

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ СЛИЧЕНИЯ ШКАЛ ВРЕМЕНИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ SBAS

Введение и постановка задачи

Сличение территориально разнесенных эталонов времени и частоты необходимо для решения актуальных научно-технических и оборонных задач, задач метрологии времени и частоты, координатно-временного обеспечения, радиоастрономии, радиолокации, радиопеленгации, цифровой синхронной связи. Успешное решение таких задач определяются как стабильностью эталонов, так и точностью их сличения. Высокие темпы совершенствования эталонов (относительная нестабильность современных эталонов составляет $10^{-13} \dots 10^{-14}$, а в перспективе – $10^{-15} \dots 10^{-16}$) определяют актуальность задачи повышения точности их сличения [1].

Основным критерием качества сличения является точность оценивания сдвига шкал $\Delta T^{ab} = -\Delta T^{ba}$ эталонов, размещенных в пунктах «а» и «б».

Помимо прямого метода (перевозимые квантовые часы – ПКЧ), наибольшую точность сличения обеспечивают радиотехнические методы с использованием различных частотных диапазонов. С 70-х годов прошлого века и до 2000 г. преимущественно использовался радиометод сличения [2], а в настоящее время – методы, основанные на использовании спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS и ГЛОНАСС [3, 4] и ретрансляции сигналов через геостационарные спутники (ГС) [5].

В ХНУРЭ разрабатывается пассивный метод сличения, основанный на приеме сигналов общих источников (так называемый алгоритм общего охвата – АОО). В качестве общих источников могут быть использованы сигналы, излучаемые геостационарными спутниками (ГС) [6], в частности, GPS-подобные сигналы ГС системы SBAS.

Статья посвящена экспериментальным оценкам потенциальной точности алгоритма общего охвата при использовании сигналов системы SBAS.

Основная часть

АОО реализуется в СРНС и новом методе «ГС+АОО» [6]. Упрощенная структурная схема и идеальная временная диаграмма АОО приведены на рис. 1, где обозначены: $H_a(t)$, $H_b(t)$ – шкалы времени сличаемых эталонов; τ_a^{ab} , τ_b^{ba} – значения времени задержки сигналов в канале РРВ; t_1^a , t_1^b – временные положения принятых в пунктах сигналов; $s_o(t)$ – сигнал общего источника; τ^{ao} , τ^{bo} – задержки сигнала общего источника относительно шкал времени эталонов; τ_{δ}^{oa} , τ_{δ}^{ob} – задержки сигнала общего источника до пунктов в канале РРВ

Из рис. 1 следует выражение для опорного значения сдвига шкал в АОО ΔT^{ab} , а также канальной, аппаратурной и помеховой погрешностей ($\delta_{\Delta T}^{ab}(\hat{\epsilon})$, $\delta_{\Delta T}^{ab}(\hat{\alpha})$, $\delta_{\Delta T}^{ab}(\hat{\eta})$):

$$\Delta T^{ab} = (t_1^a - t_1^b) - (\tau_{\delta}^{oa} - \tau_{\delta}^{ob}), \delta_{\Delta T}^{ab}(\text{кан}) = [(\tau_p^{oa} - \tau_p^{ob}) - (\tau_p^{ob} - \tau_p^{ob})],$$

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\text{ап}) = (\tau_{\text{прм}}^a - \tau_{\text{прм}}^a) - (\tau_{\text{прм}}^b - \tau_{\text{прм}}^b), \delta_{\Delta T}^{ab}(\hat{\eta}) = (\delta_t^a - \delta_t^b).$$

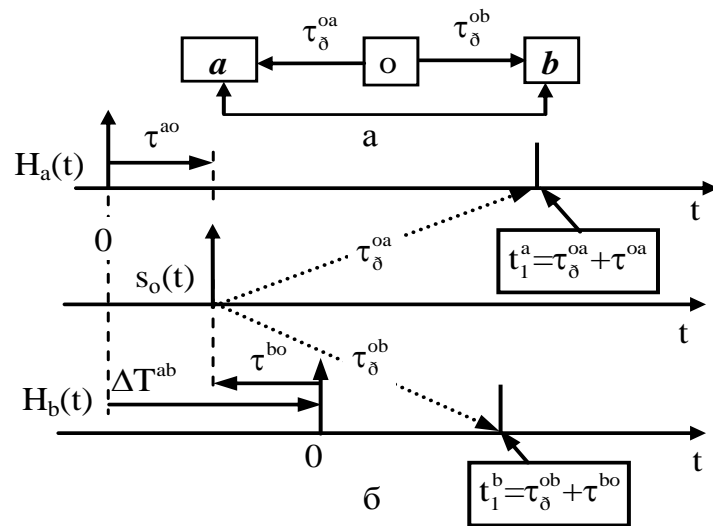


Рис. 1

Достоинствами АОО являются отсутствие излучения в пунктах и низкие требования к стабильности сигнала общего источника, а недостатком – высокие требования к оценке разности задержек в канале РРВ ($\tau_{\delta}^{oa} - \tau_{\delta}^{ob}$). Кроме различия опорных значений задержек сигналов в канале РРВ от их оценок на точность сличения влияют нестабильность задержек сигналов в аппаратуре, а также помехи.

Структура источников погрешностей, их классификация и принцип формирования неопределенности приведены на рис. 2.

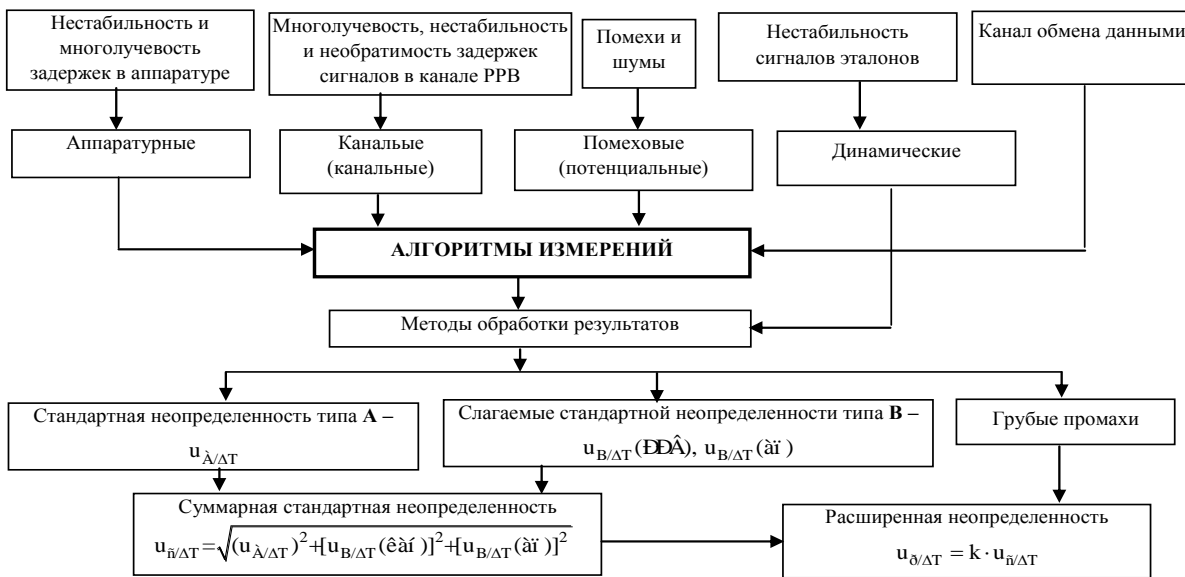


Рис. 2

Причины и методы учета составляющих неопределенности типа **В** в случае использования сигналов ГС сведены в табл. 1. Там же приведены ссылки на соответствующие литературные источники.

Для экспериментальной оценки стандартной неопределенностей типа **А**, вызванной шумами, и аппаратурной составляющей стандартной неопределенности типа **В** проведен эксперимент в режиме нулевой базы. Измерения проводились для трех вариантов. В первом случае определялись аппаратурные шумы приемных трактов, во втором – оценивалась потенциальная возможность АОО с использованием штатных антенн, имеющих круговую диаграмму

направленности (ДН), в третьем варианте измерений оценивалось влияние многолучевого РРВ и влияния уровня сигнала на точность синхронизации.

Таблица 1

Вид	Причины	Методы учета	
$u_A(\hat{\alpha})$	Параметры ионосферы	Модели, ПКЧ, НКК	[7]
	Параметры тропосферы		
	Нутация ГС		[8]
	Многолучевость РРВ	Модель	[13]
$u_A(\hat{\alpha})$	Многолучевость антенных трактов	Модель	[9]
	Температура, старение элементов и др	Измерения АЗ и режим «нулевой базы»	[2]

Для первого варианта измерений схема измерительного стенда изображена на рис. 3, где обозначены: СЧВ – стандарт частоты и времени; Пр1, Пр2 – приемники фирмы NOVATEL на основе платы OEM628, которая установлена на отладочную платформу evaluation board. Эти приемники имеют режим внешней синхронизации, выход опорной частоты и ряд других программируемых функций, основные характеристики модуля приведены в табл. 2. ПК1, ПК2 – персональные компьютеры; А – антенно-фидерный тракт с антенным делителем, ЦО – двухканальный цифровой осциллограф. Для приема сигналов используется общий антенно-фидерный тракт. Использование общего опорного генератора (СЧВ) позволяет исключить погрешность, вызванную нестабильностью генератора. На рис. 4 приведен снимок измерительного стенда со штатной антенной.

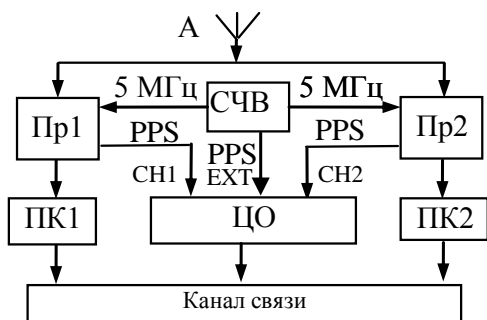


Рис. 3

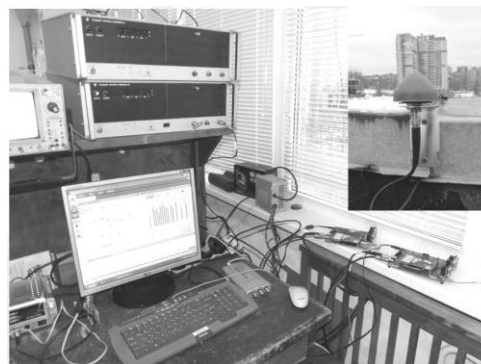


Рис. 4

При включении приемников формируются шкалы времени в каждом пункте. При этом каждую секунду формируется временная метка – импульс PPS. Сведение шкал приемника может проводиться двумя способами – с использованием системы GPS путем решения навигационной задачи и измерением расхождений PPS приемников относительно PPS, формируемой стандартом частоты. В данном эксперименте для определения расхождений шкал времени приемников используется второй способ.

На вход двухканального осциллографа подаются сигналы PPS с приемников Пр1 и Пр2, при этом синхронизация осциллографа осуществляется от PPS СЧВ. Померенное расхождение шкал вводится как расхождение шкалы приемника относительно шкалы стандарта $\Delta t_{i,\delta}$. На рис. 5 приведена осциллограмма несведенных шкал, на рис. 6 шкалы сведены с применением системы GPS.

Общие характеристики	
Количество каналов	120
Частотность	L1/L2/L5
GPS	L1, L2, L5
ГЛОНАСС	L1, L2
SBAS	Да
Galileo	E1, E5
GIOVE-A/GIOVE-B	Да
Compass	Да
L-диапазон	Да
Количество каналов	120
Разъёмы	
Основной	24-штырьковая сдвоенная вилка
Антенный	MMCX розетка
Внешнего эталона частоты	MMCX розетка
AUX	16-штырьковая сдвоенная вилка
Интерфейсные порты	
LV-TTL	2 шт
RS-232	1 шт
CAN-шина	2 шт
USB	1 шт
Ethernet	1 шт

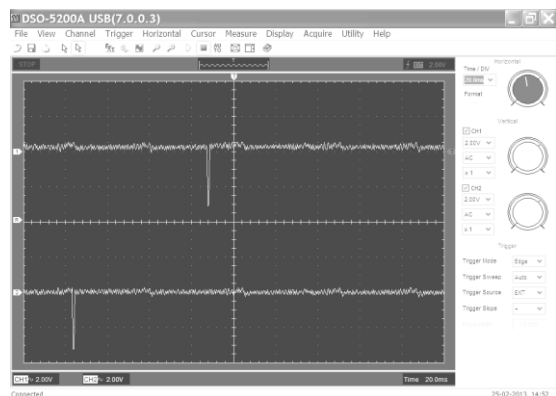


Рис. 5

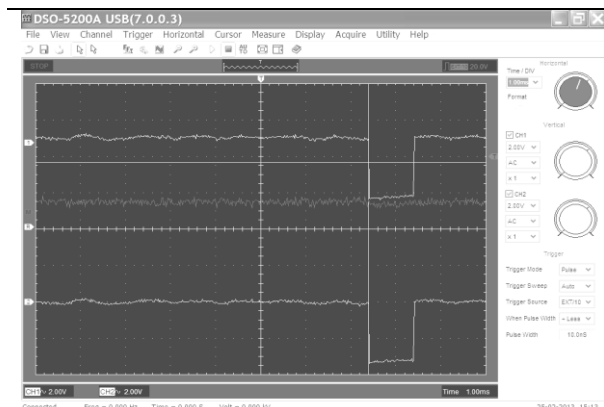


Рис. 6

После сведения шкал отключаются все каналы, в которых принимаются сигналы среднеорбитальных навигационных спутников. В противном случае шкала приемника постоянно будет синхронизироваться со шкалой GPS.

Измерения производились каждую секунду и записывались в формате RINEX. Записывались следующие данные: номер принимаемого спутника, псевдодальность по кодовым и фазовым измерениям, доплеровский сдвиг частоты, уровень сигнал/помеха. После измерений данные конвертируются и формируются массивы для обработки в пакете MATLAB.

Измерения проводились в ХНУРЭ для ГС системы SBAS PRN S120 на 17281 GPS день. На рис. 7 изображен график разности псевдодальностей на интервале $3 \cdot 10^4$ с.

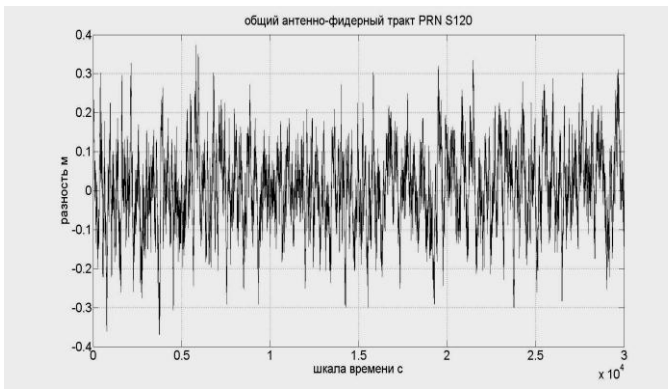


Рис. 7

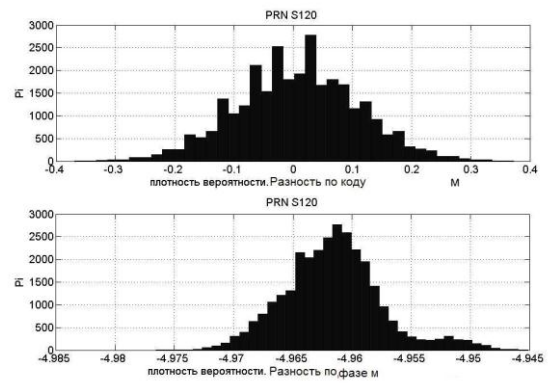


Рис. 8

На рис. 8 приведены гистограммы разностей псевдодальностей по кодовым и фазовым измерениям. Результаты статистической обработки измерений приведены в табл. 3.

Таблица 3

Вид измерений	Среднее значение аппаратурной неопределенности типа В		Оценка $u_{\Delta\Delta T}$	
	m	c	m	c
Фазовые	-4.9	$-1.6 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-11}$
Кодовые	$7 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-11}$	0.1	$3.4 \cdot 10^{-10}$

Для учета влияния шумов антенн прием сигналов производился с помощью отдельных антенно-фидерных трактов рис. 9. При этом использовались штатные антенны, имеющие круговую ДН. Результаты измерений разности псевдодальностей предоставлены на рис. 11, а гистограмма – на рис. 12. В табл. 4 предоставлены данные обработки.

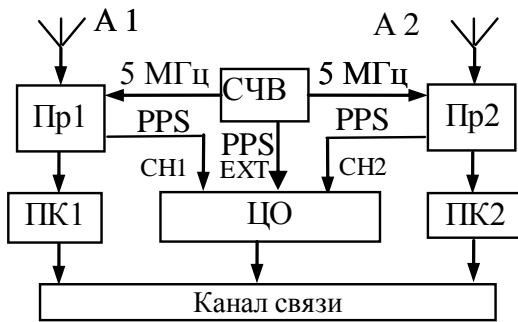


Рис. 9

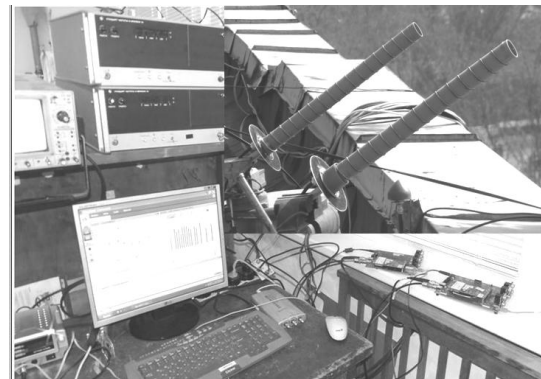


Рис. 10

В третьем случае использовались направленные спиральные антенны рис. 10. Это позволило увеличить уровень сигнала на входе приемного тракта и уменьшить влияние многолучевости канала РРВ. На рис.13 представлена разность псевдодальностей по кодовым измерениям. По данным измерений на рис.14 построена гистограмма разности псевдодальностей по кодовым и фазовым измерениям. В табл. 5 занесены результаты статистической обработки. Графики соотношения сигнал/шум представлены на рис. 15, 16. График на рис. 15 соответствует уровню сигнала с направленной антенной, а на рис. 16 уровню сигнала для антенны с круговой ДН.

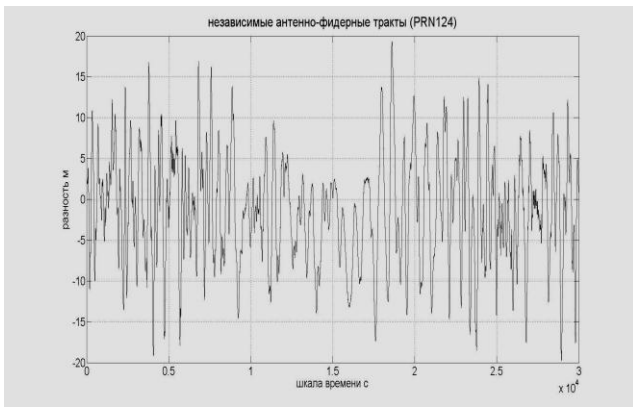


Рис. 11

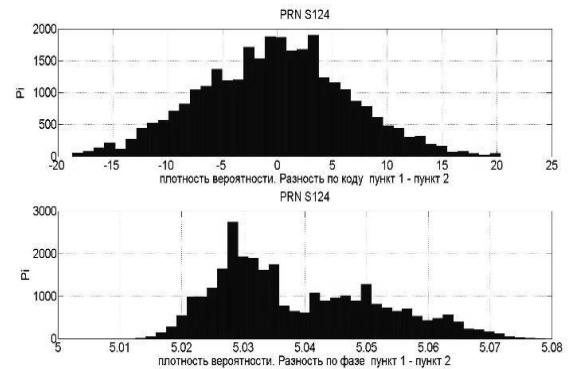


Рис. 12

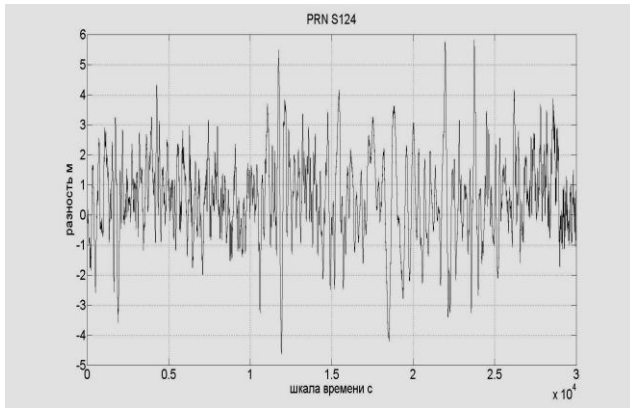


Рис. 13

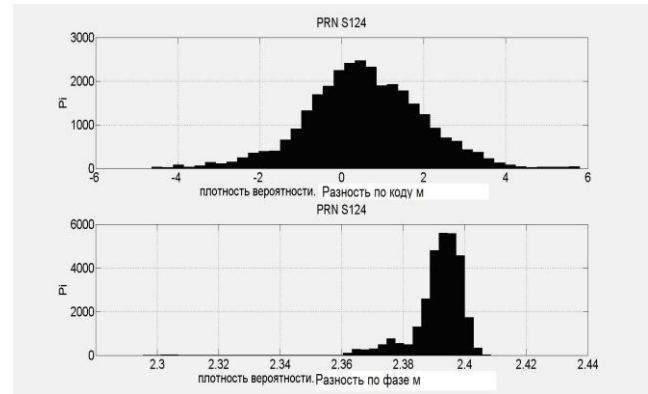


Рис. 14

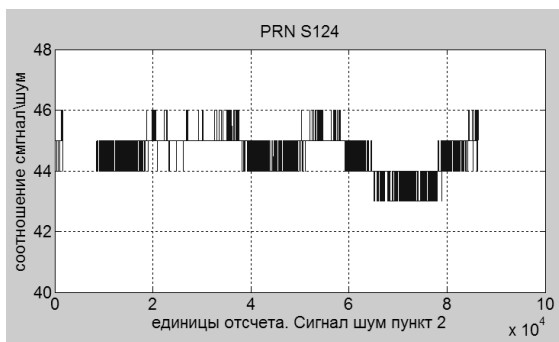


Рис. 15

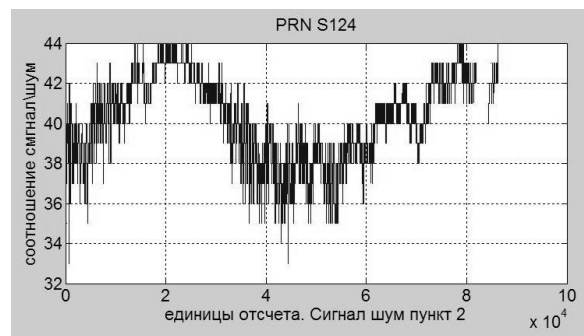


Рис. 16

Таблица 4

Вид измерений	Среднее значение аппаратурной неопределенности типа В		Оценка $u_{\lambda/\Delta T}$	
	m	c	m	c
Фазовые	4	$-1.34 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$4.3 \cdot 10^{-11}$
Кодовые	-1.29	$-4.3 \cdot 10^{-9}$	2.3	$8 \cdot 10^{-9}$

Таблица 5

Вид измерений	Среднее значение аппаратурной неопределенности типа В		Оценка $u_{\lambda/\Delta T}$	
	m	c	m	c
Фазовые	2.3	$7.9 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-11}$
Кодовые	0.5	$1.8 \cdot 10^{-9}$	1.4	$4 \cdot 10^{-9}$

Выводы

Результаты эксперимента с применением сигналов системы SBAS в режиме нулевой базы показали, что неопределенность типа A $u_{\Delta\Delta T}$ по фазовым измерениям составляет $1.4 \cdot 10^{-11}$ с, а по кодовым измерениям – $3.4 \cdot 10^{-10}$ с. Столь малые значения $u_{\Delta\Delta T}$ объясняются использованием общего антенно-фидерного тракта, что исключает влияние шумов антенны.

При использовании отдельных антенно-фидерных трактов со штатными антеннами неопределенность типа A $u_{\Delta\Delta T}$ по фазовым измерениям составляет $4.3 \cdot 10^{-11}$ с, а по кодовым измерениям – $8 \cdot 10^{-9}$ с. Эти значения обусловлены разностью задержек в фидерном тракте, шумами антенн и влиянием многолучевого РРВ. При использовании направленных антенн неопределенность типа A $u_{\Delta\Delta T}$ составляет: по фазовым измерениям $3.2 \cdot 10^{-11}$ с, а по кодовым измерениям – $4 \cdot 10^{-9}$ с. Эти значения удалось улучшить за счет повышения уровня сигнала на входе приемника и использования антенной системы с пространственной избирательности.

Список литературы: 1. *Финкельштейн А.М.* Фундаментальное координатно-временное обеспечение // Вестник Рос. Академии наук. – 2007. – Т. 77, М 7. – С. 608-617. 2. *Антипов И.Е., Коваль Ю.А., Обельченко В.В.* Развитие теории и совершенствование радиометеорных систем связи и синхронизации. – Харьков : Коллегиум, 2006. – 416 с. 3. *V. S. Zhang, T. E. Parker, M. A. Weiss, F. M. Vannicola.* Multi-Channel GPS/GLONASS Common-View between NIST and USNO // IEEE International Frequency Control Symposium, pp. 598-606, June 2000. 4. *Гужва Ю. Г.* Синхронизация часов по сигналам "ГЛОНАСС"/ Ю. Г. Гужва, А. Г. Геворкян, П. П. Богданов., В. В. Овчинников // Радионавигация и время. – 1994. – № 1. – С. 11. 5. *Recommendation ITU-R TF.1153-3* «The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing PN time codes». ITU, Radiocommunication Study Group, Geneva, Last update 2005. 6. *Пат. 38167 Україна, МПК51 (2006), G04G 7/00.* Спосіб частотно-часової синхронізації просторово рознесених еталонів та стандартів часу і частоти / Нестеренко Г.В., Коваль Ю.О., Иванова О.О., заявник та власник Харк. нац. ун-тет радіоелектр. – № u2008 09468, подано 21.07.2008; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24. 7. *Соловьев Ю.А.* Системы спутниковой навигации. – М. : Эко–Тендз, 2001. – 270 с. 8. *Иванова Е.А., Коваль Ю.А., А.А. Костыря, Ткаченко А.А., Ямницкий В.А., Ушаков С.И.* Погрешности частотно-временной синхронизации при использовании сигналов телекоммуникационных геостационарных спутников с учетом модели их перемещения // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – №. 4/10 (40). – С. 25-29. 9. *Коваль Ю.А., Костыря А.А., Иванова Е.А., Приймак В.Ю., Б.А. Ал-Твежри, А.Ф. Хусейн.* Влияние коррелированных помех в многолучевых каналах на погрешность оценки временного положения сигналов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 3/12 (51). – С. 51-60.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 12.03.2013