

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

ІСТОРІЯ-АНЕКДОТИ

ІСТОРІЯ

а ЄАРЛІКІВІ БІЛЬШІСТЬ БЫЛО ВІДБУТОВО 1995 р. ЛІЧИТЬСЯ 6 АВІОКАПІТАНІВ

КИЇВ

АВГУСТ 7, 4, 2001

KYIV

Спеціальний випуск журналу присвячено проблемам підготовки радіонавігаційного плану України та перспективам широкомасштабного використання в Україні супутниковых навігаційних систем.

Випуск підготовлено за активної участі Державного підприємства Науково-дослідний інститут «Квант—Навігація» Мінпромполітики України.

Редактор випуску — доктор технічних наук А. А. КОШОВИЙ

КИЇВ 2001

ЗМІСТ

- Кошевої А. А. Общегосударственная политика по разработке Радионавигационного плана Украины
- Верещак А. П., Кот П. А., Козлов В. А., Махонин Е. И., Волох К. Ф. Система космического навигационно-временного обеспечения Украины: состояние и перспективы
- Бабак В. П., Скалько Я. И., Харченко В. П. Основные направления внедрения спутниковых технологий для повышения эффективности движения воздушного транспорта в Украине
- Козлов В. А., Лук'яннов А. М., Ноздрин И. Г. Технические предпосылки расширения зоны действия EGNOS на террито-рию Украины
- Загоруйко В. В., Конин В. В. Обеспечение точных заходов на посадку методами спутниковой навигации
- Кошевої А. А. Перспективы развития морской навигации в Украине с использованием радионавигационных технологий в рамках Европейского сотрудничества
- Збруцький О. В., Нестеренко О. І., Прохорчук О. В. Інтегро-вана система визначення координат і курсу судна для підви-щення безпеки судноплавства
- Збруцький О. В., Гогун Ю. В. Навігація наземного об'єкта за допомогою інтегрованої навігаційної системи
- Макаренко Б. І., Горб А. І. Применение технологий гло-бальных спутниковых навигационных систем на наземном транспорте
- Черемшинський М. Д. GPS-технології в геодезичній практиці. Досвід та перспективи розвитку
- Горб А. І., Криволапов О. А. Опыт использования GPS-тех-нологий в землеустройстве
- Сидоренко Г. С., Соловьев В. С., Ткачук О. О., Клей-ман О. С. Використання сигналів супутникових радіонаві-гаційних систем для порівняння шкал часу
- Хода О. О. Створення та функціонування мережі перманен-тних GPS-станцій в Україні
- Семиволос С. П., Козлов В. А., Малафеев Е. Е. Контрольно-корректирующая станция регионального пункта СКНОУ
- Михайлов В. С. Исследование зоны действия контрольно-корректирующей станции радионавигационной системы на внутренних водных путях
- Макаренко Б. И., Наумова Е. Э. Высокоточная синхрониза-ция шкал времени при использовании двойной дифференци-альной коррекции псевдодальностей в аппаратуре потребите-лей глобальных навигационных спутниковых систем
- Клейман А. С., Левенберг А. И., Соловьев А. В., Соловьев В. С., Родионов В. Е., Таламанов С. А., Макаренко Б. И., Романько В. Н., Кравченко П. А., Усенко Т. А. Применение рубидиевого стандарта частоты и времени в системе коорди-натно-временного обеспечения при использовании GPS-тех-нологий

CONTENTS

- 5 Koshovyi A. A. All-state policy of Ukrainian radio-navigation plan development
- 12 Vereschak A. P., Kot P. A., Kozlov V. A., Makhonin E. I., Volokh K. F. Ukrainian Space navigation-time ensuring system: State and prospects
- 17 Babak V. P., Skal'ko Ya. I., Kharchenko V. P. Main directions of satellite technologies implementation to increase the effectiveness of Ukrainian air transport motion
- 22 Kozlov V. A., Luk'ianov A. M., Nozdrin I. G. Technical premises of area expansion of European geostationary navigation overlay service action zone on Ukrainian region
- 25 Zagoruiko V. V., Konin V. V. Ensuring precision approaches using the satellite navigation systems
- 31 Koshovyi A. A. Prospects for Ukrainian naval navigation development using radio-navigational technologies within the range of European cooperation
- 38 Zbruts'kyi O. V., Nesterenko O. I., Prokhorchuk O. V. Integrated system for vessel coordinates and heading determination for improvement of accident prevention of shipping
- 45 Zbruts'kyi O. V., Gogun Yu. V. Ground object navigation using integrated navigation system
- 51 Makarenko B. I., Gorb A. I. Implementation of GPS technologies on ground transportations
- 61 Cheremshyns'kyi M. D. GPS-technology in geodetic practice. Experience and perspectives of development
- 70 Gorb A. I., Kryvolapov O. A. Experience of Global Positional Satellite System technologies application for land management
- 77 Sydorenko G. S., Solovyov V. S., Tkachuk A. A., Kleyman O. S. Using signals of satellite radio navigation systems for comparison of time scales
- 83 Khoda O. O. Ukrainian permanent GPS network: creation and operation
- 87 Semivолос С. П., Козлов В. О., Малафеев Е. Е. Control-corrected station of regional point of space navigational maintenance of Ukraine
- 89 Mykhailov V. S. Exploration of action zone in inland waterways for monitoring and correcting station of radio-navigation system
- 94 Makarenko B. I., Naumova E. E. Time scales high-precision synchronization for use of pseudoranges double differential correction in users apparatus of GPS
- 101 Kleiman O. S., Levenberg A. I., Soloviov O. V., Soloviov V. S., Rodionov V. E., Talamanov S. A., Makarenko B. I., Roman'ko V. H., Kravchenko P. O., Usenko T. O. Applying of rubidium standard of frequency and time in coordinate-time ensuring system using GPS technology

- Макаренко Б. И., Кулишенко В. Ф., Петров А. Ф., Волох К. Ф., Жуков Е. Т.** Система синхронизации и единого времени наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами Украины
- Ефимов С. К., Нестерович А. Г., Яковченко А. И.** Аппаратура спутниковой навигации КА «Січ-1М» и «Микроспутник»
- Болотин С. Л.** Центр обработки РСДБ-наблюдений в Главной астрономической обсерватории НАН Украины
- Романько В. М., Хомяков Е. М., Черепков С. Т.** Розвиток системи метрологічного забезпечення радіонавігаційних полів супутниковых систем
- Скорик Е. Т., Крюков А. В.** Адаптивная компенсация помех в спутниковых радионавигационных системах
- Іщенко В. І., Зімчук І. В.** Синтез адаптивних алгоритмів оцінювання в умовах нестационарної параметричної невизначеності
- П'ясковський Д. В., Ковбасюк С. В., Шестаков В. І.** Визначення параметрів руху КА системою допплерівських вимірювачів
- П'ясковський Д. В., Водоп'ян С. В., Варламов І. Д.** Адаптивний кореляційно-екстремальний алгоритм навігації космічного апарату по геофізичних полях на основі диференціально-тейлорівських перетворень
- Баранов Г. Л., Баранов В. Л., Ковбасюк С. В.** Статистические характеристики дифференциального спектра траектории движения КА
- Баранов Г. Л., Пясковский Д. В., Ковбасюк С. В.** Объединение информации в МП РЛК с использованием дифференциального спектра траектории движения КА
- Скорик Е. Т.** Альтернативные применения сигналов спутниковых радионавигационных систем
- Прокопов А. В.** Методы учета влияния земной атмосферы в космической геодезии и навигации
- 107** *Makarenko B. I., Kulishenko V. F., Petrov A. F., Volokh K. F., Zhukov E. T. System of synchronization and common time for ground automated complex of control by Ukrainian spacecraf*
- 114** *Efimov S. K., Nesterovych A. G., Yakovchenko A. I. Satellite navigation equipment of «Sich-1M» and «Microsputnik» spacecraf*
- 117** *Bolotin S. L. VLBI data analysis center at the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine*
- 122** *Roman'ko V. M., Khomyakov E. M., Cherepkov S. T. Development system of metrological maintenance for radio-navigation fields of satellite systems*
- 126** *Skoryk E. T., Kriukov A. V. Adaptive disturbance compensation for satellite radio-navigation systems*
- 133** *Ischenko V. I., Zimchuk I. V. Synthesis of adaptive estimate algorithms under conditions of instability parametric vagueness*
- 137** *Piaskovs'kyi D. V., Kovbasiuk S. V., Shestakov V. I. Determination of spacecraft motion parameters by Doppler gauges system*
- 141** *Piaskovs'kyi D. V., Vodop'yan S. V., Varlamov I. D. Adaptive correlative-extreme algorithm of spacecraft navigation on geophysical fields using differential Taylor transformations*
- 147** *Baranov G. L., Baranov V. L., Kovbasiuk S. V. Statistical characteristics of differential spectrum of spasecraft trajectory*
- 154** *Baranov G. L., Piaskovs'kyi D. V., Kovbasiuk S. V. Unification of information in multiposition radar complex by using differential spectrum of spacecraft trajectory*
- 159** *Skoryk E. T. Alternative to use the signals of satellite radio-navigation systems*
- 163** *Prokopov A. V. Methods of allowing for Earth's atmosphere influence in space geodesy and navigation*
- 169** OUR AUTHORS

НАШІ АВТОРИ

OUR AUTHORS

№ замовлення 378 Підп. до друку 20.09.01. Формат 84×108/16. Папір офс. № 1. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 18.06. Обл.-вид. арк. 17.5 Тираж 500 екз.

Друкарня МКП «Компанія Вайте», 01042, Київ, вул. Патріса Лумумби 7

УДК 629.7:621.396

А. А. Кошевої

Міжгалузева комісія при Кабінеті Міністрів України

Общегосударственная по разработке Радионавигационного плана политика Украины

Представлено матеріали розробки Радіонавігаційного плану (РНП) України. Приведено цілі та задачі РНП, структуру його побудови, вимоги користувачів до РНП; питання планування і перспективи розвитку і вдосконалення систем радіонавігації з урахуванням рішень і рекомендацій міжнародних організацій, що визначають і регламентують застосування радіонавігаційних систем.

ВВЕДЕНИЕ

С момента провозглашения независимости и до настоящего времени Украина не имеет общегосударственной концепции радионавигационного обеспечения. Поэтому не удивительно, что в начале 1990-х гг. без должного экономического обоснования проводилась разработка микроволновой системы посадки (MLS), только в конце 1999 г. после полугодовой работы рабочей группы Межотраслевой комиссии при Кабинете Министров Украины (КМУ) постановлением КМУ была принята международная система координат WGS-84 в Украине.

В соответствии с решением Межотраслевой комиссии при КМУ, возглавляемой Первым вице-премьер-министром Украины, разработка Радионавигационного плана (РНП) Украины признана приоритетной. В этом году она должна быть завершена, и постановлением КМУ РНП будет введен в практику.

Государственная политика радионавигационного обеспечения должна формироваться, исходя из необходимости создания условий получения потребителями (аэрокосмическими, морскими, речными, наземными и др.) в какой-либо точке Земли в реальном масштабе времени надежной радионавигационной информации, достаточной для решения народно-хозяйственных и оборонных задач при минимально возможных затратах.

Принципы государственной политики основываются на обеспечении безопасности движения различных видов транспорта (воздушного, морского,

речного, наземного), решения задач геодезии, картографии, кадастра, пространственного и временно-го измерений.

В последнее десятилетие наряду с традиционными методами навигации все шире используется спутниковая радионавигация, обеспечивающая глобальную рабочую зону, высокую точность, независимую от погодных условий, а также высокий уровень доступности и целостности. Кроме того, спутниковая радионавигация обеспечивает возможность создания всемирного стандарта по определению местоположения, навигации и временной привязки практически для всех случаев применения.

На данный момент времени РНП имеет большинство передовых стран мира (США, Англия, Франция, Германия, Швеция, Норвегия, Италия, Финляндия и др.), а также страны СНГ. Здесь приводятся основные аспекты построения Радионавигационного плана Украины.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РНП УКРАИНЫ

РНП Украины является документом, ориентирующим всех навигационных потребителей на возможность использования существующих и перспективных радионавигационных систем в Украине. РНП Украины служит координирующим инструментом для согласования работы радионавигационных систем (РНС), находящихся под контролем различных организаций. РНП Украины должен быть составной частью Европейского РНП (ERNP), разрабатывае-

мого Европейской комиссией, что позволит отстаивать интересы украинских пользователей РНС в международном сообществе.

Задачей РНП Украины является предоставление потребителям информации о состоянии, технических возможностях, планах развития, сроках использования РНС, а также о направлениях международного сотрудничества в области радионавигации.

СТРУКТУРА ПОСТРОЕНИЯ РНП УКРАИНЫ

Структура РНП включает:

- требования потребителей к РНС;
- общую характеристику существующих и разрабатываемых РНС;
- основные направления повышения эффективности использования существующих РНС, их раз-

- вития и совершенствования;
- основные направления международного сотрудничества в области радионавигации;
- основные направления реализации РНП.

ТРЕБОВАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ К РНС

К основным требованиям потребителей к РНС относятся:

- требования к размеру рабочей зоны;
- требования к точности определения местоположения объектов;
- требования к доступности РНС;
- требования к целостности РНС;
- требования к непрерывности обслуживания (функционирования) РНС;
- требования к дискретности определения местоположения;

Таблица 1. Основные обобщенные требования потребителей к навигационному обеспечению

Потребители	Решаемые задачи	Рабочая зона	Погрешность (СКП), м	Доступность	Целостность (за время в секундах)
ВОЗДУШНЫЕ	Полеты по маршруту	Глобальная Региональная	250—5800	0.999	0.999 (10)
	Полеты в зоне аэродрома	Район аэродрома	200	0.9999	0.9999 (10)
	Некатегорированный заход на посадку	Район аэродрома	200	0.99999	0.9999 (10)
	Заход и посадка по категориям: I II III	Зона посадки	4.5—8.5 / 1.5—2.0 (боковая/вертикальная) 2.3—2.6 / 0.7—0.85 2.0 / 0.2—0.3	0.999999 0.9999999 0.9999999	0.99999 (6) 0.999999 (2) 0.999999995 (1)
	Геодезические и геофизические наблюдения	Локальная	1—10	0.999	0.999
МОРСКИЕ	Плавание в открытом море (океане)	Морская поверхность	1800—3700	0.99	0.99
	Плавание в прибрежной зоне	Прибрежные воды	10—200	0.99	0.99
	Прохождение узкостей, порты	Узкости, порты	10	0.99	0.99
	Маневрирование в портах	Акватории портов	10	0.99	0.99
	Исследовательские суда	Глобальная	1—10	0.99	0.99
РЕЧНЫЕ	Движение судов по внутренним водным путям: — свободные реки, — каналы, — расстановка знаков	Реки, каналы	5—15 3—5 0.25—3	0.999 0.999 0.99	0.99 0.99 0.9
НАЗЕМНЫЕ	Движение наземного транспорта по произвольным маршрутам	Региональная Локальная	20—100	0.99	0.95
	Движение наземного транспорта по установленным маршрутам	Региональная Локальная	20—100	0.99	0.95
	Решение специальных задач	Локальная	5—15	0.99	0.95
	Картография и геодезия, землеустройство	Глобальная Региональная	0.25—5 0.1—0.2	0.95	0.9

- требования к пропускной способности РНС.

Требования потребителей определяются задачами, решаемыми при использовании РНС. Задачи, решаемые при использовании РНС, подразделяются на следующие основные группы:

- задачи, связанные с перемещением подвижных объектов (транспортные задачи);
- задачи геодезической привязки;
- специальные задачи, в том числе военные, определяемые МО Украины.

На рис. 1 представлена структура задач, решаемых при использовании РНС.

В РНП Украины все индивидуальные требования каждой отдельной группы потребителей РНС представлены в полном объеме. В таблице представлены основные обобщенные требования потребителей к навигационному обеспечению.

Международные требования к навигационному обеспечению самолето- и кораблевождения определены в документах международных организаций ИКАО и ИМО.

Как видно из таблицы, требования различных групп потребителей значительно отличаются по точности и оперативности.

Отметим, что для решения прикладных задач геодезии измерения выполняются относительно пунктов опорной геодезической сети с использованием способов относительных определений. Выход на сантиметровый уровень точности астрономо-геодезических сетей к 2001–2002 гг. и на миллиметровый уровень к 2010 г. является одним из основных условий обеспечения решения задач геодинамики.

ПЛАНИРОВАНИЕ СИСТЕМ РАДИОНАВИГАЦИИ

Для принятия решений о работе существующих систем и введении новых РНС необходимо детальное рассмотрение (ных требований потребителей, международных требований и обязательств, организационных и экономических аспектов. При принятии решений следует учитывать существующую инфраструктуру и тенденции развития РНС.

Выбор решения целесообразно осуществлять на основе требований ближайшего, среднесрочного и долгосрочного планирования. Целью ближайшего и среднего планирования является рассмотрение и непрерывный мониторинг работы системы с точки зрения ее соответствия требованиям, и если необходимо, адаптации системы.

Существующие и разрабатываемые РНС по расположению средств, формированию радионавигационных полей делятся на:

- космические (спутниковые);

- наземные (стационарные и мобильные).

Классификация используемых РНС приведена на рис. 2.

Низкоорбитальная космическая навигационная система (КНС) «Цикада М» обеспечивает определение координат в Мировом океане со средней квадратичной погрешностью 80 м и дискретностью обсерваций 10–55 мин. КНС «Цикада» дополняет КНС «Цикада М», их совместное использование обеспечивает сокращение дискретности обсерваций до 30 мин на экваторе. Указанные КНС разрабатывались по заказу ВМС СССР.

Среднеорбитальные КНС четвертого поколения GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия) позволяют определять местоположение с высокой точностью (плановых координат — с погрешностью 15–20 м, высоты — до 25 м), составляющих вектора скорости (0.05 м/с) и времени (0.03 μ с). Обе системы находятся под контролем военных ведомств.

На смену системе ГЛОНАСС разрабатывается КНС «ГЛОНАСС-М» с более высокими техническими характеристиками.

Европейским сообществом планируется к вводу в эксплуатацию в 2004 г. гражданской КНС пятого поколения GALILEO, что позволит, на основе интеграции с ныне действующими КНС, повысить доступность и целостность КНС.

Наземные РНС по дальности действия делятся на:

- радиотехнические системы дальней навигации;
- радиотехнические системы ближней навигации;
- системы наблюдения;
- системы посадки.

В эксплуатации находятся следующие системы дальней навигации, разработанные по заказу Минобороны бывшего СССР:

- разностно-дальномерные импульсно-фазовые системы «Тропик-2» («Чайка») (стационарная), «Тропик-2М» (мобильная); системы обеспечивают определение плановых координат с точностью (СКП) 120–500 м, предназначены для самолетовождения, кораблевождения, управления движением наземного транспорта;
- разностно-дальномерная, многочастотная, фазовая РНС «Марс-75» (мобильная) обеспечивает точность определения места 60–350 м, предназначена для кораблевождения, гидро-графических и специальных работ.

К системам ближней навигации, которые сегодня используются, относятся:

- дальномерно-угломерная система РСБН-4Н, обеспечивает дальность до 400 км, точность

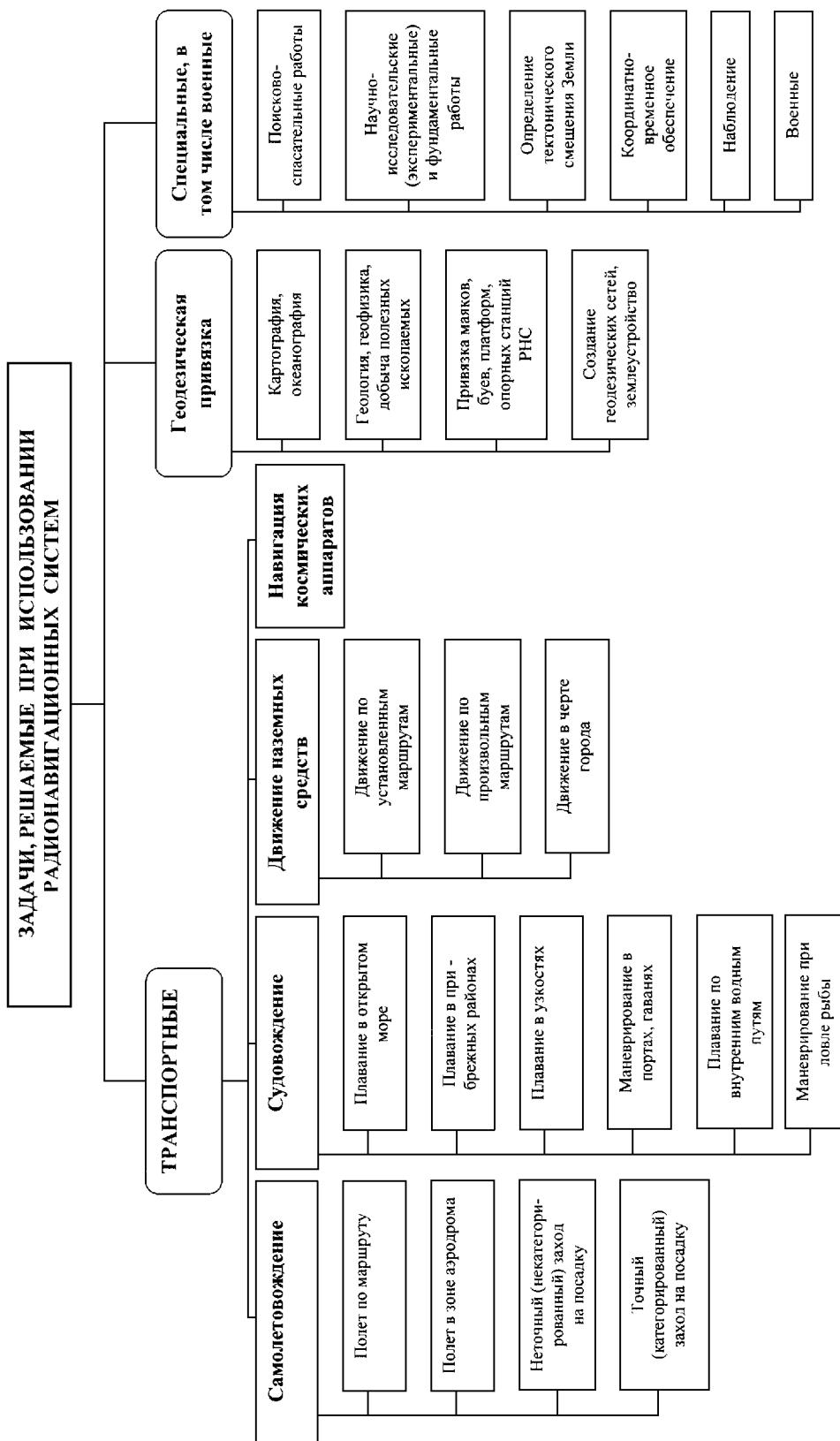


Рис. 1. Структура задач, решаемых при использовании РНС

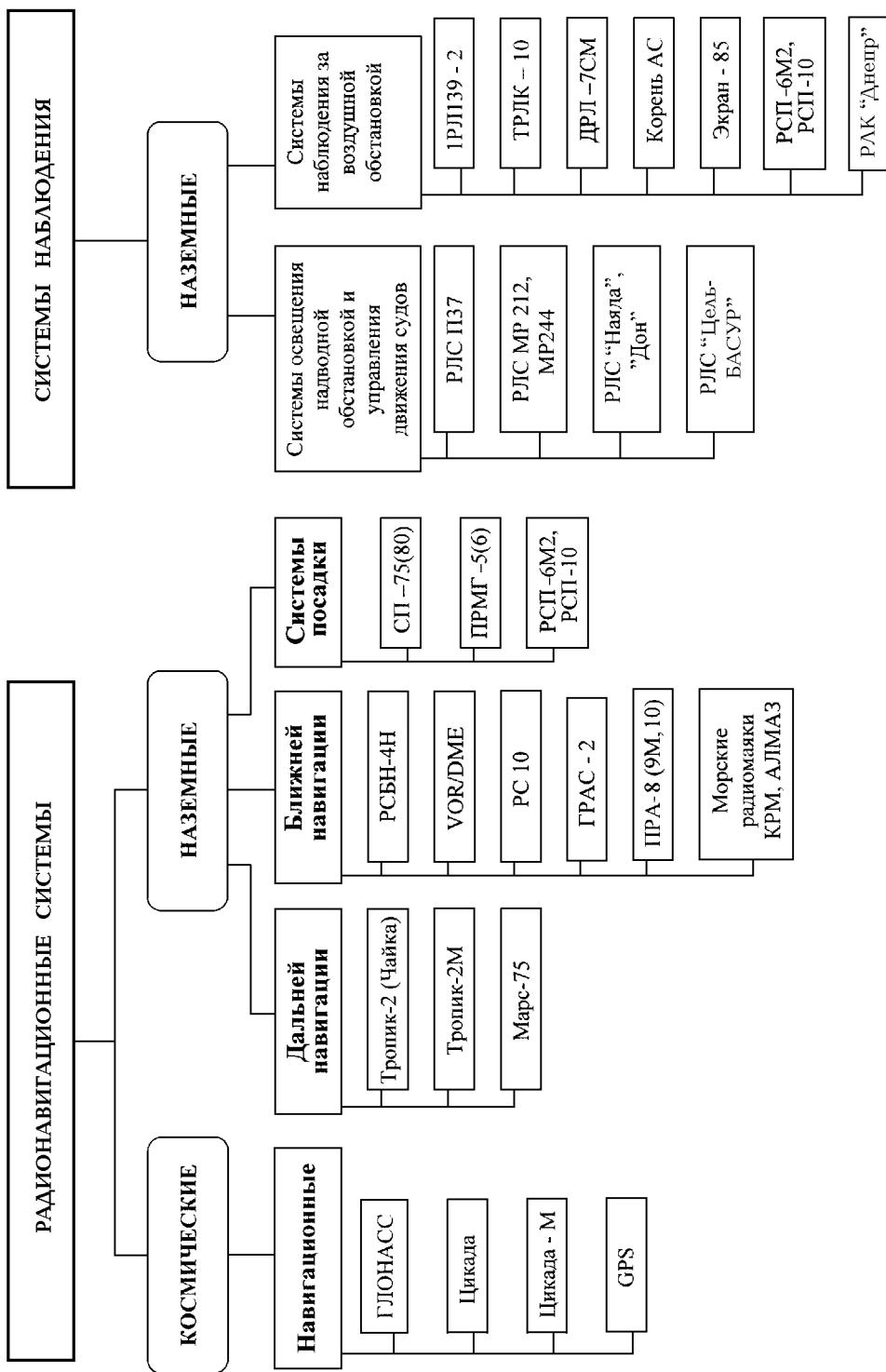


Рис. 2. Классификация используемых РНС

определения дальности 100—250 м, точность азимута не хуже 0.5°; предназначена для обеспечения самолетовождения и некатерийного захода на посадку, планируется ее использование военными потребителями до 2003 г. включительно;

- азимутально-дальномерная система VOR/DME обеспечивает дальность действия до 360 км, точность около 500 м, предназначена для обеспечения самолетовождения на международных воздушных трассах;
- разностно-дальномерная РНС РС-10, аналог РНС «Жеолок» (Франция) и «Хайперфикс» (Великобритания), обеспечивает дальность действия до 250 км, точность определения места 3.6 м, предназначена для решения специальных задач морских потребителей;
- дальномерная мобильная РНС «Грас-2» (двухканальный радиодальномер), аналог РНС «Сидес» (Франция), обеспечивает дальность действия 60 км, точность определения места 0.5—1.5 м, предназначена для решения задач гидрографии и других специальных задач;
- приводные радиостанции АРП-7 (8), ПАР-8 (9М, 10), обеспечивают дальность действия до 300 км;
- морские радиомаяки КРМ «Алмаз», обеспечивают дальность действия 300 км, точность — 3°.

Системы наблюдения делятся на:

- системы наблюдения за воздушной обстановкой;
- системы освещения надводной обстановки (СОНО) и управления движением судов (СУДС).

Системы наблюдения за воздушной обстановкой включают:

- трассовые первичные обзорные РЛС: 1РЛ139-2, ТРЛК-10 (первичный канал), обеспечивающие дальность действия до 350 км;
- аэродромные первичные обзорные РЛС: АТСР-44, ДРЛ-7СМ, «Экран-85» (первичный канал), обеспечивающие дальность действия 120—180 км;
- трассовые вторичные обзорные РЛС: «Корень АС», ТРЛК-10 (вторичный канал), обеспечивающие дальность до 350 км;
- аэродромные вторичные обзорные РЛС, входящие как вторичный канал в состав ДРЛ-7СМ, «Экран-85», «Корень-АС»;
- радиолокационные системы РСП-6М2, РСП-10.

С 2003 г. планируется использовать РЛК «Днепр».

СОНО и СУДС оснащены в основном РЛС типа 1РЛ139 (дальность действия до 350 км), МР-10, МР212/201, МР-244, «Наяда», «Дон», «Океан-СП» (дальность действия до 40—50 км); планируется

использовать РЛС «Цель-БАСУР».

В состав технических средств СОНО и УДС могут входить наряду с береговыми РЛС локальные контрольно-корректирующие станции (ККС) СНС.

Воздушными потребителями используются следующие системы посадки:

- радиомаячные системы посадки СП-75(80), ПРМГ-5(6) (для военных воздушных потребителей);
- радиолокационные системы РСП-6М2, РСП-10.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ РАДИОНАВИГАЦИИ

Анализ обеспечения требований различных групп потребителей существующими радионавигационными средствами определяет направления решения основных проблем:

- повышения точности определения местоположения объекта;
- повышения доступности РНС;
- повышения целостности РНС;
- повышения непрерывности функционирования (надежности).

Решение этих проблем осуществляется:

- применением дифференциальных подсистем (режимов) и средств контроля целостности;
- созданием объединенной международной цепи РНС «Чайка» и «Лоран-С» в Черноморско-Средиземноморском регионе;
- созданием единой системы освещения надводной обстановки, контроля и управления движением судов и кораблей в Азово-Черноморском бассейне на базе трех ведомственных систем Минтранса, Минобороны и Госкомграницы Украины с единым информационным полем;
- созданием объединенной гражданско-военной системы аэронавигационного обеспечения;
- созданием единого радиолокационного поля освещения воздушной обстановки;
- интегрированием различных РНС и использованием единого радионавигационного поля;
- внедрением автоматических идентификационных систем (AIS) и систем зависимого наблюдения (ADS);
- улучшением технических характеристик РНС и приемоиндикаторов аппаратуры потребителей.

В соответствии с Концепцией создания дифференциальной подсистемы (ДПС) Украины [1], подготовленной НКАУ и согласованной с центральными органами исполнительной власти, планируется создание региональных (с рабочей зоной покрытия от 500 до 2000 км) и локальных (от 50 до 150 км)

ДПС и использование широкозонной ДПС EGNOS при установке широкозонных контрольных станций (RIMS) на территории Украины, что позволит определять местоположение объектов с точностью 1—5 м. С целью оптимизации состава ККС региональных ДПС предусматривается создание в рамках СНГ единой сети ККС Азово-Черноморского бассейна на базе морских радиомаяков, сети ККС для международных транспортных коридоров, использование радионавигационного канала РНС «Чайка», «Лоран-С» для передачи дифференциальных поправок [2].

Внедрение AIS и ADS как дополнений к системам освещения надводной и воздушной обстановки планируется в соответствии с программами «Безопасность мореплавания» и «Создание систем CNS/ATM в Украине», разрабатываемыми Минтрансом Украины.

Концепция развития РНС предусматривает создание системы единого радионавигационного поля (ЕРНП). Оно представляет собой совокупность радионавигационных полей систем космического и наземного базирования, которые имеют единую координатно-временную основу и согласованную структуру широкополосных навигационных систем, несущие радиочастоты которых разнесены по диапазону. Создание ЕРНП позволит обеспечить повышение точности и целостности координатно-временных определений и доступности РНС.

Совместная обработка навигационных параметров на уровне измерений трех радионавигационных сигналов (один спутник и две наземные станции, два спутника и одна наземная станция и т.д.) повысит надежность навигационных определений. Избыточность навигационных измерений в ЕРНП позволит также осуществить контроль качества РНС в реальном масштабе времени.

При создании ЕРНП требуется решение как организационных, так и технических проблем, основные из них следующие:

- повышение точности определения координат места с помощью дифференциальных подсистем и специальных методов обработки сигналов (работа по фазе несущей радионавигационных сигналов, использование сигналов РНС «Лоран-С», «Чайка» в квазидальномерном режиме, относительные определения на ограниченных базах и т. д.);
- обеспечение синхронизации наземных станций с помощью СНС с ошибкой до 10—15 нс, что позволит вести обработку информации на уровне измерений радионавигационных параметров каких-либо систем;
- переход к использованию псевдошумового сигна-

ла в СЧ и НЧ РНС;

— создание единого приемоиндикатора модульного типа с единым цифровым устройством обработки радионавигационных сигналов.

Естественно, РНП Украины является составной частью РНП Европы и СНГ, поэтому развитие его возможно только при согласованности РНП Украины с радионавигационными программами СНГ и Европейского сообщества.

Использование РНП позволит обеспечить выполнение возрастающих требований к навигационному обеспечению основных групп потребителей, а также повысить вероятность непрерывного навигационного обеспечения.

В 2004—2006 гг. должны быть завершены работы по внедрению СНС GALILEO, EGNOS, AIS, ADS и вхождению РНП Украины в РНП Европейского сообщества, определены пути дальнейшего международного сотрудничества в области навигационного обеспечения.

Несомненно, ежегодно работы будут уточняться по результатам реализации основных направлений РНП с учетом возможных новых решений международных организаций и технического развития.

ВЫВОДЫ

С введением РНП Украины соответствующим постановлением Кабинета Министров Украины будет осуществляться единая государственная политика по использованию существующих и планируемых РНС с учетом решений и рекомендаций международных организаций, гармонизации развития РНС в мировом сообществе.

1. Верещак А. П., Кот П. А., Козлов В. А. и др. Система космического навигационно-временного обеспечения Украины: состояние и перспективы // Космічна наука і технологія. — 2001. — 7, № 4.— С. 12—16.
2. Offermaus A. W. S. Helwig, D. Van. Willigen. Eurofix System and its Developments, Int. Conf. of RIN, London, 1998.

ALL-STATE POLICY OF UKRAINIAN RADIO-NAVIGATION PLAN DEVELOPMENT

A. A. Koshovyi

The materials of Ukrainian radio-navigation plan (RNP) development are presented. RNP aims and tasks, the frame of its construction, users demands to RNP are listed. The planning and prospects of development and improvement of the radio-navigation systems using the resolutions and recommendations of international organizations, defined and regulated the use of the navigation systems are considered.

УДК 621.396

А. П. Верещак¹, П. А. Кот¹, В. А. Козлов¹,
Е. И. Махонин², К. Ф. Волох²

¹АТ Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

²Національне космічне агентство України, Київ

Система космического обеспечения Украины: состояние и перспективы навигационно-временного

Розглядається стан робіт з проектування і створення системи космічного навігаційно-часового забезпечення України (СКНЗУ). Приводяться основні елементи архітектури системи і топологія розміщення наземного сегменту. Обґрутується доцільність інтеграції наземного сегменту до складу системи EGNOS.

ВВЕДЕНИЕ

Начало работ по созданию системы космического навигационного обеспечения Украины (СКНОУ) было положено п. 3 Указа Президента Украины № 202/97 от 04.03.97 г. «Про заходи щодо дальшого розвитку космічних технологій», где Национальному космическому агентству Украины (НКАУ) поставлена задача обеспечить, начиная с 1997 года, внедрение спутниковых технологий для «...создания и поддержки целостности государственного навигационного поля и системы единого времени». Во исполнение этого Указа в 1997 г. АО НИИ радиотехнических измерений (АО НИИРИ) поручено выполнение НИР «Навигация», в результате которой была выполнена предварительная проработка структуры системы и рассмотрены возможные пути реализации, а также подготовлено тактико-техническое задание (ТТЗ) на ее создание.

Работы по созданию СКНОУ были включены в Национальную космическую программу Украины на 1998—2002 гг., и в соответствии с Государственным контрактом № 3.3.3-98 от 30.03.98 г., заключенным между НКАУ и АО НИИРИ, начата и проводится до настоящего времени опытно-конструкторская работа «Система космического навигационно-временного обеспечения Украины» (шифр «Навигация»).

В разработке системы кроме АО НИИРИ участвуют: НИИ «Квант-Навигация» (Киев), НПП «Хартрон-Альфа» (Харьков), ГП «Днепрокосмос» (Днепропетровск), НИИ НФПП (Киев).

Актуальность работы по созданию СКНОУ под-

тверждается как мировыми тенденциями в области развития и применения спутниковых навигационных технологий, так и внутренними потребностями Украины, что нашло отражение в одном из последних Указов Президента Украины № 30/2001 от 22.01.2001 г. «Про поліпшення інформаційного забезпечення на автомобільних дорогах України».

ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ, НАЗНАЧЕНИЕ И АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

Основной целью создания СКНОУ является организация на территории Украины навигационно-временного обеспечения, которое бы удовлетворяло требования потребителей навигационной информации на всей территории Украины, в национальном воздушном пространстве, в акваториях прилегающих морей с требуемыми характеристиками по точности, надежности, доступности, обеспечивая при этом совместимость с международными системами навигационного обслуживания.

СКНОУ предназначена для:

- ведения непрерывного (с целью контроля целостности) мониторинга навигационных полей, создаваемых космическими навигационными системами GPS (США), ГЛОНАСС (РФ);
- формирования дифференциальной корректирующей информации (ДКИ) для уточнения этих полей, включая формирование информации об их целостности;
- распространения ДКИ средствами единой системы спутниковой передачи информации

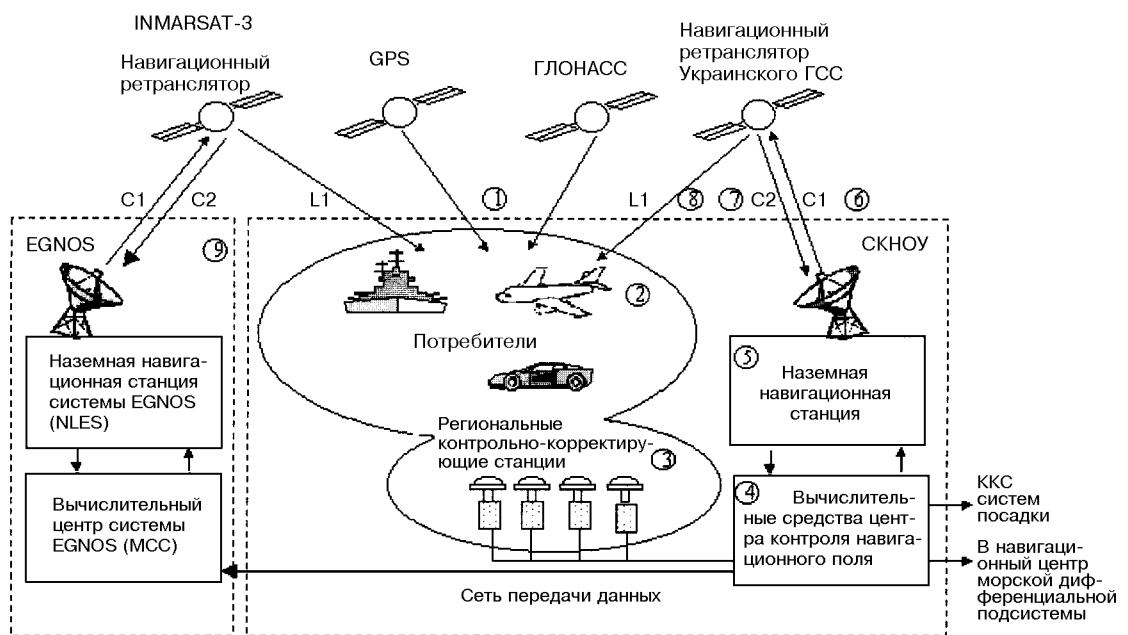


Рис. 1. Архитектура СКНОУ

(ЕССПИ) на территорию Украины и на прилегающие территории.

Создаваемая СКНОУ относится к так называемым улучшающим системам и подобна европейской системе EGNOS, разработка которой ведется под эгидой Европейской трехсторонней группы (Европейского космического агентства, Европейского Союза, Евроконтроля).

СКНОУ спроектирована и строится таким образом, чтобы обеспечивалась ее совместимость с системой EGNOS. В частности архитектура СКНОУ предусматривает возможность передачи измерительной информации и данных о состоянии ионосфера в один из центров управления системы EGNOS.

В процессе реализации СКНОУ должны быть созданы:

- сеть из 10—12 региональных пунктов контроля навигационного поля (РПКНП), на которых будут установлены высокоточные контрольно-корректирующие станции (ККС);
- центр контроля навигационного поля (ЦКНП), где должна в реальном времени выполняться обработка информации из сети РПКНП;
- наземная навигационная станция, обеспечивающая работу бортового ретранслятора геостационарного спутника связи (ГСС);
- сеть передачи данных.

Архитектура СКНОУ обеспечивает поддержку трех основных режимов функционирования:

1) осуществляет передачу навигационных сигналов, аналогичных по структуре GPS. Эти сигналы содержат в своем составе навигационное сообщение ГСС и дальномерные коды, синхронизированные с системным временем GPS;

2) обеспечивает контроль целостности навигационных полей и не более чем за 10 с сообщает пользователям сведения о качестве навигационного поля, что позволяет пользователю принимать соответствующие решения в критических режимах навигации;

3) обеспечивает формирование и трансляцию потребителям широкозонных дифференциальных поправок. Эти поправки повысят точность местоопределения до величины 3—5 м в зависимости от условий формирования поправок.

В целом архитектура системы может быть представлена в виде, показанном на рис. 1. Ожидаемые точностные характеристики СКНОУ приведены в таблице.

Система функционирует следующим образом.

Навигационные сигналы (1) передаются со спутников GPS и ГЛОНАСС и принимаются потребителями (2). Эти сигналы также принимаются наземными контрольно-корректирующими станциями (3) и по сети передачи данных поступают в центр

Технические характеристики СКНО Украины

Вариант работы СКНО	Используемые КНС	Способ передачи сообщений	Уровень контроля целостности и достоверности информации (оперативность контроля)	Точность 2σ по координатам / по скорости	Рабочая зона обслуживания	Доступность (вероятность безотказной работы)
1. Широкозонная дифференциальная навигация	GPS, ГЛОНАСС	Через ГСС INMARSAT-3	Контроль осуществляется на региональном уровне (до 10 с)	3—5 м 1.5—2.5 см/с	Региональная (2—3 тыс. км)	0.999
		По специальным каналам связи	Контроль осуществляется на региональном уровне (до 3 с)	—		
2. ДКИ локальной ККС	GPS, ГЛОНАСС	По специальным каналам связи	Контроль осуществляется на региональном уровне (до 2 с)	2.7—5 м 1.5—3.5 см/с	Локальная (0—180 км)	0.999
3. Режим RTK	GPS, ГЛОНАСС	По специальным каналам связи	Контроль осуществляется на региональном уровне (до 2 с)	5—10 см —	Локальная (0—10 км)	0.997

контроля навигационного поля (ЦКНП) (4). В вычислительном центре ЦКНП навигационные сигналы обрабатываются с целью формирования широкозонной ДКИ. Широкозонная ДКИ с помощью наземной навигационной станции (5) передаются на частоте C1 (6) на навигационный ретранслятор национального ГСС, а затем переизлучается потребителям на частоте L1 (8). Идентичный сигнал передается на частоте C2 (7).

ЦКНП при необходимости может передавать навигационную информацию и информацию о параметрах ионосфера, полученную с помощью национальной сети ККС, в вычислительный центр системы EGNOS (9).

Система обеспечивает возможность приема измерительной информации от локальных ККС систем категорированной инструментальной посадки самолетов и сети ККС Азово-Черноморского бассейна.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ДОСТИГНУТЫЕ НА КОНЕЦ 2000 Г.

К основным результатам работы по проектированию СКНОУ следует отнести:

- завершение работ над эскизным проектом системы;
- разработку концепции создания и эксплуатации системы на период 2000—2005 гг.;
- разработку плана организационно-технических мероприятий по развертыванию системы на 2000—2004 гг.

В результате проектирования (Система космического навигационного обеспечения и единого времени: Пояснительная записка эскизного проекта по

теме «Навигация». — АО НИИРИ, 2000) определена топология размещения технических средств наземного сегмента системы, необходимого для формирования широкозонной ДКИ (см. рис. I на цветной вклейке).

Определен состав функций и функциональных подсистем для всех элементов наземного сегмента системы, в том числе:

- центра контроля навигационного поля;
- контрольно-корректирующих станций;
- наземной навигационной станции;
- сети передачи данных.

Определена структура и требования к навигационному ретранслятору ГСС.

Особое внимание при проектировании было уделено той части системы, которая обеспечивает совместное функционирование наземной навигационной станции и навигационного ретранслятора ГСС. Эта часть системы является наиболее сложной и дорогостоящей в реализации, так как должна осуществлять формирование и передачу пользователям с помощью бортового ретранслятора ГСС навигационных сообщений в структурах, принятых в системах EGNOS и WAAS.

В этом плане наземный комплекс должен обеспечивать выполнение четырех основных функций (EGNOS AOC. Требования к системе. — Европейское космическое агентство, проектное бюро GNSS-1, 1998):

- 1) определение параметров орбиты ГСС;
- 2) синхронизацию времени ГСС с временем GPS;
- 3) генерирование навигационного сигнала, предназначенного для передачи на ретранслятор ГСС;
- 4) передачу навигационного сигнала на ГСС, управляя при этом когерентностью компонентов

сигнала (код / несущая), и привязку внутреннего времени системы к системному времени GPS с учетом влияния петли обратной связи между навигационной станцией и ГСС (Земля—ГСС—Земля).

Вместе с тем к концу 2000 г. стала очевидным невозможность реализации системы в полном объеме в приемлемые сроки. Причиной этого является приостановка работ по созданию украинского ГСС.

В сложившейся ситуации была разработана «Концепция создания и эксплуатации системы навигационно-временного обеспечения Украины на период 2000—2004 гг.», которая предусматривает поэтапное создание системы.

Учитывая то, что развертывание системы космического навигационного обеспечения Украины находится на начальном этапе, наиболее технически целесообразным и относительно дешевым проектом является реализация первого этапа — интеграция части наземного сегмента СКНОУ в состав системы EGNOS путем создания на территории Украины ее «восточной ветви», по примеру Норвегии, где создана и функционирует «северная ветвь» системы с центром в г. Хенефосс (EGNOS System Test Bed User Workshop Toulouse, 6—7 July 2000).

Этот подход позволит значительно расширить мерную базу системы EGNOS, что в свою очередь приведет к улучшению контроля целостности и уточнению дифференциальных поправок для районов Восточной и Юго-Восточной Европы, Малой Азии и Кавказа. Присоединение к существующей наземной инфраструктуре EGNOS «восточной ветви» увеличит охваченную территорию Земли с качественным навигационным обслуживанием.

Следует также отметить и то, что работы по созданию наземного и космического сегментов EGNOS, которые выполняются промышленным консорциумом под руководством французской фирмы «Alcatel» по контракту с Европейским космическим агентством (ESA), значительно продвинулись вперед. Ожидается, что первая очередь системы начнет функционировать в 2004 г. (Utilisation of the EGNOS System Test Bed by Civil Aviation. Edition 0.2. Edition date 01/07/2000).

В настоящее время развернут фрагмент системы, представляющий собой полный прототип системы EGNOS, именуемый испытательным стендом EGNOS (ESTB) (EGNOS System Test Bed User Workshop Toulouse, 6—7 July 2000).

В состав наземного сегмента ESTB входят:

- десять станций мониторинга навигационного поля (RIMS), собирающих данные от навигационных спутников;
- три вычислительных центра, расположенных в г. Хенефосс (Норвегия), г. Тулуза (Франция),

г. Фучино (Италия);

- три станции слежения за геостационарными спутниками INMARSAT-III, расположенные во Франции, Французской Гвиане (Южная Америка) и Южной Африке;
- две наземные навигационные станции (NLES), расположенные во Франции и Италии;
- наземная сеть передачи данных между элементами наземной инфраструктуры.

В первой половине 2000 г. были проведены сезансы тестирования системы и получены оценки горизонтальных и вертикальных навигационных ошибок местоположения потребителя, подтвердивших реализуемость ожидаемых характеристик EGNOS.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАСШИРЕНИЯ ЗОНЫ ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ EGNOS НА ТЕРРИТОРИЮ УКРАИНЫ

В настоящее время вопросы интеграции Украины в состав системы EGNOS лежат в двух плоскостях — политической и технической.

В политической плоскости сотрудничество Украины с ЕС в области использования глобальных спутниковых систем и наземной инфраструктуры контроля и управления получит новый импульс после подписания «Меморандума о взаимопонимании между НКАУ и Европейской Комиссией в области развития Европейской GNSS», который в сентябре 2000 г. был официально представлен делегацией Украины Европейской стороне в Брюсселе на заседании 5-го Подкомитета по вопросам транспорта, телекоммуникаций, науки и технологий.

Положения данного Меморандума были в 1998—2000 гг. предварительно изучены и обговорены с представителями Европейской трехсторонней группы в процессе ряда переговоров. В настоящее время только отсутствие решения Совета министров ЕС по началу работ, направленных на создание системы Galileo, является сдерживающим фактором подписания указанного Меморандума.

В технической плоскости никаких принципиальных затруднений, сдерживающих создание Украинского наземного сегмента и его интеграцию в состав EGNOS, нет.

В настоящее время Украина готова:

- 1) установить в трех городах (Харьков, Симферополь, Дунаевцы) контрольно-корректирующие станции отечественной разработки (АО НИИРИ, Харьков);
- 2) обеспечить сбор и передачу навигационной информации с помощью системы спутниковой связи на базе геостационарного спутника «Sirius-2» (Швеция) в любой из центров управления системы.

мы EGNOS по согласованию с ESA;

Выполнение названных выше мероприятий позволит Украине развернуть также работы в соответствии с требованиями, разработанными Европейской трехсторонней группой (ETG), по следующим направлениям (*Utilisation of the EGNOS System Test Bed by Civil Aviation. Edition 0.2. Edition date 01/07/2000*):

- привести в рабочее состояние инструментальные средства сбора и анализа навигационной информации на своей территории, т. е. обеспечить расширение географии и увеличение количества наземных контрольных станций в соответствии с рекомендациями Европейской конференции гражданской авиации (ECAC);
- обеспечить сбор статистических данных и оценку точности навигационных определений с целью накопления практического опыта работы с системой EGNOS, включая работы по анализу различных эффектов, связанных со средой распространения сигналов и влияния ионосфера;
- обеспечить проведение испытательных полетов для оценки характеристик системы на своей территории.

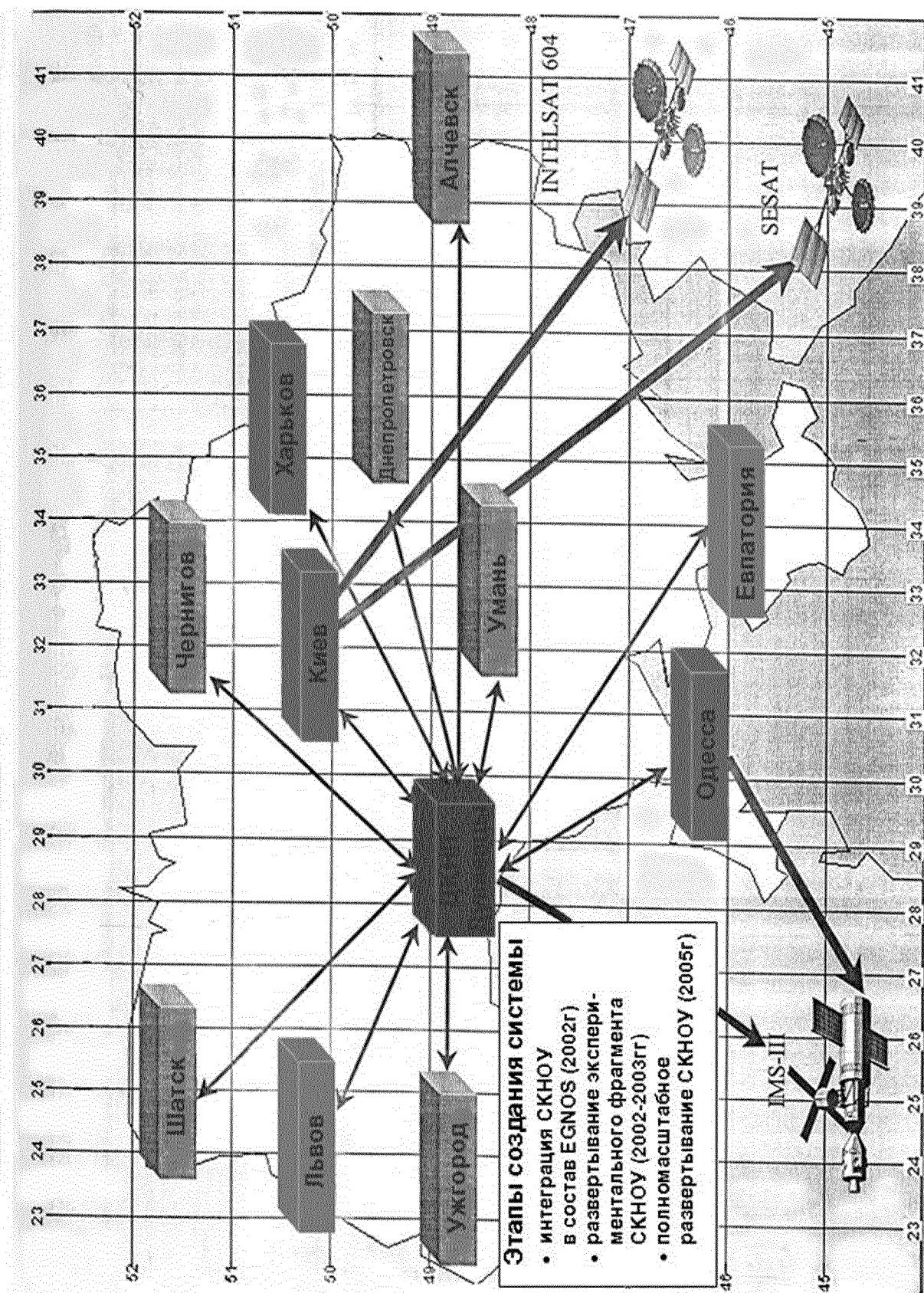
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

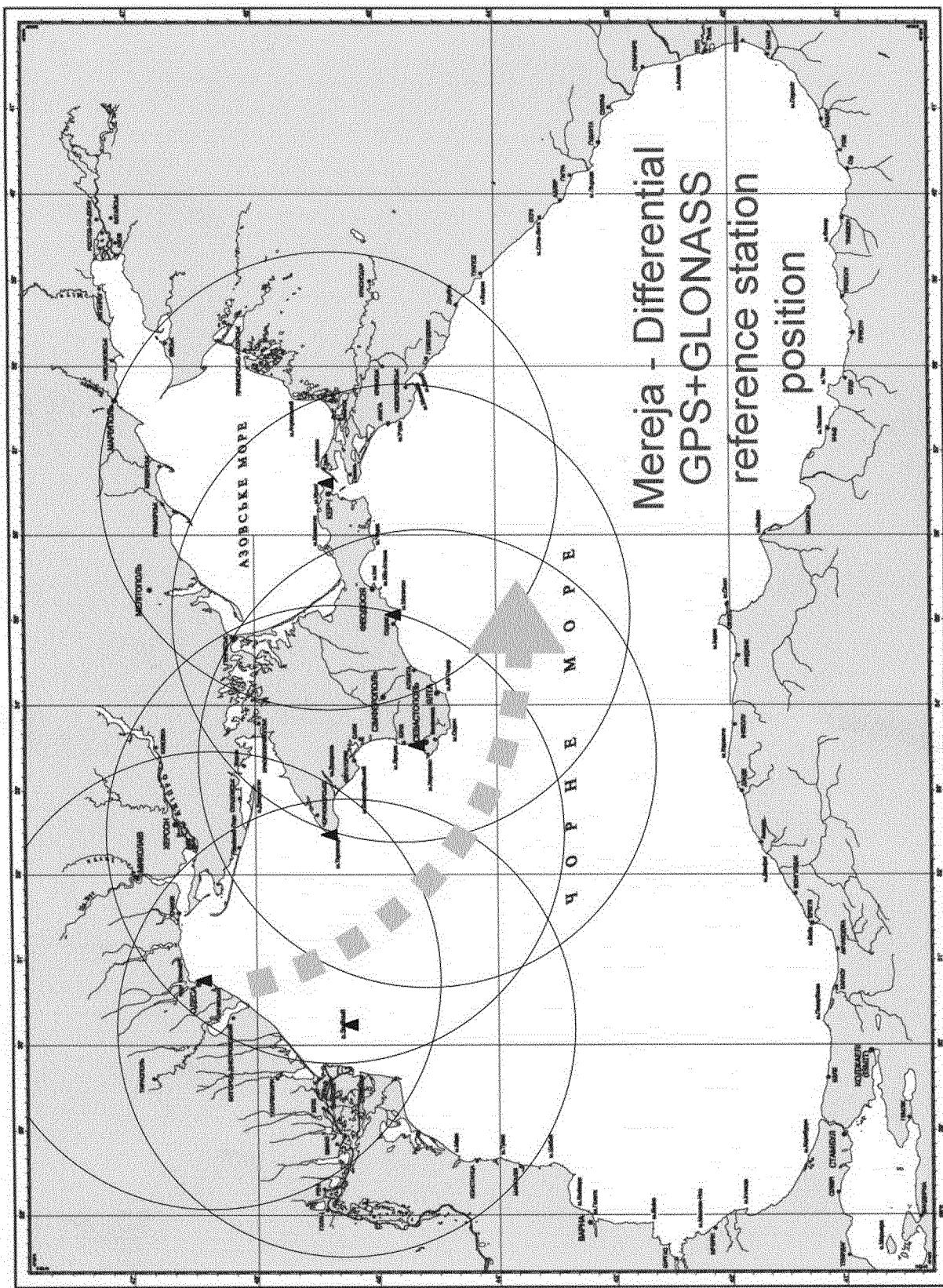
Таким образом, текущее состояние разработки и принятая концепция создания СКНОУ позволяют утверждать, что реализация системы обеспечит формирование на территории Украины навигационного поля, отвечающего требованиям ICAO. Это создаст предпосылки того, что в воздушном пространстве Украины воздушные суда будут обслуживаться с использованием технологии CNS/ATM.

UKRAINIAN SPACE NAVIGATION-TIME ENSURING SYSTEM: STATE AND PROSPECTS

A. P. Vereschak, P. A. Kot, V. A. Kozlov,
E. I. Makhonin, K. F. Volokh

The state of works in designing and creation of the Ukrainian Space Navigation — Time Ensuring System (USNES) is considered. The basic elements of the system architecture and topology of the ground segment placing are adduced. The expediency of the ground segment integration into EGNOS system, as the first stage of the creating USNES, is substantiated.





УДК 621.396.98

В. П. Бабак¹, Я. И. Скалько², В. П. Харченко¹

¹Національний авіаційний університет

²Департамент авіаційного транспорту України

Основные направления внедрения спутниковых технологий для повышения эффективности движения воздушного транспорта в Украине

Розглянуто основні напрямки запровадження супутникових систем для розв'язування функціональних задач організації повітряного руху. Виділено основні методологічні принципи формування національного плану розвитку систем інформаційного забезпечення польотів.

Технологии и аппаратура спутниковых систем все более массово используются практически во всех областях деятельности человека, и особенно там, где требуется точное местоопределение, мониторинг и управление подвижными объектами. Спутниковые радионавигационные системы GPS и ГЛОНАСС, а в скором времени и системы нового поколения типа GALILEO, в комплексе с наземными, космическими и бортовыми функциональными дополнениями становятся в соответствии с историческими решениями ICAO основными средствами навигации и управления даже в такой критической по требованиям безопасности отрасли, как воздушный транспорт.

В 1991 г. Десятая аэронавигационная конференция одобрила Концепцию развития аэронавигации, разработанную Специальным комитетом по будущим аэронавигационным системам (FANS) [1]. Концепция FANS, под которой понимают системы связи, навигации, наблюдения и организации воздушного движения (CNS/ATM), включает в себя комплексный и взаимосвязанный перечень технических средств на основе использования спутников и компьютеризированных средств. Основой системы CNS/ATM является глобальная навигационная спутниковая система GNSS, которая включает созвездия спутников, бортовые приемники и средства контроля целостности, системы с дополнениями, в зависимости от решаемых задач, оборудованием на спутниках связи, земле и на бортах воздушных

судов, что позволяет значительно повысить точность измерения координат, обеспечить целостность данных и непрерывность обслуживания. Отличительной особенностью системы являются также единый отсчет времени. Данная концепция получила поддержку в широком экономическом исследовании, из которого следует что:

- а) новые системы обеспечивают очевидные технологические преимущества;
- б) получаемые выгоды в глобальном масштабе значительно превышают расходы, связанные с внедрением новых технологий.

Несмотря на доказательность того, что внедрение будущих аэронавигационных систем на глобальном уровне является эффективным с точки зрения затрат, все же необходимо иметь больше информации о результативности внедрения этих систем как на региональном, так и на национальном уровнях. Исходя из этого государствам предложено провести собственный анализ целесообразности затрат и/или анализ затрат/выгод [2]. Безусловно, что наиболее полное представление о целесообразности внедрения новых систем дает исследование эффективности национальной аэронавигационной системы.

Следует иметь в виду, что оценка эффективности национальной аэронавигационной системы производится с учетом ее реакции на внедрение новой высокотехнологичной информационной системы CNS, изменения технологической составляющей аспекта организации воздушного движения ATM

при условии обеспечения гарантированного уровня безопасности полетов. В математическом аспекте это сводится к постановке и решению многокритериальной оптимизационной задачи.

В инструктивных материалах ICAO проблема внедрения системы CNS/ATM рассматривается на экономическом уровне. В этих материалах основное внимание уделено главным образом методам определения затрат по эксплуатации действующих и новых систем, а также влиянию этих двух видов систем на затраты, связанные с эксплуатацией воздушного судна. Показатели жизнеспособности проектного варианта основаны на сравнении с затратами на эксплуатацию действующих систем без перехода к новым технологиям (базовый вариант).

Поэтапное внедрение элементов новых систем CNS/ATM в рамках глобального плана позволяет эксплуатантам воздушных судов получить в короткие сроки преимущества эксплуатационного и экономического характера с учетом удовлетворения требований по безопасности полетов. Выгоды от внедрения таких высокотехнологических систем включают сокращение затрат, связанных с выводом из эксплуатации действующих наземных средств. Для аeronавигационной системы Украины это важно, поскольку многие средства выработали свой ресурс, а некоторые из них не соответствуют международным стандартам. Освободив воздушные суда от зависимости от наземных навигационных систем, глобальная навигационная система позволяет использовать более прямые маршруты через Украину. Замена традиционных радиотехнических средств обслуживания воздушного движения на глобальную систему CNS/ATM позволяет сэкономить на поддержании аeronавигационной инфраструктуры и техническом обслуживании средств обеспечения полетов.

На рис. 1 в обобщенном виде перечислены прямые и косвенные факторы, которые определяют эффективность новой системы.

Преимущества от внедрения спутниковых систем могут быть получены, если изготовители оборудования, авиакомпании и национальные администрации регионов скоординируют действия на уровне программ и планов развития аeronавигационной инфраструктуры, а также технологии ее применения. Кроме того, необходимо объединение усилий для производства наземного, бортового и спутникового оборудования; своевременного его ввода в эксплуатацию; разработки стандартов и процедур использования аппаратуры.

Внедрение новых систем CNS/ATM сопряжено с большими трудностями и предусматривает целый пакет инвестиций. Однако те, кто будет финанси-



Рис. 1. Факторы, определяющие эффективность новой системы

ровать такие проекты, должны быть убеждены в том, что в течение разумного времени эти расходы будут возмещены. Из этого следует необходимость четкой координации работ по внедрению элементов спутниковых систем на национальном и региональном уровнях. Необходимо своевременно создать соответствующие организационные структуры для внедрения, развития и поддержания проектного варианта системы.

Строгий метод определения эффективности новой системы базируется на определении показателей экономической эффективности и показателя уровня безопасности полетов. Методология опреде-

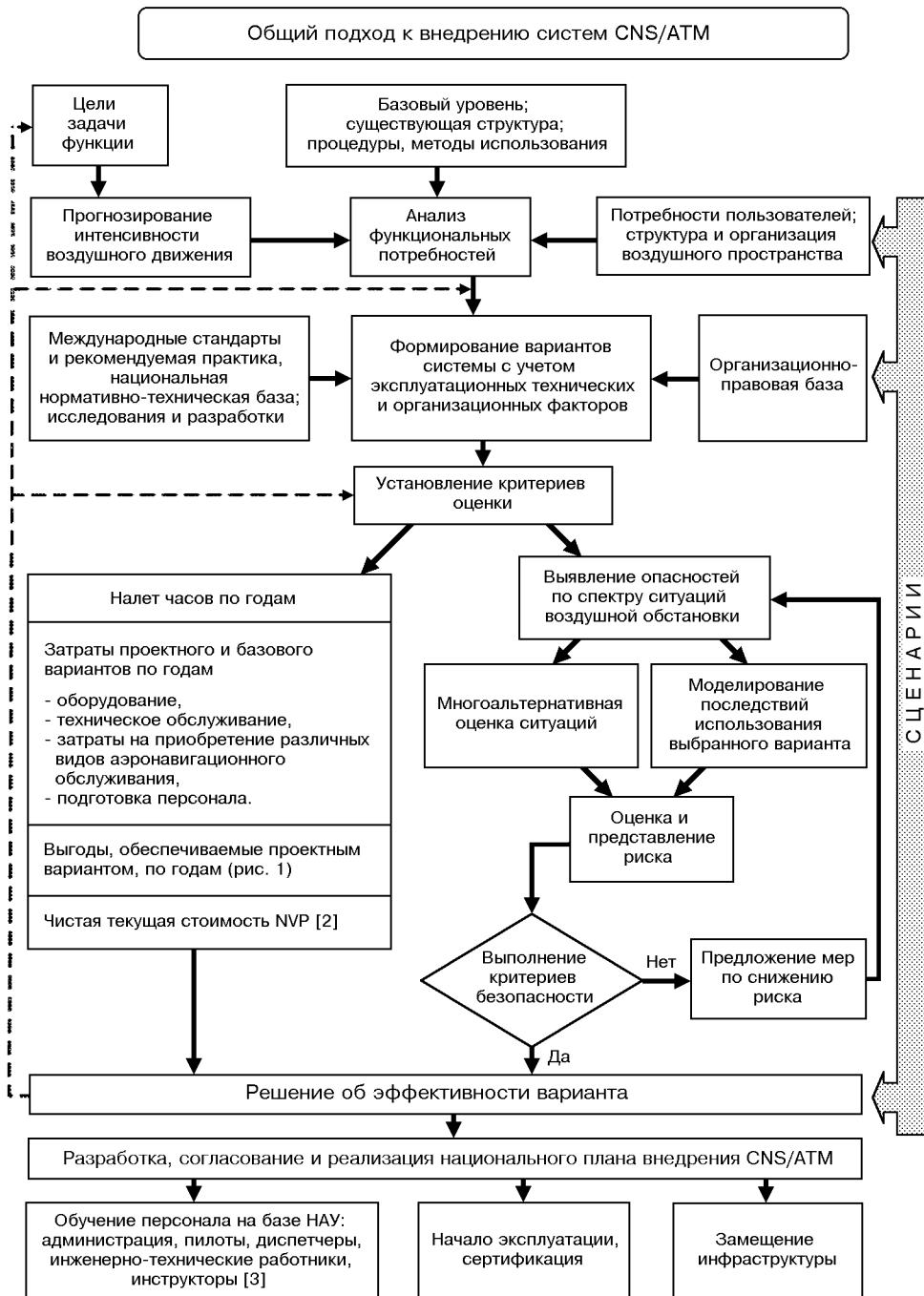


Рис. 2. Методология определения показателей эффективности и уровня безопасности полетов

ления этих показателей представлена на рис 2.

Используемый ICAO метод определения показателя предполагаемой экономической эффективности проекта CNS/ATM основан на оценке чистой текущей стоимости NPV [2].

Базовый вариант включает ныне действующие средства и связанные с ними затраты на техническое обслуживание, подготовку персонала и другие виды деятельности для поддержания инфраструктуры на расчетный период до 2015 г. Проектный

вариант предусматривает инвестиции и затраты, связанные с внедрением системы CNS/ATM в течение этого же периода времени. Они учитывают затраты на эксплуатацию как усовершенствованных систем, так и старых систем при условии их использования в проектном варианте. Кроме того, в проектном варианте учитываются выгоды в соответствии с рис. 1.

Поскольку концепция CNS/ATM предлагает различные альтернативные варианты, основанные на вполне определенном типе оборудования для выполнения различных функций, то проектный вариант включает в себя ряд сценариев. Различия между этими сценариями обусловлены конкретными типами оборудования, используемыми для связи «воздух — земля», навигации и наблюдения [1, 2, 4, 5].

В качестве исходных вариантов систем связи «воздух — земля», которые отличают сценарии один от другого выбираются:

а) ОВЧ-линии передачи данных (или VDL), используемые для передачи речевой информации и данных;

б) авиационная подвижная спутниковая служба (AMSS), которая также используется для передачи речевой информации и данных;

в) канал передачи данных S ВОРЛ.

Типы связи «земля — земля» также характеризуют вид сценариев. В этом случае предполагается, что основной объем регулярной связи между наземными авиационными пользователями и системами будет представлять собой обмен данными. Такой обмен данными между метеорологическими органами, службами аeronавигационной информации, подразделениями обслуживания воздушного движения и др. может представлять:

а) обмен сообщениями произвольного содержания;

б) обмен стандартизованными информационными сообщениями с возможными текстовыми добавлениями;

в) автоматизированный обмен данными между компьютеризированными системами.

Навигационные средства также определяют ряд сценариев. При этом в первую очередь необходимо учитывать концепцию требуемых навигационных характеристик RNP для условий зональной навигации. RNP основываются на сочетании погрешностей навигационного датчика, погрешности бортового приемника, погрешности отображения данных и погрешности, обусловленной техникой пилотирования. Типы RNP для этапов захода на посадку, посадки и вылета определяются в показателях требуемой точности, целостности, непрерывности и

готовности навигационного оборудования.

Для определения свойственных спутниковым системам ограничений и выполнения требований к характеристикам обслуживания (точность, целостность, готовность и непрерывность) на всех этапах полета должны использоваться различного рода функциональные дополнения: бортовые, наземные и спутниковые.

В сценариях навигационных средств предполагается, что такое оборудование, как ОВЧ-радиомаяки VOR, радиомаяки NDB и системы посадки по приборам (ILS) в дальнейшем не будут устанавливаться, а имеющиеся в настоящее время будут постепенно сниматься с эксплуатации.

Для систем наблюдения альтернативными вариантами являются моноимпульсные вторичные обзорные радиолокаторы режимов А, С, S и системы автоматического зависимого наблюдения, основанные либо на VDL, либо на AMSS. Система организации воздушного движения (АТМ), которая учитывается во всех сценариях, основывается на существующей системе управления воздушным движением (УВД) и функционально дополняется средствами автоматизированной и интеллектуальной поддержки УВД, которые с передачей данных по линии связи «диспетчер — пилот» (CPDLC) выполняют часть постоянных обязанностей диспетчеров. Результатом является снижение рабочей нагрузки диспетчеров, что позволяет им обслуживать большее количество воздушных судов и увеличивать пропускную способность системы управления воздушным движением (УВД).

Определение безопасности проектируемой системы заключается в оценке риска столкновения и последующем сравнении его с предварительно установленным максимально допустимым риском столкновения (рис. 2). Если расчетный риск ниже максимально допустимого риска, и это условие выполняется для всего установленного срока службы новой системы, то проектируемая система может считаться безопасной. Параметры системы, оказывающие наибольшее влияние на риск столкновения делятся на четыре основные группы:

- структура и организация воздушного пространства;
- сближение воздушного судна с другими воздушными судами;
- навигационные характеристики;
- влияние характеристик системы наблюдения и связи.

Построенная в Национальном авиационном университете математическая модель позволяет учитывать названные факторы и на основе многоальтернативного анализа оценивать качество новой систе-

мы. При этом учитываются как ошибки оператора, так и системные отказы. К выявляемым опасностям прежде всего относится нарушение норм эшелонирования, несогласованность действий летных экипажей и диспетчеров УВД и т. п. К особенностям анализа опасностей относится необходимость оценки редких событий и соответствующего спектра ситуаций воздушной обстановки. С помощью моделей последствий определяется расчетная вероятность столкновений при условии заданного разделения смежных линий пути.

Определение расчетного риска включает объединение рисков столкновения в результате каждой из выявленных опасностей с целью определения расчетной величины общего риска. Если расчетная величина общего риска превышает предварительно установленную пороговую величину, то принимаются меры (предлагаются мероприятия), направленные на снижение риска. Многоальтернативная оценка качества системы позволяет упростить и гарантировать выявление эффективных процедур снижение риска. При этом обеспечивается возможность прямого анализа влияния изменений на различные характеристики системы CNS/ATM.

Повышение эффективности движения воздушного транспорта в Украине путем внедрения новых спутниковых технологий представляет собой комплексную задачу. Ее решение предполагает варьирование многими переменными, среди которых следует выделить:

- оптимизацию структуры системы аeronавигационного обслуживания;
- изменение уровня обслуживания воздушного движения;
- изменение структуры и организации воздушного пространства;
- установление более высоких уровней требуемых навигационных характеристик;
- улучшение возможностей систем связи;
- улучшение возможностей систем наблюдения;
- развертывание сети станций с локальной зоной действия;
- внедрение средств организации воздушного движения;
- внедрение многоальтернативных анализаторов и прогнозаторов конфликтных ситуаций.

При этом повышение эффективности полетов достигается в основном за счет:

- точной зональной навигации с использованием спутниковых систем, позволяющих реализовы-

вать концепцию сокращенного эшелонирования и обеспечить более результативную структуру прямых маршрутов, а также оптимизировать профили набора высоты и снижения;

- сокращения рабочей нагрузки диспетчера в результате постепенного внедрения новых автоматизированных функций, использующих сообщения из линий передачи данных CPDLC;
- использование спрямленных траекторий полетов в аэроузловой зоне, при заходе на посадку и взлете;
- комплексирования данных системы автоматического зависимого наблюдения (ADS, ADS-B) и радиолокаторов как первичных, так и вторичных. Это позволит повысить точность, готовность, целостность и непрерывность обслуживания.

Структурная реорганизация системы аeronавигационного обслуживания Украины определяется национальной программой и планом внедрения технологии CNS/ATM, разработка которых завершается. Отдельные элементы системы CNS/ATM постепенно внедряются в Украине. Примером этого служит внедрение спутниковой авиационной связи.

1. Доклад Десятой аeronавигационной конференции // Doc 9583, AN-CONF/10, ICAO. — Монреаль, 1991.
2. Доклад Специального комитета по контролю и координации разработки и планированию перехода к будущей системе аeronавигации (FANS — этап II) // Четвертое совещание. Doc 9623, FANS(II)/4, ICAO. — Монреаль, 1993.
3. Харченко В. П. Майбутнє аерокосмічних інформаційних систем і керування транспортом // Вісник Київ. міжнар. ун-ту цивільної авіації.—1999.—№ 2.—14 с.
4. Air Traffic Management Strategy for 200+. — November, 1998.—Vol. 1—2.
5. Babak V. P. Trainer methodology realization in the process of training specialists for CNS/ATM operation // Report of the Eight Global TRAINAIR Conf. and Training Symp. Madrid, Spain, 25—29 September 2000.

MAIN DIRECTIONS OF SATELLITE TECHNOLOGIES IMPLEMENTATION TO INCREASE THE EFFECTIVENESS OF UKRAINIAN AIR TRANSPORT MOTION

V. P. Babak, Ya. I. Skal'ko, V. P. Kharchenko

The principal directions of the satellite systems implementation to decision the functional tasks of the air motion organization are considered. The main methodological principles of the national plan formation to develop the systems of the informational ensuring of flights are distinguished.

УДК 621.396

В. А. Козлов, А. М. Лук'янов, И. Г. Ноздрин

АТ Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

**Технические
зоны действия EGNOS на территории Украины**

Розглядається проблема розширення зони дії європейської широкозонної диференціальної підсистеми EGNOS на територію України. Показано, що для забезпечення регламентованої EGNOS точності навігаційних визначень в межах території України необхідно розмістити 2-3 RIMS, інформація яких передаватиметься в центр обробки інформації EGNOS. Приведено результати моделювання точності навігаційних визначень на території України з використанням коректуючої інформації системи EGNOS.

Мировое сообщество активно работает над созданием глобальной спутниковой навигационной системы GNSS. Основным вкладом Европейского Союза в систему GNSS на первом этапе ее создания является программа EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), которая разрабатывается так называемой Европейской трехсторонней группой в составе ESA (Европейское Космическое Агентство), EUROCONTROL (Европейская Организация Безопасности Аэронавигации) и EU Commission (Комиссия Евросоюза). EGNOS является широкозонной дифференциальной подсистемой существующих спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, и вместе с ними образует глобальную навигационную систему GNSS-1 первого этапа [4]. EGNOS дает гражданским пользователям спутниковых навигационных систем повышенную точность определения местоположения при использовании ими открытых навигационных сигналов стандартной точности. Основным назначением EGNOS является навигационное обслуживание воздушного, водного и наземного видов транспорта. Одной из важных задач системы EGNOS в настоящее время является обеспечение поддержки внедрения технологии CNS/ATM ICAO в зоне, находящейся в ведении Европейской конференции гражданской авиации (ECAC), а также расширение этой зоны на территорию государств СНГ, стран Африки и Азии.

Расширение зоны действия EGNOS на территорию Украины — эффективное и относительно низкозатратное решение проблем аэронавигационного

обеспечения (АНО) в Украине. Оно позволит создать надежное и точное навигационно-временное обеспечение не только для нужд авиации, но и для всех других видов транспорта на всей территории Украины и в прилегающих регионах. Оно обеспечит полеты воздушных судов в коридорах и эшелонах, отвечающих требованиям ICAO, существенно повысит эффективность АНО и реализует в Украине концепцию CNS/ATM в соответствии с рекомендациями ICAO.

Основным фактором, благоприятствующим расширению зоны действия EGNOS, является то, что Украина находится в зоне устойчивого приема сигналов от двух геостационарных спутников INMARSAT-3: AOR-E и IOR. Это позволяет в принципе всем потребителям Украины использовать эти спутники как дополнительные «навигационные точки», а также принимать от них информацию о целостности навигационного поля GNSS и широкозонные дифференциальные поправки, сформированные наземным сегментом EGNOS.

Однако не все наблюдаемые с территории Украины навигационные спутники будут обеспечены корректирующей информацией системы EGNOS, так как она формирует и передает потребителям корректирующую информацию гарантированной точности только для тех навигационных спутников GNSS (GPS и ГЛОНАСС), которые могут наблюдаться потребителями, находящимися в зоне ECAC.

С технической точки зрения решение вопроса расширения зоны действия EGNOS на территорию Украины сводится к размещению на ее территории

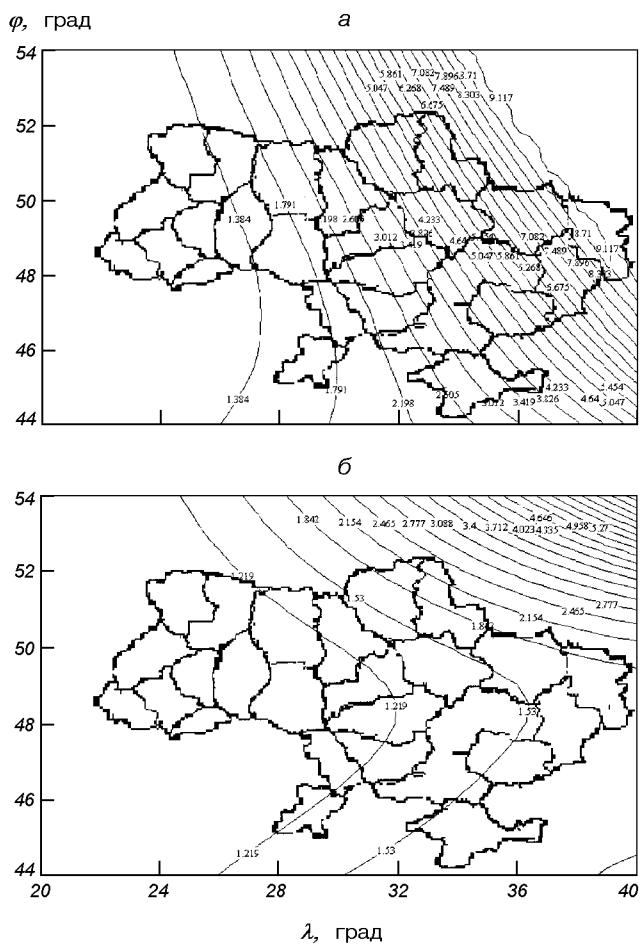


Рис. 1. Ожидаемая погрешность координатных определений (СКО, м) по сигналам GNSS-1: *а* — при отсутствии RIMS на территории Украины, *б* — при размещении на территории Украины трех RIMS

нескольких станций мониторинга навигационного поля (RIMS), которые являются базовыми элементами наземного сегмента EGNOS, и к обеспечению передачи измерительной информации в один из обрабатывающих центров EGNOS. Таким образом, при рассмотрении технических вопросов расширения зоны действия EGNOS на территорию Украины необходимо в первую очередь определить количество и места расположения RIMS, требуемых для покрытия региона.

Наиболее важным требованием к дислокации RIMS является обеспечение надежного мониторинга целостности GNSS на обслуживаемой территории. Достижение необходимого уровня надежности осуществляется оптимизацией количества RIMS, размещаемых в заданной области и одновременно

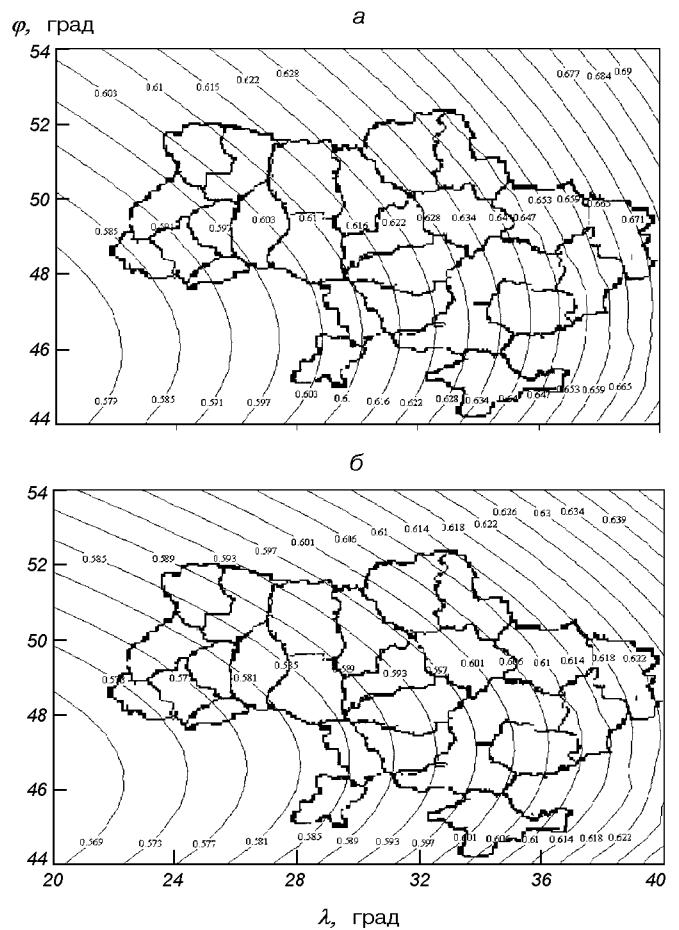


Рис. 2. Ожидаемая погрешность координатных определений (СКО, м) по сигналам GNSS-1 (вариант использования двухчастотного приемника): *а* — при отсутствии RIMS на территории Украины, *б* — при размещении на территории Украины трех RIMS

наблюдающих заданное количество одних и тех же спутников GNSS. Здесь необходимо учесть запланированное развертывание RIMS в странах Восточной Европы и Турции. Согласно данному критерию на территории Украины достаточно разместить две станции RIMS. В целях же обеспечения повышенной надежности контроля целостности GNSS целесообразно развернуть три станции RIMS. В этом случае при выходе одной из них из строя требуемая надежность мониторинга будет сохранена.

Количество RIMS на территории Украины и их размещение должны гарантировать совместно с RIMS зоны ECAC синхронное наблюдение каждого видимого с территории Украины навигационного спутника GNSS не менее чем четырьмя RIMS. Это необходимо для надежного решения задачи уточне-

ния эфемерид и уходов шкал времени спутников. Как показывают результаты математического моделирования, этот критерий выполняется при размещении на территории Украины одной RIMS.

Количество RIMS и их размещение должны также обеспечивать требуемую точность определения вертикальной ионосферной задержки (ТЕС) в определенных заранее точках зоны покрытия по результатам двухчастотных измерений, выполненных RIMS. Эти данные передаются системой EGNOS для компенсации ионосферной погрешности измерений потребителям, использующим стандартные одночастотные приемники. Результаты оценки точности местоположения потребителей на территории Украины, использующих одночастотные приемники GPS/EGNOS, представлены на рис. 1. Расчеты проведены для наземного сегмента EGNOS, состоящего из 24 RIMS, входящих в зону обслуживания ECAC [5], и дополнительно размещенных на территории Украины трех RIMS (Дунаевцы, Симферополь, Харьков). Видно, что ожидаемая погрешность определения плановых координат при размещении на территории Украины трех дополнительных RIMS будет не хуже 4.3 м (95 %), а без их размещения — до 19 м на востоке Украины.

На рис. 2 приведены аналогичные результаты расчета ожидаемой точности местоопределения потребителей, которые используют двухчастотные GPS/EGNOS-приемники с коррекцией только эфемеридных и частотно-временных погрешностей навигационных спутников по информации системы EGNOS. В этом случае точность практически не зависит от наличия дополнительных RIMS на территории Украины.

Размещение станций в восточной части Украины позволит:

- начать более раннее слежение за восходящими спутниками, которые еще не видны с позиций RIMS в Восточной Европе, и обеспечить более раннее и надежное обнаружение неисправных навигационных спутников;
- обеспечить приемлемую геометрическую конфигурацию европейских и украинских RIMS для более точной оценки широкозонных дифференциальных поправок;
- обеспечить использование EGNOS на смежных

с Украиной территориях — на севере, востоке и юге. Это дает возможность дальнейшего последовательного расширения зоны действия EGNOS и, при принятии соответствующих межправительственных решений, расширения зоны обслуживания, разрешенной к использованию ECAC.

Учитывая, что в Украине в настоящее время на принципах широкозонной навигации создается национальная система космического навигационного обеспечения (СКНО) [1, 2], задача расширения зоны действия системы EGNOS на территорию Украины может быть решена путем интеграции отдельных контрольно-корректирующих станций СКНО в структуру EGNOS.

1. Верещак А. П., Жалило А. А., Ноздрин И. Г., Флерко С. Н. Потенциальные возможности реализации широкозонной дифференциальной навигации по сигналам космических навигационных систем GPS и ГЛОНАСС в Украине // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 5/6.—С. 56—61.
2. Верещак А. П., Пискорж В. В., Жалило А. А. и др. Концепция создания системы навигационного обеспечения Украины // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 5/6.—С. 46—55.
3. Хода О. А. Программное обеспечение «Klio» для определения параметров ионосферы // Космічна наука і технологія.—1998.—5, № 5/6.—С. 25—32.
4. EGNOS AOC: Требования к системе. — Европейское космическое агентство, проектное бюро GNSS-1, 1998.
5. EGNOS System Test Bed User Workshop Toulouse, 6–7 July 2000.

TECHNICAL PREMISES OF AREA EXPANSION OF EUROPEAN GEOSTATIONARY NAVIGATION OVERLAY SERVICE ACTION ZONE ON UKRAINIAN REGION

V. A. Kozlov, A. M. Luk'ianov, I. G. Nozdrin

The problem of the effect area expansion of the European wide-area differential subsystem of the European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) on the Ukrainian region is considered. It has been demonstrated that it is necessary to place 2–3 RIMS for the ensuring of the navigation determination accuracy, regulated by EGNOS, within the Ukrainian territory. The information of these RIMS will be transmitted to the EGNOS processing data center. The results of the modeling of the navigation determination accuracy within the Ukrainian territory using correcting information of the EGNOS system are adduced.

В. В. Загоруйко, В. В. Конин

Науково-дослідний інститут нових фізичних і прикладних проблем, Київ

Обеспечение точных заходов на посадку методами спутниковой навигации

Проведено огляд розвитку засобів супутникової навігації та нормативної документації. Детально описані проблеми реалізації точних заходів на посадку на основі засобів супутникової навігації повітряних суден. Показана перспективність використання контрольно-коригуючих станцій для забезпечення точних заходів на посадку. Розглянуто перспективні схемно-конструктивні рішення контрольно-коригуючих станцій. Сформульовано аргументований висновок про доцільність і можливість розробки конкурентноспроможних контрольно-коригуючих станцій в Україні.

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывно возрастающий объем авиаперевозок в мире обусловил разработку ИКАО новой концепции глобальных систем связи, навигации, наблюдения/организации воздушного движения (CNS/ATM), конечная цель которой заключается в предоставлении эксплуатантам воздушных судов возможности выполнять полеты по желательным для них оперативно корректируемым траекториям и делать это оптимальным и рентабельным образом [1]. Одним из ключевых элементов системы CNS/ATM является глобальная навигационная спутниковая система (GNSS), которая по определению ИКАО [2] включает в себя глобальную орбитальную навигационную спутниковую систему (ГЛОНАСС) Российской Федерации и/или глобальную систему местоопределения (GPS) США, бортовые приемники GNSS и одно или несколько функциональных дополнений. Функциональные дополнения подразделяются на три основные категории: 1) бортовое функциональное дополнение (ABAS), обеспечивающее целостность путем интеграции бортовых GNSS-приемников с другими навигационными средствами воздушного судна; 2) спутниковые функциональные дополнения (SBAS), основной составляющей которых являются дополнительные навигационные спутники на геостационарных орбитах, обеспечивающие также трансляцию широкозонных дифференциальных поправок и информации о целостности; 3) наземные функциональные дополнения (GBAS), обеспечивающие воздушные суда дифференциальными поправками и информацией о целостности посредством сигналов наземных контрольно-корректирующих станций.

Согласно стратегии ИКАО [1], планам Европейской конференции гражданской авиации [2, 16] и Федерального авиационного управления (ФАУ) США [3, 14, 19], GNSS будет внедряться эволюционным путем, и темп внедрения будет в основном определяться темпами совершенствования составных частей GNSS и системы в целом. Конечная цель заключается в превращении спутниковой навигации в единственное средство аэронавигации [1, 3, 4, 14].

В настоящее время бортовые навигационные средства на основе спутниковой навигации получили статус основного средства полетов над океанами и дополнительного средства навигации при полетах по маршруту, в зоне аэродрома и неточных заходов на посадку, включая полеты в системе зональной навигации. Предполагается, что после ввода в эксплуатацию спутниковых функциональных дополнений WAAS в США, EGNOS в Европе и MSAS в Восточной Азии они получат статус основного средства навигации при полетах по маршруту, в зоне аэродрома и при точных заходах на посадку первой категории метеоминимума в зоне действия каждого из спутниковых функциональных дополнений [4, 5, 14]. Однако точные заходы на посадку при пониженных метеоминимумах первой, а тем более второй и третьей категорий, практически во всем мире осуществляются с помощью традиционных радионавигационных средств типа ILS или MLS. Необходимыми условиями превращения спутниковой навигации в основное, а тем более в единственное средство аэронавигации является обеспечение точных заходов на посадку всех категорий метеоминимумов средствами спутниковой навигации. Необходимость точных заходов на посадку средст-

вами спутниковой навигации диктуется как экономическими, так и техническими причинами [20]. При этом наиболее актуальным является обеспечение точных заходов на посадку первой категории метеоминимума, так как в этом случае обеспечивается возможность существенного увеличения объема авиационных перевозок.

ВАРИАНТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНЫХ ЗАХОДОВ НА ПОСАДКУ ПОСРЕДСТВОМ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

Необходимым условием обеспечения точных заходов на посадку с помощью средств спутниковой навигации является определение местоположения воздушных судов с метровой (для первой категории метеоминимума) и субметровой (для второй и третьей категории метеоминимума) точностью. Выполненные в начале 90-х гг. прошлого столетия исследования [11] показали, что требуемое уменьшение погрешности определения местоположения воздушных судов в случае использования средств спутниковой навигации возможно при использовании дифференциальных методов спутниковой навигации.

Возможны два варианта практической реализации дифференциальной спутниковой навигации: 1) формирование и трансляция воздушным судам широкозонных дифференциальных поправок, 2) формирование и трансляция воздушным судам локальных (с радиусом действия до 50 км) дифференциальных поправок.

В первом случае дифференциальные поправки представляют собой поправки к часам и эфемеридам навигационных спутников плюс ионосферные и тропосферные поправки. Последние являются усредненными для относительно большого региона и формируются относительно небольшим количеством наземных контрольных станций, объединенных в сеть и транслируемых воздушным судам с помощью геостационарных спутников на частоте радионавигационного сигнала навигационных спутников (системы SBAS). При этом геостационарные спутники, выполняющие наряду с функцией трансляции широкозонных дифференциальных поправок и функцию навигационных спутников, излучая радионавигационный сигнал, существенно увеличивают доступность навигационной системы.

Хотя с самого начала предполагалось обеспечение только точных заходов на посадку первой категории метеоминимума, подкупала возможность сравнительно небольшим количеством контрольных станций и небольшим количеством геостационарных спутников не только обеспечить статус основного средства навигации для бортовых навигацион-

ных устройств, использующих сигналы навигационных спутников при полетах по маршруту, в зоне аэродрома и при неточных заходах на посадку, но и при точных заходах на посадку первой категории метеоминимума.

Эти соображения обусловили разработку и практическое развертывание систем формирования и трансляции широкозонных дифференциальных поправок, представляющих собой спутниковые функциональные дополнения, в США (WAAS), в Европе (EGNOS), в Японии (MSAS). При этом зоны действия спутниковых функциональных дополнений WAAS, EGNOS, MSAS спланированы таким образом, чтобы совместная зона действия охватывала практически весь мир. Однако возможность осуществления точных заходов на посадку первой категории метеоминимума гарантируется только в ограниченных регионах: в случае WAAS — это национальное воздушное пространство США, а в случае EGNOS — воздушное пространство стран, являющихся членами Европейской конференции гражданской авиации. Но, как показали испытания системы WAAS [8], широкозонные дифференциальные поправки существенно уменьшают погрешность определения местоположения воздушных судов, но обеспечивают требуемую для обеспечения точных заходов на посадку первой категории метеоминимума точность определения местоположения воздушного судна в ограниченном объеме национального воздушного пространства США (около 50 %). Для увеличения объема воздушного пространства, в котором с помощью широкозонных дифференциальных поправок будет возможен точный заход на посадку первой категории метеоминимума, требуется существенное увеличение количества наземных контрольных станций. В результате статус основного средства навигации при полетах по маршруту, в зоне аэродрома и неточных заходах на посадку бортовые GPS/WAAS-приемники получат в 2007 г. после существенного расширения наземной инфраструктуры WASS. Что касается точных заходов на посадку первой категории метеоминимума, то с помощью WASS они будут доступными к 2007 г. на большей, но не всей территории США [3, 11]. При этом исключена возможность обеспечения точных заходов на посадку второй и третьей категории метеоминимума. Последнее исключает возможность превращения спутниковой навигации в единственное средство аeronавигации.

Во втором случае дифференциальные поправки представляют собой поправки к псевдодальностям, измеряемым бортовыми приемниками спутниковой навигации, формируемые и транслируемые воздушным судам контрольно-корректирующими станциями, располагаемым на аэродромах или вблизи аэродромов. Следует отметить значительно мень-

шую стоимость контрольно-корректирующих станций по сравнению с контрольными станциями, отсутствие необходимости приема сигналов с Р-кодом и способность индивидуальных контрольно-корректирующей станции формировать и транслировать локальные дифференциальные поправки без объединения их в сеть. Отличительной способностью локальных дифференциальных поправок является то обстоятельство, что при их надлежащем качестве возможно увеличение точности определения местоположения воздушных судов, удовлетворяющие требования точных заходов на посадку второй и третьей категории метеоминимума [11].

Потенциальные возможности локальных дифференциальных поправок обусловили разработку в США параллельно системе WAAS системы LAAS, которая представляет собой сеть из контрольно-корректирующих станций, обеспечивающих точные заходы на посадку первой, второй и третьей категории метеоминимума [3, 9]. В результате при введении в полномасштабную эксплуатацию систем WAAS и LAAS в национальном воздушном пространстве США средства спутниковой навигации становятся единственным средством аeronавигации. Запланировано создание сети из 143 контрольно-корректирующих станций, из которых 31 будут обеспечивать точные заходы на посадку первой категории метеоминимума. Они будут развернуты к 2008 г. в аэропортах, где точные заходы на посадку первой категории метеоминимума не обеспечиваются системой WAAS. 112 контрольно-корректирующих станций будут обеспечивать точные заходы на посадку первой, второй и третьей категории метеоминимума после разворачивания будут развернуты в главных аэропортах к 2015 г. [7]. Широкое использование контрольно-корректирующих станций вместо и взамен систем ILS, после ввода в эксплуатацию в 2003 г. системы EGNOS, планируется и Европейским сообществом [4, 5].

Разработку LAAS осуществляют два консорциума, состоящие из производителей контрольно-корректирующих станций и бортового навигационного оборудования, авиакомпаний и аэропортов. Возглавляются они фирмами «Honeywell» и «Raytheon» — мировыми лидерами в области разработки контрольно-корректирующих станций. Фирма «Raytheon» разработала для гражданской авиации контрольно-корректирующую станцию DIAS-3100, обеспечивающую точные заходы на посадку первой категории метеоминимума и прошедшую успешную апробацию в аэропортах Норвегии и Австралии [7, 12]. Фирма «Raytheon» также разработала и поставляет BBC США мобильную контрольно-корректирующую станцию JPALS, обеспечивающую точные заходы на посадку второй категории метеоминимума [13]. Контрольно-корректирующая стан-

ция SLS-2000 фирмы «Honeywell» прошла успешную апробацию в аэропортах Австралии и Бразилии и в 1998 г. введена в эксплуатацию в двух портах США и Канады для обеспечения точных заходов на посадку специальной первой категории (SCATI) метеоминимума [7, 22]. В настоящее время фирма «Honeywell» осуществляет летные испытания контрольно-корректирующей станции SLS-3000 — прототипа контрольно-корректирующей станции системы LAAS и модернизирует SLS-3000 для обеспечения точных заходов на посадку второй и третьей категорий метеоминимума [15]. Помимо фирм «Honeywell» и «Raytheon», контрольно-корректирующую станцию ARR-400, обеспечивающую точные заходы на посадку первой категории метеоминимума, разработала фирма «Rockwell-Collins» (США). В Европе опытные образцы контрольно-корректирующих станций разрабатываются фирмами «Thomson-CSF» (Франция) и «MAN Technologies» (Германия) [18, 22].

Потенциальные возможности контрольно-корректирующих станций обусловили разработку скандинавскими странами системы GRAS [10]. Это сеть из контрольно-корректирующих станций, которые транслируют дифференциальные поправки для обеспечения точных заходов на посадку, а также дают возможность использовать бортовые навигационные средства на основе спутниковой навигации в качестве основного средства и без сигналов системы EGNOS.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время разработана достаточная нормативная база, в первую очередь в США, а на ее основе — в Европе и ИКАО, регламентирующая требования как к системам, обеспечивающим широкозонные дифференциальные поправки, так и к контрольно-корректирующим станциям. Это в первую очередь Стандарты и Рекомендованная практика (GNSS SARPS) ИКАО по GNSS; стандарт ED-72 A: «Minimum Operator Performance Specifications for Airborne GPS Receiving Equipment used for Supplemental Means of Navigation», стандарт ED 95: Minimum Aviation System Performance Specification for a Global Navigation Satellite System Ground Based Augmentation System to Support CAT I Operations и стандарт ED 97: «Interim Technical Performance Statement for EGNOS/WAAS Airborne Equipment», разработанные Европейской комиссией по авиационному оборудованию (EUROCAE); нормы: DO-229A: «Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment», June 1998, DO-245: «Minimum Aviation System Performance Standard for Local Area Augmentation System (LAAS)», DO-246A: «GNSS Based Precision Approach Local Augmentation System (LAAS) —

Signal-in-Space Interface Control Document (ICD)», DO-253: «Minimum operational performance standards for global positioning system / local area augmentation system airborne equipment», разработанные Радиотехнической комиссией США по аэронавтике (RTCA).

ФУНКЦИИ, СТРУКТУРА, ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ КОНТРОЛЬНО-КОРРЕКТИРУЮЩИХ СТАНЦИЙ

Из предыдущего раздела следует, что Контрольно-корректирующие станции и сети из них по стоимости и точностным характеристикам представляют собой оптимальное техническое средство для обеспечения точных заходов на посадку. Во-первых, они являются необходимым элементом для превращения средств спутниковой навигации (GNSS) в основное, если не единственное средство аэронавигации. Во-вторых, они обладают неограниченной пропускной способностью и являются относительно дешевыми в изготовлении и эксплуатации. Кроме того, контрольно-корректирующие станции обеспечивают возможность высокоточного контроля движения транспортных средств и самолетов на аэродроме.

Функции контрольно-корректирующих станций, обеспечивающих точные заходы на посадку при пониженных метеоминимумах, заключаются в том, чтобы путем обработки сигналов от спутников ГЛОНАСС и/или GPS сформировать и транслировать корректирующую информацию (поправки к псевдодальностям, информация о целостности), учет которой бортовыми средствами уменьшает погрешность местоположения до 2 м в случае первой категории метеоминимума и менее 1 м в случае второй и третьей категорий метеоминимума. Кроме того, дополнительно формируется и транслируется воздушным судам глиссадная информация.

В принципе первые две функции контрольно-корректирующих станций, обеспечивающих точные заходы на посадку, свойственны и широко используемы сейчас станциям, обеспечивающим мореплавание в прибрежной зоне, но это два различных класса радионавигационного оборудования.

Для контрольно-корректирующих станций обеспечения точных заходов на посадку требуется существенно меньшая погрешность дифференциальных поправок к псевдодальностям и высокая точность определения высоты, которая вообще не оговаривается при мореплавании, практически на порядок более высокие темпы обновления корректирующей информации и ее трансляции, дополнительный обмен данных и намного более высокие достоверность передаваемой корректирующей ин-

формации, надежность и контроль целостности. В результате они существенно отличаются диапазоном частот передачи информации, другими характеристиками радиоканала, структурой и регламентируются различной нормативной документацией.

Существенное отличие в радиоканале передачи корректирующей информации точного захода на посадку заключается в том, что трансляция должна осуществляться со скоростью 31500 бит/с в диапазоне частот 108—118 МГц в режиме многочастотного доступа с временным разделением каналов с использованием 8-позиционной дифференциальной фазовой манипуляции (D8PSK), а также с широким использованием помехоустойчивого кодирования, включая (255, 249) 2⁸-код Рида—Соломона [2]. Выбор диапазона частот 108—118 МГц, который в настоящее время предназначен для излучения средств VOR и ILS, обусловлен тем, что эти средства до 2008 г. планируется исключить из состава аэронавигационного оборудования [2, 3, 16], и следовательно, диапазон частот может быть использован для трансляции корректирующей информации станциями, обеспечивающими точные заходы на посадку. Скорость передачи данных, тип модуляции, использование помехоустойчивого кодирования определяются требованиями к цифровой авиационной радиосвязи ОВЧ-диапазона [20]. В США и в Европейском сообществе запланировано все возрастающее ее использование при внедрении CNS/ATM [4, 5, 7].

Жесткие требования к погрешностям определения местоположения воздушных судов могут быть выполнены только в результате уменьшения влияния многолучевого приема и собственных шумов приемника GNSS. В настоящее время это может быть обеспечено только путем существенного увеличения количества приемников и антенн GNSS, оборудованных средствами для уменьшения многолучевого приема [13]. Так, в контрольно-корректирующих станциях системы LAAS, обеспечивающих точные заходы на посадку по первой категории метеоминимума, должно быть не менее трех приемников GNSS, а по третьей категории — до восьми приемников GNSS. В результате приемники GNSS из источников корректирующей информации, к которым подключаются радиосредства для ее трансляции, превращаются в датчики «сырой» информации (эфемерид наблюдаемых навигационных спутников и измеренных псевдодальностей к последним). Ее обработка осуществляется специализированным вычислительным устройством, которое вырабатывает и форматирует в виде стандартизованных сообщений корректирующую информацию. Специализированное вычислительное устройство вместе с программным обеспечением будет определять характеристики контрольно-корректи-

рующих станций, а приемники GNSS будут выступать в качестве источников исходной информации, которая, естественно, должна быть максимально высокого качества. Основными составными частями контрольно-корректирующих станций являются аппаратурная часть и программное обеспечение. При этом последнее должно удовлетворять требованиям стандарта [21], что обязательно имеет место в случае контрольно-корректирующих станций, разрабатываемых в США [13, 22]. Служебную роль играют радиосредства трансляции корректирующей информации, которые должны обеспечить надежную помехоустойчивую трансляцию сформированной корректирующей информации.

Вышеописанная структура контрольно-корректирующих станций для обеспечения точных заходов на посадку позволяет широко использовать при конструировании модульный принцип. В результате модернизация отдельных составных частей станции — антенн GNSS, блока датчиков (приемников) GNSS, специализированного вычислительного устройства — может осуществляться независимо, обеспечивая в итоге точные заходы на посадку третьей категории метеоминимума. Следует отметить, что модульный принцип характерен для наземной аппаратуры спутниковых функциональных дополнений WAAS и EGNOS, а также для разрабатываемых фирмами дальнего зарубежья контрольно-корректирующих станций. Более того, в технических заданиях на разработку систем WAAS и LAAS специально оговаривалось, что они должны состоять из частей, имеющихся на рынке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка и внедрение технологий CNS/ATM обусловлена непрерывным увеличением объема авиаперевозок в мире и необходимостью обеспечить их безопасность. Так, авиационный парк США в настоящее время включает 280 000 самолетов различного назначения, полеты которых внутри США обеспечивают свыше 4000 аэродромов. Однако внедрение технологий CNS/ATM требует огромных затрат и должно осуществляться путем постепенного вывода традиционных и ввода в эксплуатацию новых средств. Нет сомнения, что в течение последующих 10—15 лет осуществляется переход аeronавигации в мире на спутниковую навигацию, а точные заходы на посадку первой категории метеоминимума в ближайшие годы начнут обеспечивать аэродромы, не оснащенные в настоящее время средствами ILS или MLS и которые составляют подавляющее большинство аэродромов в мире. Это еще больше увеличит рынок средств спутниковой навигации, объем которого составляет сотни мил-

лиардов долларов и который в настоящее время на 95 % контролируется фирмами США, Канады и Японии (главным образом фирмами США) [17]. Составить серьезную конкуренцию США на этом рынке вряд ли смогут даже фирмы Европейского Союза, которым в Европе принадлежит не более 15 % рынка средств спутниковой навигации. Тем более в части средств аэронавигации, которые являются критическими по отношению обеспечения сохранности человеческой жизни и к которым предъявляются особо высокие требования.

Для Украины в настоящее время и в ближайшем будущем наиболее актуальными задачами являются обеспечение навигации и посадки самолетов зарубежных авиакомпаний и обеспечение транзитных полетов самолетов зарубежных авиакомпаний в воздушном пространстве Украины. Эти задачи в течение ближайших лет будут осуществляться посредством традиционного наземного радионавигационного оборудования. С вводом в 2003 г. в эксплуатацию системы EGNOS самолеты, оснащенные GPS/EGNOS- или GPS/WAAS-приемниками, смогут совершать в воздушном пространстве полеты по маршруту, в зоне аэродрома и при неточном заходе на посадку без поддержки традиционных наземных радионавигационных средств. Но при условии, что воздушное пространство Украины будет включено в зону действия EGNOS, или в Украине будет обеспечен автономный контроль качества сигналов EGNOS. Этот контроль может быть обеспечен с помощью контрольно-корректирующих станций, которые к тому же будут обеспечивать точный заход на посадку. Более того, достаточное количество контрольно-корректирующих станций, объединенных в сеть типа GRAS, разрабатываемой скандинавскими странами [10], смогут обеспечить превращение спутниковой навигации в основное средство аэронавигации, которое будет независимым от EGNOS или WAAS. Естественно, что с 2003 г. на мировом рынке будет большое количество разработанных фирмами дальнего зарубежья контрольно-корректирующих станций, обеспечивающих точные заходы на посадку первой категории метеоминимума. В то же время в Украине возможна разработка конкурентоспособных контрольно-корректирующих станций, обеспечивающих точные заходы на посадку, построенных с использованием имеющихся на рынке составных частей, но с наиболее высокими характеристиками. Если руководствоваться этим принципом, то в Украине возможны разработка не только конкурентоспособных контрольно-корректирующих станций, но и бортовых средств спутниковой навигации. Если же пытаться догонять фирмы дальнего зарубежья в разработке и производстве GNSS-приемников, микропроцессорных модулей и других устройств вычислительной

техники, высоконадежных резервируемых источников вторичного электропитания, радиосредств цифровой радиосвязи ОВЧ-диапазона типа VDL mode 3 (что оказалось не по силам СССР), то результаты будут отрицательными. Контрольно-корректирующие станции и другие средства спутниковой навигации на основе низкокачественных составляющих будут неконкурентоспособными на внешнем рынке, а затраты на их разработку и производство будут отнесены к убыткам.

Следует подчеркнуть, что разработка в Украине контрольно-корректирующей станции, обеспечивающей точные заходы на посадку, и ее опытная эксплуатация обеспечат возможность приобретения опыта, необходимого для широкого, эффективного и экономного использования спутниковой навигации в аeronавигационном обеспечении Украины.

1. Жудимар Дас Шагас. Взгляд ИКАО на перспективы авиационной радионавигации // Тр. 3-й Междунар. конф. «Планирование глобальной навигации». — М., 1997.— С. 58—67.
2. Air traffic management strategy for the Years 2000+. — Brussels, EUROCONTROL, 2000.
3. An Overview of the National Aerospace System (NAS) architecture: Version 4, January 1999 // WWW.faa.gov/nasarchitecture/blueprint/index.htm.
4. Benedicto J., Michel P., Ventura-Travest J. EGNOS: Project status overview // Aerospace Europe J.—1999.—1, N 1.— P. 58—64.
5. Breeuwer E., Farnworth R., Humphreys P., et al. Flying EGNOS, The GNSS-1 test bed // Galileo World.—2000.—1, N 1.—P. 10—21.
6. Draft SARPS for GNSS // Working Paper / 3 of the Third meeting of GNSS ICAO, 12—23 April 1999, Montreal, Canada.
7. Ely W. S., McPerson K. W., Crosby G. K., et al. SCATI Flight Testing — The Australian Experience // Proc. of ION GPS'99 meeting, 14—17 September 1999. — Nashville, USA. — P. 651—661.
8. Federal Aviation Administration (1999). Wide area augmentation system (WAAS) specification (FAA-F-2898 with Change 1) Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
9. Federal Aviation Administration (2000). Specification performance type one local area augmentation system ground Facility (Draft FAA-E-2937 A), Washington, DC: U.S. Government Printing Office.
10. Gustavsson N. Ground-based regional augmentation system (GRAS) // Working paper / 6 of the Third meeting GNSS ICAO, 12—23 April 1999, Montreal, Canada.
11. Idiens R. GBAS SARPS validation // WP / 9 of the Third meeting of GNSS ICAO, 12—23 April 1999, Montreal, Canada.
12. Katanic T., Gallimore I., Cussack C., et al. Operational implementation of DGPS precision approaches at airports in Norway // Proc. of ION GPS'99 meeting, 14—17 September 1999. — Nashville, USA. — P. 737—749.
13. Levy L. J., Thompson T., Pue A. J. GPS Risk assessment for civil aviation // Proc. of ION GPS'99 meeting, 14—17 September 1999. — Nashville, USA. — P. 2121—2130.
14. Loh R., Nii A. S. Wide area augmentation system (WAAS) design for growth in both national and international environment // Proc. of DSNS'96 conference, 20—24 May 1996, St-Petersburg, Russia.
15. Miller J., Cotton W., Swider R., et al. LAAS government: Industry partnership // Proc. of ION GPS'99 Meeting, 14—17 September 1999, Nashville, USA. — P. 641—650.
16. Navigation strategy for ECAC // Working Paper / 56 of the Third meeting of GNSS ICAO, 12—23 April 1999, Montreal, Canada.
17. Nelson A. Europe's GNSS market // Galileo World.—2000.—1, N 1.—P. 34—41.
18. Ramsey J. W. Satellite-based approach and landing comes into play // Avionics Magazine.—1999, February.—P. 28—33.
19. RTCA. Software considerations in airborne systems and equipment certification (DO-178 B). — Washington, D.C.: RTCA, Inc., 1993.
20. Sandhu K. S., De Cleene B., Biggs M., et al. FAA'S plan for the future use of GPS // Proc. of ION GPS'99 meeting, 14—17 September 1999. — Nashville, 1999.—P. 1763—1768.
21. Weiser M., Disher C. Multipath effect on DGNSS ground station // Proc. of the 2nd european symposium on GNSS-98, 23—25 October, Toulouse, France.
22. Windl J., Gotz S., Beerhold J. R., et al. Flight and trials with combined DGPS/DGLONASS/INS system for high dynamic maneuvers and precision landings // Proc. of the 2nd European Symposium on GNSS-98, 23—25 October, Toulouse, France.

ENSURING PRECISION APPROACHES USING THE SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS

V. V. Zagoruiko, V. V. Konin

We review the state of the satellite navigation systems and standards. Problems of precision approaches realization by means of satellite navigation systems are described in detail. Prospects of application of the ground reference stations to ensure the precision approaches are shown. Perspective scheme-constructed solutions of the ground reference station structure are considered. A reasoned conclusion about the expediency and possibility to develop the competitive Ukrainian ground reference stations is given.

А. А. Кошевої

¹Державне підприємство Науково-дослідний інститут «Квант-Навігація» Мінпромполітики України, Київ

Перспективы развития морской навигации в Украине с использованием радионавигационных технологий в рамках Европейского сотрудничества

Подаються матеріали проєктування комплексної системи забезпечення морської навігації в Україні з використанням технологій супутниковых радіонавігаційних систем (СРНС) і технологій РНС «Чайка», «Лоран-С» і «Eurofix» з урахуванням пропозицій щодо співробітництва з ЄС з метою створення в Європі єдиного радіонавігаційного поля.

ВВЕДЕНИЕ

Высокие требования к безопасности мореплавания (при возрастающей плотности движения судов) и эффективности работы судов, предъявляемые к транспортным и специализированным судам, диктуют необходимость внедрения в практику новых интеллектуальных информационных технологий, в том числе радионавигационных. Политика радионавигационного обеспечения предусматривает получение потребителями в любой точке Земли в реальном масштабе времени надежной радионавигационной информации, достаточной для решения хозяйственных и оборонных задач при минимально возможных экономических затратах.

Разрабатываемый Радионавигационный план Украины (РНПУ) как неотъемлемая часть единого Европейского плана определяет условия обеспечения безопасности движения воздушного, морского, речного, наземного транспорта, решения задач геодезии и картографии, а также развития широкого международного сотрудничества в направлении совместного использования всеми потребителями радионавигационной информации.

КООРДИНАЦИЯ РАБОТ

Украина, являясь европейским государством с широкой сетью транспортных коридоров, соединяющих Запад и Восток, заинтересована в проведении

согласованной политики в этой области. Координацию работ в области навигации и управления движением подвижными объектами обеспечивает Межотраслевая комиссия при Кабинете Министров Украины, рабочим органом которой является НИИ «Квант-Навигация».

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ

К основным приоритетным направлениям работ развития морской навигации, которые находятся под контролем Комиссии, относятся:

- обеспечение эффективной и безаварийной работы транспортных коридоров;
- создание системы космического навигационно-временного обеспечения Украины (СКНВОУ);
- создание единой системы освещения надводной обстановки (СОН), контроля и управления движением судов (УДС) в Азово-Черноморском бассейне.

ТРЕБОВАНИЯ К МОРСКОМУ НАВИГАЦИОННОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ

Все побережье Украины географически можно разделить на три региона (рис. 1):

- Азовский регион с Керченским проливом (западные их части);
- Крымский регион (от входа в Керченский про-

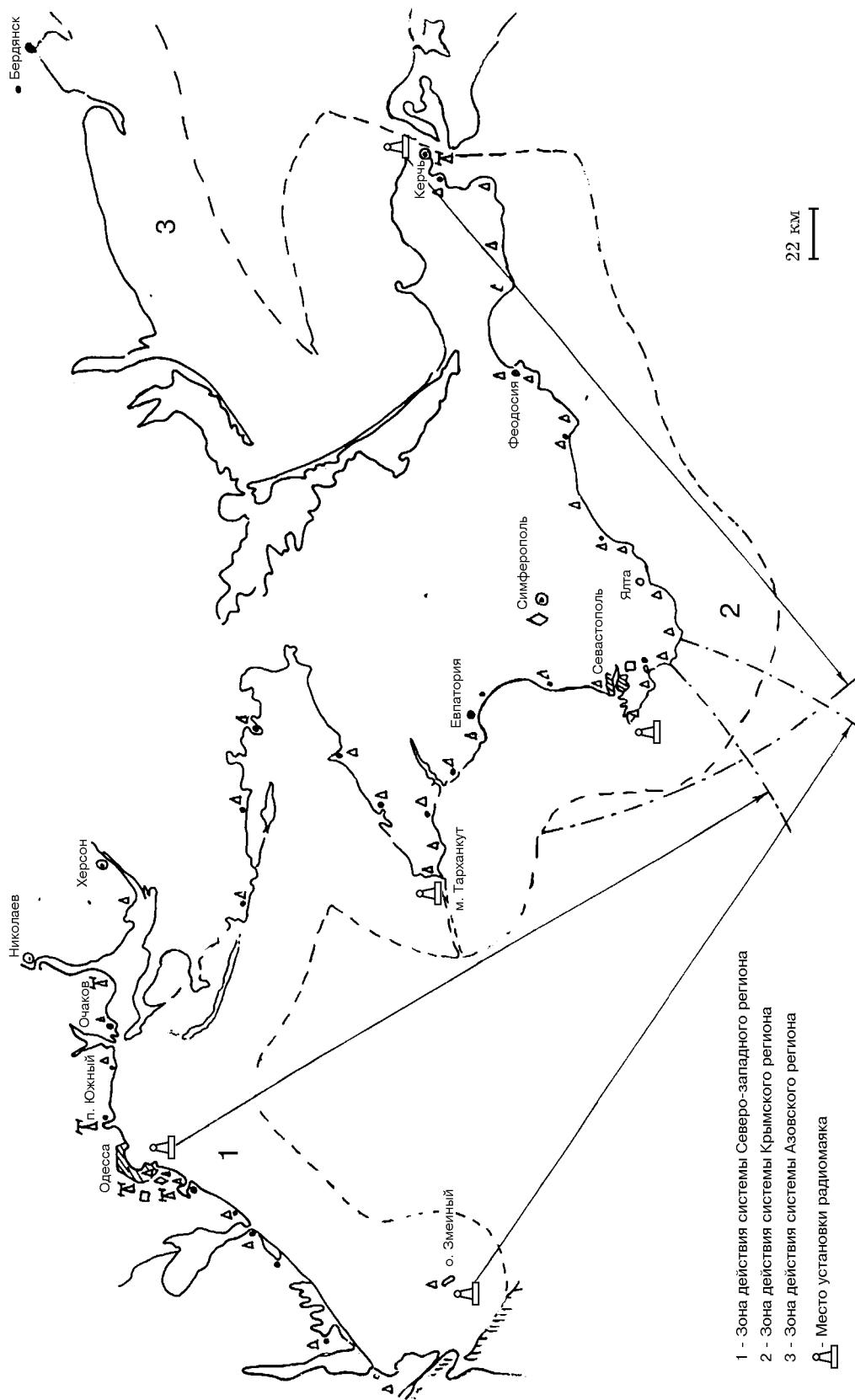


Рис. 1. Морское побережье Украины

- 1 - Зона действия системы Северо-западного региона
 2 - Зона действия системы Крымского региона
 3 - Зона действия системы Азовского региона

▲ - Место установки радиомаяка

Таблица 1. Требования к навигационному обеспечению конвенционных судов

Районы плавания / ограничения по водоизмещению судов	Точность определения места, м	Максимальная дискретность обсерваций, с
Открытое море / Без ограничений для всех судов	В соответствии с Рез. А.529 (13)	В соответствии с Рез. А.529 (13)
Плавание в портах (при подходах к ним), в узостях при ограниченной свободе маневрирования	10	2
Прибрежные воды: ограничение для судов		
— более 4000 брт	20—200	30
— более 10000 брт	10—150	30
— более 1600 брт	10—100	30
— более 150 брт	10—100	30

Таблица 2. Требования к навигационному обеспечению неконвенционных судов

Неконвенционные суда	Точность, м	Максимальная дискретность обсерваций, с
Суда менее 150 брт	20—100	30
Суда без механического двигателя	20—100	30
Яхты	10—100	30

лив до мыса Тарханкут);

- Северо-западный регион (от мыса Тарханкут до устья Дуная с включением части реки).

В навигационном отношении побережье Украины характеризуется большой протяженностью морских каналов, большинство из которых искусственного происхождения. К этому следует добавить, что Азовское и Черное моря имеют особые неблагополучные зоны с точки зрения экологии.

Требования к навигационному обеспечению судов приведены в табл. 1—3. В этих таблицах требования по доступности навигационной информации приняты на уровне 99.8 %.

В соответствии с резолюцией IMO A815(19) точность местоопределения на подходных каналах и в узких фарватерах должна быть не хуже 10 м с вероятностью 0.95.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МОРСКОЙ НАВИГАЦИИ В УКРАИНЕ

В рамках создания перспективных радионавигационных систем для обеспечения высокоточной непрерывной навигации (средняя квадратичная погрешность 1—5 м) вдоль всего морского побережья

Таблица 3. Требования к навигационному обеспечению рыбопромысловых судов и судов, выполняющих специальные задачи

Специальные задачи, решаемые в море	Точность, м	Максимальная дискретность обсерваций, с
Поиск полезных ископаемых	1—3	10
Прокладка кабелей	1—2	10
Прокладка трубопроводов	1—2	10
Гидрографические исследования	1—10	10
Установка навигационных средств	1—3	10
Дноуглубительные работы	1—10	10
Швартовые операции	1—5	10
Рыбный промысел (в открытом море)	10—100	10
Рыбный промысел (в прибрежных водах)	5—100	10
Рыбный промысел (в узостях)	5—50	10

Украины, включая Евро-Азиатский транспортный коридор, планируется в 2001—2002 гг. разработать и ввести в эксплуатацию дифференциальную сеть СРНС на базе морских радиомаяков: Еникальского, Одесского, Херсонесского, Тарханкутского и о. Змеиный (см. рис. II на цветной вклейке). Современная сеть радиомаяков охватывает практически все районы судоходства, их расположение и нынешнее состояние позволяют построить сеть контрольно-корректирующих станций (ККС) обеспечения дифференциального режима СРНС с соблюдением международных требований.

Сеть ККС совместно с RIMS в районе Черного моря станет составной частью наземной системы функционального дополнения (GBAS).

В рамках работ по пересмотру Главы 5 «Навигационная безопасность» Конвенции по охране человеческой жизни на море (СОЛАС), проводимых IMO, предполагается с 2002 г. приступить к внедрению на морском флоте принципиально новой автоматической идентификационной системы (AIS), одной из задач которой является передача с судна навигационных данных в береговые системы управления движением судов (СУДС) и обеспечения более точной и надежной проводки судов в зоне действия системы (зона прибрежного плавания и подходных путей к портам).

Для этих целей СУДС дополнительно оснащаются базовой станцией AIS, в состав которой входит либо приемник дифференциальных поправок радиомаячного диапазона и приемник ГНСС, либо контрольно-корректирующая станция (ККС) ДГНСС, а также универсальный береговой AIS-транспондер, с помощью которого на судно передается определенный набор данных, в том числе дифференциаль-

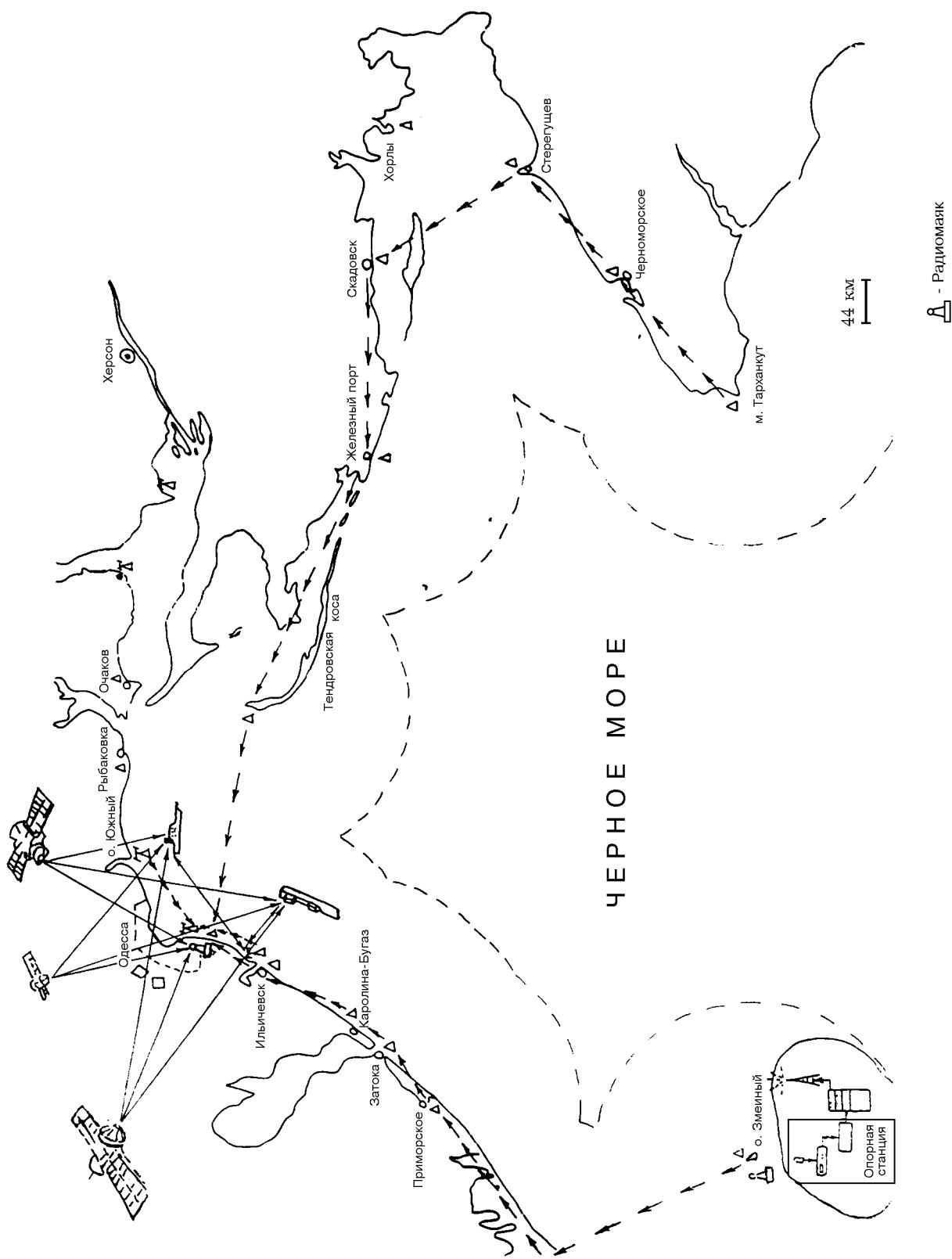


Рис. 2. Каналы передачи данных СУДС

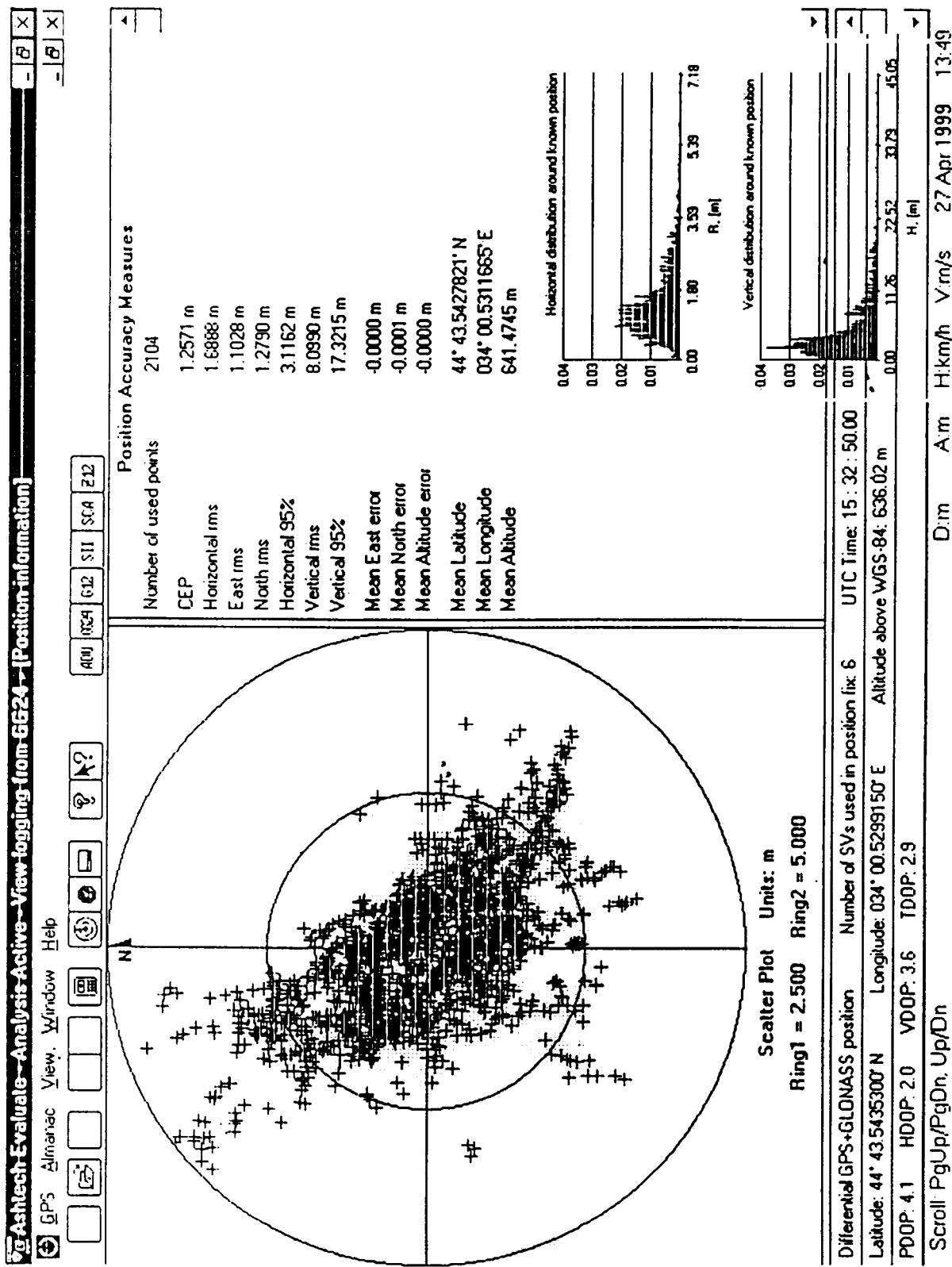


Рис. 3. Результаты экспериментальных измерений системы «Eurofix» в районе г. Симферополя

ные поправки ГНСС по УКВ-каналу для судовых приемоиндикаторов ГНСС (рис. 2).

Введение AIS в СУДС открывает новые перспективы для точной навигации в водах с обязательной лоцманской и безлоцманской проводкой.

Появляется возможность расширить зону контроля за пределы действия РЛС, получить в СУДС Минтранса (аналогично на постах наблюдения (ПН) ВМС Минобороны и Госкомграницы) кроме вычисленных в БРЛС значений курса, скорости и координат места судна (с применением сглаживающих фильтров, ограничивающих реакцию системы автосопровождения на маневр судна), действительных значений указанных параметров от AIS (измененных и вычисленных на судне), а также получить дополнительную информацию по судну (опознавательный номер судна, тип судна, его размеры и т.д.), маршруту движения и управлению. Это позволит обеспечить опознание надводных объектов при контроле их движения и переходе из зоны одного СУДС (или ПН) в зону другого СУДС (или ПН), а также повысить эффективность управления движением объектов по заданным маршрутам и проводку их в морских каналах, включая подходы к портам и базам. В перспективе необходимо вернуться к вопросу создания единой СОНО и УДС типа береговой охраны США (при смене соответствующих законодательных актов).

Наряду с внедрением спутниковых технологий в Украине проводятся работы по созданию Международной объединенной Черноморско-Средиземноморской цепи радионавигационных систем (РНС) «Чайка» и «Лоран-С» (проект по программе ТАСИС) с внедрением технологии «Eurofix», позволяющей получать высококачественные дифференциальные поправки системы GNSS по каналам РНС.

«Eurofix» сочетает преимущества и компенсирует недостатки систем GNSS и «Лоран-С/Чайка» и обладает по сравнению с другими дифференциальными системами рядом преимуществ:

- система охватывает большую площадь;
- реализуется на основе действующей инфраструктуры;
- обеспечивает улучшенную доступность линии передачи данных, в том числе и в городских условиях;
- обеспечивает резервирование навигационной информации.

Полученные результаты экспериментальных измерений в районе г. Симферополя на удалении от ККС 936908.06 м подтвердили высокую эффективность технологии «Eurofix». Средняя квадратичная погрешность местоположения с учетом корректирующих поправок по радионавигационному каналу

системы «Чайка» составила 3.37 м (рис. 3).

Данный проект окажет существенное влияние на развитие морской навигации и состояние безопасности в Черном море. Это особенно важно в связи со значительным увеличением танкерного флота, который ожидается в Черноморском регионе для транспортировки нефти из каспийского бассейна на европейский и международный рынки. В этом отношении проект окажет большое положительное влияние на экологию Черного моря. Данная инициатива также дополнит усилия ТАСИС по руководству нефтяными и газовыми трубопроводами, программы ТРАСЕКА. Она соответствует задачам вновь создаваемой паневропейской транспортной зоны в Черном море. Европейская комплексная навигационная система «Чайка/Лоран/ГЛОНАСС/GPS» создаст связь между коридорами I и IX паневропейских сетей и базу по навигации и местоопределению для обеспечения безопасности и эффективности воздушного, морского, железнодорожного, автомобильного и многовидового транспорта между Европой и Азией.

Проводимые под эгидой ЕС работы по созданию объединенной интегрированной РНС наземного/космического базирования служат дальнейшему повышению эффективности радионавигационного обеспечения в Европе.

Концепция развития РНС предлагает создание системы единого радионавигационного поля (ЕРНП), представляющего собой совокупность радионавигационных полей РНС космического и наземного базирования. Последние имеют единую координатно-временную основу и согласованную структуру широкополосных навигационных сигналов, несущие радиочастоты которых разнесены по диапазону. Создание ЕРНП требует решения как организационных, так и технических проблем, рассмотренных в работе [1].

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОТРУДНИЧЕСТВУ С ЕС

Учитывая, что через Украину проходят международные транспортные коридоры, требующие использования единого радионавигационного поля, целесообразно обеспечить увязку радионавигационного плана Украины с Европейским радионавигационным планом. С целью создания в Европе единого радионавигационного поля целесообразно в рамках ЕС завершить работы по созданию Черноморско-Средиземноморской цепочки «Лоран-С/Чайка» с реализацией технологии «Eurofix». Объединение указанного поля с создаваемым в настоящее время полем системы NELS, а в дальнейшем и

полем системы SELS, обеспечит покрытие непрерывным радионавигационным полем территории всей Европы и акваторий омывающих ее морей. С целью повышения безопасности плавания судов в Черноморском бассейне и повышения эффективности работы Евро-Азиатского коридора (ЕАТК) целесообразно СОНО и УДС Украины увязать с СОНО и УДС Черноморских государств.

Координация работ по совместным проектам возможна рабочей группой при ЕС.

ВЫВОДЫ

Интеграция усилий в создании единой СОНО и УДС Черноморских государств и единого радионавигационного поля в Европе позволит усилить стратегическую, политическую и экономическую позиции Европы в международной навигации, что

в свою очередь позволит значительно увеличить транспортные потоки через территорию Украины.

1. Кошевой А. А. Общегосударственная политика по разработке Радионавигационного плана Украины // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 4.—С. 5—11.

PROSPECTS FOR UKRAINIAN NAVAL NAVIGATION DEVELOPMENT USING RADIO-NAVIGATIONAL TECHNOLOGIES WITHIN THE RANGE OF EUROPEAN COOPERATION

A. A. Koshovyi

The materials on projection of the complex system of naval navigation support in Ukraine are proposed. It is used the technologies of satellites radio-navigation systems (SRNS) and the technologies of RNS «Chaika», «Loran-C» and «Eurofix» taking into account the proposals in cooperation with EU for the purpose to create the European united radio-navigation field.

УДК 531.383

О. В. Збруцький, О. І. Нестеренко, О. В. Прохорчук

Науково-аналітичний центр критичних технологій навігаційного приладобудування
при Національному технічному університеті України КПІ

Інтегрована система визначення координат і курсу судна для підвищення безпеки судноплавства

Розроблено та проведено дослідження інтегрованої системи визначення координат і курсу судна для підвищення безпеки судноплавства. Результати досліджень показали високі точності характеристики та надійність системи при складних умовах руху судна.

Однією з основних здач судноплавства є безпека плавання суден. Оскільки судноплавство, як і будь-яка область знань, еволюціонує, то постійно змінюється і критерій, за допомогою якого оцінюється рівень безпеки мореплавства. Зараз цей критерій встановлюється на міжнародному рівні міжнародною морською організацією IMO. Цією організацією опублікована Резолюція A.529 «Стандарт точності судноплавства» [6], який визначає необхідну точність визначення місця судна не гірше 4 % від відстані до найближчої небезпеки.

Постійне підвищення вимог по точності та дискретності визначення місця судна стимулює пошуки нових методів вимірювання навігаційних параметрів судна, розробку високоточних та надійних навігаційних систем, засобів збереження та візуалізації навігаційної інформації.

Сучасний стан навігаційного обладнання переважної більшості рухомих об'єктів, у тому числі морських та річкових, базується на використанні різних за фізичним принципом дії датчиків навігаційної інформації, таких як гірокомпас, магнітний компас, інерціальні, радіотехнічні та супутниківі навігаційні системи тощо. З огляду на те, що кожен датчик не є універсальним засобом, а має свої переваги та недоліки, давно виникнула потреба в раціональному використанні всієї сукупності навігаційної інформації, яка реалізується інтегруванням окремих навігаційних приладів у єдиний комплекс. При цьому однією з найбільш важливих задач є розробка ефективних алгоритмів інтеграції таких приладів.

У статті приводяться результати розробки та

дослідження інтегрованої навігаційної системи, яка вирішує найбільш важливі для морських та річкових рухомих об'єктів навігаційні задачі — визначення координат і курсу.

СТРУКТУРНА СХЕМА ТА АЛГОРИТМ ФУНКЦІОNUВАННЯ ІСКК

Інтегрована система визначення координат і курсу (ІСКК) судна побудована на базі коректованого гірокомпаса (ГКК), приймача сигналів супутниківих навігаційних систем (СНС) і лага. Набір навігаційного обладнання вибраний типовим для переважної більшості морських та річкових рухомих об'єктів. Так, згідно з правилами морського Реестру [5], гірокомпаси є основними навігаційними приладами, наявність яких обов'язкова на суднах із водотоннажністю більше ніж 500 тонн. Лаг традиційно використовується борту судна для визначення його швидкості, а приймач сигналів СНС, який вже широко використовується в судноплавстві, найближчим часом теж має стати обов'язковим для використання на морських суднах [4].

При виборі конкретних типів навігаційного обладнання орієнтацію було зроблено на прилади, які виробляються в Україні — малогабаритний коректований гірокомпас «Круїз» [1] та 14-канальний приймач СНС серії CH-3000, інтегрований для використання найбільш поширених супутникових систем ГЛОНАСС і GPS. Як вимірювник відносної швидкості руху судна в ІСКК запропоновано використовувати індукційний лаг IEI-2M [3].

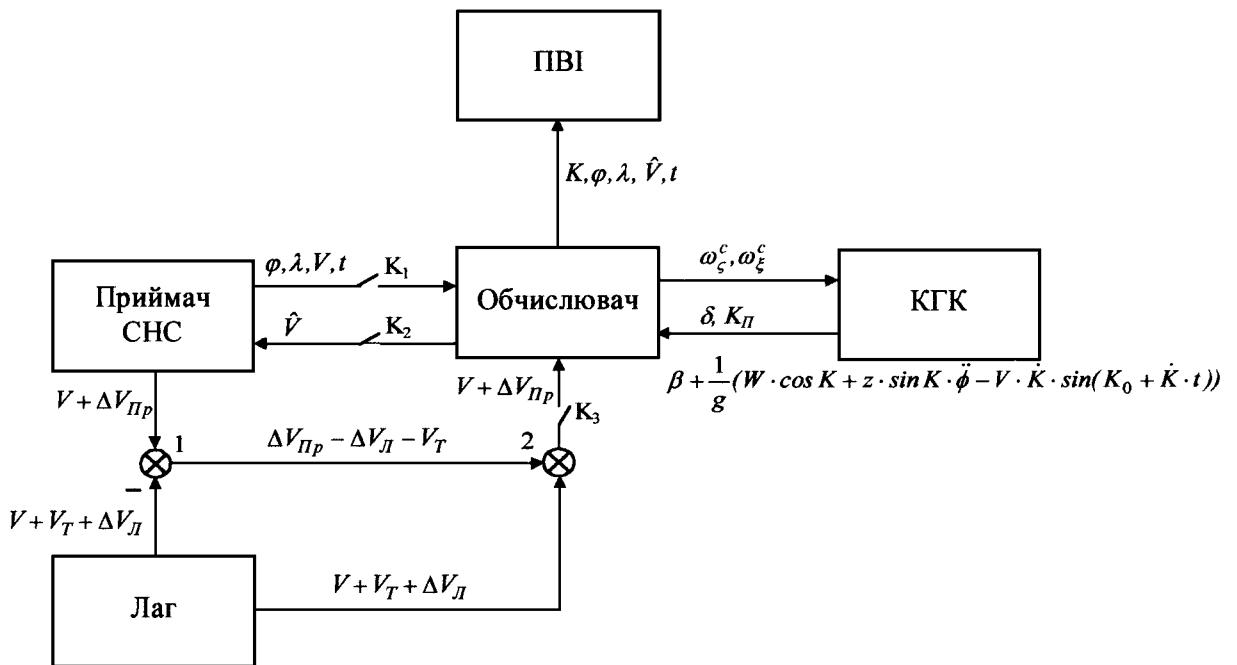


Рис. 1. Структурна схема ICKK (див. текст)

На рис. 1 показано структурну схему ICKK. Тут ПВІ — пристрій виводу інформації; K_1, K_2, K_3 — ключі; V_T — швидкість течії; ΔV_L — похибка визначення швидкості лагом; $\Delta V_{ПР}$ — похибка визначення швидкості приймачем СНС; φ і λ — широта і довгота об'єкта; K, K_Π — дійсне та приладове значення курсу судна; t — поточний час; β — кут відхилення платформи ГК від площини горизонту; δ — вихідний сигнал посилювача акселерометра; $\phi, \dot{\phi}$ — кут і кутова швидкість хитавиці відповідно; W — лінійне прискорення об'єкта; ω_x^c, ω_z^c — моменти корекції гіроскопа КГК, що усувають широтну та швидкісну девіації.

Пояснимо принцип дії ICKK. ICKK передбачає два режими функціонування — основний та аварійний.

Основним режимом функціонування ICKK називається такий режим, коли приймач СНС працює коректно, передає користувачу навігаційну інформацію. В цьому випадку значення показника якості обсервації приймача СНС дорівнює або 1 (обсервація отримана), або 2 (обсервація отримана в диференціальному режимі), ключ K_1 замкнено, а ключі K_2 та K_3 розімкнено. Приймач СНС передає на обчислювач ICKK інформацію про координати

φ, λ та швидкість судна V , а також точний час t .

Структурна схема системи побудована таким чином, щоб мати можливість усувати із сигналу лага як постійну складову похибки самого лага, так і наявність у вимірюваннях лага складової швидкості течії. Це дозволяє використовувати в ICKK навіть лаги низької точності (вертушковий або гідродинамічний). Для цього на суматор 1 одночасно надходить інформація про швидкість судна з приймача СНС $V + \Delta V_{ПР}$ та лага $V + V_T + \Delta V_L$ зі знаком мінус. Дійсне значення швидкості судна V , яке є в кожному з сигналів, віднімається, таким чином на виході суматора 1 буде загальна похибка приймача СНС та лага, яка дорівнює $\Delta V_{ПР} - \Delta V_L - V_T$. Загальна похибка подається на суматор 2, туди ж надходить сигнал з лага $V + V_T + \Delta V_L$. Тоді на виході суматора 2 одержуємо сигнал $V + \Delta V_{ПР}$, тобто дійсне значення швидкості судна з похибкою приймача СНС.

ГК «Круїз» передає на обчислювач ICKK інформацію про приладовий курс судна K_Π , а також сигнали акселерометра $\beta + \frac{1}{g} [W \cos K + z \dot{\phi} \sin K - V \dot{K} (K_0 + Kt)]$ та його підсилювача δ . Ця інформація використовується для оцінки похибок ICKK

та для формування корекції похибок КГК.

Інформація про координати, швидкість, курс та кут зносу судна, а також точний час передається споживачам через пристрій візуалізації навігаційної інформації.

Аварійним режимом функціонування ICKK називається такий режим, коли приймач СНС перестає передавати навігаційну інформацію у випадку зризу сигналу з навігаційного супутника Землі (НСЗ) (високий рівень радіоперешкод, затінення супутників, вихід з ладу НСЗ та ін.). В цьому випадку значення показника якості обсервації приймача СНС дорівнює нулю, ключ K_1 розімкнено, а ключі K_2 та K_3 замкнено. Лаг, який введено в структуру ICKK для визначення швидкості судна в аварійних режимах роботи, буде продовжувати визначати швидкість судна, використовуючи останнє значення корекції показів лага $\Delta V_{\text{пр}} - \Delta V_{\text{л}} - V_{\text{т}}$, а на вхід обчислювача буде надходити сигнал вигляду $V + \Delta V_{\text{пр}}$.

Слід зазначити, що при переході від основного режиму функціонування до аварійного структура фільтра Калмана залишиться незмінною, зміняться лише значення коваріаційних матриць випадкових процесів з урахуванням того, що інструментальна похибка вимірювання швидкості лага типу ІЕЛ-2М дорівнює ± 0.5 м/с (для порівняння: у приймача СНС, який використовується в ICKK, величина відповідної похибки ± 0.05 м/с).

Приймаючи до уваги те, що час поновлення роботи приймача СНС після зризу сигналу не перевищує кількох десятків секунд, будемо вважати, що похибка лага, обумовлена наявністю течії, залишається постійною на протязі аварійного режиму роботи ICKK.

Таким чином, обчислювач буде продовжувати отримувати інформацію про швидкість руху судна, використовуючи вимірювання лага з урахуванням останньої корекції від приймача сигналів СНС, цим самим забезпечується визначення швидкості та координат судна у випадку зризу сигналу з приймача СНС. Інформація про швидкість (координати) судна передається на приймач СНС для прискорення процесу відновлення його працездатності.

Споживач продовжує отримувати навігаційну інформацію (координати, швидкість, курс судна) з урахуванням корекції.

Алгоритм функціонування ICKK побудовано на основі модифікації дискретного оптимального фільтра Калмана (ФК) [3] шостого порядку, який враховує корельованість шумів вимірювань і випадкових вхідних впливів, а також наявність детермінованої функції часу у векторі вимірювання. В основу алгоритму ФК покладено рівняння руху

гірокомпаса, які доповнені моделями збурень — випадкової хитавиці та прискорення судна.

У ФК оцінюються такі змінні: похибка курсовизначення КГК α , кут відхилення платформи ГК від площини горизонту β ; вихідний сигнал δ посилювача акселерометра; кут φ і кутова швидкість $\dot{\varphi}$ хитавиці; лінійне прискорення об'єкта W , які разом утворюють вектор стану [1]

$$\mathbf{X}(t) = [\alpha, \beta, \delta, \varphi, \dot{\varphi}, W]^T. \quad (1)$$

Для обчислення коефіцієнтів, що залежать від проекцій кутової швидкості обертання Землі використовуються дані про широту і швидкість рухомого об'єкта, які надходять із приймача СНС.

Вектор вимірювання ICKK має вигляд

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{W}(t) + \mathbf{V}(t) + \mathbf{U}_y(t), \quad (2)$$

де

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \frac{z}{g} \sin(K) \cdot v^2 & \frac{z}{g} \sin(K) \cdot 2\mu & \frac{\cos(K)}{g} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

— матриця вимірювання;

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{z}{g} \sin(K) \sqrt{A\mu} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

— матриця зовнішніх збурень, що діють на виході системи;

$$\mathbf{V}(t) = \begin{bmatrix} \Delta\beta \\ \Delta\delta \\ \Delta W \end{bmatrix}$$

— вектор шумів вимірювань ($\Delta\beta$, $\Delta\delta$, ΔW — шуми акселерометра, підсилювача і приймача СНС);

$$\mathbf{U}_y(t) = \begin{bmatrix} -\frac{V}{g} \dot{K} \sin(K_0 + \dot{K}t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

— детермінована функція часу, що діє на виході системи.

Вектор вимірювання $\mathbf{Y}(t)$ у виразі (2) містить не тільки шуми вимірювань $\mathbf{V}(t)$, а й вектор вхідних шумів $\mathbf{W}(t)$, тобто сумарна адитивна похибка вимірювань корельована з вхідним шумом системи. Тому для оцінки вектора стану системи (1) в обчислювачі реалізується алгоритм узагальненого дискретного

фільтра Калмана [3], який враховує корельованість шумів вимірювань і випадкових вхідних впливів, а також наявність детермінованої функції часу $U_y(t)$ у векторі вимірювання $\mathbf{Y}(t)$.

Використаний в ICKK алгоритм калманівської фільтрації передбачає стробування обчислених за даними з приймача СНС значень прискорення перед визначенням чергової оцінки. Для цього перевіряється наступна нерівність

$$|W_o(k) - X_6(k/k-1)| \leq P^*(k), \quad (3)$$

де півстроби $P^*(k)$ обчислюються за правилом Зо:

$$P^*(k) = 3\sqrt{P_{66}[k/(k-1)] + \sigma_w^2},$$

а $P_{66}(k/(k-1))$ — елемент коваріаційної матриці похибок прогнозу.

При виконанні нерівності (3) у відповідності з алгоритмом ФК обчислюються оцінка і коваріаційна матриця похибки оцінки на k -му кроці, прогноз і коваріаційна матриця похибки прогнозу на $(k+1)$ -му кроці. При невиконанні нерівності (3) оцінці на k -му кроці привласнюється значення прогнозу на k -й крок за даними $(k-1)$ -го виміру, а коваріаційна матриця похибки оцінки на k -му кроці фільтрації приймається такою, ж як коваріаційна матриця похибки прогнозу на k -й крок виміру за даними $(k-1)$ -го виміру.

У результаті на виході обчислювального пристрою одержуємо оцінку поточної похибки курсовизначення $\hat{\alpha}(t)$, яка враховується при визначенні курсу судна гіромагнітним компасом, а також координати, швидкість і вектор швидкості судна.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК ІСКК

Універсальним методом оцінки динамічних характеристик ICKK є комп'ютерне моделювання. Для його проведення була розроблена програма, вихідний текст якої написаний на мові «Паскаль», а виконавчий модуль програми побудовано за допомогою компілятора «Borland Delphi IV» [2].

Моделювання роботи інтегрованої системи ICKK проводилося як напівнатурне: за допомогою комп'ютера моделювалася робота КГК «Круїз» та індукційного лага ІЕЛ-2М, а за навігаційні вимірювання, вироблені за допомогою приймача сигналів СНС, слугували реальні дані з 14-канального інтегрованого GPS/ГЛОНАСС приймача серії СН-3000, встановленого на нерухомій основі з точно відомими координатами. При цьому дані про швидкість і широту об'єкта використовувалися у програмі як помилки вимірювання швидкості і координат

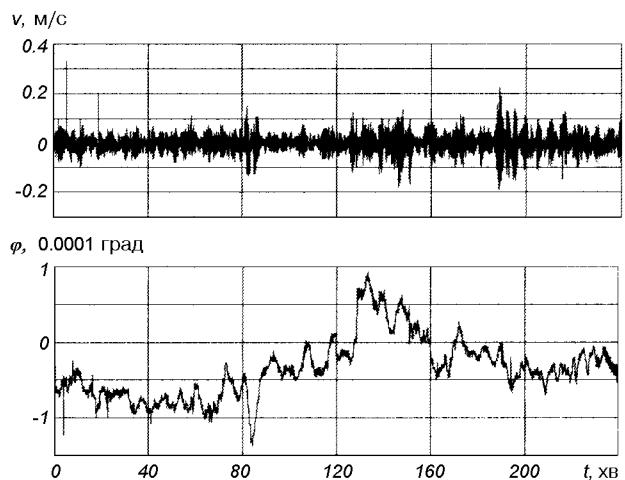


Рис. 2. Похибка визначення лінійної швидкості і широти об'єкта приймачем СНС

нат рухомого об'єкта приймачем СНС.

Отримані при роботі 14-канального інтегрованого GPS/ГЛОНАСС приймача серії СН-3000 результати визначення лінійної швидкості і широти об'єкта приведені на рис. 2.

Середнє квадратичне відхилення (СКВ) помилок визначення швидкості σ_v і широти σ_φ при цьому склали [6]:

$$\begin{aligned} \sigma_\varphi &= 2.9 \cdot 10^{-5} \text{ град;} \\ \sigma_v &= 0.05286 \text{ м/с.} \end{aligned} \quad (4)$$

Під час проведення напівнатурного моделювання використовувалися чисельні значення параметрів ГК «Круїз» [1] і задавалися такі параметри збурень:

— моделі швидкості V і прискорення W об'єкта задавалися як відомі функції часу:

$$\begin{aligned} V(t) &= \begin{cases} 0.05t, & 0 \leq t \leq 180 \text{ с,} \\ 9 \text{ м/с,} & t > 180 \text{ с,} \end{cases} \\ W(t) &= \begin{cases} 0.05 \text{ м/с}^2, & 0 \leq t \leq 180 \text{ с,} \\ 0, & t > 180 \text{ с;} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

— нерегулярна хитавиця рухомого об'єкта $\varphi(t)$ апроксимувалася випадковим процесом із кореляційною функцією виду

$$K_\varphi(\tau) = D_\varphi e^{-\mu|\tau|} \left(\cos \nu \tau + \frac{\mu}{\nu} \sin \nu |\tau| \right), \quad (6)$$

де D_φ — дисперсія; ν — переважна частота випадкових коливань; μ — коефіцієнт нерегулярності хитавиці.

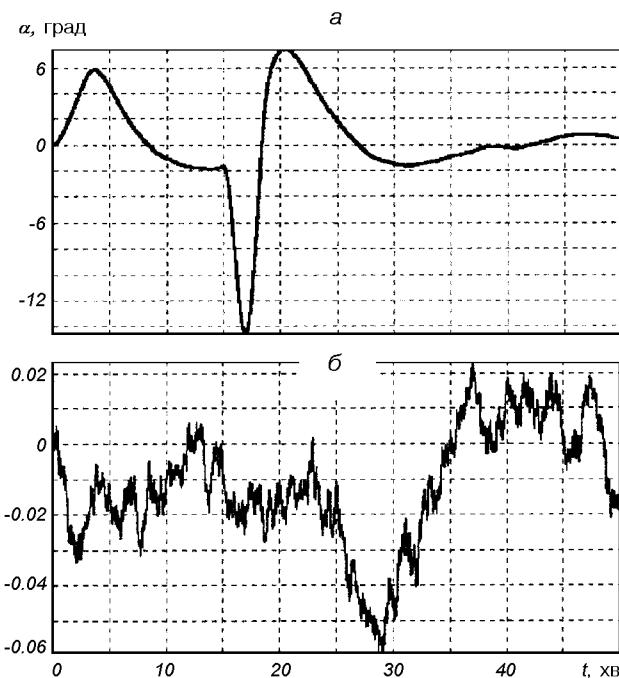


Рис. 3. Похибка визначення курсу КГК «Круїз» (а) та ICKK (б)

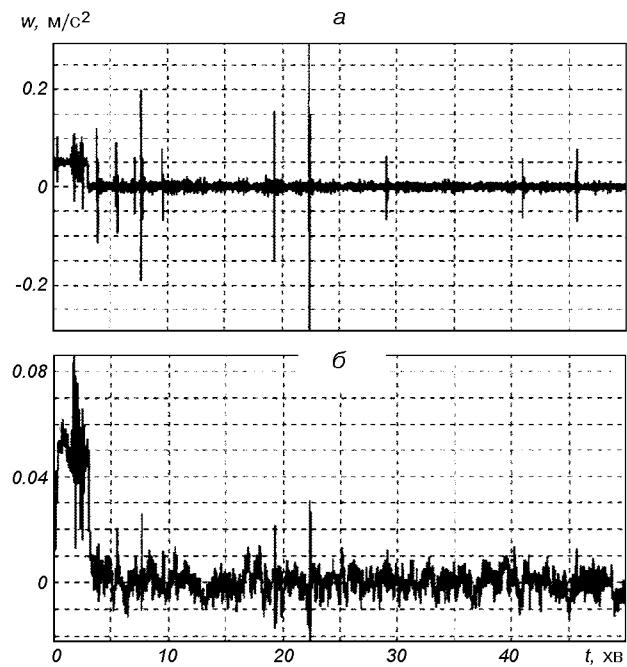


Рис. 4. Прискорення судна: а — обчислене за даними з приймача СНС, б — оцінене за допомогою фільтра Калмана в ICKK

При моделюванні використовувалися такі значення параметрів нерегулярної хитавиці: $D_\phi = 0.12 \text{ рад}^2$, $\nu = 0.6 \text{ рад}$ та $\mu = 0.01 \text{ рад}/\text{s}$;
— моделювалася повна циркуляція судна з 15 по 19 хв, тобто $T_u = 240 \text{ с}$;
— задавалася відстань від центра мас судна до місця кріплення ГК: $z = 3 \text{ м}$.

На рис. 3, а приводяться результати моделювання руху гірокомпаса, які показують, що при заданих умовах хитавиці і маневрування об'єкта похибка визначення кута курсу гірокомпасом може перевищувати 14° .

У розробленій ICKK похибка курсовизначення зменшилася до розміру помилки оцінки похибки ГК фільтром Калмана і склала $\sigma_\alpha = 0.045^\circ$ (рис. 3, б).

Значення прискорення, отримане при диференціюванні даних з приймача СНС про швидкість судна, приведене на рис. 4, а, при цьому СКВ помилки визначення прискорення σ_v склало $0.019 \text{ м}/\text{s}^2$. На рис. 4, б показані результати оцінки прискорення об'єкта за допомогою фільтра Калмана в ICKK.

Завдяки згладжувальним властивостям фільтра Калмана СКВ помилки визначення прискорення

знизилося з $\sigma_v = 0.019$ до $8.538 \cdot 10^{-5} \text{ м}/\text{s}^2$.

Приведені вище результати напівнатурного моделювання показують високі точності характеристики розробленої інтегрованої системи ICKK при складних умовах руху об'єкта. При заданні різних значень параметрів збурень визначаються максимально можливі похибки ICKK. Так, при використаних у ході моделювання параметрів випадкової хитавиці і маневрування об'єкта максимально можливі похибки ICKK склали:

- визначення кута курсу $\Delta K_{\max} = 0.25^\circ$;
- по визначенню прискорення об'єкта $\Delta W_{\max} = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}/\text{s}^2$.

Зазначені похибки досить низькі навіть для спокійних умов плавання. Згідно з вимогами морського Реєстру похибка курсовизначення при плаванні прямим курсом без хитавиці не повинна перевищувати $\pm 0.75^\circ/\text{sec}(\varphi)$, а при хитавиці і маневруванні — $2...3^\circ$. Похибка визначення прискорення об'єкта за допомогою ICKK взагалі близька до порогу чутливості навігаційних акселерометрів середньої точності.

Помилки виміру поточних координат об'єкта зберігаються на рівні помилок використовуваного в ICKK приймача СНС CH-3102. При зриві сигналу

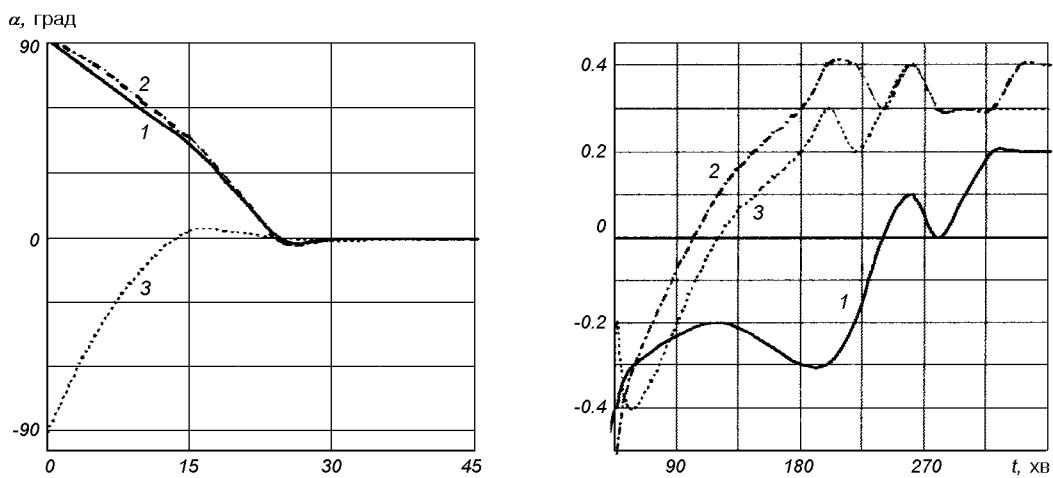


Рис. 5. Результати стендового випробування гірокомпаса «Круїз» при трьох пусках приладу

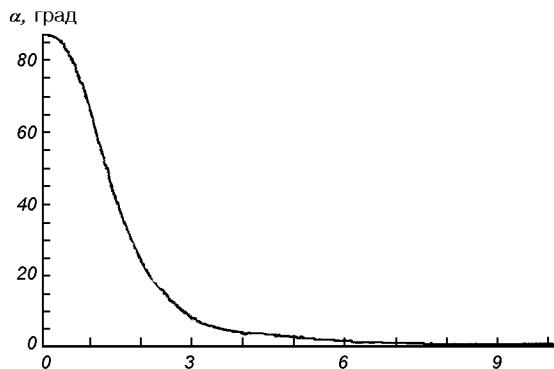
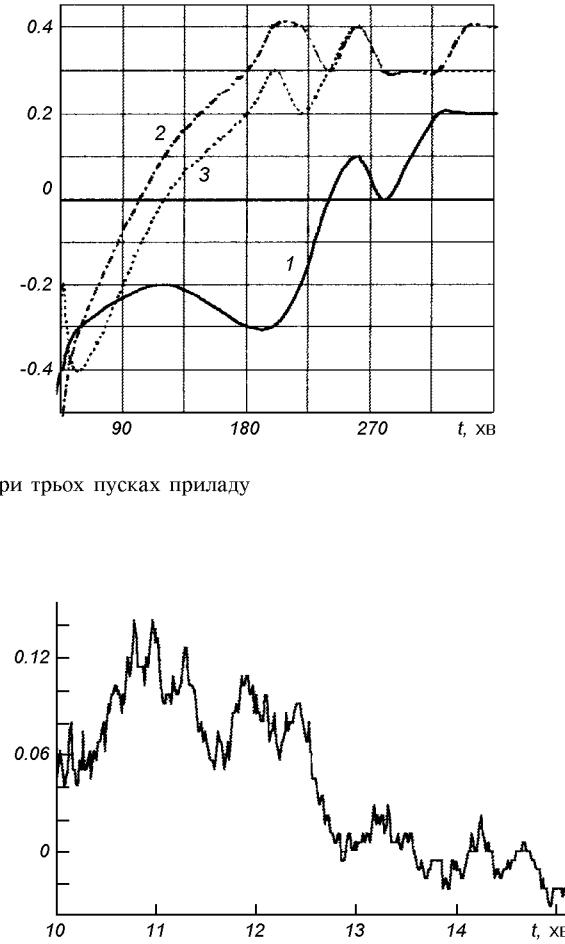


Рис. 6. Результати стендового випробування ICKK



СНС завдяки оцінці в ICKK швидкості об'єкта скорочується час поновлення працездатності приймача.

СТЕНДОВІ ВИПРОБУВАННЯ ICKK

З метою перевірки теоретичних результатів та напівнатурного моделювання роботи ICKK були проведені стендові випробування макета інтегрованої навігаційної системи у складі коректованого гірокомпаса «Круїз», приймача сигналів СНС СН-3002 «Бриз» та ПЕОМ, яка використовувалася для поєднання приладів в єдину систему, обробки інформації та візуалізації результатів роботи.

В ході стендових випробуваннях на час готовності ICKK центральний прилад КГК «Круїз» роз-

міщався на спеціальному стенді і виставлявся в площину географічного меридіана з помилкою не більше $\pm 0.1^\circ$. Потім платформа гірокомпаса вручну поверталася на кут 90° або -90° і включалася система. По ТУ на гірокомпас «Круїз» вважається, що гірокомпас прийшов у площину меридіана, якщо на приладі керування засвітиться світлодіод «READY» і наступні після цього відліки курсу знаходяться у межах $\pm 0.1^\circ$. При цьому приймач сигналів СНС СН-3002 «Бриз» видавав навігаційну інформацію, яка використовувалася в обчислювальному пристрої для реалізації алгоритмів, представлених вище.

На рис. 5 приведені результати випробування гірокомпаса «Круїз» при трьох пусках приладу. Середній час готовності гірокомпаса до роботи склав 47 хв.

На рис. 6 показані результати стендових випробувань ICKK. Середній час готовності ICKK до роботи склав 8 хв. Слід зазначити, що починаючи з 10 хв СКО оцінки похибки курсовизначення в ICKK не перевищувало 0.08° .

1. Збруцький А. В., Нестеренко О. І., Старицький Л. П. Розробка малогабаритних корректируемых гирокомпасов // Третья Санкт-Петербургская международная науч.-техн. конф. по интегрированным навигационным системам. — С.-Петербург, 1996.—С. 193—199.
2. Збруцький О. В., Нестеренко О. І., Прохорчук О. В. Оцінка динамічних похибок інтегрованої навігаційної системи визначення координат і курсу рухомого об'єкта // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів: Зб. Наук. пр. — Київ, УТУ, ТАУ.—1999.—Вип. 8.—С. 23—27.
3. Збруцький О. В., Нестеренко О. І., Прохорчук О. В. Визначення координат і курсу рухомого об'єкта інтегрованою навігаційною системою // Наукові вісті НТУУ

КПІ.—2000.—№ 2.—С. 79—83.

4. Кошевий А. А. Сучасні техніко-експлуатаційні вимоги до засобів навігації та судноводіння // Механіка гіроскопічних систем.—1997.—Вип. 14.—С. 119—127.
5. Правила по конвенціонному обладнанню морських судов // В кн.: Регистр СССР-1990 г.—Л.: Транспорт. 1989.—С. 45—213.
6. IMO Resolution A.529 (13). Accuracy standards for navigation. — (Adopted on 17 Nov. 1983).

INTEGRATED SYSTEM FOR VESSEL COORDINATES AND HEADING DETERMINATION FOR IMPROVEMENT OF ACCIDENT PREVENTION OF SHIPPING

O. V. Zbruts'kyi, O. I. Nesterenko, O. V. Prokhorchuk

Integrated system for vessel coordinates and heading determination for improvement of navigation accident prevention was developed and investigated. The results of investigations showed a high accuracy and system reliability during the difficult condition of vessel motion.

УДК 531.383

О. В. Збруцький, Ю. В. Гогун

Національний технічний університет України КПІ

Навігація наземного об'єкта за допомогою інтегрованої навігаційної системи

Аналіз сучасного стану навігаційних розробок показує, що жорсткі вимоги, які висуваються до навігаційного обладнання наземних об'єктів, можуть бути задоволені лише за умови інтегрування різномірних навігаційних датчиків та систем в єдиний навігаційний комплекс. У статті запропоновані алгоритм і структурна схема інтегрованої навігаційної системи, що дозволить вирішувати найважливіші для наземної навігації задачі — визначення координат і курсу об'єкта, та наведені результати напівнатурного моделювання роботи системи.

В даний час найпоширенішим способом навігації наземних рухомих об'єктів є використання автономних навігаційних систем, наприклад одометричної навігаційної системи (ОНС). Однак вона поряд із цілим рядом позитивних якостей має й істотний недолік — властивість накопичувати похибку визначення координат і курсу об'єкта з часом [2, 3]. У той же час апаратура споживача супутниковых навігаційних систем (СНС) позбавлена зазначеного недоліку, забезпечує глобальність і високу точність навігаційного забезпечення, однак не може бути віднесена до класу автономних навігаційних засобів. Використання СНС у комплексі з ОНС дозволяє виключити недоліки окремих систем і підвищити надійність та ефективність навігаційного забезпечення.

У процесі інтегрування ОНС і СНС в апаратурі користувача СНС від ОНС використовується апріорна інформація про координати і просторову орієнтацію об'єкта для зменшення часу першого відліку навігаційних визначень, інформація про швидкість об'єкта для підвищення точності систем стеження за кодами і несучими частотами, а також для прискорення повторного захоплення сигналів супутників при зриві стеження.

В ОНС від апаратури користувача СНС (при нормальному прийомі сигналів від супутників) використовується інформація про точне місцеположення рухомого об'єкта для корекції ОНС з тим, щоб скоректована ОНС змогла забезпечувати точну навігацію об'єкта при затіненнях сигналів супутників у точці прийому, зривах стеження за сигналами, раптових відмовах супутників і т. і.

До складу розробленої інтегрованої навігаційної системи входить механічний датчик швидкості, гіроскоп напрямку, маятниковий датчик кута нахилу та приймач сигналів СНС [1].

Структурна схема інтегрованої НС показана на рис. 1. Тут ГН — гіроскоп напрямку; МДШ — механічний датчик швидкості; МДК — маятниковий датчик кута; АК СНС — апаратура користувача супутниковых навігаційних систем; ООНС — обчислювач одометричної навігаційної системи; БОП — блок оцінки похибок; ПВІ — пристрій візуалізації інформації; Кл1, Кл2, Кл3, Кл4 — ключі; С1, С2 — суматори; x^c, y^c, z^c — координати об'єкта, що визначаються АК СНС; V^c, w^c — швидкість та прискорення об'єкта, що визначаються АК СНС; t — поточний час; δK — сигнал приросту кута курсу з ГН; V — сигнал швидкості об'єкта з механічного датчика швидкості; x^o, y^o — горизонтальні координати об'єкта, що визначаються в обчислювачі одометричної навігаційної системи; K^o, V^o — швидкість та кут курсу об'єкта, що визначаються в обчислювачі одометричної навігаційної системи; θ_m — кут тангажу об'єкта, вимірюваний маятниковим датчиком кута; θ — істинний кут тангажу; g — прискорення вільного падіння; β — кут горизонтальної міжрамкової корекції гіроскопа напрямку; Δ_v — похибка масштабного фактора механічного датчика швидкості; Δ_x, Δ_y — похибки визначення горизонтальних координат об'єкта; $\hat{\Delta}K, \hat{w}_{1dp}, \hat{\Delta}_v, \hat{w}$ — оцінки похибки кута курсу, дрейфу гіроскопа, масштабного фактора механічного датчика швидкості і прискорення об'єкта.

Призначена для визначення координат, швид-

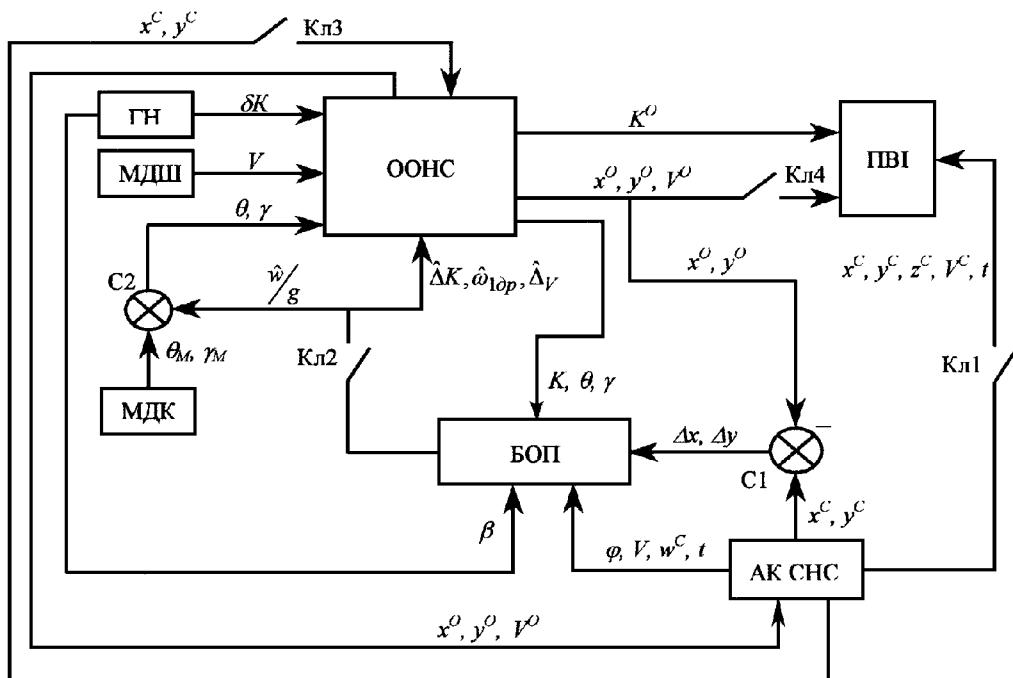


Рис. 1. Структурна схема інтегрованої НС (див. текст)

кості і курсу рухомого наземного об'єкта, інтегрована НС має два режими функціонування. Штатний режим роботи передбачає, що в АК СНС відбувається прийом і обробка інформації від достатньої кількості навігаційних супутників (мінімум чотирьох), що дозволяє приймачу сигналів СНС виробляти високоточні дані про координати і шляхову швидкість об'єкта, а також видавати інформацію про поточний час. Крім цього, в БОП генеруються оцінки похибок ОНС.

Переведення інтегрованої НС у нештатний режим роботи здійснюється у випадку появи інформаційного прaporя низкою достовірності даних АК СНС. У нештатному режимі переривається процес оцінювання похибок, а при вирішенні навігаційної задачі в блоці ООНС використовуються останні перед переходом у позаштатний режим оцінки похибки кута курсу, дрейфу гіроскопа та масштабного фактора МДШ.

В інтегрованій НС для оцінювання похибок автономного блока використовується оптимальний фільтр Калмана (ФК) восьмого порядку, в основі якого є рівняння руху гіроскопа напрямку, доповнені моделлю механічного датчика швидкості, моделями збурень та рівняннями похибок визначення горизонтальних координат об'єкта ОНС.

У ФК оцінюються змінні ΔK , w , Δ_v , Δx , Δy , а також кут міжрамкової корекції ГН β , дрейфи

гіроскопа ω_{1dp} , ω_{2dp} , що утворюють вектор стану системи

$$\mathbf{X}(t) = [\Delta K, \beta, w, \Delta_v, \omega_{1dp}, \omega_{2dp}, \Delta x, \Delta y]^T.$$

Математична модель інтегрованої системи запишеться у вигляді рівнянь

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_\eta(y \sin K + \theta \cos K + x_2) - x_5, \\ \dot{x}_2 &= -\omega_\eta x_1 - \omega_\xi + \dot{K}(\theta \sin K - \gamma \cos K) - \\ &\quad - \dot{\gamma} \sin K - \theta \cos K - \frac{k}{H} x_2 - x_6, \\ \dot{x}_3 &= W_1, \quad \dot{x}_4 = 0, \\ \dot{x}_5 &= W_2, \quad \dot{x}_6 = W_3, \\ \dot{x}_7 &= -x_1 V \cos \theta \sin K - x_3 \frac{1}{g} V \sin \theta \cos K + x_4 V \cos \theta \cos K, \\ \dot{x}_8 &= x_1 V \cos \theta \cos K - x_3 \frac{1}{g} V \sin \theta \sin K + x_4 V \cos \theta \sin K, \end{aligned}$$

де x_i ($i = 1 \dots 8$) — компоненти вектора стану; ω_η , ω_ξ — проекції кутової швидкості Землі на осі географічної системи координат $O\xi\eta\sigma$; γ — кут крену об'єкта; k/H — кутова швидкість горизонтальної міжрамкової корекції, W_i ($i = 1, 2, 3$) — вхідні білі шуми.

Вектором вимірів запропонованої системи є

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}(t) \cdot \mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t),$$

де матриця вимірювань

$$\mathbf{C}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

а вектор $\mathbf{V}(t)$ — це шум вимірювання кута горизонтальної корекції в гіроскопі напрямку, шум вимірювання прискорення об'єкта приймачем СНС та шум вимірювання координат місцезнаходження об'єкта приймачем СНС.

Використовуючи алгоритм дискретного фільтра Калмана, будемо мати на виході БОП оптимальні оцінки змінних вектора стану системи, що використовуються при обчисленні координат об'єкта [4], однак це твердження вірно лише за умови, що всі параметри математичної моделі точно відомі. На практиці забезпечити виконання цієї умови неможливо, тому актуальною є задача оцінювання чутливості алгоритму функціонування інтегрованої НС до неточності задання параметрів математичної моделі системи.

Отримані вирази оцінки зниження точності i -го компонента вектора стану дозволили побудувати графіки відносного погрішення точності оцінювання елементів вектора стану в залежності від неточності задання параметрів математичної моделі. На рис. 2 представлено графік відносного погрішення точності оцінювання дрейфу гіроскопа $\omega_{\text{др}}$ в залежності від неточності задання інтенсивності шуму W_2 в моделі дрейфу гіроскопа $q_{\omega_{\text{др}}}$. Графіки відносного погрішення точності оцінювання інших елементів вектора стану мають аналогічний характер та чисельні показники.

Як показав аналіз, алгоритм оцінювання елементів вектора стану, найважливіших з точки зору вирішення навігаційної задачі як в штатному, так і в нештатному режимах функціонування, не є чут-

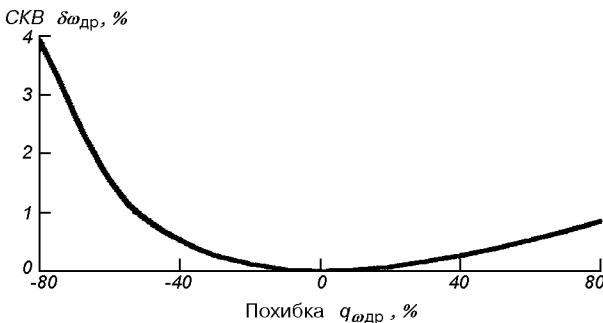


Рис. 2. Залежність відносної похибки оцінювання $\omega_{\text{др}}$ від відносної похибки $q_{\omega_{\text{др}}}$

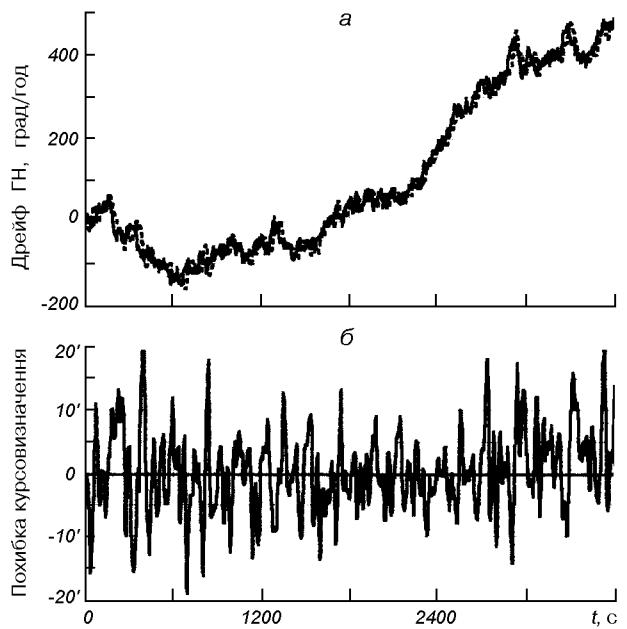


Рис. 3. а — дійсний дрейф ГН (сузільна крива) та його оцінка (пунктир), б — похибка курсовизначення

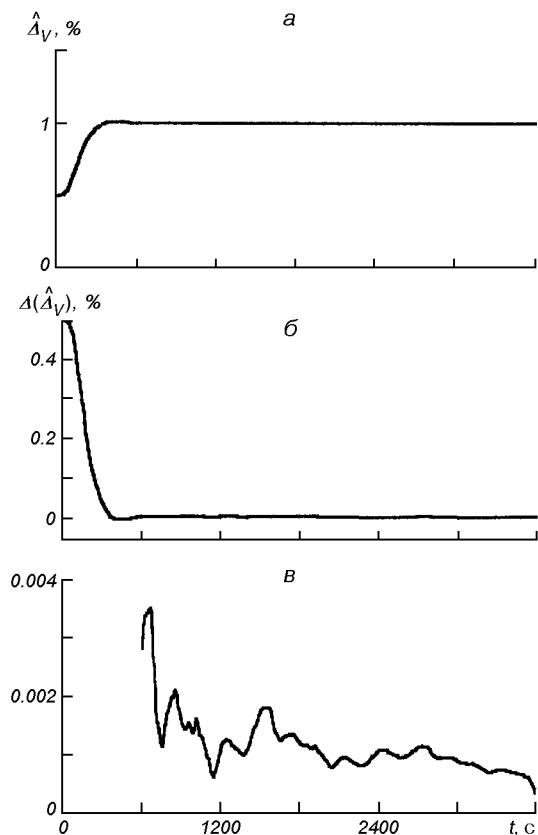


Рис. 4. Оцінка похибки масштабного фактора МДШ (а) та помилка оцінки похибки масштабного фактора МДШ (б, в)

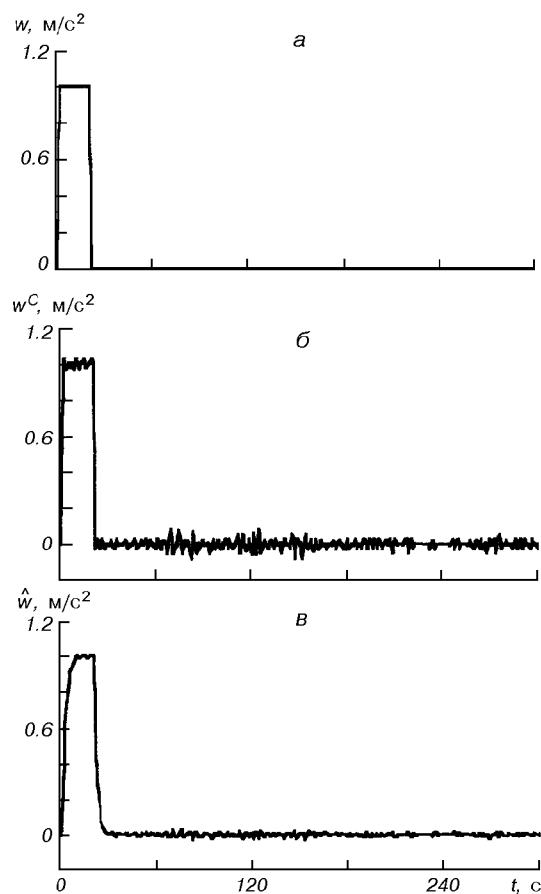


Рис. 5. Прискорення об'єкта: *а* — тестове; *б* — визначене за даними з АК СНС, *в* — оцінка прискорення об'єкта

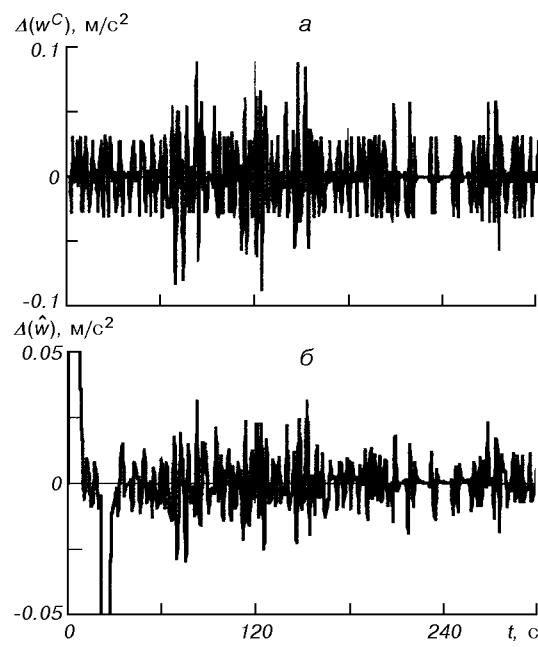


Рис. 6. *а* — похибка визначення прискорення об'єкта за даними з АК СНС, *б* — похибка оцінки прискорення у ФК

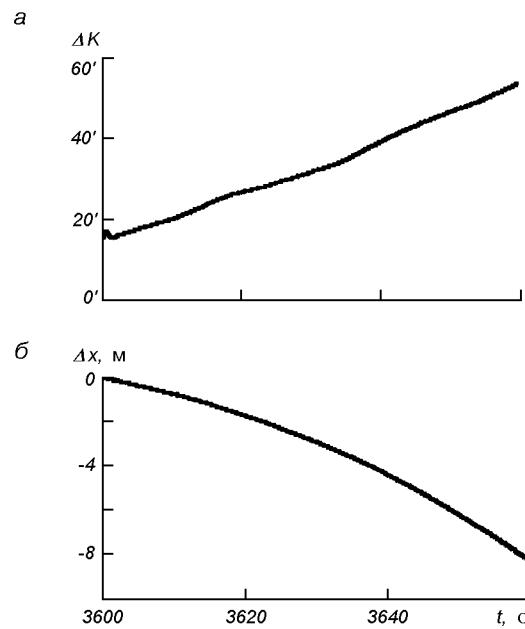
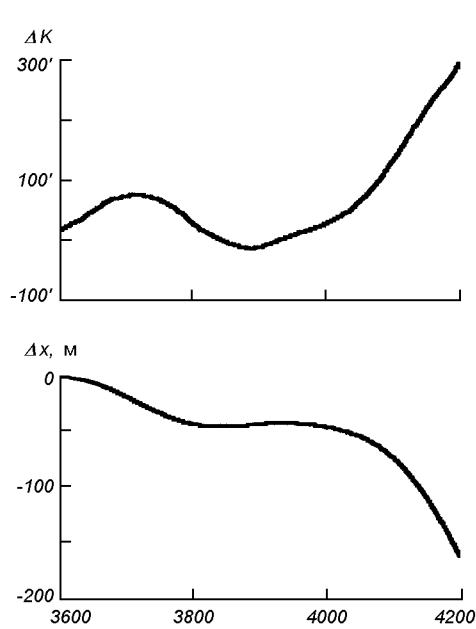


Рис. 7. Похибка курсовизначення (*а*) та визначення координат (*б*) інтегрованої НС в непштатному режимі

ливим відносно неточності задання параметрів математичної моделі, що істотно підвищує точність та надійність навігаційних визначенень, що отримуються за допомогою інтегрованої навігаційної системи.

Для проведення комп'ютерного моделювання був розроблений пакет прикладних програм, що складається з модуля, написаного на мові «Pascal», а також програм, створених у пакетах «Matlab 2001» та «Mathcad 2000 Professional».

Моделювання роботи інтегрованої НС здійснювалося як напівнатурне: на ЕОМ моделювалася робота гіроскопа напрямку, механічного датчика швидкості, маятникового датчика кута та обчислювального блока одометричної навігаційної системи, а за навігаційні вимірювання АК СНС використовувалися реальні дані 14-канального інтегрованого GPS/ГЛОНАСС приймача СН-3003 «Базальт», встановленого на нерухомій основі з точно відомими координатами. При цьому дані про широту, довготу та швидкість об'єкта (за виключенням точно відомих значень координат і швидкості) використовувалися як похиби визначення координат та швидкості об'єкта приймачем сигналів СНС.

Середні квадратичні відхилення визначення швидкості, широти та довготи склали:

$$\sigma_v = 0.05 \text{ м/с}; \quad \sigma_\varphi = \sigma_\lambda = 2 \text{ м}.$$

При напівнатурному моделюванні використовувалися такі чисельні параметри ОНС, до складу якої входять ГН, МДШ та МДК: похибка масштабного фактора МДШ $\Delta_v = 0.01$; середнє квадратичне відхилення (СКВ) похибки визначення кута тангенса σ_θ та крену σ_γ МДК $\sigma_\theta = \sigma_\gamma = 2 \cdot 10^{-3}$ рад; характер зміни випадкового дрейфу ГН показано на рис. 3.

При моделюванні передбачалося, що координати початкової точки руху рівні $\varphi_0 = 50^\circ$ пн. ш., $\lambda_0 = 30^\circ$ сх. д. Моделі курсу K , кутів тангенса θ і крену γ прискорення w і швидкості V задавалися як відомі функції часу:

$$K = 45^\circ; \quad \theta = \gamma = 0^\circ;$$

$$w = \begin{cases} 1 \text{ м/с}^2 & 0 \leq t \leq 20 \text{ с}, \\ 0, & t > 20 \text{ с}, \end{cases}$$

$$V = \begin{cases} 1t & 0 \leq t \leq 20 \text{ с}, \\ 20 \text{ м/с}, & t > 20 \text{ с}. \end{cases}$$

Наведемо результати моделювання штатного режиму роботи інтегрованої НС, при якому здійснюються оцінювання та врахування похибок одометричної навігаційної системи (рис. 3—8).

На рис. 3 подані графіки дійсного дрейфу ГН та його оцінки (оцінка зображена пунктиром). Помилка оцінки похибки курсопоказу ГН буде похиб-

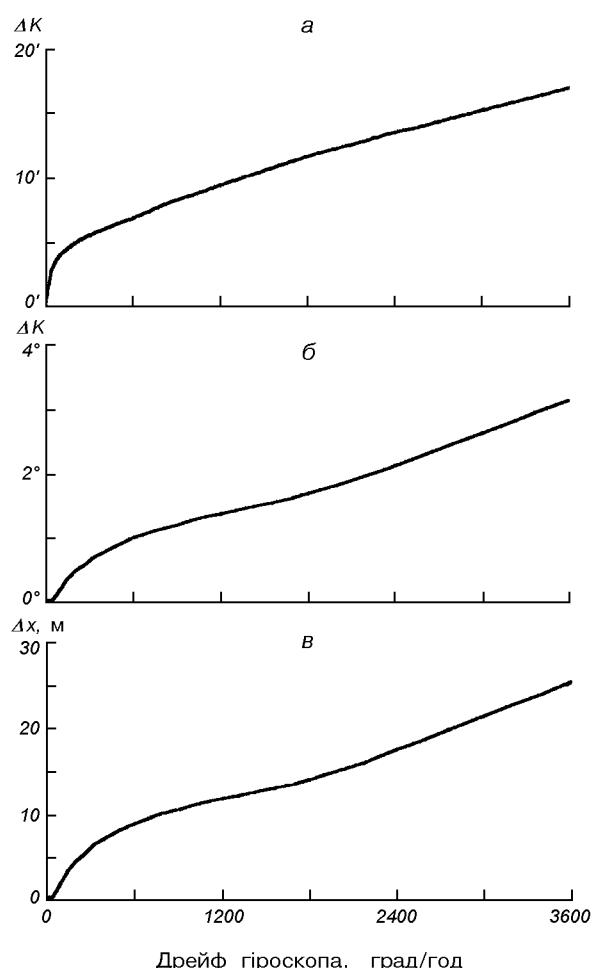


Рис. 8. *a* — похибка курсовизначення модифікації інтегрованої НС у штатному режимі, *b*, *v* — похибка курсовизначення та визначення координат в нештатному режимі

кою курсовизначення інтегрованої навігаційної системи (рис. 3, *b*).

Таким чином, СКВ похибки курсовизначення інтегрованої навігаційної системи склало $6.541'$ (рис. 3, *b*).

На рис. 4, *a* приводиться оцінка похибки масштабного фактора МДШ, а на рис. 4, *b*, *v* — помилка оцінки похибки масштабного фактора МДШ. Видно, що вже через 12 хв після початку руху помилка оцінки похибки масштабного фактора одометра не перевищує 0.002% при номінальній величині похибки масштабного фактора 1% .

Проаналізуємо якість оцінювання лінійного прискорення (рис. 5, 6). Відзначимо, що СКВ помилки обчислення прискорення за даними з АК СНС склало 0.019 м/с^2 , а СКВ помилки оцінки прискорення у фільтрі Калмана склало 0.01 м/с^2 .

Проаналізуємо роботу інтегрованої НС у нештатному режимі. Будемо вважати, що в момент часу $t = 3660$ с стався зрив прийому сигналів СНС, що стало підставою для переведення системи в нештатний режим, при якому інформація про навігаційні параметри руху об'єкта надходить із блока обчислювача ОНС. Наведемо результати моделювання нештатного режиму інтегрованої НС на короткому (60 с) та довгому (600 с) відрізках часу (рис. 7).

З метою узагальнення результатів досліджень було проведено напівнатурне моделювання інтегрованої НС, побудованої на різних по точності гіроскопах напрямку (рис. 8). За відрізок часу роботи системи в нештатному режимі був обраний інтервал, рівний 60 с. Видно, що у штатному режимі похибка визначення поточних координат об'єкта зберігається на рівні похибки використовуваного в інтегрованій НС приймача СНС CH-3103, а похибка курсовизначення не перевищує кількох кутових мінут. В нештатному режимі в залежності від точності гіроскопа, що входить до складу інтегрованої НС, похибка визначення місцезнаходження складає від декількох десятків сантиметрів до 25 м, а похибка визначення кута курсу — від кількох кутових мінут до кількох градусів. Результати досліджень, які в узагальненому вигляді відображені на рис. 8, свідчать про широку сферу застосування інтегрованої НС, що включає до скла-

ду автономний блок середньої або низької точності та приймач СНС.

1. Збруцький О. В., Гогун Ю. В. Інтегрована навігаційна система рухомого наземного об'єкта // III Міжнародна науково-техніческая конференция «Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование подвижных объектов». Сб. докл. — 2001.—С. 168—173.
2. Кузнецов М. И. Танковые навигационные системы: Учеб. пособие. — М.: Воениздат, 1978.—120 с.
3. Полухин И. Системы топогеодезического обеспечения полевой артиллерии // Зарубежное военное обозрение.—1991.—№ 8.—С. 24—28.
4. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Пер. с англ. под ред. Б. Р. Левина. — М.: Связь, 1976.—496 с.

GROUND OBJECT NAVIGATION USING INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM

O. V. Zbruts'kyi, Yu. V. Gogun

The analysis of the modern state of the navigation developments showed, that the strict requirements to the ground objects navigation equipment may be realized only under condition of the different navigation sensors and systems integration into the united navigation complex. It is proposed the algorithm and block diagram of the integrated navigation system to provides for solution of the most important ground navigation problems — object heading and position determination. The results of the system functioning simulation are also shown.

Б. И. Макаренко¹, А. И. Горб²

¹АТ Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

²Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків

Применение навигационных технологий систем на глобальных наземном спутниковых транспорте

Приведено загальні відомості про використання технології глобальних супутниковых навігаційних систем (ГСНС) для навігації наземного (автомобільного і залізничного) транспорту на прикладі однієї з діючих ефективних систем, що використовують вказану технологію. Характеризуються принципи дії подібних систем, шляхи їхньої реалізації і досяжні технічні параметри.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

ГСНС (GPS) дает уникальную возможность глобального высокоточного координатно-временного обеспечения [1, 3, 4]. Пользователями ГСНС могут быть как подвижные объекты, так и стационарные, нуждающиеся в высокоточном определении координат и поправок к местной шкале времени.

С помощью ГСНС осуществляется высокоточная навигация космических аппаратов в ближнем космосе, самолетов, других воздушных летательных аппаратов, морских и речных кораблей, наземных транспортных средств, в том числе: для диспетчерских и следящих систем, скорой помощи, курьерской службы, систем посадки самолетов и т. д. [5].

Для высокоточных определений на земле, в море, в воздухе ГСНС находят следующие применения: геодезия, геоинформационные технологии (ГИС), топография, геофизика и геология, гидрография и фотограмметрия, нефтяные изыскания.

Условная классификация GPS-приемников по применению приведена в табл. 1 [2].

Одним из наиболее динамично развивающихся секторов мирового рынка аппаратуры потребителя ГСНС является применение GPS для управления транспортом [2, 7].

2. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ГСНС НА ЖЕЛЕЗНОДОРЖНОМ И АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ

Современная аппаратура потребителей ГСНС обеспечивает автономную высокоточную навигацию железнодорожного и автомобильного транспорта, включая отдельные поезда и автомобили.

В настоящее время широкое развитие и распространение получают диспетчерские системы управления и контроля железнодорожных и автомобильных транспортных средств — Automatic Vehicle Location

Таблица 1. Классификация аппаратуры потребителей ГСНС (GPS-приемников) по применению

Назначение	Цена, USD	Краткая характеристика
Позиционирование (местоопределение)	500—1000	Только стационарный режим; портативный; малоканальный, точность позиционирования ≈ 100 м; система автоматизированной записи данных отсутствует
Навигация	1000—20000	Дифференциальный режим; точность — несколько метров; специальные навигационные объекты
Геоинформационные технологии (ГИС)	3000—30000	Дифференциальный режим; точность — субметровый диапазон; автоматизированная запись данных; интерфейс с матобеспечением для ГИС
Геодезия/Геодинамика	10000—50000	Дифференциальный режим; измеряется фаза несущей; точность — см; автоматизированное накопление данных
Тайминг	До 60000	Применяется исключительно в целях контроля времени, точность 1 мкс.
Военное назначение	До 60000	Точность в стационарном положении 16 м (в режиме S/A ограничения); сверхвысокая точность в дифференциальном режиме; имеется запрет для гражданских пользователей

(AVL) [1, 2, 6—8]. Предназначены они для обеспечения оперативного контроля и управления транспортом, а также для решения вопросов безопасности при перевозке особо опасных грузов (вооружение, боеприпасы, радиоактивные и промышленные отходы), ценностей, пассажиров. Эти системы могут одинаково надежно функционировать на железнодорожном транспорте на открытых участках путей метрополитенов, в городском электротранспорте. Наряду с решением задач безопасности внедрение AVL-систем повышает эффективность использования железнодорожного и автомобильного транспорта: снижает потери, связанные с простоями техники, позволяет более организованно проводить плановые ремонты и техническое обслуживание транспортных средств в зависимости от их реального пробега, улучшает дисциплинированность, ответственность машинистов, водителей, обеспечивает объективную оценку трудовых затрат персонала. AVL-системы появились благодаря бурному развитию вычислительной техники, микроЭлектроники, и прежде всего глобальной спутниковой навигации (GPS).

Основу диспетчерских информационных систем составляют следующие принципы:

1. Каждое транспортное средство оборудуется многоканальным приемником навигационных сигналов, излучаемых спутниками систем NAVSTAR или ГЛОНАСС непрерывно, в любую погоду. В любой точке страны, в частности Украины, приемник может регистрировать от 6 до 10 спутников системы NAVSTAR и ГЛОНАСС. После соответствующей обработки аппаратурой потребителя сигналы от нескольких спутников преобразуются в значение долготы, широты, высоты, скорости и направления движения.

2. Полученная информация передается по радиоканалу на диспетчерский центр и отображается соответствующим значком на электронной карте города, региона или страны. Данные о местоположении транспортного средства регистрируются в компьютере также в текстовом виде. Понятием радиоканал объединены УКВ-связь, сотовая связь, глобальная система спутниковой связи и другие.

3. Благодаря быстрому регулярному автоматическому опросу транспорта и высокой скорости передачи информации диспетчеры могут получать данные о состоянии тысяч единиц транспорта. Уже сейчас имеются технические решения для одновременного слежения и управления десятками тысяч объектов.

4. AVL-технология переводит на диспетчерском пункте информацию о местоположении транспортных средств в «картину» на электронной карте.

Поэтому стоит актуальный вопрос об адекватности электронных карт. В компьютере формируются также динамически изменяющиеся текстовые сообщения с указанием характерных особенностей местности, расстояния до ближайшей точки маршрута. Диспетчерской службе передается объективная информация о текущем состоянии транспортного средства (неисправности систем, наличии энергоснабжения, топлива, аварийных ситуациях и так далее).

5. Телесигнализация с транспортного средства идет в радиоэфир без вмешательства машиниста или водителя. Это позволяет им сосредоточиться на выполнении своих прямых обязанностей, а диспетчеру — принимать решения на основе объективной информации, что важно в критических ситуациях. Нажатием кнопки на экране-индикаторе машинист или водитель наряду с информацией о местоположении транспортного средства может отправить стандартные или экстренные сообщения типа «на маршруте, жду указаний», «авария», «нападение», «остановлен из-за снегопада» и так далее. Таким образом, диспетчер вместе с этими сообщениями получит координаты транспортного средства с точностью 2—5 м, если используется дифференциальный режим спутниковых наблюдений. Серийно выпускают системы, позволяющие водителю направлять на любой факс или e-mail практически в любую точку на Земле текст с компьютера, установленного в кабине, или принимать документы на принтер или факс прямо в кабине. Следовательно, сокращается время реакции диспетчера, который по одному взгляду на экран рабочей станции может определить, где находится каждое транспортное средство и нужна ли ему помочь. в AVL-системах существенно сокращается голосовой радиообмен. Любые действия машиниста или водителя могут быть заранее запрограммированы в бортовом комплексе, а передача идет по цифровому каналу, который достаточно просто кодируется.

6. Системы диспетчерского управления и контроля, или AVL-системы, могут различаться по методам определения координат транспортных средств, по способам обмена информацией между диспетчерским центром (ДЦ) и транспортным средством (ТС), логикой построения самого ДЦ и другим параметрам. Однако удобно классифицировать диспетчерские системы по зоне предполагаемой работы. По такому признаку диспетчерские системы можно условно разделить на системы глобального покрытия — «дальние системы» и системы локального покрытия — «ближние системы».

Дальние системы используются для контроля международных и междугородных перевозок, когда

расстояние между ДЦ и ТС составляет десятки тысяч километров. Для таких систем наилучшим решением в качестве средств связи являются спутниковые каналы. Конечно, можно использовать и сотовую телефонию. Такое решение не может быть признано удовлетворительным ввиду того, что зоны работы сотовых телефонов покрывают только крупные города и небольшие территории около них. Спутниковые системы связи на Украине представлены двумя принципиально различными системами — на базе геостационарных спутников («Inmarsat» и «Eutelsat») и низкоорбитальных спутников («Iridium», «Globalstar», «Orbocomm»). Низкоорбитальные системы весьма перспективны. Однако на полно-масштабный эксплуатационный уровень они выйдут через несколько лет. Поэтому диспетчерских систем, построенных на базе такой связи, в ближайшее время ожидать не следует. Наиболее широко на рынке Украины могут быть представлены диспетчерские системы, построенные с использованием связи стандарта «Inmarsat-C». Этот стандарт предусматривает передачу цифровых сообщений определенной длительности. Передача информации между ДЦ и транспортным средством обеспечивается на всей территории земного шара, за исключением приполярных областей. Время доставки сообщения до адресата не превышает 5—7 мин. Диспетчерская система, построенная на связи «Eutelsat — EutelTracs» обладает примерно такими же функциями, но область связи ограничена Европейской частью.

Комплект для объекта контроля состоит из малогабаритной наземной спутниковой станции, спутниковой и навигационной антенны, бортового компьютера пользователя и набора различных датчиков. Бортовой компьютер обеспечивает управление передачей информации о местоположении либо через заданный промежуток времени, либо по запросу с ДЦ. Кроме этого, на ДЦ может передаваться информация о состоянии всех подключенных датчиков. Водитель и диспетчер могут обмениваться между собой текстовыми сообщениями произвольной формы, что практически полностью заменяет голосовую связь, которая является достаточно дорогой услугой на больших расстояниях. Точность определения местоположения — около 100 м. Информация на ДЦ отображается на электронной карте той местности, где проходит маршрут транспортных средств. Кроме этого, вся поступающая и исходящая информация архивируется, и в любой момент может быть представлена как в графическом, так и в табличном виде при анализе. Существенным достоинством является то, что бортовой компьютер и программное обеспечение ДЦ для

«Inmarsat-C» русифицировано (в отличие от «EutelTracs»).

Ближние системы предназначены для контроля и управления парком транспортных средств на удалении от ДЦ не более 200 км. На таких расстояниях применение спутниковой связи уже нерационально. Поэтому в диспетчерских системах такого типа применяются другие виды радиосвязи: выделенный УКВ-канал, транкинговые сети, сотовая телефония. В последнее время идет бурное развитие этих видов связи. Основными потребителями подобных систем могут быть городские оперативные службы (милицейские патрули, службы скорой помощи), службы доставки, организации, осуществляющие вывоз бытовых отходов, службы безопасности для VIP-клиентов и др. В «ближних системах» важным фактором является оперативность доставки информации, а также поддержка голосовой связи (в последнее время вместо голосовой связи широко применяются формализованные текстовые сообщения). Скорость обмена информацией между ДЦ и объектами контроля может достигать 10 объектов в секунду. При этом обеспечивается приоритетная передача специальной информации (тревожных сообщений), и состояние дискретных и аналоговых датчиков. Бортовой комплект транспортного средства ближней системы состоит из бортового контроллера со встроенной навигационной аппаратурой пользователя (иногда она может быть невстроенной с навигационной антенной), бортовой радиостанции (или сотового телефона), связной антенны и комплекта датчиков. Функции управления бортовым комплектом возлагаются на контроллер, который обрабатывает информацию, поступающую от всех источников, а затем передает сформированный пакет на ДЦ. Помимо указанных для дальней системы способов обмена между транспортными средствами и ДЦ, здесь могут применяться специальные методы, которые и позволяют реализовать скорости опроса до 10 транспортных средств в секунду).

Точность определения местоположения составляет около 100 м, но в подобных системах возможен дифференциальный режим, который повышает точность относительного определения местоположения до нескольких метров. При этом используется ближайшая контрольная базовая навигационная станция, относительно которой и производятся уточнения положений транспортных средств. На базовой станции вычисляются соответствующие поправки, которые могут либо передаваться на борт для генерации уточненных координат и передачи их на ДЦ (прямой дифференциальный метод), либо передаются на ДЦ, где они используются для коррекции получаемых с бортов менее точных координат (ин-

версный дифференциальный метод). На ДЦ принятая информация также помещается в базу данных и отображается на электронной карте города или той местности, где проходят маршруты. Архивирование поступающей информации позволяет в дальнейшем подвергнуть ее анализу оператору ДЦ. Доступно решение еще одной задачи. В случае получения информации о нападении на транспортное средство оператор может дистанционно выключить или включить один или несколько исполнительных механизмов (например, электроснабжение). Такая возможность имеется и в дальней системе, но там она теряет всякий смысл — отправить оперативную группу поддержки за тысячи километров невозможно. Поставляемое программное обеспечение ДЦ для ближних систем обычно полностью русифицировано.

Для построения типичной диспетчерской системы можно использовать комплексное решение практически любых задач слежения и диспетчеризации, воспользовавшись, например, предложением компании «Trimble Navigation» [7]. Система состоит из подсистемы бортовой аппаратуры транспортного средства, подсистемы диспетчерского центра и канала связи между ними (рис. 1).

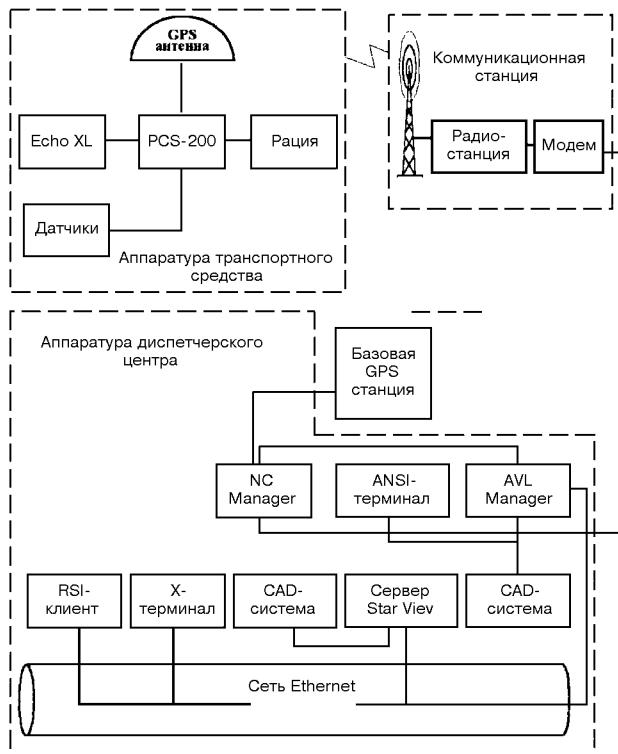


Рис. 1. Структурная схема системы слежения за транспортом

Ключевым элементом в AVL-системе является радиоконтроллер PSC-200, который содержит процессор ввода-вывода, спецпроцессор, радиомодем, контроллер связи и GPS-приемник. Аппаратура пользователя — шестиканальный приемник GPS-сигналов с внешней антенной использует простой последовательный ASCII-протокол и позволяет обеспечить непрерывность работы следящей системы в городских условиях. Такие данные о транспортном средстве, как широта, долгота, высота, скорость, условный номер средства и системное время могут выдаваться приемником по крайней мере один раз в секунду. Благодаря точному отсчету времени, доступному всем транспортным средствам, могут быть осуществлены различные стратегии приема сообщений: либо на основании запроса, либо по установленному графику. Вычисление точного местоположения транспортного средства — одна из задач, решаемых AVL-системой. Информация о координатах и состоянии транспортного средства должна быстро передаваться в диспетчерский центр. Эффективность передачи определяется двумя элементами: микропроцессорным модемом, специально созданным для работы с мобильной радиостанцией, и спецконтроллером сети передачи данных. Одно из главных преимуществ использования микропроцессорного бортового контроллера — возможность осуществления более сложного протокола сеансов связи. В системе реализован «слотовый» протокол отсчетов, который в четыре раза увеличивает количество ТС, передающих сообщения ежесекундно по одному радиоканалу. В течение каждого цикла каждому ТС направляется запрос, в котором предлагается либо ответить в определенный интервал времени — «слот», либо промолчать. AVL-система позволяет пользователям получать сообщения от трех-пяти транспортных средств в секунду. Таким образом, могут быть достигнуты скорости опроса от 180 до 300 ТС в минуту по одному выделенному радиоканалу.

В радиоконтроллер PSC-200 включен интегрированный мобильный радиомодем — специализированное устройство, предназначенное для обеспечения надежной передачи данных через радиостанцию. Известно, что основной функцией радиомодема является преобразование информационных данных в сигналы, удобные для передачи по радиоканалу. Для передачи через радиостанцию используются специальные процедуры сжатия данных и обнаружения ошибок. Такой подход снижает влияние эффектов, связанных с затуханием радиосигналов, а также не допускает прохождения искаженной информации на диспетчерский центр.

На радиоконтроллер PSC-200 возложены все не-

обходимые функции управления мобильной радиостанцией: настройка радиоканала, обеспечение модуляции и демодуляции и прочее, благодаря чему она может работать полностью в автономном режиме, не требуя никакого вмешательства оператора или машиниста, что, в свою очередь, позволяет разместить оборудование транспортного средства в виде недоступного «черного ящика». Следует упомянуть, что радиоконтроллер PSC-200 выполняет также ряд весьма ответственных функций для работы всей системы AVL. Он управляет двумя устройствами RS232, одно из которых требуется для подключения к бортовому экрану-индикатору состояния «Echo XL» или к радиостанции «Motorola». В контроллере используется GPS-время для координации «слотовой» системы связи, а также для точной фиксации моментов времени изменения состояния транспортного средства. Другие функции радиоконтроллера PSC-200 по обработке входных и выходных сигналов связаны с дискретными сигналами, которые подаются на разъем контроллера. Эти сигналы могут использоваться для передачи контрольных параметров транспортного средства: оценка исправности системы энергоснабжения, электропитание приборов освещения, сирены и т. п.

Бортовой микропроцессор запрограммирован на выполнение нескольких ключевых функций поддержки. Прежде всего микропроцессор выключает радиостанцию через 6 мин после выключения системы питания. Радио включается вновь при включении энергоснабжения системы. Эта функция предотвращает чрезмерный разряд батарей. Информация о состоянии радиостанции также передается контроллеру диспетчерского центра для отображения на терминале «AVL Manager» диспетчерского центра. Далее, микропроцессор накапливает данные от подсистемы скорости вычисления и передачи информации о пройденном пути. Контроллер автоматически вносит в передаваемое сообщение данные о пройденном расстоянии при каждом изменении состояния (например при перемещении средства от одного места дислокации к другому). Кроме того, процессор используется совместно с терминалом «Echo XL» для передачи стандартных сообщений, выбираемых и добавляемых экипажем.

Бортовой терминал состояния «Echo XL» предназначен для быстрой и простой связи водителей транспортного средства и персонала диспетчерского центра без использования голосовой связи. Диспетчеру может быть сообщено до 8 типов состояний. Каждое из них может иметь до 15 сообщений. Тип состояния и сообщения программируются в соответствии с конкретными должностными инструкциями служб, предписывающими определенные доклады и

варианты действий в той или иной ситуации. Терминал имеет большой жидкокристаллический экран. На нем отображается название каждого ключа состояния и используются четкие символы, которые легко читаются практически при любых условиях освещения. Надписи на русском языке крупным шрифтом и раздельно расположенные клавиши уменьшают возможность ошибочных операций. «Терминал Echo XL» размещен в прочном водонепроницаемом пластиковом корпусе, способном сохранять работоспособность терминала при аварийных ситуациях.

В системе AVL могут применяться различные типы и модели радиостанций, включая «Midland Radio», «Motorola», «Standart» и др. Система работоспособна в любом диапазоне частот, на который у заказчика имеется лицензия, от низких частот до 900 МГц. Радиосеть может использовать одну или несколько точек ретрансляции, что не сказывается на функционировании системы.

Оборудование диспетчерского центра. AVL-система включает оборудование и программное обеспечение, необходимое для ее автономного функционирования, включая диспетчерский центр.

«NC Manager» — специализированное программное обеспечение управления информационной линией радиосвязи. Ориентированный на персональный компьютер программный пакет организует опрос, получение сообщений, контроль линии связи, а также работу с группой удаленных базовых станций или с большим числом передатчиков. Это устраняет необходимость в управлении оборудованием путем последовательной передачи запросов от каждой радиостанции. Программное обеспечение позволяет также отфильтровать многократные повторения одного и того же сообщения от транспортного средства, принимаемого разными радиостанциями.

Существует несколько методов, используемых при управлении информационными потоками в подвижной радиосвязи. Например, метод опроса, использующий комбинацию автоответа и опроса по очереди с целью обеспечить гибкость и оптимизировать работу в разрешенной полосе частот. В этом методе базовая станция передает по радио сообщение-запрос, содержащий поле «разрядной карты». Положение разрядов этой карты сообщает каждому подвижному модему, как и когда передавать сообщение о состоянии и местоположении.

Пакет программ управления системой слежения и оперативного контроля. Программа «AVL Manager» осуществляет управление всей системой, служит интерфейсом данных для транспортных средств, дает информацию о местоположении, пе-

редает системе отображение карты слежения и обеспечивает функционирование до восьми диспетчерских рабочих мест.

Через терминал «Superuser» «AVL Manager» позволяет полностью конфигурировать каждый сегмент системы. Набор из 60 команд позволяет диспетчеру системы конфигурировать все порты данных, создавать и удалять терминалы, модифицировать информацию в базе данных, изменять конфигурацию, изменять параметры сети данных, а также создавать и редактировать форматы экрана. Все команды представляют собой четырехбуквенные мнемограммы с последующими изменяемыми полями.

Некоторые из команд выводят на экран дисплея информацию о системе, полезную для управления каналом связи и конфигурацией системы. Применяя эти команды, пользователь может создавать на дисплее AVL-состояния, выводя 25 параметров, относящихся к конкретной транспортной единице: номер транспортного средства, класс транспортного средства, состояние транспортного средства, схема опроса; скорость транспортного средства, возраст сообщения местоположения, расстояние от ближайшего известного пункта, слот (временной интервал для опроса), сообщение, состояние блока энергоснабжения, состояние «открытая дверь», общий индекс сообщения, ближайший известный пункт, изменяемый идентификатор, направление движения, возраст положения порта данных, широта и долгота.

Таким образом обеспечивается настройка, позволяющая заказчику и пользователю приспособить систему под конкретные потребности оперативной службы и режима работы.

Программное обеспечение включает базу данных известных пунктов, позволяющую пользователю вводить в таблицу описания известных географических мест, таких как пересечения с дорогами, мосты, стрелки, ориентиры и др. Широта и долгота каждого такого места могут быть введены с помощью измерения по топологической карте или просто путем выезда на ТС, оборудованном системой AVL и привязки к каждому пункту с описанием этого места. Программное обеспечение автоматически сохраняет последовательность сообщений о местоположении транспортного средства и вычисляет, какой ориентир является самым близким, и расстояние до него. Есть команды для немедленного получения информации о конкретном транспортном средстве, не прибегая к его поиску по перечню.

Программа отображения карт. Программное обеспечение «Star View» обеспечивает отображение положения транспортного средства и его состояния

на электронную карту. В AVL используется версия «Star View RSI» (Remote System Interface), обеспечивающая как непосредственное управление конфигурацией окон карты манипуляциями с помощью «мыши» и клавиатуры, так и применение командного интерфейса через Ethernet. Конфигурация окон карты может управляться и командами от терминалов «AVL Manager».

На экране можно показать одновременно несколько областей карты. Каждая карта индивидуально конфигурируется в пределах отдельного окна, чтобы отобразить различные границы, масштаб, точку обзора, выбранные сообщения о состоянии транспортного средства. Так как каждое окно способно к отображению любой части карты, содержащейся в базе данных, точка обзора карты может быть выбрана так, чтобы представить карту полностью, ее ограниченную область или конкретный участок местности. Для наблюдения за работой транспорта может быть открыто специальное окно, с помощью которого можно контролировать и отслеживать отдельное транспортное средство или целую группу. Оператор может выбрать интересующую его область, изменить масштаб, в частности путем «наезда» точки наблюдения на карту и центрировать изображение относительно выбранной точки.

Терминалы «AVL Manager» позволяют управлять дисплеями, на каждом из которых можно расположить до 4 окон с картами. Если карта создана для слежения за транспортным средством или их группой, то окно будет автоматически заменять масштаб и перемещать изображение, чтобы сохранять в течение всего времени интересующие транспортные средства в пределах окна. С помощью стандартных утилит могут быть изменены размеры каждого окна с картой или его положение на экране. Другие возможности манипуляций с картой включают утилиту «найти транспортное средство», используемую для быстрого нахождения местоположения и отображения конкретной транспортной единицы и утилиту, позволяющую вывести на экран опорный пункт, чтобы помочь диспетчерам быстро сориентироваться при принятии решений.

Для обозначения различных типов транспортных средств можно использовать 8 различных условных знаков, формы и размеры которых выбираются при конфигурировании. Система может отображать идентификатор любой из транспортных единиц, а также показывать их состояние, изменения цвет изображения.

В дополнение к визуальному отображению состояния транспортного средства во временном рабочем окне в пределах изображения карты может распо-

лагаться текстовая информация о каждом из объектов, включая идентификатор транспортной единицы, направление движения, скорость, время и т. д.

Дифференциальный режим работы [5, 8]. Глобальная спутниковая навигационная система GPS позволяет проводить определения координат с точностью до нескольких метров. При использовании метода дифференциальной коррекции GPS (DGPS) точность измерений GPS-приемниками достигает 3–5 м. Общие сведения о ГСНС даны, например, в работе [7].

На практике применяют два типа DGPS: с передачей дифференциальных поправок и инвертированная. В системе с передачей дифпоправок базовый GPS-приемник вырабатывает дифференциальные поправки, которые передаются по радиоканалу на всю железную дорогу (весь транспортный парк). Мобильные GPS-приемники используют поправки для повышения точности определения своего местоположения, после чего уточненные координаты сообщаются на базовую станцию. В инвертированной системе GPS-поправки сохраняются на базовой станции и используются при обработке сообщений о местоположении по мере их поступления от ТС.

Базовая станция CBS в реальном масштабе времени вырабатывает поправки, которые существенно повышают точность определения местоположения ТС, оборудованных GPS-датчиками. CPS-станция содержит GPS-приемник с 12 параллельными каналами слежения за спутниковыми сигналами, выносную внешнюю GPS-антенну, кабели, источники электропитания и программное обеспечение для ПК. Дифпоправки поступают на «NC Manager» и передаются по радиоканалу на мобильные GPS-приемники.

Инвертированная дифференциальная система GPS (IDGPS) использует дифференциальную базовую станцию 4000RS, которая соединена с «NC Manager», использующим данные для внесения поправок в сообщения о местоположении по мере их поступления от подвижных объектов. Для систем, где скорость опроса является главным показателем, при числе ТС менее 30 устройство IDGPS работает быстрее, чем устройство DGPS с передачей дифференциальных поправок. Для систем, обслуживающих более 30 транспортных единиц, DGPS является более эффективной.

Аппаратура потребителя в общем случае включает: антенну, устройство приема, преобразования и обработки сигналов ИСЗ, навигационный процессор, устройство отображения навигационной информации.

Некоторые фирмы-производители GPS-приемников, помимо готовых конструктивно законченных

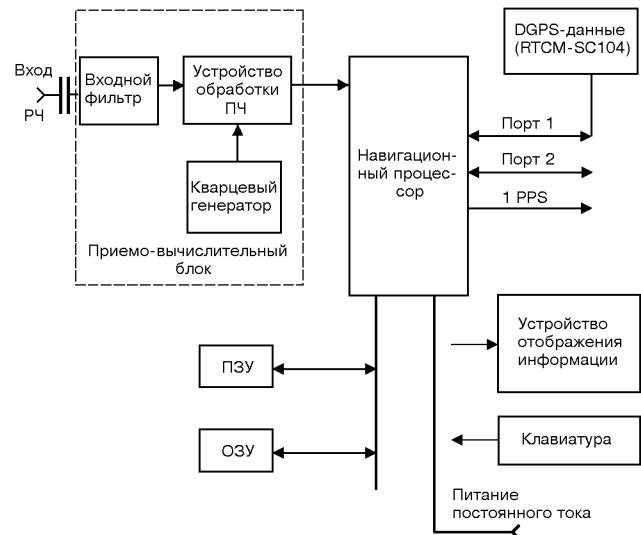


Рис. 2. Функциональная схема GPS-приемника

приборов выпускают так называемую OEM-продукцию. Эта продукция представляет собой печатную плату с навесными элементами без корпуса. Такие устройства удобно использовать для решения нестандартных задач, а также если есть необходимость в упрощении или усовершенствовании функций, которыми обладают готовые конструктивно законченные приемники. Распространенная блок-схема такого устройства приведена на рис. 2.

Плата включает в себя два основных блока (микросхемы): приемо-вычислительный блок и навигационный процессор. Приемо-вычислительный блок усиливает и демодулирует принятый сигнал для выделения передаваемой в нем навигационной информации. Навигационный процессор решает навигационную задачу и выдает все необходимые данные в порт 1 или 2 в заданном формате. Как правило, есть возможность ввода дифференциальных поправок через порт 1 или 2, и вывода сигнала 1 PPS (синхроимпульса с частотой 1 Гц).

При подсоединении платы с антенной и источником питания к компьютеру можно получать на дисплее навигационные данные и координаты в формате NMEA или в формате фирмы-производителя. Если подключить к плате клавиатуру, устройство отображения информации, а также дополнительную память, процессор, то можно получить готовый GPS-приемник, т. е. законченное изделие. В последнее время намечается тенденция к продаже отдельных навесных элементов. Наиболее распространенные OEM продукты различных фирм-производителей приведены в табл. 2.

Таблица 2. OEM-продукция различных фирм-производителей

Производитель	Модель	Возможна ра- бота по сигна- лам систем	Число каналов	Размеры, мм	Масса, г	Точность		Потребляе- мая мощ- ность, Вт	Цена, USD в Украине
						Позиция, м	Время, нс		
Ashtech, Magellan США	G8	GPS	8	38.5×59×8	19.6	3	1.000	< 0.75	180
Ashtech, Magellan США	G12-L	GPS	12	57.5×12.5×107.5	3.64	0.01	175	1.4	2 700
Ashtech, Magellan США	GG 24	GPS/ GLONASS	24	97.5×17.5×165	14	0.005	300	1.8	9 000
CMC, GPS-OEM Group Канада	Alstar 5 Hz PVT	GPS	12	66.25×13.75×100	3.08	0.01	50	1.2	930
Koden Electronica Co, Ltd Япония	GSU-25	GPS	12	35×12.5×62.5	20	10	500	1.2	128
m-blox AG Швеция	GPSMS1	GPS	12	29.3×7.7×29.3	15	2	100	0.14	126
MITAC Inc Тайвань	MGE-110	GPS	12	54×16×71	24	< 2	1.000	?	165
Philips Semiconductors США	UAA 1570 RF Front EndSAA 1575	GPS	—	—	3—5	300	0.5	50	
Rojone Pty Ltd Австралия	GPS Genius	GPS	12	70×70×15	110	< 2	1.000	1	350
Trimble Navigation Limited США	Lassen-SK8	GPS	8	82.6×31.2×10.2	19.6	1—5	300	0.75	200

Таблица 3. OEM-продукция фирмы «Trimble»

Параметр	SVeeSix-CM3	ACE GPS Module	Lassen-SK8	Thunderbolt GPS Discipline Clock
Частота	L1, код C/A (SPS)	L1, код C/A (SPS)	L1, код C/A (SPS)	L1, код C/A (SPS)
Число каналов	6	8	8	8
Точность, м	25 КВО без S/A	25 КВО без S/A	25 КВО без S/A	—
Точность DGPS, м	от 2 до 5 (2 сигма)	2 КВО без S/A	2 КВО без S/A	—
Точность сигнала 1PPS, нс	1000	95	500	50
Рабочая температура, °C	-40...+85	-40...+85	-40...+85	-40...+85
Влажность, %	5—95	5—95	5—95	5—95
Высота, м	-400...+18000	-400...+18000	-400...+18000	-400...+18000
Питание, В	+5 (-3...+5 %)	+5 (-5...+5 %)	+5 (-5...+5 %)	+12, -12, +5
Потребляемая мощность, Вт	1.15	Уточняется	0.75	10
Протоколы	TSIP, TAIP, NMEA	TSIP, TAIP, NMEA	TSIP, TAIP, NMEA	TSIP
Размеры, мм	82.6×46.5×14.7	82.6×46.5×14.7	82.6×31.2×10.2	127×102×51
Масса, г	36.4	28.3	19.6	567

Наиболее широкий спектр OEM продуктов предлагает фирма «Trimble», в частности: SVeeSix — CM3; «ACE GPS Module»; «Lassen-SK8»; «Thunderboult GPS Disciplined Clock» (табл. 3).

Модуль SVeeSix-CM3 обеспечивает выполнение функций контроля за работой антенны, которая также обеспечивает защиту антенного кабеля от замыкания на землю или на 12 В. Благодаря этой функции модуль сигнализирует пользователя о том, что антенна замкнута или отключена. Наличие двух последовательных портов дает возможность непосредственного ввода сигналов дифференциальной коррекции в формате RTCM SC-104. Встроенные часы позволяют уменьшить время захвата рабочего созвездия при первом включении прибора (холодный старт), поэтому можно начи-

нать работу с платой без подключения ее к компьютеру для установки текущего времени. Модуль имеет шестиканальный приемный тракт, позволяющий с помощью метода перераспределения сопровождать восемь спутников, что улучшает точность позиционирования. Имеется функция сопровождения шести «высоких» или четырех «лучших» из восьми спутников. Есть возможность использования сигнала 1 PPS, синхронизированного по UTC с погрешностью менее 1 мкс. Гибкость и легкость интеграции модуля обеспечивается двумя последовательными портами. Первый порт может использоваться для выдачи сообщений в формате двоичного протокола TSIP, обеспечивающего максимальный контроль за работой модуля, или формате TAIP, наиболее подходящего для задач слежения за

объектами. Второй последовательный порт выводит NMEA-сообщения. Скорость выдачи TSI-сообщения — раз в две секунды, а TAIP и NMEA — с частотой 1 Гц.

Инженерный продукт «ACE GPS Module» в отличие от SVeeSix — СМ3 имеет восьмиканальный приемный тракт и обладает меньшим энергопотреблением при тех же габаритных размерах, что обеспечивает большую надежность и экономичность. В отличие от устройства «ACE GPS Module» плата «Lassen-SK8» имеет меньшие габариты и массу благодаря технологии «Sierra GPS».

Модуль «Thunderbolt GPS Discipline Clock» предназначен для систем синхронизации. Он включает специально изготовленный термостатированный кварцевый генератор и его управляющую схему на одной плате. В плате используется специально разработанный алгоритм самокоррекции для уменьшения влияния режима селективного доступа. «Thunderbolt GPS Discipline Clock» имеет три выходных сигнала: сигнал в формате интерфейсного протокола TSIP, сигнал с частотой равной 10 МГц и сигнал 1PPS (точность сигнала 1 PPS, синхронизированного по UTC, составляет 50 нс).

OEM продукция фирмы «Ashtech/Magellan». Особый интерес представляет OEM-продукция фирмы «Ashtech/Magellan» (табл. 4). Последними разработками этой фирмы являются платы G8, G12, которые работают по сигналам по сигналам двух систем NAVSTAR и GLONASS.

Плата G8 включает в себя восьмиканальный приемный тракт, который принимает спутниковые сигналы на частоте L1 (1575.42 МГц), имеет возможность приема RTCM-поправок в режиме реального времени и выдачи всей информации через второй параллельный порт только в формате NMEA. Для платы G8 характерны малые габариты, масса, а также незначительное энергопотребление.

Плата G12 — это 12-канальный модуль, который определяет координаты не только по коду, а и по несущей сигнала. Поэтому точность позиционирования в режиме реального времени повышается до 90 см (95 %) в плане, и 1.6 м (95 %) по высоте. Также повышается точность сигнала 1 PPS, и в дифференциальном режиме составляет 30 нс. Особенностью данной платы являются: выдача позиции, а также «сырых данных» (код и фаза несущей) с частотой 20 Гц; формирование высокоточных сигналов на частотах от 1 Гц до 8.25 МГц; возможность изменения моделей геоида. Плата G12 имеет два порта RS-232: один для приема дифференциальных поправок в формате RTCM, другой для выдачи данных в формате NMEA. Потребляемая мощность составляет 1.4 Вт при напряжении источника питания 5 В ($\pm 5\%$).

Более перспективной и интересной является плата GG 24, содержащая 24-канальный приемный тракт и позволяющая принимать сигналы от двух навигационных систем одновременно (12 каналов — NAVSTAR и 12 каналов — GLONASS). Это устройство надежно определяет координаты в крупных городах с высотными зданиями, в карьерах, ущельях, горной местности, т. е. в местах с большим затенением сигналов от ИСЗ. В связи с тем, что Украина не имеет селективного доступа при работе по сигналам системы NAVSTAR, точность определения координат и времени в автономном режиме соответственно равны 16 м (95 %) и 70 нс (1 PPS). А при вводе дифференциальных поправок точность увеличивается до значений 75 см (95 %) и 45 нс (1 PPS). Плата GG 24 поставляется с программным обеспечением «Ashtech Evaluate», которое работает в среде Windows, и выдает информацию о спутниках, позиции и скорости пользователя. Плата GG 24 питается постоянным напряжением 5 В, при этом потребляется мощность 1.8 Вт.

Таблица 4. Сравнительный анализ OEM-продукции различных фирм-производителей

Параметр	«Lassen-SK8»	G8	«Jupiter»
Частота	L1, код C/A (SPS)	L1, код C/A (SPS)	L1, код C/A (SPS)
Число каналов	8	8	12
Точность, м	25 КВО без S/A	40 КВО	25 КВО без S/A
Точность DGPS, м	2 КВО без S/A	3 КВО	от 2 до 5 (2 сигма)
Точность сигнала 1 PPS, нс	500	1000	1000
Рабочая температура, °C	-40...+85	-30...+80	-40...+85
Влажность, %	5—95	95	95
Высота, м	-400...+18000	+18288	-330...+18000
Питание, В	+5 (-5...+5 %)	5	+5 (-5...+5 %)
Потребляемая мощность, Вт	0.75	0.75	1.025
Протоколы	TSIP, TAIP, NMEA	NMEA	Binari, NMEA
Размеры, мм	82.6×31.2×10.2	39×60×8	71×41×11
Масса, г	19.6	19.8	23

Имея небольшие габариты 10×16.7 см и массу, плата GG 24 — это весьма удобный продукт для инженерных применений.

Если провести сопоставимый анализ трех плат «Lassen-SK8» фирмы «Trimble»; G8 фирмы «Ashtech»; «Jupiter» фирмы «Rockwell» (табл. 4), можно отметить, что наибольшим числом каналов обладает плата «Jupiter», поэтому она более надежна при решении навигационной задачи.

К тому же плата «Jupiter» имеет возможность отслеживать фазу несущей принимаемого сигнала, и ее можно применять в геодезических приложениях. Но при этих достоинствах габариты ее больше и она менее экономична с точки зрения потребляемой мощности. Как и плата «Lassen-SK8», плата «Jupiter» помимо выходного формата NMEA может выдавать данные и в двоичном формате фирмы «Rockwell». По характеристикам поиска и слежения за спутниками при холодном, теплом и горячем старте можно отметить, что они у всех трех плат практически одинаковы. Точных характеристики и характеристики устойчивости к внешним воздействиям у всех трех плат практически одинаковы. Плата «Jupiter», в отличие от плат «Lassen-SK8» и G8, может использоваться с двумя видами антенн — активными и пассивными, а G8 и «Lassen-SK8» поставляют только с активными антennами.

Платы фирмы «Trimble» «Lassen-SK8», SVeeSix-CM3, «ACE GPS Module» предпочтительно использовать для построения диспетчерских систем (как мобильные приемники), так как они имеют подходящий для этих целей выходной формат TAIP. Плата «Thunderbolt GPS Disciplined Clock» удобна и надежна в задачах синхронизации, так как она разработана специально для решения такого рода задач.

Еще одно из достоинств плат фирмы «Trimble» — это формат TSIP. Используя его, можно получить всю информацию, которую передают ИСЗ. Поэтому на базе формата TSIP можно строить базовые дифференциальные станции, в отличие от плат G8, GG 24, «Jupiter». Уникальную в своем роде плату GG 24, работающей по сигналам двух навигационных систем, предпочтительно использовать в городских условиях и в условиях с большим затенением GPS-сигнала, а также как навигационный прибор. При этом обеспечиваются высокие точности (16 м) без использования дифференциального режима. Все платы имеют выходной формат NMEA и могут принимать и использовать RTCM поправки в режи-

ме реального времени, поэтому все они могут быть использованы при построении мобильных навигационных приборов.

Поскольку формат NMEA стандартизирован и используется навигационными приборами других классов, есть возможностьстыковки GPS-плат с другими навигационными приборами и выдачи совмещенной информации на один универсальный дисплей.

Украина и Россия также разрабатывают аппаратуру потребителей и OEM-продукцию, поэтому можно надеяться, что в ближайшее время она будет конкурировать с продукцией стран дальнего зарубежья.

1. Аргунов А. Д. и др. Формирование и применение интегрального радионавигационного поля // «Навигация-98»: Сб. тр. второй междунар. конф. — М., 1997.—Т. 2.—С. 336—353.
2. Бахвалов Б. Н., Верещак А. П., Макаренко Б. И. и др. Современные технологии на железнодорожном транспорте / Под ред. Б. И. Макаренко, Л. А. Исаева. — Харьков: ХВУ, 2000.—С. 220.
3. Бирюков А. Система контроля и управления транспортом // Сети.—1996.—№ 7.—С. 126.
4. Величко О. Н., Макаренко Б. І., Камінський В. Ю. та інші. Державна служба єдиного часу і еталонних частот — необхідний елемент розвитку наземної космічної інфраструктури України // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 1-2.—С. 7—16.
5. Верещак А. П., Пискорж В. В., Жалило А. А. и др. Концепция создания системы навигационного обеспечения Украины // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 5/6.—С. 46—56.
6. Демченко О. Ф., Макаренко Б. И., Черепнев А. А. Использование высоких технологий на транспорте // Рынок услуг комплексных транспортных систем и прикладные проблемы регионов: Тр. междунар. практической конф., Киев, 12—13 октября 1999 г. — Киев, 1999.—С. 27—28.
7. Хомяков Э. Н., Макаренко Б. И., Трикоз Д. В., Кащенко В. С. Возможности перспективной глобальной навигационно-связной спутниковой системы // Радиотехника.—1996.—№ 8.—С. 60—64.
8. Receiver Survey // GPS World.—1998, January.—Р. 46—60.

IMPLEMENTATION OF GPS TECHNOLOGIES ON GROUND TRANSPORTATIONS

B. I. Makarenko, A. I. Gorb

We present an information to use the technologies of global satellite navigation systems (GSNS) for ground transportations (automobiles, railways). It is considered one of the effective systems operating at present using named technology. The principles of such system operation, their implementation and attainable technical parameters are described.

УДК 629.783; 528.001

М. Д. Черемшинський

Науково-дослідний інститут геодезії і картографії, Київ

GPS-технології в геодезичній практиці. Досвід та перспективи розвитку

Розглянуто досвід співпраці країн Європи у побудові геодезичних мереж та створення нової системи відліку із застосуванням GPS-технологій. Запропоновано заходи щодо модернізації Державної геодезичної мережі України.

В 1980-х рр. розпочалось широкомасштабне використання космічних технологій в геодезії, картографії, геодинаміці, навігації та інших галузях. Науково-технічний прогрес та досягнення науки в галузі космонавтики, створення нових засобів зв'язку, мініатюризація комп'ютерної техніки дозволяють значно покращити характеристики радіонавігаційних систем та створити нове покоління багатоцільових супутниковых радіонавігаційних систем, таких як GPS Navstar (Глобальна система визначення місцезнаходження Навстар) у Сполучених Штатах Америки та система ГЛОНАСС в Радянському Союзі. В геодезії та навігації найбільш широке застосування знайшла система GPS Navstar (в подальшому GPS). Система ГЛОНАСС у зв'язку з відсутністю надійних приймачів для сегменту користувача, закритістю системи та технічними проблемами в космічному сегменті майже не застосовується для геодезичних робіт, тому нижче розглянатиметься вплив на розвиток геодезії технологій, побудованих на основі системи GPS [8].

Впровадження GPS привело до революційних змін у практиці і теорії побудови геодезичних мереж. Фахівці в галузі геодезії стали учасниками процесу переходу за незначний проміжок часу від двовимірної до тривимірної та чотиривимірної геодезії [12]. Динаміка цих змін може бути проілюстрована на прикладі створення високоточної геодезичної мережі та геодезичної системи відліку для Європейського континенту.

Широковідома геодезична система координат для Західної Європи ED50 (European Datum 1950) була створена зразу після Другої світової війни на основі даних наземних вимірювань. Середня точність отрима-

ної системи координат, яка базувалась на Міжнародному еліпсоїді Хейфорда (Hayford), становила кілька метрів (до десяти) [10]. Для покращення точності системи координат ED50 Міжнародною асоціацією геодезії (IAG) утворюється спеціальна постійна комісія RETrig (Reseaux Europeens de la Triangulation), яка працює досить тривалий час над цим питанням. Нарешті, в 1987 р. на Генеральній асамблії Міжнародної асоціації геодезії у Ванкувері (Канада) були представлені результати 30-річної роботи зі створення уніфікованої Європейської геодезичної мережі та системи координат. Була створена двовимірна Європейська система координат ED87 (European Datum 1987). Референц-еліпсоїд та орієнтування системи ED87 були вибрані ідентичними попередній системі координат, але для фінального розв'язання системи було включено деякі дані супутникових спостережень. Середня похибка системи координат для всієї території не перевищувала 2 м. Незважаючи на значні переваги цієї системи координат, рішення ED87 запізнилось майже на 10 років. В кінці 1980 рр. у практику геодезичних робіт впроваджуються GPS-технології, які забезпечують значно точніші результати та потребують набагато менших витрат часу і ресурсів.

Процеси інтеграції країн Європи, розвиток інформаційних мереж, широке застосування Географічних інформаційних систем (GIS), впровадження GPS для навігації, програми геодинамічних досліджень вимагають створення нової високоточної системи координат, яка базувалась на даних космічної геодезії. Впроваджена Картографічним агентством Міністерства оборони США Світова си-

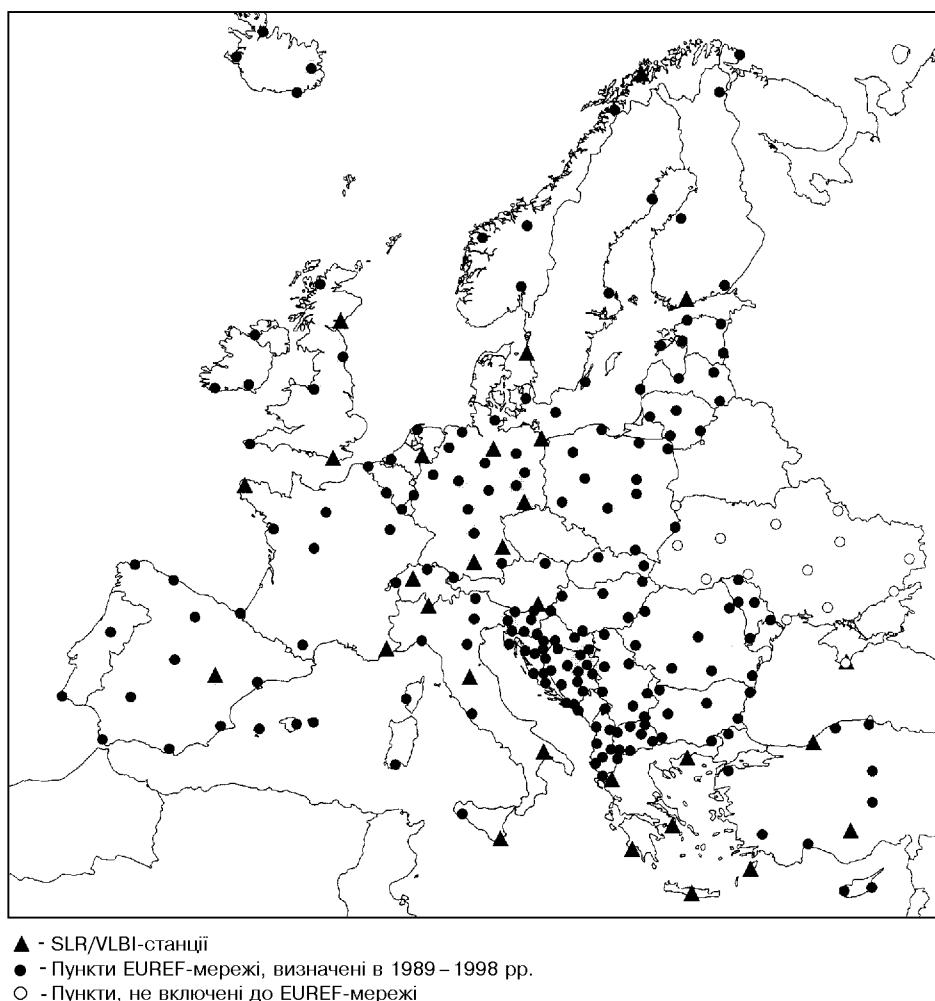


Рис. 1. Картограма EUREF межкі станом на 1998 р.

стема координат 1984 року (WGS84), яка базується в основному на даних допплерівських спостережень і досягає абсолютної точності близько одного метра, широко застосовується, але не забезпечує вимог користувачів для особливо точних геодезичних вимірювань, у зв'язку з відносно низькою (близько 1–2 м) стабільністю системи.

Виходячи з цього, у 1987 р. на згаданій Генеральній асамблей IAG було прийнято рішення про визначення та встановлення нової геодезичної системи відліку та створення тривимірної геодезичної мережі для території Європи на основі застосування космічних технологій, яка б відповідала вимогам часу та забезпечувала широкий спектр користувачів високоточними геодезичними даними. Для реалізації цієї ідеї створюється спеціальна підкомісія Міжнародної асоціації геодезії для Європи — EUREF (European Reference Frame). Головними

завданнями підкомісії EUREF є:

- створення та підтримка на відповідному рівні Європейської геодезичної системи відліку;
- створення Європейської мережі перманентних GPS-станцій;
- створення уніфікованої Європейської висотної мережі.

Необхідність поліпшення геодезичної мережі Європи визнається всіма геодезичними службами континенту. Тому у вересні 1987 р. на пленарному засіданні Європейського комітету геодезичних служб CERCO (Comite European des Responsables de la Cartographie Officielle) в Афінах, утворюється спеціальна Робоча група VIII (WG VIII) (тепер робоча група «Геодезія»), головним завданням якої визначається розробка стратегії практичного застосування можливостей GPS-технологій для геодезії і картографії.

За глобальну основу для створення системи від—ліку для Європи було запропоновано прийняти Міжнародну земну систему відліку (ITRF), яка щорічно уточнюється Міжнародною Службою Обертання Землі (IERS) за результатами комбінованої обробки даних спостережень методами лазерної локації супутників та інтерферометрії з наддовгими базами SLR/VLBI. Середня абсолютна точність глобальних моделей системи відліку, які будується IERS, становить 1—3 см.

Спільним рішенням Підкомісії EUREF та WG VIII в основу створення Європейської системи відліку було взято 35 європейських SLR/VLBI-пунктів, які є частиною реалізації ITRF, і базовий набір геоцентричних координат яких на епоху 1989.0 утворює Європейську земну систему відліку ETRF89.

Звичайно, 35 пунктів SLR/VLBI для всієї території Західної Європи (16 країн загальною площею близько 3.5 млн кв. км) було явно недостатньо для забезпечення переходу до єдиної високоточної системи координат. Тому в жовтні 1988 р. EUREF прийнято рішення щодо проведення згущення європейської мережі на основі застосування GPS-технологій. Проектом створення нової мережі передбачається, що середні відстані між пунктами геодезичної мережі згущення становитимуть 300—500 км. Запропонована мережа згущення складається з 92 пунктів (від 3 до 15 пунктів в залежності від країни), включаючи 21 SLR/VLBI-станцію.

Вже у 1989 р. була проведена найунікальніша кампанія геодезичних спостережень в історії геодезії за охопленою територією, результатами та надзвичайно короткими термінами робіт. Кампанія спостережень EUREF-GPS, в якій було задіяно 62 двочастотних геодезичних GPS-приймачі, проводилася за спеціально розробленою методикою у два етапи. Перший — 16—21 травня 1989 р. (62 станції спостережень), другий — 23—28 травня 1989 р. (55 станцій спостережень). Абсолютна похибка положень пунктів мережі з урахуванням похилок SLR/VLBI-станцій склала 30—40 мм для горизонтальних складових та 50—60 мм — для вертикальної. У 1990 р. EUREF-мережа поширюється на північний захід Європи до Ісландії, Шпіцбергена та Гренландії. У 1991 р. проводиться уточнення мережі, і отриманий список координат пунктів приймається як поточна реалізація ETRF89 під назвою EUREF-89 [10].

Демократичні зміни в країнах Центральної та Східної Європи, зростаючі економічні зв'язки та процеси інтеграції цих країн до Європейського союзу вимагають розширення уніфікованої геодезичної мережі на схід Європи. Геодезичні служби

країн Центральної та Східної Європи приймають рішення про приєднання до EUREF та впровадження для території цих країн ETRF як основної геодезичної системи відліку. Так, в 1991 році GPS-кампанії по програмі EUREF за технічної підтримки геодезичних служб країн Західної Європи проводять Чехія, Словаччина, Угорщина; в 1992—1994 рр. — Польща, Болгарія, Литва, Латвія, Естонія, Румунія, Словенія, Хорватія та Туреччина. Всі спостереження проводяться за спеціальною 5-денною програмою спостережень, яка включає одночасні спостереження на нових пунктах мережі та пунктах, визначених в EUREF89, які приймаються за вихідні. До кінця 1994 р. практично протягом шести років з початку реалізації проекту була створена нова геодезична мережа та єдина система координат сантиметрової точності для всієї Європи (рис. 1).

За станом на 1999 р. з проведенням кампанії GPS-спостережень за програмою EUREF в Молдові було завершено створення уніфікованої високоточної геодезичної мережі для всієї Європи та опубліковані для використання геодезичні координати пунктів мережі. В загальному EUREF-мережа включає близько 240 пунктів, або від 2 до 15 пунктів для кожної країни в залежності від її розмірів та розташування. До 2001 р. більшість країн Європи завершили програмами згущення державних геодезичних мереж та прийняли ETRF89 як основну геодезичну систему відліку.

Для прикладу згущення EUREF-мережі приведено досвід Угорщини. В 1991 р. в рамках EUREF-кампанії в Угорщині було визначено п'ять пунктів. Майже зразу після закінчення цієї кампанії 1991 р. було визначено додатково 19 GPS-пунктів, які склали основу нової геодезичної мережі країни. Національна геодезична GPS-мережа Угорщини, яка була запроектована для задоволення потреб земельної реформи, землеустрою, картографування території тощо, включає 1154 пункти, які рівномірно покривають всю територію країни при середній відстані між пунктами 10 км. Всі GPS-спостереження пунктів мережі згущення були проведені всього за 41 робочий день в три етапи (три блоки мережі — східний, центральний та західний) протягом 1995—1997 рр. дев'ятьма бригадами спостерігачів [4]. В результаті обробки матеріалів спостережень отримана геодезична мережа сантиметрової точності, яка задоволяє вимоги практично всіх користувачів.

В рамках реалізації програми EUREF до 2000 р. в Європі створена також EUREF-мережа перманентних GPS-станцій (EUREF Permanent Network), яка включає більше 100 станцій. Кожна країна

створює свою мережу перманентних станцій в залежності від власних потреб, і тільки окремі з них включаються до мережі EUREF. Так, з 21 перманентної станції шведської геодезичної мережі SWEPOS тільки п'ять станцій включено до мережі EUREF, з 11 перманентних станцій Норвезької мережі SATREF — шість станцій, з 20 перманентних станцій геодезичної мережі Німеччини — 10 станцій і т. п. [6]. Для включення в мережу EUREF до перманентних станцій ставляться такі вимоги:

- станції мають бути встановленими з дотриманням вимог та стандартів IGS;
- дані спостережень мають надаватись до Постійного бюро перманентної мережі та бути відкритими для всіх країн учасників EUREF;
- дані спостережень мають проходити обробку в одному із центрів системи обробки даних.

В систему обробки даних EUREF входять: Глобальний центр обробки даних в Географічному інституті Франції в Парижі (IGN), Регіональний центр обробки даних в Федеральному управлінні геодезії і картографії Німеччини у Франкфурті-на-Майні (BKG), шість локальних центрів обробки в

Італії, Нідерландах, Фінляндії, Австрії, Швеції та Бельгії а також Центральне бюро Перманентної GPS-мережі в Бельгії [5].

Головною метою встановлення мережі перманентних станцій є підтримка ETRS89 та забезпечення високоточними даними геодинамічних спостережень, моніторингу рівня морів, метеорологічні дослідження тощо. Близько 50 % перманентних станцій EUREF входять до мережі Міжнародної геодинамічної служби (IGS). Результати спостереження на перманентних станціях раз на добу передаються для обробки обчислювальні центри системи обробки даних. Близько 36 перманентних станцій передають дані спостережень для обробки погодинно. Контроль діяльності мережі перманентних станцій здійснюється Бельгійською Королівською обсерваторією, де знаходиться Центральне бюро Перманентної мережі. Картограма розміщення перманентних станцій приведена на рис. 2.

До EUREF приєдналися всі країни Європи, за винятком Російської Федерації та Білорусі. Дещо інша ситуація з питання приєднання до EUREF склалась в Україні. В 1995 р. з ініціативи Головного управління геодезії, картографії та кадастру (Укр-

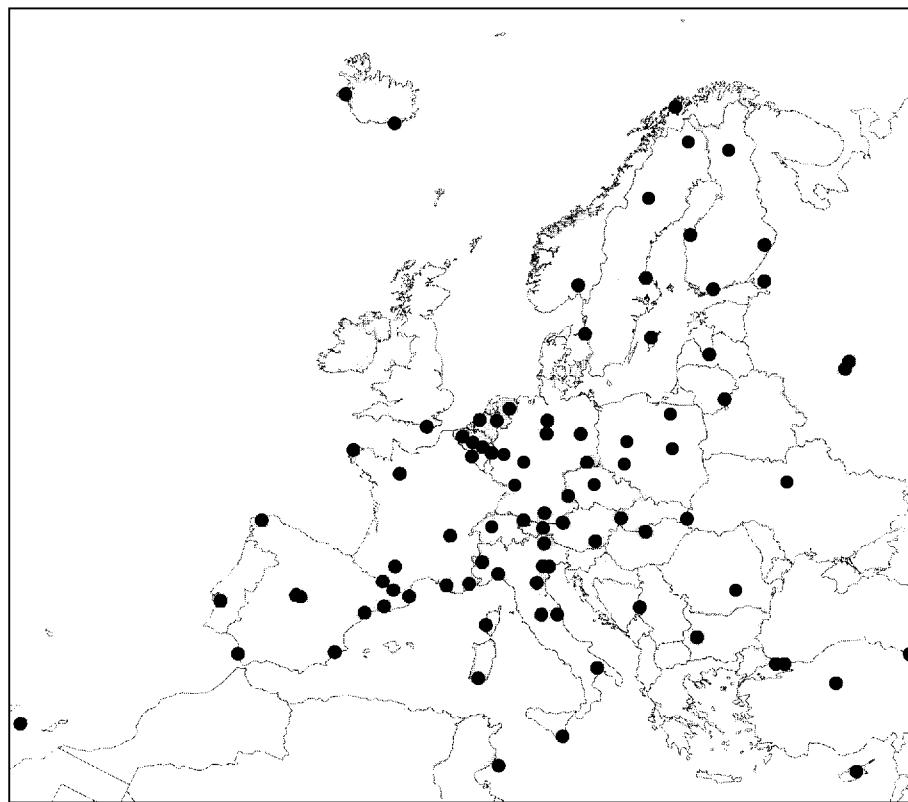


Рис. 2. Картограма розміщення перманентних станцій EUREF [5]

геодезкартографії) та технічної підтримки Інституту прикладної геодезії (IfAG) з Франкфурта-на-Майні (Німеччина) було організовано проведення кампанії зі створення GPS-мережі. У відповідності з загальноприйнятою для EUREF методикою планувалось провести п'ятиденні спостереження на 15 спеціально побудованих пунктах з середніми відстанями між ними близько 200—300 км. На жаль, завершити спостереження згідно з планом не вдалось з причини деяких організаційних прорахунків та нерозуміння окремими державними органами і спеціалістами важливості цього питання та необхідності виконання такого проекту для України як одного з практичних кроків в реалізації політики інтеграції до Європейського співтовариства. Питання створення EUREF-мережі було розблоковано тільки в 2000 році, після прийняття Постанови Кабінету Міністрів України від 22.12.99 року № 2359 «Про впровадження на території України Світової геодезичної системи координат WGS-84».

GPS-технології широко використовуються також для створення висотних мереж. Технічною робочою групою Підкомісії EUREF в 1994—1997 рр. проводилась підготовка для організації проекту з створення Європейської висотної вихідної GPS-мережі EUVN (European Vertical GPS Reference Network). Найважливішими науковими та практичними цілями [9] створення такої мережі є:

- встановлення єдиної системи висот та вихідних дат для Європи;
- прив’язка і зв’язок всіх футштоків та моніторинг абсолютноого рівня морів та їхніх варіацій;
- вибір та встановлення єдиного вихідного пункту висотної мережі;
- створення Європейської висотної кінематичної мережі.

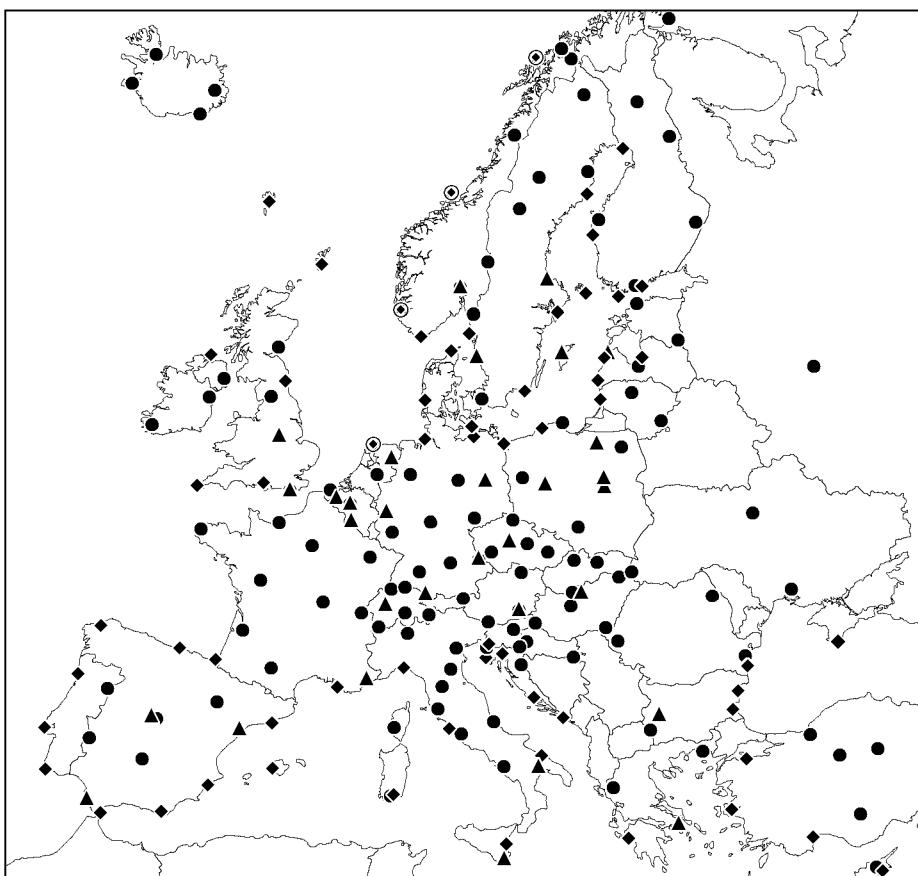
EUVN-мережа включає 195 пунктів, зокрема 79 EUREF-пунктів, 53 вузлових пункти нівелірних мереж в різних країнах і 63 футштоки. В період 21—29 травня 1997 р. на всіх пунктах мережі були виконані одночасні спостереження за спеціальною програмою із застосуванням двочастотних геодезичних GPS-приймачів. В Україні до EUVN-мережі включено чотири пункти — Симеїз, Миколаїв, Київ та Ужгород, висоти яких визначені з нівелювання першого класу. Обробка результатів спостережень, виконаних українськими фахівцями у відповідності з методикою EUVN, проведена обчислювальними центрами EUREF, і таким чином Україна приєдналась до Європейської висотної мережі. Картограма розміщення пунктів EUVN-мережі приведена на рис. 3.

Наприкінці 1999 р. спеціальною комісією CERCO

— MEGRIN (Multipurpose European Ground Related Network) на вимогу Європейської комісії було організовано круглий стіл з питань Вихідних геодезичних дат для Європи [11]. В засіданні круглого столу взяли участь експерти від Генерального директорату інформаційного суспільства ЄС, Європейського комітету зі статистики (EUROSTAT), Європейської організації з безпеки аeronавігації (EUROCONTROL), EUREF, CERCO, Технічного комітету 211 Міжнародної організації зі стандартизації (ISO/TC211) та ін. Круглий стіл рекомендував Європейській комісії прийняти ETRS89 як геодезичну систему координат для Європи і EUVN — як систему висот та рекомендувати прийняття цих систем всіма країнами членами ЄС. Рекомендовано також відкрито опубліковувати для використання параметри зв’язку між національними системами координат та ETRS89 з точністю до 1—2 м, а також вказати наявність точніших параметрів переходу та офіційні джерела інформації з цих питань.

Таким чином, за 10 років у Європі створено та прийнято для використання нову систему координат та висот і високоточну планову та висотну мережі на найвищому сучасному рівні точності. Нова мережа охоплює територію площею близько 5 млн км², а відстань між крайніми точками мережі складає 4.9 тис. км з півночі на південь та 5.5 тис. км з заходу на схід. Таке досягнення стало можливим тільки завдяки застосуванню GPS-технологій, які практично не мають технічних обмежень для ефективного використання для створення геодезичних мереж. Основним обмеженням для застосування GPS-технологій можуть бути лише економічні, організаційні або адміністративні проблеми.

Початок застосування GPS-технологій в геодезичній практиці в Україні можна віднести до 1993 р., коли представники геодезичної служби України вперше взяли участь в засіданні EUREF, яке проходило в Будапешті. На цьому засіданні було представлено також нарис концепції проекту модернізації геодезичної мережі України з застосуванням GPS-технологій та співробітництва з європейськими країнами в цих питаннях [7]. В тому ж році Українським аерогеодезичним підприємством були закуплені перші GPS-приймачі «Trimble 4000». Комплект складався з двох геодезичних двочастотних приймачів «Trimble 4000 SSE», які були використані для спостережень на пунктах Львів та Ужгород в рамках кампанії Геодинаміка Карпат (GEODUC). Протягом 1994 р. провадилася розробка проекту та підготовка до спостережень Фундаментальної GPS-мережі, яка включала 15 заново побудованих фундаментальних пунктів (переважно в аеропортах та астрономічних обсерва-



- ▲ - Перманентні GPS-станції EUREF
- ◎ - Перманентні GPS-станції, суміщені з метеорографами (рівнемірними постами)
- ◆ - Метеорографи, включені до мережі
- - Пункти нівелірних мереж та пункти EUREF, включені до мережі

торіях). Передбачалось, що ця мережа буде інтегрована до EUREF. У зв'язку з відсутністю на той час в Україні необхідної кількості геодезичних GPS-приймачів кампанію спостережень планувалась провести за технічної підтримки Інституту прикладної геодезії з Німеччини, який, як один із центрів обробки даних, погодився надати відповідну кількість приймачів та допомогу в проведенні спостережень і обробки даних. Як відзначалось раніше, повністю завершити кампанію спостережень не вдалось. Незважаючи на це, підприємства геодезичної служби продовжували нарощувати зусилля із впровадження GPS в геодезичну практику. Були придбані додаткові комплекти геодезичних приймачів та проведені додаткові вимірювання на окремих пунктах Фундаментальної мережі, необхідні для завершення спостережень 1995 р. Обробка результатів спостережень проводилась фахівцями та науковцями Науково-дослідного інституту гео-

дезії та картографії і Державного університету «Львівська політехніка» в два етапи [2]. На першому етапі, в 1996 р., Фундаментальна мережа була обчислена як вільна, з одним вихідним пунктом Симеїз. У 1998 р. для контролю якості Фундаментальної GPS-мережі України проведено повторне обчислення та врівноваження мережі. Для цього використано результати спостережень на 19 пунктах мережі, в тому числі 14 пунктів Фундаментальної GPS-мережі України та п'ять Перманентних станцій EUREF-мережі, розташованих в інших країнах (Грац, Йозефослав, Метсахові, Потсдам та Ветцель), які служили вихідними пунктами. За результатами обробки даних спостережень отримані такі характеристики Фундаментальної GPS-мережі України [11]:

- середня квадратична похибка взаємного положення пунктів мережі — 2—5 мм;
- середня квадратична похибка узгодження з за-

- гальномоземною системою ITRF93 на епоху 1995.47 складає 5—8 мм.
- загальна похибка мережі менше 10 мм.

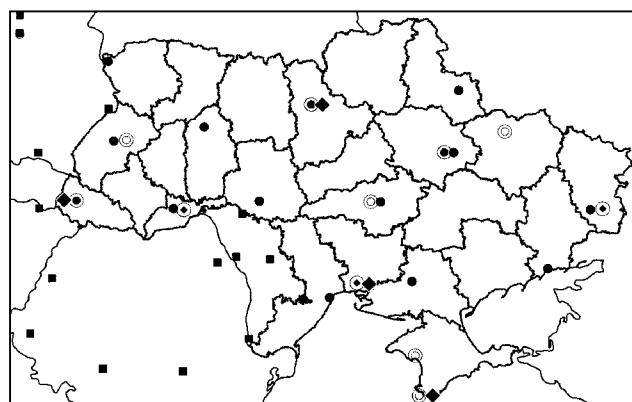
Із завершенням в 1998 р. обробки результатів спостережень в Україні була побудована високоточна багатоцільова геодезична мережа субсантиметрової точності, координати пунктів якої отримані в загальномоземній системі координат. Створена в короткі терміни Фундаментальна GPS-мережа має для України велике наукове та практичне значення. Без такої мережі неможливе виконання робіт зі сертифікації міжнародних аеропортів згідно з вимогами ICAO, яка зараз проводиться в Україні, геодинамічні спостереження, покращення характеристик традиційної мережі тощо.

Як показала практика, система координат, що застосовується в Україні з 40 рр. минулого століття (точність 1—2 м) та Державна геодезична мережа, побудована традиційними методами у 1950—1980 рр., вже не можуть задовольнити зростаючі вимоги користувачів, особливо з точки зору широкого застосування GPS-технологій в різних галузях науки і виробництва (навігація, геологія, земельна реформа тощо). В зв'язку з цим перед країною стоять важливі питання — створення Національної системи відліку та модернізації Державної геодезичної мережі. Вирішення цих питань пов'язано із значними фінансовими та матеріальними витратами, тому вони потребують наукового обґрунтування та зваженого підходу, який опирається на міжнародний досвід та співпрацю з іншими країнами. Науково-технічна Програма створення національної системи відліку розробляється геодезичною службою України з залученням провідних вчених та фахівців в цій галузі. На наш погляд, така програма повинна базуватись виключно на застосуванні сучасних технологій та разом з іншими включати такі заходи:

- повторне спостереження пунктів Фундаментальної геодезичної мережі за програмою EUREF;
- прив'язка пунктів Державної геодезичної мережі І та ІІ класів до пунктів Фундаментальної геодезичної мережі для оцінки точності існуючої мережі та обчислення параметрів зв'язку іншими системами координат;
- оцінка точності Державної геодезичної мережі та обчислення точних параметрів зв'язку державної системи координат з Європейською та Міжнародною системами;
- створення мережі перманентних станцій та включення деяких з них до EUREF;
- модернізація Державної висотної мережі та вибір системи висот для України;

- модернізація Державної гравіметричної мережі;
- побудова моделі геоїда субдециметрової точності для території України;
- згущення пунктів Фундаментальної геодезичної мережі до густоти один пункт на 100 км² (побудова GPS-мережі І класу точності із 6000 нових пунктів для забезпечення потреб народного господарства);
- згущення Державної геодезичної мережі до густоти одного пункту на 10—15 км² (середня відстань між пунктами 5—6 км);
- впровадження засобів та методів Диференційних GPS-вимірювань (DGPS) та RTK.

Окрім з вище приведених заходів вже реалізуються підприємствами геодезичної служби країни. В 2000 р. після довготривалого підготовчого періоду Українським державним аерогеодезичним підприємством реалізовано проект прив'язки 48 пунктів Державної геодезичної мережі до пунктів Фундаментальної геодезичної мережі. В липні 2001 р. завершена програма повторних спостережень 15 пунктів Фундаментальної геодезичної GPS-мережі. Науково-дослідним інститутом геодезії та картографії проводиться обробка результатів спостережень. Встановлено чотири перманентні станції та планується встановлення ще восьми перманентних станцій, які управлюватимуться в основному Головною астрономічною обсерваторією та геодезичною службою України [3]. Картограма розміщення пунктів Фундаментальної геодезичної GPS-мережі наведена на рис. 4.



● - Пункти Фундаментальної мережі, які спостерігались за програмою EUREF
◆ - Пункти, включені до мережі EUVN
◎ - Перманентні станції локальні та включені до мережі IGS
○ - Перманентні станції, які плануються відкрити
■ - EUREF-пункти за межами України

Рис. 4. Картограма розміщення пунктів фундаментальної GPS-мережі України

Для ефективного вирішення завдань земельної реформи, розвідки корисних копалин, демаркації державного кордону України, проектування та будівництва трансевропейських магістралей, охорони навколошнього середовища тощо необхідне створення нової геодезичної GPS-мережі. Виходячи з досвіду Угорщини та інших країн Європи для створення мережі, що включає приблизно 6000 пунктів, які рівномірно покриватимуть територію країни (при середніх відстанях між пунктами близько 10 км), необхідно витратити близько 300 робочих днів для 10 бригад, оснащених GPS-приймачами. Виконання таких робіт можливе тільки при відповідному стабільному фінансуванні з державного бюджету.

GPS-технології широко застосовуються також в інженерній геодезії для створення спеціальних високоточних геодезичних мереж для моніторингу стану великих промислових споруд та конструкцій. Значний інтерес представляє досвід створення високоточної геодезичної мережі першої черги геодинамічного полігону Чорнобильської АЕС [1]. Спеціальна геодезична мережа створена в 1996 р. на промисловому майданчику ЧАЕС для спостережень за деформаціями об'єкту «Укриття» та прилеглих споруд і включає 13 пунктів. Мінімальна довжина сторони мережі складає 0.22 км, максимальна — 3.2 км, середня — 1.3 км. Всього в мережі вимірюють 77 векторів. Спостереження виконані чотирма одночастотними GPS-приймачами «Trimble 4600» сесіями тривалістю 3 год. Середня квадратична похибка визначення сторони мережі, отримана в результаті її врівноваження, склала 1.4 мм. З початку створення мережі проведено ще вісім циклів спостережень за аналогічною методикою, які підтвердили як стабільність пунктів мережі, так і високу точність отриманих результатів вимірювань, що досягаються з застосуванням GPS-технологій. Порівняння результатів вимірювань, отриманих в різних циклах спостережень, показали, що різниця між значеннями вимірюваних векторів знаходитьться в межах 0.4—2.2 мм по довжині та 0.008—0.64" по азимуту. Досвід створення згаданої мережі, а також досвід застосування GPS-технології для спостереження за висотними будівлями показує високі можливості цього методу з точки зору досягнення надзвичайно високої точності вимірювань в стислі терміни, що неможливо досягти традиційними методами.

Космічні технології визначення місцевонаходження знаходить своє застосування в різних галузях економіки та активно розвиваються, і за оцінками експертів ринок цих технологій складає десятки мільярдів доларів США. Європейським співтова-

риством впроваджується проект створення глобальної навігаційної системи, в США розгорнута широка програма модернізації GPS, тому для України є надзвичайно важливим визначити власну політику в цих питаннях. За традицією політика в галузі використання супутниковых радіонавігаційних технологій відображається в так званому Радіонавігаційному плані країни. Виходячи з того, що геодезична мережа та геодезична система відліку є основою для побудови систем навігації та застосування радіонавігаційних технологій в інших галузях, наведені заходи з визначення національної системи відліку повинні увійти складовою частиною до Державного радіонавігаційного плану, який повинен стати основним документом для визначення політики України в галузі застосування супутниковых радіонавігаційних технологій.

Тут наведено тільки деякі приклади застосування GPS-технологій в геодезії. Можливості технологій визначення місцевонаходження об'єктів, особливо в поєднанні з можливостями ГІС-технологій, надзвичайно широкі. Тому об'єднання зусиль всіх спеціалістів у цій галузі для вироблення спільної стратегії та координація і узгодження дій — необхідна умова, виконання якої дозволить користувачам в Україні відчути найближчим часом усі переваги сучасних технологій.

Список скорочень

GPS NAVSTAR	Global Positioning System Navstar
IAG	International Association of Geodesy
ED87	European Datum 1987
GIS	Geographic Information Systems
US DMA	United States Defense Mapping Agency
WGS84	World Geodetic System 1984
EUREF	European Reference Frame
CERCO	Comite European des Responsables de la Cartographie Officielle (fr.)
WG VIII	Working Group VIII (тепер Working Group «Geodesy»)
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
IERS	International Earth Rotation Service
SLR/VLBI	Satellite Laser Ranging/Very Long Baseline Interferometry
ETRF89	European Terrestrial Reference Frame 1989
IfAG	Institute of Applied Geodesy
EUVN	European Vertical GPS Reference Network
MEGRIN	Multipurpose European Ground Related Network

- Баран П. І., Бондар А. Л., Романишин П. О. та ін. Перший досвід і проблеми використання GPS-методу в інженерно-геодезичній практиці // Вісник геодезії та картографії.— 1998.
- Кучер О., Абрикосов О., Марченко А. Контроль якості фундаментальної GPS-сеті України // Науково-технічний симпозіум Геомоніторинг-99. Моршин 13-16.11.1999. — Львів, 1999.—С 10—14.
- Хода О. Українська мережа перманентних GPS-станцій // Науково-технічний симпозіум Геомонітооринг-99. Моршин

- 13-16.11.1999. — Львів, 1999.—С. 19—21.
4. Adam J. et al. The report of Hungary on EUREF Related Activities in 1997—1998. Euref publication 7/1. BKG. Farnkfurt am Main, 1999.—P. 176—180.
5. Bruyninx C. The EUREF Permanent GPS Network and the Network — Activities May 1996 — May 1997 and future plans // Report of the Symp. of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Sofia, 4—7 June 1997. — Munchen: Bavarian Academy of Science, 1997.—P. 39—49.
6. Bruyninx C. Overview of the EUREF Permanent Network and the Network coordination Activities // Report of the Symp. of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Tromso, 22—24 June 2000. — Munchen: Bavarian Academy of Science, 2000.—P. 24—31.
7. Cheremshynsky M. Some Activities of Geodetic Service of Ukraine related to Establishing of Modern Reference Frame // Report of the Symp. of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Budapest, 17—19 May 1993. — Munchen: Bavarian Academy of Science, 2000.—P. 178—180.
8. Daly P., Riley S., Raby P. GLONASS Status and Initial C/A and P code Ranging test. — University of Sydney and University of Leeds, 1992.
9. Ihidle J. et al. The concept of the European Vertical GPS Network (EUVN). EUREF publication 7/II. BKG. — Frankfurt am Main, 1999.—P. 11—21.
10. Seeger H. EUREF a Modern Geodetic Approach to establish an All-European Reference System // Proc. of Belgo-European Seminar «New Surveyors» Wegimont, 24-25.03.1993.
11. Spatial Reference System for Europe // Proc. and Recommendation of Workshop held in Marne - La Vallee, 29—30.11.1999. European Commission. European Commission Joint Research Center, 2000.
12. Zelinsky J. EUREF: Application of GPS for Geodesy. Polish Academy of Science. Civil GPS Service interface Committee. 6-th European Meeting. — Warsaw, 1997.

**GPS-TECHNOLOGY IN GEODETIC PRACTICE.
EXPERIENCE AND PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT**

M.D.Cheremshynskyi

The experience of European countries cooperation to construction of geodetic networks and new reference frame establishment based on GPS-technologies application is discussed. The measures for modernization of the Ukrainian State Geodetic Network are proposed.

УДК 621.396.96

А. И. Горб¹, О. А. Криволапов²

¹Національний аерокосмічний університет (ХАІ)

²Навігаційно-геодезичний центр, Харків

Опыт использования GPS-технологий в землеустройстве

Описываются особливості реалізації GPS-технологій в землеустройстві. Розглянуто можливості застосування приймачів ProMARK X-CM, «Locus» і «Legacy» Н для польових зйомок. Пропонуються практичні рекомендації з вибору режимів роботи GPS-обладнання.

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые методы съемки местности и сбора данных находят все большее применение для решения задач инвентаризации земель, создания и обновления кадастров, в частности земельного, для распаевания участков земли в процессе ее приватизации. Использование аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем GPS NAVSTAR (США) и ГЛОНАСС (Россия) позволяет значительно повысить производительность полевых съемок и упростить камеральную обработку собранных данных. Под аппаратурой потребителей следует понимать в данном случае геодезическое GPS-оборудование, базирующееся на приеме, обработке и вычислении координат по сигналам спутниковых радионавигационных систем. Вопросы практического использования высокоточного геодезического GPS-оборудования представляют значительный интерес для землестроителей, так как в Украине установлены достаточно сжатые сроки проведения земельной реформы. До конца 2002 г. должно быть проведено распаевание земель коллективной собственности сельскохозяйственных предприятий с выдачей государственных актов на право владения землей. Поэтому GPS-технологии приобретают одно из доминирующих мест в инструментальной съемке местности. При этом землестроителей особо интересует точность и надежность определения координат, влияние внешних условий (лесополосы, здания, линии электропередач), возможность автоматизации сбора и обработки полевых наблюдений, редуцирование полученных координат в принятые в Украине координатные системы, производительность и экономическая эффективность новых спутниковых технологий.

Основными задачами, решаемыми в процессе сбора данных для землестроителей, являются:

- создание опорных съемочных геодезических сетей, которые впоследствии могут служить основанием для проведения съемки при помощи оптических геодезических инструментов;
- съемка контуров угодий;
- съемка отдельных географических объектов, расположенных на земельных участках и требующих специального отвода земли под них (опоры линии электропередач, дороги, трубопроводы, пункты государственной геодезической сети и т. д.);
- сбор данных по рельефу местности;
- определение координат характерных точек для регистрации растровых изображений (аэрофотоснимков, космических снимков).

Эти и другие землестроительные задачи могут быть эффективно решены при помощи GPS-технологий. Первое знакомство землестроителей и геодезистов Украины с GPS-оборудованием состоялось в октябре 1995 года, когда Навигационно-геодезический центр (Харьков) на базе НПО «Метрология» провел выставку-семинар «Применение спутниковой глобальной системы позиционирования в геодезии и землеустройстве в Украине». На семинаре было представлено высокоточное GPS-оборудование фирмы «Ashtech» (США), которая первой на практике доказала эффективность создания интегрированной аппаратуры потребителей, принимающей и обрабатывающей совместно сигналы систем GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. Впоследствии GPS-оборудование фирмы «Ashtech» начали использовать землестроители многих областей Украины. Это прежде всего Кировоградская, Донецкая, Николаевская, Харьковская, Черниговская области.

Таблица 1. Основные характеристики GPS-приемников

Тип приемника	ProMARK X-CM	«Locus»	«Legacy-H GD»
Изготовитель	«Magellan», США	«Ashtech», США	«Topcon/Javad», США
Внутренняя память, Мб	4	4	до 96
Емкость памяти (6 спутников) при темпе 2 с, ч	10	12.5	10
Напряжение питания, Вт	8...12	4...12	6..28
Потребляемая мощность, Вт	5	1	3
Темп выдачи данных, с	1...999	2...999	0.05...999
Теплый старт, с	60	60	10
Горячий старт, с	35	12	1
Рабочая температура	-10 °C...+60 °C	-20 °C...+65 °C	-40 °C...+55 °C
Вес, кг	0.84	0.8	0.46
Антенна	внешняя навигационная или геодезическая, микрополосковая	встроенная, микрополосковая	внешняя микрополосковая, фазоцентрированная
Цена одного приемника, USD	4000	6200	4500

Таблица 2. Точностные характеристики GPS-приемников

Тип приемника	ProMARK X-CM	«Locus»	«Legacy-H GD»
Количество каналов	10	8	20 (10+10)
Частота	L1	L1	L1 (L2)
Обрабатываемые сигналы	C/A-код, фаза	C/A-код, фаза	C/A (P-коды), фаза
Точность:			
— статика, мм;	$15 + 3 \cdot 10^{-6} D^*$	$5 + 1 \cdot 10^{-6} D$	$5 + 1.5 \cdot 10^{-6} D$
— кинематика, мм;		$12 + 2.5 \cdot 10^{-6} D$	
— режим RTK, мм			$15 + 2 \cdot 10^{-6} D$
Программное обеспечение	MSTAR	«Locus Processor»	«Pinnacle»
Режимы съемки	статика, кинематика	статика, «стою-иду»	статика, «стою-иду», кинематика

Опыт работы с различными типами GPS-оборудования позволяет провести анализ общих свойств и особенностей использования в землеустройстве следующих трех типов приемников: ProMARK X-CM («Magellan», США), «Locus» («Ashtech»/«Magellan», США), «Legacy» («Javad» / «Topcon», США).

Основные характеристики GPS-приемников и их точностные возможности приведены в табл. 1, 2.

ОПИСАНИЕ GPS-ПРИЕМНИКОВ PROMARK, «LOCUS», «LEGACY»

Одним из наиболее распространенных в Украине является приемник ProMARK X-CM (рис. 1, а) фирмы «Magellan» (США), работающий по сигналам GPS NAVSTAR, в котором обеспечивается оптимальное соотношение точности и цены. Комплект из двух приемников с геодезическими и навигационными антеннами и программным обеспечением обработки наблюдаемых данных стоит в Украине (Навигационно-геодезический центр) около 8000 долларов США.

Приемник ProMARK X-CM — это десятиканальный фазовый приемник, предназначенный для навигации, маркировки и привязки географических объектов, а также для геодезической съемки. Конструктивно приемник ручной, удобный и простой в обращении, с оперативной выдачей данных о местоположении. Запоминающее устройство приемника (4 Мб) позволяет загружать и хранить данные. На практике при темпе съема данных 1 с время работы приемника или продолжительность накопления данных составляет более девяти часов. Кроме того, приемник может сохранять до 500 путевых точек или 10 маршрутов с 20 участками каждый. В автономном режиме точность приемника в плане (в отсутствие селективного доступа) не хуже 12 м. В дифференциальном режиме после камеральной обработки точность координатных измерений составляет $15 \text{ mm} + 3 \cdot D \cdot 10^{-6}$, где D — длина базовой линии в миллиметрах. Приемник ProMARK X-CM может работать как в автономном, так и в дифференциальном режимах.

Дифференциальный режим предусматривает установку одного приемника (базового) на точку с

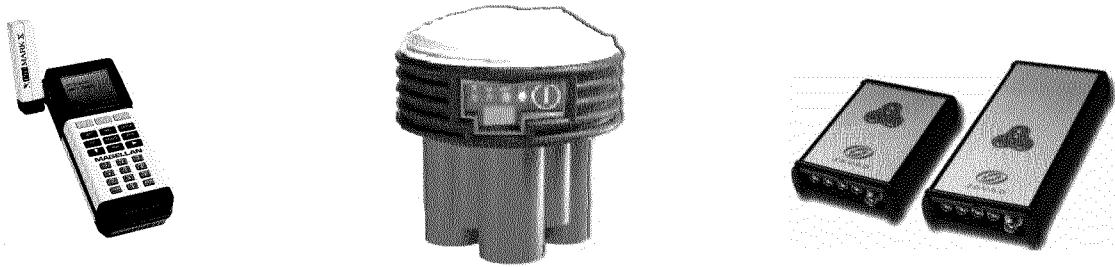


Рис. 1. Приемники ProMARK X-CM (а), «Locus» (б) и «Legacy H» (в)

известными (априорно) координатами. Измерения второго приемника (мобильного) корректируются при камеральной обработке или в режиме реального времени (RTK-режим) дифференциальными поправками, сформированными по измерениям базового приемника. При камеральной обработке на компьютере информации, хранящейся в памяти приемника, применяются программные продукты MSTAR и MCOM, работающие в среде Windows. Программа MCOM осуществляет обмен накопленной в приемнике информации («сырых данных» и эфемерид) с компьютером, а программа MSTAR позволяет проводить дифференциальную обработку и статистический анализ данных. Дополнительными возможностями ПО MSTAR является программа-планировщик для контроля числа спутников, видимых приемником в процессе полевых съемок, и величины геометрического фактора, т. е. ухудшения точности съемки из-за неблагоприятного расположения созвездия спутников и программа-конвертор, позволяющая представлять наблюдаемые приемником данные в формате RINEX, а следовательно, открывающая возможность их обработки другими программными продуктами.

Система для съемки местности «Locus» фирмы «Ashtech» (рис. 1, б) представляет интерес для землеустроителей благодаря своей простоте, надежности и точности.

В одном корпусе объединены микрополосковая антенна, собственно приемник и источник питания. Автономное питание приемника стандартными щелочными батарейками или аккумуляторами обеспечивает до 100 ч непрерывной работы. Управление приемником осуществляется лишь одной кнопкой. Панель индикации состоит из четырех индикаторов: питание, слежение за спутниками, память, время съемки. Оборудование «Locus» может использоваться в полном объеме как система из двух

приемников, а также в виде расширенной системы, включающей три и более приемника. Комплект может эксплуатироваться как для обычной GPS-съемки, так и для совместного применения с традиционными геодезическими инструментами в тех местах, где измерения с помощью глобальных спутниковых систем затруднены. Характерной особенностью приемников «Locus» является отсутствие кабельных соединений. Инфракрасные устройства обмена данными значительно упрощают установочные работы и увеличивают скорость обмена данными до 57000 бод.

Камеральная обработка полевых наблюдений проводится программным обеспечением «Locus Processor» на стандартной платформе Windows. Удобный графический интерфейс дает представление о проделанной работе в полевых условиях как при статической съемке с сантиметровой точностью, так и при кинематическом режиме. В программах «Locus Processor» применяются разнообразные средства для анализа качества съемок, а также содержатся другие полезные процедуры, такие как планировщик, обработка GPS-данных, уравнивание сетей по методу наименьших квадратов, инструменты для генерации отчетов, экспорт данных в стандартные форматы.

Так, автоматический «определитель сбоев» помогает обеспечить надлежащую обработку в первый раз, указывая на данные, которые могут вызвать проблемы. При полностью автоматической обработке программное обеспечение «Locus Processor» постоянно представляет наилучшее возможное решение без необходимости обрабатывать полевые данные вручную. Для повышения производительности полевой съемки, гибкости проведения наблюдений, для улучшения качества собираемой информации предпочтительнее использовать ручной накопитель данных — ручной контроллер. При проведении

основных геодезических работ контроллер представляет детальную статистику работы приемника и сбора данных. Более того, он позволяет землеустроителю в полевых условиях вводить характерную для наблюдаемых точек информацию (атрибуты), что необходимо для реализации высокопроизводительного режима Stop & Go (стою—иду).

Фирма «Topcon», а точнее, ее подразделение «Topcon Positioning Systems» выпустила новый ряд геодезических приемников серии «Legacy H» (рис. 1, в). Для надежной работы в полевых условиях приемники выполнены в компактных герметичных цельнометаллических корпусах, что повышает помехозащищенность и ударопрочность приемников. Приемники «Legacy» выполнены в двух вариантах: полный корпус — «Legacy GGD» и половинка — «Legacy GG» и «Legacy GD». В свою очередь приемники в укороченном корпусе имеет две модификации: «Legacy GG» принимают и обрабатывают сигналы двух навигационных систем GPS и ГЛОНАСС на частоте L1, а «Legacy GD» — двухчастотная модификация приемника сигналов GPS L1 и L2.

Концептуальная особенность оборудования фирмы «Topcon» состоит в возможности создания требуемой конфигурации приемника с помощью опций. Установка новых опций и обновление программного обеспечения может производить землеустроитель самостоятельно после получения пароля установки. Опция Cinderella каждый второй вторник автоматически включает в «Legacy» опции, обеспечивающие его работу по двум частотам двух спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС.

Отличительные особенности приемника «Legacy» наблюдаются и на аппаратном уровне. Ядром приемника является микросхема «Paradigm». В одном корпусе микросхемы объединены 40 универсальных каналов, каждый из которых может отслеживать сигнал как GPS, так и ГЛОНАСС на частоте L1 или L2. Кроме того, каждый из каналов приемника может быть использован в качестве скоростного (32 Кбит/с) коммуникационного канала. Технология, заложенная в «Paradigm», улучшает качество обработки данных и повышает способность отслеживать сигналы спутников в неблагоприятных условиях (лесопосадки, под линиями электропередач). В ожидании введения C/A кода на частоте L2 в микросхеме введена обработка C/A кода на этой частоте. Следует отметить также, что микросхема включает шесть независимых высокоскоростных коммуникационных каналов с распределенным спектром. Эти каналы работают как на прыгающей частоте (64 Кбит/с), так и с сигналом, модулируемым псевдошумом (32 Кбит/с). Предлагаемая ком-

муникационная технология обладает синхронизацией благодаря «жесткой» привязке ко времени GPS. Система подавления помех, встроенная в микросхему, позволяет подавлять до шести внутриполосных помех. При обработке сигналов спутников как по коду, так и по фазе в микросхеме предложен ряд новшеств для уменьшения влияния многолучевости.

Для управления режимами работы приемника «Legacy» землеустроителю в полевых условиях может использовать минимальный интерфейс «Minter» или внешний контроллер, например «Psion 5», CDU-1 или «Ranger». Контроллеры, работающие в операционной системе Windows CE, оснащены специальными программами для работы в поле — FieldFace. Два диода и две функциональные клавиши на корпусе приемника («Minter» — MINimum INTERface) позволяют землеустроителю управлять режимами работы приемника и производить запись данных. Внутренняя память приемника может увеличиваться до 96 Мбайт. Для передачи данных с приемника в персональный компьютер используется интерфейсное программное обеспечение PC-CDU Lite, которое позволяет подготовить приемник для полевых работ или для работы в офисе. Программное обеспечение PC-CDU Lite работает в среде Windows 95, 98, NT.

В зависимости от задач землеустроителя предусмотрены следующие дополнительные возможности приемника «Legacy»:

- обновление данных с частотой 5, 10, 20 Гц;
- режим реального времени RTK;
- прием и передача дифференциальных корректирующих поправок в формате RTCM;
- подавление многолучевости и помех в полосе сигнала;
- ввод и вывод опорной частоты и внешних событий.

К приемнику «Legacy» предусмотрено подключение внешних антенн «Legant», RegAnt-1, RegAnt-2. Сконструированные и изготовленные в Харькове вешки для антенн являются удобными аксессуарами для землеустроителей.

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ GPS В ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВЕ

Заявленные изготовителями (фирмы «Magellan», «Topcon») точности определения координат (табл. 1) являются достаточно высокими для одночастотных геодезических GPS-приемников. В случае применения GPS-приемников в Украине следует проводить метрологическую аттестацию. Нави-

гационно-геодезический центр совместно с НПО «Метрология» не только обеспечивает землеустроителей метрологической аттестацией GPS-приемников, но и проводит дополнительные тестовые измерения с целью изучения особенностей их функционирования на территории Украины. Основными задачами при этом являются:

- аттестация приемников, а точнее, оценка точностных их характеристик в автономном и дифференциальном режимах;
- учет влияния на точность геометрического фактора PDOP и анализ оптимального времени полевых съемок;
- анализ точности GPS-измерений координат в зависимости от удаления мобильного приемника от базового;
- оценка эффективности работы приемников в различных режимах измерений (статика, кинематика «стою—иду»).

Метрологические и тестовые работы проводились на Национальном метрологическом полигоне. При соблюдении условий получения сантиметровой точности (5 спутников — время наблюдения 25 мин или 6 спутников — время наблюдения 20 мин) погрешность измерения линейных базисов с помощью приемников ProMARK X-CM не превысила 10 мм. В то же время погрешность определения базисов с помощью приемников Locus и «Legacy» после уравнивания на соответствующих программных продуктах не превысила 2 мм.

При создании обоснования основным режимом измерений является «статика», хотя при наличии высокоточного GPS-оборудования можно воспользоваться и некоторыми более производительными режимами, если они позволяют получать требуемую точность. Для построения высокоточного обоснования строится сеть, опирающаяся минимум на

три твердые точки. В дальнейшем узлы этой сети используются для размещения базового приемника при GPS-съемке, либо как опорные пункты прокладки теодолитных и нивелирных ходов.

Часто на практике землеустроителей интересует вопрос предельных расстояний от базовой станции до мобильных приемников и зависимости погрешности измерений от длины базовой линии, поскольку зачастую при работе с GPS-оборудования для съемки контуров базовый приемник устанавливается в одном месте, его положение не изменяется на протяжении всего дня работы, а за это время мобильным приемником землеустроитель может осуществлять съемку на довольно протяженных участках и его максимальное отдаление от базовой станции может составлять несколько десятков километров. Иногда практикуется и такой метод работы, когда базовая станция перманентно находится в одном месте (в областном центре), а мобильными приемниками производят измерения на территории всей области. Один из экспериментов был посвящен практическому изучению этого вопроса. Мобильный одночастотный приемник («Legacy H-GD») был установлен на автомобиле и производил измерения в кинематическом режиме. Расстояние от базового приемника изменялось при этом от 35 до 130 км (рис. 2). График средних квадратичных отклонений местоположения представлен на рис. 3. При этом получение фиксированного решения не было возможно ни в какой период измерения. Нижняя граница средних квадратичных погрешностей «плавающих» решений составила от 80 до 250 мм (меньшие значения погрешности соотносилась с меньшим расстоянием между базовым и мобильным приемником). Однако в реальных условиях происходили частые срывы циклов при движении вблизи густой растительности или при проезде

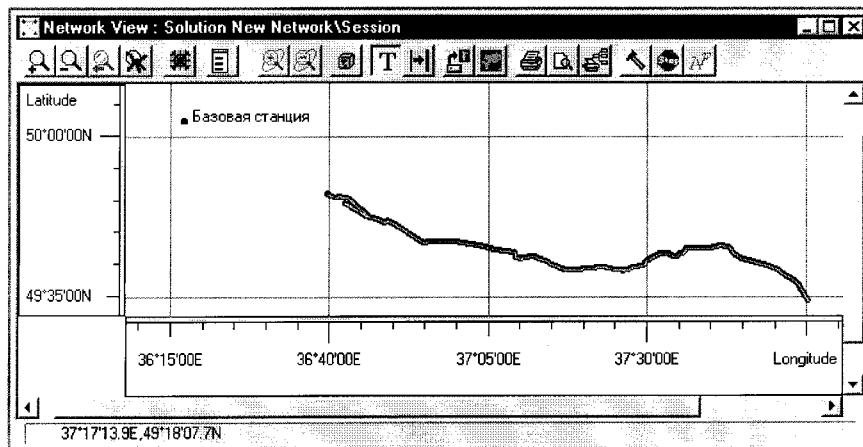


Рис. 2. Траектория движения автомобиля с приемником «Legacy H-GD»

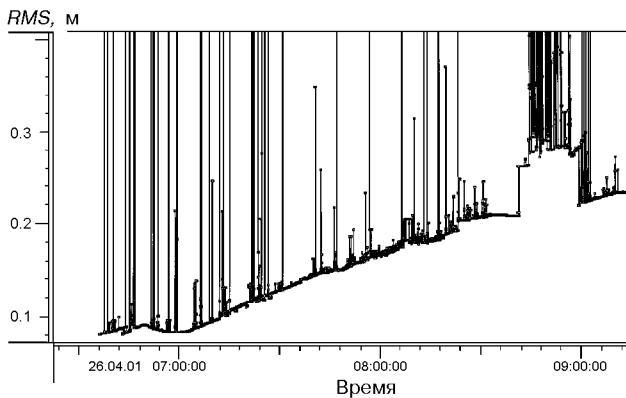


Рис. 3. Значения средних квадратичных отклонений местоположения

под мостами. Этим моментам на рис. 3 соответствуют резкие «выбросы», где погрешность могла составлять до 1.2 м. Следует отдать должное всему программно-аппаратному комплексу фирмы «Topcon Positioning System»: даже при потере сигналов спутников математическое обеспечение «Pinnacle» и технология слежения *Co-Op Tracking*, примененная в приемниках, обеспечивали быстрое восстановление «плавающего» разрешения фазовой неоднозначности.

Тем не менее, следует осторожно подходить к применению результатов измерений на больших базисах. Ведь необходимая для задач определения координат опорных пунктов (межевых знаков) сантиметровая точность требует на базисе в 100 км более чем одного часа статических измерений двухчастотным приемником при хорошем созвездии спутников. Для одночастотных приемников получение результатов сантиметрового уровня точности даже на меньших расстояниях может оказаться довольно затруднительным. Поэтому одночастотными приемниками статические измерения рекомендуется проводить на базисах до 25 км. Что же касается динамических режимов съемки (кинематика и «стою—иду») для задач съемки контуров угодий, транспортных путей и других с требованиями по точности 0.1...0.5 м, то измерения на больших базисах приемлемы. При этом следует учитывать возможности аппаратуры и программного обеспечения и проводить фильтрацию полученных решений.

Одним из интересных направлений применения GPS-оборудования в землестроительных работах является использование GPS-данных перманентных станций в качестве одного из источников «сырых» данных для обеспечения относительного

режима обработки. Доступные с этих станций измерения в формате RINEX могут обрабатываться большинством программных продуктов. Эти данные могут послужить надежным источником получения скорректированных решений в крайних случаях (например, когда после нескольких дней съемки обнаруживается, что базовая станция не накапливалась данные в нужное время или ее данные были повреждены) и при проведении крупномасштабных проектов, таких как создание опорной геодезической сети на территории области. При этом необходимо учитывать некоторые особенности использования данных перманентных станций:

- 1) интервал регистрации данных (одна эпоха) составляет 30 с;
- 2) на территории Украины практически использовать можно не более десятка станций (Голосеев, Ужгород, Менделеево, Бухарест, Грац, Зеленчукская), поскольку на территории Восточной Европы отсутствуют региональные сети контрольных станций;
- 3) при обработке данных перманентных станций желательно использовать точные эфемериды, а они обрабатываются далеко не всеми программными продуктами камеральной обработки.

В связи с этим использование данных перманентных GPS-станций для создания опорной сети требует довольно длительных измерений.

Эксперимент применения данных станции Голосеев (расстояние до Харькова более 400 км) для расчета траектории перемещения мобильного одночастотного приемника показал, что оценка погрешности измерения составила 0.8 м.

Выбор режима измерений при помощи GPS-оборудования определяется несколькими факторами: цель съемки и требуемая точность (для создания опорной сети требуется применение статической, в некоторых случаях быстростатической съемки, при съемке границ основным режимом можно назвать режим «стою—иду», при съемке контуров — «стою—иду» или кинематическую съемку); срок выполнения работы (иногда в целях обеспечения выполнения большого объема полевых работ в ограниченный срок приходится применять более производительные режимы, жертвуя при этом либо точностью измерений, либо временем выполнения камеральных работ);

используемое программное обеспечение камеральной обработки (как обработки спутниковых измерений, так и геодезических, ГИС, САД-систем. Например, некоторые программные продукты не обеспечивают типовую кинема-

тическую обработку, либо при экспорте данных кинематической обработке в какое-либо другое приложение оказывается, что придется проделать дополнительную работу по отбору необходимых точек для дальнейшей камеральной обработки).

Отдельно следует остановиться на режиме «стою—иду». Этот режим нашел широкое применение в землестроительных работах благодаря своей высокой производительности и точности измерений. Однако этот режим требует несколько большей подготовки землеустроителя, поскольку техника его выполнения несколько сложнее, чем техника выполнения статических или кинематических съемок. При сборе данных в этом режиме на скорость и погрешность измерения влияет корректность проведения инициализации съемки, правильная установка интервала нахождения на точке и интервала накопления данных в приемник, обеспечение непрерывности слежения за пятью и более спутниками. При этом на землеустроитеle лежит задача не только управления оборудованием, но и корректного отображения окружающих условий с помощью атрибутивной информации, что упрощает и сокращает время камеральной обработки данных в CAD-приложениях.

По опыту съемки системой «Locus» контуров угодий и границ хозяйств были получены следующие характеристики производительности выполнения съемки в режиме «стою—иду»: в среднем за 8 ч рабочего дня фиксировалось 276 точек на площади 327 га, общее время съемки на точках 1 ч 50 мин, технологическое время на инициализацию и переинициализацию 45 мин. На участках с благоприятным рельефом и геометрической формой угодий при аналогичном времени съемки и количестве точек удавалось производить съемку на участках площадью более 1000 га.

Еще одной задачей, решаемой при землеустройстве, является вынос проектов в натуру. Здесь оптимальным инструментом является GPS-оборудование, работающее в RTK-режиме (кинематический режим с возможностью приема и обработки дифференциальных фазовых поправок в реальном масштабе времени). При этом землеустроитель на контроллере регистрирует скорректированное местоположение антенны, полученное с сантиметровой точностью, и может определить расположение точки с заданными координатами на местности. Тем не менее, из-за высокой стоимости оборудование,

способное работать в RTK-режиме, еще не нашло широкого применения у землеустроителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приемники «Locus» предназначены прежде всего для геодезических работ и поэтому имеют ограниченные возможности по вводу атрибутивной информации, характеризующей объекты съемки. Для сбора данных предпочтительней использовать приемники ProMARK X-CM. Хотя они и уступают геодезическим приемникам по возможностям получения высокоточной информации, но имеют возможности накопления, наряду с данными о местоположении, различной атрибутивной информации, включающей несколько полей (например наименование, тип, высота и т. д.) и информации с других датчиков. Система «Legacy» может быть сконфигурирована по требованиям землеустроителя оптимальным образом, сочетая точностные возможности геодезических GPS-приемников и возможности ввода и регистрации дополнительной информации при помощи различных совместимых контроллеров (CDU, «Ranger»).

- Генике А. А., Побединский Г. Г. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии. — М.: Картгоцентр—Геодезиздат, 1999.—272 с.
- Горб А. И. Анализ точности приемника спутниковых навигационных сигналов ProMARK X-CM // Зарубежная радиоэлектроника.—1999.—№ 12.—С. 58—61.
- Горб А. И., Крылов О. В., Криволапов О. А., Осипов Б. Г. Некоторые особенности сбора и обработки данных при GPS-съемке // ГИС-Форум-2000: Сб. тр., 13-16 ноября 2000 г. — Киев, 2000.—С. 33—39.
- Гоффманн-Велленгоф Б., Лихтенеггер, Коллинз Д. Глобальна система визначення місцезнаходження (GPS): Теорія і практика / Пер. з англ. під ред. Я. С. Яцківа. — Київ: Наук. думка, 1996.—392 с.

EXPERIENCE OF GLOBAL POSITIONAL SATELLITE SYSTEM TECHNOLOGIES APPLICATION FOR LAND MANAGEMENT

A. I. Gorb, O. A. Kryvolapov

The features of global positional satellite system (GPS) technologies realization for the land management and boundary control are described. The possibilities to use the ProMARK X-CM, Locus and Legacy H of GPS-receivers for field surveys are considered. The practical recommendations as to the choice of GPS-equipment optimal performance modes are offered.

УДК 529.781:621.317

Г. С. Сидоренко, В. С. Соловйов, О. О. Ткачук, О. С. Клейман

Харківський державний науково-дослідний інститут метрології

Використання сигналів
супутниковых радіонавігаційних систем
для порівняння шкал часу

Наведено результати використання сигналів супутниковых радіонавігаційних систем (СРНС) GPS і ГЛОНАСС для порівняння національної шкали часу України з Міжнародною шкалою координованого часу та національною шкалою часу Російської Федерації. Показано, що при застосуванні наявних приймачів сигналів СРНС цей метод порівняння шкал часу забезпечує досить мале значення випадкової складової похибки вимірювань, але може мати суттєву систематичну похибку вимірювань, яка залежить від багатьох факторів.

З метою забезпечення єдності вимірювань часу здійснюються регулярні порівняння національних шкал часу багатьох країн. Для цього у різні роки застосовувались різноманітні методи: транспортований квантovий годинник, телевізійний метод, використання сигналів спеціалізованих радіостанцій, наземних та супутниковых радіонавігаційних систем, дуплексних каналів супутниковых систем зв'язку та радіометеорний метод. Кожному з цих методів притаманні певні систематичні та випадкові складові похибок вимірювань, а також окремі переваги та недоліки. Протягом останніх років найбільше застосування в усьому світі знайшов метод порівняння шкал часу з використанням сигналів супутниковых радіонавігаційних систем GPS та ГЛОНАСС. Відомо [4], що прецизійні спеціалізовані приймачі сигналів СРНС при відповідній методиці їхнього застосування спроможні забезпечити граничну точність порівняння шкал часу приблизно 2 нс для коротких відстаней і 4 нс для довгих. Однак застосування лише одного методу чи лише однієї СРНС не може завжди гарантувати вірогідність результатів вимірювань, оскільки існує імовірність значної невилученої систематичної похибки вимірювань. Тому в Харківському державному науково-дослідному інституті метрології (ХДНДІМ) для порівняння шкал часу еталоні вже багато років регулярно застосовують сигнали як СРНС ГЛОНАСС, так і СРНС GPS, а також альтернативний високоточний метод — радіометеорний. У цьому методі використовується радіомет-

теорний канал зв'язку (РМК), що утворюється при відбитті радіовиль метрового діапазону від іонізованих метеорних слідів. Через цей канал передаються в обох напрямках радіосигнали, синхронізовані сигналами шкал часу, що порівнюються.

Державний первинний еталон одиниць часу і частота України, що знаходиться в ХДНДІМ, у період його атестації у 1996 році включав до свого складу дев'ять водневих стандартів частоти і часу різних типів (Ч1-80, Ч1-76 та Ч1-70), які складали групову міру частоти еталона [1]. У процесі функціонування еталона основний склад групової міри змінюється в залежності від результатів визначення метрологічних характеристик окремих мір.

Метрологічні характеристики еталона визначаються за результатами внутрішніх звірень водневих стандартів частоти і часу між собою та за результатами зовнішніх звірень національної шкали координованого часу UTC(UA) і частоти групової міри еталона зі шкалами та частотами, що відтворюються національними еталонами інших держав.

За результатами внутрішніх звірень добова нестабільність частоти водневих стандартів, яку можна характеризувати середнім квадратичним відносним відхиленням частоти $\delta_{\text{доб}}$ від середнього за місяць значення, протягом останніх років оцінюється значеннями від $5 \cdot 10^{-15}$ до $3 \cdot 10^{-14}$ для різних стандартів. Місячна нестабільність частоти водневих стандартів оцінюється значеннями $\delta_{\text{міс}}$ від $1 \cdot 10^{-14}$ до $5 \cdot 10^{-14}$. Найкращим за цими характеристиками є один з водневих генераторів стандарту

Ч1-80 (міра ВС 609). Найменше за модулем значення середньої відносної зміни частоти ν , яке становило $-1 \cdot 10^{-15}$ за місяць, було відмічено у одного з пасивних стандартів Ч1-76 (міра ВС 610).

Для підтвердження метрологічних характеристик еталона, що визначаються за результатами внутрішніх звірень, для забезпечення єдності вимірювань часу і частоти у глобальному масштабі дуже важливими є міжнародні звіренья національного еталона з іншими еталонами близького за метрологічними характеристиками рівня. Особливо важливими є звіренья з тими еталонами, на базі яких формується Міжнародна шкала атомного часу TAI та шкала координованого часу UTC.

У ХДНДІМ створено й вже багато років успішно експлуатується автоматизована система (далі називатимемо її просто систему) зовнішніх звірень еталонів часу і частоти з використанням сигналів СРНС ГЛОНАСС [3]. Система призначена для прийому радіосигналів певних космічних апаратів (КА) системи ГЛОНАСС, проведення вимірювань відповідно до графіка спостережень, реєстрації даних і обробки інформації з метою визначення різниці шкал часу еталонів.

Систему створено на базі приймача А-724М-01, персонального комп’ютера і технічних та програмних засобів автоматизації, розроблених у Російському інституті радіонавігації та часу (Санкт-Петербург). Вона дозволила суттєво розширити функціональні можливості застосування базового приймача, а при певних режимах спостережень — зменшити окремі складові похибок вимірювань.

У системі передбачено такі варіанти її застосування:

- автономна робота користувача, коли він працює за власним планом, і забезпечується визначення шкали часу користувача відносно національної шкали координованого часу Російської Федерації UTC(SU) і шкали часу системи (ШЧС) ГЛОНАСС;
- централізована робота користувача, коли він працює разом з іншими користувачами у мережі пунктів, один із яких є провідним, а інші відомими.

Синхронність роботи пунктів забезпечується планом робіт, формованим на провідному пункті і передаваним на усі відомі пункти мережі. У цьому випадку забезпечується можливість визначення взаємної різниці шкал часу користувачів один відносно одного.

Система забезпечує визначення розбіжності шкали часу місцевого еталона відносно шкали часу UTC(SU) за добу з похибою, яка характеризується середнім квадратичним відхиленням (СКВ) не більше 50 нс і визначення взаємного розходжен-

ня шкал часу еталонів у пунктах спостережень з похибкою за добу не більше 20 нс. Приведені характеристики забезпечуються при штатному функціонуванні системи ГЛОНАСС і похибках заування координат користувача не більше 3 м.

Для порівняння національної шкали часу України UTC(UA) з національною шкалою часу Російської Федерації UTC(SU), а також зі шкалами часу UTC(IM) еталона-копії (Іркутськ) і UTC(RIRT) еталона Російського інституту радіонавігації та часу використовувалась саме ця апаратура. Спостереження здійснювались за методом «common-views», коли сигнали одного й того ж супутника приймаються одночасно в усіх пунктах спостережень згідно з технологічними графіками, які розробляє Центр управління системою ГЛОНАСС. Ці графіки передбачають по два сеанси спостережень за сигналами двох певних супутників щодобово.

Попередні оцінки похибок порівняння шкал часу різними методами за результатами досліджень протягом 1998 року наведено в роботі [2]. На рис. 1 зображене результат визначення цим же методом різниці шкал часу UTC(UA) і UTC(SU) протягом 2000 року. По осі абсцис відкладено модифіковану юліанську дату MJD. Стрибок на графіку різниці шкал часу (значенням 500 нс) обумовлений коректуванням шкали часу UTC(UA), яке було здійснено 04.06.2000 р. (MJD 51699).

Графік різниці шкал координованого часу UTC(UA) – UTC(SU) на інтервалі часу спостережень 60 діб визначеної тим ж методом, зображене на рис. 2. Там же показано апроксимацію експери-

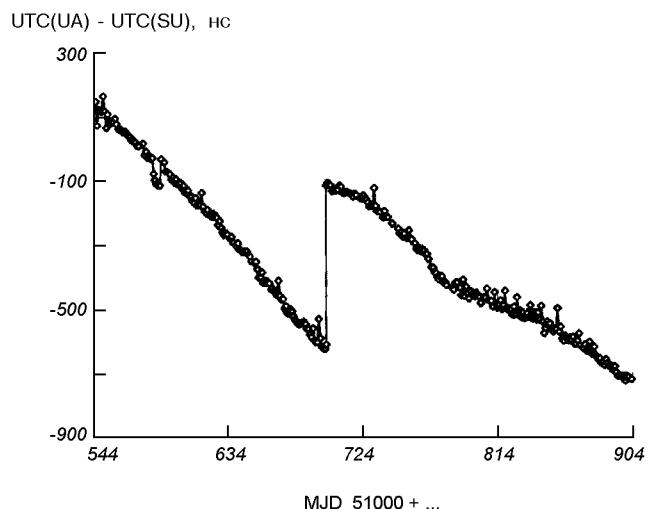


Рис. 1. Порівняння шкал координованого часу державних еталонів України та Росії за даними прийому сигналу ГЛОНАСС у 2000 р.

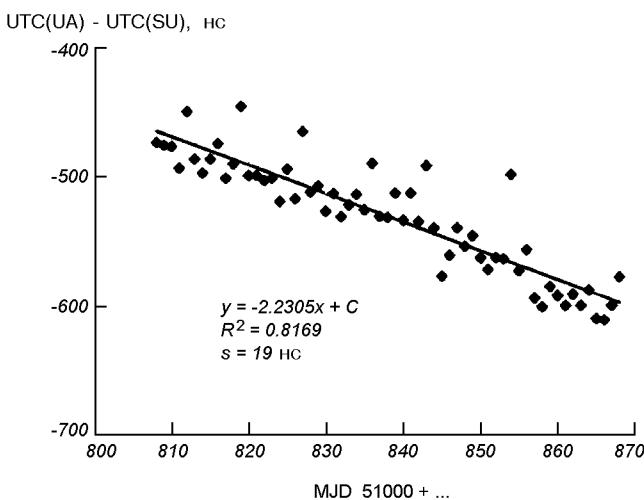


Рис. 2. Лінійна апроксимація експериментальних даних порівняння шкал часу державних еталонів України та Росії за даними прийому сигналів ГЛОНАСС на інтервалі часу спостережень 60 діб

ментальних даних прямою лінією та наведено рівняння апроксимуючої лінії (лінії регресії). Середнє квадратичне відхилення s результатів вимірювань від лінії регресії складає 19 нс. Ця величина характеризує похибку апроксимації, яка включає до себе відміну реальної різниці шкал часу еталонів від прямої лінії та похибку метода звірення. Параметр R^2 характеризує вірогідність апроксимації.

Треба відмітити, що вказаний графік спостережень не дозволяє використати усі можливості системи. Наявне програмне забезпечення системи дозволяє застосувати оптимальні графіки спостережень, які розробляє Міжнародне бюро мір та ваг (BIPM). При виконанні вимірювань за цими графіками можна збільшити статистику даних вимірювань і тим самим зменшити випадкову складову похибки вимірювань при порівнянні шкал часу до одиниць наносекунд.

Прийом сигналів СРНС GPS з метою порівняння шкали часу UTC(UA) з Міжнародною шкалою часу UTC проводився за допомогою приймача геодезичного призначення типу «Trimble 4000SSi». Головна астрономічна обсерваторія (ГАО) НАНУ у 1997 р. придбала кілька зразків цих приймачів з метою оснащення ними фундаментальних координатно-часових станцій для перманентних GPS-спостережень. Один з таких приймачів був переданий тимчасово ХДНДІМ.

Приймач «Trimble 4000SSi» — це 9-канальний (з можливістю розширення до 12 каналів) двочастотний (частоти $L1$ і $L2$) приймач сигналів GPS, у якому використовується технологія «Super-track™» для підвищення перешкодостійкості при прийомі

слабких сигналів, дозволяє проводити вимірювання по C/A і P -кодах, а також визначати повну фазу несучих хвиль. При статичній зйомці приймач з відповідним прикладним програмним забезпеченням дозволяє визначати довжину бази з міліметровою похибкою. Приймач має також вихід сигналів часу з частотою 1 Гц, синхронізованих з Міжнародною шкалою координованого часу UTC з граничним відхиленням від неї не більше 1 мкс. Приймач цього типу не дозволяє реалізувати режим спостережень «common-view», коли відносна прив'язка шкал часу станцій здійснюється шляхом одночасних спостережень сигналів того самого заданого супутника, а використовує режим спостережень «all-in-view», коли обробляються сигнали від усіх видимих у даний момент супутників. Потенційно цей приймач має більш високі метрологічні характеристики в порівнянні з одночастотними приймачами. Вивченю можливості використання таких приймачів для порівняння шкал часу зараз приділяється велика увага спеціалістами різних країн.

У жовтні 1997 р. у ХДНДІМ було почато експериментальні прийоми сигналів GPS з метою відправцювання оптимальної методики спостережень і оцінки похибки вимірювань при порівнянні шкал часу з використанням даного приймача. При дослідженнях використовувався державний первинний еталон одиниць часу і частоти. Вимірювання проводилися за допомогою частотоміра ЧЗ-64, що має розподільну здатність та випадкову похибку при вимірюванні одиночних інтервалів часу не більше 1 нс. Управління частотоміром, реєстрація інформації та її наступна обробка здійснювалися за допомогою ПЕОМ. У програмі вимірювань передбачено проведення серії з десяти вимірювань, відбраковування аномальних результатів вимірювань і обчислення середнього значення. За результат однічного вимірювання приймається середнє значення у серії вимірювань.

Спочатку спостереження здійснювалися по такому графіку: сеанси прийому сигналів GPS проводилися через кожні 30 хв цілодобово. Потім у дані вимірювань вводилися поправки до робочої шкали часу еталона і визначалося середнє значення за кожну добу різниці шкал часу UTC(UA) – UTC. Як показали дослідження, випадкова похибка порівняння шкал часу при такому графіку спостережень була неприпустимо великою: середнє квадратичне відхилення (СКВ) добових оцінок різниці шкал часу досягало 200 нс.

Тоді інтервал часу вибірки τ_v був істотно зменшений (до 2 хв), і протягом трьох тижнів були проведенні спостереження з метою визначення оптимального інтервалу часу вибірки. Для цього весь масив даних був розбитий на окремі підмасиви з

інтервалами часу вибірки 2, 4, 6 і 10 хв, і для кожного підмасиву проведено статистичну обробку і аналіз часових рядів. Було встановлено, що для зазначених інтервалів часу вибірки СКВ результатів одиничних вимірювань від середнього значення за добу практично однакове (приблизно 100 нс). Похибка оцінок середніх за добу значень різниці шкал часу зменшується зі збільшенням частоти повторення сеансів вимірювань, але при цьому збільшується обсяг масиву даних, які необхідно зберігати в пам'яті ПЕОМ. Аналіз результатів спостережень показав, що при зміні τ_b від 2 до 10 хв СКВ результатів вимірювань (середніх значень за добу) від лінії регресії збільшується від 6 до 12 нс. Тому для подальших регулярних спостережень оптимальним вважалось значення $\tau_b = 5$ хв.

Для прикладу можна навести результати порівняння національної шкали часу UTC(UA) з Міжнародною шкалою координованого часу UTC протягом 1998 р. із застосуванням приймача сигналів GPS типу «Trimble 4000SSi» [2]. Ці результати свідчать, що при використанні прийнятої методики спостережень і обробки результатів випадкова похибка порівняння шкал часу не перевищує 10 нс. Однак зіставлення з результатами, отриманими в той же час іншими способами, показало наявність значної невилученої систематичної похибки вимірювань. Тому при наступних дослідженнях цікаво оцінити всі складові похибок вимірювань.

З метою визначення апаратурної похибки вимірювань приймачами цього типу при порівнянні шкал часу у червні 1998 р. були проведені спостереження одночасно на двох комплектах апаратури «Trimble 4000SSi». Обидві антени були розташовані поруч, всі сполучні кабелі обох комплектів було зроблено однакової довжини. Спостереження були розділені на кілька окремих сеансів. У перших трьох сеансах вимірювання здійснювалися таким чином. У кожному циклі вимірювань, що повторювалися через п'ять хвилин, спочатку 10 разів вимірювався інтервал часу між сигналами робочої шкали часу еталона і сигналами часу з виходу першого приймача (інтервал часу вибірки 2 с), потім такі ж вимірювання проводилися із сигналами часу з виходу другого приймача.

Аналіз результатів вимірювань, здобутих у цих трьох вибірках, показав, що приймачі розрізняються як за середнім значенням величини, що визначається, $\Delta T = \text{UTC(UA)} - \text{UTC}$, так і за значенням СКВ результатів вимірювань. Різниця середніх значень ΔT складала 65—77 нс, а СКВ результатів одиничних вимірювань складали 84—97 нс для першого приймача і 30—34 нс для другого.

У четвертому сеансі спостережень інтервал часу між початком вимірювань з використанням одного

і другого приймача був зменшений з 20 до 2 с з метою забезпечення більшої синхронності вимірювань (вимірювання проводилися по черзі). Сеанси вимірювань повторювалися також через кожні 5 хв. Але це не привело до істотного зменшення різниці середніх значень ΔT , визначених за допомогою двох приймачів.

У п'ятому сеансі спостережень на обидва входи вимірювача інтервалів часу подавалися сигнали часу з виходів двох приймачів, тобто забезпечувалася повна синхронність вимірювань і безпосередньо вимірювалася різниця моментів сигналів часу $T_1 - T_2$, що видаються споживачам з двох приймачів. У цьому експерименті середнє значення величини $T_1 - T_2 = 86$ нс при СКВ, рівному 143 нс.

Проведені дослідження показали, що навіть у випадку, коли два приймачі типу «Trimble 4000SSi» знаходяться в тому самому пункті спостережень (нульова база), в однакових умовах і синхронізовані одним і тим же самим сигналом еталонної частоти, невилучена систематична апаратурна похибка вимірювань складає 50...100 нс, а за випадковою складовою похибки вимірювань окремі екземпляри приймачів відрізняються в два-три рази.

На рис. 3 зображені результати порівняння шкал часу UTC(UA) і UTC з використанням сигналів GPS протягом 2000 р., а на рис. 4 — на 60-добово-му інтервалі спостережень. Кожна точка на цих рисунках — середнє значення величини UTC(UA) — UTC, яке визначено за добу спостережень. Середнє квадратичне відхилення даних від лінії регресії на місячному інтервалі спостережень складає лише 8 нс, що свідчить про малу випадкову похибку порівняння шкал часу при використанні

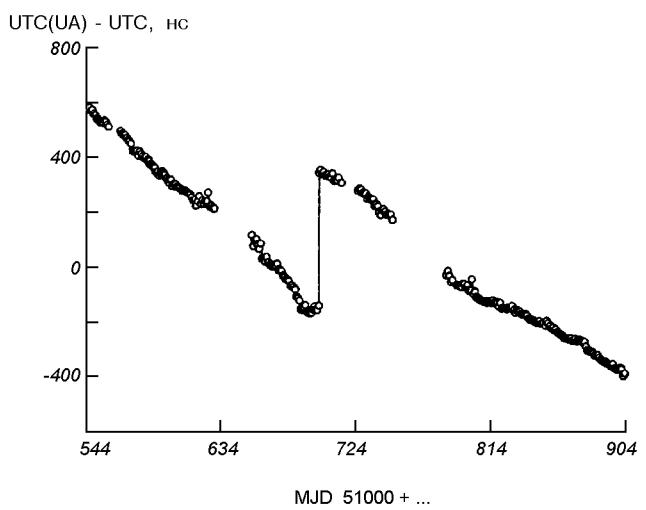


Рис. 3. Порівняння шкали координованого часу державного еталону України з Міжнародною шкалою координованого часу за даними прийому сигналів GPS у 2000 р.

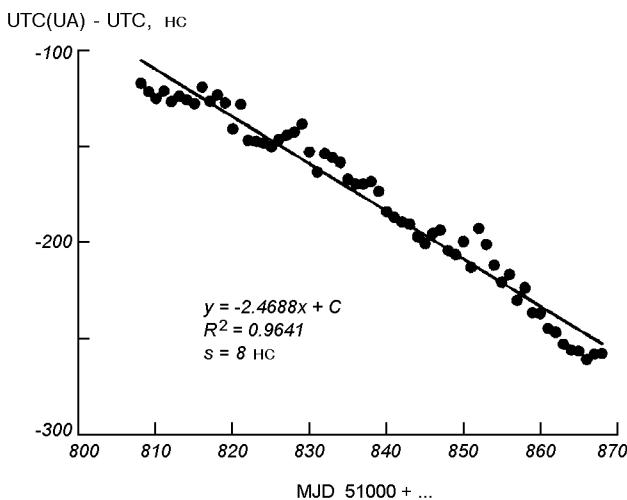


Рис. 4. Лінійна апроксимація експериментальних даних порівняння шкал часу UTC(UA) і UTC за даними прийому сигналу GPS на інтервалі часу спостережень 60 діб

приймача «Trimble 4000SSi» за вказаною вище методикою. Значення параметра R^2 близьке до одиниці, що говорить про високу вірогідність лінійної апроксимації експериментальних даних.

1 травня 2000 р. було обнародовано заяву президента США про те, що США припиняють погіршення сигналів GPS шляхом уведення режиму вибіркової доступності (режиму SA) і надають можливість безоплатно і повністю використовувати GPS у мирних цілях для цивільного, комерційного і наукового застосування в усьому світі. Відповідно до цієї заяви, цивільні користувачі зможуть тепер визначати координати і час у десять разів точніше, ніж робили це раніше.

У зв'язку зі скасуванням застосування режиму SA становить великий інтерес, як це відбилося на точності порівняння шкал часу з використанням сигналів GPS. Проведені дослідження з застосуванням приймача «Trimble 4000SSi» показали, що похибка одиничних вимірювань відразу знизилася з 100 нс (СКВ) до значення кроку дискретизації (40 нс) сигналів часу, що видаються користувачеві з приймача (рис. 5). Оскільки дані вимірювань перестали носити випадковий характер, збільшення числа вимірювань стало мало впливати на точність середнього значення результатів вимірювань при усередненні даних. Тому випадкова похибка середніх за добу значень оцінок результатів визначення різниці шкал часу UTC(UA) і UTC, якщо і зменшилася, то несуттєво (з 10 до 7 нс). Впливу скасування режиму SA на величину систематичної похибки вимірювань виявлено не було.

Як вже вказувалось вище, для порівняння шкал часу еталонів у ХДНДІМ регулярно застосовується,

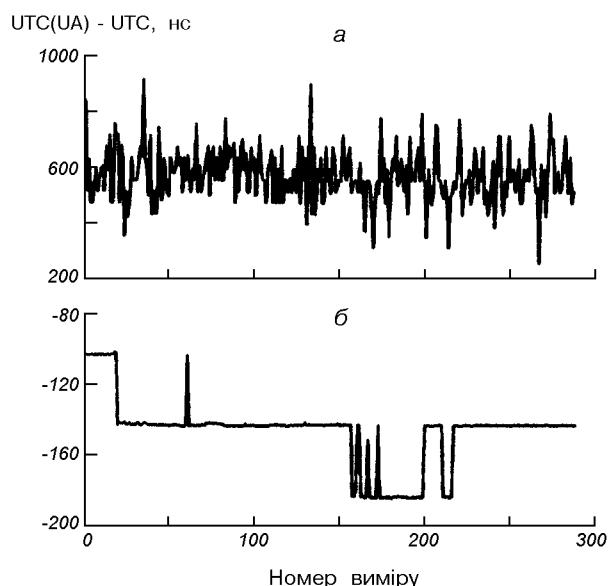


Рис. 5. Зразки даних вимірювань величини UTC(UA) – UTC з використанням сигналів GPS за допомогою приймача Trimble 4000SSi: а — при застосуванні режиму SA; б — після відміни режиму SA

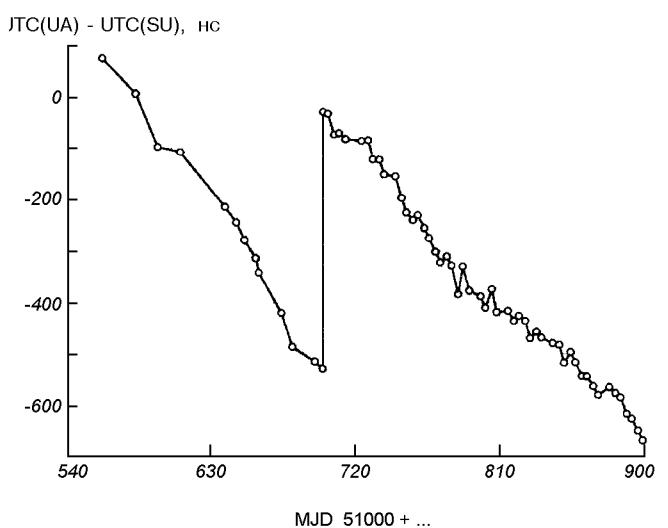


Рис. 6. Порівняння шкал координованого часу державних еталонів України та Росії радіометеорним методом у 2000 р.

крім методу з використанням сигналів СРНС, альтернативний високоточний метод з використанням радіометеорного каналу зв'язку за допомогою апаратури «Метка-6М».

На рис. 6 показано результати порівняння шкал часу еталонів UTC(UA) і UTC(SU) по РМК протягом 2000 року. При визначені різниці шкал координованого часу еталонів UTC(UA) – UTC(SU)

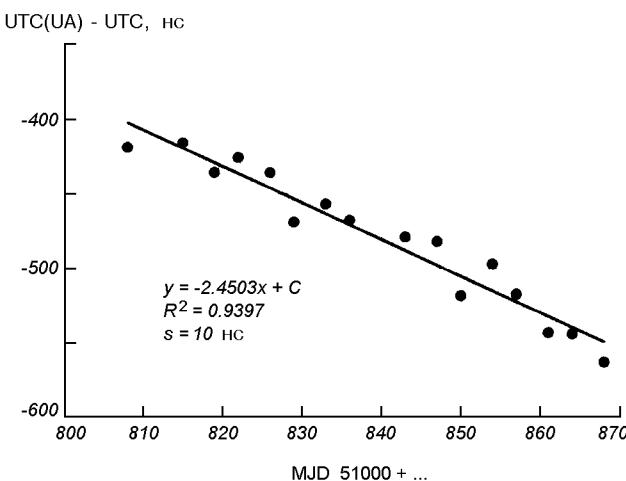


Рис. 7. Лінійна апроксимація експериментальних даних порівняння шкал часу державних еталонів України та Росії радіометеорним методом на інтервалі часу спостережень 60 діб

приймалось середнє з двох значень $\Delta T_{\text{вим}}$, що були отримані в обох пунктах, вводилися поправки до робочих шкал часу еталонів, враховувалась різниця затримок сигналів в апаратурі, яка застосовується в Харкові та в Москві. На перший погляд, цей графік практично не відрізняється від аналогічного графіку різниці шкал часу UTC(UA) – UTC(SU), визначеного за даними прийому сигналів ГЛОНАСС (рис. 1).

Графік різниці шкал координованого часу UTC(UA) – UTC(SU) на інтервалі часу спостережень 60 діб, визначеного радіометеорним методом, зображене на рис. 7. Середнє квадратичне відхилення s результатів вимірювань від лінії апроксимації складає 10 нс, що свідчить про високу точність радіометеорного методу порівняння шкал часу.

Ретельно зіставляючи результати визначення різниці шкал часу UTC(UA) – UTC(SU) двома методами одночасно, можна зробити висновок, що ці результати не так добре узгоджуються. Незважаючи на невеликі значення випадкових похибок вимірювань, середнє за рік значення розбіжності результатів, здобутих двома методами, складає від 50

до 200 нс в різні роки, а середнє квадратичне відхилення різниць добових оцінок величини UTC(UA) – UTC(SU) від середнього значення цієї величини за рік дорівнює 20–30 нс. Це свідчить про наявність невилучених систематичних похибок вимірювань. Радіометеорний метод порівняння шкал часу за своїм принципом не потребує знання часу розповсюдження радиосигналу на трасі, а радіометеорний канал зв'язку є дуплексним і не має джерел значних систематичних похибок вимірювань. Складніше з цими питаннями при використанні приймальної апаратури СРНС: тут складових похибок вимірювань значно більше, і не усі вони достатньо визначені. Тому є підстава вважати, що розбіжності в здобутих результатах обумовлена головним чином невилученою систематичною похибкою вимірювань, що повільно змінюється, при використанні сигналів СРНС ГЛОНАСС технічними засобами, які є у нашому розпорядженні.

1. Клейман О. С., Оголюк В. П., Сидоренко Г. С. та ін. Державний перший еталон одиниць часу і частоти // Український метрологічний журн.—1997.—Вип. 3.—С. 18—23.
2. Солов'йов В. С. та ін. Оцінка похибок порівняння еталонних шкал часу за допомогою різних методів // Український метрологічний журн.—1999.—Вип. 3.—С. 5—8.
3. Ткачук А. А., Родіонов В. Е., Сагайдак Г. І. Автоматизированная система приема сигналов СРНС ГЛОНАСС // Пр. II Міжнарод. науково-техн. конф. «Метрологія-99» Харків, 1999.—С. 154—156.
4. Schildknecht T., Dudle G. Time and frequency transfer: high precision using GPS phase measurements // GPS World.—2000.—Feb.—P. 48—52.

USING SIGNALS OF SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS FOR COMPARISON OF TIME SCALES

G. S. Sydorenko, V. S. Solovyov, A. A. Tkachuk, O. S. Kleyman

The results of using the signals of satellite radio navigation systems GPS and GLONASS for comparison of the Ukraine national time scale with International scale of Universal Time and the Russian national time scale are given. It is shown that the method of time scale comparison ensured rather small value of random composite measurement error when the available GPS & GLONASS receivers are used. However this method may have the systematic error depended on many factors.

УДК 528.2:629.78+528.516

О. О. Хода

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Створення та функціонування мережі перманентних GPS-станцій в Україні

Наведено загальну інформацію про українську перманентну GPS-мережу. Мережа складається з дев'яти GPS-станцій, встановлених різними закладами. Три станції (Київ/Голосіїв, Ужгород, керовані Головною астрономічною обсерваторією НАН України, та Полтава, керована Науково-дослідним інститутом геодезії та картографії і Національним космічним агентством України) входять до мереж IGS та EPN.

Глобальна система визначення місцеположення (GPS) стала важливим та ефективним засобом для різних застосувань від навігації у реальному часі до високоточного моніторингу геофізичних процесів. Зважаючи на це, деякі країни встановили мережі перманентних GPS-станцій, які покривають всю територію країни або лише її частину.

Українська мережа перманентних GPS-станцій (рисунок), як і більшість національних мереж, створена спільними зусиллями кількох організацій та інститутів. Вона складається з сегменту станцій Головної астрономічної обсерваторії НАН України (ГАО), сегменту станцій Науково-дослідного інституту геодезії та картографії (НДІГК) і Національного космічного агентства України (НКАУ) та станцій, створених іншими організаціями.

СЕГМЕНТ СТАНЦІЙ ГАО НАН УКРАЇНИ

ГАО НАН України першою в Україні розпочала роботи зі створення перманентних GPS-станцій. На сьогодні ГАО встановила чотири станції: Київ/Голосіїв, Ужгород, Євпаторія та Харків. Дві з них, Київ/Голосіїв та Ужгород, входять до мережі Міжнародної геодинамічної GPS-служби (IGS) та Європейської перманентної опорної координатної мережі (EUREF Permanent Network, EPN). Інші дві поки що не можуть бути включені до цих міжнародних мереж, через те що координати Євпаторії та Харкова вважаються секретною інформацією.

Всі пункти ГАО (табл. 1) обладнані двохчастотни-

ми приймачами (12+12 каналів) «Trimble 4000 SSi» та антенами дизайну «Choke Ring» (Trimble). Згідно з вимогами IGS [3] та EPN [2] щодо режиму роботи перманентних GPS-станцій спостереження організовані таким чином:

- початок сесій о 00:00 UTC кожної доби;
- кінець сесій о 23:59 UTC кожної доби;
- інтервал реєстрації сигналів від GPS-супутників: 30 с, починаючи з секунди «0»;
- мінімальний кут місця для супутників, що спостерігаються: +5°.

Робота GPS-станцій повністю автоматизована. Управління виконується програмою-менеджером GGPS, створеною в ГАО НАН України. Програма GGPS являє собою набір сценаріїв інтерпретатора команд «Bourne Again Shell» операційної системи «Linux», які формують команди управління GPS-приймачем або файлами даних спостережень. При цьому використовуються так звані R-утиліти фірми «Trimble Navigation Ltd», програма перетворення різних бінарних форматів даних у формат RINEX та перевірки якості отриманих даних teqc, програма перетворення даних з формату RINEX у формат Compact RINEX.

GGPS запускається кожної доби о 23:59 UTC і виконує наступні операції:

- задає умови наступної сесії спостережень;
- вмикає таймер GPS-приймача для старту наступної сесії;
- пересилає файл даних спостережень з приймача в комп’ютер;



Таблиця 1. Перманентні GPS-станції ГАО НАН України

Станція	Київ/Голосіїв	Ужгород	Севастопіль	Харків
Ідентифікатор	GLSV	UZHL	EVPA	KHAR
Номер DOMES	12356M001	12301M001	—	—
Дата встановлення	16 грудня 1997 р.	5 лютого 1999 р.	13 жовтня 1999 р.	1999 р.
Місце встановлення	ГАО НАН України	Лабораторія космічних досліджень УжНУ	Національний центр управління та випробувань космічних засобів НКАУ	Харківський державний науково-дослідний інститут метрології
Носій координат	Перетин верхньої поверхні сталевого стовпа на даху головного офісу обсерваторії з його вертикальною віссю	Перетин верхньої поверхні сталевого стовпа на даху головного офісу лабораторії з його вертикальною віссю	Перетин верхньої поверхні сталевого стовпа, замурованого в бетон, з його вертикальною віссю	Перетин верхньої поверхні сталевого стовпа на даху головного офісу інституту з його вертикальною віссю
Приймач	«Trimble 4000SSi»	«Trimble 4000SSi»	«Trimble 4000SSi»	«Trimble 4000SSi»
Версія програмного забезпечення приймача	7.19A	7.19A	7.29	7.29
Антена	TRM29659.00	TRM29659.00	TRM29659.00	TRM29659.00
Висота антени (метри)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Статус	IGS, EPN	IGS, EPN	Автономний режим	Автономний режим
Колокація	SLR 1824 Kiev/Golosiiv	—	SLR 1867 Evpatoria	—
Сусідній пункт UKRREF	KIEV, KIEA	UZHD	—	—
Міжнародні центри обробки та аналізу даних, що використовують дані спостережень станції	COD (IGS, EPN), SIO (IGS), BKG (EPN), WUT (EPN)	WUT (EPN), OLG (EPN), GOP (EPN)	—	—

- перетворює файл даних з внутрішнього формату у формат RINEX;
- пересилає файл даних у внутрішньому форматі в архів;
- пересилає стиснутий програмою «Compress» RINEX-файл на ftp-сервер ГАО НАН України (для станції Київ/Голосіїв);
- виконує перевірку якості даних спостережень;

- перетворює файл даних з формату RINEX у формат Compact RINEX;
- пересилає отриманий файл на ftp-сервер Регіонального центру збору даних IGS (Федеральна агенція з картографії та геодезії (BKG), м. Франкфурт-на-Майні, Німеччина);
- пересилає файл даних у внутрішньому форматі в ГАО НАН України (для станції Ужгород).

Станції Євпаторія та Харків працюють в автономному режимі. Дані GPS-спостережень на станції Євпаторія лише зберігаються на комп'ютері, який керує GPS-приймачем. В Харкові спостереження GPS-супутників використовуються лише для порівняння національної шкали часу UTC(UA) з шкалою UTC.

СЕГМЕНТ СТАНЦІЙ НДІГК ТА НКАУ

Навесні 2001 р. НДІГК разом з НКАУ розпочали роботи зі створення перманентних GPS-станцій. На сьогодні існує вже дві станції: Полтава та Львів (табл. 2). Найближчим часом будуть встановлені ще дві: Миколаїв та Алчевськ (або Донецьк). Станція Полтава входить до мереж IGS та EPN.

Станції обладнуються двочастотними приймачами «Trimble 4700» та антенами дизайну «Choke Ring» (Trimble) або «Zephyr». Режим роботи стан-

Таблиця 2. Перманентні GPS-станції НДІГК та НКАУ

Станція	Полтава	Львів
Ідентифікатор	POLV	—
Номер DOMES	12336M001	—
Дата встановлення	26 квітня 2001 р.	15 червня 2001 р.
Місце встановлення	Полтавська гравіметрична обсерваторія НАН України	Національний університет «Львівська політехніка»
Носій координат	Перетин верх- ньої поверхні ста- левого стовпа на даху головного офісу обсерва- торії з його верти- кальною віссю	Не визначено
Приймач	«Trimble 4700»	«Trimble 4700»
Версія програмного забезпечення прий- мача	1.30	1.30
Антена	TRM29659.00	TRM39105.00
Висота антени (мет- ри)	0.0000	Не визначено
Статус	IGS, EPN	Автономний ре- жим
Колокація	SLR	SLR
Сусідній пункт UKRREF	POLT	LVIV

цій такий же, як і на станціях ГАО НАН України.

Робота станцій автоматизована за допомогою програмного забезпечення «Trimble Reference Station» під операційною системою Windows 9x/NT.

Дані спостережень зі станції Полтава пересилаються в ГАО НАН України. Планується, що ГАО буде операційним центром для станцій цього сегменту, тобто збиратиме «сирі» дані спостережень, приведиме їх до відповідності вимогам IGS та EPN і пересилатиме їх до Регіонального центру збору даних IGS.

Координати пункту Львів вважаються секретною інформацією, тому ця станція поки що працює в автономному режимі.

ІНШІ СТАНЦІЇ

Перманентна GPS-станція Сімеїз (табл. 3) створена Масачусетським технологічним інститутом (MIT, США) та Університетським навігаційним консорціумом (UNAVCO, США) навесні 2000 р. Станція входить до Середземноморської GPS-мережі (Mediterranean GPS Network), яка підтримується UNAVCO.

GPS-станція Сімеїз обладнана двочастотним приймачем «Rogue SNR-8000» та аненою дизайну «Choke Ring» (TurboRogue). Щогодинні файли спостережень у форматі RINEX відправляються на ftp-сервер UNAVCO, на основі цих файлів формується також файл добових спостережень.

В Кіровограді та Дніпропетровську перманентні станції встановлені місцевими геодезичними організаціями. Дані спостережень на цих станціях використовуються для локальних геодезичних цілей.

Таблиця 3. Перманентна GPS-станція Сімеїз

Станція	Сімеїз
Ідентифікатор	CRAO
Дата встановлення	27 квітня 2000 р.
Місце встановлення	Кримська астрофізична обсерваторія, Сімеїз
Приймач	«Rogue SNR-8000»
Версія програмного забезпечення приймача	3.2.32.8
Антена	AOAD/M_T
Висота антени (метри)	0.0800
Обтічник антени	SCIS
Статус	Mediterranean GPS Network
Колокація	SLR 1873 Simeiz, SLR 1893 Katsiveli, Mobile SLR 7561 Simeiz, VLBI 7332 Simeiz
Сусідній пункт UKRREF	SIME

В ГАО НАН України, яка має комплекси обробки GPS-спостережень «Bernese GPS Software Version 4.2» [1] та GAMIT, проводяться роботи зі створення Центру обробки та аналізу GPS-даних з українських перманентних станцій у комплексі з даними з закордонних станцій.

1. Bernese GPS Software Version 4.2 / Eds V. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2001.—515 p.
2. Guidelines for EUREF Stations & Operational Centers (prepared by EUREF Coordination Group, February 01, 2001) // http://www.epncb.oma.be/g_sto_oc.html
3. Standards for IGS Stations and Operational Centers, Version 1.3 (9 February, 1999) (prepared by IGS Infrastructure

Committee and Central Bureau) // http://igscb.jpl.nasa.gov/network/guide_igs.html

**UKRAINIAN PERMANENT GPS NETWORK:
CREATION AND OPERATION**

O. O. Khoda

General information about Ukrainian permanent GPS network are presented. This network consists of nine GPS stations established by different organizations and institutes. Three stations (Kiev/Golosiv, Uzhgorod operated by the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Science of Ukraine, and Poltava operated by the Science and Research Institute of Geodesy and Cartography, and the National Space Agency of Ukraine) were included in the IGS and EUREF permanent networks.

УДК 621.396

С. П. Семиволос, В. А. Козлов, Е. Е. Малафеев

Розглядається один з варіантів побудови ККС, який дозволяє виконувати функції RIMS європейської підсистеми EGNOS.

Региональный пункт контроля навигационного поля (РПКНП) является основным элементом наземной сети контрольно-корректирующих станций (ККС) системы космического навигационного обеспечения (СКНОУ). Одной из функций РПКНП является формирование региональных полей прецизионного местоопределения. РПКНП строятся по известному принципу дифференциальных подсистем, заключающемуся в том, что в опорной точке, координаты которой известны с высокой точностью, устанавливается контрольно-корректирующая станция (ККС), которая определяет и передает наземным потребителям поправки к измеряемым навигационным параметрам, а также другие, необходимые для навигационных определений, данные.

В АО НИИРИ, г. Харьков, начиная с 1993 г., проводятся работы по разработке различных вариантов аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем для различных заказчиков. В частности, в настоящее время изготовлен и проходит испытания один из вариантов экспериментального образца ККС, который планируется для установки в РПКНП в качестве базового.

Вариант построения ККС соответствует международным требованиям [2–4].

Аппаратура ККС РПКНП предназначена для решения следующих задач:

- 1) непрерывного слежения за всеми видимыми навигационными космическими аппаратами GPS, ГЛОНАСС, EGNOS (INMARSAT-3);
 - 2) сбора данных, поступающих от всех видимых навигационных спутников, и обработку их с целью получения:
 - псевдодальностей по коду C/A на частоте $L1$;
 - фазы несущей на частоте $L1$;
 - разностей фаз кодов на $L1/L2$ и несущих (без знания X -кода);

эфемеридных и навигационных данных на каждом из наблюдаемых спутников;

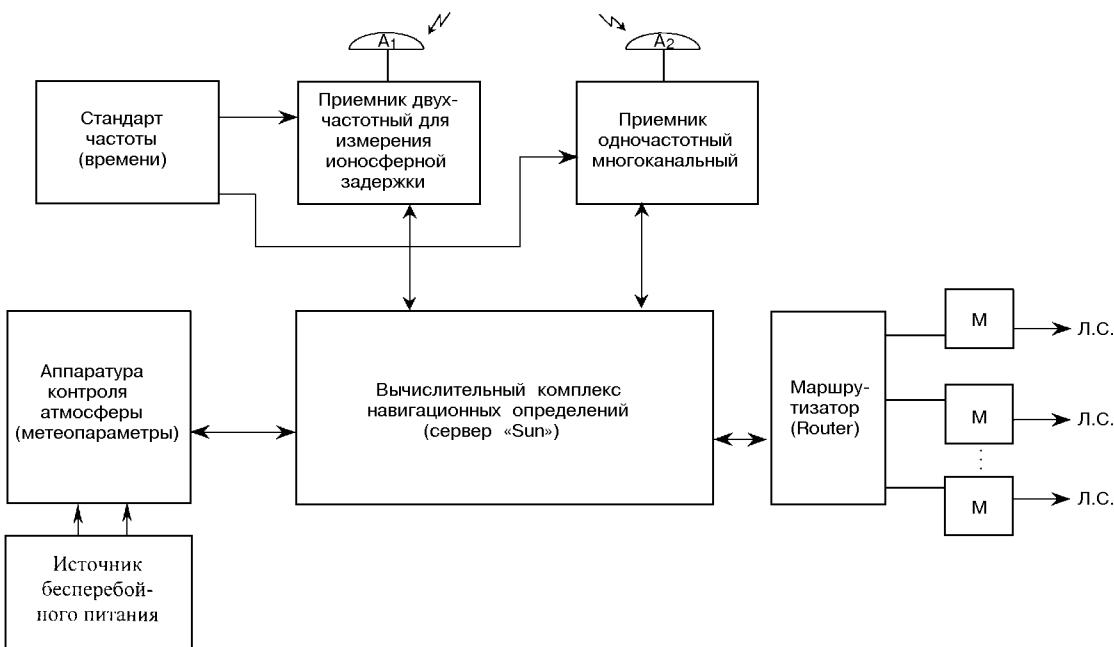
- найден из последовательных ступеней;

 - 3) передачи полученных навигационных данных в центр контроля навигационного поля (ЦКНП) в режиме реального времени;
 - 4) контроля качества навигационных сигналов, поступающих от навигационных спутников;
 - 5) контроля целостности навигационных определений КА;
 - 6) формирования дифференциальных поправок для всех видимых КА;
 - 7) формирования навигационной корректирующей информации в стандарте RTCM SC-104 (версия 2.2) сообщений: 1, 2, 3, 4, 6, 14, 18, 19, 27, 31, 32, 34, 37 и выдачу их в каналы связи с периодом не более 1 с;
 - 8) регистрации и архивирования навигационных данных на заданный период времени, а также данные контроля работоспособности составных частей ККС.

Обобщенная структурная схема ККС представлена на рисунке.

В состав ККС входит следующая аппаратура:

- две антенны с подавлением многолучевости;
 - приемник двухчастотный на L1/L2 для измерения ионосферных задержек типа «Ashtech Z-18»;
 - приемник одночастотный типа GG-24 фирмы «Magellan»;
 - стандарт частоты и времени типа СЧВР-3 ГНПО «Метрология»;
 - вычислительный комплекс, используемый для навигационных определений, реализован на базе сервера «Enterprise 220R» фирмы «Sun»;
 - маршрутизатор (ROUTER) типа 2620 фирмы «Cisco»;
 - модемы типа U-336E фирмы ZyxEL;



Обобщенная структурная схема ККС

- источник бесперебойного питания;
- комплект кабелей, принадлежностей и ЗИП.

Навигационные сигналы (НС) КНС ГЛОНАСС и GPS принимаются одновременно двумя многоканальными приемниками, которые формируют информационные кадры и выдают их в вычислительный комплекс, который является основным вычислительным и коммуникационным ядром ККС. Выбор сервера фирмы «Sun» основан на следующих предпосылках:

- свыше 70 % всех коммуникаций Internet базируется на технике «Sun»;
- фирма «Sun Microsystems» уже объявила о своих намерениях сделать ОС «Solaris» де факто стандартом UNIX и опубликует открытые спецификации «Solaris» для клонирования;
- на аналогичной технике построен главный центр Европейской системы EGNOS, а СКНОУ предполагает взаимодействие с ней.

Аппаратура контроля метеопараметров тропосфера используется для измерения показателя преломления воздуха, температуры воздуха и атмосферного давления. Погрешность (σ) измерения параметров тропосферы рефрактометром типа А5000 ОКБ завода им. Шевченко (Харьков), составляет:

- показателя преломления 2N-ед.;
- температуры воздуха 0.5 K;
- атмосферного давления 1.0 мбар.

Наличие результатов измерений температуры воздуха и атмосферного давления, наряду с показателем преломления, позволяет разделить задержку

сигнала в атмосфере на «сухую» и «влажную» составляющие, обусловленные «сухой» и «влажной» составляющими показателя преломления воздуха [1], что повышает точность оценки общей задержки сигнала.

Такой состав ККС соответствует требованиям, предъявляемым к RIMS системы EGNOS, и позволяет на первом этапе создания СКНОУ путем интеграции этих пунктов в состав наземного сегмента EGNOS, расширить зону действия системы EGNOS на территорию Украины.

1. Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. — М.: Радио и связь, 1993.
2. Global Navigation Satellite System (GLONASS), Interface Control Document. — Moscow, 1995.—Ver. 3d, MSF.
3. RTCM Recommended Standards for Differential NAVSTAR GPS Service, Radio Technical Commission for Maritime Service. — Washington, D.C., USA, 1994.—Ver. 2.1, RTCM SC-104.
4. The GPS: Management and Operation of a Dual Use System, Report to the Secretaries of Defence and Transportation, Joint DOD/DOT Task Force, 1993.

CONTROL-CORRECTED STATION OF REGIONAL POINT OF SPACE NAVIGATIONAL MAINTENANCE OF UKRAINE

S. P. Semivolos, V. O. Kozlov, E. E. Malafeev

It is considered one of the versions of construction control-corrected station, which allows to function the RIMS as a European EGNOS subsystem.

УДК 656.61.053

В. С. Михайлів

Київська державна академія водного транспорту

Исследование зоны действия контрольно-корректирующей радионавигационной системы на внутренних водных путях

Досліджується радіус дії контрольно-коректуючих станцій, що здійснюють передачу диференціальних поправок на внутрішніх водних шляхах. Найдено розв'язок задачі оптимізації радіуса зони контролю-
но-коректуючої станції.

При разработке структуры системы контрольно-корректирующих станций (ККС) в диапазоне УКВ важное значение имеет решение задачи оптимизации размеров зон ККС, определяющей надежность передачи дифференциальных поправок, архитектонику и технологические особенности построения системы передачи дифференциальных поправок на внутренних водных путях (ВВП).

В литературных источниках приводятся различные процедуры оптимизации, базирующейся как на детерминированных, так и на статистических моделях УКВ-радиоканалов. Следуя методу А. В. Доровских и А. А. Сикарева [2], проведем решение задачи оптимизации размеров зон ККС при передаче аналоговых сообщений.

Наличие радиосвязи по направлению ККС — абонент — судно в рассматриваемых УКВ-радиолиниях есть вероятность события

$$P\{\text{связь есть}\} = P\{u_c > u_3\},$$

где u_c — уровень принимаемого сигнала,

$$u_3 = \alpha_{v_{bx}}, \quad (1)$$

v_{bx} — чувствительность приемника, α — заданное превышение u_c над v_{bx} .

Тогда решение задачи оптимизации размеров радиуса зоны ККС имеет вид

$$r_{cp}^{\text{опт}} = \underset{r_{cp}}{\operatorname{argmax}} P\{u_c > u_3\}, \quad (2)$$

где r_{cp} — среднее расстояние между корреспондентами.

Для наиболее общего случая вероятность $P\{u_c > u_3\}$ может быть определена как вероятность одновременного наступления следующих трех событий: расстояние между корреспондентами не превышает предельно допустимое R_{np} при работе корреспондентов на ровной поверхности земли; случайный рельеф между корреспондентами не перекрывает I зоны Френеля ($\eta < b_1$); ожидаемый уровень сигнала при обязательном выполнении предыдущих условий превышает u_3 .

Учитывая изложенное, можно записать:

$$\begin{aligned} P\{u_c > u_3\} &= \\ &= P\{r_c < R_{np}\} P\{\eta < b_1\} P\{u_c > u_3 / r_c < R_{np}, \eta < b_1\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Определим входящие в правую часть этого выражения вероятности.

Вероятность $P\{r_c < R_{np}\}$ принято находить по плотности вероятности взаимного удаления корреспондентов. Для рассматриваемой ситуации наиболее типичным является закон Максвелла [2]:

$$W(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{r^2}{\sigma^3} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где

$$\sigma^2 = \frac{\pi}{8} r_{\text{cp}}^2. \quad (5)$$

Тогда

$$P\{r_c < R_{\text{np}}\} = \int_0^{R_{\text{np}}} W(r) dr = \frac{2}{\pi} \gamma\left(\frac{3}{2}; \frac{R_{\text{np}}^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

где $\gamma(\alpha, \gamma)$ — неполная гамма-функция [4]. Поскольку

$$\gamma(\alpha + 1, x) = \alpha\gamma(\alpha, x)x^\alpha e^{-x} \quad (7)$$

и, кроме того,

$$\gamma(1/2, x_0^2) = \sqrt{\pi}\Phi(x_0/\sqrt{2}), \quad (8)$$

то, последовательно применяя (7), (8) и (6), после преобразований получим следующее выражение:

$$P\{r_c < R_{\text{np}}\} = \Phi(\sigma/\sqrt{2}) - (2/\sqrt{\pi})\sigma \exp(-\sigma^2), \quad (9)$$

где $\Phi(\dots) = \sqrt{2/\pi} \int_0^x \exp(-t^2/2) dt$ — функция Крампа, табулированная в [3];

$$\sigma = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R_{\text{np}}}{r_{\text{cp}}}.$$

На рис. 1 построены в соответствии с выражением (9) зависимости вероятности $P\{r_c < R_{\text{np}}\}$ от r_{cp} . Значение предельной дальности связи определяется соотношением

$$R_{\text{np}} = 3.57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),$$

где h_1 и h_2 — соответственно высоты приемной и передающей антенн в метрах. Значения этих высот для кривых представлены в табл. 1.

Из рис. 1 следует, что изменение высот подъема антенн существенно влияет на величину рассматриваемой вероятности P . Так, при $h_1 = h_2 = 3$ м

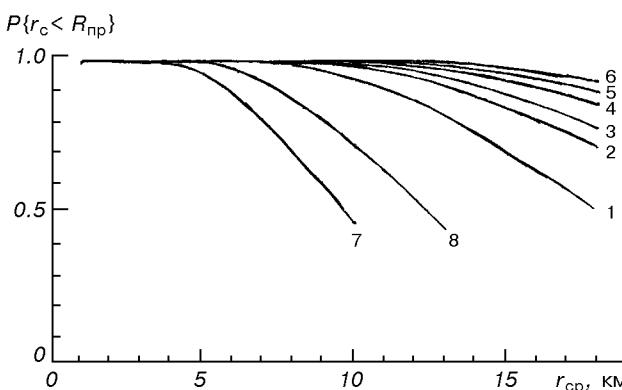


Рис. 1. Зависимость I составляющей вероятности $P\{r_c < R_{\text{np}}\}$ от r_{cp}

Таблица 1. Соответствие номера кривой $P\{r_c < R_{\text{np}}\}$ значению высоты антенны

№ кривой	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$
1	10	10
2	15	15
3	15	20
4	15	30
5	15	40
6	15	50
7	3	3
8	5	5

$P\{r_c < R_{\text{np}}\} \geq 0.7$ для $r_{\text{cp}} = 0...8$ км, при $h_1 = h_2 = 5$ м эта вероятность распространяется на интервал $r_{\text{cp}} = 0...10.3$ км. Наконец, при $h_1 \geq 15$ м, $h_2 \geq 15$ м вероятность равна 0.7 и более в интервале $r_{\text{cp}} = 0...18$ км. Характер изменения вероятности $P\{r_c < R_{\text{np}}\}$ — монотонно убывающая с увеличением r_{cp} .

Для нахождения вероятности $P\{\eta < b_1\}$ воспользуемся плотностью распределения высот H случайного рельефа, вид которой зависит от рассматриваемого географического района.

Для районов Прибалтики, северо-западной части России, бассейнов Днепра и Дуная, юга Украины и др. наиболее близким к фактическому является показательный закон

$$W(H) = \alpha_H \exp(-\alpha_H H), \quad (10)$$

где α_H — параметр распределения, значения которого для выбранного района находятся в пределах 0.01 ... 0.1 [2].

Запишем справедливое соотношение [2]

$$P\{\eta < b_1\} = \int_0^{\infty} F_\eta(b_1) W(b_1) db_1, \quad (11)$$

где $F_\eta(b_1)$ — интегральная функция распределения высот рельефа, определяемая по формуле (10) при $H \leq b_1$; $W(b_1)$ — плотность вероятности из (4) при $b_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda r / 3}$, что соответствует определению величины 1-й зоны Френеля на середине радиотрассы; λ — длина волн. Интегрируя в (11), получаем

$$P\{\eta < b_1\} = 1 - \frac{8}{\sqrt{\pi}} \Theta^{3/2} u_1,$$

где

$$u_1 = \int_0^{\infty} x^4 \exp(-\alpha_H x - \Theta x^4) dx, \quad (12)$$

$$\Theta = \frac{2^5 3^2}{\pi \lambda^2} r_{\text{cp}}.$$

Для упрощения вычислений преобразуем выражение (12) следующим образом. Используя разложение

$$\exp(-\alpha_H x) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\alpha_H^k x^k}{k!} \quad (13)$$

и интегрируя по (3.478.1) из [1], окончательно получим

$$P\{\eta < b_1\} = 1 - \frac{\Theta^{1/4}}{\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\alpha_H^k \Gamma[(k+5)/4]}{k! \Theta^{k/4}}, \quad (14)$$

где $\Gamma(\dots)$ — полная гамма-функция [1]. В этом разложении всегда можно ограничиться конечным числом членов знакопеременного ряда, причем ошибка не превышает по абсолютной величине первый из отброшенных членов.

Заметим, что можно было бы попытаться использовать второй путь вычислений в (12), основанный согласно (1.211.1) из [1] на разложении

$$e^{-\Theta_x^4} = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\Theta^k}{k!} x^{4k},$$

$$u_1 = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\Theta^k}{k!} \int_0^{\infty} x^{4(k+1)} e^{-\alpha x} dx.$$

Интегрируя согласно (3.381.4) из [1], получим

$$u_1 = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\Theta^k \Gamma[4(k+1)+1]}{k! \alpha^{4(k+1)+1}} =$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\Theta^k [4(k+1)]!}{k! \alpha^{4(k+1)}}.$$

Однако использование такой оценки для количественных расчетов менее удобно, чем в (14), поскольку $\alpha < 1$.

На рис. 2 представлены графики, построенные в соответствии с выражением (14). Здесь $\alpha_H = 0.01$ для кривой 3, $\alpha_H = 0.05$ для кривой 2, $\alpha_H = 0.1$ для кривой 4. Видно, что вероятность $P[\eta < b_1]$ для всего диапазона рассматриваемых дальностей связи существенно зависит от величины α_H , но достаточно высока, превышая значения 0.85. С увеличением r_{cp} она монотонно увеличивается.

Наконец, вероятность $P[u_c > u_3 / r_c < R_{np}, \eta < b_1]$ в (3) определяется соотношением

$$P\{u_c > u_3 / r_c < R_{np}, \eta < b_1\} = 1 - \int_0^{u_3} W(u_c) du_c, \quad (15)$$

где согласно [2] распределение уровня принимает

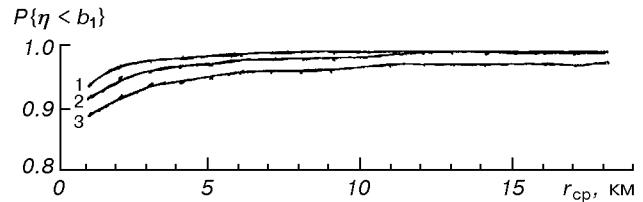


Рис. 2. Зависимость II составляющей вероятности $P\{r_c < R_{np}\}$ от r_{cp}

мого сигнала в случае прямого радиолуча имеет вид

$$W(u_c) = \sqrt{2/\pi} \frac{A}{\sigma^3 u_c} \exp\left(-\frac{A}{2\sigma^2 u_c}\right) \left(\frac{\sqrt{A}}{\sqrt{u_c^3}}\right). \quad (16)$$

Здесь σ^2 определяется выражением (5), кроме того,

$$A = [P_u G_1 \eta_1 G_2 \eta_2 W_{bx} (h_1^2 + h_0^2)(h_2^2 + h_0^2)]^{1/2},$$

где h_0 — минимальная эффективная высота антенны в метрах, определяемая для параметров средних между сухой и влажной почвой; P_u — мощность излучения передатчика; W_{bx} — входное сопротивление приемника; G_1 и G_2 — коэффициенты усиления соответственно передающей и приемной антенн; η_1 и η_2 — коэффициенты полезного действия систем передачи энергии соответственно от передатчика к передающей антенне и от приемника к приемной антенне.

Подставляя (16) в (15) и интегрируя с помощью (3.381.3) из [1], получим

$$P\{u_c > u_3 / r_c < R_{np}, \eta < b_1\} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \Gamma\left(\frac{3}{2}; \frac{A}{2\sigma^2 u_3}\right), \quad (17)$$

где $\Gamma(\dots)$ — неполная гамма-функция [1]. Учитывая, что

$$\Gamma(\alpha + 1, x) = \alpha \Gamma(\alpha, x) + x^\alpha e^{-x},$$

а также

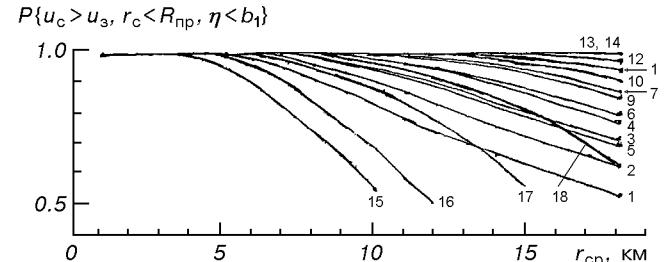


Рис. 3. Зависимость III составляющей вероятности $P\{r_c < R_{np}\}$ от r_{cp}

$$\Gamma(1/2, x_0^2) = \sqrt{\pi} [1 - \Phi(x_0/\sqrt{2})],$$

после преобразования (17) окончательно получим

$$P\{u_c > u_s / r_c < R_{np}, \eta < b_1\} = \Phi(\beta/\sqrt{2}) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \beta e^{-\beta^2}, \quad (18)$$

где $\beta = A/(2\sigma^2 u_s)$, а величина u_s определена по формуле (1).

Таблица 2. Соответствие номера кривой (18) высоте антенны и мощности передатчика

№ кривой	h_1 , м	h_2 , м	P_u , Вт
1	10	10	7
2	10	10	15
3	10	10	30
4	10	10	50
5	15	15	7
6	15	15	15
7	15	15	30
8	15	20	7
9	15	30	7
10	15	40	7
11	15	50	7
12	15	50	15
13	15	50	30
14	15	50	50
15	3	3	7
16	3	3	50
17	5	5	7
18	5	5	50

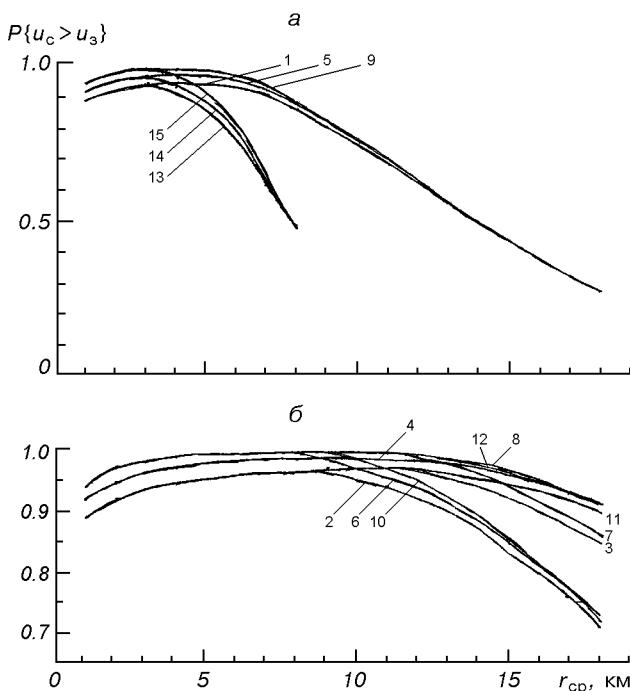


Рис. 4. Зависимость вероятности $P\{r_c < R_{np}\}$ от r_{cp}

На рис. 3 представлен график зависимости вероятности от r_{cp} в соответствии с (18). Множеству параметров приданы значения, типичные для УКВ-радиостанций, в том числе типа «Кама», и прежде всего «Кама-Р», а также GSM, ММТ-450 и др. Кроме того, принятые следующие значения параметров:

$$G_1 = G_2 = 1, \quad \eta_1 = \eta_2 = 0.9,$$

$$W_{bx} = 75 \text{ Ом}, \quad x_{bx} = 1.5 \text{ мкВ},$$

$\alpha = 3$ (соотношение сигнал/шум).

Высоты передающей и приемной антенн, а также мощности передатчиков для соответствующих номеров кривых сгруппированы в табл. 2.

Как видно из рисунка, рассматриваемая вероятность существенно зависит от высот антенн и мощности передатчика. При прочих равных условиях с увеличением r_{cp} вероятность монотонно уменьшается.

Соотношения (9), (14) и (18) с учетом (3) позволяют решить задачу оптимизации, определяемую выражением (2). Учитывая сложный функциональный вид сомножителей, входящих в выражение (3), а также значительное число входящих в них параметров, такое решение можно получить путем численных расчетов на ЭВМ, в том числе на основе графического построения вероятности в зависимости от значений r_{cp} , соответствующих максимуму этой вероятности. Для иллюстрации этого положения на рис. 4 представлены результаты расчета зависимости $P\{u_c > u_s\}$ от r_{cp} . Значения параметров приемо-передатчиков радиотрассы, рельефа и динамики движения корреспондентов приняты

Таблица 3. Соответствие $P\{u_c > u_s\}$ параметрам h_1 , h_2 , P_u , α_H

№ кривой	α_H	h_1 , м	h_2 , м	P_u , Вт
1	0.01	10	10	7
2	0.01	15	30	7
3	0.01	15	50	7
4	0.01	15	50	50
5	0.05	10	10	7
6	0.05	15	30	7
7	0.05	15	50	7
8	0.05	15	50	50
9	0.1	10	10	7
10	0.1	15	30	7
11	0.1	15	50	7
12	0.1	15	50	50
13	0.01	3	3	7
14	0.05	3	3	7
15	0.1	3	3	7

такими, как указано выше. Соответствие кривых рис. 4, *a* и *b* параметрам h_1 , h_2 , P_u , α_H показано в табл. 3.

Как видно из рис. 4, значения вероятности $P\{u_c > u_s\}$ плавно изменяются в окрестности ее максимума. При этом значение r_{cp} изменяется в пределах от 3 км при $\alpha = 0.01$, $h_1 = h_2 = 3$ м, $P_u = 7$ Вт — до 10 км при $\alpha = 0.1$, $h_1 = 15$ м, $h_2 = 50$ м, $P_u = 50$ Вт.

Необходимо отметить, что с увеличением высоты антенн и мощности передатчика характер кривых в окрестности максимума становится более плавным, и оптимальное значение r_c^{opt} увеличивается.

Таким образом, предлагаемое в данной работе решение задачи оптимизации радиуса зоны ККС при передаче дифференциальных поправок в аналоговой форме показало, что для наиболее характерного случая максвелловского закона распределения перемещения абонентов относительно ККС и для типичных эксплуатационно-технических параметров радиопередатчиков ККС и судовых навигационных приемников оптимальные и квазиопти-

мальные радиусы зон ККС имеют значения от 3 км до 12...15 км при вероятности правильного приема аналоговых дифференциальных поправок не меньше 0.75.

- Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — М.: Госиздат Физматлит-ры, 1963.—1100 с.
- Доровских А. В., Сикарев А. А. Сети связи с подвижными объектами. — Киев: Техника, 1989.—158 с.
- Таблицы вероятностных функций / Пер. с англ. Л. С. Барк. — М.: ВЦ АН СССР, 1970.—344 с.
- Янке Е., Эмде Ф., Лем Ф. Специальные функции. — М.: Наука, 1964.—344 с.

EXPLORATION OF ACTION ZONE IN INLAND WATERWAYS FOR MONITORING AND CORRECTING STATION OF RADIO-NAVIGATION SYSTEM

V. S. Mykhailov

It is investigated the action radius of monitoring and correcting stations realized the differential corrections transmission in inland waterways. The solution of task optimization of radius dimensions for monitoring and correcting station is founded.

УДК 621.396.98:629.7

Б. И. Макаренко¹, Е. Э. Наумова²

¹АТ Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

²Науковий метрологічний центр (військових еталонів) Міністерства оборони України, Харків

Высокоточная синхронизация шкал времени при использовании двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей в аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем

Приводятся результаты разъязвания задачи порівняння шкал часу користувачів з системною шкалою часу глобальної навігаційної супутникової системи і задачі порівняння шкал часу двох просторово рознесеніх користувачів. Використовується подвійна диференціальна корекція псевдодальностей на основі обробки вимірювальної інформації в радіоелектронному комплексі з чотирьох регіональних контрольних станцій. Методом імітаційного моделювання радіоелектронного комплексу контрольних станцій, розміщених в Україні, аналізуються повні і залишкові похибки вимірювань псевдодальностей. Методом імітаційного моделювання супутникової системи координатно-часового забезпечення нерухомих користувачів аналізуються повні, потенційні та результатуючі похибки порівняння шкал часу без застосування та з урахуванням застосування подвійної диференціальної корекції псевдодальностей.

ВВЕДЕНИЕ

Высокоточная синхронизация шкал времени про странственно разнесенных эталонов времени и частоты является одним из специальных применений глобальных спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС, GNSS-I [1, 2, 4].

Опыт практического использования данных систем убедительно указывает на большую роль систематических (медленно изменяющихся) погрешностей в измерениях псевдодальностей и псевдоскоростей. Известно, что основными источниками данных погрешностей являются: тропосферная рефракция, ионосферная рефракция, неопределенность вектора состояния навигационных космических аппаратов (НКА).

Полагается, что эффекты, вытекающие из специальной и общей теории относительности, ослабляются с использованием аппаратных и программных средств [2].

Для ослабления медленно изменяющихся погрешностей в измерениях псевдодальностей и псевдоскоростей используют различные методы. Прежде всего применяют математические модели для

основных составляющих погрешностей, для использования которых необходимо знание ряда параметров обстановки (температура, давление, влажность, максимальная электронная концентрация и т. д.). Кроме того, широко используются относительные (разностные) измерения и определения. Именно таким методом в настоящее время осуществляется сравнение шкал времени UTC(SU) и UTC(UA) на основе наблюдения одного навигационного космического аппарата (НКА) ГЛОНАСС и определения расхождений шкал времени с использованием аппаратуры потребителя А-724М-01 [1].

Однако по мере удаления потребителей друг от друга эффект ослабления медленно изменяющихся погрешностей снижается из-за их пространственной декорреляции.

Наиболее эффективным средством ослабления медленно изменяющихся погрешностей измерения псевдодальностей и псевдоскоростей является дифференциальный режим функционирования спутниковой радионавигационной системы [1, 4]. При локальной дифференциальной коррекции медленно изменяющиеся погрешности устраняются практически полностью. По мере удаления потребителей от

контрольных станций остаточные погрешности рас- тут по причине пространственно-временной декор- реляции погрешностей.

В последнее время внимание специалистов привлекает идея среднезонной коррекции псевдодаль- ностей [6].

Представляет интерес исследовать эффектив- ность метода среднезонной коррекции псевдодаль- ностей, названного в работе [3] методом двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей, применительно к задаче сравнения шкал времени потребителей, неподвижных в сеансе связи с НКА, координаты которых в общем случае неподвижны и подлежат оцениванию.

СОВМЕСТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ КООРДИНАТ И ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ РАСХОЖДЕНИЙ НЕПОДВИЖНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Вектор состояния неподвижного потребителя, следуя [4], определим векторно-матричным разност- ным уравнением

$$\lambda_{k_i} = \Phi_{k, k-1_i} \cdot \lambda_{k-1_i} + \eta_{k_i}, \quad (1)$$

где

$$\lambda_{k_i}^T = \{x_i, y_i, z_i; \delta T_{k_i}, \delta f_{k_i}\},$$

x_i, y_i, z_i — гринвичские геоцентрические коорди- наты антennы аппаратуры потребителя с номером i ; δT_{k_i} — расхождение (погрешность) шкалы времени потребителя относительно системного времени СРНС; δf_{k_i} — расхождение (погрешность) частоты генератора потребителя относительно номинально- го значения f_0 ;

$$\Phi_{k, k-1_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{1-\rho_i}{\alpha_i \cdot f_0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_i \end{bmatrix},$$

$$\rho_i = e^{-\alpha_i(t_k - t_{k-1})} = e^{-\alpha_i \Delta t};$$

α_i — ширина энергетического спектра частотных флюктуаций.

Дискретный белый шум η_{k_i} имеет нулевое мате- матическое ожидание. Дисперсионно-ковариацион- ная матрица $\langle \eta_{k_i} \cdot \eta_{k_i}^T \rangle = \theta_{\eta_i}$ содержит нули, кроме элементов $\theta_{44}, \theta_{55}, \theta_{45} = \theta_{54}$, а именно:

$$\begin{aligned} \theta_{44_i} &= \sigma_{\delta f_i}^2 \frac{2\alpha_i \Delta t + 4\rho_i - \rho_i^2 - 3}{\alpha_i^2 f_0^2}, \\ \theta_{55_i} &= \sigma_{\delta f_i}^2 (1 - \rho_i^2), \\ \theta_{45_i} &= \theta_{54_i} = \sigma_{\delta f_i}^2 \frac{(1 - \rho_i)^2}{\alpha_i f_0}, \\ \sigma_{\delta f_i}^2 &= \frac{\theta_{\xi_{f_i}}}{4\alpha_i}, \end{aligned}$$

$\theta_{\xi_{f_i}}$ — спектральная плотность интенсивности бело- го шума $\xi_{f_i}(t)$ в уравнении

$$\frac{d\delta f_i(t)}{dt} = -\alpha_i \delta f_i(t) + \xi_{f_i}(t).$$

В качестве начальных условий для уравнения (1) имеем

$$\begin{aligned} \langle \lambda_{o_i}^T \rangle &= [x_{o_i}, y_{o_i}, z_{o_i}; \delta T_{o_i}, \delta f_{o_i}] = \mathbf{v}_0^T, \\ \overset{o}{\lambda}_{o_i} &= \lambda_{o_i} - \langle \lambda_{o_i} \rangle; \\ \langle \overset{o}{\lambda}_{o_i} \cdot \overset{o}{\lambda}_{o_i}^T \rangle &= \mathbf{M}_0. \end{aligned}$$

В качестве измеряемых функций рассмотрим ко- довые псевдодальности, а также псевдоскорости относительно четырех НКА рабочего созвездия. Уравнения наблюдения запишем в виде [4]

$$\mathbf{u}_{ki} = \mathbf{R}_{ki}(\lambda_{ki}, \lambda_{sk}) + \mathbf{n}_{ki},$$

где $\hat{\lambda}_{sk}$ — блочный вектор оценок эфемерид и частотно-временных расхождений НКА,

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{n}_{ki} \rangle &= \delta \mathbf{n}_{ki}, & \overset{o}{\mathbf{n}}_{ki} &= \mathbf{n}_{ki} - \delta \mathbf{n}_{ki}, \\ \langle \overset{o}{\mathbf{n}}_{ki} \cdot \overset{o}{\mathbf{n}}_{ki}^T \rangle &= \mathbf{N}_{ki}, & \langle \overset{o}{\mathbf{n}}_{ki} \cdot \overset{o}{\mathbf{n}}_{li}^T \rangle &= \mathbf{0} \quad \text{при } k \neq l. \end{aligned}$$

Алгоритм оценивания вектора состояния потре- бителя имеет вид [4]

$$\tilde{\lambda}_{ki} = \overset{*}{\lambda}_{ki} + \overset{*}{\mathbf{H}}_{ki} [\mathbf{u}_{ki} - \mathbf{R}_{ki}(\overset{*}{\lambda}_{ki}, \lambda_{sk}) - \delta \mathbf{n}_{ki}]. \quad (2)$$

Здесь

$$\overset{*}{\lambda}_{ki} = \Phi_{k, k-1_i} \tilde{\lambda}_{k-1, i},$$

$$\overset{*}{\mathbf{H}}_{ki} = \sum_{ki} \cdot \overset{*}{\mathbf{C}}_{ki}^T \cdot \mathbf{N}_{ki}^{-1}, \quad \overset{*}{\mathbf{C}}_{ki} = \frac{\partial \mathbf{R}_{ki}}{\partial \lambda_{ki}} \Big|_{\overset{*}{\lambda}_{ki}}.$$

$$\tilde{\Sigma}_{ki} = \left[\Sigma_{ki}^{-1} + \mathbf{C}_{ki}^T \mathbf{N}_{ki} \mathbf{C}_{ki} \right]^{-1}, \quad (3)$$

$$\tilde{\Sigma}_{ki}^* = \Phi_{k, k-1_i} \cdot \tilde{\Sigma}_{k-1} \cdot \Phi_{k, k-1_i}^T + \theta_{\eta_{ki}},$$

$$\tilde{\chi}_{0_1} = \nu_0,$$

$$\Sigma_{0_1} = \mathbf{M}_0.$$

Слагаемое δn_{ki} в (2) указывает на возможность и целесообразность коррекции систематических погрешностей исходных измерений.

МЕТОД ДВОЙНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ПСЕВДОДАЛЬНОСТЕЙ

Алгоритмы обработки измерительной информации в радиоэлектронном комплексе двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей приведены в [3]. При использовании комплекса из четырех региональных контрольных станций и аппроксимации поля медленно изменяющихся погрешностей измерения псевдодальностей плоскостью оценивается вектор из коэффициентов a_j, b_j, c_j по разностям $\Delta \tilde{D}_{kji} = \tilde{D}_{kji} - \tilde{D}_{kj0}$, $i = 1, 2, 3$, j — номер НКА.

На интервале постоянства во времени параметров a_j, b_j, c_j длительностью $M \Delta t$ ($k = 1, 2, \dots, M$) имеем

$$\begin{pmatrix} \hat{a}_j \\ \hat{b}_j \\ \hat{c}_j \end{pmatrix} = \left[\sum_{k=1}^M \mathbf{D}^T \cdot \Delta \mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{D} \right]^{-1} \sum_{k=1}^M \mathbf{D}^T \cdot \Delta \mathbf{N}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \delta D_{kj1} \\ \delta D_{kj2} \\ \delta D_{kj3} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \end{bmatrix};$$

x_i, y_i, z_i — гринвичские координаты антенн контрольных станций ($i = 0, 1, 2, 3$).

Вместо алгоритма (4) возможно рекуррентное оценивание параметров $\hat{a}_j, \hat{b}_j, \hat{c}_j$ методом фильтрации Калмана.

Двойная дифференциальная коррекция псевдодальностей для НКА с номером i в точке с координатами x, y, z определяется выражением

$$\delta \tilde{D}_{kj} = \delta \tilde{D}_{kj0} + \hat{a}_{jk}(x - x_0) + \hat{b}_{jk}(y - y_0) + \hat{c}_{jk}(z - z_0),$$

причем $\delta \tilde{D}_{kj0}$ — псевдодальномерная погрешность, измеренная на главной контрольной станции.

Дополнительное слагаемое

$$dD_{kj} = \hat{a}_{jk}(x - x_0) + \hat{b}_{jk}(y - y_0) + \hat{c}_{jk}(z - z_0)$$

вычисляется с учетом знания координат потребителя, полученных в штатном режиме функционирования аппаратуры (без коррекции).

Эффективность метода двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей может быть оценена по уровню остаточной погрешности, например в пункте контроля качества корректирующей информации с координатами $x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha$, а именно

$$\begin{aligned} \Delta \delta \tilde{D}_{kj\alpha} &= \delta \hat{D}_{kj\alpha} - \\ &- [\delta \hat{D}_{kj0} + \hat{a}_{jk}(x_\alpha - x_0) + \hat{b}_{jk}(y_\alpha - y_0) + \hat{c}_{jk}(z_\alpha - z_0)]. \end{aligned} \quad (5)$$

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА РЕГИОНАЛЬНЫХ КОНТРОЛЬНЫХ СТАНЦИЙ И СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ШКАЛ ВРЕМЕНИ

Алгоритм моделирования включает несколько этапов.

- На первом этапе моделирования осуществляется:
 - планирование сеанса связи с НКА по данным альманаха параметров орбит, выбор рабочего созвездия НКА;
 - расчет эфемерид в сеансе связи.

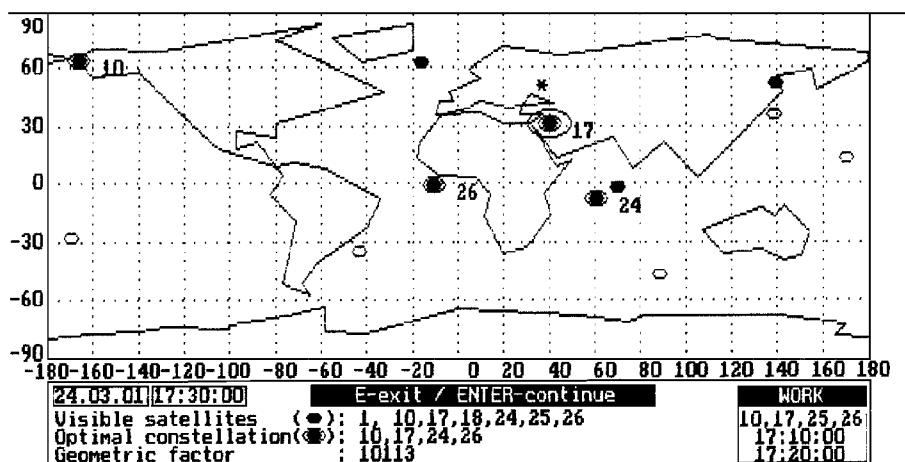
На втором этапе моделирования формируется массив наблюдаемых псевдодальностей и псевдоскоростей. При этом формируются процессы частотно-временных расхождений для каждой контрольной станции и для каждого пункта контроля качества корректирующей информации (ПКК КИ). С использованием вычисленных геометрических дальностей и радиальных скоростей, а также частотно-временных расхождений находятся измеряемые псевдодальности и псевдоскорости.

На основе известных моделей тропосферной и ионосферной рефракции вычисляются погрешности измерений псевдодальностей и псевдоскоростей. Полагая известными погрешности в знании векторов состояния НКА рабочего созвездия, вычисляются соответствующие погрешности псевдодальномерных и псевдоскоростных измерений

$$\delta \hat{\mathbf{R}}_k = \frac{\partial \mathbf{R}_k}{\partial \lambda_{sk}} \Big|_{\hat{\lambda}_{sk}} \delta \lambda_{sk}.$$

Наконец, формируются случайные погрешности n_k с заданной дисперсионной матрицей N_k .

На третьем этапе находятся оценки параметров $\hat{a}_j, \hat{b}_j, \hat{c}_j$ двойной дифференциальной коррекции



Карта навигационной обстановки

псевдодальностей для каждого НКА рабочего созвездия при выбранной дислокации контрольных станций. В пунктах контроля качества корректирующей информации находятся остаточные погрешности (5) для каждого НКА.

На последнем этапе оценивается вектор состояния потребителя (пункта контроля качества корректирующей информации) без коррекции и с использованием двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей. Помимо абсолютных оценок векторов $\lambda_{k\alpha}$, $\lambda_{k\beta}$ определяются разностные оценки, т. е., вычисляются оценки длин базовых линий и расхождения шкал времени

$$\delta \tilde{T}_{k\alpha} - \delta \tilde{T}_{k\beta} = \delta \tilde{T}_{k\alpha\beta}.$$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСШИРЕННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ШКАЛ ВРЕМЕНИ ЭТАЛОНОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ С НЕИЗВЕСТНЫМИ КООРДИНАТАМИ

Сеанс связи выбран на 24 марта 2001 г. Планирование сеанса проведено с использованием приведенного в табл. 1 альманаха параметров орбит НКА ГЛОНАСС с учетом параметров орбит двух КА INMARSAT-III (IOR, AOR-E).

Комплекс региональных контрольных станций выбран с учетом расположения главной станции в районе г. Симферополь (ГКС-0), где имеется передатчик длинноволнового диапазона системы даль-

ней радионавигации «Чайка», который можно использовать для трансляции корректирующей информации. Периферийные контрольные станции выбраны в районах городов Харьков, Алчевск, Хмельницкий. Пункты контроля качества корректирующей информации выбраны в г. Харьков и в г. Киев. Для рассмотренного комплекса в сеансе связи выбраны НКА ГЛОНАСС с номерами 17, 18, 24 и один геостационарный КА INMARSAT-III (IOR).

Рассмотрим сеанс связи длительностью 120 с. Интервал по времени записи измерительной информации выбран равным 2 с. Карта навигационной обстановки для этого сеанса приведена на рисунке.

В табл. 2 приведены оценки параметров вектора двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей для всех НКА рабочего созвездия. В табл. 3, 4 приведены фрагменты файлов данных для пунктов контроля качества корректирующей информации в районе городов Киев и Харьков для КА № 26 (INMARSAT-III AOR-E).

Аналогичные вычисления выполнены также для НКА ГЛОНАСС с номерами 17, 18, 24 как для ПКК КИ в г. Киеве, так и в г. Харькове.

Основные результаты моделирования приведены в табл. 5, 6. Табл. 5 содержит результаты анализа погрешностей оценок расхождений шкал времени без применения двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей. В табл. 6 помещены аналогичные данные, но для случая использования двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей.

Таблица 1. Альманах параметров орбит НКА ГЛОНАСС и КА INMARSAT-III на 24 марта 2001 г.

Nº	t_{Om}	T	e	i	Ω_m	arg	T_v
1	16858.498	40544.330	0.00139808	65 07 17.0	178 00 42.5	066 42 12.5	-0.00036620
7	06473.280	40544.194	0.00048160	65 07 41.1	221 23 28.8	079 01 08.9	-0.00042724
8	11601.092	40544.242	0.00144766	65 06 54.1	199 58 48.0	052 33 30.9	-0.00036620
10	19862.592	40543.874	0.00161552	64 52 58.0	286 25 25.9	177 24 45.7	+0.00042724
11	24752.374	40543.972	0.00313568	64 52 25.2	265 58 25.2	164 35 49.8	+0.00042724
13	35251.842	40543.914	0.00150584	64 52 29.5	222 01 25.4	323 13 23.7	+0.00048828
15	04739.998	40543.904	0.00039958	64 52 21.5	349 29 29.0	222 21 47.8	+0.00036620
17	13193.812	40543.962	0.00073814	64 44 53.5	073 39 04.7	066 31 39.7	+0.00042724
18	18155.186	40544.190	0.00354194	64 43 53.5	052 52 32.9	229 47 24.1	+0.00109862
24	08222.906	40543.938	0.00040816	64 45 06.4	094 24 41.4	067 47 08.3	+0.00054930
25	10000.000	86164.000	0.00001212	01 00 00.0	065 00 00.0	040 00 00.0	+0.00000012
26	12000.000	86164.000	0.00000134	01 00 00.0	345 00 00.0	050 00 00.0	+0.00000002

Таблица 2. Оценки параметров вектора двойной дифференциальной коррекции псеводальностей

NKA	\hat{a}	σ_a	\hat{b}	σ_b	\hat{c}	σ_c
17	$7.73 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$-4.69 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-10}$	$2.27 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-8}$
18	$-1.7 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$-5.87 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-10}$	$-3 \cdot 10^{-6}$	$5.4 \cdot 10^{-8}$
24	$2.17 \cdot 10^{-5}$	$9.7 \cdot 10^{-8}$	$-5.6 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$4.47 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$
26	$-1.7 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$-2.87 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-9}$	$-3.12 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-8}$

Таблица 3. Эффективность двойной дифференциальной коррекции псеводальностей (ПКК КИ — Киев, НКА № 26 INMARSAT-III AOR-E)

Номер	t_k	dU_0	ddD	$dU_0 + ddD$	dU_{14}	$dU_{14} - (dU_0 + ddD)$	$dU_{14} - dU_0$
1	17:30:00	30.771	0.722	31.493	32.038	0.545	1.267
2	17:30:02	30.351	1.368	31.719	32.274	0.555	1.923
3	17:30:04	30.487	1.644	32.131	32.123	-0.008	1.636
4	17:30:06	30.565	1.574	32.139	32.344	0.205	1.779
5	17:30:08	30.266	1.695	31.961	32.099	0.138	1.833
6	17:30:10	30.621	1.797	32.418	32.103	-0.315	1.482
7	17:30:12	30.497	1.783	32.28	32.189	0.091	1.692
8	17:30:14	30.469	1.767	32.236	32.292	0.056	1.823
9	17:30:16	30.134	1.812	31.946	32.182	0.236	2.048
10	17:30:18	30.393	1.847	32.24	32.383	0.143	1.99
...
57	17:31:52	30.501	1.815	32.316	32.235	-0.081	1.734
58	17:31:54	30.51	1.813	32.323	32.264	-0.059	1.754
59	17:31:56	30.477	1.812	32.289	32.284	-0.005	1.807
	MO					-0.00175	1.795525
	SKO					0.163574	0.147202

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы сводятся к следующему.

Без коррекции погрешность измерения псеводальностей имеет порядок десятков метров (dU_{14} в табл. 3, dU_{10} в табл. 4).

Коррекция по данным главной контрольной станции приводит к остаточной погрешности измерения псеводальностей на уровне единиц метров ($dU_{14} - dU_0$ в табл. 3; $dU_{10} - dU_0$ в табл. 4).

Двойная дифференциальная коррекция псеводальностей по данным комплекса из четырех региональных контрольных станций обеспечивает остаточную погрешность на дециметровом уровне ($dU_{14} - dU_0 - ddD$ в табл. 3; $dU_{10} - dU_0 - ddD$ в табл. 4).

Без дифференциальной коррекции псеводальностей смещения в оценках расхождения шкал времени равны 140—170 нс (dT_{10}, dT_{14} в табл. 5), тогда как потенциальная точность находится на уровне

Таблица 4. Эффективность двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей (ПКК КИ — Харьков, НКА № 26 INMARSAT-III AOR-E)

Номер	t_k	dU_0	ddD	dU_0+ddD	dU_{10}	$dU_{10}-(dU_0+ddD)$	$dU_{10}-dU_0$
1	17:30:00	30.771	5.747	36.518	36.191	-0.327	5.420
2	17:30:02	30.351	5.978	36.329	36.198	-0.131	5.847
3	17:30:04	30.487	5.970	36.457	35.917	-0.54	5.430
4	17:30:06	30.565	5.975	36.540	36.111	-0.429	5.546
5	17:30:08	30.266	5.953	36.219	35.528	-0.691	5.262
6	17:30:10	30.621	5.882	36.503	35.895	-0.608	5.274
7	17:30:12	30.497	5.898	36.395	35.905	-0.49	5.408
8	17:30:14	30.469	5.876	36.345	35.645	-0.7	5.176
9	17:30:16	30.134	5.919	36.053	36.199	0.146	6.065
10	17:30:18	30.393	5.903	36.296	35.84	-0.456	5.447
...
57	17:31:52	30.501	6.085	36.586	36.040	0.546	5.539
58	17:31:54	30.510	6.086	36.596	36.024	-0.572	5.514
59	17:31:56	30.477	6.087	36.564	36.064	-0.5	5.587
				MO		-0.43215	5.588305
				SKO		0.166524	0.151659

Таблица 5. Калмановские оценки расхождения шкал времени потребителей в районах г. Киев (ПКК КИ — 14) и г. Харьков (ПКК КИ — 10) без применения двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей, измеренных по НКА ГЛОНАСС

	t_k	dt_{10}	$skot_{10}$	dt_{14}	$skot_{14}$	dt_{14-10}
1	17:30:02	8.13E-08	9.80E-10	9.17E-08	9.80E-10	1.04E-08
2	17:30:04	1.12E-07	8.10E-10	1.26E-07	8.10E-10	1.39E-08
3	17:30:06	1.24E-07	7.10E-10	1.41E-07	7.10E-10	1.71E-08
4	17:30:08	1.28E-07	6.50E-10	1.48E-07	6.40E-10	2.02E-08
5	17:30:10	1.30E-07	6.00E-10	1.52E-07	5.90E-10	2.14E-08
6	17:30:12	1.32E-07	5.60E-10	1.54E-07	5.60E-10	2.22E-08
7	17:30:14	1.32E-07	5.30E-10	1.55E-07	5.30E-10	2.24E-08
8	17:30:16	1.33E-07	5.10E-10	1.56E-07	5.00E-10	2.29E-08
9	17:30:18	1.34E-07	4.90E-10	1.57E-07	4.80E-10	2.29E-08
10	17:30:20	1.34E-07	4.80E-10	1.57E-07	4.70E-10	2.36E-08
...
57	17:31:54	1.41E-07	3.10E-10	1.67E-07	3.00E-10	2.60E-08
58	17:31:56	1.41E-07	3.10E-10	1.67E-07	3.00E-10	2.67E-08
59	17:31:58	1.41E-07	3.10E-10	1.67E-07	3.00E-10	2.66E-08
MO		1.36E-07		1.60E-07		2.41E-08
SKO		8.57E-09		1.12E-08		2.80E-09

Таблица 6. То же после применения двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей, измеренных по НКА ГЛОНАСС

	t_k	dt_{10c}	$skot_{10c}$	dt_{14c}	$skot_{14c}$	dt_{14-10c}
1	17:30:02	8.30E-10	9.80E-10	7.00E-10	9.80E-10	-1.30E-10
2	17:30:04	1.00E-09	8.10E-10	2.70E-10	8.10E-10	-7.30E-10
3	17:30:06	2.40E-10	7.10E-10	6.30E-10	7.10E-10	3.90E-10
4	17:30:08	9.70E-11	6.40E-10	6.70E-10	6.40E-10	5.73E-10
5	17:30:10	1.70E-10	6.00E-10	1.90E-10	5.90E-10	2.00E-11
6	17:30:12	1.30E-10	5.60E-10	1.40E-10	5.60E-10	1.00E-11
7	17:30:14	2.40E-10	5.30E-10	2.50E-12	5.30E-10	-2.38E-10
8	17:30:16	1.90E-10	5.10E-10	2.50E-11	5.00E-10	-1.65E-10
9	17:30:18	1.20E-10	4.90E-10	1.00E-10	4.80E-10	-2.00E-11
10	17:30:20	4.50E-10	4.70E-10	1.60E-11	4.70E-10	-4.34E-10
...
57	17:31:54	8.80E-11	3.00E-10	3.30E-10	3.00E-10	2.42E-10
58	17:31:56	3.20E-10	3.00E-10	2.70E-11	3.0010	-2.93E-10
59	17:31:58	4.00E-10	3.00E-10	5.60E-11	3.00E-10	-3.44E-10
MO		2.85E-10		1.73E-10		-1.12E-10
SKO		2.44E-10		1.69E-10		2.84E-10

долей наносекунды (sko t_{10} , sko t_{14}). Смещения в оценках расхождений двух шкал времени порядка десятков наносекунд (dt_{14-10} в табл. 5).

При использовании двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей полные погрешности как абсолютных, так и относительных (разностных) оценок расхождений шкал времени находятся на уровне потенциальных значений и фактически не превышают одной наносекунды.

В целом следует заметить, что результаты моделирования, вероятно, излишне оптимистичны, однако достаточно убедительно свидетельствуют об эффективности двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей. Сходные результаты получены и для других сеансов связи, для других конфигураций комплексов контрольных станций как в Украине, так и за ее пределами.

1. Величко О. М., Сафонов Ю. І., Клейман О.С. та ін. Державна служба єдиного часу і еталонних частот України: структура і основні засади забезпечення країни високоточною частотно-часовою інформацією // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 2/3.—С. 8—11.
2. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенегер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення местоположення (GPS): Теорія і практика / Пер. з англ. під ред. Я. С. Яцківа. — К.: Наук. думка, 1995.—380 с.
3. Наумова О. Е., Романько В. М., Хомяков Е. М., Черепков С. Т. Метод подвійної дифференціальної корекції // Український метрологічний журн.—1999.—№ 3.—С. 8—10.

4. Хомяков Э. Н., Наумова Е. Э., Шаповалов С. Г., Трикоз Д. В. Спутниковые системы координатно-временного обеспечения неподвижных потребителей. — Харьков: ХАИ, 2000.—105 с.
5. NAVSTAR GPS. User Equipment. Introduction. — 1996, September. Chapter 11. Special application for NAVSTAR GPS. — P. 11_1—11_15.
6. Xing-Xiang Jin, Cees D. de Jong. Improvement of DGPS Performance in Medium Areas by Using a Network of DGPS Reference Stations. Differential Satellite Navigation System // Proc. 5th International Conf. on DSRNS'96. — St. Petersburg (Russia), 1996, May 20—24.

TIME SCALES HIGH-PRECISION SYNCHRONIZATION FOR USE OF PSEUDORANGES DOUBLE DIFFERENTIAL CORRECTION IN USERS APPARATUS OF GPS

B. I. Makarenko, E. E. Naumova

The problem of a comparison of users time scales with a system time scale of GPS and problem of a comparison of time scales two spatially of diverse users is considered. The double differential correction of pseudoranges based on measuring information processing in a radioelectronic complex from four regional control stations is offered. Full and residual errors of pseudoranges measurement are analysed by the simulation modeling method of a radio electronic complex of control stations located in Ukraine. Full, potential and resultant errors of time scales comparison without application and with allowance for applications of pseudoranges double differential correction are analysed by the simulation modeling method of fixed user coordinate-time providing.

УДК 389.23

А. С. Клейман¹, А. И. Левенберг¹, А. В. Соловьев¹, В. С. Соловьев¹,
В. Е. Родионов¹, С. А. Таламанов¹, Б. И. Макаренко², В. Н. Романько³,
П. А. Кравченко⁴, Т. А. Усенко⁵

¹Харківський державний науково-дослідний інститут метрології

²АТ Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

³Науковий метрологічний центр (військових стандартів) Міністерства оборони України, Харків

⁴Харківський державний університет сільського господарства

⁵ТОВ «Фарлеп-Харків»

Применение и времени обеспечения

рубидиевого в системе при

стандарта координатно-временного использовании

частоты GPS-технологий

Розглянуто основні питання формування системи координатно-часового забезпечення в Україні. За еталонне джерело сигналу пропонується використовувати рубідієвий стандарт частоти. Приведено результати його дослідження з системою GPS.

Повышение требований широкого круга разнородных потребителей к точности, надежности, доста-
точности и глобальности координатно-временного
обеспечения обусловило активное развитие как ча-
стотно-временных систем, так и радионавигацион-
ных систем на их основе. Это оказало существенное
влияние не только на собственно навигацию, но и на ряд смежных областей: геологоразведка, земле-
устройство, управление транспортными системами,
включая судовождение по фарватерам морей и рек,
экологию и т. д.

Решение практических всех проблем дальнейшего
развития средств координатно-временного обес-
печения наряду с использованием специфических ап-
паратных и программных средств, связанных, в
основном, с совершенствованием аппаратуры по-
требителей, предусматривает в том или ином виде
объединение в единую координатно-временную си-
стему различных систем как частотно-временных,
так и радионавигационных.

Различные подходы к этой области могут быть
реализованы на основе интегрирования и синтези-
рования различных систем, обобщая которые мож-
но предложить вариант формирования интеграль-

ной координатно-временной системы (ИКВС),
структурная схема которой представлена на рис. 1.

Украина располагает Государственным первич-
ным эталоном единицы времени и частоты
(ГПЭВЧ, ХГНИИМ, г. Харьков) с относительной
погрешностью хранения единиц времени и частоты
не более $\pm 2 \cdot 10^{-14}$, что соответствует характеристи-
кам лучших зарубежных эталонов. Передача раз-
меров единиц времени и частоты, и шкалы времени
от Государственного эталона потребителям в насто-
ящее время осуществляется как непосредственно
рабочим эталонам, так и с применением каналов
телевидения. Как уже указывалось, задача постро-
ения системы мониторинга, предназначенный для
формирования соответствующих поправок на эта-
лонные сигналы частоты и времени (ЭСЧВ), пере-
даваемые зарубежными радиостанциями, включая
космические радионавигационные системы (КНС)
GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия), реализуется
комплексом аппаратуры (рис. 1). Последнее осо-
бенно важно, так как применение КНС для реше-
ния задач координатно-временного обеспечения по-
потребителей находит все более широкое использова-
ние [1, 4—6]. Контроль качества (мониторинг)

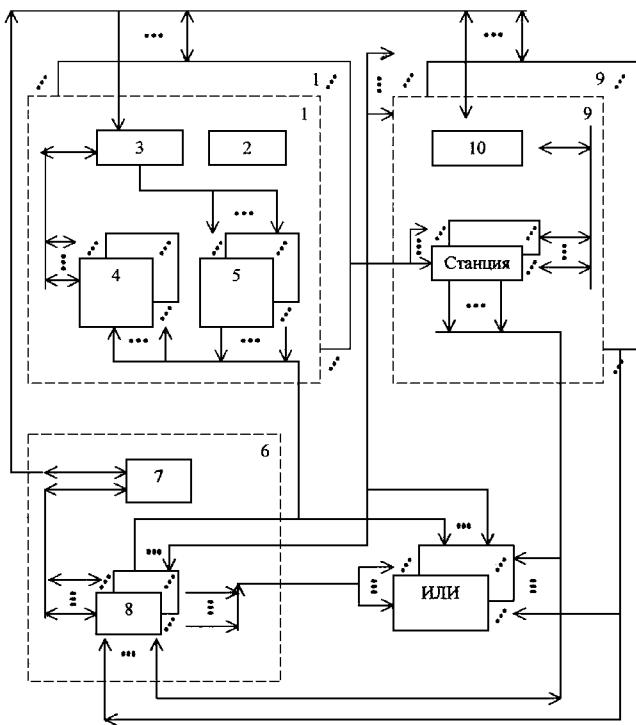


Рис. 1. Структура интегральной координатно-временной системы: 1 — спутниковые радионавигационные системы (СРНС), 2 — системный эталон времени и частоты (СЭВЧ), 3 — центр управления спутниковыми системами (ЦУСС), 4 — контрольный пункт (КП), 5 — навигационные сигналы (НС), 6 — подсистема формирования контрольно-корректирующей информации (ПФККИ), 7 — центр управления подсистемы синхронизации, 8 — контрольно-корректирующие станции, 9 — наземные телевизионные станции передачи ЭСЧВ, 10 — центр управления наземными станциями

радионавигационного поля, создаваемого КНС, должен осуществляться непрерывно специализированным радиотехническим комплексом, оборудованным аппаратурой метрологической аттестации с соответствующим программным обеспечением. Цель такого контроля качества навигационного поля — дать реальную объективную и оперативную информацию потребителям про возможность использования тех или иных навигационных спутников, телевизионных и других сигналов КНС в целом.

Концептуально формирование системы мониторинга основывается на синхронизации шкал времени (ШВ) региональных контрольно-корректирующих станций (ККС) относительно ШВ ГПЭВЧ. При этом должна быть предусмотрена передача потребителям текущего рассогласования ШВ ГПЭВЧ и системного эталона источника координатно-временных сигналов (СЭВЧ).

При реализации программно-математического

обеспечения (ПМО) в него входит также программа определения координат пункта (ОКП), которые формируются путем усреднения отсчетов трехмерных координат пункта, получаемых с выхода аппаратуры приема (АП), его высокоточных геодезических координат, что позволяет, во-первых, размещать пункты ИКВС на позициях, не имеющих высокоточной привязки, во-вторых — поддерживать оперативное перемещение пунктов. При этом время, затрачиваемое на определение координат пункта с погрешностью 0.5—2 м, в зависимости от характеристик используемой АП составит от 1 до 6 ч от момента начала навигационно-временного определения (НВО) по сигналам спутниковой радионавигационной системы (СРНС).

Точностные и временные параметры систем (процедур) синхронизации ШВ и привязки координат были проанализированы для ряда приборов (эталонных источников колебаний), включая случай использования в качестве опорного источника (ОИ) рубидиевого стандарта частоты и времени со следующими точностными характеристиками [3]: нестабильность частоты, которая характеризуется средней квадратичной относительной двувыборочной дисперсией за 10 с ($\sigma \leq 3 \cdot 10^{-12}$); неточность установки номинального значения частоты ($\Delta f \leq 3 \cdot 10^{-12}$); скорость изменения частоты за сутки (дрейф) ($f' \leq 2 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1}$).

Проведенные расчеты показали, что при указанных характеристиках ОИ и погрешности однократного 10 с отсчета временной поправки на выходе АП ≈ 40 — 50 нс, обеспечивается поддержание синхронизации ШВ пункта с ШВ системного эталона времени и частоты (СЭВЧ) структуры СРНС с погрешностью 10—15 нс. При этом погрешность синхронизации ШВ пунктов, разнесенных на расстояние 1000 км, менее 5—7 нс.

Такими точностными характеристиками, отвечающими требованиям ОИ, обладает рубидиевый стандарт частоты и времени [3], созданный в ХГНИИМ.

Структурная схема и принцип работы рубидиевого стандарта частоты и времени, созданного нами, достаточно подробно рассмотрена в работе [3]. Следует только отметить, что существенное улучшение точностных характеристик этого прибора по сравнению с аналогами получено за счет применения новых методов и средств как в электронной, так и в физической части прибора. Основные точностные характеристики прибора, полученные по результатам многочисленных групп измерений двух образцов, представлены в табл. 1.

Предусмотрена возможность использования этого прибора с приемником (АП) GPS.

Таблица 1. Характеристики рубидиевого стандарта частоты ХГНИИМ

№ п/п	Основные характеристики	Значения характеристик	
		за 1 с	за 10 с
1	Среднее квадратичное относительное двувыборочное отклонение частоты, не более:	$8 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$
	за 100 с	$7.5 \cdot 10^{-13}$	
	за 1000 с	$6 \cdot 10^{-13}$	
	за 1 сут	$1 \cdot 10^{-13}$	
	за 10 сут		
2	Среднее относительное изменение частоты за месяц, не более		$\leq 2 \cdot 10^{-12}$
3	Габаритные размеры, мм $400 \times 140 \times 380$		
4	Масса, кг		12

Таблица 2. Результаты сличений АП SVeeSix-CM3

№ п/п	Характеристика	Время усреднения		Примечание
		1 сут	10 сут	
1	Среднее квадратичное отклонение частоты, 10^{-12}	0.46 0.55	0.13 0.14	При сличении с рубидиевым стандартом При сличении с ГПЭВЧУ
2	Линейный уход частоты, 10^{-12}	0.04 0.04	0.04 0.04	При сличении с рубидиевым стандартом При сличении с ГПЭВЧУ



Рис. 2. Структурная схема АП SVeeSix-CM3

Аппаратуру приема сигналов системы GPS выпускают ряд фирм: «3S Navigation», «Trimble» (США), РНИИ КП, «Котлин», (Россия), «Орион-Навигация» (Украина) и др. Аппаратура этих производителей формирует на выходе импульсы с частотой следования 1 Гц синхронно с временной шкалой UTC (Universal Time Coordinated). В ХГНИИМ проводятся исследования, направленные на повышение точности методик сличения шкал времени стандартов частоты и времени для обеспечения единства измерений этих величин. По соображениям эффективности и стоимости оборудования для проведения исследований была выбрана АП SVeeSix-CM3 производства фирмы «Trimble».

Приемное шестиканальное устройство SVeeSix-CM3 позволяет получать на выходе импульсы частотой 1 Гц, длительностью 1 мкс и передним фронтом длительностью не более 20 нс, следующие синхронно со шкалой времени UTC. Структурная схема приемного устройства SVeeSix-CM3 пред-

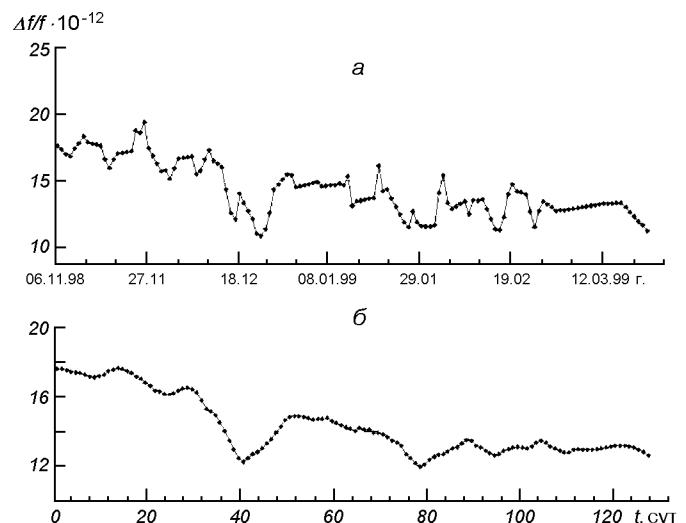


Рис. 3. Результаты сличений рубидиевого стандарта с АП SVeeSix-CM3 с усреднением: а — за 1 сут, б — за 10 сут

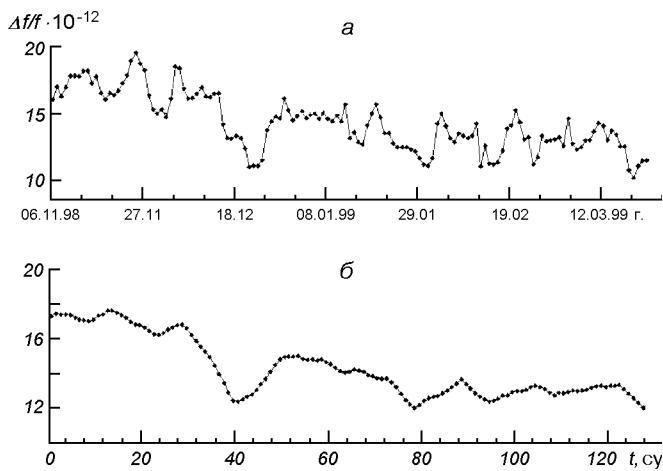


Рис. 4. Результаты долговременных сличений АП SVeeSix-CM3 с водородным стандартом ГПЭВЧУ с усреднением: *а* — за 1 сут, *б* — за 10 сут

ставлена на рис. 2.

Результаты долговременных сличений созданного прибора с GPS, усредненные за 1 сут и 10 сут, представлены на рис. 3.

Результаты сличений прибора с водородным стандартом (Н), входящим в состав ГПЭВЧ Украины, представлены на рис. 4 соответственно с усреднением за сутки и за 10 сут, и в табл. 2, в которой также представлены усредненные данные экспериментальных исследований.

На рис. 5, *а* представлены результаты сличений шкалы водородного стандарта частоты ГПЭВЧУ со шкалой времени PNC GPS с использованием радионавигационного геодезического приемника «Trimble 4000», а на рис. 5, *б* — с применением АП SVeeSix-CM3. Сравнение результатов сличений представлено в табл. 3.

Следует отметить, что сличение с применением АП «Trimble 4000» производилось круглосуточно с усреднением за сутки, а сличение с применением SVeeSix-CM3 примерно 1 ч в сутки, т. е. время и массив сличений отличаются в 12–18 раз. Поэтому следует ожидать улучшения точностных характеристик сличений с применением SVeeSix-CM3 при проведении сличений и усреднении за 24 ч.

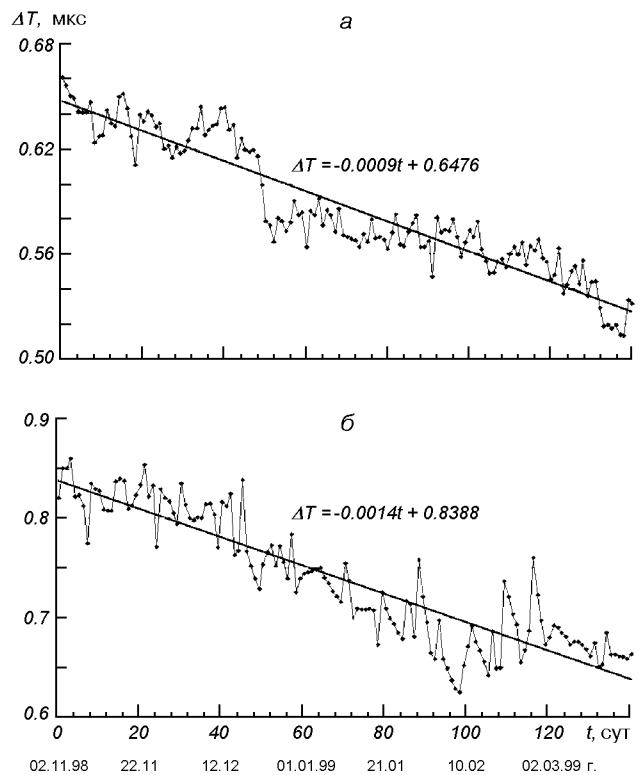


Рис. 5. Результаты сличений водородного стандарта ГПЭВЧУ с PNC GPS с использованием: *а* — АП «Trimble 4000», *б* — SVeeSix-CM3

Принимая во внимание результаты, приведенные в табл. 3, можно сделать вывод о пригодности приемника SVeeSix-CM3 для сличения шкал стандартов частоты и контроля их метрологических характеристик.

В дальнейшем были отработаны методики таких измерений. На рис. 6 представлена структурная схема установки для проведения процесса сличений.

Частотомеры ЧЗ-64/1 работают в режиме измерения интервалов времени, измеряя расхождение шкал соответственно GPS и водородного стандарта ГПЭВЧУ, рубидиевого стандарта и GPS, рубидиевого стандарта и водородного стандарта ГПЭВЧУ.

Таблица 3. Результаты сличений, проведенных с помощью АП GPS разных типов

Наименование характеристики	Характеристики приемного устройства Trimble 4000		Характеристики приемного устройства SVeeSix-CM3	
	при усреднении за сутки	при усреднении за 5 сут	при усреднении за 1 ч в сутки	при усреднении за 5 сут
Среднее квадратичное изменение шкалы относительно линии регрессии, нс	13	11	27	20
Стоимость приемного устройства, USD	4000		400	

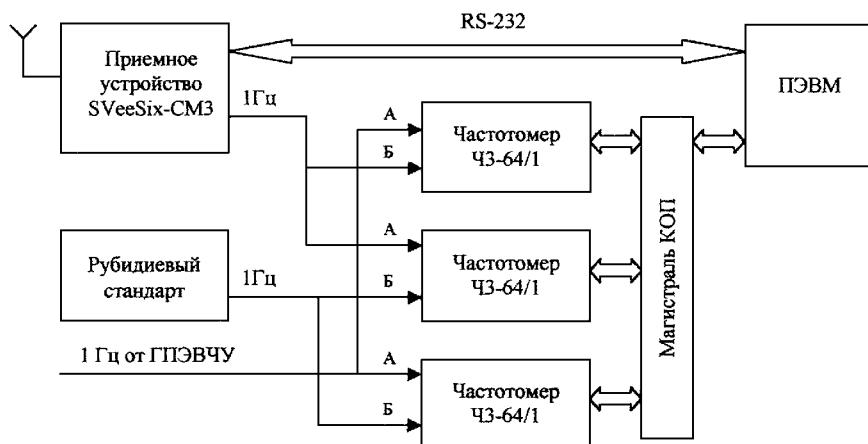


Рис. 6. Структурная схема установки для проведения сличений

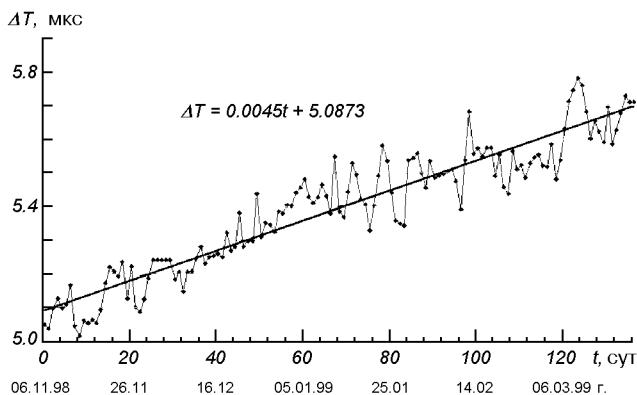


Рис. 7. Разность результатов сличений с помощью СРНС GPS и результатов непосредственных сличений

Таким образом, имеется возможность сопоставить результаты сличений стандартов частоты как с использованием СРНС GPS, так и непосредственно.

Накопление и обработка измерительной информации происходит в ПЭВМ, к которой подключаются частотометры при помощи интерфейса КОП. ПЭВМ также осуществляет управление приемным устройством SVeeSix-CM3, связь с которым поддерживается при помощи стандартного интерфейса RS-232.

Проведены сличения шкал рубидиевого стандарта и водородного стандарта ГПЭВЧУ. На рис. 7 изображен график разности результатов сличений с помощью СРНС GPS и результатов непосредственных сличений за период с 06.11.98 г. по 22.03.99 г.

При отключении селективного доступа погрешность сличения сигналов GPS с частотой (время-



Рис. 8. Схема формирования физической групповой шкалы

Таблица 4. Значения характеристик рубидиевого стандарта с GPS при включении и отключении селективного доступа

Наименование характеристики	Селективный доступ включен		Селективный доступ выключен	
	за сутки	за 10 сут	за сутки	за 10 сут
Среднее квадратичное двувыворочное отклонение частоты, 10^{-12}	5.5	1.4	1.7	0.23

нем) хранителей уменьшается. В табл. 4 приведены характеристики массивов наблюдений относительного отклонения частоты рубидиевого стандарта от частоты GPS. То есть при отключении селективного доступа погрешность сличения стандартов (хранителей частоты и времени) существенно уменьшается.

В качестве СЭВЧ в рассмотренной структуре (рис. 1) применяется ГПЭВЧУ, однако каждый из элементов должен иметь свой ОИ, к точностным характеристикам которого предъявляются довольно высокие требования. Улучшение точностных ха-

Таблица 5. Результаты исследования системы формирования групповой шкалы при использовании четырех водородных стандартов

Способ формирования шкалы	Среднее квадратичное двубыборочное отклонение частоты за сутки, 10^{-15}	Линейный уход частоты за сутки, 10^{-15}
Физическая шкала	21	2.8
Режим калибровки	5.2	0.6

Таблица 6. Результаты исследования системы формирования групповой частоты при использовании двух рубидиевых стандартов

Время измерения	Стандарт 1, 10^{-12}	Стандарт 2, 10^{-12}	Групповая частота, 10^{-12}
1 с	9.6	8.4	7.0
10 с	1.8	4.9	4.0
100 с	1.5	1.4	6.8

теристик возможно при реализации группового эталона.

Предлагается способ синтеза физической шкалы времени, формируемой по суммарной частоте выходных сигналов стандартов — элементам группового эталона. Схема устройства формирования шкалы, реализующего этот способ, изображена на рис. 8.

Сигнал стандартов частоты — элементов группового эталона через блок входных усилителей подается на блок суммирования частот, осуществляющий аналоговое усреднение частот. Сигналом этого блока осуществляется синхронизация блока формирования шкалы, где формируется сигнал, содержащий информацию о физической групповой шкале.

Результаты исследования системы формирования групповой шкалы при использовании четырех водородных стандартов частоты представлена в табл. 5. Результаты исследования системы формирования групповой частоты при использовании двух рубидиевых стандартов представлены в табл. 6.

Результаты, изложенные в настоящей статье, могут служить основой создания системы координатно-временного обеспечения в Украине.

1. Аргунов А. Д. и др. Формирование и применение интегрального радионавигационного поля // «Навігація-98»: Сб. тр. Второї Міжнарод. конф. — 1997.—Т. 2.—С. 336—353.
2. Белянський М. Ф. та ін. Система контролю навігаційного поля // Український метрологічний журн.—1998.—Вип. 2.—С. 29—32.
3. Клейман А. С. и др. Стандарт частоты и времени рубидиевый: создание, исследование и применение // Український метрологічний журнал.—1998.—Вип. 1—4.
4. Клейман А. С. и др. О метрологическом обеспечении измерений, осуществляемых с применением глобальных радионавигационных систем // Український метрологічний журнал.—1999.—Вип. 4.—С. 14—16.
5. Салищев В. А. и др. Станция мониторинга радионавигационных полей систем ГЛОНАСС-СР8 и определения дифференциальных поправок // Радиотехника.—1996.—№ 1.—С. 98—93.
6. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / Под ред. В. С. Шебшаевича. — М.: Радио и связь, 1993.—408 с.

APPLYING OF RUBIDIUM STANDARD OF FREQUENCY AND TIME IN COORDINATE-TIME ENSURING SYSTEM USING GPS TECHNOLOGY

O. S. Kleiman, A. I. Levenberg, O. V. Soloviov, V. S. Soloviov, V. E. Rodionov, S. A. Talamanov, B. I. Makarenko, V. H. Roman'ko, P. O. Kravchenko, T. O. Usenko

The main problems of forming of the coordinate and time system ensuring in the Ukraine are discussed. The rubidium frequency standard is suggested to use as the reference signal source. The results of its investigation by GPS are given below.

УДК 621.396.2:521.6:529.78

**Б. И. Макаренко¹, В. Ф. Кулишенко¹, А. Ф. Петров¹,
К. Ф. Волох², Е. Т. Жуков³**

¹АТ Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

²Національне космічне агентство України, Київ

³Інститут прикладної астрономії РАН, Санкт-Петербург

Система синхронизации и единого времени наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами Украины

Приводятся загальні принципи побудови і функціонування системи синхронізації і единого часу наземного автоматизованого комплексу управління космічними апаратами України. В основі використовуються глобальні супутникові радіонавігаційні системи, вона інтегрована в Державну службу единого часу і еталонних частот України. Подані основні вимоги до системи, апаратури пунктів синхронізації і единого часу.

ВВЕДЕНИЕ

Открытый доступ к временной информации спутниковых радионавигационных систем, а также ее прецизионные характеристики, позволяют качественно решать задачи частотно-временного обеспечения различных систем и комплексов. Для их решения в Украине создается Государственная служба единого времени и эталонных частот [1, 2], имеются отдельные технические средства единого времени и эталонных частот в учреждениях Министерства обороны, Национального космического агентства, Академии наук, связи, энергетики, транспорта, которые в своем большинстве морально и физически устарели, выработали технический ресурс и не позволяют обеспечить на требуемом уровне решение перспективных задач обороны, промышленности, фундаментальной и прикладной науки, метрологии, в том числе задач, предусмотренных космической программой, а также программами по навигационному (координатно-временному) обеспечению Украины.

Одним из функциональных элементов, входящих в наземный автоматизированный комплекс управления космическими аппаратами (НАКУ КА) Украины, является система синхронизации и единого времени (ССЕВ). Она предназначена для частотно-временного обеспечения управления, т. е. привязки

к единой шкале времени данных траекторно-телефизионной, научной, дистанционного зондирования, сейсмической и другой информации, а также синхронизации наземных космических средств отдельных научно-испытательных комплексов (ОНИК), преобразованных в центры (управления полетами — ЦУП, приема научной информации — ЦПНИ, приема и обработки специальной информации и контроля навигационного поля — ЦПОСИ-иКНП, контроля космического пространства — ЦККП) и технических средств главного центра спецконтроля (ГЦСК) Национального центра управления и испытаний космических средств (НЦУ-ИКС)). Потребителями сигналов единого времени и эталонных частот являются радиотехнические и квантово-оптические системы траекторных измерений, командно-измерительные системы, радиотелеметрические системы, системы обработки измерительной информации, радиотехнические, телевизионные и сейсмические комплексы. Измерительная информация, получаемая средствами центров, должна быть с необходимой точностью привязана к временной шкале для осуществления ее совместной обработки. Необходимо создание системы синхронизации и единого времени НАКУ КА, ССЕВ комплексов навигационного обеспечения, ССЕВ МОУ и интегрирование их в Государственную службу единого времени и эталонных частот (ГСВЧ), а также

необходимо создание аппаратно-программных средств потребителей системы единого времени и эталонных частот.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ СИНХРОНИЗАЦИИ И ЕДИНОГО ВРЕМЕНИ НАКУ КА

Система синхронизации и единого времени (ССЕВ) должна обеспечивать:

- получение потребителями сигналов точного времени и эталонных частот;
- фиксирование моментов событий в процессе функционирования средств НЦУИКС;
- осуществление взаимной привязки по времени измерительной информации при ее обработке и синхронизации шкал времени информационно-измерительных систем различного назначения;
- существующих и перспективных потребителей НЦУИКС сигналами требуемых точностей на период эксплуатации ССЕВ;
- достоверность используемой потребителями частотно-временной информации и их оперативное оповещение о выходе ее параметров за пределы установленных допусков;
- надежность функционирования во всех условиях.

При этом должны быть предусмотрены:

- помехоустойчивость и защищенность от искусственных помех;
- электромагнитная совместимость с другими используемыми техническими средствами; защищенность от несанкционированного использования;
- совместимость с существующими системами СЕВ.

Анализ принципов построения и современного уровня сложных технических систем, требующих высокоточных траекторных, телеметрических и сигнальных измерений, показывает, что должны быть обеспечены следующие основные технические характеристики ССЕВ:

относительная погрешность частоты

- | | |
|---|---|
| опорных генераторов — | от $3 \cdot 10^{-11}$ до $3 \cdot 10^{-13}$; |
| нестабильность частоты опорных генераторов на интервалах времени измерений от 1 с до 1 ч — | от 10^{-8} до 10^{-13} ; |
| погрешность синхронизации шкал времени измерительных систем (привязки к единой шкале времени) — | от 2 мс до 0.005 мкс. |

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ССЕВ

При выборе направлений развития методов и средств время-частотного обеспечения важным является сравнительная оценка их состояния за рубежом. Мировой уровень в этой области определяют в основном США и Россия. Отдельные достижения имеются во Франции, Японии, Германии и других развитых странах.

В Российской Федерации Государственная система единого времени и эталонных частот (ГСЕВЭЧ) предназначена для обеспечения сигналами точного времени и эталонными частотами комплексов и систем оборонного, народно-хозяйственного и научного назначения, а также частотно-временного метрологического обеспечения Вооруженных сил и народного хозяйства. В нее входят эталонная база, средства передачи сигналов времени и частоты, средства контроля и управления, включающие автоматизированный центр управления системой (АЦУС), контрольно-управляющие пункты и автоматизированную сеть синхронизации и передачи данных, приемные пункты сигналов времени и частоты. Передача сигналов времени через навигационные и связные КА, сигналов времени и эталонных частот через ДВ-радионавигационную систему и по телевидению, а также передача эталонных частот через СДВ-радиостанции ведется совместно (одновременно) с передачей основной информации.

Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) Госстандарта РФ отвечает за хранение и передачу размеров единиц времени и частоты, а также астрономическое определение времени. Эти задачи решаются с помощью соответствующих эталонов (Государственного первичного эталона единиц времени и частоты (ГЭВЧ), эталона-копии ГЭВЧ и вторичных эталонов), специальными радиостанциями для передачи эталонных сигналов частоты и времени (ЭСЧВ) КВ (с погрешностями сравнения шкал времени до 0.3 мс и частот до $1 \cdot 10^{-8}$) и ДВ (с погрешностями сравнения шкал времени порядка 50 мкс и частот до $5 \cdot 10^{-12}$ за сутки) и средствами передачи ЭСЧВ в шестой строке полного телевизионного сигнала через технический телевизионный центр в Останкино (Москва) с ретрансляцией их по каналам ОРТ (с погрешностями синхронизации шкал времени до 0.5 мкс). ГЭВЧ использует для воспроизведения единицы времени и частоты цезиевый репер и для хранения ее — 10 водородных стандартов частоты. Он имеет неисключенную систематическую погрешность на уровне $5 \cdot 10^{-14}$ и

хранит атомную шкалу времени ТА(SU) и шкалу UTC(SU) с нестабильностью порядка $(2...5) \cdot 10^{-15}$. Эталон-копия и вторичные эталоны имеют погрешность воспроизведения единиц времени и частоты на уровне $(2...5) \cdot 10^{-14}$. Их шкалы времени сравниваются со шкалой времени ГЭВЧ по сигналам ГЛОНАСС в дифференциальном режиме с помощью приемника А-724М-01 с погрешностью не более 20 нс.

Совокупность объектов и средств Минобороны США, осуществляющих частотно-временное обеспечение, можно считать в определенной мере аналогом части ГСЕВЭЧ. При этом ведущая и контрольно-управляющая функция USNO (Военно-морской обсерватории США) аналогична роли АЦУС в ГСЕВЭЧ. В качестве аналога ГСВЧ можно полагать совокупность средств и объектов, функционирующих в интересах NIST (Национального института стандартов и технологии США) и осуществляющих хранение и передачу размеров единиц времени и частоты. В США четко разграничиваются функции метрологии времени и частоты, за которые отвечает NIST, и функции обеспечения астрономическими данными и точным временем для навигации, за которые отвечает USNO. В USNO созданы и используются мастер-часы, включающие в себя 10 водородных мазеров (среди них VLG-11 с суточной нестабильностью порядка $(3...5) \cdot 10^{-15}$) и около 50 цезиевых стандартов частоты (среди них HP5071A с атомно-лучевой трубкой 001 с нестабильностью порядка $2 \cdot 10^{-14}$). Первичный цезиевый стандарт частоты США sup на пучке атомов с лазерной накачкой NIST-7 характеризуется точностью $(5...7) \cdot 10^{-15}$. Наименьшую неучтенную погрешность единицы частоты и атомной секунды $2.2 \cdot 10^{-15}$ имеет первичный цезиевый стандарт частоты на «фонтанном эффекте» с лазерным охлаждением, созданный во Франции.

USNO контролирует средства передачи сигналов точного времени и эталонных частот Минобороны США, к которым относятся 7 радиостанций СДВ-связи ВМС (передача эталонных частот с погрешностью $1 \cdot 10^{-11}$ на расстояние до 10 000 км), 8 радиостанций глобальной сети радионавигационной системы (РНС) СДВ — OMEGA (обеспечение привязки шкал времени с погрешностью 1...3 мкс и погрешности частоты до $1 \cdot 10^{-12}$) и 12 цепочек радиостанций РНС ДВ — Loran-C (обеспечение привязки шкал времени с погрешностью 0.1 мкс по фазовым и 2 мкс по импульсным измерениям и погрешности частоты до $1 \cdot 10^{-12}$), КА спутниковых радионавигационных систем низкоорбитальной TRANSIT и среднеорбитальной GPS. Часы главной управляющей станции GPS (2 водородных мазера и

12 цезиевых стандартов частоты) синхронизированы по часам USNO с погрешностью порядка 1 нс через дуплексный канал геостационарного КА связи и с погрешностью порядка 5 нс дифференциальным методом по сигналам СРНС.

NIST контролирует передачу сигналов времени и эталонных частот через специализированные радиостанции КВ и ДВ, через два геостационарных метеорологических КА и через телекоммуникационные центры (с погрешностью до 10 нс в зоне действия телекоммуникационного центра).

Современная высокая точность передач сигналов времени и частоты и перспективы в этой области в США связаны с GPS.

На основе вышесказанного представляется целесообразным использовать в системе синхронизации и единого времени (ССЕВ) НАКУ КА Украины командный метод синхронизации с включением в контур управления основных пунктов синхронизации и единого времени (ПСЕВ). Тем самым будут реализованы контроль положения ШВ этих пунктов и их синхронизация относительно системной шкалы времени, формируемой в пункте контроля и управления ССЕВ НАКУ КА Украины. Включение в контур реализуется путем организации информационного обмена между контрольно-управляющим пунктом (КУП) и приемными пунктами. При этом осуществляется передача в КУП данных о привязке ШВ приемных пунктов по сигналам различных передающих средств, обработка этих данных с данными контрольной привязки системной ШВ КУП по этим же передающим средствам. По результатам этой обработки формируется информация о возможном временном положении шкал времени пунктов и их положении относительно единой системной ШВ КУП, а также производится формирование команд на синхронизацию ШВ приемных пунктов. Это дает возможность использовать для синхронизации ШВ пунктов СЕВ передающие средства, не входящие в контур управления СЕВ НАКУ КА Украины, т. е. передающие средства, находящиеся вне ее территории.

Контрольно-управляющий пункт должен быть создан на первом этапе создания ССЕВ. Помимо него в состав подсистемы контроля и управления должны входить линии связи и передачи данных, реализующие информационный обмен между КУП и ПСЕВ. Наиболее приемлемой технически и экономически является реализация в кратчайшее время КУП на базе одного из существующих приемных пунктов. При этом предпочтительным является выбор г. Евпатории, где есть два приемных пункта, оснащенных комплектами аппаратуры «Кипарис», и рабочий этalon времени и частоты на основе двух водородных стандартов частоты из

состава наземного радиотехнического комплекса «Квант-Д». Разработка подсистемы контроля и управления на этой основе должна включать в себя вопросы информационного обмена КУП с ПСЕВ и программно-алгоритмического обеспечения контроля и управления ССЕВ НАКУ КА, создания комплекса средств контроля временного поля, включая транспортируемые квантовые часы, и информационно-вычислительного комплекса. Создание собственных передающих средств ССЕВ НАКУ КА Украины наиболее реально в ближайшее время на основе модернизации радиостанции РНС-Е(Б) в г. Симферополе, заключающейся в дооснащении ее аппаратурой СЕВ собственной разработки либо комплексом 17Н820 производства России.

Создание специализированных КВ и ДВ радиостанций для передачи сигналов времени, аналогичных тем, которые имеются в ГСВЧ России, представляется дорогостоящим и неперспективным. Для этой цели считается перспективным передача сигналов времени через геостационарные КА-ретрансляторы. В США это осуществляется через геостационарные метеорологические спутники GOES, которые в настоящее время ретранслируют на частоте 469 МГц временной код ведущей КВ радиостанции WWV службы времени NIST. Точность привязки ШВ достигает 10 мкс. Таким образом, метод передачи сигналов времени через геостационарные КА-ретрансляторы является перспективным и может быть реализован при запуске КА «Либідь». Реально обеспечивается точность сличения ШВ дуплексным методом через геостационарные КА-ретрансляторы не хуже 0.1 мкс, потенциально — единицы наносекунд. Наличие доступа к спутниковому каналу связи позволяет рекомендовать к использованию дуплексный метод спутниковой синхронизации ШВ.

Наибольшее внимание при разработке средств ССЕВ НАКУ КА Украины следует уделить на наш взгляд радиометеорным средствам синхронизации и передачи данных. Эти средства позволяют комплексно решить вопросы как синхронизации, так и управления в системе, в наибольшей степени удовлетворяют требованиям и специфике функционирования ССЕВ. Проведенные в Харьковском государственном техническом университете радиоэлектроники (ХГТУРЭ) разработки этих средств, имеющиеся опытные образцы и опыт их применения позволяют ориентироваться на них как на основные собственные средства высокоточной синхронизации и передачи данных с погрешностью до 5 нс в ССЕВ НАКУ КА Украины с зоной действия до 2000 км. Применение метеорных радиолиний передачи данных позволит отказаться от аренды линии связи и

обеспечит реализацию собственного канала передачи данных и управления, удовлетворяющего в большей степени требованиям помехозащищенности, скрытности, надежности и устойчивости функционирования.

На территории Украины имеется широкая разветвленая сеть телевизионных станций (центров) и ретрансляционных линий передач, поэтому метод передачи ЭСЧВ по ТВ каналам признан Госстандартом Украины приоритетным [2] и принят к реализации в 2001 г. Основные характеристики создаваемой системы приведены в Приложении А.

Исходя из выше изложенного, предлагаем следующую функциональную структуру ССЕВ НАКУ КА Украины (рисунок).

Для привязки ШВ приемных пунктов к единой ШВ контрольно-управляющего пункта ССЕВ НАКУ КА Украины используется комплекс существующих средств передачи сигналов времени РФ и СРНС GPS США, а также собственные создаваемые средства передачи сигналов и синхронизации хранителей времени.

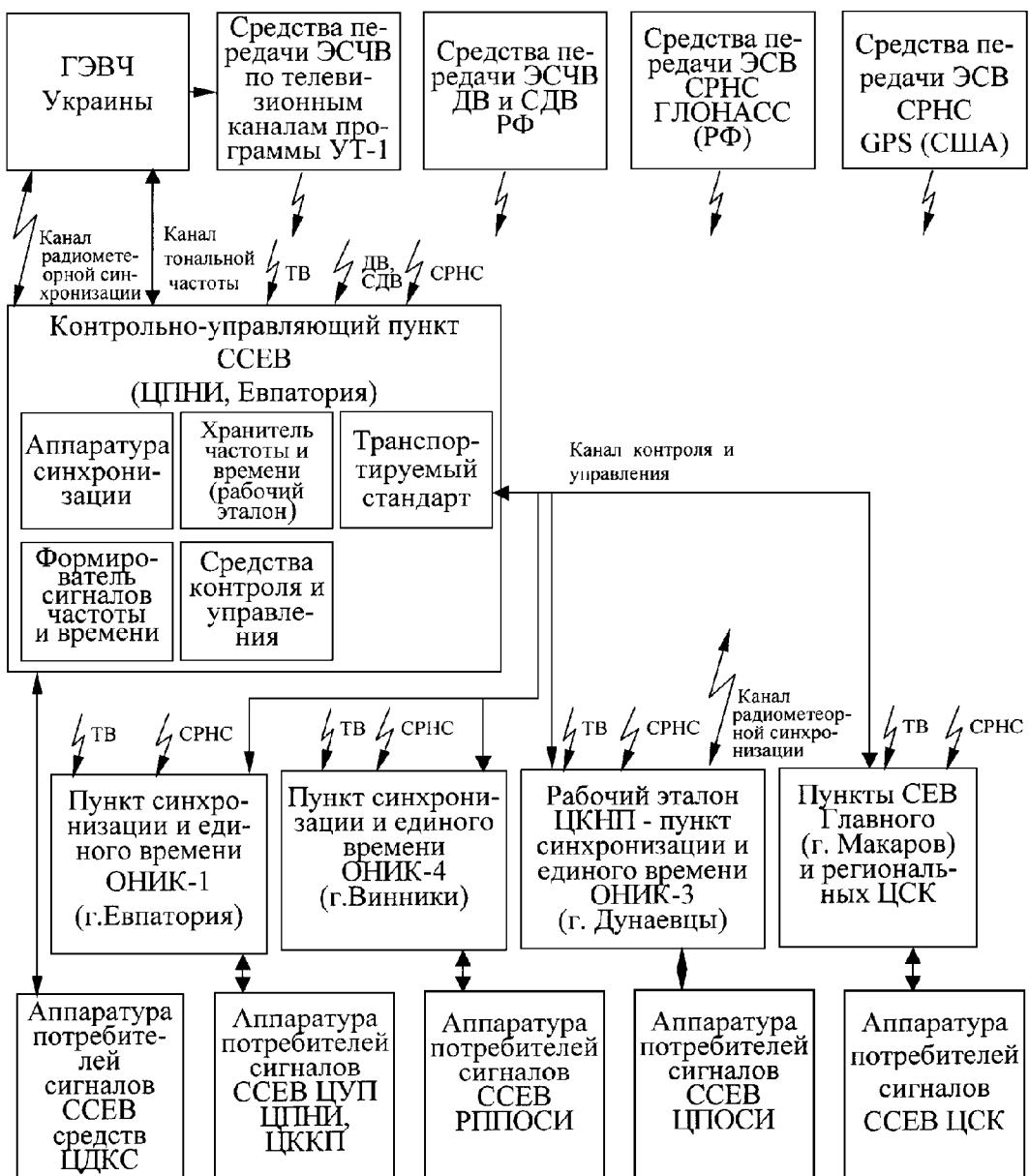
Функционально используются следующие средства передачи РФ:

- ДВ-радиостанции РНС-Е(А) и РНС-Е(Д) — ведущая и ведомые станции Европейской цепочки ИФ РНС «Чайка», расположенные в районе г. Карабев и г. Сызрань, излучающие навигационные пачки импульсов на несущей частоте 100 кГц;
- СДВ-радиостанции связи, расположенные в гг. Бишкек, Архангельск, Нижний Новгород, Хабаровск, Краснодар, Молодечно, излучающие в режиме связи сигнал эталонной частоты 25 кГц и в сеансном режиме по определенной программе сигналы для привязки ШВ;
- ДВ-радиостанция РБУ — ведущая радиостанция ГЭВЧ России, расположенная под Москвой, излучающая эталонные сигналы времени и частоты на несущей 66.6 кГц;
- КВ-радиостанция РВМ, расположенная под Москвой и излучающая по определенной программе ЭСЧВ на несущих частотах 4.996, 9.996, 14.996 МГц;
- ТВ-каналы синхронизации, по которым передаются ЭСЧВ в составе полного ТВ-сигнала, формируемые на ТТЦ в г. Москве;
- спутники СРНС ГЛОНАСС.

Кроме того, функционально используются и спутники СРНС GPS (США).

Последние средства обеспечивают наиболее высокую из указанных выше средств точность привязки ШВ и имеют глобальную зону действия [3].

Метрологический контроль характеристик пере-



Структура системы синхронизации и единого времени НАКУ КА Украины

даваемых сигналов времени и частоты могут осуществлять пункты ГСВЧ Украины относительно существующих ГЭВЧ (в Харьковском НИИ метрологии) и вторичных эталонов времени и частоты, находящихся в УкрЦСМ (г. Киев), НИИ «Система» (г. Ужгород). Их взаимная синхронизация относительно первичных эталонов времени и частоты Украины и России осуществляется с помощью существующих метеорных радиолиний синхронизации. Оперативный контроль передаваемых сигналов времени и частоты ведет контрольно-управляю-

щий пункт ССЕВ НАКУ КА Украины. Обмен результатами контроля КУП и пунктов ГСВЧ позволяет определить характеристики КУП относительно первичных и вторичных эталонов.

Контроль и управление положением ШВ относительно единой ШВ КУП осуществляется на основе передачи данных о привязке ШВ приемных пунктов в КУП по системе связи и передачи данных, их обработки и формировании команд управления, передаваемых на ПСЕВ. Кроме того, используются транспортируемый квантовый хранитель времени и

частоты. КУП и каналы передачи данных и команд управления составляют подсистему контроля и управления (ПКУ). КУП должен быть оснащен рабочим эталоном времени и частоты (РЭВЧ), формирующим системную шкалу времени, информационно-вычислительным комплексом и транспортируемыми квантовыми часами. На основе обмена данных по линии связи с АЦУС осуществляется оценка взаимного положения шкал ССЕВ НАКУ КА Украины и ГСЕВЭЧ.

Таким образом, в структуре ССЕВ можно выделить три иерархических уровня:

первый представляет собой эталонную частотно-временную базу, включающую в себя ГЭВЧ, вторичные и рабочие эталоны времени и частоты, синхронизуемые относительно эталонов времени и частоты РФ с помощью метеорных радиолиний синхронизации или с использованием СРНС и других стран — с использованием СРНС;

второй иерархический уровень представляет ныне действующие средства передачи сигналов времени и эталонных частот РФ и США, сигналы которых в настоящее время могут использоваться в Украине для привязки ШВ, а также перспективные создаваемые средства передачи ЭСЧВ: с использованием телевизионных сигналов программы УТ-1 (г. Киев, ДВ-радиостанции РНС-Е(Б) (г. Симферополь), с использованием дуплексных каналов метеорной и спутниковой связи;

третий иерархический уровень образуют средства пользователей системы СЕВ НАКУ КА — пункты синхронизации и единого времени и частотно-временная аппаратура.

В настоящее время центры НЦУИКС оснащены аппаратурой приемных пунктов (ПП) СЕВ 2 класса точности «Кипарис» (разработки конца 1960-х годов), дооснащенных рубидиевыми стандартами частоты («Агат-М», 11Н974 или СЧВ-74) и 4 класса точности — комплексами 17Н723 «Секунда» (разработки начала 1980-х годов). Наземный радиотехнический комплекс «Квант-Д» имеет в своем составе водородные стандарты частоты Ч1-70, Ч1-75 и Ч1-80, а центры спецконтроля — аппаратуру СЕВ (разработки и производства ПО им. С. П. Королева, г. Киев) на основе рубидиевого стандарта Ч1-50, синхронометра кварцевого Ч7-12 и приемного устройства СРНС ГЛОНАСС 1Т130М-01. Указанная аппаратура в основном выработала ресурс, не соответствует современным требованиям и поэтому требует замены на новую, основные характеристики которой приведены в Приложении Б.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ ЭТАЛОННЫХ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕЛЕВИЗИОННОГО СИГНАЛА ПРОГРАММЫ УТ-1

Создаваемая система передачи точных сигналов времени и частоты по каналам национального телевидения обладает следующими техническими характеристиками:

1. В 6-й строке телевизионного сигнала передаются эталонный сигнал частоты — 15 периодов сигнала частотой 1 МГц, эталонный сигнал времени — метка шкалы времени 1 с, код текущего значения времени, дата, поправки к шкале времени и другая информация.

2. Хранитель времени и частоты имеет:
среднее относительное изменение частоты
за 1 сут $3 \cdot 10^{-12}$,
среднее квадратичное относительное отклонение
частоты не более 10^{-11} за 1 с,
 $8 \cdot 10^{-12}$ за 10 с,
 $83 \cdot 10^{-12}$ за 1 сут;

среднее квадратичное относительное отклонение воспроизведения частоты не более 10^{-11} .

3. Относительная погрешность передаваемых эталонных сигналов частоты 1 МГц — не более 10^{-11} за 1000 с, $3 \cdot 10^{-12}$ за 1 сут.

4. Погрешность воспроизведения характерных меток передаваемых эталонных сигналов времени по отношению к шкале национального координированного времени UTC(UA) не более 1 мкс.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АППАРАТУРА ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Основной задачей аппаратуры частотно-временного обеспечения является обеспечение технических средств и комплексов сигналами точного времени и эталонными частотами, определение точного времени свершения событий.

Аппаратура ПСЕВ должна обеспечивать прием образцовых сигналов времени и частоты, передаваемых передающими станциями отечественной и зарубежных систем единого времени и эталонных частот (СЕВ ЭЧ); воспроизведение сигналов высокостабильной частоты 5 МГц; формирование из сигналов этой частоты местной шкалы времени, образцовых сигналов различных частот и кодов времени, привязанных к шкале времени (ШВ) UTC (UA) и поправок к шкале UTC; хранение местной шкалы времени в процессе непрерывной работы; выдачу потребителям образцовых сигналов

и кодов времени, эталонных частот.

Типовая структура пункта СЕВ имеет в своем составе аппаратуру хранения времени, аппаратуру привязки шкал времени и сличения частот, аппаратуру формирования и передачи потребителям сигналов времени и частоты.

Пункты СЕВ могут быть различного класса точности и предлагается комплектовать их на основе базового комплекта ПСЕВ. Комплексность ПСЕВ определяется на основании требований потребителя к нестабильности частот, точности привязки и хранения шкалы времени, видами сигналов частоты и времени. По точностным характеристикам ПСЕВ можно разделить на две категории: с квантовым хранителем времени и кварцевым хранителем времени.

ПСЕВ с квантовым (рубидиевым) хранителем частоты и времени имеет следующие основные технические характеристики:

Относительная нестабильность частоты

за сутки $5 \cdot 10^{-12}$;

Погрешность хранения времени

за сутки 1 мкс;

Период автономной работы при уходе шкалы

времени не более 1 мс 150 сут;

Погрешность привязки шкалы времени:

по СРНС ГЛОНАС/GPS < 1 мкс;

по ТВ-каналу 1 мкс;

по метеорному каналу связи 50 нс;

по ДВ-радиостанции 10 мкс.

ПСЕВ с кварцевым хранителем частоты и времени (например «Гиацинт-М», Э2-128 или ГК62-ТС1) имеет такие же погрешности привязки шкалы времени, как и предыдущий, а также: относительную нестабильность частоты ПСЕВ

за сутки $5 \cdot 10^{-9}/5 \cdot 10^{-10}/5 \cdot 10^{-11}$;

погрешность хранения времени

за сутки 500/50/5 мкс;

период автономной работы при уходе шкалы

времени не более 1 мс/сут 3/30/100.

ПСЕВ непрерывно функционирует в режимах: «Синхронизация» и «Автономный». В режиме «Синхронизация» осуществляется формирование и хранение шкалы времени, прием ЭСЧВ и привязка к ним ШВ (синхронизация часов), контроль сигналов времени и частоты, выдача их требуемым

устройствам, в том числе в ПЭВМ; установка времени производится внешними сигналами синхронизации. В режиме «Автономный», т. е. при отсутствии сигналов синхронизации ТВ и СРНС (эталонных сигналов частоты ЭСЧ или эталонных сигналов времени ЭСВ), осуществляется формирование и хранение шкалы времени (с погрешностями, определяемыми нестабильностью внутреннего опорного генератора или внешнего квантового), установка времени вручную, выдача сигналов времени и частоты требуемым устройствам.

ПСЕВ обеспечивает: прием сигналов телевизионного вещания с ЭСЧВ, сигналов СРНС с ЭСВ и эталонной шкалы времени; выдачу на внешние разъемы сигналов «1 Гц», сигналов синхронизации времени ПЭВМ, цифровой информации, передаваемой СРНС и по ТВ, синусоидальных сигналов частотой 5 МГц, других синхросигналов (например импульсных сигналов частотой 1/60 Гц, 1/300 Гц, смеси 1 Гц + 1/60 Гц + 1/300 Гц и др.).

Питание ПСЕВ осуществляется от однофазной сети переменного тока 220 ± 22 В частотой 50 ± 1 Гц или от источника постоянного тока напряжением 27 ± 3 В с гальванической развязкой.

1. Величко О. Н., Макаренко Б. І., Камінський В. Ю. та ін. Державна служба єдиного часу і еталонних частот — необхідний елемент розвитку наземної космічної інфраструктури України // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 1-2.—С. 7—16.
2. Величко О. М., Сафонов Ю. І., Клейман О. С. та ін. Державна служба єдиного часу і еталонних частот України: структура і основні засади забезпечення країни високоточною частотно-часовою інформацією // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 2/3.—С. 8—11.
3. Шебанов А. А., Рабкин В. С., Горбунов В. И. Синхронизация мер времени и частоты по сигналам спутниковых радионавигационных систем. — М.: Изд-во стандартов, 1992.—128 с.

SYSTEM OF SYNCHRONIZATION AND COMMON TIME FOR GROUND AUTOMATED COMPLEX OF CONTROL BY UKRAINIAN SPACECRAFTS

B. I. Makarenko, V. F. Kulishenko, A. F. Petrov,
K. F. Volokh, E. T. Zhukov

General principles of construction and function of synchronization system and common time of the ground automated complex of Ukrainian spacecrafits control using the global satellite radio-navigation systems and integration this system to the State service of common time and standard frequencies of Ukraine are presented.

УДК 621.396

С. К. Ефимов, А. Г. Нестерович, А. И. Яковченко

АТ Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

Аппаратура спутниковой навигации КА «Січ-1М» и «Микроспутник»

Представлено GPS-приймач для космічної навігації, створений в Науково-дослідному інституті радіотехнічних вимірювань (м. Харків).

В настоящее время использование GPS-приемников на низкоорбитальных космических аппаратах (КА) является обычной практикой. В качестве примера можно привести приемники «Topstar 3000» (фирма «Alcatel», Франция), SGR («Surrey Satellite Technology LTD», Великобритания).

Применение GPS приемников на борту КА позволяет решать следующие задачи.

- **Определение параметров движения (положения и скорости) КА в реальном времени:** данные могут быть использованы как на борту КА, так и на наземной станции слежения, что повышает автономность КА и упрощает слежение за ним.
- **Синхронизация времени:** точность привязки шкалы времени КА ко времени UTC лучше 1 мкс может быть использована для целей телекоммуникации и наблюдения.
- **Использование «сырых» измерений:** принятые GPS-приемником «сырые» измерения (псевдо дальность, доплеровское смещение частоты, фаза) могут быть переданы либо на другой КА (для использования в дифференциальном режиме), либо на наземную станцию слежения. Совместная фильтрация данных наблюдений GPS-приемника и модельного движения КА на основе законов Кеплера позволяет достичь высокой точности определения положения КА на орбите (радиальная составляющая лучше 10 см для одночастотного приемника и 3 см для двухчастотного приемника).

Двухчастотные измерения, в свою очередь, могут быть использованы для мониторинга атмосферы Земли.

- **Определение ориентации КА:** размещение на КА нескольких антенн позволяет определить ориентацию КА в пространстве.

Использование GPS-приемника на борту КА имеет свои особенности, вызванные высокой динамикой его движения и работой в условиях космоса:

- большой диапазон изменения измеряемых параметров, затрудняющий поиск и слежение за сигналами спутниковых радионавигационных систем (СРНС);
- работа в условиях глубокого вакуума, радиации, жестком температурном режиме;
- при выводе на орбиту — работа в условиях перегрузок.

Особенностью обработки измерений, вытекающей из свободного полета КА на орбите, является жесткая связь координат и скорости КА через уравнения движения Кеплера, что позволяет применить фильтрацию Калмана для совместной обработки измерений и модели движения КА. Такая фильтрация значительно повышает точность и надежность навигационных определений.

По заказу НКАУ АО НИИРИ (г. Харьков) ведет разработку аппаратуры спутниковой навигации (АСН), предназначенной для установки на борту космических аппаратов «Січ-1М» и «Микроспутник».

КА «Січ-1М» и «Микроспутник» представляют собой низкоорбитальные спутники с круговой околополярной орбитой (высота орбиты 600 км, наклонение 82.5°), предназначенные для оперативного дистанционного зондирования объектов природной среды.

Основное назначение АСН — определение координат, составляющих вектора скорости и сдвига

часов приемника с целью обеспечения координатно-временной привязки фотоснимков, производимых с борта КА. Кроме того, на данной аппаратуре предполагается провести целый ряд научно-практических экспериментов с целью:

- отработки принципов построения бортовой АСН КА типа «Січ-2М» и «Січ-3М», предназначенный в том числе и для высокоточного определения параметров движения, времени и угловой ориентации КА по сигналам GPS;
- выбора путей создания космического дополнения системы навигационного обеспечения Украины и перспективной гражданской международной спутниковой навигационной системы GNSS-2 на базе низкоорбитальной группировки КА;
- исследования возможности организации контрольной станции космического базирования.

Реализация указанных целей зависит от того, какой уровень точности и надежности координатно-временных определений КА будет достигнут в результате проведения эксперимента.

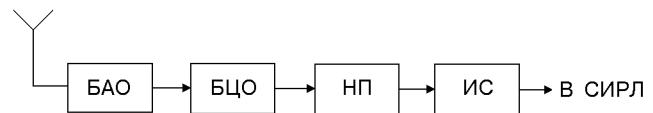
Реализацию эксперимента предполагается проводить по следующей схеме. На борту КА устанавливается АСН, осуществляющая прием и обработку навигационных сигналов. Частично обработанная измерительная информация и результаты бортовых навигационных определений АСН в реальном масштабе времени вместе с телеметрической и другой информацией, формируемой на борту, по специальной информационной радиолинии СИРЛ передаются на наземный пункт приема, обработки и регистрации бортовой информации АСН во время нахождения КА в зоне радиовидимости наземного приемного пункта. Для реализации дифференциального метода навигационных определений на наземном пункте размещается контрольная станция, осуществляющая прием и обработку навигационных сигналов. Зарегистрированная измерительная информация АСН, бортовая телеметрическая информация, а также измерительная информация контрольной станции совместно обрабатываются в режиме послесеансной обработки с целью получения высокоточных параметров движения КА, определения его орбиты и синхронизации (оценки текущего расхождения) шкал времени КА и контрольной станции с привязкой результатов определений к шкале UTC.

В результате эксперимента предполагается установить качество решения задачи синхронизации времени и определения орбиты КА по результатам совместных бортовых и наземных измерений, а также оценить надежность, точность и эксперимен-

тальные характеристики спутниковой аппаратуры космического базирования.

Экспериментальная наземная станция в части аппаратного и программного обеспечения повторяет бортовую АСН. Отличие заключается в программном обеспечении фильтрации параметров, принимаемых АСН, которое реализует узкую полосу фильтра по сравнению с бортовой аппаратурой, где динамика изменения параметров навигационных сигналов примерно на порядок выше, чем на контрольной станции. Кроме того, основная задача контрольной станции заключается в формировании, обработке и регистрации навигационных параметров в сеансе измерений и выполнении наземного контроля целостности СРНС, т. е. выявлении неисправных НКА. Реализация дифференциального режима измерений при таком построении возлагается на программный комплекс послесеансной обработки.

Функциональная схема АСН приведена на рисунке.



Приемник состоит из антенны, блока аналоговой обработки сигналов (БАО), блока цифровой обработки сигналов (БЦО), навигационного процессора (НП) и интерфейса связи (ИС).

Поскольку положение КА стабилизировано на орбите с высокой точностью, в приемнике используется одна антenna для приема сигналов из верхней полуплоскости.

АСН построен на базе семейства микросхем фирмы «Mitel Semiconductors» GP2000 и RISC — процессоре ARM60B.

Данный набор микросхем хорошо зарекомендовал себя в работе, в том числе и на борту космического аппарата. Так, на семействе микросхем этой серии построен SGR (Space GPS Receiver) фирмы SSTL.

АСН содержит 12 каналов слежения за сигналами частоты L1 системы NAVSTAR.

Связь АСН с СИРЛ осуществляется через интерфейс связи (RS232, RS422, RS485, MIL-STD-1553B и др. в зависимости от требований радиолинии передачи навигационных параметров и данных полезной нагрузки).

Технические характеристики АСН

Погрешность определения параметров движения спутников в гринвичской системе координат:

- по координатам X, Y, Z ≤ 100 м;
- по составляющим вектора скорости $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$ ≤ 0.5 м/с;

Предельная погрешность выдачи секундной метки в систему управления спутника (при необходимости) 1 мкс

Темп выдачи навигационной информации	1 с
Диапазон частот	L1 (1575.42 МГц)
Код	C/A
Количество измерительных каналов	12
Энергопотребление	6 Вт
Масса (для микроспутника)	1.2 кг
Габаритные размеры (для микроспутника)	212×100×50 мм

Программное обеспечение хранится в электрически перепрограммируемом запоминающем устройстве. Для реализации режима «горячего старта» в

приемнике установлены часы реального времени и энергонезависимая память. В процессе работы АСН постоянно уточняет параметры орбиты и сохраняет их в энергонезависимой памяти вместе с обновленным альманахом GPS. После перерыва в работе при новом включении АСН рассчитывает положение спутников GPS и производит прогноз положения КА на орбите, что позволяет существенно сузить диапазон поиска сигналов и сократить время первого получения навигационных определений.

Проведено моделирование движения КА «Січ-1М», показавшее работоспособность программного обеспечения в условиях динамики движения КА.

SATELLITE NAVIGATION EQUIPMENT OF «SICH-1M» AND «MICROSPUTNIK» SPACECRAFTS

S. K. Efimov, A. G. Nesterovych, A. I. Yakovchenko

The GPS receiver for the space navigation created by Scientific-Research Institute of Radioengineering Measurements (Kharkov) is presented.

УДК 521.9+520.875

С. Л. Болотин

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Центр обробки РСДБ-наблюдений
в Главной астрономической обсерватории
НАН Украины

Описано сучасний стан та діяльність центру обробки РНДБ-спостережень в ГАО НАНУ. Анонсовано нове покоління програмного забезпечення обробки РНДБ-спостережень «SteelBreeze».

ВВЕДЕНИЕ

Радиоінтерферометрія со сверхдлинними базами (РСДБ) являється унікальним методом геодинаміки і астрометрії, який позволяє определяти одночасно так координати і скорості пунктів на поверхні Землі і внегалактических источников в космічному пространстві, так і взаємну орієнтацію небесної і земної систем координат. Точність определення координат і параметров вращення Землі (ПВЗ) із РСДБ-наблюдений вище, ніж у інших сучасних методах — GPS або SLR. Аналіз РСДБ-наблюдений проводиться в ГАО НАНУ уже більше 10 років.

В 1990 році А. Курьянова, М. Медведський і Я. Яцків створили програмне забезпечення (ПО) «Киев-Геодинаміка-Р» [1]. Оно було написано на мові FORTRAN для ЕВМ серії ЕС. ПО позволяло обробляти серії сеансів РСДБ-наблюдений і определяти ПВЗ, координати станцій і радіоісточників.

В 1992 році почався проект, який впоследствії отримав назву «SteelBreeze». Основною метою було створення незалежного програмного забезпечення обробки РСДБ-наблюдений, що в подальшому дозволило порівнювати отримані результати, застосовувати різні методи обробки, алгоритми і т. д. Це програмне забезпечення розроблялось на мові «Pascal» для персональних комп'ютерів під управлінням операційної системи MS DOS, а потім було адаптовано для

роботи з графічним інтерфейсом Windows 3.1 фірми «Microsoft».

С постачанням «SteelBreeze» в 1994 р. були отримані оцінки суточних і полусуточних вариацій вращення Землі непосредственно. На 14-ти суточному інтервалі сеансів CONT'94 РСДБ-наблюдений були отримані координати полюса Землі ($d X_p$ і $d Y_p$) і вариації Всесвітнього времени d(UT1-UTC) з точністю близько 5 мін [3].

Перше рішення, надане Міжнародною службі вращення Землі (МСВЗ) для побудови комбінованого рішення, було отримано в 1995 р. з обробки 177707 РСДБ-наблюдений, проведених впродовж чотирьох років. Оно включало в себе обчислення координат радіоісточників, координат станцій наблюдень і серію ПВЗ.

В 1998 р. почалася розробка нової версії програмного забезпечення «SteelBreeze-2». В основу цього проекта легли рішення і алгоритми, які були вироблені при розробці «SteelBreeze-1», а зміни затронули в основному техніку розробки ПО. Так, «SteelBreeze-2» написано на мові C++, може виконуватися на різних операційних системах, таких як Linux, FreeBSD, Solaris і др., використовуючи бібліотеку графічних інтерфейсів Qt.

С 1999 року центр обробки РСДБ-наблюдений ГАО НАНУ виступає в якості центра аналізу в Міжнародній РСДБ-службі для задач геодезії і астрометрії (IVS).

ОБОРУДОВАНИЕ ЦЕНТРА

Работы в центре анализа РСДБ-наблюдений ведутся на компьютере «Intel Pentium II» (400 MHz) с оперативной памятью 192 Мб. Компьютер оборудован SCSI-интерфейсом, к которому подключены три жестких диска с объемом 9, 4 и 6 Гб, при этом возможно расширение до 15 устройств. Компьютер управляется операционной системой Linux/GNU (версия ядра 2.2.18, LibC-2.2.1) с графическим интерфейсом под управлением X-сервера XFree86-3.3.6.

На данный момент ГАО подключена к всемирной сети Интернет при помощи некоммутируемого соединения на скорости 33.6 кб/с. К сожалению, такая низкая пропускная способность нашего канала не позволяет центру анализа выступать в роли операционного центра IVS.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ «STEELBREEZE-1»

ПО «SteelBreeze» разрабатывалось как средство анализа геодезических наблюдений РСДБ. Оно использует метод наименьших квадратов для оценивания различных геодинамических параметров с применением квадратно-корневого информационного фильтра, алгоритм которого описан в работе [2]. Для треуголизации матриц в этом фильтре применяются преобразования Хаусхольдера, что делает его быстрым, экономным и относительно нечувствительным к ошибкам машинного округления. Фильтр позволяет также использовать стохастические модели для оценивания параметров.

Программное обеспечение импортирует данные РСДБ-наблюдений, представленные в различных форматах (NGS, MarkIII, VDB), и хранит их в своем бинарном формате. При этом обеспечивается быстрый доступ к записям и их компактное размещение. Также хранятся в отдельных базах данных каталоги станций наблюдений, радиоисточников, ПВЗ, эфемериды и другие данные.

«SteelBreeze» обрабатывает РСДБ-наблюдения (временную задержку), которые проводились в течении одного или нескольких сеансов наблюдений. Временная задержка моделируется согласно принятым соглашениям MCB3 [7]. Возможно использование и других моделей, не вошедших в соглашения: модели движения тектонических плит, модели нутации, тропосферной задержки в зените и ее масштабирующей функции и др.

Программное обеспечение оценивает следующие геодинамические параметры: параметры вращения Земли, координаты и скорости станций наблюдений,

координаты радиоисточников, числа Лява, параметры стандартов частоты станций наблюдений, тропосферную задержку в зените. При этом каждый оцениваемый параметр может принадлежать следующим типам:

- глобальный параметр: несмещенная оценка параметра определяется на всем наборе обрабатываемых сеансов наблюдений (обычно применяется для координат радиоисточников, станций, и т. д.);
- локальный параметр: несмещенная оценка параметра определяется на каждом сеансе наблюдений, так что оценки на двух соседних интервалах наблюдений считаются независимыми (например ПВЗ);
- локальный параметр с наложенными связями: несмещенная оценка параметра определяется на каждом сеансе наблюдений, при этом оценки на двух соседних интервалах наблюдений связаны между собой определенными правилами;
- стохастический параметр: поведение оцениваемого параметра между двумя последовательными моментами наблюдений внутри одного сеанса описывается определенным правилом (в программном обеспечении используется модель случайного блуждания). Этот тип используется для оценивания часов станций и тропосферной задержки в зените;
- стохастический параметр с наложенными связями: в отличие от стохастического параметра его оценки на соседних сеансах наблюдений связаны такими же правилами, как и внутри сеансов.

ПО «SteelBreeze-1» состоит из около 80 тыс. строк исходного текста на языке «Pascal». Оно создавалось с использованием методов объектно-ориентированного программирования, что существенно облегчало процесс разработки программы.

В качестве первого примера анализа РСДБ-наблюдений при помощи ПО «SteelBreeze-1» представим решение GAOUA 2000 R 01. Для этого решения РСДБ-наблюдения, проводимые по программе IRIS-A, а затем — NEOS-A, были обработаны с целью построения земной и небесной систем координат и определения их взаимной ориентации. Использовалось 288583 временных задержек, полученных с 6 января 1998 по 28 декабря 1999 на 176 сеансах наблюдений.

Начальные значения координат станций наблюдений задавались ITRF94, а их скорости вычислялись согласно модели NNR-NUVEL-1A. Для привязки начала отсчета полученной системы с ITRF94 накладывалось дополнительное условие:

Рис. 1. Расположение станций, участвовавших в решении GAOUA 2000 R 01. Треугольниками отмечены станции, координаты которых использовались для фиксации начала отсчета полученной земной системы координат, кружками — остальные станции

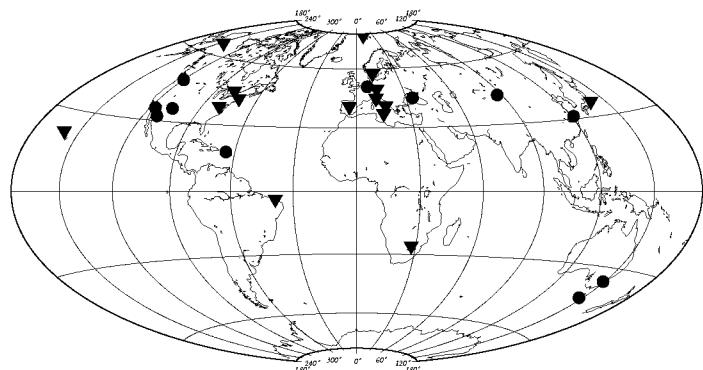
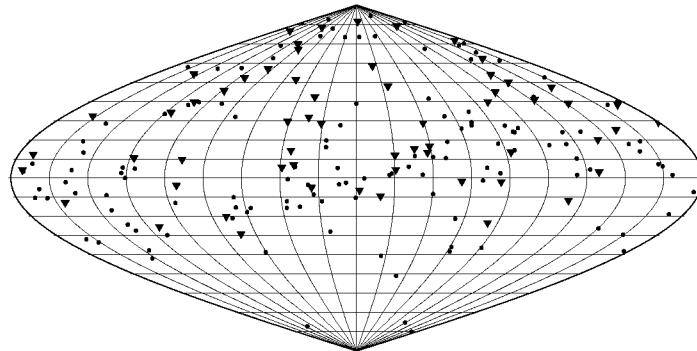


Рис. 2. Распределение на небесной сфере радиоисточников, входящих в решение GAOUA 2000 R 01. Треугольниками отмечены радиоисточники, координаты которых участвовали в фиксации прямого восхождения полученной небесной системы координат, кружками — остальные радиоисточники



для выбранных станций наблюдений (ALGOPARK, DSS65, FORTLEZA, GILCREEK, HARTRAO, KASHIMA, KOKEE, MATERA, MEDICINA, NOTO, NRAO20, NYALES20, ONSALA60, WESTFORD и WETTZELL) справедливо равенство суммы векторов вычисленных положений сумме векторов положений, взятых из ITRF94:

$$\sum_{i=1}^{15} \mathbf{r}_{GAOUA2000R01} = \sum_{i=1}^{15} \mathbf{r}_{ITRF94}. \quad (1)$$

На данном интервале наблюдений были определены координаты 26 станций.

На рис. 1 показано распределение этих станций наблюдений. Треугольниками обозначены станции, координаты которых использовались для фиксации начала отсчета полученной земной системы координат (уравнение (1)).

Начальные значения координат радиоисточников задавались каталогом RSC(WGRF)95R01. Начало прямого восхождения в определяемой системе координат связано с началом прямого восхождения в RSC(WGRF)95R01 требованием равенства сумм прямых восхождений некоторых радиоисточников для обеих систем координат (для этого использовался набор из 60 радиоисточников):

$$\sum_{i=1}^{60} \alpha_{GAOUA2000R01} = \sum_{i=1}^{60} \alpha_{RSC(WGRF)95R01}. \quad (2)$$

Полученная таким образом небесная система отсчета состоит из координат 191 радиоисточника.

На рис. 2 показано распределение этих радиоисточников на небесной сфере. Треугольниками обозначены радиоисточники, координаты которых использовались для фиксации прямого восхождения полученной небесной системы отсчета (уравнение (2)).

Взаимная ориентация земной и небесной систем координат вычислялась согласно модели нутации IAU-1980 с использованием поправок из решения EOP(IERS)97C04. Для перехода между этими системами координат использовалась концепция «не врашающегося начала отсчета» [4]. В движении полюса и изменениях UT1 учитывались суточные и полусуточные приливные вариации согласно [6].

Фиксация взаимной ориентации земной и небесной систем координат была задана ПВЗ из решения EOP(IERS)97C04 на 29 декабря 1998 г. Тропосферная рефракция в зените, вызванная гидростатическим компонентом и парами воды, моделировалась согласно [8]. При этом использовалась функция масштабирования МТТ [5] для обоих компонентов. Ионосферная задержка исключалась благодаря использованию наблюдений на двух диапазонах частот. Задержка в зените и нестабильность стандарта частоты оценивались как стохастические параметры.

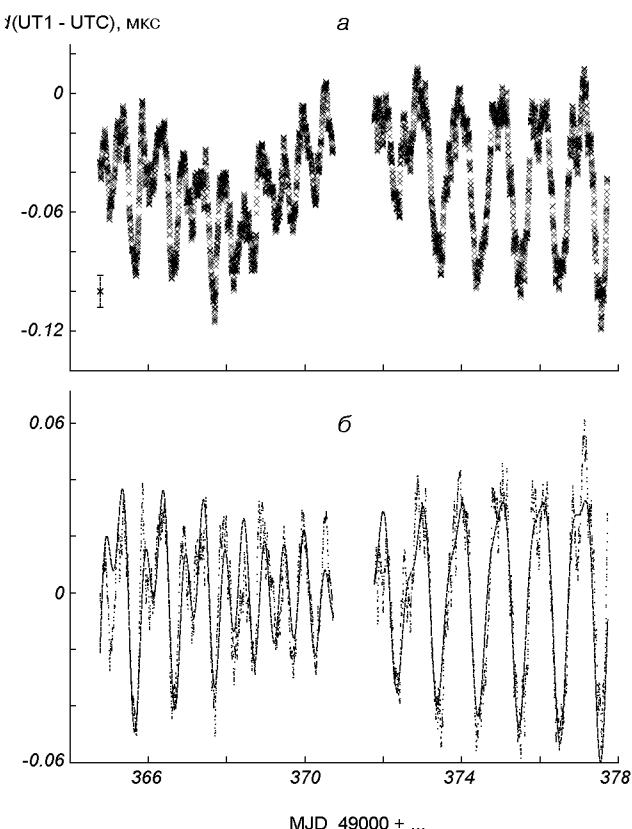


Рис. 3. *а* — оценки неравномерности вращения Земли $d(\text{UT1} - \text{UTC})$; *б* — эти же оценки, из которых удален низкочастотный тренд (точки) и теоретические значения, вычисленные согласно модели Херринга и Донга [6] (штриховая линия)

ры при помощи модели случайного блуждания со следующими значениями мощности спектральной плотности белого шума: для параметров часов $20^2 \text{ пс}^2/\text{ч}$, для тропосферной задержки в зените $1^2 \text{ см}^2/\text{ч}$.

Взвешенные средние квадратичные остатки этого решения составляют 38.4 пс.

В качестве второго примера анализа РСДБ-наблюдений с помощью ПО «SteelBreeze-1» рассмотрим определение высокочастотных вариаций в скорости вращения Земли. Использовались наблюдения расширенной РСДБ кампании 1994 г. Во время ее проведения станции практически непрерывно вели наблюдения с 11 по 26 января. До 24 станций трех независимых сетей (NASA-R&D, VLBA и NAVEX-G) участвовали в наблюдениях. Однако лишь сеть NASA-R&D удовлетворяет требованиям, необходимым для высокоточного определения вариаций ПВЗ. Остальные две сети по различным причинам (конфигурация станций, время накопления, стабильность стандартов частоты на станциях, и т. д.) не пригодны для этих целей. В итоге

использовались данные семи станций: GILCREEK, KOKEE, WESTFORD, LA-VLBA, WETTZELL, ONSALA60 и FD-VLBA, которые наблюдали 41 радиоисточник. На эти наблюдения принято ссылаться как CONT'94.

Обработка выполнялась так же, как и в предыдущем примере, за исключением того, что координаты радиоисточников, координаты и скорости станций не оценивались, а брались из решений RSC(WGRF)95R02 и SSC(ITRF)96C01 соответственно, а координаты полюса dX_p , dY_p и $d(\text{UT1} - \text{UTC})$ оценивались как стохастические параметры. Величины мощности спектральной плотности стохастических параметров задавались следующими:

параметры часов:	$18^2 \text{ пс}^2/\text{ч};$
задержка в зените:	$1.0^2 \text{ см}^2/\text{ч};$
$d(\text{UT1}-\text{UTC}):$	$0.012^2 \text{ мкс}^2/\text{ч};$
dX_p и $dY_p:$	$(0.001 \cdot 0.16'')^2/\text{ч};$

Было обработано 27975 временных задержек и взвешенные средние квадратичные остатки решения составили 10.3 пс.

На рис. 3, *а* приведены оценки неравномерности вращения Земли $d(\text{UT1} - \text{UTC})$. Эти же оценки, из которых удален низкочастотный тренд, и теоретические значения, вычисленные согласно модели Херринга и Донга [6], показаны на рис. 3, *б*.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ «STEELBREEZE-2»

К сожалению, описанное выше ПО «SteelBreeze-1» имеет ряд недостатков: оно было создано с использованием непереносимого на другие платформы диалекта языка программирования и библиотек; есть внутренние ограничения на объем в базах данных наблюдений, что приводит к невозможности иметь дело с сеансами, на которых было проведено более 15535 наблюдений. По этим причинам в 1998 году развитие ПО «SteelBreeze-1» было остановлено и начата разработка программного обеспечения нового поколения.

Новое ПО «SteelBreeze-2» наследует алгоритмы и методики предыдущей версии, а также устраняет ее недостатки. В новой версии ПО процесс обработки наблюдений не связан с сеансами РСДБ-наблюдений, что делает возможным обрабатывать сеансы, которые перекрываются во времени. Улучшены алгоритмы управления базами данных наблюдений, каталогов станций и источников. Добавлен новый тип параметров — «дуговой параметр», — оценки которого проводятся внутри определенного интервала времени и не зависят от начала и конца сеансов наблюдений. Полностью изменен интерфейс пользователя.

ПО «SteelBreeze-2» распространяется в исходных текстах в соответствии с лицензией GNU и может быть доступен в Интернете по адресу
<http://sourceforge.net/projects/steelbreeze>

1. Яцкiv Я. С., Курьянова А. Н., Медведский М. М. Комплекс алгоритмов и программ для обработки РСДБ-наблюдений «Киев-GR1». — Киев, 1991.— с.—(Препринт / АН УССР; Ин-т теорет. физики; ИТФ-91-37Р).
2. Biermann G. J. Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation // Mathematics in Science and Engineering Series.—1977.—128.—P. 242.
3. Bolotin S. Hight frequency variations of EOP from extensive VLBI operations in January 1994 // Proc. of the second EVN/JIVE Symp. — 1995.—P. 13—18.
4. Capitaine N. The Earth rotation parameters: conceptual and convention definitions // Astron. and Astrophys.—1986.—162.—P. 323—329.
5. Herring T. A. // Proc. of the Symp. on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy / Eds by J. C. De Munch, T. A. Th. Spoelstra. — Netherland Geodetic Commission, Delft, Netherlands, Publications on Geodesy.—1992.—N 36.—P. 157—164.

6. Herring T. A., Dong D. Measurement of diurnal and semi-diurnal rotational variations and tidal parameters of Earth // J. Geophys. Res.—1994.—99.—P. 18051—18071.
7. International Earth Rotation Service, IERS Conventions // Ed. D. D. McCarthy. — Paris, 1996.
8. Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites // The Use of Artificial Satellite for Geodesy / Eds S. W. Henriksen et al. — Washington, D. C.: AGU, 1972.—P. 247—251.—(Geophys. Monogr. Ser. 15).

VLBI DATA ANALYSIS CENTER AT THE MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE

S. L. Bolotin

The current state and activities of the VLBI Data Analysis Center at the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv are described. The new generation of the VLBI data analyzing software «SteelBreeze» is announced.

УДК 386.2

В. М. Романько¹, Е. М. Хомяков², С. Т. Черепков³

¹Науковий метрологічний центр (військових еталонів) Міністерства оборони України, Харків

²Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків

³Військстандарт, Київ

Розвиток системи метрологічного забезпечення радіонавігаційних полів супутниковых систем

Розглядаються основні конструктивні принципи розвитку системи координатно-часового забезпечення широкого кола споживачів та виникаючі проблеми побудови системи метрологічного контролю радіонавігаційних полів.

Розв'язання широкого кола військових і народно-господарчих задач вимагає єдності вимірювання просторових координат, простору швидкостей (прискорень), а також частотно-часових розходжень. До таких задач перш за все належать: управління повітряним рухом, управління космічними апаратами, управління рухом наземних транспортних засобів, навігація морських і річних суден, управління військами, льотні випробування високоточної зброї.

На цей час для координатно-часового забезпечення (КЧЗ) споживачів широко використовуються системи дальніої навігації «Омега», «Лоран-С», «Чайка». При цьому наземні радіонавігаційні системи «Лоран-С» і «Чайка» сумісні між собою, і їхня робоча зона охоплює майже всю північну півкуль. Проте ні та ні інша не дістали схвалення як світові навігаційні системи, і в найближчі 10 років у Європі вони будуть відігравати лише роль системної підтримки.

У 1996 році Європейська комісія визначила стратегію радіонавігації наступним чином: «глобальна система супутникового обладнання для визначення місця знаходження, швидкості і часу, що виконує на постійній основі вимоги потенційних споживачів цивільного сектора».

Ця стратегія була підтримана Радою Міністрів країн Європейської спілки (ЄС) і глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС) включена до директиви щодо створення трансевропейської транспортної мережі як пріоритетний проект для її інфраструктури. Крім того, Рада ЄС рекомендувала своїм членам розпочати і підтримувати участь у ГНСС-1, а також розпочати підготовку до роботи

щодо створення ГНСС-2. При цьому узгоджена стратегія країн ЄС з питання створення ГНСС має три основних аспекти [4]:

- створення на першому етапі системи ГНСС-1, що базується на використанні існуючих глобальних навігаційних супутниковых систем GPS (США) і ГЛОНАСС (Росія), і подальше розгортання ГНСС-2, яка буде всесвітньою відкритою системою і відповідатиме всім вимогам всіх категорій споживачів щодо визначення місця розташування, швидкості і часу;
- створення і розвиток ГНСС повинні відбуватися на основі використання міжрегіональної кооперації;
- ГНСС повинна забезпечувати вимоги всіх видів споживачів.

Правовою основою для використання систем GPS і ГЛОНАСС як базових для ГНСС-1 є листи США (LE 4/4.9.1-94/89 від 11.12.94 р.) і Росії (LE 4/4.9.1-96/80 від 20.09.96 р.) державам, у яких вони надають ці системи для загального користування. При цьому гарантується нормальне функціонування цих систем протягом 15 років.

Було б нерозумно не використати даний арсенал засобів при розв'язанні задач створення та розвитку системи КЧЗ цивільних і військових споживачів України, однак при дотриманні цілого ряду умов [1, 2].

Навігаційні сигнали, що випромінюються навігаційними штучними супутниками Землі (НШСЗ), мають визначену структуру, яка здатна забезпечувати проведення високоточных навігаційних вимірювань і наступних навігаційних визначень. Однак у повній мірі використовувати можливість супутни-

кових радіонавігаційних систем можуть тільки їхні власники, до числа яких Україна не належить. Указані власники мають принципову можливість змінювати структуру радіонавігаційних сигналів, що випромінюються, таким чином, щоб або ускладнити несанкціоноване їх використання іншими споживачами, або внести суттєві похибки до результатів навігаційних визначень.

Для того щоб своєчасно прийняти запобіжні заходи, які забезпечують можливість використання таких сигналів без ушкодження споживачем, необхідно здійснювати постійний контроль за якістю радіонавігаційного поля. Особливо це важливо з точки зору військових споживачів, коли від якості навігаційно-часових визначень залежить рівень боєвої ефективності.

Відповідно до цього перед метрологічним контролем системи КЧЗ стоять нові вимоги:

- зниження похибки добових звірень державного еталону часу і частоти з робочими еталонами до 20 нс;
- організація поточного метрологічного контролю кодових і фазових сигналів ГНСС, що забезпечує похибку звірень бортових системних шкал часу зі шкалою Державної служби часу та еталонних частот (ДСЧЧ) менше 1 нс;
- розвиток робіт зі сертифікації та метрологічної атестації апаратури користувачів ГНСС в усіх режимах її застосування.

На сучасному етапі у зв'язку з вимогами забезпечення достатньої цілісності та вірогідності координатно-часових визначень необхідно сформувати національну систему метрологічного забезпечення радіонавігаційних полів (СМЗРНП), яка повинна забезпечувати контроль якості джерел радіонавігаційних сигналів, що входять до систем космічного і наземного базування, виявлення джерел з аномальними характеристиками і формування повідомлень до центру управління системи та користувачам РНС у зоні як окремо діючого пункту контролю, так і у зоні дії глобальної системи моніторингу. При цьому визначальним чинником при формуванні СМЗРНП є критерій максимізації відношення ефективність/вартість. Виходячи з цього, можна виділити два комплекси вторинних аспектів формування СМЗРНП, що базуються на вихідній оцінці якості системи контролю: структурний і критеріальний.

Перший з них обумовлює мінімізацію витрат на побудову діючої структури СМЗРНП. Критеріальний аспект формування СМЗРНП ґрунтуються у першу чергу на забезпеченні необхідної і достатньої глибини та вірогідності контролю якості радіонавігаційного поля у зоні дії окремого пункту контролю

у регіоні, що охоплює зони дії декількох периферійних пунктів спостереження, та у зоні дії всієї СМЗ. Поряд з цим при формуванні структури СМЗРНП необхідно враховувати необхідність максимальної оперативності забезпечення споживачів інформацією про поточний стан як джерел радіонавігаційних сигналів, так і про стан радіонавігаційних полів у цілому, включаючи місцеві і регіональні аномалії на трасах розповсюдження.

У цих умовах надзвичайно актуальними є задачі метрологічної атестації навігаційних полів — контролю їхньої якості у реальних умовах обстановки. Дані задачі повинні розв'язуватися спеціалізованим радіотехнічним комплексом, обладнаним апаратурою метрологічної атестації та відповідним програмним забезпеченням. Мета такого контролю — дати реальну об'єктивну і оперативну інформацію споживачам (особливо військовим) про можливості використання навігаційних сигналів тих або інших НШСЗ і супутникової радіонавігаційної системи у цілому. При цьому головні задачі метрологічної атестації можуть розглядатися на трьох рівнях: на рівні апаратури контролю навігаційного поля, на рівні локальної контрольної станції, а також на рівні великого базового комплексу регіональних контрольних станцій.

На рівні апаратури контролю навігаційного поля повинна вирішуватися головна задача метрологічної атестації коливань, що приймаються:

$$u(t) = \sum_{i=1}^N \left\{ \mu_{0i} d_i(t) S_i[t, \Lambda_i(t)] + \right. \\ \left. + \operatorname{Re}[\dot{\mu}_i(t) d_i(t) \dot{S}_i(t, \Lambda_i(t))] \right\} + n(t),$$

де N — число НШСЗ, які можна бачити; μ_{0i} — амплітуда частини сигналу i -го НШСЗ, що не флукутує; $S_i[t, \Lambda_i(t)]$ — нормований широкосмуговий шумоподібний сигнал i -го НШСЗ; $\Lambda_i(t)$ — вектор плинних навігаційних параметрів сигналу i -го НШСЗ (час запізнення коду, доплерівський зсув частоти-носія, фазовий зсув частоти-носія сигналу відносно опорного сигналу приймача); $d_i(t)$ — нормована двійкова послідовність символів службової інформації; $\dot{\mu}_i(t)$ — комплексні швидкі амплітудно-фазові (мультиплікативні) флюктуації сигналу i -го НШСЗ; $n(t)$ — адитивні флюктуації, які мають як теплові шуми, так і сигнали, обумовлені багатопроменевістю.

Локальні контрольні станції, які розташовують у районах морських, річних портів, аеродромів військового призначення і аеропортів, обладнуються штатною апаратурою споживача. Координати антени відомі за результатами астрономо-геодезичних

вимірювань. У загальному випадку відоме розходження шкали часу контрольної станції від шкали часу супутникової радіонавігаційної системи або державного еталону.

Формування диференційних локальних поправок, які дозволяють послабити вплив повільномінливих похибок спостережень, пропонується здійснювати безпосередньо до вектора стану споживача

$$\Lambda_k^T = \{V_{xk}, V_{yk}, V_{zk}, x_k, y_k, z_k, \delta f_k, \delta T_k\},$$

де V_{xk} , V_{yk} , V_{zk} — складові вектора швидкості споживача (у місцевій або гринвіцькій геоцентричній системах координат); x_k , y_k , z_k — складові вектора положення споживача; δf_k — поправка до частоти опорного генератора споживача; δT_k — поправка до шкали часу споживача.

За результатами прийому і обробки навігаційних сигналів в апаратурі локальної контрольної станції визначаються різниці між відомим (еталонним) вектором стану контрольної станції (складові вектора швидкості антени контрольної станції дорівнюють нулю), та вектором стану контрольної станції, що оцінюється у процесі розв'язання навігаційно-часової задачі.

Експериментальні спостереження різниць координат і псевдовідстаней показують, що безпосередньо використовувати їх як диференційні поправки не можна через наявність випадкових похибок спостереження.

У зв'язку з цим поправки, що повільно змінюються, пропонується апроксимувати поліномом (Тейлора або Чебишева) невисокого порядку:

$$\delta \Lambda_k = \sum_{i=0}^P C_i \varphi_{ki} + \left(\sum_{j=1}^m \gamma_j \overset{\circ}{\delta \Lambda}_{kj} + \varepsilon_k \right) + \nu_k,$$

де P — степінь полінома; C_i — невідомі коефіцієнти; φ_{ki} — відомі поліноми Тейлора або Чебишева; γ_j — невідомі коефіцієнти авторегресії; $\overset{\circ}{\delta \Lambda}_{kj}$ — корельована складова вхідних даних; ε_k , ν_k — некорельовані випадкові величини з нульовими середніми значеннями та невідомими дисперсіями σ_ε^2 , σ_ν^2 .

Метрологічна атестація при формуванні локальних диференційних поправок повинна передбачати: оцінку коефіцієнтів полінома та полінома в цілому; аналіз похибок оцінок коефіцієнтів полінома та полінома в цілому; оцінку статистичних характеристик коригованої складової (послідовність авторегресії); оптимальну адаптивну фільтрацію корельованої складової диференційної поправки; аналіз точності фільтрації корельованої складової; аналіз рівня некорельованої складової спостережень [3].

З метою послаблення похибок, пов'язаних з невизначеністю ефемерид і шкали часу НШСЗ, будуться мережі регіональних контрольних станцій для незалежного визначення ефемерид кожного навігаційного ШСЗ, який можна побачити, а також для оцінки частотно-часових розходжень бортового еталону частоти і часу та еталона єдиного часу контрольних станцій. Мережа регіональних контрольних станцій є, як правило, беззапитний великообсяговий радіотехнічний комплекс. Контрольні станції обладнуються апаратурою споживача посиленої комплектації (з квантовими еталонами частоти і часу), а також апаратурою передачі даних у центр комплексу.

Метрологічна атестація при формуванні глобальних диференційних поправок зводиться: до оцінки ефемерид, параметрів орбіт і частотно-часових розходжень j -го НШСЗ; до аналізу точності отриманих оцінок; до порівняння отриманих оцінок з даними, які передаються з НШСЗ у складі оперативної службової інформації.

Результати спостережень у мережі регіональних контрольних станцій можна подати у вигляді

$$\mathbf{u}_{kj} = \mathbf{R}_{kj}(\Lambda_{skj}, \mathbf{Q}) + \mathbf{n}_k,$$

де \mathbf{R}_{kj} — вектор функцій, що вимірюються; Λ_{skj} — вектор ефемерид j -го НШСЗ та його частотно-часові розходження; \mathbf{Q} — блочний вектор координат антен контрольних станцій; \mathbf{n}_k — похиби спостережень, статистичні характеристики яких визначені при метрологічній атестації на рівні коливань, що приймаються.

Лінеаризація відношения для функцій, що вимірюються, у межах вектора Λ_{skj} (яка визначається за службовою інформацією з борта НШСЗ) дас

$$\delta \mathbf{u}_{kj} = \mathbf{u}_{kj} - \mathbf{R}_{kj}(\Lambda_{skj}, \mathbf{Q}) = \mathbf{C}_{kj} \cdot \delta \Lambda_{skj} + \mathbf{n}_k,$$

де

$$\mathbf{C}_{kj} = \frac{\partial \mathbf{R}_{kj}}{\partial \Lambda_{skj}}$$

при значенні $\delta \Lambda_{skj}$; $\delta \Lambda_{skj} = \Lambda_{skj} - \Lambda_{skj}^{ref}$.

Задача зводиться до оптимальної фільтрації вектора $\delta \Lambda_{skj}$ та до аналізу точності її результату.

Розв'язання задач метрологічної атестації радіонавігаційних полів дозволяє сформулювати основні конструктивні принципи концепції КЧЗ широкого кола споживачів України:

- забезпечення необхідного рівня оперативності і якості КЧЗ споживачів за будь-яких обставин. У відповідності з цим принципом першочергова увага повинна бути звернута на визначення вимог до КЧЗ різних споживачів, досяжний рівень

- їхньої реалізації у відповідності з провідним задумом концепції і розробку заходів щодо підтримання необхідного рівня КЧЗ за будь-яких обставин;
- максимальне використання елементів існуючої міжнародної системи для КЧЗ України. Цей принцип припускає збереження, в першу чергу, Державної системи единого часу та еталонних частот, дієздатність якої гарантує часове забезпечення України за будь-яких обставин, у тому числі в практично неможливому (суть гіпотетичному) випадку повної деградації ГНСС або приглушення її сигналів засобами радіоелектронної боротьби;
 - в основі топогеодезичного забезпечення України повинні бути електронно-цифрові карти місцевості, що дозволять забезпечити автоматизовану підготовку вихідних геодезичних даних у рамках запропонованої системи КЧЗ;
 - максимальне інтегрування системи КЧЗ окремих відомств в національну систему КЧЗ споживачів України. Це припускає, що відомча система КЧЗ не є відокремленою автономною системою, а використовує в основному результати функціонування національної системи КЧЗ, доповнюючи її при необхідності окремими елементами, що забезпечують виконання вимог, які пред'являються до КЧЗ споживачами, якщо ці вимоги не можуть бути реалізовані в рамках національної системи КЧЗ;
 - максимально можливе використання споживачами апаратури загального призначення. Цей принцип припускає використання споживачами окремих відомств не спеціально розробленої апаратури, а там, де це можливо, апаратури загальнопромислових зразків. Спеціально розроблена апаратура повинна використовуватися лише там, де неможливо або неприпустимо за тих чи інших міркувань використання апаратури загального призначення;
 - необхідність підготовки у вузах України фахівців з координатно-часового забезпечення і експлуатації супутникових навігаційних систем. Цю підготовку доцільно провести, наприклад, на базі бакалавриату у Харківському військовому університеті, спираючись на існуючі спеціальності «Балістика і навігація літальних апаратів ракетних і ракетно-космічних комплексів» та «Метрологічне

забезпечення систем та комплексів».

Таким чином, генеральна лінія концепції створення СМЗРНП повинна визначатися наступними положеннями: створення одної системи, яка задовільнить потреби народного господарства та Міністерства оборони без дублювання цивільних і військових служб; максимальне використання існуючих в Україні науково-технічних комплексів, систем і засобів; використання результатів міжнародного співробітництва, науково-технічних комплексів і систем інших країн, у першу чергу Росії та США, на основі норм міжнародного співробітництва. При цьому в основу створення СМЗРНП пропонується покласти метрологічні підрозділи Міністерства оборони, які мають робочі еталони одиниць часу і частоти військового призначення, входять до складу ДСЧЧ, мають розвинену інфраструктуру та підготовлений особовий склад.

1. Верещак А. П., Пискорж В. В., Жалило А. А. и др. Концепция создания системы навигационного обеспечения Украины // Космическая наука и технология.—1998.—4, № 5/6.—С. 46—55.
2. Камінський В. Ю., Романько В. М., Хом'яков Е. М., Черепков С. Т. Метрологічна атестація навігаційних полів супутниковых радіонавігаційних систем // Український метрологічний журнал.—1998.—Вип. 3.—С. 55—57.
3. Романько В. Н., Хом'яков Э. Н., Наумова Е. Э., Шаповалов С. Г. Статистическая обработка оценок поправок к шкале времени аппаратуры потребителей ГЛОНАСС // Метрология в электронике: Праці конф. — Харків, 1997.—Т. 2.—С. 43—46.
4. Толл Б. Концепция радионавигации Еврокомиссии: GNSS и EGNOS // Планирование глобальной радионавигации: Сб. тр. II-й Междунар. конф.; 24—26 июня 1997 г. — Т. 1.—С. 91—103.

DEVELOPMENT SYSTEM OF METROLOGICAL MAINTENANCE FOR RADIO-NAVIGATION FIELDS OF SATELLITE SYSTEMS

V. M. Roman'ko, E. M. Khomyakov, S. T. Cherepkov

The main constructive principles the system development of the coordinate-time maintenance for wide circle of users and arised problems to construct and develop the metrological control system of the radio-navigation fields are considered. The main tasks of metrological certification are solved using three levels: of the control equipment of navigation field, of the local check server and the base complex of regional check servers. The reasons allowed to use the metrological subdivisionsin of the Ukrainian Armed Forces based on the system of metrological control of radio-navigation fields.

УДК 629.7.052.3: 621.396.98

Е. Т. Скорик¹, А. В. Крюков²

¹Державне підприємство Науково-дослідний інститут «Квант-Навігація» Мінпромполітики України, Київ

²Науковий центр при Київському військовому інституті управління та зв'язку

Адаптивная компенсация помех в спутниковых радионавигационных системах

Розглядається проблематика завадостійкості апаратури користувачів супутникових радіонавігаційних систем (СРНС), основаної на адаптивному придушенні активних завад в зоні застосування СРНС відповідальними користувачами (авіація, морський флот, силові структури та ін.). Стосовно до особливостей сигналів СРНС та умов їхнього прийому при наявності завад пропонується алгоритм двоетапного адаптивного придушення завад (алгоритм «адаптив-адаптив», чи А²). Як показує аналіз, він дає значну економію технічних і програмних засобів (в деяких випадках до двох порядків) порівняно з алгоритмом повністю адаптивних антенних решіток (ПЛАР).

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) типа GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия) являются системами массового обслуживания, основанными на высокой технологии глобального координатно-временного обеспечения (КВО), которые к началу 21-го столетия гарантируют наиболее точную навигационную информацию широкому классу пользователей.

При создании общегражданской глобальной СРНС типа GNSS эти СРНС выбраны в качестве базовых как для Европы (проекты EGNOS, GALILEO), так и для создаваемой системы КВО Украины путем дополнения существующих СРНС национальными (региональными) наземными и космическими аппаратными и программно-алгоритмическими средствами контроля уровня целостности, надежности и доступности навигационной информации. В этом ряду научно-технических мер поддержание региональной устойчивости КВО в условиях дестабилизирующих факторов — электромагнитных помех разной природы при приеме навигационной информации СРНС аппаратурой пользователей (АП) является важной и актуальной народно-хозяйственной задачей.

В реальной помеховой обстановке часто создаются ситуации, когда без применения специальных мер защиты помехи полностью или частично по-

давляют полезный сигнал, и решение навигационной задачи становится невозможным или реализуется с недопустимыми погрешностями. Поэтому проблема помехоустойчивости АП СРНС в пространственно-временном континууме «навигационное поле — поле помех» является актуальной для многих ответственных пользователей СРНС, включая контрольно-корректирующие станции (ККС), составляющие основу национальных КВО. В связи со сложностью реальной электромагнитной обстановки (ЭМО) в зоне современных аэродромов обеспечение помехоустойчивости аэродромных комплексов систем привода и посадки самолетов по сигналам СРНС (в соответствии с концепцией ICAO CNS/ATM) является приоритетной задачей.

В общем случае полностью надежное функционирование СРНС в помеховой обстановке обеспечивается только при комплексировании в составе АП средств различных источников навигационной информации, включая средства, основанные на других физических принципах (например GPS + «Loran C» или GPS + ИНС — инерциальные навигационные системы). В ряде случаев достаточное функционирование АП в помехах достигается применением в полях СРНС адаптивной пространственной селекции для подавления радиопомех. Целью настоящей публикации является формулировка общей проблемы компенсации помех при реализации планов вступления Украины в проект

EGNOS и освоении концепции ICAO CNS/ATM. Приводится оценка одного из режимов адаптивной помехозащиты АП СРНС.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СРНС

Решение задачи помехоустойчивости навигации и местоопределения в общем случае состоит из следующих этапов:

- обнаружение помех по превышению порога, обычно адаптивного;
- выделение помеховых направлений в пространстве;
- собственно компенсация помех;
- выделение сигнала из шума согласованной фильтрацией (обнаружение сигнала);
- декодирование сигнала (выделение навигационной информации).

Практически все эти условно выделенные этапы являются в той или иной мере адаптивными, пред назначенными для обеспечения автоматического решения задачи местоопределения в условиях помех при поддержании заданного уровня точности, достоверности и целостности.

В этом ряду различают следующие случаи:

- помехоустойчивость в условиях активных преднамеренных помех, в том числе и имитационных уводящих помех, когда реализуется радиоэлектронное противодействие (РЭП) радионавигации в оперативной обстановке особого периода;
- помехоустойчивость в непреднамеренных помехах от источников радиосигналов систем связи (особенно подвижной сотовой), телевизионных вещательных каналов, радиолокационных и импульсных промышленных электромагнитных полей (например силовых сетей и систем зажигания автомобилей).

Отдельной задачей является подавление пассивных помех, образующихся за счет отражения сигналов НКА от местных предметов, окружающих антенну АП и от подстилающей поверхности. Интерференционные помехи особенно сильно проявляются при низком размещении НКА над горизонтом. Их влияние оказывается в первую очередь на точности координатных определений. На практике проблема интерференции навигационных полей устраняется двумя способами: пассивным — использованием основания антенны со специальными круговыми дроссельными проточками глубиной около $\lambda/4$, где λ — средняя рабочая длина волны, и активным — применением высокоеффективной

программы «Эверест». Так как отраженный сигнал всегда запаздывает относительно прямого, то с помощью этой программы, используемой в высокоточных геодезических приемниках, дискриминируется передний фронт сигнала от запаздывающего в пределах десятков наносекунд.

В настоящей работе рассматривается только задача подавления активных непреднамеренных помех.

СПЕЦИФИКА СИГНАЛОВ СРНС И ПОМЕХ

Особенностями приема сигналов СРНС, определяющими применяемые меры помехозащиты, являются предельно малый уровень их сигналов у поверхности Земли ($-160 \text{ дБ}\cdot\text{Вт}$ при соотношении сигнал к тепловому шуму $C/\bar{W} = -20 \text{ дБ}$ для кода C/A) и кодовый квазишумовой тип манипуляции (в GPS — CDMA, а в ГЛОНАСС — FDMA). По нормам Федеральной комиссии по связи FCC США, любой сигнал выше уровня шумов на входе АП СРНС является помехой и должен быть подавлен фильтровыми, структурно-сигнальными или пространственными методами до уровней, не вызывающих отказа или ошибки в местоопределении.

По нормам Международного Союза радиосвязи ITU уровни плотности мощности сигналов СРНС в диапазоне от 1.525 ГГц до 2.5 ГГц у поверхности Земли не должны превышать $-154 \text{ дБ}\cdot\text{Вт}/\text{м}^2$ в любой полосе 4 кГц, чтобы не создавать помехи каналам наземной подвижной связи, работающим в этом же частотном участке на первичной основе. Эффективная площадь слабонаправленной приемной связной антенны в диапазоне L_1 составляет примерно $-25.4 \text{ дБ}/\text{м}^2$. Сигнал кода C/A GPS имеет у Земли уровень $-160 \text{ дБ}\cdot\text{Вт}$ в полосе 1.023 МГц. Следовательно, максимальная плотность СВЧ мощности СРНС в полосе 4 кГц ($34.1 \text{ дБ}\cdot\text{Гц}$) на выходе антенны будет равна

$$\begin{aligned} W &= -160 \text{ дБ}\cdot\text{Вт} - 34.1 \text{ дБ}\cdot\text{Гц} + 25.4 \text{ дБ}/\text{м}^2 = \\ &= -158.7 \text{ дБ}\cdot\text{Вт}/\text{м}^2. \end{aligned}$$

Видим, что запас относительно норм ITU составляет только 4.7 дБ. Для навигационных космических аппаратов (НКА) новых проектов GPS Block II A сигнал, принимаемый АП, составляет $-157 \text{ дБ}\cdot\text{Вт}$, т. е. на 3 дБ лучше, чем в старых, и следовательно, запас становится меньше 2 дБ. Это означает, что приемники GPS не имеют другой возможности увеличить свою сигнальную устойчивость за счет излучаемой мощности НКА, кроме как за счет корреляционной обработки кода — согласованной фильтрации в эквивалентной узкой полосе 1 Гц,

когда реализуется сжатие при обработке до 70 дБ и эффективное соотношение С/Ш на выходе АП от 38 до 42 дБ. Дальнейшая помеховая устойчивость АП СРНС реально достигается только адаптацией в частотной и пространственной областях.

ЭМО при размещении GPS антенны на корабле связана с наличием на этом же борту по крайней мере двух излучающих радиосистем. Одна из них в диапазоне L — терминал INMARSAT-A на расстоянии 10 м от фазового центра антенны GPS создает в течение 10 мин на частоте 1636.5 МГц излучение с плотностью мощности 3 Вт/м². Другая — это импульсный навигационный судовой радиолокатор, излучающий в S -диапазоне при вращении антенны со скоростью 20 об./мин пакет из 10 импульсов с $P_{имп} = 60$ кВт с частотой повторения $F = 600$ имп./с, с длительностью 1—1.5 мкс и со скважностью 1600:1. Этот радиолокатор оказывает на АП СРНС воздействие в виде перемежающихся импульсных внеполосных помех.

Гораздо более сложная ЭМО реально наблюдается для АП СРНС, в частности для ККС в зоне действия крупных аэродромных комплексов. В общем случае речь идет о проблеме электромагнитной совместимости ККС как способности ККС нормально функционировать в условиях заданной ЭМО. В документе ICAO [3] в качестве критерия помехоустойчивости приемников СРНС ККС приняты достаточно жесткие требования на нормы ухудшения точности по дальности (1σ) не более 0.4 м для GPS и не более 0.8 м для ГЛОНАСС и ошибок в цифровой передаче не хуже 1 слова на 10^4 слов для обеих СРНС. Приведены типовые нормы уровней гармонических и шумоподобных помех (от -150 дБ·Вт) и их частотных полос (до 40 МГц) и импульсных помех с пиковой мощностью 0 дБ·Вт длительностью до 125 мкс при скважности менее 0.1.

АДАПТИВНЫЕ АНТЕННЫ

В общем случае задача помехоустойчивости АП решается применением специальных антенн в виде многоэлементной фазированной антенной решетки (ФАР) или АР с диаграммообразующей схемой (ДОС) с алгоритмами пространственной адаптации. Теория адаптивных решеток (ААР) достаточно хорошо разработана [2] и нашла свою успешную реализацию в радиолокации и в радиосвязи.

По определению пространственная фильтрация ААР заключается в автоматическом определении направления прихода помехи и формировании нуля диаграммы направленности (ДН) ААР в помеховом

направлении. Местоопределение и навигация по сигналам СРНС относятся к классу задач, решаемых пассивным беззапросным методом приема шумоподобных фазокодируемых сигналов (ШПС) с системной синхронизацией, и к этой задаче адаптивные методы помехозащиты полностью применимы [1].

При использовании ААР в системах связи вообще и в СРНС требуется высокая степень совместимости структуры применяемых сигналов с параметрами ААР по ряду причин. Так, весовые коэффициенты ААР в динамике могут модулировать полезный сигнал случайными процессами адаптации, особенно если различия сигнала и помехи в максимальной степени не учтены. Необходимо располагать копией полезного сигнала и системной синхронизацией, что в АП СРНС обычно доступно. Так как такой алгоритм как максимизация отношения сигнала к шуму (МОСШ) требует знания ковариационной матрицы помех, собственных шумов и направления прихода полезных сигналов, то схема обработки в ААР должна опознавать полезный сигнал по структуре. В частности, кодированный сигнал СРНС позволяет реализовать в ААР критерий минимальной средней квадратичной ошибки (МСКО), при котором уже не требуется априори знание направления прихода полезных сигналов. Поэтому учет формы сигнала и способ подавления помех в ААР для АП СРНС должны быть использованы комплексно.

Известны также такие недостатки алгоритма МОСШ, когда нули, сформированные на помеху, частично затрагивают направление полезного сигнала, и при этом каждая новая помеха расстраивает ААР. Учет структуры ШПС увеличивает помехоустойчивость СРНС и в пределе делает алгоритмы МОСШ и МСКО практически эквивалентными.

На выбор ФАР или ДОС для ААР влияют три фактора: требуемое разрешение нулей, поле обзора и ширина основного луча в направлении на полезный сигнал. Как правило, число элементов ФАР или число лучей ДОС должны иметь порядок числа помех, а сама АР выбирается разреженной. Для размеров решетки $D/\lambda = 10$ —15 ФАР и ДОС практически эквивалентны по реализуемым параметрам в режиме ААР, однако для ШПС ДОС более предпочтительны в связи с их частотной независимостью. Кроме того, ДОС позволяет использовать для компенсации помех не только режим ААР, но и такую эффективную технику, как компенсаторы с открытой петлей в режиме прямого вычитания.

В технической литературе по частичному решению задачи помехоустойчивости АП СРНС сравни-

- вались следующие два экспериментальных метода:
- адаптивный алгоритм ориентации минимума ДН АР на помеху. ААР состояла из 6—9 малогабаритных слабонаправленных антенных элементов. Коэффициент подавления одиночной стационарной помехи достигал 50 дБ;
 - программный алгоритм наведения максимума ДН на НКА. Была разработана ДОС в виде 36-элементной линзы Ротмана. Выходы линзы выбирались на известные угловые направления НКА. Применение узконаправленных ДН позволяло подавлять помеху (без адаптации) по боковым лепесткам (БЛ) на 15 дБ и более.

МЕТОД ДВУХЭТАПНОЙ АДАПТАЦИИ

Несмотря на относительно хорошо разработанную математическую общую теорию АР, техническая проблема помехоустойчивости АП СРНС на практике не может считаться полностью решенной. Поэтому мы предлагаем и анализируем метод адаптивного подавления помех для АП ответственных пользователей и для ККС общего применения, который не имеет недостатков и одновременно сохраняет преимущества двух предыдущих методов. Предлагаемый метод имеет условное название «адаптив—адаптив» или A^2 , т. е. метод двойной или двухэтапной адаптации.

По определению ААР с полной адаптацией (ПААР) считается базовой структурой по компенсации помех. ПААР состоит из АР и элементарных когерентных корреляционных автокомпенсаторов (АК) (рис. 1) Аппельбаума [4], установленных в каждом канале АР (рис. 2). Элементарный АК с контуром слежения О-типа является полностью устойчивой структурой, чем объясняется его широкое использование в ААР в аналоговом и цифровом форматах.

ПААР реализует градиентный алгоритм кратчай-

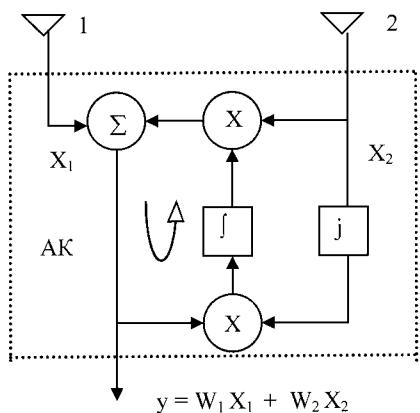


Рис. 1. Когерентный корреляционный автокомпенсатор

шего спуска. Теоретически ПААР обеспечивает сквозной алгоритм МСКО, эквивалентный в данной конфигурации алгоритму МОСШ. Эта структура ААР во многом эквивалентна по рабочим характеристикам (скорости схождения и конечным результатам) рекуррентным алгоритмам, реализуемым, в том числе, с помощью систолических вычислительных структур и инверсии выборочных ковариационных матриц (ВКМ или SMI — sample matrix inversion). Полностью адаптивный режим как некий частный случай конечного автомата является математической процедурой, которая обладает следующей особенностью [5]. Речь идет о повышенной чувствительности алгоритма ПААР в линейном приближении к неидентичности (неидеальности) элементов АР. Действительно, если включить в схеме (рис. 3) автоматический режим адаптации при наличии полезного сигнала с С/Ш, превышающим определенный порог, все неидентичности АР начинают формировать в АК искусственный помеховый сигнал типа специфического «вируса» по основному направлению, что приводит к заметному подавлению собственного сигнала (рис. 4), в некоторых случаях до 7 дБ. К другим недостаткам режима ПААР относят искажение формы главного

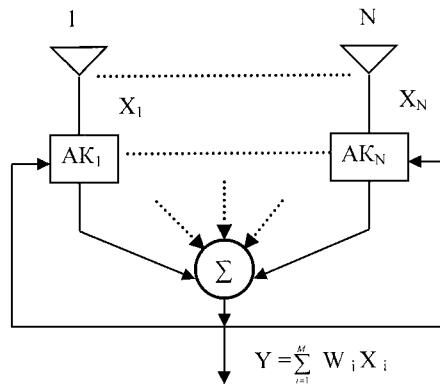


Рис. 2. Базовая структура полностью адаптивной антенной решетки

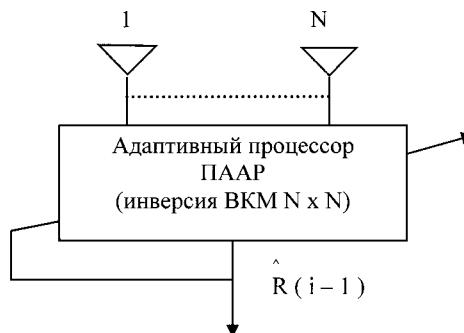


Рис. 3. Обобщенная схема адаптивного процессора ПААР

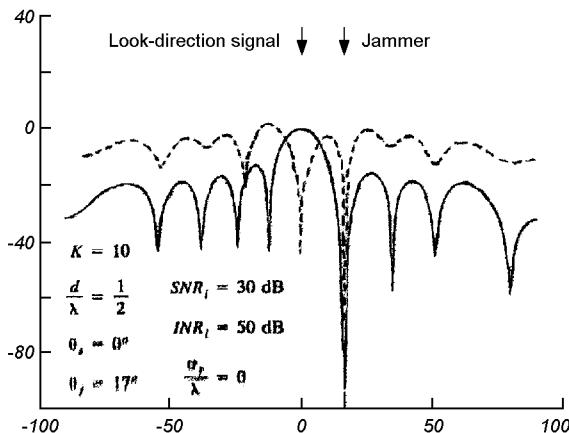


Рис. 4. Результаты моделирования идеальной (1) и неидеальной (2) ПААР

лепестка ДН ААР при формировании нуля на помеху, что на практике также ухудшает С/Ш по собственному сигналу. В ряде случаев при реализации структурной избирательности перед согласованным фильтром по сигналу необходимо устанавливать фильтр, отбеливающий структуру помехи.

Алгоритм A^2 с априорной информацией о полезных сигналах не обладает комплексом недостатков ПААР. Задача состоит в синтезе квазиоптимальной структуры частично адаптивной АР для АП СРНС с максимальным использованием априорной информации по сигналам и помехам, т. е. сводится к поиску наилучшего алгоритма для заданного применения. Поскольку такой детальной априорной информации на практике не может быть, особенно в случае перемежающихся помех, адаптивный процессор по A^2 является разумной альтернативой построения АП СРНС с требуемой помехоустойчивостью в реальных условиях местоопределения и навигации.

Процессор A^2 , строго говоря, является подоптимальной структурой с предпроцессором, решающей уравнение правдоподобия с порогом — «наличие/отсутствие сигнала». Среди многих используемых на практике критериев эффективности помехозащиты (МОСШ, максимум правдоподобия МП, максимальное подавление помехи МПП, максимум коэффициента передачи МКП АР, максимальной энтропии МЭ) выбираем отношение сигнала к сумме помехи и шума С/П + Ш как меру отношения всей желательной мощности сигнала ко всей нежелательной мощности на выходе адаптивного процессора. Эта мера качества близка к оценке МП и входит в оценку точности местоопределения АП СРНС при наличии шумов.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ МЕТОДА

Рассмотрим отличия дискриминации помехи алгоритмами ПААР и A^2 .

Предположим, что имеется одномерная АР из N элементов. Пусть X_{it} (где $i = 1, 2, \dots, N - 1$) — выборки электромагнитного поля на раскрыве АР, причем X — сумма интерферирующих помех и тепловых шумов:

$$X_{it} = J_{it} + N_{it}.$$

Здесь J_{it} — помеха на i -м элементе АР в момент времени t ; N_{it} — то же для гауссова теплового шума.

Оценка пространственной корреляционной функции выборок АР выражается как

$$\hat{R}_{(1-1)} = \frac{1}{R} \sum_{t=1}^M X_{it} X_{it}^*, \quad (1)$$

где \hat{R} означает оценку, а M — число временных выборок. Как видим, $R_{(1-1)}$ — это оценка первой строки (row) ковариационной матрицы, использующей алгоритм SMI. Далее, для оценки координат помех определяют полный пространственный спектр от (1).

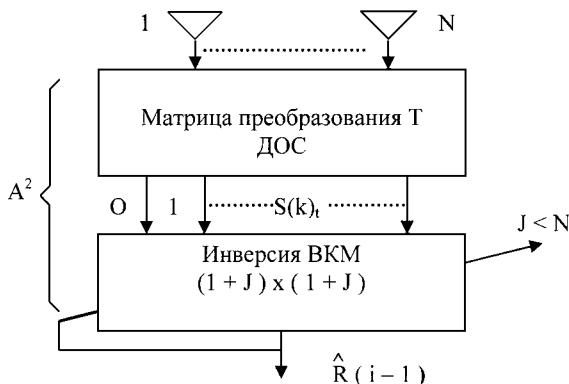
При гауссовом характере тепловых шумов оценка местоположения источников помех J определяется следующим образом:

$$\hat{X}_j = \frac{\sum_i (1/\sigma_j^2) \cdot (X_j - b_j)}{\sum_j (1/\sigma_j^2)}, \quad (2)$$

где X_j — координата помехи, b_j — смещение оценки, σ_j^2 — дисперсия оценки.

Из выражения (2) следует, что при алгоритме ПААР, кроме операций определения пространственной корреляции, обращения матриц и углового спектра по всему раскрыву АР, необходимо проводить также операции оценок координат и их дисперсий. Кроме аппаратурных и вычислительных затрат, это приводит ко взаимному влиянию операций подавления помех на процессы обработки полезных сигналов, и в частности, кискажениям ДН по сигналам.

Общая структурная схема компенсатора помех по алгоритму A^2 показана на рис. 5. Основу структуры составляет АР, содержащая N входов и $J + 1$ выходов, где J — число помех. ДОС формирует главный луч (один или несколько по числу НКА) и J дополнительных лучей на помехи. В результате в устройстве SMI производится вычитание помех из смеси С + П в главных лучах ДОС.

Рис. 5. Обобщенная схема адаптивного процессора A²

Нахождение угла помехи в этом случае фактически состоит в дискретном преобразовании Фурье (ДПФ), выполняемом цифровой или аналоговой ДОС:

$$S(k)_t = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_{jn} \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right). \quad (3)$$

Тогда оценку $\hat{U}(k)$ находят из (3) следующим образом:

$$\hat{U}(k) = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M [S(k)_t].$$

Здесь, как и в (1), M — число временных выборок в полосе сигналов и помех.

Угловой спектр $U(k)$ представляет собой N лучей, сформированных в угловом u -пространстве $\pm 90^\circ$, в котором лучи АР имеют равный разнос:

$$u = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta.$$

Здесь θ — угол от нормали к АР, d — шаг АР, λ — длина волны сигнала.

Оценку точности углового спектра помехи получают как:

$$\sigma_{\theta_j} = \frac{\theta_3}{\sqrt{2M(J/N)_j}}, \quad (4)$$

где θ_3 — ширина ДН ДОС антенны по уровню 3 дБ, равная $\lambda/(N+1)d$ в радианах; $(J/N)_j$ — отношение уровней помехи/тепловой шум для j -й помехи на выходе ДОС.

Если помеха достаточно сильна (интересующий нас случай), оценка углового спектра σ_{θ_j} по (4) может быть получена при $M = 1$, что соответствует одной временной выборке. Это наблюдается уже при

$(J/N)_j \geq 10$, где N_j — мощность шума в j -элементе решетки.

Теперь, когда для локализации помехи используется только одна временная выборка, для нахождения ее в угловом спектре с помощью ДПФ достаточно применить только $N/2\log_2 N$ комплексных умножений. Даже в случае близко расположенных помех и применении методов сверхразрешения типа МЭ требуются только одноразовые временные выборки, именно благодаря большому уровню помех на выходе ДОС. После дискриминации помех формируются вспомогательные лучи в направлении помех (рис. 5) с однозначностью: на J помех J лучей. Далее используются стандартный алгоритм SMI или алгоритм Аппельбаума совместно с формированием основного луча.

Таким образом, первоначальная решетка из N элементов трансформируется в эквивалентную решетку из $J+1$ элементов-лучей, к которым может быть применен адаптивный алгоритм, например алгоритм SMI на $J+1$ портов. Теперь пусть P — есть оценка корреляционной матрицы трансформированной эквивалентной АР. Оптимальные веса для такой АР в режиме A^2 выражаются как

$$W = P_T^{-1} T,$$

где T — матрица размером $1 \times (J+1)$, дающая $T^s = [1, 0, 0, 0, \dots, 0]$, где s — позиции транспонирования.

В пределе ААР по алгоритму A^2 имеет существенно ту же эффективность подавления помех, что и ПААР в случае, когда помехи близки к ортогональности по углу и спектру между собой и к сигналу. В частности, подавление помехи по алгоритму A^2 определяется с достаточной на практике точностью как

$$R_j = \frac{1}{1 + (J/N)_j},$$

что для $(J/N)_j > 10$ становится просто равным $R_j = (N/J)_j$.

Таким образом, эффективность A^2 в этом первом приближении идентична той, которая наблюдается у ПААР в случае если число вспомогательных лучей равно или превышает число помех. В тоже время алгоритм A^2 дает существенную экономию вычислительных средств. Действительно, вместо инверсии матрицы $N \times N$ достаточно инвертировать матрицу $(J+1) \times (J+1)$, что требует только $(J+1)^3$ комплексных умножений вместо N^3 для ПААР. Число вычислительных операций, требуемых для оценки ковариационной матрицы АР, также значительно сокращается. Если используется

алгоритм SMI, то число временных выборок для оценивания матрицы $N \times N$ составляет $2N$ для оптимальной эффективности в пределах 3 дБ от (9), что для A^2 сводится к $2(J + 1)$ временных выборок.

Эта экономия вычислительных операций достигает больших значений для больших АР с $N \leq 50—100$. Для АР ККС с 16—32 элементами эта экономия достигает 5—10 раз. Все же наиболее важным преимуществом модели A^2 следует считать тот факт, что структура БЛ и усиление в главном лепестке ДН ААР не деградируют как в случае модели ПААР, что показано на рисунках, построенных по результатам моделирования. Деградация структуры главной ДН и БЛ представляет серьезную проблему, когда есть мощные перемежающиеся короткие помехи от РЛС, при которых компенсационные петли в ПААР просто не успевают отрабатывать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Максимальный учет специфики работы АР СНРС в условиях помех обуславливает использование для их компенсации алгоритма типа «адаптив—адаптив» или A^2 , с помощью которого значительно сокращаются и экономятся вычислительные средства по аппаратуре и программному обеспечению; устраняется ряд недостатков полностью адаптивной процедуры, применяемой к АР (таких как деградация структуры главного и боковых лепестков АР). Техника A^2 относится в теории адаптивных антен-

ных решеток к классу подоптимальных, тем не менее для АР GPS модель A^2 близка к оптимальной по некоторым инженерным критериям, таким как точность местоопределения, отношение сигнала к помехе и затраты на реализацию.

1. Ломан В. И., Комаров В. М., Нестеренко И. К. Адаптивные антенные решетки в системах широкополосной связи // Зарубежная радиоэлектроника.—1983.—№ 5.—С. 3—23.
2. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки. — М.: Радио и связь, 1986.
3. Проект поправки AN 7/1-99-95 к Т. I Приложения 10 SARPS и инструктивный материал для Глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS). — Монреаль: ICAO, 1999.
4. Applebaum S. P. Adaptive Arrays // IEEE Trans. AP-24.—1976.—N 5, Sept.—P. 585—598.
5. Jablon N. K. Adaptive Beamforming with the Generalized Sidelobe Canceller in presence of Array Imperfection // IEEE Trans. AP-34.—1986.—N 8, Aug.—P. 996—1012.

ADAPTIVE DISTURBANCE COMPENSATION FOR SATELLITE RADIO-NAVIGATION SYSTEMS

E. T. Skoryk, A. V. Kriukov

It is analyzed the problem to ensure the antijamming of users equipment of satellite radio-navigation system (SRHS) based on the adaptive suppression of the active disturbance in a zone of SRHS application by responsible users (aviation, navy, power structures and others). It is suggested the algorithm of two-stage adaptive disturbance suppression (algorithm «adaptive-adaptive» or A^2). This algorithm, as analysis shows, gives a considerable economy of the technical and program means (for some conditions — till two orders) in comparison with algorithm of the completely adaptive antenna arrays.

УДК 681.518

В. І. Іщенко, І. В. Зімчук

Житомирський військовий інститут радіоелектроніки імені С. П. Корольова

Синтез адаптивних алгоритмів оцінювання в умовах нестационарної параметричної невизначеності

Пропонується методика синтезу адаптивних алгоритмів оцінювання вимірюваної інформації в умовах апріорної невизначеності моделі вхідного впливу та статистичних характеристик шумів. Наводиться приклад з результатами цифрового моделювання.

При здійсненні навігації, спостереження за космічними об'єктами та управління літальними апаратами використовується інформація про координати та параметри руху, що отримується за допомогою радіолокаційних слідкувальних систем. В реальних умовах функціонування систем обробки радіолокаційної інформації відомості про помилки вимірювань та збурення в динаміці руху літальних об'єктів, як правило, апріорно невизначені [1, 4, 7]. Для усунення апріорної невизначеності є ряд напрямків у розв'язанні задачі оцінювання: мінімаксний підхід, принцип інваріантності та принцип адаптації [6, 7]. Завдяки можливості забезпечення максимальної точності фільтрації у всьому діапазоні можливих умов функціонування, найбільше розв'язування отримав адаптивний підхід [6, 7].

Один із методів синтезу адаптивних систем фільтрації полягає в тому, що невідомі параметри вхідного впливу приєднуються до складу оцінювань, і розглядається задача фільтрації для розширеного вектора стану [2, 6]. Однак такий підхід пов'язаний з підвищеннем порядку системи оцінювання та збільшенням об'єму необхідних обчислень, що у свою чергу приводить до неможливості реалізації алгоритму в реальному часі.

Другий підхід ґрунтуються на тому, що оцінки невідомих параметрів розраховуються окремим блоком адаптації та використовуються для корекції параметрів неадаптивного блоку фільтрації [1, 9]. Такий підхід порівняно з попереднім не збільшує порядок системи оцінювання та спрощує розв'язання задачі адаптивної фільтрації. Опису різних адап-

тивних алгоритмів, що синтезовані даним методом, присвячені численні публікації, наприклад [1, 2, 4, 6, 7, 9]. Однак практичному застосуванню деяких з них перешкоджають: структурна стадність та пов'язана з цим необхідність виконувати велику кількість матричних обчислень за час, який дорівнює періоду дискретизації [1, 2, 4, 7, 9]; наявність певної кількості апріорної інформації про умови функціонування [1, 4]; умови сталості статистичних характеристик вхідних впливів [6, 9]. Тому при розв'язанні задачі оцінювання в умовах нестационарної параметричної невизначеності, велику зацікавленість викликають питання синтезу простих та водночас ефективних за точністю та обчислювальним затратам алгоритмів з робастними алгоритмами адаптації [7].

В роботі розв'язується задача розробки методики синтезу таких алгоритмів.

Припускається, що на вхід адаптивного алгоритму оцінювання в дискретні моменти часу $t_n = nT$ надходить адитивна суміш корисної складової

$$x(n) = x(n - 1) + \sum_{i=1}^k \frac{T^i}{i!} \Delta^i x(n - 1), \quad (1)$$

та некорельованої завади (помилки вимірювань) $f(n)$:

$$M[f(n)] = 0, \quad M[x(n)f(n)] = 0, \quad (2)$$

$$M[f(n)f(n - 1)] = 0,$$

$$M[f^2(n)] = R(n), \quad (3)$$

Δ^i — ліва i -та різниця від $x(n - 1)$; T — темп

обробки інформації.

Тоді рівняння спостереження прийме вигляд

$$g(n) = x(n) + f(n). \quad (4)$$

Необхідно отримати оцінку вхідної дії $\hat{x}(n)$ оптимальну за критерієм мінімум середнього квадрата помилки оцінки [6]:

$$P(n) = M[\varepsilon^2(n)] \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\varepsilon(n) = x(n) - \hat{x}(n), \quad (6)$$

(де $\varepsilon(n)$ — помилка оцінки) при умові, що модель вхідного впливу $x(n)$ та дисперсія помилок вимірювань $R(n)$ априорно невизначені.

Відомо [6, 9], що адаптивні алгоритми складаються безпосередньо з алгоритмів фільтрації та адаптації. Алгоритм фільтрації може бути синтезований методом «трьох поліномів» [8]. Згідно з методом алгоритми оцінювання та управління визначаються виразами

$$\hat{x}(n) = \frac{C(z) - B(z)}{A(z)} \tilde{u}(n), \quad (7)$$

$$u(n) = \frac{C(z) - A(z)}{C(z) - B(z)} \hat{x}(n). \quad (8)$$

У співвідношеннях (7), (8) $A(z)$ та $B(z)$ — поліноми чисельників передаточних функцій за розузгодженням управління $\tilde{u}(n) = g(n) - u(n)$ та оцінювання $\hat{x}(n) = g(n) - \hat{x}(n)$; $C(z)$ — характеристичний поліном замкненої системи, який визначає її стійкість:

$$C(z) = \frac{A(z) - F_u(z)B(z)}{1 - F_u(z)}, \quad (9)$$

$F_u(z)$ — передаточна функція алгоритму управління.

Здійснити адаптацію синтезованого алгоритму оцінювання можна шляхом підстройки його вагових коефіцієнтів у відповідності зі зміною статистичних характеристик розузгодження спостереження [5, 6, 9], а саме середнім квадратом помилок вимірювань $R(n)$ та екстраполяції:

$$P_e(n) = M[\varepsilon_e^2(n)], \quad (10)$$

$$\varepsilon_e(n) = x(n) - u(n), \quad (11)$$

$\varepsilon_e(n)$ — помилка екстраполяції (управління).

Значення $R(n)$ та $P_e(n)$ розраховуються із взаємної кореляційної функції вибіркової послідовності відповідних помилок. Вказана послідовність помилок утворюється на основі властивості симетрії [3].

Так, для реалізації послідовності помилок вимірювань розраховується N -та різниця від вхідної дії:

$$\Delta^N g(n) = C_N^0 g(n) - C_N^1 g(n-1) + \dots + C_N^N g(n-N).$$

де C_N^j — біноміальний коефіцієнт.

Із рівняння (4)

$$\Delta^N g(n) = \Delta^N x(n) + \Delta^N f(n).$$

Якщо

$$N = k + 1, \quad (12)$$

де k — максимальний степінь задаючого впливу, то

$$\Delta^N x(n) = 0,$$

і тоді

$$\Delta^N g(n) = \Delta^N f(n),$$

або

$$\Delta^N g(n) = \sum_{i=0}^N (-1)^i C_N^i f(n-i). \quad (13)$$

Застосовуючи до різниці $\Delta^N g(n)$ операцію розрахунку дисперсії, з урахуванням умов (2), (3) отримаємо

$$D[\Delta^N g(n)] = \sum_{i=0}^N (-1)^i (C_N^i)^2 R(n-i).$$

Тепер вираз для розрахунку дисперсії помилок вимірювань прийме вигляд

$$R(n) = D[\Delta^N g(n)] - \sum_{i=1}^N (-1)^i (C_N^i)^2 R(n-i). \quad (14)$$

Аналогічний підхід використовується і для визначення середнього квадрата помилок екстраполяції. На підставі рівняння (11) екстрапольоване значення може бути представлене як адитивна суміш корисної складової та помилки екстраполяції:

$$u(n) = x(n) + [-\varepsilon_e(n)].$$

З метою утворення послідовності помилок екстраполяції розраховується N -та різниця від управління $u(n)$:

$$\Delta^N u(n) = \Delta^N x(n) - \Delta^N \varepsilon_e(n). \quad (15)$$

При виконанні умови (12) $\Delta^N x(n) = 0$, і тоді рівняння (15) прийме вигляд

$$\Delta^N u(n) = -\Delta^N \varepsilon_e(n) = -\sum_{i=0}^N (-1)^i C_N^i \varepsilon_e(n-i).$$

Розраховуючи математичне очікування квадрата величини $\Delta^N u(n)$, отримаємо

$$M[(\Delta^N u(n))^2] = \\ = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N (-1)^{i+j} C_N^i C_N^j K(n-i, n-j), \quad (16)$$

де

$$K(n - i, n - j) = M[\varepsilon_e(n - i) \varepsilon_e(n - j)]$$

— коваріаційна функція помилок екстраполяції, яка розраховується наступним чином:

$$K(n - i, n - j) = P_e(n - i), i = j,$$

$$K(n - i, n - j) = M[\tilde{u}(n - i)\tilde{u}(n - j)], i \neq j.$$

Із рівняння (16) визначається середній квадрат помилки екстраполяції:

$$\begin{aligned} P_e(n) &= M[(\Delta^N u(n))^2] - \sum_{i=1}^N (-1)^i C_N^i K(n, n - i) - \\ &- \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^N (-1)^{i+j} C_N^i C_N^j K(n - i, n - j). \end{aligned} \quad (17)$$

В умовах, коли максимальна степінь задаючого впливу $x(n)$ априорно відома, розрахунок $P_e(n)$ та $R(n)$ труднощів не викликає. Якщо такої інформації немає, то необхідно розраховувати різницю на максимальну розмірність. При виконанні цієї вимоги задаючий вплив компенсується повністю і рівняння (14) та (17) залишаються справедливими.

Викладена методика синтезу адаптивних алгоритмів оцінювання в умовах нестационарної параметричної невизначеності описується рівняннями (7), (8), (12), (14), (17). Відмінними рисами пропонованого рішення є: утворення коваріаційної функції послідовності випадкових помилок, що пов'язує параметри фільтра з невідомими статистичними характеристиками розузгодження, здійснюється з використанням концепції зворотних задач динаміки; можливість синтезу інваріантних відносно задаючого впливу алгоритмів адаптації з урахуванням різної міри априорної невизначеності; синтез адаптивних алгоритмів виконується в скалярній формі, без застосування чисельних методів, що не потребує великих обчислювальних затрат для своєї реалізації.

Приклад. Розглянемо задачу оцінювання координат $x(n)$ об'єкта, що рухається зі швидкістю $V(n)$ та здатного маневрувати з постійним прискоренням a в непередбачені для спостерігача (системи оцінювання) моменти часу. Дані про стан об'єкта поступають через сталий проміжок часу T у вигляді вимірювань його координати при наявності некорельованого адитивного шуму (умови (2)). Припускається, що параметри a , $R(n)$ априорно невизначені. Рівняння руху об'єкта з постійною швидкістю та з постійним прискоренням відповідно мають вигляд

$$x(n) = x(n - 1) + V(n - 1)T,$$

$$x(n) = x(n - 1) + V(n - 1)T + \frac{aT^2}{2}.$$

Синтезуємо адаптивний алгоритм оцінювання другого порядку астатизму за каналами оцінювання та управління. Для цього поліноми $A(z)$, $B(z)$, $C(z)$ визначимо у вигляді [8]:

$$\begin{aligned} A(z) &= (1 - z^{-1})^2, \\ B(z) &= b_0(1 - z^{-1})^2, \\ C(z) &= 1 - 2b_0z^{-1} + b_0z^{-2}. \end{aligned}$$

На підставі рівнянь (7), (8) отримаємо алгоритми оцінювання та управління:

$$\hat{x}(n) = K(n)\tilde{u}(n) + 2\hat{x}(n - 1) - \hat{x}(n - 2), \quad (18)$$

$$u(n) = 2\hat{x}(n - 1) - \hat{x}(n - 2),$$

$K(n) = 1 - b_0(n)$ — ваговий коефіцієнт, оптимальне значення якого визначається співвідношенням [5]:

$$K(n) = \frac{P_e(n)}{P_e(n) + R(n)}. \quad (19)$$

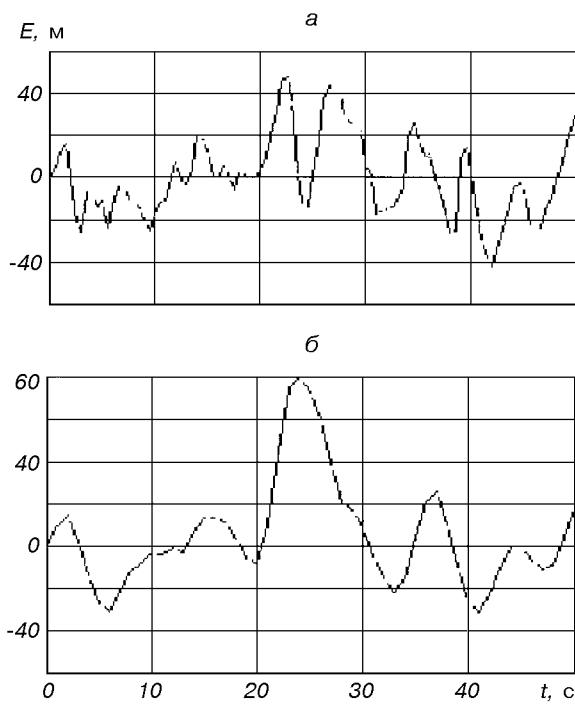
Для розрахунку $R(n)$, $P_e(n)$ скористаємося виразами (14) та (17). Через те що $k = 2$, отримаємо наступні алгоритми:

$$\begin{aligned} R(n) &= D[\Delta^N g(n)] + \\ &+ 9R(n - 1) - 9R(n - 2) + R(n - 3), \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} P_e(n) &= M[(\Delta^3 u(n))^2] + 6M[\tilde{u}(n)\tilde{u}(n - 1)] - \\ &- 6M[\tilde{u}(n)\tilde{u}(n - 2)] + 2M[\tilde{u}(n)\tilde{u}(n - 3)] + \\ &+ 18M[\tilde{u}(n - 1)\tilde{u}(n - 2)] - 6M[\tilde{u}(n - 1)\tilde{u}(n - 3)] + \\ &+ 6M[\tilde{u}(n - 2)\tilde{u}(n - 3)] - \\ &- 9P_e(n - 1) - 9P_e(n - 2) - P_e(n - 3). \end{aligned} \quad (21)$$

Рівняння (18)–(21) повністю описують синтезований адаптивний алгоритм оцінювання, що адаптується як до статистичних характеристик помилок вимірювань, так і до зміни моделі вхідного впливу.

З метою оцінки ефективності синтезованого алгоритму проводилось цифрове моделювання. На інтервалах часу $t = 0 \dots 20$ с та $t = 30 \dots 50$ с модель вхідного впливу $x(n)$ описувалась поліномом першого порядку, а на інтервалі $t = 20 \dots 30$ с — поліномом другого порядку. Під час маневрування прискорення дорівнювало -20 м/с^2 . Похиби вимірювань моделювались з нормальним законом розподілу, нульовим математичним очікуванням та дисперсією 625 м^2 . Дослідження проводилось з темпом обробки інформації 2 Гц [6].



Похибка оцінки адаптивного алгоритму оцінювання (а) та похибка оцінки $\alpha - \beta$ -фільтра (б)

Ефективність синтезованого адаптивного алгоритму оцінювалась за помилкою оцінювання (6) (рисунок а) у порівнянні з роботою $\alpha - \beta$ -фільтра [4] (рисунок б).

З результатів моделювання видно, що на інтервалах рівномірного руху об'єкта спостереження в адаптивному алгоритмі значення помилки оцінюю-

вання таке саме, як і у $\alpha - \beta$ -фільтра, а на інтервалах рівноприскореного руху об'єкта значення помилки в 2.3 раза менше.

1. Гриценко Н. С., Гусаров А. И., Логинов В. П., Севастьянов К. К. Адаптивное оценивание. Часть 1 // Зарубежная радиоэлектроника.—1983.—№ 7.—С. 3—27.
2. Гриценко Н. С., Гусаров А. И., Логинов В. П., Севастьянов К. К. Адаптивное оценивание. Часть 2 // Зарубежная радиоэлектроника.—1985.—№ 3.—С. 3—26.
3. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели. — М.: Наука, 1988.—328 с.
4. Кузьмин С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. — М.: Сов. радио, 1974.—432 с.
5. Медич Дж. Статистически оптимальные оценки и управление / Под ред. А. С. Штаталова. — М.: Энергия, 1973.—440 с.
6. Первачев С. В., Перов А. И. Адаптивная фильтрация сообщений. — М.: Радио и связь, 1991.—160 с.
7. Петров А. В., Яковлев А. А. Анализ и синтез радиотехнических комплексов / Под ред. В. Е. Дулевича. — М.: Радио и связь, 1984.—248 с.
8. Пушкарев Ю. А., Ревенко В. Б. Новый структурный метод синтеза эффективных цифровых фильтров обработки информации для автоматических следящих систем // Проблемы управления и информатики.—1995.—№ 1.—С. 38—48.
9. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / Пер. с англ. и под ред. К. Т. Леондеса. — М.: Мир, 1980.—408 с.

SYNTHESIS OF ADAPTIVE ESTIMATE ALGORITHMS UNDER CONDITIONS OF INSTABILITY PARAMETRIC VAGUENESS

V. I. Ischenko, I. V. Zimchuk

Synthesis procedure of the adaptive algorithms of the measuring information estimating under conditions of a priori vagueness of the entrance influence simulation and statistical noises characteristics is proposed. The results of numerical simulation are given.

Д. В. П'ясковський, С. В. Ковбасюк, В. І. Шестаков

Житомирський військовий інститут радіоелектроніки імені С. П. Корольова

Визначення параметрів руху КА системою допплерівських вимірювачів

Розглянута можливість визначення орбітальних параметрів КА за допомогою системи допплерівських вимірювачів частоти. Приведені результати математичного моделювання.

В навколоzemному космічному просторі знаходяться тисячі космічних апаратів, які належать різним державам і мають різне призначення. Надійність і якість їхнього функціонування залежить від багатьох факторів, одним з яких є знання поточних параметрів орбіти КА. Тому їхня чітка робота неможлива без розвиненої системи навігаційного забезпечення. Необхідно завжди з потрібою точністю знати, де КА знаходиться в даний момент, і якою буде його траєкторія на момент часу, який визначається задачами польоту [4].

Як правило, навігаційне забезпечення здійснюється мережею наземних пунктів, які обладнані відповідними радіолокаційними засобами, засобами передачі та обробки вимірювальної інформації [3, 4, 6, 7]. Ці пункти є елементами наземних командно-вимірювальних комплексів, які керують рухом, роботою КА та являють собою складну і дуже дорогу радіотехнічну систему. Тому актуальним стає питання організації навігаційного забезпечення поширеними відносно не дорогими засобами.

Одним із шляхів отримання навігаційної інформації про КА є прийом і обробка безперервного сигналу, який випромінюється цим ШСЗ. Випромінювання безперервного сигналу характерне як для апаратів космічної складової навігаційних систем, так і для КА інших систем і призначення [3].

Як відомо, внаслідок руху випромінювача (в нашому випадку КА) відносно приймача спостерігається ефект Допплера [1, 6—8]. Цей ефект покладений в основу допплерівських вимірювачів швидкості і широко використовується для визначення складових вектора швидкості об'єкта спостереження. Самі вимірювачі є відносно недорогими технічними пристроями.

Окрім питання задачі визначення параметрів руху КА допплерівськими вимірювачами швидкості

висвітлені досить широко. Так, в роботі [7] викладені динамічні властивості допплерівського зсуву несучої частоти радіосигналу як радіонавігаційного параметра. В [1, 7] подані окремі алгоритми розв'язання навігаційних задач з вибірки вимірювань. Однак логічно закінчених алгоритмів визначення орбітальних параметрів КА з вибірки вимірювань допплерівської частоти, які могли бути покладені в основу розробки відповідної технічної системи або математичної моделі, в [1, 6—8] не приведено.

Метою нашої роботи є дослідження можливості визначення орбітальних параметрів КА з вибірки вимірювань допплерівської частоти.

Розв'язання задачі визначення орбітальних параметрів КА з вибірки вимірювань допплерівської частоти передбачається здійснювати в два етапи. На першому виявляється можливість знаходження дальності до об'єкта спостереження за вимірюваннями допплерівської частоти. На другому — безпосередній розрахунок орбітальних параметрів КА.

Відомо, що допплерівська частота f_{Δ} міститься в сигналі, який приймається від КА:

$$\sin \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) = \sin 2\pi \int (f_0 + f_{\Delta}) dt,$$

де ω — циклічна частота, t — поточний час, r — дальність до випромінювача, c — швидкість світла, f_0 — несуча частота коливань сигналу, який приймається, причому

$$f_{\Delta} = -r' \frac{f_0}{c} = -\frac{r'}{\lambda}, \quad (1)$$

де r' — радіальна швидкість, λ — довжина хвилі несучого коливання.

Зв'язок допплерівської частоти з динамікою зміни параметрів руху КА відносно вимірювача подано на рис. 1.

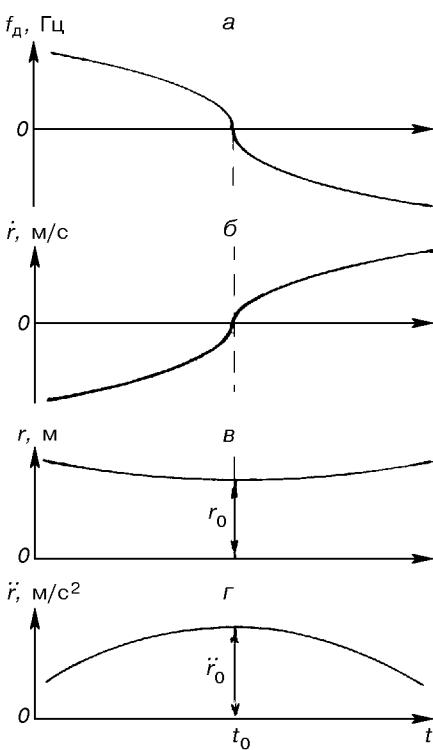


Рис. 1. Зв'язок допплерівської частоти з динамікою зміни параметрів руху КА відносно вимірювача: *a* — допплерівська частоти, *b* — радіальної швидкості, *c* — дальності, *z* — радіального прискорення

Нехай на визначеному часовому інтервалі відбувається спостереження безперервного сигналу з частотою f одним із методів, запропонованіх, наприклад, в [7]. Визначається допплерівська по правка і за допомогою швидкого перетворення Фур'є (як варіант) виконується розбивка цього сигналу на певні інтервали. Тоді із виразу (1) можна визначити зміну радіальної швидкості в деякі фіксовані моменти часу з інтервалом Δt . Якщо застосувати до отриманої таким чином вибірки один із методів статистичної обробки, можна знайти поліном, який відображав би закон зміни радіальної швидкості в часі. Використовуючи метод найменших квадратів з урахуванням заміни дискрети часу відповідним параметром x реальну функціональну залежність $\dot{r}(x)$ можна апроксимувати узагальненим поліномом вигляду [5]:

$$\dot{r}(x) = \varphi^T(x)C, \quad (2)$$

де $\varphi^T(x)$ — вектор довільних реальних гладких функцій, C — вектор-стовпець коефіцієнтів апроксимуючої функції. Шляхом диференціювання і інтегрування виразу (2) можна визначити апроксимуючі поліноми для радіального прискорення:

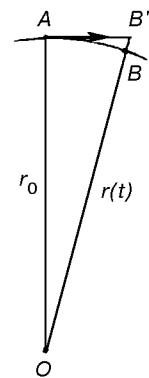


Рис. 2. Визначення швидкості $V_{\text{КА}}$

$$\ddot{r}(x) = [\varphi^T(x)C] \frac{d}{dt} \quad (3)$$

і дальності до об'єкта спостереження:

$$\mathbf{r}(x) = \mathbf{r}_0 + \int_x \varphi^T(x) C dt, \quad (4)$$

де r_0 — траверзна відстань.

Для знаходження траверзної відстані можна скористатись відомою залежністю [1, 6, 8]

$$r_0 = \frac{V_{\text{KA}}^2}{\ddot{r}_0}, \quad (5)$$

де \ddot{r}_0 — значення радіального прискорення в точці траверза.

При відсутності априорної інформації про висоту орбіти КА його швидкість V_{KA} можна визначити таким чином. Розглянемо геометричне подання задачі (рис. 2). Поблизу точки траверза шлях AB , який пройде КА по орбіті за малий проміжок часу Δt , можна подати відрізком AB' . Тоді

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + (V_{\text{KA}}\Delta t)^2}. \quad (6)$$

Із виразів (5) і (6) на момент часу t отримаємо

$$V_{\text{KA}} = \frac{\Delta t \ddot{r}_0 \dot{r}_t}{\sqrt{\Delta t^2 \ddot{r}_0^2 - \dot{r}_t^2}}.$$

Таким чином, на першому етапі шляхом фізичних представлень і математичних перетворень показана можливість отримання значення дальності від вимірювача до КА та радіальних швидкості і прискорення в будь-який момент часу на інтервалі його спостереження за результатами вимірювання частоти Допплера.

Розглянемо другий етап, де для знаходження орбітальних параметрів КА пропонується використовувати систему допплерівських вимірювачів, яка складається із трьох позицій і центру обробки інформації.

Розташовані на деякій відстані один від одного вимірювальні пункти можуть передавати в центр обробки коефіцієнти поліномів вигляду (2)–(4), де здійснюється їхня прив'язка до єдиного часу. Таким чином, на момент часу t з'являється можливість отримання трьох дальностей (значення радіуса-вектора) до КА. За перетином трьох радіус-векторів можна знайти просторові координати об'єкта спостереження.

Розглянемо геометрію задачі. В геоцентричній системі координат позначимо відстані між пунктами допплерівських вимірювачів O_1, O_2, O_3 і початком координат як R_1, R_2, R_3 , дальності до КА в точці T через r_1, r_2, r_3 , а відстань OT — як R (рис. 3). Координати вимірювачів знаходяться з їхньої геодезичної прив'язки за виразами [2], які в геоцентричній системі координат записуються відповідно (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) , (X_3, Y_3, Z_3) .

Використовуючи рівняння сферичної поверхні

$$(X_i - X_T)^2 + (Y_i - Y_T)^2 + (Z_i - Z_T)^2 - r_i^2 = 0$$

(де X_T, Y_T, Z_T — невідомі координати об'єкта, i — номери позицій) і значення різниць $R_1^2 - R_2^2, R_1^2 - R_3^2, R_2^2 - R_3^2$, після математичних перетворень координати точки T можна представити у вигляді

$$X_T = e_1 - aY_T,$$

$$Z_T = e_2 - bY_T.$$

Тут

$$e_1 = \frac{c_1(Z_2 - Z_3) - c_3(Z_1 - Z_2)}{(X_1 - X_2)(Z_2 - Z_3) - (X_2 - X_3)(Z_1 - Z_2)},$$

$$e_2 = \frac{c_3(X_1 - X_2) - c_1(X_2 - X_3)}{(X_1 - X_2)(Z_2 - Z_3) - (X_2 - X_3)(Z_1 - Z_2)},$$

$$a = \frac{(Y_1 - Y_2)(Z_2 - Z_3) - (Y_2 - Y_3)(Z_1 - Z_2)}{(X_1 - X_2)(Z_2 - Z_3) - (X_2 - X_3)(Z_1 - Z_2)},$$

$$b = \frac{(X_1 - X_2)(Y_2 - Y_3) - (X_2 - X_3)(Y_1 - Y_2)}{(X_1 - X_2)(Z_2 - Z_3) - (X_2 - X_3)(Z_1 - Z_2)},$$

$$c_1 = 0.5(r_2^2 - r_1^2 + R_1^2 - R_2^2),$$

$$c_2 = 0.5(r_3^2 - r_1^2 + R_1^2 - R_3^2),$$

$$c_3 = 0.5(r_3^2 - r_2^2 + R_2^2 - R_3^2).$$

Координату Y_T можна отримати з квадратного рівняння вигляду

$$(1 + a^2 + b^2)Y_T^2 + 2(X_1a - Y_1 + Z_1b - ae_1 - be_2)Y_T - (r_1^2 - R_1^2 - e_1^2 - e_2^2 + 2X_1e_1 + 2Z_1e_2) = 0.$$

Таким чином, в будь-який момент часу t на інтервалі спостереження КА системою допплерівських вимірювачів можна отримати його координати

ти в геоцентричній відносній системі координат.

Для знаходження кеплерових параметрів руху необхідно знайти швидкості зміни цих координат. Для цього визначаються геоцентричні координати КА на наступному кроці вимірювання і застосовується просте диференціювання:

$$\|V\| = (\|X_n\| - \|X_{n-1}\|)/\Delta t,$$

де V — вектор швидкості зміни вектора координат $\|X\|$ на момент часу n .

Після перетворення координат КА із геоцентричної відносної $\|X_{TO}\|$ в геоцентричну абсолютну $\|X_{GA}\|$

$$\|X_{GA}\| = A_{GA, TO} \|X_{TO}\|,$$

$$\|V_{GA}\| = A_{GA, TO} \|V_{TO}\|,$$

де A — матриця переходу, подана в [2], визначення параметрів орбіти зводиться до розрахунку відомих формульних залежностей [2, 7].

Таким чином, на основі інформації від допплерівських вимірювачів швидкості отримано алгоритм визначення орбітальних параметрів руху КА.

Точнісні характеристики алгоритму досліджувались шляхом його математичного моделювання.

Суттєвим фактором, який впливає на радіонавігаційні параметри, що вимірюються, є нестабільність частоти опорних генераторів КА і допплерівських вимірювачів [7]. Відхилення частоти генератора від номінальної викликає похибку оцінки допплерівського зсуву частоти. Генератори, які встановлюються на КА, можуть мати відносне відхилення частоти $\Delta f/f_0 = 10^{-11} \dots 10^{-14}$. Генератори допплерівських вимірювачів мають більше значення відхилення дійсного значення частоти: $\Delta f/f_0 =$

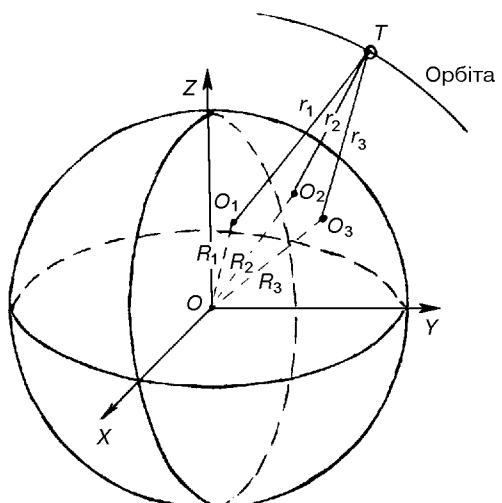


Рис. 3. Геометричне подання задачі визначення координат в геоцентричній відносній системі

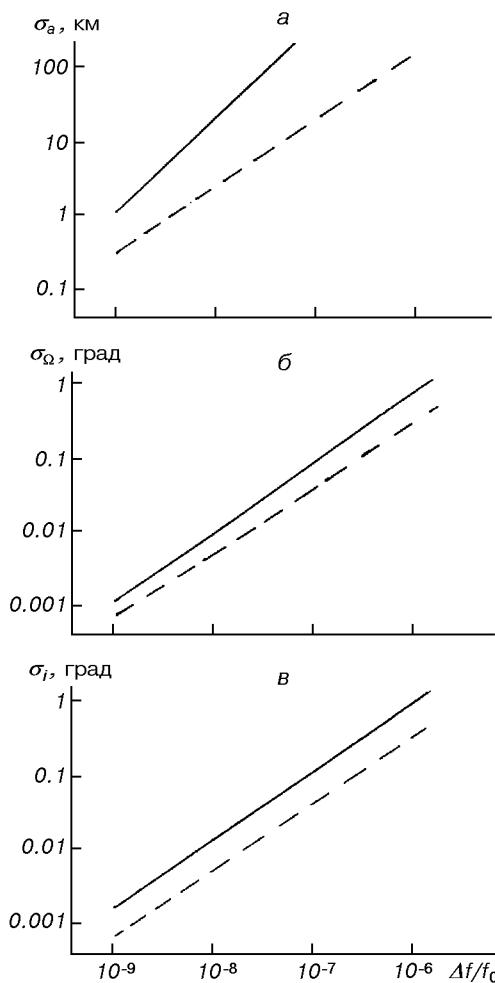


Рис. 4. Залежність похибок визначення орбітальних параметрів від $\Delta f/f_0$ (великої півосі σ_a , висхідного вузла σ_Ω і нахилу орбіти σ_i)

$= 10^{-6} \dots 10^{-9}$ [7]. Практично на похибку визначення параметрів високостабільний сигнал КА не впливає. Тому шляхом математичного моделювання руху КА і поданого алгоритму було проведено дослідження впливу $\Delta f/f_0$ генератора допплерівських вимірювачів на помилку визначення орбітальних параметрів. Умови моделювання: КА рухається по навколополярній низькій круговій орбіті і випромінює безперервний сигнал з несуючою частотою f_0 . Вимірювальні пункти розташовані по вершинах рівностороннього трикутника. Інтервал зняття інформації складає 0.5 с. Опорна частота генератора допплерівського вимірювача прийнята згідно з [7]. Результати моделювання показані на

рис. 4, де відображені залежності середнього квадратичного відхилення помилки визначення відповідно великої півосі σ_a , висхідного вузла σ_Ω і нахилу орбіти σ_i від відносного відхилення частоти $\Delta f/f_0$ опорного генератора допплерівських вимірювачів за сигналами КА з несуючою частотою $f_0 = 150$ МГц (суцільна лінія) і $f_0 = 400$ МГц (штрихова лінія). Видно, що точність визначення орбітальних параметрів критична до $\Delta f/f_0$. Тому для отримання високоточних навігаційних параметрів необхідна вимірювальна апаратура з якнайбільшою стабільністю опорного генератора частот.

Таким чином, запропонований двоетапний підхід, коли на першому етапі за вимірами допплерівської частоти визначаються дальності від КА до вимірювачів, на другому — розраховуються геоцентричні координати, дозволяє визначити параметри орбіт КА, які випромінюють сигнал радіочастоти, при мінімальних економічних витратах. Подана послідовність дій є логічно завершеним алгоритмом визначення орбітальних параметрів руху КА і може бути використана при створенні відповідних засобів навігаційного забезпечення польотів ШСЗ.

- Громов Г. Н. Дифференциально-геометрический метод навигации. — М.: Радио и связь, 1986.—384 с.
- Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки транспортных измерений.—М.: Сов.радио, 1978.—384 с.
- Инженерный справочник по космической технике. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. А. В. Солодова. — М.: Военизмат, 1977.—430 с.
- Космические аппараты / Под общ. ред. К. П. Феоктистова. — М.: Военизмат, 1983.—319 с.
- Лоунсон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Пер. с англ. — М.: Наука, 1986.—232 с.
- Никитенко Ю. И., Быков В. И., Устинов Ю. М. Судовые радионавигационные системы: Учеб. для вузов. — М.: Транспорт, 1992.—336 с.
- Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцевич и др. / Под ред. П. П. Дмитриева и В.С. Шебшаевича. — М.: Радио и связь, 1982.—272 с.
- Ярлыков М. С. Статистическая теория радионавигации. — М.: Радио и связь, 1989.—344 с.

DETERMINATION OF SPACECRAFT MOTION PARAMETERS BY DOPPLER GAUGES SYSTEM

D. V. Piaskov's'kyi, S. V. Kovbasiuk, and V. I. Shestakov

Possibility of spacecraft orbital parameters determination using the system of Doppler frequency gauges is considered. The results of mathematical simulation are given.

УДК 629.7.05:621.391.268

Д. В. П'ясковський, С. В. Водоп'ян, І. Д. Варламов

Житомирського військового інституту радіоелектроніки імені С. П. Корольова

Адаптивний кореляційно-екстремальний
алгоритм навігації космічного апарату
по геофізичних полях на основі
диференціально-тейлорівських перетворень

Розглядається задача навігації космічних апаратів по фізичних полях Землі. Для розв'язку задачі пропонується використовувати ітераційний процес байесівського уточнення на основі диференціальних перетворень. Показано, що такий підхід забезпечує спрощення обчислень у порівнянні з традиційними кореляційно-екстремальними методами. Наводяться результати досліджень запропонованого алгоритму.

ВСТУП

Для вирішення задач навігації широко застосовуються кореляційно-екстремальні методи [2, 3], в тому числі для навігації сучасних орбітальних засобів по геофізичних полях Землі [4, 5]. Ці поля забезпечують значно більшу надійність, завадостійкість та автономність у порівнянні з штучними навігаційними полями [4]. Частіше за все вирішення такої задачі базується на методах цифрової обробки просторового розподілу інтенсивності навігаційного поля, але широкому застосуванню алгоритмів просторової обробки на борту космічних апаратів в реальному масштабі часу перешкоджає значна складність обчислень [10].

Проблемам обчислень кореляційно-екстремальних алгоритмів приділяється значна увага, однак традиційні методи (різницево-кореляційний, обчислення кореляційної функції за допомогою швидкого перетворення Фур'є, послідовного визначення подібності зображень та інші) зменшують тривалість обчислень лише на порядок у порівнянні з класичним кореляційно-екстремальним алгоритмом [2]. Підвищення ефективності можливе при доповненні їх процедурами управління спостереженням [11].

Ще більшу ефективність дає використання диференціально-тейлорівських перетворень [12], що дозволяє подати широке коло нелінійних або нестационарних рівнянь у вигляді алгебраїчних спів-

відношень [8, 9]. На відміну від інших операційних методів алгебраїчні моделі нестационарних та нелінійних рівнянь, отримані за допомогою диференціальних перетворень, не містять методичної похибки, а синтезовані алгоритми оцінювання або управління ефективні з погляду швидкодії та точності.

АНАЛІЗ ЗАДАЧІ

Розглянемо цифрову еталонну модель просторового або поверхневого навігаційного поля розміром $M \times M \times M$ або $M \times M$ та поточний вимір (зображення) даного поля розміром $N \times N$. Розмір поточного виміру може бути значно меншим за розмір еталонної моделі.

Пристрій вимірювання навігаційного поля жорстко закріплений на космічному апараті, який здійснює одночасно два види керованого руху: поступальний — центра мас та обертальний — відносно центра мас. Крім того, на платформу діють збурюючі фактори, які призводять до зсуву платформи як по кутових $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, так і по лінійних Δx , Δy , Δz координатах. Як наслідок, виникає відхилення поточного положення платформи від прогнозованого.

Слід визначити оцінку величин Δx , Δy (для поверхневого поля) чи Δx , Δy , Δz (для просторового

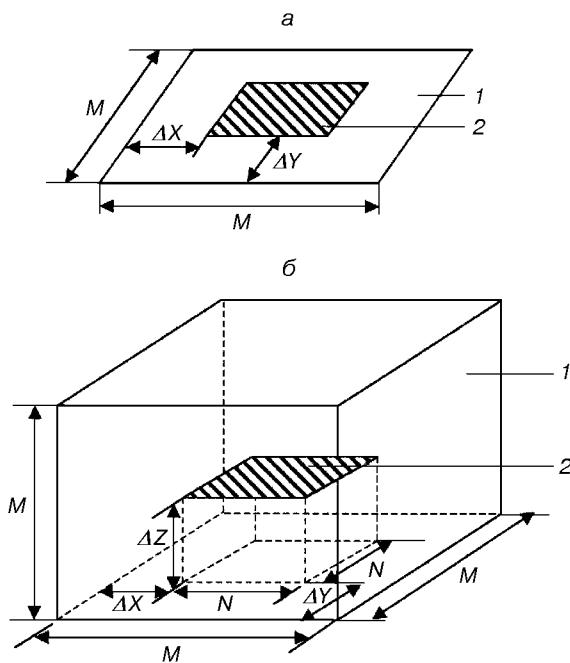


Рис. 1. Прив'язка зображень: а — двовимірний зсув, б — тривимірний зсув. 1 — еталонна модель поля, 2 — поточний вимір навігаційного поля

полія), які характеризують зсув поточного виміру відносно еталону (рис. 1), що дає змогу визначити положення космічного апарату у потрібній системі координат.

Традиційно для розв'язку задачі прив'язки зображень використовують різні модифікації класичного кореляційно-екстремального алгоритму [1–3, 7, 11, 13, 14]. Як правило, всі ці алгоритми мають комбінаторний характер, тобто тривалість розв'язку задачі визначається функцією виду $\tau = kN^m$, $m > 1$. Наприклад, класичний кореляційно-екстремальний алгоритм, що ґрунтується на повному переборі варіантів, має складність порядку $O(N^4)$. Таким чином, при збільшенні розміру зображення кількість елементарних операцій значно збільшується. Наприклад, якщо $N = 10$, то треба зробити 10^4 операцій, якщо $N = 1000$, то кількість операцій буде дорівнювати 10^{12} . Внаслідок цього комбінаторні алгоритми не дозволяють розв'язувати задачі поєднання зображень у реальному масштабі часу в системах, де потрібно обробляти зображення зі значними розмірами, в тому числі й в кореляційно-екстремальних системах навігації, де розміри зображень можуть складати тисячі — десятки тисяч дискрет.

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ЗАДАЧІ СУМІЩЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИСТЕМАХ (КЕС)

Еталонне зображення є реалізацією стохастичного двовимірного поля і для його обробки засобами електронної обчислювальної техніки найчастіше використовують форму, що подана у вигляді матриці:

$$S(x, y), \quad x \leq M, \quad y \leq M,$$

де $M \times M$ — розмір зображення.

Аналогічно може бути описане поточне зображення:

$$R(x - \Delta x, y - \Delta y), \quad x \leq N,$$

$$y \leq N, \quad N \leq M,$$

де $\Delta x, \Delta y$ — величина дискретного зсуву по відповідних координатах; $N \times N$ — розмір зображення.

В цілому еталонне та поточне зображення пов'язані сукупністю перетворень [1]:

$$R = A_\Gamma A_p A_K [S] + F, \quad (1)$$

де A_Γ, A_p — оператори геометричного і радіометричного перетворень відповідно; A_K — оператор квантування за часом та простором; F — просторово-часовий стохастичний процес.

Метою розв'язку задачі суміщення зображень є визначення величин зсуву $\Delta x, \Delta y$, тобто

$$\Delta = A_0 [S, R],$$

де $\Delta = [\Delta x, \Delta y]$, A_0 — оператор (алгоритм) обробки.

Слід відмітити, що розв'язок задачі у загальному випадку (1) є складною науково-технічною проблемою, тому у більшості випадків [2, 3, 7] дослідники вимушенні розділяти процес обробки зображень на певні етапи.

Будемо вважати, що на етапі первинної обробки виконані геометричні та радіометричні перетворення і обидва зображення подані в єдиному просторово-часовому базисі. Тоді класичний алгоритм кореляційно-екстремального аналізу (КЕА) полягає у знаходженні глобального максимуму функціонального виду:

$$I = \int \int S(x - \tau_x, y - \tau_y, t) R(x - \tau_x, y - \tau_y, t) d\tau_x d\tau_y. \quad (2)$$

Хоча алгоритм (2) і дозволяє отримати оцінки $\Delta x, \Delta y$ з достатньо високою точністю, його застосування обмежене через значну складність обчислень.

У багатьох навігаційних та деяких інших системах, що працюють в реальному масштабі часу, визначення розугодження зображень проводиться із умови [3]:

$$\frac{\partial I}{\partial x^*} = 0, \quad \frac{\partial I}{\partial y^*} = 0. \quad (3)$$

Технічна реалізація алгоритмів КЕА на основі (3) може бути достатньо простою у вигляді автоматичної слідкувальної системи з моноімпульсним способом вимірювання вхідної інформації [4]. При цьому слідкувальна диференційна КЕНС в усталеному режимі знаходить і підтримує положення, що визначає Δx , Δy із умови (3).

Незважаючи на високу точність і можливість роботи в режимі реального часу, диференційним КЕНС властивий ряд недоліків, основним із яких є обмеження поля зору моноімпульсного вимірювача виду:

$$\begin{aligned} [t_{\max} - t_{\min}] &< \alpha_t, \\ [x_{\max} - x_{\min}] &< \alpha_x, \\ [y_{\max} - y_{\min}] &< \alpha_y, \end{aligned} \quad (4)$$

де α_x , α_y , α_t — інтервали кореляції просторово-часового поля.

Під час порушення умов (4) диференційна КЕНС втрачає працездатність внаслідок зриву процесу супроводження [4].

У більшості випадків отримане зображення з борту КА характеризується нестационарним розподілом просторово-часового поля, внаслідок чого інтервали кореляції (4) можуть змінюватись в широкому діапазоні. Таким чином, досить актуальною є задача розробки КЕА з невисокою обчислювальною складністю, адаптивного до структури просторово-часового поля.

СТРУКТУРА КЕА НА ОСНОВІ АПРОКСИМАЦІЇ

Для реалізації адаптивного алгоритму розглянемо можливість застосування процедури послідовного уточнення з використанням структури фільтра Калмана (рис. 2).

Робота алгоритму ґрунтуються на процесах послідовного уточнення попередньої оцінки та управління спостереженням.

Для управління процесом спостереження використовується дискримінатор, що дозволяє вибрати із еталонного зображення кадр із заданими розмірами $K \times K$ та положенням \bar{K} .

На першому кроці ще невідома оцінка зсуву Δ , і ширина дискримінаторної характеристики визначає

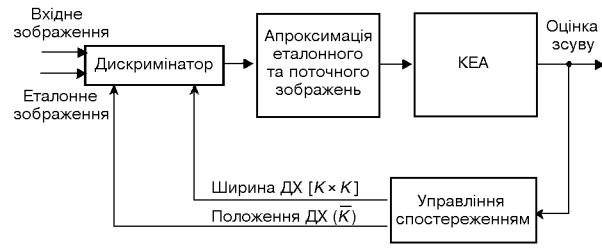


Рис. 2. Процедура послідовного уточнення з використанням структури фільтра Калмана

повне поле еталонного зображення (ЕЗ). У цих умовах поліноміальна апроксимація ЕЗ відтворює в основному низькі просторові частоти, а оцінка зсуву Δ забезпечує лише перше наближення. Процедура управління спостереженням на основі першої оцінки зсуву визначає нове положення та ширину дискримінаторної характеристики. Критерієм ефективності оцінювання є умова:

$$K_i < K_{i-1},$$

де K_i , K_{i-1} — значення ширини ДХ відповідному кроці ітеративного процесу.

Таким чином, на другому кроці КЕА розміри аналізованого фрагменту еталонного зображення повинні зменшитись за рахунок звуження ширини ДХ. При цьому точність апроксимації покращується внаслідок відтворення більш високочастотних просторових компонентів. У результаті оцінка Δ буде краща за попередню, а ширина ДХ для проведення наступної ітерації ще більш звузиться. Процедура послідовного уточнення величини зсуву Δ може повторюватись до моменту, коли буде досягнута необхідна точність прив'язки зображень.

АЛГОРИТМ АПРОКСИМАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Нехай поточне зображення складається з детермінованої $r(x, y, t)$ та стохастичної $f(x, y, t)$ складових:

$$R(x, y, t) = r(x, y, t) + f(x, y, t),$$

$$\Delta x_s \ll X, \quad \Delta y_s \ll Y,$$

$$\Delta n_x \ll X, \quad \Delta n_y \ll Y,$$

причому r та f некорельовані.

Тоді функціонал (2) може бути поданий у такий спосіб:

$$\begin{aligned} I &= M[S(x, y, t)R(x, y, t)] = \\ &= M[S(x, y, t)r(x, y, t)] + M[S(x, y, t)f(x, y, t)] = \end{aligned}$$

$$= M[S(x, y, t)r(x, y, t)] \approx M[\hat{S}(x, y, t)\hat{r}(x, y, t)], \quad (5)$$

де $\hat{S}(x, y, t)$, $\hat{r}(x, y, t)$ — апроксимація еталонного та поточного зображень.

Приблизна рівність (5) буде тим точніша, чим вища точність апроксимуючого полінома або вужча ширина ДХ.

Для синтезу алгоритму апроксимації скористається методом рівних площин [9], згідно з яким умовою точної апроксимації є обмежено заданої функції $S(t)$ деяким поліномом $S(t)$ є тотожність площин під їхніми графіками на заданому відрізку $G = [0, b]$, тобто

$$\int_0^{b_i} S(t)dt = \int_0^{b_i} \hat{S}(t)dt, \quad V_i, 0 \leq i \leq V,$$

$$\begin{aligned} S(t) &= S_0 + S_1 t + \dots + S_n t^n, \\ \hat{S}(t) &= \hat{S}_0 + \hat{S}_1 t + \dots + \hat{S}_n t^n. \end{aligned} \quad (6)$$

Використовуючи диференціально-тейлорівські перетворення Г. Е. Пухова [8, 9]:

$$X_k = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k x(t)}{dt^k} \right]_{t=0},$$

$$k = 0, 1, 2, \dots,$$

$$x(t) = X_{(0)} + X_{(1)} \frac{t}{H} + X_{(2)} \left(\frac{t}{H} \right)^2 + \dots,$$

отримаємо модель апроксимації на основі використання диференціальних спектрів $S(q)$ та $\hat{S}(q)$, тобто

$$S(q) = S_0 + S_1 H q + S_2 H^2 q^2 + \dots + S_n H^n q^n,$$

$$S_r(q) = S(q) + \tau \partial [S(q)] + \tau^2 \partial^2 [S(q)] + \dots + \hat{S}_n H^n q^n,$$

$$q \equiv \frac{t}{H}.$$

Тут $\hat{S}_0, \hat{S}_1, \dots, \hat{S}_n$ — невідомі коефіцієнти апроксимуючого полінома. Для знаходження невідомих коефіцієнтів розіб'ємо діапазон визначення $[0, b]$ на V діапазонів виду $[0, b_i]$, $0 \leq i \leq V$, b_i — задані величини. Тоді на кожному з цих діапазонів чисельними методами може бути визначений функціонал:

$$V_i = \int_0^{b_i} S(t)dt. \quad (7)$$

Сукупність співвідношень (6) для V діапазонів може бути подана у вигляді матричного запису системи лінійних рівнянь виду:

$$\mathbf{H} \times \mathbf{X} = \mathbf{V},$$

де

$$\mathbf{X} = [\hat{S}_0 \hat{S}_1 \dots \hat{S}_V],$$

$$\mathbf{V} = [V_0 V_1 V_2 \dots V_V],$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} b_0 & \frac{b_0^2}{2} & \dots & \frac{b_0^{V+1}}{V+1} \\ b_1 & \frac{b_1^2}{2} & \dots & \frac{b_1^{V+1}}{V+1} \\ b_V & \frac{b_V^2}{2} & \dots & \frac{b_V^{V+1}}{V+1} \end{bmatrix}.$$

Тут \mathbf{V} — вектор відомих значень, визначених за (7), \mathbf{H} — матриця відомих коефіцієнтів, \mathbf{X} — вектор невідомих коефіцієнтів.

Неважко впевнитися, що коефіцієнти апроксимуючого полінома можуть бути знайдені за виразом

$$\mathbf{X} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{V}.$$

АЛГОРИТМ АНАЛІТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМУМУ КОРЕЛЯЦІЙНОГО ІНТЕГРАЛА

Для значного зниження обчислювальної складності КЕА може бути використана аналітична форма подання еталонного та поточного зображень у вигляді поліномів відносно диференціальних спектрів (ДС), тобто

$$r(q) = (r_0 + r_1 H q + r_2 H^2 q^2 + \dots) - a,$$

$$S(q) = S_0 + S_1 H q + S_2 H^2 q^2 + \dots,$$

$$S_r(q) = S(q) + \tau \partial [S(q)] + \tau^2 \partial^2 [S(q)] + \dots - b,$$

де $S_r(q)$ — поліноміальний ДС зображення, зсунутого на невідому величину τ ; r_i, s_i — відомі коефіцієнти

Із умови $\frac{\partial I}{\partial \tau} = 0$ маємо рівняння для визначення невідомого зсуву τ виду

$$m_0 + m_1 \tau + m_2 \tau^2 + \dots + m_V \tau^V = 0,$$

де $m_i = F(r_0, r_1, \dots, r_V, S_0, S_1, \dots, S_V)$.

Таким чином, задача пошуку максимуму кореляційного інтегралу аналітичним методом зводиться до пошуку кореня τ алгебраїчного рівняння степеня V , що можна зробити відомими чисельними методами без значних обчислювальних затрат.

ПРИКЛАД

Розглянемо приклад використання запропонованого алгоритму прив'язки зображень для розв'язання задачі навігації космічного апарату по магнітному

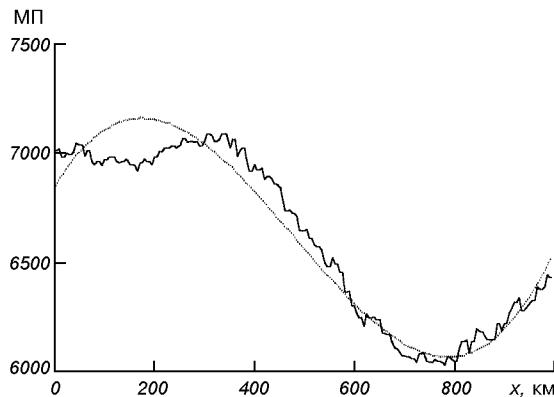


Рис. 3. Еталонне зображення магнітного поля розміром 1000 км та його апроксимація поліноміальною функцією

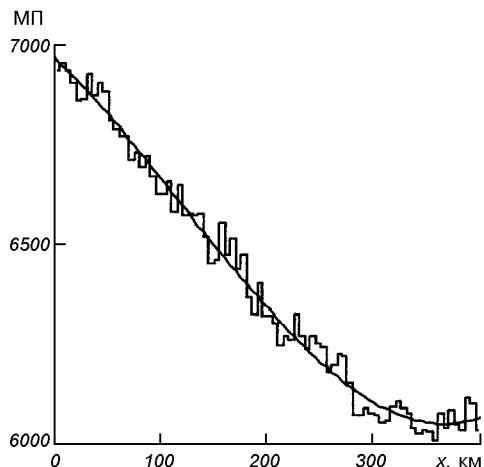


Рис. 4. Поточне зображення магнітного поля та його апроксимація

полю Землі [4, 6].

Еталонне зображення магнітного поля розміром 1000 км для прийнятих параметрів руху космічного апарату та його апроксимація поліноміальною функцією наведена на рис. 3.

Зображення результатів вимірювання магнітного поля з борту КА протягом 400 км подано на рис. 4. Для проведення моделювання було здійснено зсув у обох зображеннях, що дорівнював 400 км.

На першому кроці ітераційного процесу отримано такі результати: оцінка зсуву дорівнює 300 км, що дає похибку у 100 км, та середнє квадратичне відхилення — 40 км. Таким чином, найбільш вірогідно, що дійсне розугодження за законом Зо знаходиться в діапазоні від 180 до 820 км. У подальшому для аналізу візьмемо цей відрізок еталону. Він та його апроксимація показані на рис. 5.

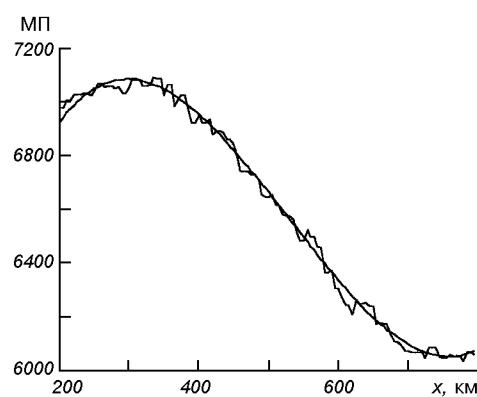


Рис. 5. Еталонне зображення магнітного поля з найбільш інформативною частиною для другого кроку ітерації та його апроксимація

З рис. 5 видно, що в результаті звуження діапазону відрізок аналізованого еталону менший за $X \in [180, 820]$ км, точність апроксимації вища, а результати прив'язки повинні бути кращими.

На другому кроці ітераційного процесу отримано такі результати: оцінка зсуву зображень дорівнює 390 км (що знижує похибку до 10 км), середнє квадратичне відхилення складає 10 км.

Якщо отримана точність оцінки незадовільна, то робиться наступний крок ітерації, де аналізується діапазон еталону на відрізку від 360 до 820 км. При необхідності робиться ще крок і т. п.

На двадцятій ітерації точність прив'язки досягає 150 м, що значно краще за точність балістичної прив'язки $\Delta L = 3.5$ км.

Потенційні характеристики розробленого алгоритму кореляційно-екстремального прив'язки зображення залежать від характеристик використовуваного поля. В наведеному прикладі гранична точність оцінки навігаційних параметрів по магнітному полю Землі визначається радіусом кореляції, величина якого за матеріалами [4] складає десятки метрів.

Таким чином, розроблено кореляційно-екстремальний алгоритм, ефективний за точністю та обчислювальною складністю. Особливістю алгоритму є його структура, еквівалентна фільтру Калмана, та невисока обчислювальна складність за рахунок використання математичного апарату диференційних перетворень. Розроблений алгоритм був використаний для розв'язання задачі навігації космічного апарату по магнітному полю Землі. Ефективність алгоритму підтверджена математичним модулюванням.

1. Андросов В. А., Бойко Ю. В., Бочкарев А. М., Однорог А. П. Совмещение изображений в условиях неопределенности // Зарубежная радиоэлектроника.—1985.—№ 4.—С. 54—70.
2. Баклицкий В. К., Бочкарев А. М., Мусыяков М. П. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации / Под ред. В. К. Баклицкого. — М.: Радио и связь, 1986.—216 с.
3. Баклицкий В. К., Юрьев А. Н. Корреляционно-экстремальные методы навигации. — М.: Радио и связь, 1982.—256 с.
4. Белоглазов И. Н., Джанжава Г. И., Чигин Г. П. Основы навигации по геофизическим полям. — М.: Наука, 1985.—328 с.
5. Бесекерский В. А., Иванов В. А., Самотокин Б. Б. Орбитальное гирокомпасирование / Под ред. Б. Б. Самотокина. — Санкт-Петербург: Политехника, 1993.—256 с.
6. Лебедев Д. В., Ткаченко А. И., Магнитометрическая система определения параметров движения космического аппарата // Проблемы управления и информатики.—1997.—№ 4.—С. 139—154.
7. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. / Под ред. Д. С. Лебедева. — М.: Мир, 1982.—Кн. 1, 2.—792 с.
8. Пухов Г. Е. Дифференциальный анализ электрических цепей. — Киев: Наук. думка, 1982.—496 с.
9. Пухов Г. Е. Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов. — Киев: Наук. думка, 1986.—160 с.
10. П'ясковський Д. В., Варламов И. Д., Евдокимов А. В. Аналіз методів совміщення зображеній при распознавании объектов // Вопросы теории сложных радиоэлектронных систем: Тем. науч.-техн. сб. / Отв. ред. П. В. Фриз. — Житомир: ЖВУРЭ ПВО, 1993.—Вып. 15.—С. 3—8.
11. П'ясковський Д. В., Водоп'ян С. В., Варламов И. Д. Алгоритм поєднання цифрових зображень на основі екстраполяції руху платформи // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: Збірник наук. праць. — Житомир: ЖВІРЕ, 1999.—Вип. 1.—С. 73—79.
12. П'ясковський Д. В., Водоп'ян С. В., Варламов И. Д. Кореляційно-екстремальна прив'язка зображень на основі диференційних перетворень// Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: Збірник наук. праць. — Житомир: ЖВІРЕ, 2001.—Вип. 3—С. 157—168.
13. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. — М.: Сов. Радио, 1979.—312 с.
14. Ярославский Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. — М.: Радио и связь, 1987.—296 с.

**ADAPTIVE CORRELATIVE-EXTREME ALGORITHM OF
SPACECRAFT NAVIGATION ON GEOPHYSICAL FIELDS
USING DIFFERENTIAL TAYLOR TRANSFORMATIONS**

D. V. Piaskov's'kyi, S. V. Vodop'ian, I. D. Varlamov

The problem of spacecrafts navigation on Earth's physical fields is considered. Iterative process of Bayer's accuracy rise using the differential transformations is proposed for task solution. It is shown that such approach makes the calculating algorithm more simple in comparison with traditional correlative-extreme methods. The results of the proposed algorithm researches are presented.

УДК 621.396

Г. Л. Баранов¹, В. Л. Баранов¹, С. В. Ковбасюк²

¹Державне підприємство Науково-дослідний інститут «Квант-Навігація» Мінпромполітики України, Київ

²Житомирський військовий інститут радіоелектроніки імені С. П. Корольова

Статистические характеристики дифференциального спектра траектории движения КА

Розрахунок точності визначення положення космічного апарату на орбіті ґрунтуються на диференціальних перетвореннях. Приведено результати моделювання.

Математическое моделирование динамических объектов, функционирующих в условиях воздействия случайных возмущений, широко используется в различных областях науки и техники. Современные исследования нелинейных систем оценивания и управления проводятся с обязательным моделированием случайных процессов, возникающих в результате действия случайных возмущений [5]. Эффективным подходом к решению проблемы моделирования случайных процессов в реальном и ускоренном времени является применение математического аппарата дифференциальных преобразований, с помощью которого в процессе моделирования в области изображений исключается временной аргумент. Достоинством метода дифференциальных преобразований является выполнение моделирования в аналитическом, численно-аналитическом и численном виде [2].

В данной работе предлагается подход к моделированию случайного процесса, каким является оценка движения космического аппарата (КА) в околоземном пространстве, и оценка его статистических характеристик. Предложенный подход позволяет на основе дифференциальных преобразований получать в области изображений точные модели случайных процессов в рамках корреляционной теории. Ограничим область исследования случайных процессов задачами анализа точности нелинейных систем оценивания и управления, сформулированными в [4, 5]. Математическая модель систем оценивания и управления описывается дифференциальными уравнениями относительно выходных координат. Математическое описание со-

ставляется из объективных законов взаимодействия системы управления и среды. Случайные отклонения и возмущения моделируются случайными величинами и случайными функциями.

Задача анализа точности систем оценивания и управления сводится к определению требуемых вероятностных характеристик некоторых функционалов от выходных координат исследуемой системы при заданных вероятностных характеристиках случайных отклонений и случайных величин, моделирующих случайные отклонения и возмущения, действующие на систему. Математическая модель случайных процессов в рамках сформулированной задачи содержит векторное дифференциальное уравнение

$$\frac{dy(t)}{dt} = f[t, y(t), x(t), V] \quad (1)$$

с начальными условиями при $t = 0$

$$y(0) = y_0,$$

где y — n -мерный вектор выходных координат моделируемой системы; x — v -мерная случайная функция времени, моделирующая случайные воздействия на систему; V — s -мерный вектор случайных величин, моделирующий случайные отклонения параметров моделируемой системы; y_0 — n -мерный вектор начальных условий, которые в общем случае являются случайными величинами.

В модели (1) заданы вероятностные характеристики случайной функции $x(t)$ и вектора начальных условий в виде моментов или законов распределения вероятностей.

Кроме модели (1) выбрана система функционалов от выходных координат

$$\Phi_l[t, y(t)], l = 1, 2, \dots, L. \quad (2)$$

Задаются также функции

$$\chi_l(\Phi_l), l = 1, 2, \dots, L, \quad (3)$$

определеняющие форму вероятностных характеристик функционалов (характеристические функции).

В общей постановке задача формулируется следующим образом. По заданному дифференциальному уравнению (1) и заданным вероятностным характеристикам случайных функций $x(t)$ и случайных величин V определить математические ожидания

$$M[\chi_l(\Phi_l)], l = 1, 2, \dots, L. \quad (4)$$

Математические ожидания (4) в частных случаях функций (3) могут выражать, например, следующие вероятностные характеристики: математические ожидания выходных координат, их дисперсии; интегральные многомерные законы распределения выходных координат; математические ожидания, дисперсии и интегральные законы для некоторых функций от выходных координат; вероятность того, что некоторая функция от выходных координат будет в течение выбранного промежутка времени изменяться в заданной области. Математическая модель (1)–(4) является общей и довольно сложной. Эта модель может быть упрощена на основе известных преобразований [5]. Линейная замена переменных $z(t) = y(t) - y_0$ позволяет перейти от случайных начальных условий к нулевым случайным условиям. В работе [5] показано, что от случайных функций $x(t)$ можно перейти к детерминированным функциям от случайных величин, используя представления случайных функций в виде

$$x(t) = m_x(t) + \varphi(t, v_1, v_2, \dots, v_r), \quad (5)$$

где $m_x(t) = M[x(t)]$, $M[\varphi] = 0$; φ — некоторая детерминированная функция указанных аргументов; v_1, v_2, \dots, v_r — некоррелированные случайные величины, вероятностные характеристики которых определяются по заданным вероятностным характеристикам случайных функций $x(t)$.

В случае коррелированных случайных величин при помощи линейных преобразований переходят к системе некоррелированных нормированных случайных величин [5].

В результате проведенных преобразований (5) математическая модель (1)–(4) может быть представлена в более простом виде

$$\frac{dz}{dt} = F[t, z, v_1, v_2, \dots, v_m], \quad (6)$$

$$t = 0, \quad z(0) = 0,$$

где случайные величины v_1, v_2, \dots, v_m — некоррелированны и нормированы:

$$\begin{aligned} M[v_1] &= M[v_2] = \dots = M[v_m] = 0, \\ M[v_1^2] &= M[v_2^2] = \dots = M[v_m^2] = 1. \end{aligned} \quad (7)$$

Предполагается, что случайные величины v_1, v_2, \dots, v_m независимы, и для них заданы плотности распределения вероятностей

$$P_1(v_1), P_2(v_2), \dots, P_m(v_m). \quad (8)$$

На основе математической модели (6)–(8) задача анализа точности системы автоматического управления формулируется следующим образом. Необходимо определить математические ожидания

$$M[\chi_l[\Phi_l(t, z(t))]], l = 1, 2, \dots, L, \quad (9)$$

если задано векторное дифференциальное уравнение (6), условия (7) и плотности распределения (8) независимых случайных величин v_1, v_2, \dots, v_m .

Уравнение (6) в векторной форме описывает систему обыкновенных стохастических дифференциальных уравнений. Случайные величины v_1, v_2, \dots, v_m можно рассматривать в качестве некоторых числовых параметров, так как они по определению не зависят от времени и в каждом конкретном опыте принимают определенные числовые значения. При каждой выборке значений случайных величин v_1, v_2, \dots, v_m уравнение (6) является обычным детерминированным векторным дифференциальным уравнением.

В дальнейшем воспользуемся результатами теоремы, доказанной в [5]. Совокупность компонентов z_1, z_2, \dots, z_n случайной функции $z(t, v_1, v_2, \dots, v_m)$, являющейся решением уравнения (6), можно представить в виде некоторых детерминированных функций времени и случайных величин v_1, v_2, \dots, v_m :

$$z_i = \psi_i(t, v_1, v_2, \dots, v_m), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

причем функции ψ_i непрерывны относительно аргументов t, v_1, v_2, \dots, v_m , если правые части системы дифференциальных уравнений вида (6) непрерывны относительно параметров v_1, v_2, \dots, v_m и допускают лишь разрывы первого рода относительно аргумента t на множестве нулевой меры.

Из этой теоремы следует, что в классе решений z_i (10), допускающих дифференцирование по временному аргументу, возможно применение диффе-

ренциальных преобразований [1, 2], разработанных для детерминированных функций. Обозначим совокупность случайных величин v_1, v_2, \dots, v_m

$$\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_m). \quad (11)$$

Компоненты (10) решения уравнения (6) являются детерминированными функциями $z_i = \psi_i(t, V)$ времени и случайных величин, входящих в \mathbf{V} . В каждой реализации случайного процесса величина V определяет согласно (11) заданный набор констант.

Прямые и обратные дифференциальные преобразования [1, 2] для детерминированных функций (10) с учетом обозначения (11) имеют вид

$$\underline{z}_i(t, V) = Z_i(K, V) = \frac{H_i^k}{K!} \left[\frac{d^k z_i(t, V)}{dt^k} \right]_{t=0}, \quad (12)$$

$$z_i(t, V) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H_i} \right)^k Z_i(K, V), \quad (13)$$

где V — случайная величина (11), характеристики независимых компонентов которой заданы выражениями (7), (8); $Z_i(K, V)$ — дискретная функция целочисленного аргумента $K = 0, 1, 2, \dots$ и заданной случайной величины V ; H_i — отрезок временного аргумента, на котором рассматривается функция $z_i(t, V)$; значение H_i должно быть меньше радиуса сходимости рядов Тейлора в окрестности точки $t = 0$.

Выражение (12) определяет прямое преобразование, позволяющее по оригиналу $z_i(t, V)$ найти изображение $Z_i(K, V)$. Чертят снизу функции $z_i(t, V)$ в выражении (12) обозначает дифференциальное преобразование этой функции.

Обратное преобразование, восстанавливающее оригинал $z_i(t, V)$ в виде ряда Тейлора с центром в точке $t = 0$, определяется выражением (13). Аналогично терминологии, принятой в [1, 2], дифференциальные изображения $Z_i(K, V)$ будем называть дифференциальным спектром, а значения функции $Z_i(K, V)$ при конкретных значениях аргумента $K = 0, 1, 2, \dots$ назовем дискретами дифференциального спектра.

Особенность дифференциальных преобразований (12) заключается в том, что в области изображений случайный процесс $z_i(t, V)$ представляется дифференциальным спектром, дискреты которого являются случайными величинами, определяемые заданным случайными величинами (11). Замена случайной функции $z_i(t, V)$ в области изображений случайной величиной $Z_i(K, V)$ существенно упрощает

моделирование случайных процессов в задаче анализа точности систем автоматического управления по математической модели (6)–(9).

Действительно, применим дифференциальные преобразования (12) к уравнению (6). В результате в области изображений получим математическую модель в форме рекуррентного выражения

$$Z_i(K + 1, V) = \frac{H_i}{K + 1} F_i[T(K), Z(K, V), V], \\ Z_i(0) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

Математическую модель (14) случайного процесса в области изображений условимся называть Р-моделью в честь основателя дифференциальных преобразований Г. Е. Пухова [1, 2]. Присваивая последовательно целочисленные значения $K = 0, 1, 2, \dots$, по Р-модели (14) находим дифференциальный спектр $Z_i(K, V)$, $i = 1, \dots, n$ решения уравнения (6). На этом завершается первый этап решения задачи, заключающийся в моделировании дифференциального уравнения (6) в области изображений.

На втором этапе требуется определить математические ожидания (9). Учитывая, что решение уравнения (6) получено в форме дифференциального спектра $Z_i(K, V)$, переведем выражение (9) в область изображений, применив прямые дифференциальные преобразования (12). В результате получим математическую модель для определения требуемых вероятностных характеристик по дифференциальному спектру $Z(K, V)$

$$M[\underline{\chi}_l [\Phi_l(T(K), Z(K, V))]], \quad l = 1, \dots, L. \quad (15)$$

Вычисления по выражению (15) выполняются с учетом заданных характеристик (7), (8) случайных величин (11). Учитывая, что вычисления математических ожиданий по выражению (15) проводятся в области изображений, характеристики случайных функций получаются в форме дифференциальных спектров, которые необходимо перевести во временную область обратными преобразованиями вида (13) или способами, предложенными в [3].

В качестве примера выведем выражения для вычисления основных характеристик случайных процессов в рамках корреляционной теории. Предположим, что рассматривается одномерный случайный процесс $x(t, \omega)$, где ω — заданная случайная величина. В области изображений модель этого случайного процесса представляется дифференциальным спектром $X(K, \omega)$. Если выполнить обратное преобразование $X(K, \omega)$ во временную область согласно (13), то получим выражение

$$x(t, \omega) = \sum_{K=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^K X(K, \omega). \quad (16)$$

Найдем математическое ожидание случайного процесса $x(t, \omega)$, описываемого выражением (16)

$$m_x(t) = M[x(t, \omega)] = \sum_{K=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^K M[X(K, \omega)], \quad (17)$$

где

$$M[X(K, \omega)] = m_x(K) = \int_{-\infty}^{\infty} X(K, \omega) p(\omega) d\omega,$$

$p(\omega)$ — заданная плотность распределения вероятностей случайной величины ω .

Если случайный процесс $x(t, \omega)$ рассматривается от нулевого момента времени $t_0 = 0$, то $H = t - t_0 = t$, и выражение (17) упрощается:

$$m_x(t) = \sum_{K=0}^{\infty} m_x(K). \quad (18)$$

Из (18) следует, что математическое ожидание $m_x(t)$ случайного процесса $x(t, \omega)$ определяется суммой математических ожиданий $m_x(K)$ всех дискрет дифференциального спектра $X(K, \omega)$, $K = 0, 1, 2, \dots$ при $H = t$.

Корреляционная функция $R_x(t_1, t_2)$ случайного процесса $x(t, \omega)$ строится по двум дифференциальным спектрам $X(K, \omega)$. Согласно выражению (12) прямого дифференциального преобразования дискреты дифференциального спектра зависят от интервала $H = t - t_0$ представления функции $x(t, \omega)$. Выбираем два интервала времени $H_1 = t_1 - t_0$ и $H_2 = t_2 - t_0$. В случае рассмотрения случайного процесса $x(t, \omega)$ от $t_0 = 0$ эти интервалы времени принимают вид $H_1 = t_1$, $H_2 = t_2$.

Обозначим дифференциальный спектр $X(K, \omega)$, полученный при $H_1 = t_1$, через $X(K, t_1, \omega)$, а при $H_2 = t_2$ представим его в виде спектра $X(K, t_2, \omega)$. Определим математические ожидания дискрет этих двух дифференциальных спектров

$$\begin{aligned} m_x(K, t_1) &= M[X(K, t_1, \omega)] = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} X(K, t_1, \omega) p(\omega) d\omega, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} m_x(K, t_2) &= M[X(K, t_2, \omega)] = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} X(K, t_2, \omega) p(\omega) d\omega. \end{aligned} \quad (20)$$

В области изображений перемножаем дифференциальные спектры (19) и (20)

$$m_x(K, t_1) * m_x(K, t_2) = \sum_{l=0}^{1=K} m_x(K - l, t_1) m_x(l, t_2). \quad (21)$$

Формируем в области изображений произведение двух дифференциальных спектров $X(K, t_1, \omega)$ и $X(K, t_2, \omega)$, а результат перемножения обозначим $Q(K, t_1, t_2, \omega)$

$$\begin{aligned} Q(K, t_1, t_2, \omega) &= X(K, t_1, \omega) * X(K, t_2, \omega) = \\ &= \sum_{l=0}^{1=K} X(K - l, t_1, \omega) X(l, t_2, \omega). \end{aligned} \quad (22)$$

Найдем математическое ожидание от (22)

$$\begin{aligned} m_q(K, t_1, t_2) &= M[Q(K, t_1, t_2, \omega)] = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} Q(K, t_1, t_2, \omega) p(\omega) d\omega. \end{aligned} \quad (23)$$

Согласно определению корреляционной функции сформируем ее дифференциальный спектр $R_x(K, t_1, t_2)$ по выражению

$$R_x(k, t_1, t_2) = m_q(k, t_1, t_2) - m_x(K, t_1) * m_x(K, t_2). \quad (24)$$

Переход от дифференциального спектра $R_x(K, t_1, t_2)$ во временную область можно выполнить обратным дифференциальным преобразованием (13) двумя способами: при $H_1 = t_1$ и $H_2 = t_2$. В результате имеем

$$R_x(t_1, t_2) = \sum_{K=0}^{\infty} R_x(K, t_1, t_2). \quad (25)$$

Таким образом, корреляционная функция $R_x(t_1, t_2)$ случайного процесса $x(t, \omega)$ определяется суммой всех дискрет дифференциального спектра $R_x(K, t_1, t_2)$, вычисление которого производится по выражениям (19)–(24).

В случае $t_1 = t_2 = t$ корреляционная функция $R_x(t)$ равна дисперсии $D_x(t)$.

Рассмотрим методику моделирования случайных процессов на основе дифференциальных преобразований на примере задачи оценивания положения космического аппарата. Невозмущенное движение КА описывается дифференциальным уравнением вида

$$\ddot{\bar{r}} + K_s \frac{\bar{r}}{r^3} = 0, \quad (26)$$

где \bar{r} — радиус-вектор, определяющий положение КА в выбранной системе координат; K_s — постоянная поля земного тяготения (гравитационная постоянная Земли), равная $3.986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$, что эквивалентно системе трех дифференциальных уравнений второго порядка

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{K_s x}{r^3} = 0, \\ \ddot{y} + \frac{K_s y}{r^3} = 0, \\ \ddot{z} + \frac{K_s z}{r^3} = 0, \end{cases} \quad (27)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, или системе шести дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \dot{x}, & \frac{d\dot{x}}{dt} = -\frac{K_s x}{r^3}, \\ \frac{dy}{dt} = \dot{y}, & \frac{d\dot{y}}{dt} = -\frac{K_s y}{r^3}, \\ \frac{dz}{dt} = \dot{z}, & \frac{d\dot{z}}{dt} = -\frac{K_s z}{r^3}. \end{cases} \quad (28)$$

Традиционно решение системы (28) есть совокупность шести независимых между собой частных решений (постоянных), к нахождению которых и сводится задача интегрирования данных уравнений.

Мы же решим поставленную задачу с помощью дифференциальных преобразований. Рассмотрим ход решения на примере одной координаты x и с одним допущением. Положим, что орбита КА круговая и $r = \text{const}$. Принятое допущение позволит уменьшить громоздкость выкладок, так как наша цель — рассмотреть новую методику решения задачи и определение статистических характеристик полученной модели.

Для построения дифференциального спектра модели движения КА определим случайные факторы, которые имеют место при решении данной задачи. Ограничения, наложенные на модель, — фактор не случайный и упрощенная модель имеет методическую погрешность. Известно также, что на точность определения (экстраполяции) положения КА на орбите большое значение оказывают начальные условия, необходимые для решения дифференциальных уравнений. Начальные условия — в данном случае положение и скорость на момент времени $t = 0$ — определяются по измерениям, которые получены с помощью радиолокационных станций, либо по результатам обработки ряда таких измерений. Последние как раз и подвержены большому количеству случайных возмущений, обусловленных неоднородностями трассы распространения радиоволн, неоднородностями и шумами приемных трактов и т. д. Таким образом, случайнм процессом при решении задачи построения дифференциального спектра движения КА и определение точностных характеристик модели является определение начальных условий.

В этом случае система уравнений для координаты x запишется в виде

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \dot{x} = g, \\ \frac{d\dot{x}}{dt} &= \frac{dg}{dt} = -\frac{K_s x}{r^3} \end{aligned} \quad (29)$$

при начальных условиях $t = 0$, $x(0) = x_0 - v_1$, $g(0) = g_0 - v_2$. Независимые случайные величины v_1 , v_2 заданы математическими ожиданиями $m_{v_1} = M[v_1] = 0$; $m_{v_2} = M[v_2] = 0$ и дисперсиями $D_{v_1} = \sigma_{v_1}^2$; $D_{v_2} = \sigma_{v_2}^2$. Требуется построить дифференциальный спектр модели движения КА с принятыми ограничениями и найти математическое ожидание $m_x(t)$ и дисперсию $D_x(t)$ случайного процесса.

В области изображений (учитывая свойства дифференциально-тейлоровских преобразований [1]) система уравнений (29) примет вид

$$\begin{aligned} X(k+1) &= \frac{H}{k+1} G(k), \\ G(k+1) &= -\frac{HK_s}{(k+1)r^3} X(k). \end{aligned} \quad (30)$$

В соответствии с выражением (12) определяем дискреты дифференциального спектра для положения и скорости по координате x :

$$\begin{aligned} X(0) &= x_0 - v_1, \\ X(1) &= g_0 H - v_2 H, \\ X(2) &= -\frac{K_s H^2}{2!r^3} x_0 + \frac{K_s H^2}{2!r^3} v_1, \\ X(3) &= -\frac{K_s H^3}{3!r^3} g_0 + \frac{K_s H^3}{3!r^3} v_2, \\ X(4) &= \frac{K_s^2 H^4}{4!r^6} x_0 - \frac{K_s^2 H^4}{4!r^6} v_1, \\ X(5) &= \frac{K_s^2 H^5}{5!r^6} g_0 - \frac{K_s^2 H^5}{5!r^6} v_2, \\ G(0) &= g_0 - v_2, \\ G(1) &= -\frac{K_s H}{r^3} x_0 + \frac{K_s H}{r^3} v_1, \\ G(2) &= -\frac{K_s H^2}{2!r^3} g_0 + \frac{K_s H^2}{2!r^3} v_2, \\ G(3) &= \frac{K_s^2 H^3}{3!r^6} x_0 - \frac{K_s^2 H^3}{3!r^6} v_1, \\ G(4) &= \frac{K_s^2 H^4}{4!r^6} g_0 - \frac{K_s^2 H^4}{4!r^6} v_2, \\ G(5) &= -\frac{K_s^3 H^5}{5!r^9} x_0 + \frac{K_s^3 H^5}{5!r^9} v_1. \end{aligned} \quad (31)$$

Вообще говоря, дифференциальный спектр (31) обоих уравнений системы (30) бесконечен. Мы ограничимся шестью дискретами, так как элементы седьмой будут иметь коэффициенты K_3^3/r^9 порядка 10^{-18} . Для получения решения во временной области надо произвести обратное преобразование, восстанавливающее оригинал $x(t, V)$ в виде ряда Тейлора с центром в точке $t = 0$, определяемое выражением (13).

Для расчета статистических характеристик рассматриваемого случайного процесса воспользуемся выражениями (18) и (25). Для определения дисперсии в последнем выражении приравняем $t_1 = t_2$. Математические ожидания случайных процессов, описываемых положение и скорость космического аппарата по координате x , будут представлены следующими выражениями:

$$\begin{aligned} x(t) &= \left(1 - \frac{K_3}{2!r^3} t^2 + \frac{K_3^2}{4!r^6} t^4\right) x_0 + \\ &+ \left(t - \frac{K_3}{3!r^3} t^3 + \frac{K_3^2}{5!r^6} t^5\right) g_0, \\ g(t) &= \left(-\frac{K_3}{r^3} t + \frac{K_3^2}{3!r^6} t^3 - \frac{K_3^3}{5!r^9} t^5\right) x_0 + \\ &+ \left(1 - \frac{K_3}{2!r^3} t^2 + \frac{K_3^2}{4!r^6} t^4\right) g_0. \end{aligned} \quad (32)$$

Для оценки ошибки определения положения и скорости КА по координате x определим дисперсию случайных процессов:

$$\begin{aligned} D_x(t) &= \sigma_{v_1}^2 + \left(\sigma_{v_2}^2 - \frac{K_3}{r^3} \sigma_{v_1}^2\right) t^2 + \\ &+ \left(\frac{K_3^2}{4r^6} \sigma_{v_1}^2 - \frac{K_3}{3r^3} \sigma_{v_2}^2\right) t^4 + \frac{K_3^2}{3!3!r^3} \sigma_{v_2}^2 t^6, \\ D_g(t) &= \sigma_{v_2}^2 - \left(\frac{K_3}{r^3} \sigma_{v_2}^2 - \frac{K_3^2}{r^6} \sigma_{v_1}^2\right) t^2 + \\ &+ \left(\frac{K_3^2}{4r^6} \sigma_{v_2}^2 - \frac{K_3^3}{3!r^9} \sigma_{v_1}^2\right) t^4 + \frac{K_3^4}{3!3!r^{12}} \sigma_{v_2}^2 t^6. \end{aligned} \quad (33)$$

Дисперсии в системе (33) определялись по четырем дискретам спектра обоих случайных процессов. Для сравнения, дисперсия определения положения, рассчитанная по шести дискретам дифференциального спектра, определяется выражением

$$\begin{aligned} D_x(t) &= \\ &= \sigma_{v_1}^2 + \left(\sigma_{v_2}^2 - \frac{K_3}{r^3} \sigma_{v_1}^2\right) t^2 + \left(\frac{K_3^2}{4r^6} \sigma_{v_1}^2 - \frac{K_3}{3r^3} \sigma_{v_2}^2\right) t^4 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \left(\frac{2.67K_3^2}{60r^6} \sigma_{v_2}^2 - \frac{K_3^3}{4!r^9} \sigma_{v_1}^2\right) t^6 + \left(\frac{K_3^4}{4!4!r^{12}} \sigma_{v_1}^2 - \frac{K_3^3}{5!3r^9} \sigma_{v_2}^2\right) t^8 + \\ &+ \frac{K_3^4}{5!5!r^{12}} \sigma_{v_2}^2 t^{10}. \end{aligned} \quad (34)$$

Результаты моделирования показывают, что добавка двух дискрет дифференциального спектра модели движения КА не приводит к существенному изменению расчетных значений дисперсий. Так, при значении параметра $t = 100$ с ошибкой в определении дисперсии положения на четыре порядка меньше дисперсии начальных условий по координате x .

Анализ выражений (33) приводит к следующим выводам. Точность определения положения КА сильно зависит от точности расчета (или измерения) начальных условий как по положению, так и по скорости. Ошибки в начальных условиях скорости имеют решающее значение с увеличением t . Это можно увидеть из выражения для $D_x(t)$, так как коэффициенты при дисперсиях измерения скорости КА для соответствующих степеней времени на несколько порядков больше, чем при дисперсиях измерения положения.

На рис. 1, 2 приведены результаты расчетов. На рис. 1 представлены зависимости среднего квадратичного отклонения определения положения объекта в зависимости от времени экстраполяции при постоянной ошибке определения начальных условий положения и соотношении $\sigma_{g_1} = 2\sigma_{g_2}$.

На рис. 2 представлены также зависимости точности экстраполяции КА при постоянной ошибке определения начальных условий по скорости объекта и соотношении $\sigma_{x_1} = 2\sigma_{x_2}$. Из приведенных графиков следует, что с увеличением времени экстраполяции точность предсказанного положения КА зависит, в основном, от точности начальных условий по скорости.

В заключение отметим следующее. Предложенный подход к моделированию случайного процесса, которым является определение параметров траектории КА, с помощью математического аппарата дифференциальных преобразований обеспечивает точное моделирование случайного процесса в области изображений, где возможно применение различных аналогов известных аналитических методов анализа случайных процессов и нелинейных стохастических систем. Аналитические зависимости математических преобразований случайных процессов существенно сокращают объем вычислений, остающихся для численной реализации вычислений на ЭВМ. Так, на примере упрощенной модели движения КА был произведен аналитический расчет

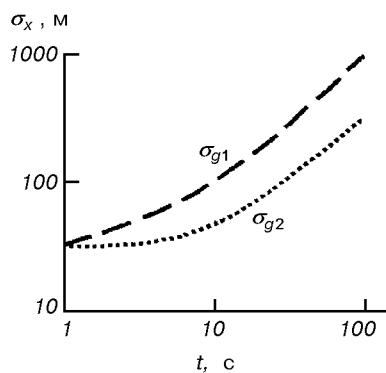


Рис. 1. Зависимости среднего квадратичного отклонения определения положения объекта в зависимости от времени экстраполяции

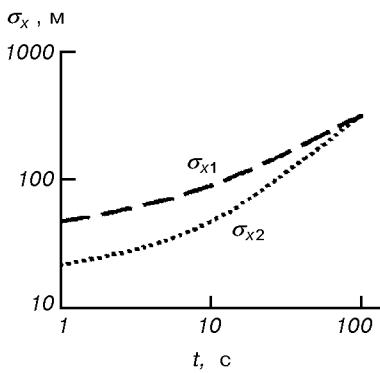


Рис. 2. Зависимости точности экстраполяции КА при постоянной ошибке определения начальных условий по скорости объекта

ошибки определения, экстраполяции положения объекта и в численном виде получены искомые результаты. Расчетные зависимости показывают, что для повышения точности экстраполяции положения КА разработчикам как аппаратурной, так и алгоритмической части радиолокационных комплексов необходимо прилагать все усилия для точного измерения составляющей скорости, поскольку именно эта составляющая в основном определяет точность предполагаемого нахождения объекта на заданный момент времени.

1. Пухов Г. Е. Дифференциальные преобразования функций и уравнений. — Киев: Наук. думка, 1984.—420 с.
2. Пухов Г. Е. Дифференциальные спектры и модели. — Киев: Наук. думка, 1990.—184 с.

3. Ронто Н. И., Семагина Э. П. К вопросу нахождения функций оригиналов по дифференциальным Т-спектрам // Электрон. моделирование.—1987.—9, № 6.—С. 5—8.
4. Статистические методы в проектировании нелинейных систем автоматического управления / Под ред. Б. Г. Доступова. — М.: Машиностроение, 1970.—408 с.
5. Чернецкий В. И. Анализ точности нелинейных систем управления. — М.: Машиностроение, 1968.—246 с.

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF DIFFERENTIAL SPECTRUM OF SPACECRAFT TRAJECTORY

G. L. Baranov, V. L. Baranov, S. V. Kovbasiuk

The accuracy calculation of spacecraft position in orbit is based on differential transformations. The results of simulation are given.

УДК 621.396

Г. Л. Баанов¹, Д. В. Пясковский², С. В. Ковбасюк²

¹Державне підприємство Науково-дослідний інститут «Квант-Навігація» Мінпромполітики України, Київ

²Житомирський військовий інститут радіоелектроніки імені С. П. Корольова

Объединение информации в МП РЛК с использованием дифференциального спектра траектории движения КА

Запропоновано новий підхід до визначення та екстраполяції положення космічного апарату на орбіті в багатопозиційному радіолокаційному комплексі, що складається з РЛС з автономним прийманням, оснований на дифференціальних тейлорівських перетвореннях. Отримано аналітичні залежності точнісніх характеристик.

Непрерывное повышение требований к объему и качеству радиолокационной информации, помехозащищенности и живучести радиолокационных средств вынуждает специалистов, наряду с поиском новых технических решений в создании основных технологических компонентов радиолокационных станций, развивать новые направления и методы радиолокации. Точность определения положения космического аппарата на орбите является одним из факторов, которые определяют эффективность космической инфраструктуры в целом. Так, ошибки расчетов координат элементов навигационной системы приведут к значительным погрешностям определения положения объектов на суше, воде и в воздухе. Важным также является точность прогноза положения КА на определенный момент времени, влияющая на оптимальное построение системы из нескольких аппаратов, расчет сеансов связи и т. д.

Информация о КА, полученная в результате наблюдения за объектом с помощью РЛС, может быть описана следующей схемой:

наблюдение = модель + ошибки измерений.

Таким образом, суммарные ошибки определения параметров орбиты КА складываются из ошибок описания модели движения объекта и ошибок измерения. Одним из перспективных направлений для уменьшения ошибок измерения является создание активного многопозиционного радиолокационного комплекса (МП РЛК) на базе РЛС с автономным приемом. Ошибки описания модели можно уменьшить с помощью использования операционного ме-

тода дифференциальных преобразований.

Целью статьи является рассмотрение нового подхода к уменьшению ошибок наблюдения за КА на основе дифференциальных преобразований при моделировании случайных процессов применительно к активному МП РЛК.

Основная идея многопозиционной радиолокации состоит в том, чтобы более эффективно (чем в обычных однопозиционных РЛС) использовать информацию, содержащуюся в пространственной структуре электромагнитного поля. Существенные результаты в развитии теории многопозиционной радиолокации получены в радионавигации, радиолокации, гидролокации и других областях.

Однако вопросы объединения и обработки радиолокационной информации в активном МП РЛК практически не освещались. Как правило, рассматриваются малобазовые пассивные (активно-пассивные) многопозиционные РЛС (МП РЛС). Методы получения координатной информации в такой системе требуют минимум две позиции для определения одного из параметров движения цели. При этом не используется ряд преимуществ активного МПРЛК, а именно:

- возможность определения координат объекта наблюдения (ОН) в цикле измерения каждой позицией;
- отдельные РЛС как составные части комплекса могут работать в различных частотных диапазонах;
- повышение точности измерительной информации за счет использования больших баз;

- отсутствие синхронизации между позициями с точностью до фазы несущего колебания, что существенно упрощает аппаратурную часть;
- возможность повышения точности определения местоположения объекта наблюдения разными методами за счет избыточности радиолокационной информации.

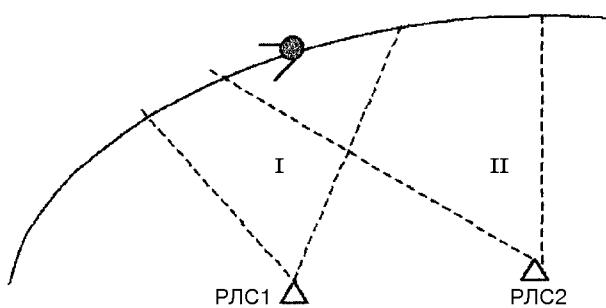


Схема сопровождения КА с помощью МП РЛК

Схематически вариант построения многопозиционного радиолокационного комплекса показан на рисунке, где изображены две РЛС, траектория полета КА и штриховыми линиями обозначены пространственные сектора наблюдения за объектом каждой из РЛС. Для объединения информации от нескольких автономных РЛС наиболее простым и лучшим с точки зрения результирующей точности является случай полного совпадения зон обзора, сложным и худшим — когда зоны обзора вообще не пересекаются.

Объединение данных в МП РЛК производится путем объединения информации либо на этапе единичных измерений, либо на этапе траекторных расчетов. Большое значение для этого имеет принятая модель движения КА. Векторное уравнение, которое описывает полет космического объекта (для простоты рассмотрим случай невозмущенного движения) можно представить в виде

$$\ddot{\vec{r}} + K_3 \frac{\vec{r}}{r^3} = 0, \quad (1)$$

где \vec{r} — радиус-вектор, определяющий положение объекта в выбранной системе координат, K_3 — постоянная поля земного тяготения (гравитационная постоянная Земли), равная $3.986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

Традиционно для решения таких дифференциальных уравнений применяют приближенные численные методы, такие как методы Рунге—Кутта, многозначные методы [1]. Эти методы не позволя-

ют получить решение в аналитическом виде, а результат решения не всегда носит достоверный характер.

Эффективным подходом к решению проблемы решения дифференциальных уравнений является применение математического аппарата дифференциальных преобразований. Дифференциальные преобразования — новый операционный метод, который в отличие от известных интегральных преобразований Лапласа и Фурье, основан на переводе оригиналов в область изображений при помощи операции дифференцирования. При математическом моделировании физических объектов и процессов, описываемых дифференциальными и интегральными уравнениями, дифференциальные преобразования позволяют заменить операции интегрирования и дифференцирования эквивалентными алгебраическими операциями как в численном, так и в аналитическом виде.

Дифференциальными тейлоровскими преобразованиями называются функциональные преобразования вида [2, 4]

$$\underline{z}(t, V) = Z(K, V) = \frac{H^k}{K!} \left[\frac{d^k z(t, V)}{dt^k} \right]_{t=0}, \quad (2)$$

$$z(t, V) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^k Z(K, V), \quad (3)$$

где V — случайная величина, $Z(K, V)$ — дискретная функция целочисленного аргумента $K = 0, 1, 2, \dots$ и заданной случайной величины V , H — отрезок временного аргумента, на котором рассматривается функция $z(t, V)$; значение H должно быть меньше радиуса сходимости рядов Тейлора в окрестности точки $t = 0$.

Выражение (2) определяет прямое преобразование, позволяющее по оригиналу $z(t, V)$ найти изображение $Z(K, V)$. Чертка снизу функции $z(t, V)$ в выражении (2) обозначает дифференциальное преобразование этой функции. Обратное преобразование, восстанавливающее оригинал $z(t, V)$ в виде ряда Тейлора с центром в точке $t = 0$, определяется выражением (3). Аналогично терминологии, принятой в [2, 4], дифференциальные изображения $Z(K, V)$ будем называть дифференциальным спектром, а значения функции $Z(K, V)$ при конкретных значениях аргумента $K = 0, 1, 2, \dots$ назовем дискретами дифференциального спектра.

В области изображений математическая модель случайного процесса, которым является измерение координат КА, представляется в виде дискретного дифференциального спектра, элементы которого являются случайными величинами [5]. Дифферен-

циальный спектр прямого преобразования выражения (1) имеет бесконечную длину. Для наглядности ограничимся первыми шестью дискретами, рассмотрим только координату x и примем $r = \text{const}$.

В этом случае система уравнений для координаты x запишется в виде

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = g, \quad \frac{\ddot{x}}{dt} = \frac{dg}{dt} = -\frac{K_3 x}{r^3} \quad (4)$$

при начальных условиях $t = 0$, $x(0) = x_0 + v_1$, $g(0) = g_0 + v_2$. Независимые случайные величины v_1 , v_2 заданы математическими ожиданиями $m_{v_1} = M[v_1] = 0$; $m_{v_2} = M[v_2] = 0$ и дисперсиями $D_{v_1} = \sigma_{v_1}^2$, $D_{v_2} = \sigma_{v_2}^2$. Требуется построить дифференциальный спектр модели движения КА с принятыми ограничениями. В этом случае дискреты спектра (учитывая свойства дифференциально-тейлоровских преобразований [3]), полученные для системы (4), записываются в виде

$$X(0) = x_0 + v_1; \quad X(1) = (g_0 + v_2)H;$$

$$X(2) = -\frac{K_3}{2!r^3}(x_0 + v_1)H^2;$$

$$X(3) = -\frac{K_3}{3!r^3}(g_0 + v_2)H^3;$$

$$X(4) = \frac{K_3^2}{4!r^6}(x_0 + v_1)H^4;$$

$$X(5) = \frac{K_3^2}{5!r^6}(g_0 + v_2)H^5;$$

$$G(0) = g_0 + v_2;$$

$$G(1) = -\frac{K_3}{r^3}(x_0 + v_1)H;$$

$$G(2) = -\frac{K_3}{2!r^3}(g_0 + v_2)H^2;$$

$$G(3) = \frac{K_3^2}{3!r^6}(x_0 + v_1)H^3;$$

$$G(4) = \frac{K_3^2}{4!r^6}(g_0 + v_2)H^4;$$

$$G(5) = -\frac{K_3^3}{5!r^9}(x_0 + v_1)H^5.$$

Произведя обратное дифференциальное преобразование спектра по выражению (3), получим восстановленный оригинал во временной области.

Начальные условия для построения дифференциального спектра движения КА определяются путем

обработки измерений на интервале сопровождения объекта с помощью РЛС одним из известных методов. Если они рассчитаны для разных РЛС в многопозиционном комплексе не на один момент времени (в случае малого пересечения или непересечения пространственных секторов сопровождения объекта), спектры, описывающие движение КА, будут смещены друг относительно друга. Смешенный дифференциальный спектр определяется выражением [3]

$$x(t \pm h) \Xi e^{\pm h \Delta} X(K) = X(k) \pm (k+1) \frac{h}{H} X(k+1) + \\ + \frac{(k+2)!}{2!k!H^2} h^2 X(k+2) \pm \frac{(k+3)!}{3!k!H^3} h^3 X(k+3) + \dots$$

Для рассматриваемого случая движения КА смешанные спектры по положению и первой производной описываются выражениями

$$X(K)e^{\pm h \Delta} = \left[1 - \frac{K_3}{2!r^3}(h+H)^2 + \frac{K_3^2}{4!r^6}(h+H)^4 \right] x_0 + \\ + \left[h+H - \frac{K_3}{3!r^3}(h+H)^3 + \frac{K_3^2}{5!r^6}(h+H)^5 \right] g_0$$

и

$$G(K)e^{\pm h \Delta} = \\ = \left[-\frac{K_3}{r^3}(h+H) + \frac{K_3^2}{3!r^6}(h+H)^3 - \frac{K_3^3}{5!r^9}(h+H)^5 \right] x_0 + \\ + \left[1 - \frac{K_3}{2!r^3}(h+H)^2 + \frac{K_3^2}{4!r^6}(h+H)^4 \right] g_0.$$

Учитывая случайный характер определения начальных условий, определим точность расчета координаты и скорости объекта при восстановлении оригинала с использованием обратного дифференциального преобразования.

Предположим, что рассматривается одномерный случайный процесс $l(t, \omega)$, где ω — заданная случайная величина. По определению дисперсия случайной функции $l(t, \omega)$ вычисляется по выражению

$$D_l(t) = M[l^2(t, \omega)] - m_l^2(t). \quad (5)$$

Введем вспомогательную переменную

$$U(t, \omega) = l^2(t, \omega). \quad (6)$$

Выражение (5) с учетом (6) принимает вид

$$D_l(t) = M[U(t, \omega)] - m_l^2(t). \quad (7)$$

Переведем выражения (6), (7) в область изображений, применив дифференциальные преобразования (2):

$$D_l(K) = M[U(K, \omega)] - m_l(K)*m_l(K), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} U(K, \omega) &= L(K, \omega)*L(K, \omega) = \\ &= \sum_{n=0}^{n=K} L(K-n, \omega) \cdot L(n, \omega), \end{aligned} \quad (9)$$

$$M[U(K, \omega)] = m_u(K) = \int_{-\infty}^{\infty} U(k, \omega) \cdot p(\omega) d\omega, \quad (10)$$

$$m_l^2(K) = m_l(K)*m_l(K) = \sum_{n=0}^{n=K} m_l(K-n) \cdot m_l(n), \quad (11)$$

где «*» — символ операции умножения в области изображений, а черта снизу операции возведения в квадрат также обозначает выполнение этой операции в области изображений.

Выражения (8)–(11) позволяют определить дифференциальный спектр $D_l(K)$, моделирующий дисперсию $D_l(t)$ в области изображений. С целью восстановления дисперсии $D_l(t)$ во временной области по дифференциальному спектру $D_l(K)$ применим обратные дифференциальные преобразования вида (3)

$$D_l(t) = \sum_{K=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^K D_l(K). \quad (12)$$

Учитывая, что случайный процесс $l(t, \omega)$ рассматривается от $t_0 = 0$ и $H = t - t_0 = t$, выражение (12) преобразуется к виду

$$D_l(t) = \sum_{K=0}^{\infty} D_l(K), \quad (13)$$

где дифференциальный спектр $D_l(K)$ вычисляется по выражениям (8)–(11) на основании дифференциального спектра $L(K, \omega)$. Соотношение (13) дает простой алгоритм определения дисперсии $D_l(t)$ случайного процесса $l(t, \omega)$. Необходимо для каждой дискреты дифференциального спектра $L(K, \omega)$ найти дисперсию $D_l(K)$, и просуммировать дисперсии $D_l(K)$, $K = 0, 1, 2, \dots$ всех дискрет дифференциального спектра $X(K, \omega)$ при $H = t$.

Применив рассмотренную методику для случая смещения дифференциального спектра движения КА, получим

$$\begin{aligned} D_x(t + \Delta t) &= \sigma_{v_1}^2 + \left[\sigma_{v_2}^2 - \frac{K_s}{r^3} \sigma_{v_1}^2 \right] (t + \Delta t)^2 + \\ &+ \left[\frac{K_s^2}{4r^6} \sigma_{v_1}^2 - \frac{K_s}{3r^3} \sigma_{v_2}^2 \right] (t + \Delta t)^4 + \frac{K_s^2}{3!3!r^6} \sigma_{v_2}^2 (t + \Delta t)^6, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} D_x(t + \Delta t) &= \sigma_{v_2}^2 - \left[\frac{K_s}{r^3} \sigma_{v_2}^2 - \frac{K_s^2}{r^6} \sigma_{v_1}^2 \right] (t + \Delta t)^2 + \\ &+ \left[\frac{K_s^2}{4r^6} \sigma_{v_2}^2 - \frac{K_s^3}{3!r^9} \sigma_{v_1}^2 \right] (t + \Delta t)^4 + \frac{K_s^4}{3!3!r^{12}} \sigma_{v_2}^2 (t + \Delta t)^6. \end{aligned} \quad (15)$$

Если в выражениях (14), (15) принять $\Delta t = 0$, то выражения примут вид для частного случая определения дисперсий не сдвинутых спектров. Анализ выражений позволяет сделать вывод, что точность расчетов как сдвинутого, так и экстраполированного положения и скорости объекта зависят в большей степени от точности определения начальных условий по скорости.

Одним из известных вариантов объединения измеренных координат в МП РЛК, приведенных к единому временному моменту, является весовое усреднение данных по методу средневзвешенных. Процедура объединения дифференциальных спектров будет отличаться тем, что весовой обработке будут подвергаться не полученные измерения, а рассчитанные на их основе дискреты спектров, соответствующие математической модели полета космического объекта. Вес дискрет дифференциального спектра по положению и скорости пропорционален ошибкам измерения $\sigma_{v_1}^2$, $\sigma_{v_2}^2$ соответственно и интервалу временного сдвига спектра Δt . Рассмотрим случай, когда многопозиционный радиолокационный комплекс состоит из двух РЛС, и дискреты дифференциальных спектров равноточны. В этом случае начальные условия при $t = 0$ для первой и второй РЛС будут иметь вид соответственно

$$\begin{aligned} x(0) &= x_0 + v'_1, \quad g(0) = g_0 + v'_2, \\ x(0) &= x_0 + v''_1, \quad g(0) = g_0 + v''_2. \end{aligned}$$

В случае равноточных измерений, получаемых обеими радиолокационными станциями, дисперсии определения положения и скорости будут равны

$$\sigma_{v'_1}^2 = \sigma_{v''_1}^2, \quad \sigma_{v'_2}^2 = \sigma_{v''_2}^2.$$

Дискреты для расчета дисперсии объединенной в МП РЛК информации по положению объекта будут иметь вид:

$$\begin{aligned} D_x(0) &= \frac{\sigma_{v_1}^2}{2}, \\ D_x(1) &= 0, \\ D_x(2) &= -\frac{K_s \sigma_{v_1}^2}{2r^3} t^2 + \frac{\sigma_{v_2}^2}{2} t^2, \end{aligned}$$

$$D_x(3) = 0,$$

$$D_x(4) = -\frac{K_3 \sigma_{v_2}^2}{6r^3} t^4 + \frac{K_3^2 \sigma_{v_1}^2}{8r^6} t^4,$$

$$D_x(5) = 0,$$

$$D_x(0) = \frac{K_3^2 \sigma_{v_2}^2}{72r^6} t^6.$$

Выражение для дисперсии является суммой всех дискрет:

$$D_x(t) = \frac{\sigma_{v_1}^2}{2} + \left(\frac{\sigma_{v_2}^2}{2} - \frac{K_3 \sigma_{v_1}^2}{2r^3} \right) t^2 + \\ + \left(\frac{K_3^2 \sigma_{v_1}^2}{8r^6} - \frac{K_3 \sigma_{v_2}^2}{6r^3} \right) t^4 + \frac{K_3^2 \sigma_{v_2}^2}{72r^6} t^6,$$

В результате аналогичной процедуры для скорости объекта получаем:

$$D_g(t) = \frac{\sigma_{v_2}^2}{2} - \left(\frac{K_3 \sigma_{v_2}^2}{4r^3} - \frac{K_3^2 \sigma_{v_1}^2}{2r^6} \right) t^2 + \\ + \left(\frac{K_3^2 \sigma_{v_2}^2}{8r^6} - \frac{K_3^3 \sigma_{v_1}^2}{12r^9} \right) t^4 + \frac{K_3^4 \sigma_{v_1}^2}{72r^{12}} t^6.$$

Таким образом, использование метода дифференциальных преобразований позволяет получить в аналитическом виде бесконечного ряда точное решение уравнения движения КА. Точность приближенной модели определяется количеством взятых

для рассмотрения дискрет дифференциального спектра. Объединение же информации в активном МП РЛК с использованием дифференциальных преобразований позволяет получить в аналитическом виде как результат объединения и экстраполяции данных с нескольких источников с учетом дифференциальной модели движения космического объекта, так и выражения для дисперсий ошибок расчетов.

1. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и математическое обеспечение: Пер. с англ. — М.: Мир, 1998.—575 с.
2. Основы автоматического управления / Под ред. В. С. Пугачева. — М.: Наука, 1974.—720 с.
3. Пухов Г. Е. Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов. — Киев: Наук. думка, 1986.—158 с.
4. Статистические методы в проектировании нелинейных систем автоматического управления / Под ред. Б. Г. Доступова. — М.: Машиностроение, 1979.—408 с.
5. Чернецкий В. И. Анализ точности нелинейных систем управления. — М.: Машиностроение, 1968.—246 с.

INFORMATION IN MULTIPOSITION RADAR COMPLEX BY USING DIFFERENTIAL SPECTRUM OF SPACECRAFT TRAJECTORY

G. L. Baranov, D. V. Piaskovs'kyi, S. V. Kovbasiuk

It is proposed a new approach to determination and extrapolation of the spacecraft position in orbit for multiposition radar complex, consisted of independent radar station based on the differential Tailor transformations. The analytical dependences of accuracy characteristics are obtained.

Е. Т. Скорик

Державне підприємство Науково-дослідний інститут «Квант-Навігація» Мінпромполітики України, Київ

Альтернативные спутниковых применения радионавигационных сигналов систем

Приведено відомості про застосування СРНС для досліджень фізики атмосфери і для дистанційного моніторингу морської поверхні. Використовується режим прихованого радіозондування середовища сигналами випромінювання СРНС і просторова схема двохпозиційної радіолокації.

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС), благодаря высокому научно-техническому системному обеспечению, представляют для учебных разных специальностей мощный инструмент исследований, в том числе в областях знаний, не имеющих прямого отношения к координатно-временному обеспечению (КВО). Высокая когерентность системной шкалы времени, гарантирующая высокое разрешение по доплеровскому смещению, квазишумовой характер излучения с высоким разрешением по дистанции, парный (двухчастотный) сигнал излучения, обеспечивающий разрешение по частотной дисперсии, — это далеко не полный перечень особенностей датчиков СВЧ-генераторов сигналов космических аппаратов (КА) СРНС, дающий в руки исследователей радиофизиков уникальные возможности альтернативных применений сигналов СРНС, число которых ограничено только творческим воображением ученых.

В статье из многих возможных применений приведены только два наиболее эффективные и проверенные на практике. Оба эти направления используют режим скрытого радиозондирования (СРЗ) физических объектов сигналами СРНС при прохождении их излучения через исследуемую среду или при приеме их отражения от поверхности раздела сред. Речь идет о мониторинге (дистанционном контроле) состояния земной атмосферы и морской поверхности. С точки зрения техники СВЧ реализуется полный комплексный анализ матрицы рассеяния среды, а сам прибор может быть отнесен к классу скаттерометров СВЧ с внешним источником пробного (опорного) сигнала. С точки зрения радиофизики используется по сути метод когерент-

ного радиооблучения физической среды, сводимый к радиоголографии (радиотомографии), а именно — получению срезов среды и реконструкции объемных и поверхностных физических параметров сред по этим срезам.

МОНИТОРИНГ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛОВ СРНС

Истоки метода восходят еще к первой СРНС «Транзит», использовавшей низкоорбитальные навигационные космические аппараты (НКА). Во многих странах, в том числе в бывшем СССР, были проведены успешные исследования метода зондирования атмосферы при проходах НКА от восхода до захода над испытательной наземной приемной позицией. Осуществлялся прием двух взаимокогерентных сигналов частот 150 и 400 МГц с регистрацией разностных доплеровских смещений частот и эффекта Фарадея. Были получены пространственные срезы полного электронного содержания ионосферы вдоль траекторий орбиты НКА и его временные вариации и осуществлялся расчет электронной концентрации ионосферы и некоторых других параметров атмосферы.

После введения в полномасштабную эксплуатацию СРНС GPS Navstar метод был успешно применен в США по программе NASA EOS — Earth Observing System. В результате технология СРЗ стала основой эксперимента GGI — GPS Geoscience Instruments. Приемник GPS размещался на борту низкоорбитального исследовательского КА на полярной орбите [2]. Взаимное орбитальное вращение передатчиков GPS на НКА и приемника на исследовательском КА приводило к тому, что трасса

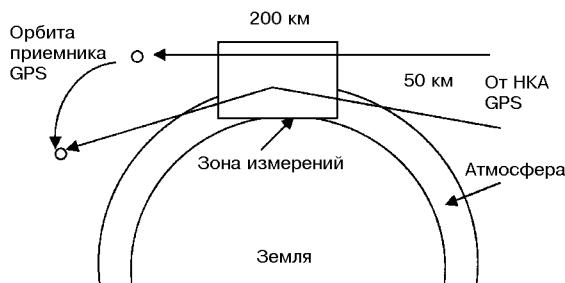


Рис. 1. Геометрия измерений параметров атмосферы сигналами GPS

радиосигналов GPS делала срезы, как показано на схеме геометрии измерений (рис. 1), подобной той, которая реализуется при автономном местоопределении координат низкоорбитальных КА с помощью СРНС. Длительность наблюдения одного среза атмосферы от скольжения трассы вдоль поверхности Земли до высоты 100 км составляет от 1 до 2 мин. При полной орбитальной группировке GPS в 24 НКА в течение дня реализуется до 500 сеансов зондирования при разрешении по дистанции 1 км. В результате реализуется планетарный эксперимент оптического типа, при котором между источником сигналов СРЗ и приемником GPS в атмосфере формируется своеобразная синтезированная линза. Наблюдааемым (измеряемым) параметром является избыточная задержка распространения сигнала GPS за счет атмосферы. Задержка вызывается изменением индекса рефракции, что вызывает, в свою очередь, искривление трассы прохождения луча через границу раздела сред с разной рефракцией по закону Снелла. В качестве модели атмосферы была выбрана многослойная структура сферических тонких слоев. Для вычисления искривления оптических трасс используется прецизионная техника измерения приращений доплеровского смещения частоты несущей, когда трасса сигнала слегка отличается от той, которая была бы при отсутствии атмосферы. Реализована точность измерения частоты 10^{-13} . Это эквивалентно угловому разрешению около 10 нрад или 1 мкград, что соответствует искривлению трассы 5 см на расстоянии 5000 км.

Так как исследователей интересует в конечном счете вертикальное распределение рефракции (когда доплеровского смещения нет), то для его вычисления на основе наклонных зондирований был использован метод интегрального преобразования Абеля при допущении, что структура атмосферы изменяется локально в основном только в вертикальном измерении.

Следующий шаг состоял в интерпретации полученных результатов по рефракции. Учитывается,

что в атмосфере Земли имеется три первичных источника рефракции, влияющих на прохождение СВЧ-сигналов: составляющие сухой атмосферы, влажной атмосферы и ионосферы. Разделение составляющих рефракции было успешно выполнено с учетом того, что в диапазоне рабочих частот GPS зона Френеля, как приближение волнового дифракционного подхода к эквивалентной (синтезируемой) реализуемой апертуре датчика, имеет диаметр около 1.5 км. Это гарантирует горизонтальное разрешение примерно 160 км, определяющее достаточную длину пути в вертикальном атмосферном слое после преобразования Абеля. Были определены все составляющие инструментальных ошибок метода, что позволяет успешно применять метод GPS-зондирования для изучения энергетики и динамики атмосферы. Новые по точности перспективы метода возникли после снятия режима ограниченного доступа в гражданском коде GPS. Для улучшения разделения вклада составляющих сухой и влажной рефракций с помощью таких космических атмосферных патрулей обсуждается возможность дополнительного использования на бортах будущих проектов аппаратов НКА GPS и в проектах НКА GALILEO передатчиков-радиомаяков на одной или двух частотах диапазона миллиметровых волн (ММВ) вблизи линии резонансного поглощения паров воды на частоте 22 ГГц.

ДВУХПОЗИЦИОННАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО СКРЫТОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ (СРЗ)

Двухпозиционная (bistatic) радиолокация, при которой позиции передатчика и приемника радиолокационной станции (РЛС) разнесены в пространстве, является относительно новым эффективным направлением в радиолокации. В 1980-х были проведены эксперименты по использованию бистатической схемы РЛС в качестве высотомера для летательного аппарата (ЛА) с повышенной скрытностью (без передающего сигнала) при использовании для «подсветки» земной поверхности излучения Галактики [1]. Последнее представляет собой широкополосное шумовое радиоизлучение массивных космических тел, подобных Солнцу, лежащих в плоскости Галактики. Атмосфера Земли ограничивает диапазон частот космического шума, достигающего ее поверхности, значениями 10 МГц—100 ГГц, с хорошо изученными зонами повышенного затухания в диапазоне ММВ в парах воды и молекулах кислорода. Наибольшее значение интенсивности галактического шума достигается в том случае,

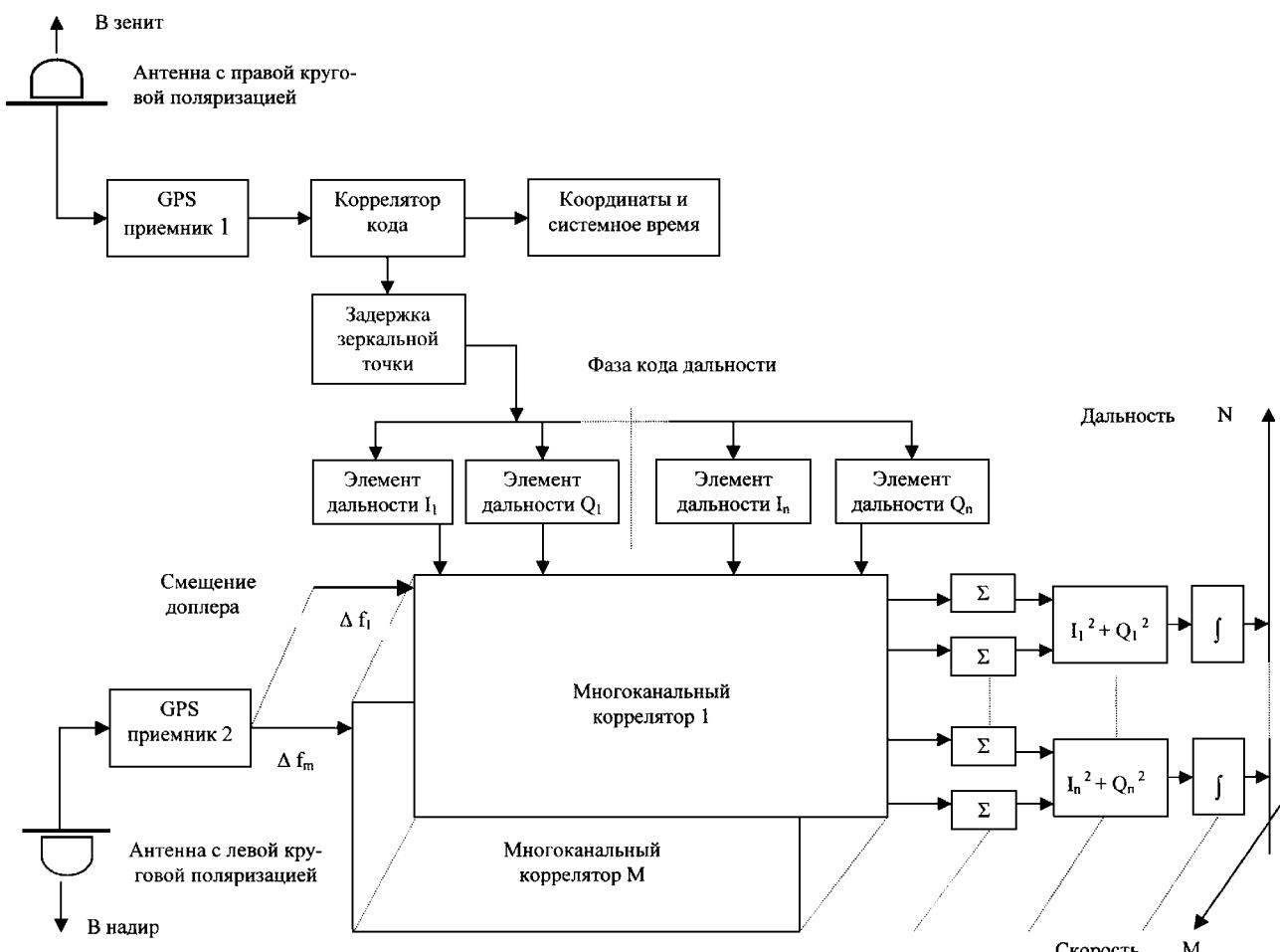


Рис. 2. Структурная схема РЛС со скрытым радиозондированием сигналами GPS

когда приемная антенна ориентирована на центр плоскости Галактики. На частоте 10 МГц уровень галактического шума, принятый полуволновым вибратором, превышает на 30 дБ уровень теплового шума $kT\Delta f$ приемника при стандартной температуре $T_0 = 290$ К, где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура в градусах Кельвина, Δf — полоса частот канала в Гц. На частоте 500 МГц этот относительный уровень падает до -10 дБ. В связи с тем, что Галактика представляет собой протяженный и неоднородный источник шума, есть предел усиления антенны такого электромагнитного датчика, равный 10—15 дБ.

Эксперимент состоял в размещении на ЛА двух приемных антенн — одной, ориентированной вверх на центр плоскости Галактики, и другой, направленной вниз на подстилающую поверхность. С помощью взаимной корреляционной обработки галактического шума, считая его гауссовым процессом с нулевым средним значением, определялось

групповое время запаздывания отражения, принятого «земной» антенной относительно шума, принятого антенной «небесной». Был разработан субоптимальный приемник, состоявший из двух радиоканалов и двух однобитовых аналого-цифровых преобразователей и сдвигового регистра в опорном канале. Затем оба канала поступали на сумматор по модулю два, на выходе которого устанавливался счетчик в качестве так называемого «знакового» взаимокоррелятора. Если сигналы с выходов двух антенн не коррелированы по задержке (коэффициент корреляции $\rho = 0$), то появление нулей и единиц на выходе счетчика равновероятны, и вероятность равна 0.5. При $\rho > 0$ вероятность единиц увеличивается, и пороговая схема обнаруживает наличие совпадения задержек в качестве факта обнаружения сигнала, отраженного от подстилающей поверхности с измерением величины задержки как меры высоты ЛА относительно Земли. Эксперимент на частоте 100 МГц в полосе пропускания

10 МГц при частоте отсчетов $2 \cdot 10^7$ независимых выборок в секунду подтвердил возможность измерения высоты с разрешением ± 3.75 м при использовании галактического шума для СРЗ.

Эксперименты с галактическим СРЗ исчерпали себя после появления возможности использования для целей СРЗ сигналов от НКА GPS. С 1993 г. Европейским космическим агентством ESA проводились первые эксперименты по использованию этих сигналов для бистатических РЛС в качестве скаттерометров и альтиметров. Уже в 1998 г. в рамках программы TOPEX — Ocean Topography Experiment в США был создан высотомер-скаттерометр, использующий сигналы GPS для СРЗ [3]. С помощью этого оборудования был получен большой объем статистических данных о свойствах морской подстилающей поверхности, что позволило создать специализированный инструмент дистанционного мониторинга для задач океанографии.

Структурная схема оборудования показана на рис. 2. Это типичный современный когерентный радиолокатор (РЛС) с двумерным разрешением по дальности и скорости. В качестве источника опорного сигнала используется GPS-приемник 1 с антенной, направленной в зенит. GPS-приемник 2 с антенной, направленной в nadir (в случае альтиметра) или под наклоном к поверхности воды (скаттерометр) служит в качестве измерительного канала. Исключительно эффективно было использовано явление перемены знака круговой поляризации GPS сигналов с правой при передаче на левую при отражении от поверхности среды. Уникальность сигналов GPS в качестве датчика СРЗ, в отличие от галактического шума, состоит в возможности получения высокой угловой разрешающей способности (эффект синтезирования апертуры) на приемной позиции при слабонаправленной антенне. Устранение влияния зеркального отражения («засветки») опорного сигнала реализовано с помощью фиксированной задержки фазы кода. Применяя двумерную матрицу согласованных фильтров по задержке и по доплеровскому смещению, в устройстве обработки измерителя реализуется возможность накопления (когерентного суммирования Σ и некогерентного интегрирования \int) отсчетов сигналов GPS, отраженных от поверхности в пределах временных N и доплеровских M стробов. Фирма «Mitel Semiconductor» (Канада) разработала для этих целей матрицу «задержка — частота Доплера» из 2021 корреляторов квадратурных составляющих отраженных сигналов I_n и Q_n на базе высокой технологии на полупроводниковых чипах. Таким образом, были реализованы измерения высоты морских волн, скорости и направления

движения ветра и волн, а также величины отражающей способности поверхности σ в m^{-2} с помощью измерителя мощности огибающей отраженного сигнала $I_n^2 + Q_n^2$ в элементах разрешения. Последнее свойство позволило различать сухую и влажную земную поверхность, обеспечивая картографирование береговых зон и районов портов (гаваней).

Аппаратура бистатической РЛС с СРЗ сигналами GPS успешно была испытана в США в 1998 г. не только с борта самолета C-130 с высоты 3 км, но и с борта аэростата (зонда) с высоты 25 км. NASA изучает возможность применения этой техники измерений также с борта КА. Успехи настоящей программы обусловят широкое использование техники СРНС (наряду с применением для КВО) в качестве универсального инструмента практически для всех глобальных геофизических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозируется, что сфера применения когерентных электромагнитных датчиков (сенсоров) скрытого зондирования, применяющих сигналы СРНС для исследования геофизических параметров окружающей среды будет расширяться. Их использование особенно перспективно при решении актуальных проблем глобального потепления и изменения климата Земли, исследовании процессов текущих циркуляций в Мировом океане, изменений в атмосфере и прогнозировании погоды. Уникальность метода обеспечивается возможностью использовать высокотехнологичные параметры этих пробных сигналов без затрат на их формирование и излучение, и сосредоточить основное внимание на вопросах обработки сигналов для выделения наиболее полной информации об окружающей среде.

1. Heralley J. E., Schroeder J. E. Bistatic Radar Without Transmitted signal-Covert Altimetry Concept // IEEE Trans. Aerospace and El. Systems.—1990.—26, N 5.—P. 732—736.
2. Kursinski R. Monitoring the Earth's Atmosphere with GPS // GPS World.—1994, March.—P. 50—53.
3. Romjathy A., Garrison J. L., Zavorotny V. GPS: A New Tool for Ocean Science // GPS World.—1999, April.—P. 50—52, 54, 56.

ALTERNATIVE TO USE THE SIGNALS OF SATELLITE RADIO-NAVIGATION SYSTEMS

E. T. Skoryk

Results on the use of the satellite radio-navigation systems (SRNS) for the meteorological physics investigation and the sea surface monitoring distance are reported. The method of hidden radio sounding of surrounding medium by the signals of SRNS radiation and space diagram of two-positional radiolocation is used.

А. В. Прокопов

Харківський державний науково-дослідний інститут метрології

Методы учета влияния земной атмосферы в космической геодезии и навигации

Подано аналітичний огляд літературних джерел про методи врахування впливу земної атмосфери на результати координатно-часових визначень, здійснюваних за допомогою сучасних вимірювальних систем космічної геодезії та навігації, які використовують електромагнітні хвилі радіо- і оптичного діапазонів.

В современной космической геодезии и навигации широко применяются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), радиоинтерферометры со сверхдлинной базой (РСДБ), спутниковые лазерные дальномеры (СЛД), интегрированные со спутниками системы доплеровского определения орбит и радиопозиционирования (ДОРПС), спутниковые высотомерные комплексы и др.

В качестве переносчика измерительной информации в перечисленных системах используются электромагнитные волны оптического и радиодиапазонов. Аппаратурные возможности этих систем к настоящему времени выросли уже настолько, что одним из основных факторов, ограничивающих точность измерений, стало влияние земной атмосферы на характеристики распространения электромагнитных волн, регистрируемых в процессе измерений.

Для серийно выпускаемых ГНСС-приемников геодезического назначения уже давно достигнута инструментальная погрешность измерения фазы радиосигнала, не превышающая 1 мм [2]. В то же время погрешность определения высоты пунктов геодезической сети, построенной с помощью таких приемников, в лучшем случае оказывается на уровне нескольких сантиметров. К числу главных причин столь значительного снижения точности принято относить именно неадекватный учет влияния земной атмосферы [9].

Атмосферные эффекты при распространении электромагнитных волн отличаются большим разнообразием, обусловленным сложностью земной атмосферы как физического объекта. В общем случае атмосфера Земли может рассматриваться как трехмерно-неоднородная среда, состоящая из двух боль-

ших областей: электрически нейтральной, прилегающей непосредственно к земной поверхности (основными ее частями являются тропосфера и стратосфера), и расположенной над ней электрически заряженной области — ионосфере.

Показатель (коэффициент) преломления атмосферы в этих областях содержит регулярную и случайную составляющие. Случайная составляющая связана со стохастическими процессами в атмосфере, приводящими к флюктуациям характеристик электромагнитных волн и случайным погрешностям измерений. Современный уровень развития теории распространения волн в случайных средах позволяет использовать хорошо известные статистические методы минимизации случайных погрешностей. Наиболее важные регулярные эффекты, приводящие к снижению точности координатно-временных определений, связаны с тем, что скорость распространения сигнала в атмосфере не совпадает со скоростью света в вакууме, а длина искривленной из-за эффекта рефракции траектории распространения сигнала оказывается больше длины прямой, соединяющей точки размещения источника и приемника сигнала.

Для ионосферы, например, фазовый показатель преломления которой в радиодиапазоне меньше единицы и зависит от частоты, эти эффекты приводят к групповому запаздыванию и к фазовому опережению радиосигналов [2]. Более подробно на ионосферных эффектах мы остановимся ниже, при обсуждении двухчастотных методов исключения их влияния на результаты измерений. Здесь же отметим, что в случае тропосферы речь идет только о задержке сигнала, в общем случае складывающейся из двух неравных частей. Основная часть отражает

вклад в задержку сухого или гидростатического* компонента показателя преломления воздуха. Для стандартных атмосферных условий при распространении в зенит (угол места $\alpha = 90^\circ$) эта часть эквивалентна примерно 230 см дополнительного пути сигнала как для оптического, так и для радио-диапазонов, и называется гидростатической зенитной задержкой. Влажный (негидростатический) компонент показателя преломления оказывает заметное влияние только в случае радиодиапазона. При этом в зависимости от влажности воздуха он может давать дополнительный вклад в зенитную задержку от 0 до 40 см. Этот компонент обычно называется негидростатической зенитной задержкой. С уменьшением угла места α и гидростатический, и негидростатический компонент задержки сигнала в тропосфере увеличиваются примерно как $(\sin\alpha)^{-1}$.

Еще одним эффектом, существенно влияющим на точность координатных измерений (в тех случаях, когда измеряемыми являются угловые величины), оказывается угловая рефракция, то есть отличие направления прихода сигнала в приемник от истинного направления на источник этого сигнала. Угловая рефракция в настоящей статье не рассматривается.

Как уже упоминалось выше, свойства ионосферы и тропосферы зависят от диапазона длин волн электромагнитных сигналов, используемых в измерениях [14]. В оптическом диапазоне ответственной за дополнительную задержку сигнала является тропосфера. При этом показатель преломления воздуха зависит от длины волны оптического излучения (имеет место эффект дисперсии). Ионосфера же является для оптических сигналов фактически вакуумом. В радиодиапазоне существенное влияние на задержку сигнала оказывает и тропосфера, и ионосфера. Однако дисперсионными свойствами обладает лишь ионосфера, показатель преломления тропосферы же в радиодиапазоне не зависит от длины волны.

Наличие дисперсии среды позволяет исключить ее влияние на основе измерений групповых (фазовых) набегов на различных несущих частотах. Такой подход впервые был предложен для наземной оптической дальномерии [5]. Практическая реализация этого подхода в оптическом диапазоне длин волн оказалась весьма сложной задачей, поэтому первые образцы двухволновых СЛД еще не вышли из стадии лабораторных экспериментов [10]. Гораздо более существенные успехи достигнуты в реализации дисперсионного метода измерений

в радиодиапазоне, хотя работы здесь начались намного позднее. Двухчастотные ГНСС-приемники уже более 10 лет производятся серийно и успешно используются в многочисленных приложениях.

Принято считать, что измерения на двух частотах позволяют с достаточной точностью исключить влияние ионосферы на результаты ГНСС-измерений. Отметим, однако, что двухчастотные (двухвольновые) средства измерений в принципе не учитывают тот факт, что электромагнитные сигналы с различными несущими частотами распространяются в неоднородной среде с дисперсией по разным траекториям. В статье [8] показано, что в оптическом диапазоне этот эффект для небольших углов места α может оказаться существенным (соответствующая погрешность измерения расстояния может достигать 2...3 см для $\alpha < 10^\circ$). Оценки указывают на то, что этот эффект в принципе должен проявляться и в радиодиапазоне при двухчастотных наблюдениях ИСЗ на малых углах места.

Таким образом, исследования эффекта разброса траекторий представляют интерес, в особенности в связи с тем, что в разрабатываемой в настоящее время европейской ГНСС GALILEO планируется применить по крайней мере три достаточно отличающиеся друг от друга несущие частоты [11]. Это можно использовать при необходимости для исключения остаточной ионосферной погрешности, обусловленной пространственным разбросом траекторий сигналов с различными несущими частотами.

В связи с отсутствием дисперсии для радиоволн в тропосфере при разработке алгоритмов определения тропосферных поправок широко применяется метод моделирования, опирающийся на теорию распространения электромагнитных волн в неоднородных средах. Отметим, что этот метод сохраняет свое значение и для оптического диапазона, поскольку перспективы внедрения двухволновых СЛД в практику астрономо-геодезических наблюдений остаются пока еще довольно неопределенными.

Интерес к исследованиям и разработкам моделей тропосферных поправок в оптическом и радиодиапазоне не ослабевает вот уже более трех десятков лет. Однако данная проблема пока еще далека от своего окончательного решения. Основная трудность здесь состоит в сильной пространственно-временной изменчивости реальной атмосферы.

Список научных работ, посвященных проблеме влияния земной атмосферы на координатно-временные измерения, осуществляемые с помощью электромагнитных волн, насчитывает несколько сот

* Гидростатический компонент показателя преломления воздуха в земной атмосфере определяется полным атмосферным давлением, высотное распределение которого является следствием известного условия гидростатического равновесия.

наименований. Весьма подробный обзор работ зарубежных исследователей, посвященных моделям показателя преломления воздуха и данным о его пространственных распределениях, разработкам алгоритмов определения тропосферных поправок и их тестированию, приведен в работе [24]. Из анализа этих работ следует, что при решении задач атмосферной коррекции на основе методов моделирования задержки сигнала за рубежом в настоящее время используется в основном три подхода:

1. *Чистое моделирование.* В этом случае тропосферная задержка вычисляется по данным метеоизмерений в точке расположения приемника с использованием какой-либо математической модели распространения радиоволн в неоднородной среде. Как будет ясно из дальнейшего, погрешность такого моделирования обычно оказывается не менее 3 см, что приводит к неприемлемым с точки зрения ряда приложений погрешностям координатных определений [24].

2. *Внешняя калибровка.* Отличается от чистого моделирования тем, что по математической модели с использованием данных о метеопараметрах в точке наблюдения вычисляется лишь «сухой» или гидростатический компонент задержки. Вклад влажности воздуха определяется путем измерений независимым методом, например, с помощью радиометра водяных паров (РВП) [13], рамановского лидара [20], спектрального гигрометра [12]. В работе [22] погрешность измерений с помощью РВП оценена на уровне 2...3 мм для зенитной задержки. К сожалению, РВП неприменимы во время дождя и могут иметь систематическую погрешность, зависящую от места размещения радиометра и времени года. Необходимо также учитывать, что пересчет измеренной с помощью РВП зенитной задержки на произвольный угол места приводит к заметному увеличению погрешности результата.

3. *Самокалибровка.* При использовании этого метода вклад влажного компонента (который в зарубежной литературе получил наименование «остаточная зенитная задержка») определяется на основе обработки данных непосредственно ГНСС-наблюдений. Процедура обработки может быть различной — использование метода наименьших квадратов, фильтра Калмана и др. [16] — однако в любом случае такая обработка требует применения априори известной зависимости тропосферной задержки от угла места. По этой причине точность конечного результата и здесь во многом определяется той точностью, с которой промоделирована угловая зависимость тропосферной задержки.

Таким образом, проблема точного физико-мате-

матического моделирования задержки радиосигнала в тропосфере является актуальной для всех трех описанных выше методов определения тропосферных поправок, применяемых для коррекции ГНСС-измерений.

В связи с этим проанализируем далее наиболее точные модели тропосферных поправок и перспективы дальнейших исследований в этой области. При этом будем учитывать, что современные средства обработки результатов ГНСС-измерений представляют собой компьютерные программы, включающие в себя те или иные алгоритмы коррекции. Пользователь по сути не имеет доступа к конкретным математическим алгоритмам, а имеет дело только с программной реализацией этих алгоритмов. По этой причине далее приводятся лишь общие сведения о тропосферных моделях и данные о точностных возможностях наиболее популярных алгоритмов тропосферной коррекции. Непосредственные же математические соотношения, зачастую довольно громоздкие, не выписываются.

В общем случае задержка ΔS радиосигнала, прошедшего трехмерно-неоднородную тропосферу с показателем преломления $n(\mathbf{r})$ (\mathbf{r} — радиус-вектор), может быть представлена в виде

$$\Delta S = \int_0^D (n - 1) d\sigma + \int_0^D d\sigma - L, \quad (1)$$

где L — расстояние между концевыми точками измеряемой линии по прямой; D — длина траектории, искривленной на атмосферном участке вследствие рефракции; σ — лучевая координата.

Интегрирование в (1) ведется вдоль лучевой траектории, форма которой определяется лучевым уравнением

$$\frac{d}{d\sigma} \left(n \frac{d\mathbf{r}}{d\sigma} \right) = \nabla n, \quad (2)$$

где ∇ — знак градиента [3].

Исходные уравнения (1), (2) обычно рассматриваются в приближении сферически-слоистой среды. При этом в зарубежной литературе, как уже отмечалось, особо выделяется случай зенитной задержки ΔS^z . При моделировании ΔS^z общая задержка представляется в виде суммы двух слагаемых, описывающих соответственно вклад «сухого» (гидростатического) компонента ΔS_h^z и «влажного» (негидростатического) компонента ΔS_w^z :

$$\Delta S^z = \Delta S_h^z + \Delta S_w^z. \quad (3)$$

Переход к задержке сигнала под произвольным углом места α принято осуществлять с помощью специально строящихся функций отображения

(mapping function). В общем случае эти функции вводятся формально. Мотивы их введения можно понять из следующих соображений. Применительно к среде с постоянным значением показателя преломления для плоской геометрии задачи уравнения (1), (2) дают следующее соотношение для задержки

$$\Delta S = \Delta S^z \frac{1}{\sin \alpha}. \quad (4)$$

По аналогии с (4) для произвольной сферически неоднородной тропосфера задержка сигнала формально представляется также в виде произведения зенитной задержки ΔS^z и некоторой функции $m(\alpha)$, которая «проецирует» или «отображает» ΔS^z на направление, соответствующее углу места α :

$$\Delta S = \Delta S^z \cdot m(\alpha).$$

Именно функция $m(\alpha)$, поведение которой не сильно отличается от поведения функции $1/\sin \alpha$, и получила название функции отображения. Такая функция обычно вводится не только для полной задержки, но и для отдельных ее компонентов — гидростатического и негидростатического

$$\Delta S = \Delta S_h^z m_h(\alpha) + \Delta S_w^z m_w(\alpha). \quad (5)$$

По литературным источникам можно найти несколько десятков различных соотношений, предлагаемых для вычисления ΔS_h^z , ΔS_w^z , ΔS , $m_h(\alpha)$, $m_w(\alpha)$ [24]. Необходимо, однако, отметить, что все они базируются на одном из трех подходов, предложенных около 30 лет назад в основополагающих работах [17, 23, 27].

Методика [17] использует аналитическую функцию для описания высотного профиля показателя преломления воздуха (парабола 4-й степени).

В работе [23] применены цепные дроби для компактного представления разложенных в ряд интегралов рефракции. Коэффициенты разложения, которые выражаются через такие же интегралы, при этом определяются на основе численного эксперимента с использованием заранее заданных профилей показателя преломления воздуха (методика «ray tracing»). Именно этот подход стал наиболее популярным для получения угловых зависимостей задержки $m(\alpha)$, $m_h(\alpha)$, $m_w(\alpha)$.

Основной идеей работы [27] явилось использование теоремы статики атмосферы, что позволило взять в общем виде интеграл рефракции для гидростатической задержки. В рамках данной модели получены простые соотношения для зенитных за-

держек, которые мы приводим для использования в оценочных расчетах:

$$\Delta S_h^z = \frac{0.002277 P_s}{1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00000028 H_s}, \quad (6)$$

$$\Delta S_w^z = 0.002277 \left(\frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) e_s.$$

Здесь φ , H_s — широта (в градусах) и высота над уровнем моря (в метрах) точки, где размещается приемник; P_s , T_s , e_s — давление (в мбар*) и температура (в градусах Кельвина) воздуха, парциальное давление водяных паров (в мбар) в данной точке.

Формулы, полученные в многочисленных последующих статьях, являются лишь модификациями результатов указанных выше работ и не затрагивают их основополагающие принципы. Подробный анализ имеющихся в зарубежной литературе моделей тропосферных поправок, выполненный на основе ray tracing с использованием данных метеозондирования, полученных в течение 1992 г. на 50 метеостанциях, размещенных, в основном в Северной и Южной Америке, показал [24], что наиболее точные результаты обеспечивают следующие модели: [27] — для зенитной задержки; [15, 19, 21, 25] — для зависимости задержки от угла места (т. е. для mapping function).

Приведем количественные характеристики точности этих моделей. Погрешность определения гидростатической зенитной задержки по модели [27] не превышает 1 мм. Вклад влажности воздуха, т. е. негидростатическая зенитная задержка, моделируется с погрешностью около 3 см с помощью моделей [19, 27]. Такую же погрешность обеспечивает и приведенная в [27] модель полной задержки. Mapping function для гидростатического компонента задержки наиболее точно описывается моделями, приведенными в [15, 19, 25]. Погрешность этих моделей не превышает 0.5 см при $\alpha = 10^\circ$. Модели этих же авторов оказались лучшими и для mapping function, учитывающей вклад влажности (погрешность моделирования не превышает 1.5 мм для $\alpha = 10^\circ$).

Необходимо отметить, что именно перечисленные выше модели предлагаются для практического использования в рекомендациях Международной службы вращения Земли [18].

Полную погрешность моделирования тропосферной задержки можно получить, если просуммировать приведенные выше отдельные составляющие

* 1 мбар = 10^2 Па

погрешности с учетом соотношений (3)–(6). Наиболее просто эта процедура выполняется в случае чистого моделирования: полная погрешность оказывается не менее 3 см при $\alpha = 90^\circ$ и увеличивается с уменьшением α (при $\alpha = 10^\circ$ она составляет не менее 17 см).

Среди причин, приводящих к рассмотренным выше погрешностям, можно указать эмпирический характер моделей зависимости задержки от угла, отклонение от условий гидростатического равновесия в реальной атмосфере, неадекватный учет влажности воздуха и др.

Помимо перечисленных причин рассмотренные выше модели не учитывают еще ряд факторов, что снижает их точность. В частности, эти модели справедливы лишь в приближении сферически симметричной земной атмосферы и не учитывают горизонтальных градиентов показателя преломления воздуха, имеющих место в реальных условиях. Для $\alpha = 10^\circ$ это приводит к дополнительной задержке порядка 2...3 см. Известные в настоящее время модели соответствующих поправок базируются на методе учета горизонтальных градиентов, предложенном Гарднером [24].

Еще одним источником погрешности для рассмотренных моделей является пренебрежение влиянием на задержку сигнала гидрометеоров: облаков, тумана, снега, дождя. В работах [1, 24] даны оценки вклада этих эффектов и показано, что в ряде случаев он может быть весьма существенным. При наличии кучевого дождевого облака, например занимающего диапазон высот 0.7–3.7 км и описываемого добавкой к показателю преломления воздуха порядка $2.3 \cdot 10^{-5}$, дополнительная задержка составит 5.4 см для $\alpha = 90^\circ$ и 32 см для $\alpha = 10^\circ$ [1]. В литературе, однако, нет сведений о каких-либо разработках методов учета гидрометеоров при GNSS-измерениях.

Проведенный анализ показывает, что проблема повышения точности моделирования задержки сигнала в тропосфере применительно к координатно-временным измерениям остается актуальной. Представляют интерес дальнейшие исследования, направленные на поиск новых моделей тропосферной задержки, свободных от ограничений рассмотренных в настоящей работе алгоритмов моделирования. К наиболее актуальным задачам здесь можно отнести отказ от использования теоремы статики и эмпирических подходов при отыскании угловых зависимостей задержки, уточнение моделей учета влажности воздуха, разработка методов учета влияния гидрометеоров и др.

В связи с этим представляется целесообразным развивать новый подход к решению проблемы уч-

та тропосферы, предложенный в работе [6]. В основу нового подхода положен строгий метод решения задач геометрической оптики неоднородных сред — интегральное лучевое приближение (ИЛП). Уравнения ИЛП связывают усредненные вдоль геометрооптических лучей величины и сформулированы специально для анализа интегральных эффектов при распространении электромагнитных волн в атмосфере. Основной идеей метода ИЛП является представление интегралов рефракции квадратурными суммами Эйлера — Маклорена, содержащими в качестве параметров интегральные характеристики среды. Искомые поправки при этом могут быть выражены в виде функций от метеопараметров атмосферы в точке размещения приемника сигнала (причем эти функции не являются эмпирическими, как в известных методах, а представлены строгими аналитическими соотношениями). Существенно, что метод ИЛП не требует привлечения теоремы статики атмосферы. Его уравнения сформулированы в общем случае произвольной трехмерно-неоднородной среды, и следовательно, позволяют учесть горизонтальные градиенты показателя преломления воздуха.

К настоящему времени разработано несколько упрощенных вариантов практической реализации метода ИЛП, в частности для определения астрономической рефракции в оптическом диапазоне [7], для определения атмосферных поправок к результатам SLR-измерений [4], для определения тропосферных поправок в радиодиапазоне [26]. Расчетные алгоритмы реализованы в виде современных компьютерных программ.

Сравнительный анализ точности моделей ИЛП и известных моделей проведен на базе гау tracing с использованием годовых наборов данных метеозондирования атмосферы, полученных в различных регионах Украины, а также на нескольких метеостанциях США и Канады. Показано, что новый подход позволяет уменьшить систематическую составляющую погрешности определения атмосферной поправки как в оптическом, так и в радиодиапазоне длин волн.

1. Андрианов В. А., Мосин Е. Л., Смирнов В. М. Оценка влияния капельно-жидких атмосферных образований на величину тропосферной погрешности радиотехнических измерений дальности и скорости искусственных спутников Земли // Радиотехника и электроника.—1992.—Вып. 3.—С. 555–558.
2. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Р., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика: Пер. з англ. третього вид. / Під ред. Я. С. Яцківа. — Київ: Наук. думка, 1995.—380 с.
3. Кравцов Ю. А., Фейзулин З. И., Виноградов А. Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. — М.: Радио и

- связь. — 1983. — 224 с.
4. Миронов Н. Т., Прокопов А. В., Ремаев Е. В. Исследование нового метода учета влияния земной атмосферы при лазерных измерениях расстояний до ИСЗ // Кинематика и физика небес. тел. — 1997. — 13, № 4. — С. 89—96.
 5. Прилепин М. Т. Определение показателя преломления воздуха при измерении расстояний светомодуляционными дальномерами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 1957. — № 2. — С. 123—132.
 6. Прокопов А. В. Интегральные методы лучевой теории в задачах исследования и учета влияния земной атмосферы на точность астрономо-геодезических наблюдений // Метрология времени и пространства: Тр. 5 Российского симп. — Менделеево: ИМВП ГП ВНИИФТРИ, 1994. — С. 212—217.
 7. Прокопов А. В., Ремаев Е. В. О возможности повышения точности определения астрономической рефракции по наземным метеоданным // Кинематика и физика небес. тел. — 1996. — 12, № 3. — С. 37—43.
 8. Прокопов А. В., Ремаев Е. В. Рефракционные ограничения точности двухволновой спутниковой лазерной дальномерии // Український метрологічний журнал. — 2000. — Вип. 2. — С. 5—9.
 9. Beutler G., Bauersima I., Gurtner W. et al. Atmospheric Refraction and Other Important Biases in GPS Carrier Phase Observations // Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements / Ed. F. K. Brunner. Monograph 12, School of Surveying. The University of New South Wales, Kensington, Australia, 1988. — P. 15—43.
 10. Boer A., Hessels U. Two Color Laser Ranging with TIGO SLR System. Status and First Results // Presented at the 11 International Workshop on Laser Ranging, 21—25 September, Deggendorf, Germany, 1998.
 11. Eissfeller B., Hein G. W., Winkel J. C., et al. Requirements on the Galileo Signal Structure // ION GPS 2000, 19-22 September 2000, Salt Lake City, UT, 2000. — P. 1772—1781.
 12. Elgered G. Refraction in the troposphere // Proc. of Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy / Eds J. C. de Munck, T. A. Th. Spoelstra. — The Hague, The Netherlands, 19—22 May, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Delft, The Netherlands, N 36, New Series, 1992. — P. 13—19.
 13. Elgered G. Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave radiometry // Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry / Ed. M. A. Janssen. — John Wiley and Sons, 1993. — P. 215—258.
 14. Hartman G. K., Leitinger R. Range errors due to ionospheric and tropospheric effects for signal frequencies above 100 MHz // Bulletin Geodesique. — 1984. — 58. — P. 109—136.
 15. Herring T. A. Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data // Proc. of Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy / Eds J. C. de Munk, T. A. Th. Spoelstra. — The Hague, The Netherlands, 19-22 May, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Delft, The Netherlands, N 36, New Series, 1992. — P. 157—164.
 16. Herring T. A., Davis J. L., Shapiro I. I. Geodesy by radio interferometry: The application of Kalman filtering to the analysis of very long baseline interferometry data // J. Geophys. Res. — 1990. — 95, N B8. — P. 12561—12581.
 17. Hopfield H. S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data // J. Geophys. Res. — 1969. — 74, N 18. — P. 4487—4499.
 18. IERS Conventions // IERS Technical Note 21 / Ed. D. D. McCarthy. — U.S. Naval Observatory, 1996.
 19. Ifaidis I. The atmospheric delay of radio waves: modeling the elevation dependence on a global scale // Technical Report N 38L, School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1986.
 20. Jackson D. M., Gasiewski A. J. Millimeter-wave radiometric observations of the troposphere: a comparison of measurements and calculations based on radiosonde and Raman lidar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 1995. — 33, N 1. — P. 3—14.
 21. Lanyi G. Tropospheric delay effects in radio interferometry // The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42—78, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif., 1984. — P. 152—159.
 22. Linfield R. P., Teitelbaum L. P., Skjerve L. J., et al. A Test of water vapor radiometer-based troposphere calibration using VLBI observations on a 21-kilometer baseline // The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42—122, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif., 1995. — P. 12—31.
 23. Marini J. W., Murray C. W. Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees // NASA-TM-X-70555. — Greenbelt, Md.: Coddard Space Flight Center, 1973.
 24. Mendes V. B. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques // Ph. D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report N 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1999. — 353 p.
 25. Niell A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // J. Geophys. Res. — 1996. — 101, N B2. — P. 3227—3246.
 26. Prokopov A., Remayev Ye. New approach to the problem of determination of atmospheric refractivity corrections for space geodetic applications // Reports on Geodesy. — 2000. — N 9 (55). — P. 43—48.
 27. Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction. In three parts // Bulletin Geodesique. — 1973. — N 105. — P. 279—298; N 106. — P. 383—397; N 107. — P. 13—34.

METHODS OF ALLOWING FOR EARTH'S ATMOSPHERE INFLUENCE IN SPACE GEODESY AND NAVIGATION

A. V. Prokopov

An analytical survey of literature referring to the methods of allowing for Earth's atmosphere influence on results of coordinate and time determinations is given. These determinations are carried out by modern space geodesy and navigation measuring systems using the electromagnetic waves of radio and optical bands.