

*В.В.БАВЫКИНА, канд. техн. наук, А. С. КЛЕЙМАН, д-р техн. наук,
Ю.А. КОВАЛЬ, д-р техн. наук, В. С. СОЛОВЬЕВ, д-р техн. наук,
А.А. ТКАЧУК, канд. техн. наук, С.В. ТРАМБОВЕЦКИЙ*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ МЕР ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ GPS

Синхронность или привязка шкал времени территориально разнесенных эталонов (или стандартов) времени и частоты — основа для реализации современных частотно-временных методов, позволяющих решать актуальные научно-технические и оборонные задачи, создавать системы координатно-временного обеспечения, метрологии времени и частоты, радиоастрономии, радиолокации и др. Так, в настоящее время для Украины актуальна задача синхронизации опорных генераторов в национальной цифровой системе связи [1].

Качество работы систем синхронизации мер времени и частоты прежде всего определяется высокой стабильностью эталонных генераторов и точностью их синхронизации. Относительная нестабильность современных квантовых генераторов составляет $10^{-13} \dots 10^{-15}$. Высокие темпы совершенствования генераторов, оцениваемые ориентировочно уменьшением нестабильности на один порядок в течение десяти лет, позволяет прогнозировать в перспективе нестабильности генераторов в пределах $10^{-16} \dots 10^{-18}$. Что касается средств и методов синхронизации генераторов, то они традиционно уступают по точности генераторам и поэтому в значительной мере определяют качество работы систем. Этим определяется актуальность работ, направленных на совершенствование методов синхронизации территориально распределенных опорных генераторов и хранителей времени.

В основе практически всех методов синхронизации лежит передача информации о шкалах времени. Сопоставительный анализ методов синхронизации [2-8] показывает, что в настоящее время наивысшую точность обеспечивают: перевозимые квантовые часы (ПКЧ); спутниковые радионавигационные системы (СРНС) GPS и ГЛОНАСС; связные ИСЗ; радиометеорный метод синхронизации (РМС). Каждый из высокоточных методов синхронизации (см. табл. 1) обладает определенными преимуществами и недостатками, которые необходимо учитывать при решении конкретной задачи.

Таблица 1

Метод	Погрешности синхронизации	Достоинства	Общие недостатки// Недостатки для Украины
ПКЧ	1...10 нс	Прямые измерения	Низкая оперативность; высокая стоимость //Отсутствие ПКЧ
ИСЗ связи	1...100 нс	Глобальная зона действия; оперативность	Излучение в пунктах // Зависимость от зарубежных систем
СРНС	1...50 нс	Глобальная зона действия	Селективный доступ (СД) для GPS; низкая оперативность // Зависимость от зарубежных систем
РМС	20...30 нс (в перспективе < 1 нс)	Оперативность. Независимость от зарубежных систем	Излучение в пунктах. Ограниченная дальность (до 2000 км)

Вопросам высокоточного частотно-временного обеспечения уделяется серьезное внимание во всех развитых странах мира [9, 10]. Особую актуальность имеет задача синхронизации времени и частоты для Украины, которая после распада СССР практически лишилась технических средств передачи эталонных сигналов времени и частоты по радиоканалам. Украина помимо этого не располагает собственными СРНС, связными ИСЗ и предприятиями по выпуску ПКЧ [11, 12]. Несмотря на решение ряда актуальных задач, включенных в Государственную программу создания и развития Государственной службы единого времени и эталонных частот Украины [13], потребители в Украине пока вынуждены пользоваться сигналами радиостанций и бортовых источников СРНС других стран (прежде всего США и России).

Анализ показывает, что наиболее приемлемы для решения задачи синхронизации мер времени и частоты в Украине два сопоставимых по точности метода – СРНС и РМС, которые взаимно дополняют друг друга. Достоинствами СРНС являются: глобальная зона действия, отсутствие излучения на пунктах, миниатюрность приёмной аппаратуры, а достоинствами РМС – автономность, оперативность, независимость от зарубежных систем. К недостаткам СРНС относятся: недостаточно высокая оперативность, зависимость от зарубежных систем, вероятность введения селективного доступа в системе GPS, а к недостаткам РМС – излучение в пунктах синхронизации и ограниченная дальность (до 2000 км). В связи с изложенным значительный интерес представляет освоение метода синхронизации времени и частоты с применением СРНС.

Использование сигналов СРНС GPS и ГЛОНАСС является одним из наиболее высокоточных способов определения координат и синхронизации мер частоты и времени в глобальном масштабе [8, 14]. В основе этих систем лежит высокоточная взаимная синхронизация шкал времени эталонов на борту ИСЗ и излучаемых ими сигналов (см. рис. 1).

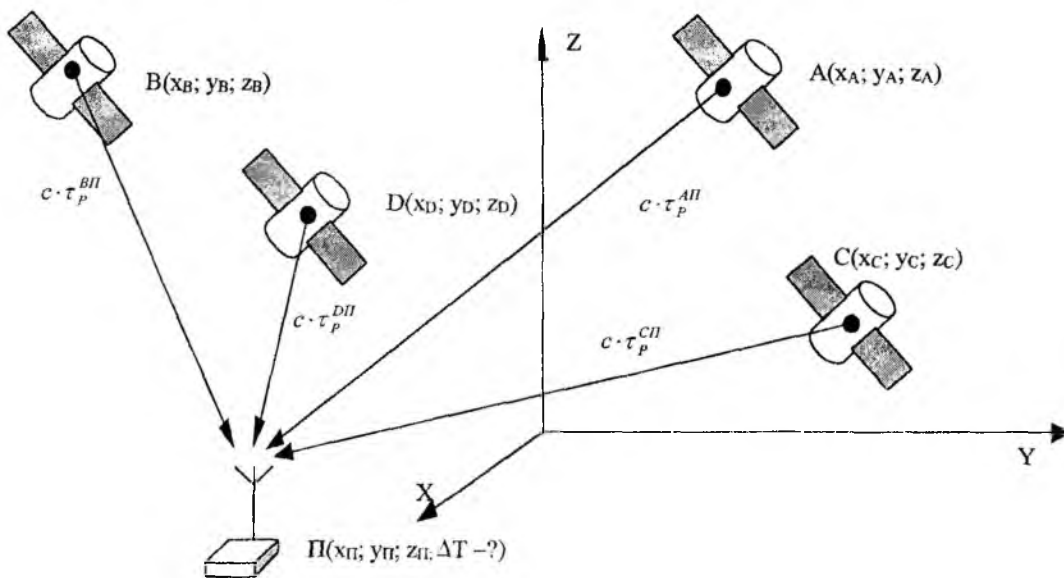


Рис. 1

Для определения трех координат и сдвига шкалы времени в пункте P необходимо принять сигналы минимум от четырех ИСЗ СРНС с известными координатами (на рис. 1 – A, B, C, D). В этом случае может быть составлена система уравнений:

$$\begin{aligned} \sqrt{(x_P - x_A)^2 + (y_P - y_A)^2 + (z_P - z_A)^2} &= c \cdot \tau_P^{AP} = c \cdot \Delta T + c \cdot \tau'_{AP}, \\ \sqrt{(x_P - x_B)^2 + (y_P - y_B)^2 + (z_P - z_B)^2} &= c \cdot \tau_P^{BP} = c \cdot \Delta T + c \cdot \tau'_{BP}, \\ \sqrt{(x_P - x_C)^2 + (y_P - y_C)^2 + (z_P - z_C)^2} &= c \cdot \tau_P^{CP} = c \cdot \Delta T + c \cdot \tau'_{CP}, \\ \sqrt{(x_P - x_D)^2 + (y_P - y_D)^2 + (z_P - z_D)^2} &= c \cdot \tau_P^{DP} = c \cdot \Delta T + c \cdot \tau'_{DP}, \end{aligned} \tag{1}$$

где c – скорость распространения радиоволн на трассе ИСЗ – пункт P ; $c \cdot \tau'_{AP}$, $c \cdot \tau'_{BP}$, $c \cdot \tau'_{CP}$, $c \cdot \tau'_{DP}$ – значения так называемых «псевдодальностей», рассчитываемых с помощью измеренных сдвигов между принятыми сигналами ИСЗ и шкалой времени пункта P – τ'_{AP} , τ'_{BP} , τ'_{CP} , τ'_{DP} .

Решение системы (1) позволяет определить координаты пункта (x_P, y_P, z_P) и сдвиг шкал

$$\Delta T = T^{ШВС} - T^П,$$

где $T^{ШВС}$ – шкала времени системы (ШВС); $T^П$ – шкала времени пункта П.

Известны четыре основных метода синхронизации по сигналам СРНС: непосредственная синхронизация, взаимная синхронизация, метод пролетных часов и метод радиоинтерферометрии на короткой базе [6]. Наибольшее распространение среди них получили два первых метода, принципы которых иллюстрируются на рис. 2 и 3.

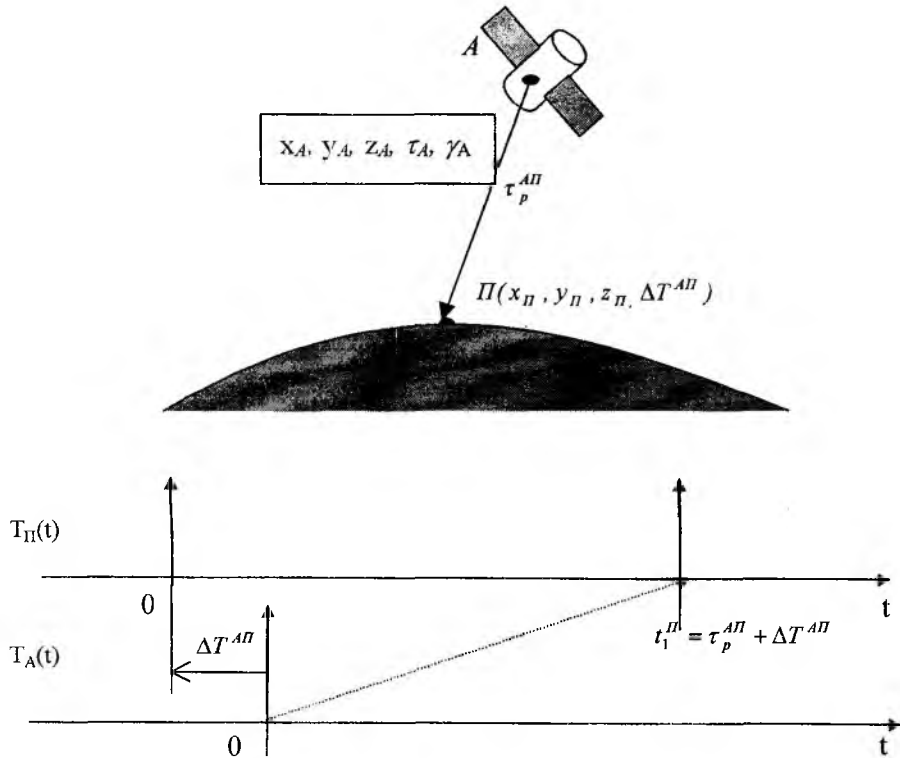


Рис. 2

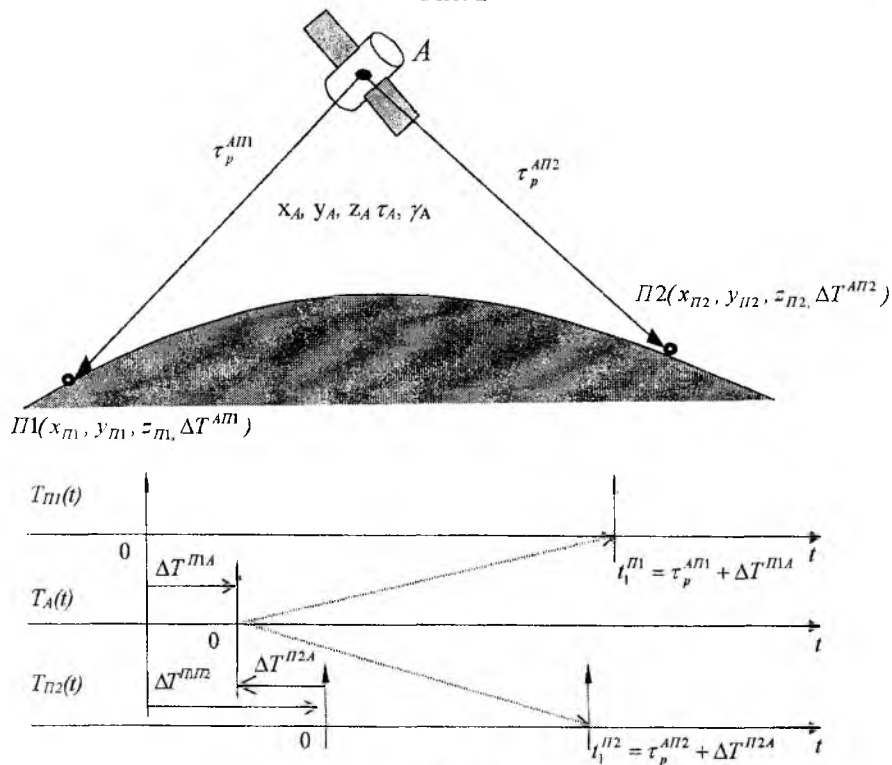


Рис. 3

Метод непосредственной синхронизации (см. рис. 2), называемый также односторонним, является наиболее простым. Он обеспечивает глобальную зону и не требует привлечения дополнительной информации, кроме передаваемой в составе навигационных сигналов. Расхождение часов пункта P относительно ШВС определяется в соответствии с выражением

$$\Delta T = \tau' - (\tau_P + \tau_{ион} + \tau_{троп} + \tau_{ап}) + \Delta T_{ИСЗ},$$

где τ' – измеренное значение «псевдодальности»; τ_P – рассчитанное время распространения сигнала; $\tau_{ион}, \tau_{троп}$ – поправки, учитывающие влияние ионосферы и тропосферы на распространение сигнала; $\tau_{ап}$ – задержка сигнала в приемнике; $\Delta T_{ИСЗ}$ – расхождение шкалы времени ИСЗ относительно ШВС.

Дальность от ИСЗ до потребителя рассчитывается на основе известных координат потребителя (x_P, y_P, z_P) и эфемерид ИСЗ (x_A, y_A, z_A), передаваемых в составе навигационного сигнала.

Расхождение шкалы времени ИСЗ относительно ШВС рассчитывается на основе передаваемых в составе навигационного сигнала частотно-временных поправок (ЧВП): частотной $-\tau_A$ и временной $-\gamma_A$. Передаются также поправки для перехода от ШВС к государственным шкалам времени. Для системы ГЛОНАСС такой шкалой является UTC(SU), а для системы GPS – UTC(USNO).

Метод взаимной синхронизации, называемый также дифференциальным, предполагает проведение одновременных измерений в пунктах $P1$ и $P2$ по сигналам одного из ИСЗ и последующий обмен результатами измерений (режим наблюдений «common-view»). В этом случае взаимное расхождение шкал времени пунктов определяется в соответствии с выражением

$$\Delta T^{P1-P2} = \Delta T^{P1A} - \Delta T^{P2A},$$

где $\Delta T^{P1A}, \Delta T^{P2A}$ – результаты определения сдвигов шкал пунктов относительно ШВС в соответствии с выражением (3).

За счет исключения ряда составляющих погрешностей, являющихся общими для сверяемых пунктов, точность взаимной синхронизации выше, чем при непосредственной синхронизации.

Основными источниками погрешностей определения координат и синхронизации объектов в СРНС GPS и ГЛОНАСС являются [6,14-20]: методические погрешности, обусловленные взаимным расположением в пространстве пункта и ИСЗ, сигналы которых используются для измерений. Эти погрешности оцениваются рядом безразмерных показателей – факторов (геометрический, вертикальный и др.); погрешности режима СД, который может быть введен в системе GPS решением правительства США. В этом режиме с целью закругления измерений специально формируют ошибочные данные об орбитах ИСЗ и изменяют показания их часов (погрешность составляет порядка 30 м); погрешности распространения радиоволн в ионосфере (за счёт дисперсии скорости распространения погрешности составляют 20-30 м днём и 3-6 м ночью) и тропосферные (за счёт рефракции радиоволн погрешность составляет 30 м); эфемеридные погрешности, обусловленные различием фактического и рассчитанного положений ИСЗ (оценки этого источника ошибок составляют 3 м или 10 нс); погрешность ухода шкалы времени ИСЗ, связанная с расхождением шкал времени разных ИСЗ; погрешность определения расстояния до спутника (вызвана конечным отношением С/Ш и составляет 2 м); релятивистские погрешности (приводят к относительному сдвигу частоты сигнала ИСЗ, принятого на Земле, приблизительно на $4,5 \cdot 10^{-10}$ и сдвигу шкалы времени примерно на 38 мкс в сутки); погрешности «многолучёвости» распространения радиоволн.

Для снижения и компенсации некоторых видов погрешностей разработаны эффективные способы. Так, погрешности ухода шкалы времени ИСЗ и релятивистские погрешности практически устраняются за счёт коррекции бортовых генераторов. Основным методом устранения погрешностей, связанных с режимом СД, является применение дифференциальных измерений. Для снижения погрешностей, вызванных распространением радиоволн в ионосфере, измерения производятся на двух частотах, а в составе сигнала GPS передаются соответствующие поправки. Погрешности за счёт рефракции радиоволн в нижних слоях атмосферы компенсируются расчетными поправками.

В работах, посвященных вопросам синхронизации мер времени и частоты по сигналам СРНС GPS и ГЛОНАСС [6, 18-20], в основном приводятся оценки только случайных погрешностей и отсутствуют данные о систематических погрешностях. Так, применение прецизионных приёмников систе-

мы GPS типа TTR-6A, которыми оснащены эталонные центры ряда стран, в том числе и Государственный эталон времени и частоты России (ВНИИФТРИ), обеспечивает случайную погрешность около 5 нс [5]. По данным работы [6] погрешность синхронизации шкал времени с применением системы ГЛОНАСС обеспечивается на уровне 10...20 нс (не хуже 20 нс за сутки в режиме непосредственной синхронизации и не хуже 10 нс в режиме взаимной синхронизации). Недостатками исследований, описанных в работе [6], является относительно большая дискретность измерений (10 нс) и использование только одного типа приёмников (АСН-16).

В Харьковском государственном научно-исследовательском институте метрологии (ХГНИИМ) сигналы СРНС ГЛОНАСС начали применяться для сличений эталонов времени и частоты, начиная с 1993 г. [21]. Для приема сигналов использовалась аппаратура А-724М-01 (аналог приемника АСН-16), измерения проводились дифференциальным методом по согласованному графику одновременно во всех эталонных центрах России, Украины и Белоруссии [22]. В 1997 г. была введена в эксплуатацию автоматизированная с помощью внешней ПЭВМ система приема сигналов СРНС ГЛОНАСС [23] на базе такого же приемника А-724М-01, но в которой использовался более точный измеритель интервалов времени (с разрешающей способностью 1 нс). Применение этой системы измерений и обработки данных, а также повышение метрологических характеристик самой СРНС ГЛОНАСС, позволило снизить случайную погрешность сравнения шкал времени эталонов с 30...50 нс до 10...20 нс (при усреднении данных измерений на суточных интервалах наблюдений).

В работе [21] было показано, что результаты сравнения шкал времени эталонов ХГНИИМ и ВНИИФТРИ одновременно радиометеорным методом и по сигналам ГЛОНАСС, различаются систематически на 160 нс (среднее значение разности результатов за год наблюдений). Поскольку РМС по сути является дуплексным методом и потому не требует определения времени распространения сигналов на трассе, а погрешности измерений используемых радиометеорных комплексов аппаратуры были тщательно исследованы с помощью имитаторов метеорных сигналов в одном и том же пункте, а также на реальных трассах с применением квантовых транспортируемых часов, указанное различие можно отнести преимущественно за счет неучтенной систематической погрешности метода и средств сравнения шкал времени по сигналам ГЛОНАСС.

Проведенные впоследствии метрологические исследования двух образцов приемника типа А-724М-01, расположенных в одном и том же пункте, показали, что несмотря на то, что в этих приемниках проводится измерение и учет задержки сигналов (калибровка) в каждом сеансе измерений, используется один и тот же внешний высокостабильный опорный генератор (водородный стандарт частоты и времени), результаты одновременных измерений двумя приемниками различаются в среднем на 60 нс при среднеквадратическом отклонении разности результатов измерений 10 нс.

С 1997 г. в ХГНИИМ для сравнения национальной шкалы координированного времени UTC(UA) с Международной шкалой координированного времени UTC начал применяться приемник сигналов GPS типа Trimble 4000SSi. Это прецизионный двухчастотный кодовый и фазовый приемник, предназначенный в основном для применения в геодезии. Потенциально он обладает более высокими метрологическими характеристиками по сравнению с одночастотными приемниками. Этот приемник имеет также выход сигналов времени с частотой 1 Гц, синхронизированных с Международной шкалой координированного времени UTC с предельным отклонением от нее не более 1 мкс. Приемник этого типа не позволяет реализовать режим наблюдений "common-view", когда относительная привязка шкал времени станций осуществляется путем одновременных наблюдений сигналов одного и того же заданного спутника, а использует режим наблюдений "all-in-view", когда обрабатываются сигналы от всех видимых в данный момент спутников. Проведенные исследования [24] показали, что при использовании одностороннего метода непосредственной синхронизации, случайная погрешность единичных измерений (СКО) с помощью приемника Trimble 4000SSi достигает 100 и более наносекунд при функционировании системы GPS в режиме селективного доступа (SA). После отмены Президентом США применения режима SA (с 1 мая 2000 г.) СКО единичных измерений уменьшилось до 15...20 нс [25]. Но и в том и другом режиме функционирования системы GPS увеличение длительности интервалов времени наблюдений и усреднение полученных при этом результатов измерений позволяет снизить значение СКО результатов измерений при сравнении шкал времени до 10 нс и менее (для суточных интервалов наблюдений). В результате одновременных исследований двух образцов приемника Trimble 4000SSi в одном и том же пункте наблюдений (в ХГНИИМ) было также установлено, что даже в случае, когда оба приемника находятся в одинаковых условиях и синхронизированы одним и тем же сигналом эталонной частоты, неисключенная систематическая аспа-

ратурная погрешность измерений составляет 50...100 нс, а по случайной составляющей погрешности единичных измерений отдельные экземпляры приемников различаются в два — три раза [24].

Результаты использования сигналов СРНС и ГЛОНАСС для регулярного сравнения национальной шкалы времени Украины с Международной шкалой координированного времени и с национальной шкалой времени Российской Федерации приведены в работе [26]. В работе [27] приведены результаты экспериментальных оценок составляющих погрешностей измерений при сравнении эталонных шкал времени различными методами и техническими средствами. В частности, показано, что неисключенная систематическая погрешность привязки шкал времени односторонним методом, даже при использовании такого приемника, как Trimble 4000SSi, может составлять 0,5 мкс. Наличие существенных неисключенных систематических погрешностей измерений при сравнении шкал времени было установлено и при предварительных исследованиях приемника сигналов СРНС ГЛОНАСС и GPS типа СН-3800 отечественного производства [28], что свидетельствует о необходимости проведения абсолютной или относительной калибровки приемников сигналов СРНС в случае их применения для высокоточного сравнения шкал времени.

В ХГНИИМ и в Научном метрологическом центре (военных эталонов) были проведены экспериментальные исследования одноплатных приемников сигналов GPS типа Svee Six-СМ3 с целью выяснения возможности использования таких приемников для контроля метрологических характеристик рубидиевых стандартов частоты и для сличений исходного эталона времени и частоты Министерства Обороны с государственным первичным эталоном единиц времени и частоты [29].

Из обзора современного состояния системы ГЛОНАСС [16] (из 24 ИСЗ системы в рабочем состоянии находятся только 8) и ограниченной номенклатуры выпускаемых приёмников, можно сделать вывод, что для потребителей в Украине наибольший интерес представляет система GPS. Это определило направление проведенных в настоящей работе исследований.

Из широкой номенклатуры приёмников GPS [20] для исследования были выбраны представители основных групп приёмников: представители класса так называемых одноплатных GPS-приемников — Trimble ACE II и Ashtech G8; геодезический прецизионный приёмник Trimble 4000SSi; специализированный временной приёмник Trimble Acutime 2000. Основные технические характеристики исследуемых приёмников представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики приёмников	G8	ACE II	4000SSi	Acutime 2000
Производитель	Ashtech	Trimble		
Рабочая частота	L1 (1575.42 МГц)			
Количество каналов	8	8	12	12
Погрешность определения координат (С/А код / DGPS), м	40 / 3	25 / 2	10 / 0,5	40 / 1,5
Параметры импульса «1» с: длительность импульса, мкс погрешность синхронизации, мкс	1000 GPS ± 1	10 UTC ± 0,5	10 UTC ± 0,05	10 - 500000 UTC ± 0,05

В основу исследований был положен известный метод «нулевой базы», основанный на размещении приёмников и источника опорного сигнала в одном пункте [6]. Данный метод измерений позволяет исключить случайные погрешности, связанные с распространением радиоволн и неточностью определения координат пунктов, а также оценить систематические погрешности, вызванные аппаратными задержками и расхождением алгоритмов обработки информации в различных типах приёмников.

Измерения проводились в ХГНИИМ, шкала государственного первичного эталона единиц времени и частоты Украины [30] использовалась как шкала опорного сигнала. Структурная схема стенда для проведения измерений представлена на рис. 4. Стенд позволяет измерять с дискретностью 1 нс интервалы времени между сигналами рабочей шкалы времени государственного эталона, которая является физической реализацией шкалы координированного времени UTC (UA), и сигналами времени с выхода соответствующих приёмников GPS. Благодаря наличию интерфейса канала общего пользования (КОП) и коммутатора, измерения полностью автоматизированы, а их результаты заносятся в память ПЭВМ.

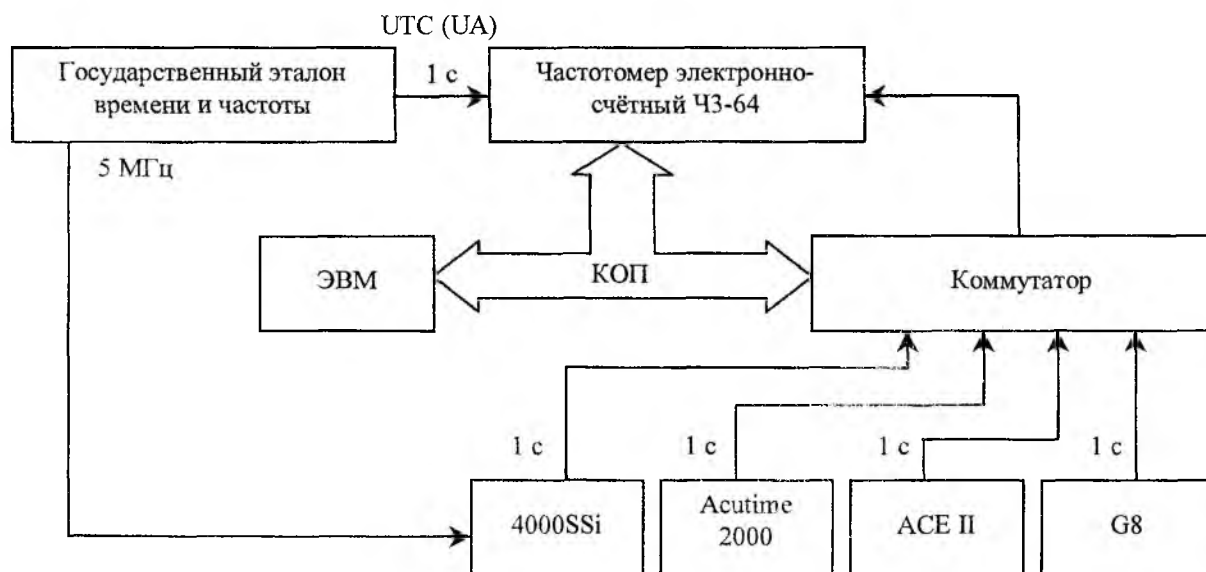


Рис. 4

Было произведено два цикла измерений. В первом цикле исследовались погрешности на сравнительно коротком интервале времени – по 1000 измерений для каждого из приёмников с интервалом в 3 с. Для результатов одиночных измерений первого цикла приняты такие обозначения: для приёмника G8 – $\Delta T1_i(G8)$; для приёмника ACE II – $\Delta T1_i(ACE II)$; для приёмника 4000SSi – $\Delta T1_i(4000SSi)$; для приёмника Acutime 2000 – $\Delta T1_i(Acutime 2000)$. Поскольку в приёмнике Trimble 4000SSi существует возможность подключения внешнего опорного сигнала 5 МГц, измерения для него проводились для двух режимов: без внешнего опорного сигнала – $\Delta T1(4000SSi/внутр)$; со внешним опорным сигналом от эталона – $\Delta T1(4000SSi/внеш)$.

Во втором цикле проводились круглосуточные измерения на протяжении недельного периода. Для каждого из приёмников по очереди с перерывом в 2 минуты производилось по 10 измерений разности соответствующих шкал времени и выполнялось усреднение результатов измерений. Таким образом за одни сутки накапливалось 240 усреднённых измерений для каждого из приёмников. Из-за технических причин во втором цикле измерений не принимал участие приёмник Acutime 2000. Для результатов одиночных измерений второго цикла приняты соответствующие обозначения: для приёмника G8 – $\Delta T2_i(G8)$; для приёмника ACE II – $\Delta T2_i(ACE II)$; для приёмника 4000SSi – $\Delta T2_i(4000SSi)$.

Обработка результатов измерений производилась при помощи математического пакета для статистических расчётов STATISTICA v. 5.5. На рис. 5–9 представлены временные графики зависимостей $\Delta T1_i$ для первых 100 отсчётов из 1000 и гистограммы распределения результатов измерений. В табл. 3 приведены результаты статистической обработки первого цикла измерений: оценки математического ожидания $\Delta T1$ и оценки среднеквадратического отклонения (СКО) σ_1 .

Таблица 3

Параметр	G8	ACE II	4000SSi/внутр	4000SSi/внеш	Acutime 2000
$\Delta T1, \text{нс}$	810,7	1406,9	790,6	794,5	531,7
$\sigma_1, \text{нс}$	55,43	92,4	16,6	0,55	22,9

На рис. 10 представлены временные графики зависимостей $\Delta T2_i$ для второго цикла измерений, а на рис. 11 – соответствующие гистограммы распределений результатов. В табл. 4 приведены результаты статистической обработки второго цикла измерений: оценки математического ожидания $\Delta T2$ и оценки среднеквадратического отклонения (СКО) σ_2 , а также результат проверки гипотезы относительно гауссова закона распределения вероятностей результатов по критерию Колмагорова-Смирнова (оценка максимума модуля отклонения эмпирического закона от гипотетического – гауссова - $P_{\text{норм}}$).

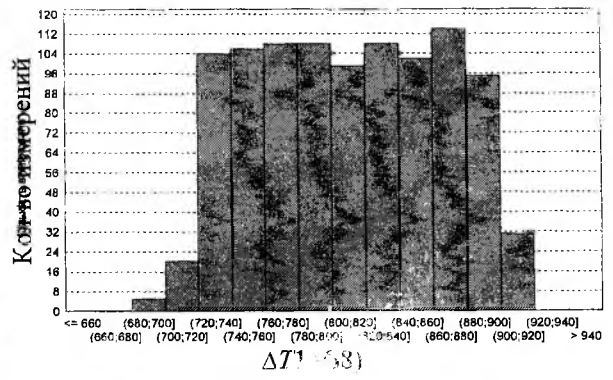
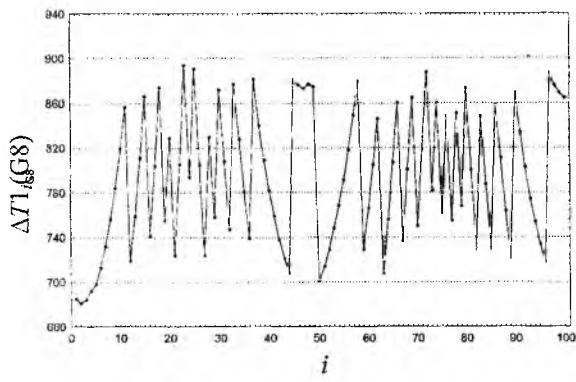


Рис. 5

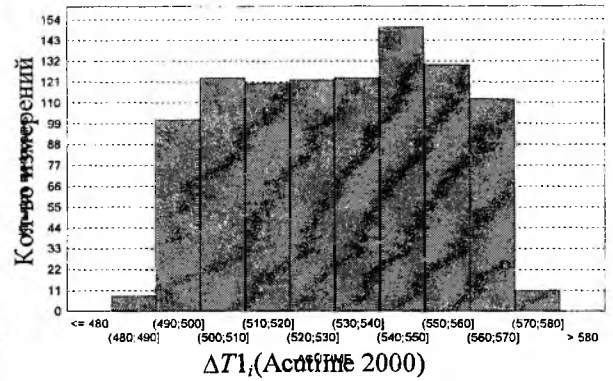
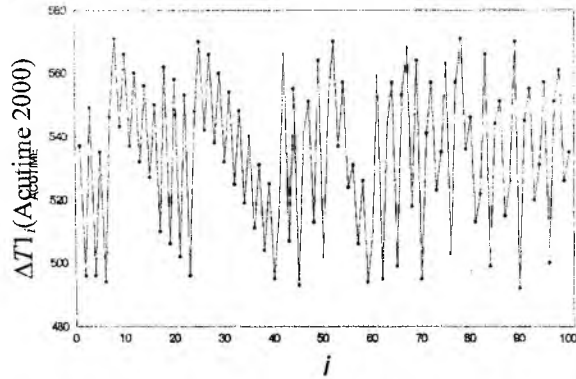


Рис. 6

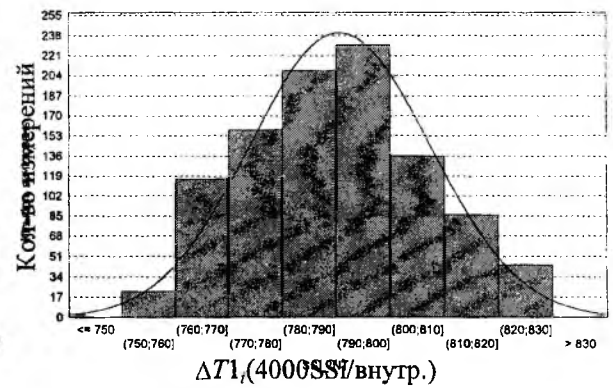
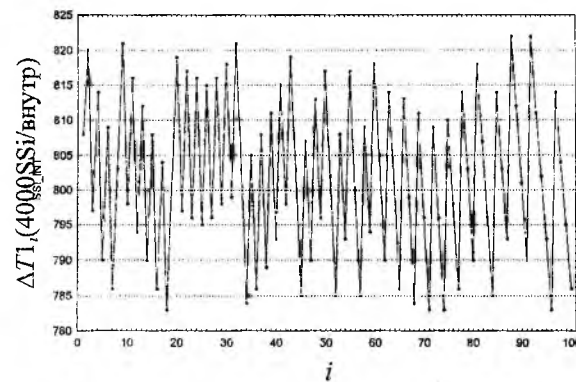


Рис. 7

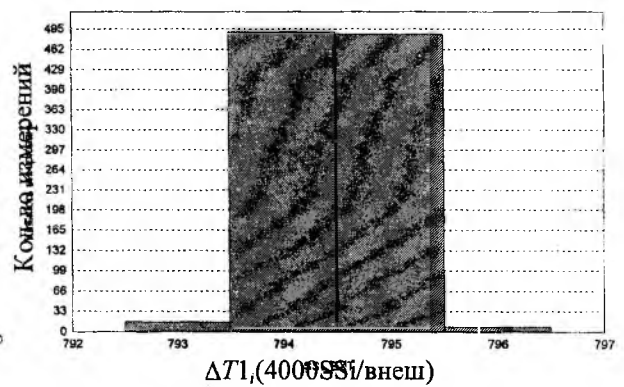
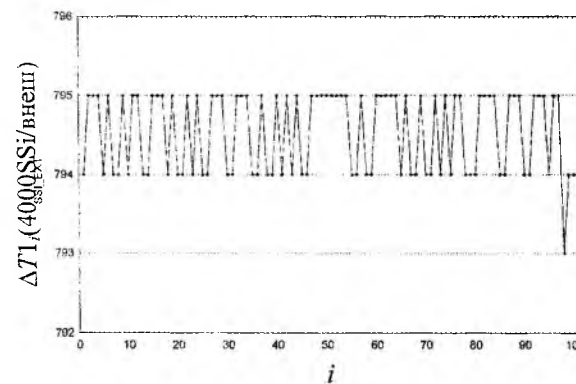


Рис. 8

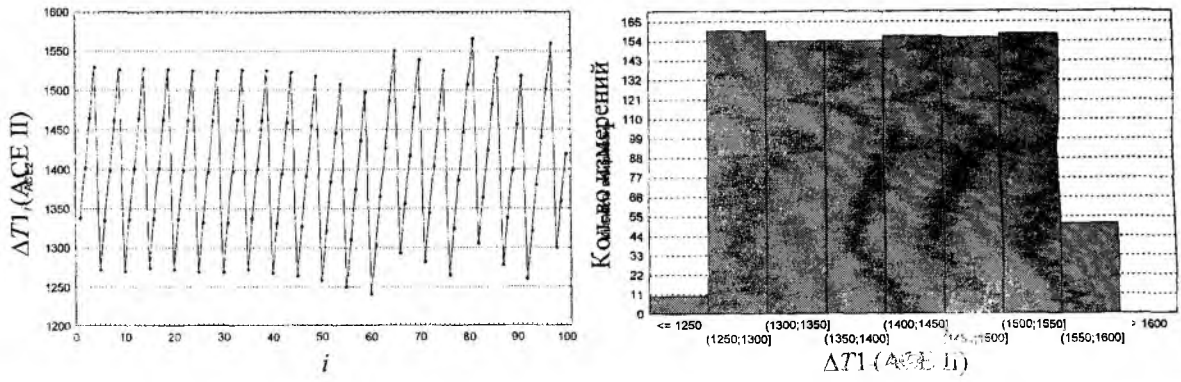


Рис. 9

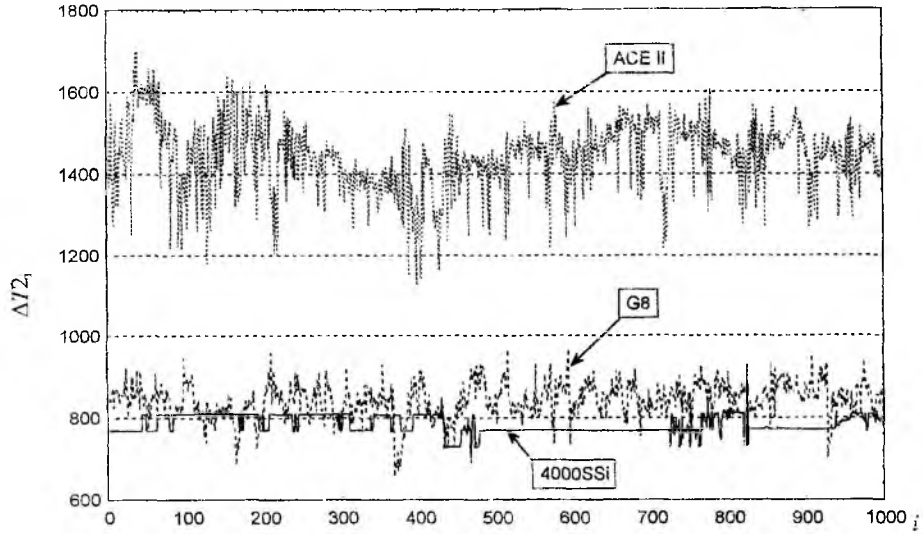


Рис. 10

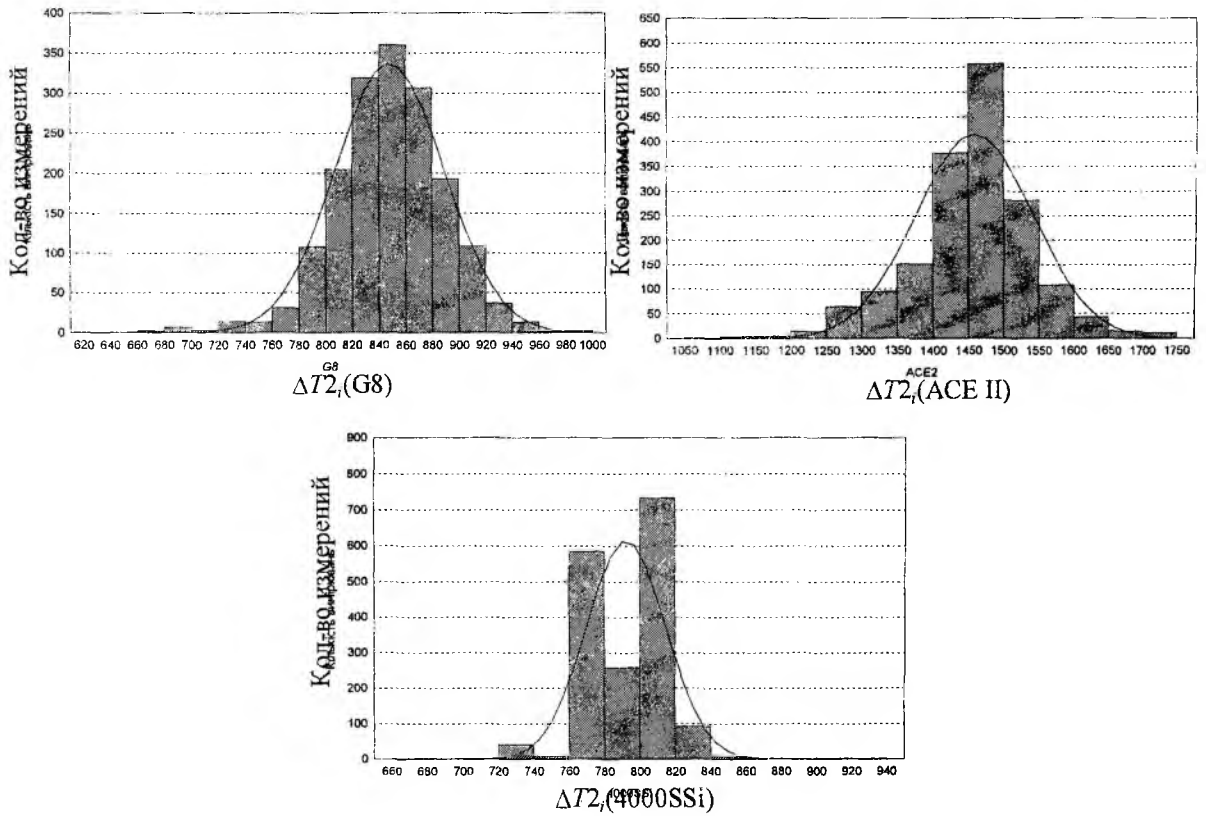


Рис. 11

Статистическая обработка результатов измерений второго цикла выполнялась как для каждого суточного сеанса измерений (первые 7 строк табл. 4), так и для полного недельного цикла (последняя строка табл. 4).

Таблица 4

Номер суток	ACE II			G8			4000SSi/внеш		
	ΔT_2 , нс	σ_2 , нс	$P_{\text{норм}}, \%$	ΔT_2 , нс	σ_2 , нс	$P_{\text{норм}}, \%$	ΔT_2 , нс	σ_2 , нс	$P_{\text{норм}}, \%$
1	1466,4	104,4	> 20	835,5	40,9	> 20	795,5	19,1	< 1
2	1390,3	70,9	< 15	831,0	51,5	> 20	786,9	27,9	< 1
3	1453,3	69,2	< 5	849,3	37,1	> 20	768,8	0,65	< 1
4	1460,7	63,3	< 1	857,3	35,5	> 20	770,7	22,9	< 1
5	1459,0	69,2	< 1	856,3	39,3	> 20	805,2	14,3	< 1
6	1513,1	85,9	< 5	848,1	39,0	> 20	805,5	12,6	< 1
7	1469,3	61,8	< 1	854,9	32,7	> 20	798,2	17,0	> 20
1-7	1458,7	82,9	< 1	848,0	40,8	> 15	792,2	22,4	< 1

Измерения первого цикла показали, что на коротких интервалах времени основной вклад в погрешность измерений вносят частотные нестабильности внутренних кварцевых генераторов приёмников и различие их собственных частот. Об этом свидетельствуют и характер временных зависимостей ΔT_i , и близкие к равномерному закону распределения гистограммы, и, наконец, существенное снижение оценки СКО до 0,55 нс для приёмника Trimble 4000SSi при использовании вместо внутреннего генератора внешнего высокостабильного источника сигнала 5 МГц от эталона.

Во втором цикле измерений законы распределения гистограмм стали заметно отличаться от равномерных ввиду проявления дополнительных источников погрешностей. Когда законы распределения результатов измерения во втором цикле по критерию Колмагорова-Смирнова не соответствовали гауссовым, усреднение результатов по 10 измерениям в сеансе, выполняемое в этом цикле, не только привело к снижению оценки СКО таких единичных измерений, но и в большинстве случаев оценки СКО увеличились (см. табл. 3 и 4). Однако, накопление результатов на длительных интервалах измерений позволяет снизить случайные ошибки. К примеру, оценки СКО математических ожиданий результатов 7-ми суточных измерений ΔT_2 составляют: $\sigma_{2д}(\text{ACE II})=36,2$ нс; $\sigma_{2д}(\text{G8})=10,4$ нс; $\sigma_{2д}(\text{4000SSi/внеш})=13,8$ нс.

Полученные результаты показывают необходимость усовершенствования как алгоритмов обработки результатов измерений, так и алгоритмов обработки сигналов СРНС, в частности, улучшение математических моделей, описывающих параметры ионосферы, тропосферы, геоида и других элементов, которые взаимодействуют с системой и приводят к дополнительным погрешностям измерений.

Результаты сравнения вычисленных оценок математических ожиданий ΔT могут служить оценками систематических погрешностей измерений при сравнении шкал времени. Следует отметить существенное расхождение значений ΔT для различных типов приёмников. Наиболее высокая стабильность результатов измерений получена с помощью приёмника Trimble 4000SSi, немного уступает ему приёмник Trimble Acutime 2000. Существенно худшие параметры показали более дешёвые одноплатные GPS-приёмники Trimble ACE II и Ashtech G8.

Проведенные исследования еще раз показали актуальность калибровки GPS приёмников перед применением их для синхронизации мер времени и частоты. Для калибровки, кроме использованного метода «нулевой базы», можно использовать имитаторы сигналов СРНС [16] или альтернативные высокоточные методы измерения сдвига шкал времени, например, РМС [7].

Список литературы: 1. Система синхронизации первичной цифровой сети связи Украины. Основные положения. Министерство связи Украины. УНИИС, Киев. 1996. 2. Время и частота / Под ред. Дж. Джесперсена. М.: Мир, 1973. 214 с. 3. Актуальные проблемы метрологии в радиоэлектронике / Под ред. В. К. Коробова. М.: Изд-во стандартов, 1985. 295 с. 4. Дудник Б. С., Кащеев Б. Л., Коваль Ю. А. и др. О точности различных методов сличения шкал координированного часу UTC(X) с UTC(SU) // Исследования в области измерений времени и частоты. Сб. науч. тр. ВНИИФТРИ. М.: 1982. С. 13–21. 5. Ткачук О. О. Сучасні методи та засоби звірення еталонів часу та частоти // Бюлет. УАА, К.: ВПЦ, "Наукова книга", 1996.- № 9, С. 41-42. 6. Гужва Ю. Г., Геворкян А. Г., Богданов П. П., Овчинников В. В. Синхронизация часов по сигналам "Глонасс" // Радионавигация и время. 1994. №1. С. 11-14. 7. Кащеев Б. Л., Коваль Ю. А., Кундюков С. Г. Высокоточные радиометеороные системы сравнения эталонов времени и частоты // Радиоэлектроника и информатика. 1997. №1. С. 9-18. 8. Шебанов А. А., Рабкин В. С., Гор-

бунов В.И. Синхронизация мер времени и частоты по сигналам спутниковых радионавигационных систем. М.: Издательство стандартов, 1992. 128 с. 9. Мангелл А. Дж. Национальные эталоны времени и частоты // ТИИЭР. - 1986. Т. 74. № 1. 10. Болотов И. М., Геворкян А. Г. Развитие научно-технических основ СЕВ // Радионавигация и время. 1992. № 1. С. 50-52. 11. Величко О. М., Макаренко Б. И., Камінський В. Ю. та ін. Державна служба єдиного часу і еталонних частотнеобхідний елемент розвитку наземної космічної інфраструктури України. // Космічна наука і технологія. 1997. Т. 3. № 1/2. С. 7-15. 12. Клейман А. С., Соловьёв В. С., Ткачук А. А. Эталонная база Украины в области измерений времени и частоты // Український метрологічний журнал. 1996. Вип. 4. С. 17-18. 13. Величко О. М., Миронов М. Т., Сидоренко Г. С. та ін. Державна програма створення та розвитку Державної служби єдиного часу і еталонних частот // Український метрологічний журнал. 1996. Вип. 4. С. 13-16. 14. Шебшаевич В.С. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. - М.: "Радио и связь", 1993. 286 с. 15. Шкирятов В.В. Радионавигационные системы и устройства. М., "Радио и связь", 1984. 161 с. 16. Соловьёв Ю. А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз, 2000. 267 С. 17. Волков Н.М., Иванов Н.Е., Салищев В.А. и др. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС // ИПРЖР, Москва. 1999. С. 4-20. 18. Allan D.W. and Weiss M. Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite // Proc. 34th Ann. Symp. on Frequency Control, May 1980, p.p.334-346. 19. Баялсников Б.Н., Богданов П.И., Геворкян А.Г., Гужва Ю.Г. Современное состояние и перспективы организации частотно-временного обеспечения системы ГЛОНАСС // Вопросы радиоэлектроники (серия ОВР), 1991. Вип.8.С.10-15. 20. Кошеляевский Н.В., Пушкин С.Б., Черенков Г.Т. Исследование погрешностей сличения эталонов ГСВЧ с помощью сигналов ГЛОНАСС // Вопросы радиоэлектроники (серия ОВР), 1991. Вип.8.С. 91. 21. Ткачук А. А. Сличения шкал времени эталонов радиометеороным методом и по сигналам РНС "ГЛОНАСС" // Материалы 5 Российск. симп. "Метрология времени и пространства", Менделеево, 11-13 окт. 1994. 22. Альшина А. П., Задрейка А. В., Кошеляевский Н. Б. и др. Передача размеров единиц и шкал времени от государственного эталона Российской Федерации // Труды Международ. науч.-практич. конф. "Метрология-97", Минск, 29 сент.-2 окт. 1997. 23. Ткачук А. А., Родионов В. Е., Сагайдак Г. И. Автоматизированная система приема сигналов СРНС ГЛОНАСС. // Труды II Международ. науч.-технич. конф. "Метрология -99", Харьков, 5-7 октября 1999 г.Т.1.С. 154-165. 24. Соловьёв В. С., Ткачук А. А., Сагайдак Г. И., Головня М. В. Применение геодезических приемников сигналов GPS типа Trimble 4000SSi для сравнения шкал времени // Труды II Международ. науч.-технич. конф. "Метрология -99", Харьков, 5-7 октября 1999 г.Т.1.С. 96-98. 25. Ткачук А. А., Сагайдак Г. И. Исследование эффекта отмены селективного доступа на точность сравнения шкал времени с использованием сигналов GPS // Труды III Международ. науч.-технич. конф. "Метрология в електроніці-2000", Харьков, 10-12 октября 2000 г. С. 5-8. 26. Сидоренко Г. С., Соловьёв В. С., Ткачук О. О. Використання сигналів супутникових радіонавігаційних систем для порівняння шкал часу // Космічна наука і технологія, 2001.Т. 7. № 9.С. 77-82. 27. Соловьёв В. С., Ткачук О. О., Клейман О. С. та ін. Оцінка похибок порівняння еталонних шкал часу за допомогою різних методів // Український метрологічний журнал. 1999. Вип. 3. С. 5-8. 28. Лукьяненко Н. В., Клейман А. С., Ткачук А. А. и др. Предварительные результаты метрологических исследований приемника сигналов GPS ГЛОНАСС типа СН-3800 // Труды II Международ. науч.-технич. конф. "Метрология -99", Харьков, 5-7 октября 1999 г.Т.1.С. 93-95. 29. Клейман А. С., Гиренко В. М., Левенберг А. И. и др. Использование приемника GPS типа Svec Six-СМЗ для контроля метрологических характеристик стандарта частоты // Труды II Международ. науч.-технич. конф. "Метрология -99", Харьков, 5-7 октября 1999 г.Т.1.С. 111-114. 30. Клейман. О. С., Оголюк В. П., Сидоренко Г. С. та ін. Державний первинний еталон одиниць часу і частоти. // Український метрологічний журнал. 1997. Вип. 3. С. 18-23.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 18.10.2001