

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 супутникових 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 дальньої 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 півкулю. 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 трансєвропейської 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 супутникових 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 високоточних 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 бойової 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 кодівих 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 ґрунтується 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:

$$u(t) = \sum_{i=1}^N \{ \mu_{0i} d_i(t) S_i[t, \Lambda_i(t)] + \text{Re}[\dot{\mu}_i(t) d_i(t) \dot{S}_i(t, \Lambda_i(t))] \} + n(t),$$

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 широкопasmовий 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) флуктуації сигналу i -го НШСЗ; $n(t)$ — адитивні флуктуації, які мають як теплові шуми, так і сигнали, обумовлені багатопрореневістю.

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 повільнозмінних 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 системі 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:

$$\delta \Lambda_k = \sum_{i=0}^P C_i \varphi_{ki} + \left(\sum_{j=1}^m \gamma_j \delta \Lambda_{kj}^0 + \varepsilon_k \right) + \nu_k,$$

де P — степінь полінома; C_i — невідомі коефіцієнти; φ_{ki} — відомі поліноми Тейлора або Чебишева; γ_j — невідомі коефіцієнти авторегресії; $\delta \Lambda_{kj}$ — корельована складова вхідних даних; ε_k, ν_k — некорельовані випадкові величини з нульовими середніми значеннями та невідомими дисперсіями $\sigma_\varepsilon^2, \sigma_\nu^2$.

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, будуються 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 великобазовий 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 — похибки спостережень, статистичні характеристики яких визначені при метрологічній атестації на рівні коливань, що приймаються.

Лінеаризація відношення для функцій, що вимірюються, у межах вектора Λ_{skjc} (яка визначається за службовою інформацією з борта НШСЗ) дає

$$\delta \mathbf{u}_{kj} = \mathbf{u}_{kj} - \mathbf{R}_{kj}(\Lambda_{skjc}, \mathbf{Q}) = \mathbf{C}_{kcj} \cdot \delta \Lambda_{skj} + \mathbf{n}_k,$$

де

$$\mathbf{C}_{kcj} = \frac{\partial \mathbf{R}_{kj}}{\partial \Lambda_{skj}}$$

при значенні $\delta \Lambda_{skjc}; \delta \Lambda_{skj} = \Lambda_{skj} - \Lambda_{skjc}$.

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 єдиного часу та еталонних частот, дієздатність якої гарантує часове забезпечення України за будь-яких обставин, у тому числі в практично неможливому (суто 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 єдиної системи, яка задовольнить 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 // Космична наука і технологія.—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 супутникових радіонавігаційних систем // Український метрологічний журн.—1998.—Вип. 3.—С. 55—57.
3. Романько В. Н., Хомяков Э. Н., Наумова Е. Э., Шаповалов С. Г. Статистическая обработка оценок поправок к шкале времени аппаратуры потребителей ГЛОНАСС // Метрологія в електроніці: 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 subdivisions in the Ukrainian Armed Forces based on the system of metrological control of radio-navigation fields.