

УДК 389.23

А. С. Клейман<sup>1</sup>, А. И. Левенберг<sup>1</sup>, А. В. Соловьев<sup>1</sup>, В. С. Соловьев<sup>1</sup>,  
В. Е. Родионов<sup>1</sup>, С. А. Таламанов<sup>1</sup>, Б. И. Макаренко<sup>2</sup>, В. Н. Романько<sup>3</sup>,  
П. А. Кравченко<sup>4</sup>, Т. А. Усенко<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Харківський державний науково-дослідний інститут метрології

<sup>2</sup>АТ Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

<sup>3</sup>Науковий метрологічний центр (військових стандартів) Міністерства оборони України, Харків

<sup>4</sup>Харківський державний університет сільського господарства

<sup>5</sup>ТОВ «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 досліджень з системою GPS.

---

Повышение требований широкого круга разнородных потребителей к точности, надежности, достаточности и глобальности координатно-временного обеспечения обусловило активное развитие как частотно-временных систем, так и радионавигационных систем на их основе. Это оказало существенное влияние не только на собственно навигацию, но и на ряд смежных областей: геологоразведка, землеустройство, управление транспортными системами, включая судовождение по фарватерам морей и рек, экологию и т. д.

Решение практически всех проблем дальнейшего развития средств координатно-временного обеспечения наряду с использованием специфических аппаратных и программных средств, связанных, в основном, с совершенствованием аппаратуры потребителей, предусматривает в том или ином виде объединение в единую координатно-временную систему различных систем как частотно-временных, так и радионавигационных.

Различные подходы к этой области могут быть реализованы на основе интегрирования и синтеза различных систем, обобщая которые можно предложить вариант формирования интеграль-

ной координатно-временной системы (ИКВС), структурная схема которой представлена на рис. 1.

Украина располагает Государственным первичным 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 характеристикам лучших зарубежных эталонов. Передача размеров единиц времени и частоты, и шкалы времени от Государственного эталона потребителям в настоящее время осуществляется как непосредственно рабочим эталонам, так и с применением каналов телевидения. Как уже указывалось, задача построения системы мониторинга, предназначенной для формирования соответствующих поправок на эталонные сигналы частоты и времени (ЭСЧВ), передаваемые зарубежными радиостанциями, включая космические радионавигационные системы (КНС) GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия), реализуется комплексом аппаратуры (рис. 1). Последнее особенно важно, так как применение КНС для решения задач координатно-временного обеспечения потребителей находит все более широкое использование [1, 4—6]. Контроль качества (мониторинг)

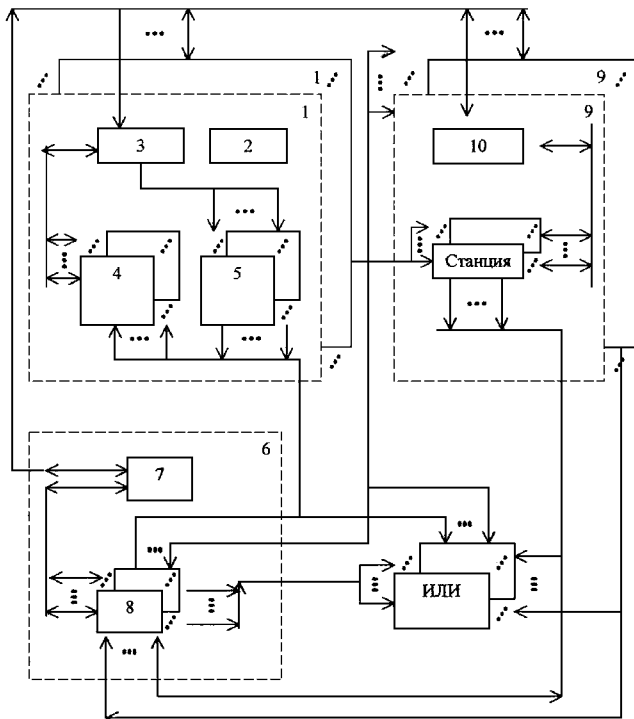


Рис. 1. Структура интегральной координатно-временной системы: 1 — спутниковые радионавигационные системы (СРНС), 2 — системный эталон времени и частоты (СЭВЧ), 3 — центр управления спутниковыми системами (СУСС), 4 — контрольный пункт (КП), 5 — навигационные сигналы (НС), 6 — подсистема формирования контрольно-корректирующей 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 двувыворочной 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  $\approx 40$ —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.

Таковыми 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
1	Среднее квадратичное относительное двувыворочное отклонение частоты, не более:	
	за 1 с	$8 \cdot 10^{-12}$
	за 10 с	$5 \cdot 10^{-12}$
	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 400×140×380	
4	Масса, кг	12

Таблица 2. Результаты сличений АП SVeeSix-СМ3

№ п/п	Характеристика	Время усреднения		Примечание
		1 сут	10 сут	
1	Среднее квадратичное отклонение частоты, $10^{-12}$	0.46	0.13	При сличении с рубидиевым стандартом
		0.55	0.14	При сличении с ГПЭВЧУ
2	Линейный уход частоты, $10^{-12}$	0.04	0.04	При сличении с рубидиевым стандартом
		0.04	0.04	При сличении с ГПЭВЧУ

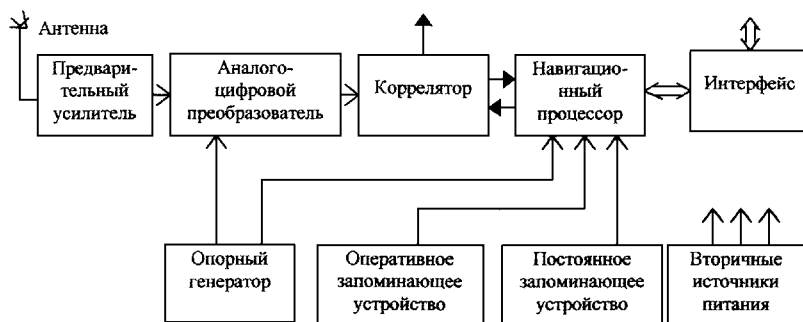


Рис. 2. Структурная схема АП SVeeSix-СМ3

Аппаратуру приема сигналов системы GPS выпускают ряд фирм: «3S Navigation», «Trimble» (США), РНИИ КП, «Котлин», (Россия), «Оризон-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-СМ3 производства фирмы «Trimble».

Приемное шестиканальное устройство SVeeSix-СМ3 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-СМ3 пред-

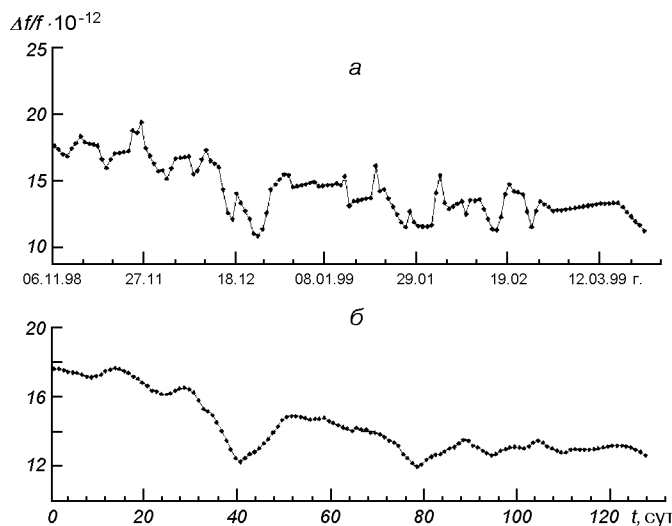


Рис. 3. Результаты сличений рубидиевого стандарта с АП SVeeSix-СМ3 с усреднением: а — за 1 сут, б — за 10 сут

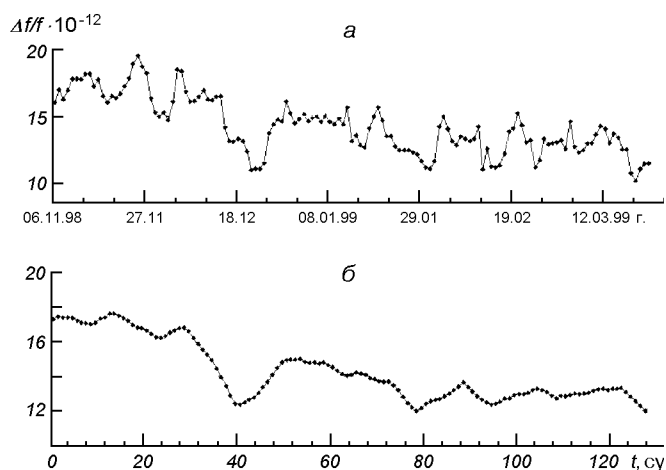


Рис. 4. Результаты долговременных сличений АП SVeeSix-CM3 с водородным стандартом ГПЭВЧУ с усреднением: *a* — за 1 сут, *б* — за 10 сут

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 (H), 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, *a* 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.

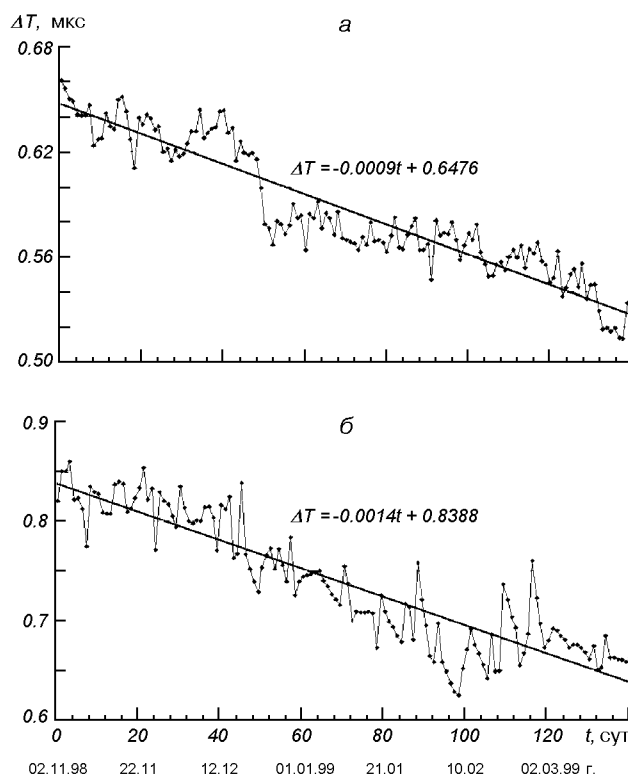


Рис. 5. Результаты сличений водородного стандарта ГПЭВЧУ с PNC GPS с использованием: *a* — АП «Trimble 4000», *б* — SVeeSix-CM3

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	

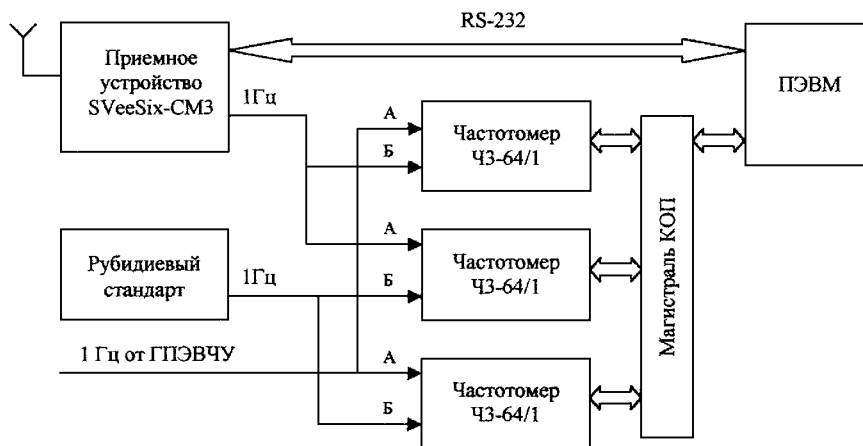


Рис. 6. Структурная схема установки для проведения сличений

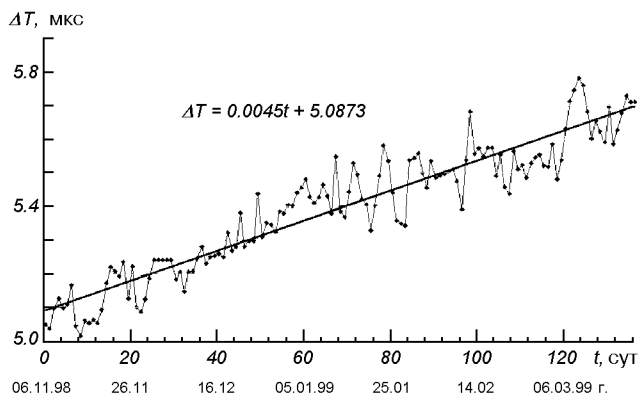


Рис. 7. Разность результатов сличений с помощью СРНС GPS и результатов непосредственных сличений

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 частотомеры при помощи интерфейса КОП. ПЭВМ также осуществляет управление приемным устройством SVeeSix-СМ3, 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 (вре-

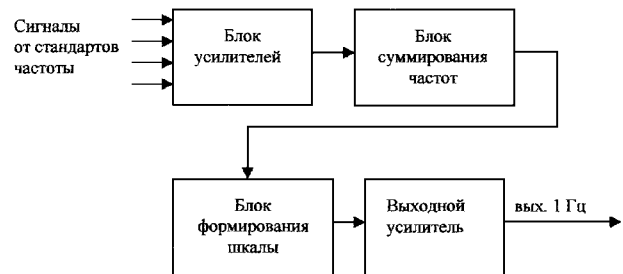


Рис. 8. Схема формирования физической групповой шкалы

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 двувыборочное 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 харак-

Таблица 5. Результаты исследования системы формирования групповой шкалы при использовании четырех водородных стандартов

Способ формирования шкалы	Среднее квадратичное двувыворочное 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 // «Навигация-98»: Сб. тр. Второй Междунар. конф. — 1997.—Т. 2.—С. 336—353.
2. Белянский 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 журн.—1998.—Вип. 1—4.
4. Клейман А. С. и др. О метрологическом обеспечении измерений, осуществляемых с применением глобальных радионавигационных систем // Український метрологічний журн.—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.