

# Прикладні аспекти: вимірювання часу

УДК 621.396.96

Ю.А. Коваль, В.Ю. Приймак, С.А. Плехно, А.А. Костыря, Б.А. Ал-Твежри, А.Ф. Хуссейн

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

## АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СДВИГА ШКАЛ ВРЕМЕНИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ SBAS

*Рассмотрено современное состояние сличения эталонов времени и частоты пассивным методом с применением алгоритма общего охвата (АОО). Проведен анализ и оценена потенциальная возможность АОО. Приведены соотношения для оценки сдвига шкал эталонов и погрешностей. Дана классификация и предложены способы оценивания неопределенности измерений для АОО.*

**Ключевые слова:** сличение эталонов времени и частоты, методы и алгоритмы измерений сдвига шкал, погрешности и неопределенность.

### Введение и постановка задачи

Сличение территориально разнесенных эталонов времени и частоты необходимо для решения актуальных научно-технических и оборонных 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

$$\widehat{\Delta T}^{ab} = -\widehat{\Delta T}^{ba}$$

эталонных, 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 радиометеорный метод 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 новый пассивный метод сличения, основанный на приеме сигналов общих источников (так называемый алгоритм общего охвата – АОО). В качестве общих источников могут быть использованы сигналы, излучаемые гео-

стационарными спутниками (ГС) [6], в частности, GPS-подобные сигналы ГС системы SBAS.

Статья посвящена теоретическому анализу погрешностей, а в настоящее время и неопределенности измерений сдвига шкал [7 – 9] с использованием сигналов ГС и экспериментальным оценкам некоторых составляющих неопределенности сличений 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;  $\tau_p^{ab}$ ,  $\tau_p^{ba}$  – значения времени задержки сигналов в канале РРВ;  $t_1^a$ ,  $t_1^b$  – временные положения принятых в пунктах сигналов.  $s_0(t)$  – сигнал общего источника;  $\tau^{ao}$ ,  $\tau^{bo}$  – задержки сигнала общего источника относительно шкал времени эталонов;  $\tau_p^{oa}$ ,  $\tau_p^{ob}$  – задержки сигнала общего источника до пунктов в канале РРВ. Из рис. 1 следует выражение для опорного значения сдвига шкал в АОО

$$\Delta T^{ab} = (t_1^a - t_1^b) - (\tau_p^{oa} - \tau_p^{ob}). \quad (1)$$

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

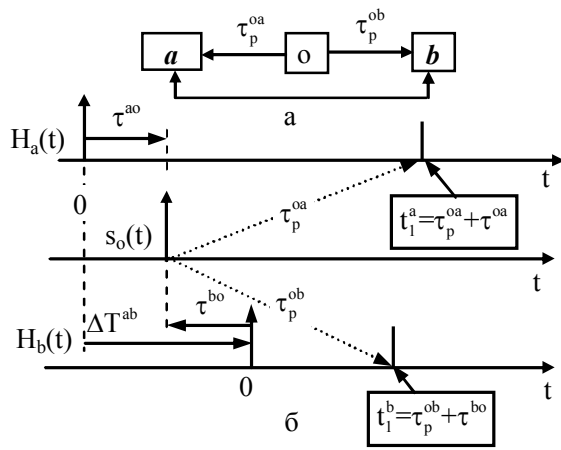


Рис. 1. Алгоритм общего охвата

Суммарную погрешность для АОО можно записать в виде:

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\text{кан}) = [(\tau_p^{oa} - \hat{\tau}_p^{oa}) - (\tau_p^{ob} - \hat{\tau}_p^{ob})]; \quad (2)$$

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\text{ап}) = (\tau_{\text{прм}}^a - \hat{\tau}_{\text{прм}}^a) - (\tau_{\text{прм}}^b - \hat{\tau}_{\text{прм}}^b); \quad (3)$$

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(c/\pi) = (\delta_t^a - \delta_t^b); \quad (4)$$

где  $\hat{\tau}_p^{oa}$ ,  $\hat{\tau}_p^{ob}$ ,  $\hat{\tau}_{\text{прм}}^a$ ,  $\hat{\tau}_{\text{прм}}^b$  – опорные значения задержек в канале РРВ и приемной аппаратуры.

Учитывая случайный характер и некоррелированность помех в пунктах, попомеховые погрешности сличения, с применением (4), можно оценить среднеквадратическими отклонениями (СКО):

$$\sigma_{\Delta T}^{ab}(c/\pi) = \sigma_{\Delta T}^{ba}(c/\pi) = \sqrt{(\sigma_t^a)^2 + (\sigma_t^b)^2}, \quad (5)$$

где  $\sigma_t^a$ ,  $\sigma_t^b$ ,  $\hat{\tau}_{\text{прм}}^a$ ,  $\hat{\tau}_{\text{прм}}^b$  – СКО ОВП сигналов в пунктах.

Поскольку СКО помеховой погрешности (5) определяется при статистической обработке результатов измерений сдвига шкал, эта оценка погрешности соответствует стандартной неопределенности типа **A** [7, 8]

$$u_{A/\Delta T}^{ab} = u_{A/\Delta T}^{ba}(c/\pi) = \sigma_{\Delta T}^{ab}(c/\pi) = \sigma_{\Delta T}^{ba}(c/\pi).$$

Канальную и аппаратную погрешности, описываемые выражениями (2) и (3), нельзя определить путем статистической обработки результатов измерений. Поэтому, согласно [7, 8], эти погрешности формируют неопределенность типа **B**.

Для оценки стандартной канальной неопределенности  $u_B(\text{кан})$  применимы модели канала РРВ, ПКЧ и другие независимые каналы калибровки (НКК), а для аппаратной неопределенности  $u_B(\text{ап})$  – измерения («пилотирование») аппаратных задержек (АЗ) или проведение измерений в режиме «нулевой базы» (аппаратурные комплексы пунктов **a** и **b** совмещаются).

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

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

Для экспериментальной оценки стандартной неопределенностей типа **A**, вызванной шумами, и аппаратной составляющей стандартной неопределенности типа **B** в случае использования для сличения сигналов системы SBAS проведен эксперимент в режиме нулевой базы.

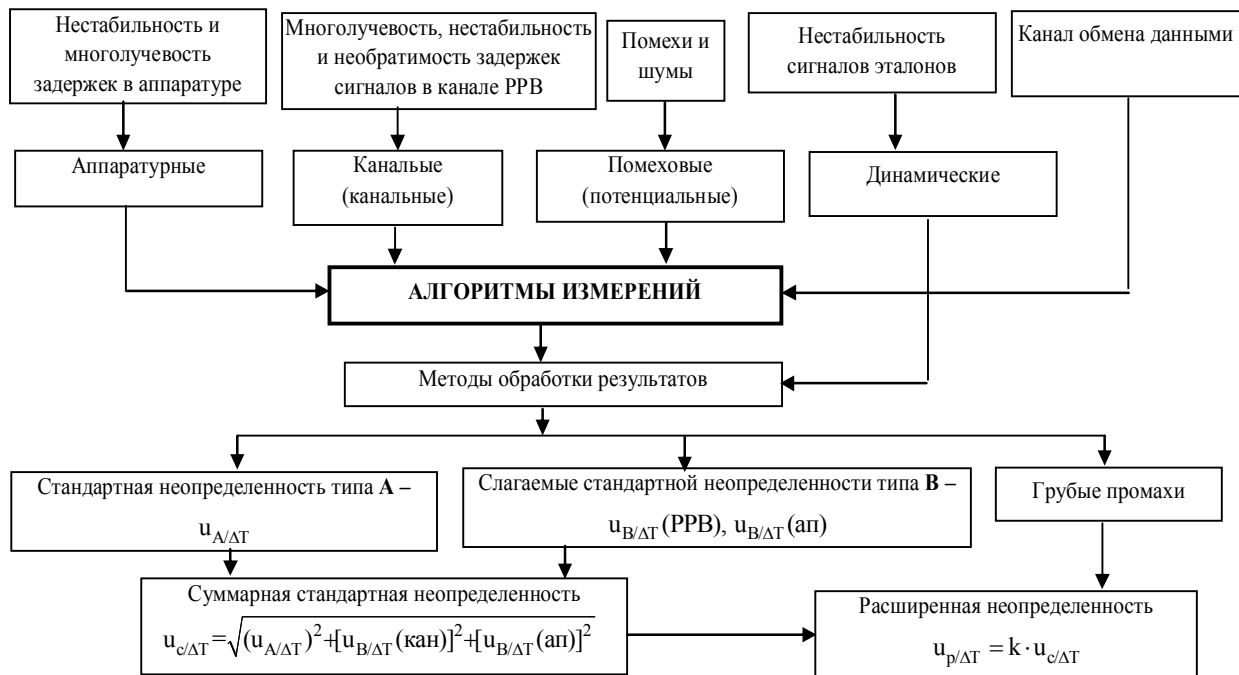


Рис. 2. Структура погрешностей и неопределенности сличений с использованием сигналов ГС

Таблица 1

Причины и методы учета составляющих неопределенности типа В

Вид	Причины	Методы учета	
u <sub>B</sub> (кан)	Параметры ионосферы	Модели, ПКЧ, НКК	[11]
	Параметры тропосферы		[12]
	Нутация ГС		[13]
	Многолучевость РРВ	Модель	[13]
u <sub>B</sub> (ап)	Многолучевость антенных трактов	Модель	[13]
	Температура, старение элементов и др	Измерения АЗ и режим «нулевой базы»	[2]

Схема измерительного стенда изображена на рис. 3, где обозначены: СЧВ – стандарт частоты и времени; Пр1, Пр2 – приемники NOVATEL OEM628, имеющие режим внешней синхронизации; 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.

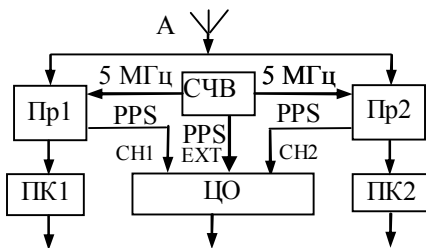


Рис. 3. Структурная схема измерительного стенда

При включения 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  $\Delta t_{pp}$ . На рис 4 приведена осциллограмма не сведенных шкал, на рис 5 шкалы сведены с применением системы GPS.

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

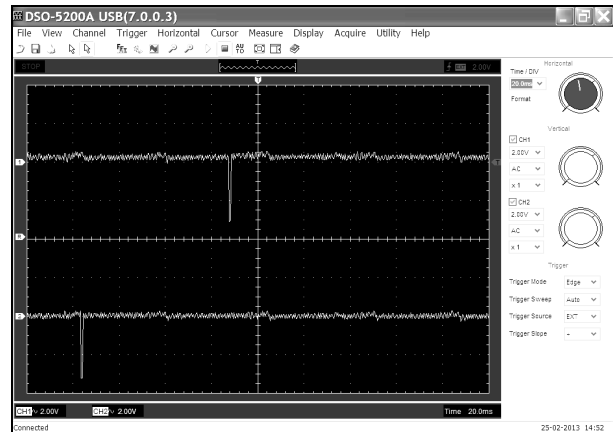


Рис. 4. Осциллограмма сдвинутых шкал времени

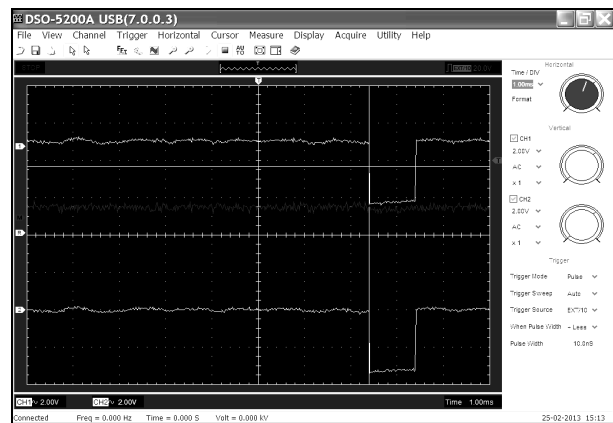


Рис. 5. Осциллограмма сведенных шкал времени

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 данных для обработки в пакете MATLAB. Измерения проводились в ХНУРЭ для ГС системы SBAS PRN S120 на 17281 GPS день. На рис. 6 изображен график разности псевдодальностей на интервале  $3 \cdot 10^4$  с. На рис. 7 приведены гистограммы разностей псевдодальностей по кодовым и фазовым измерениям. Результаты статистической обработки измерений приведены в табл. 2.

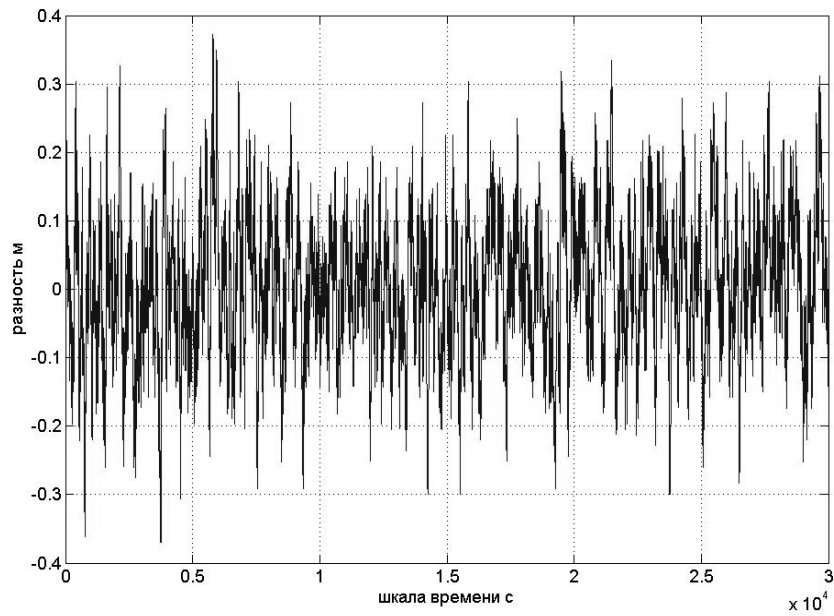


Рис. 6. Разность псевдодальностей

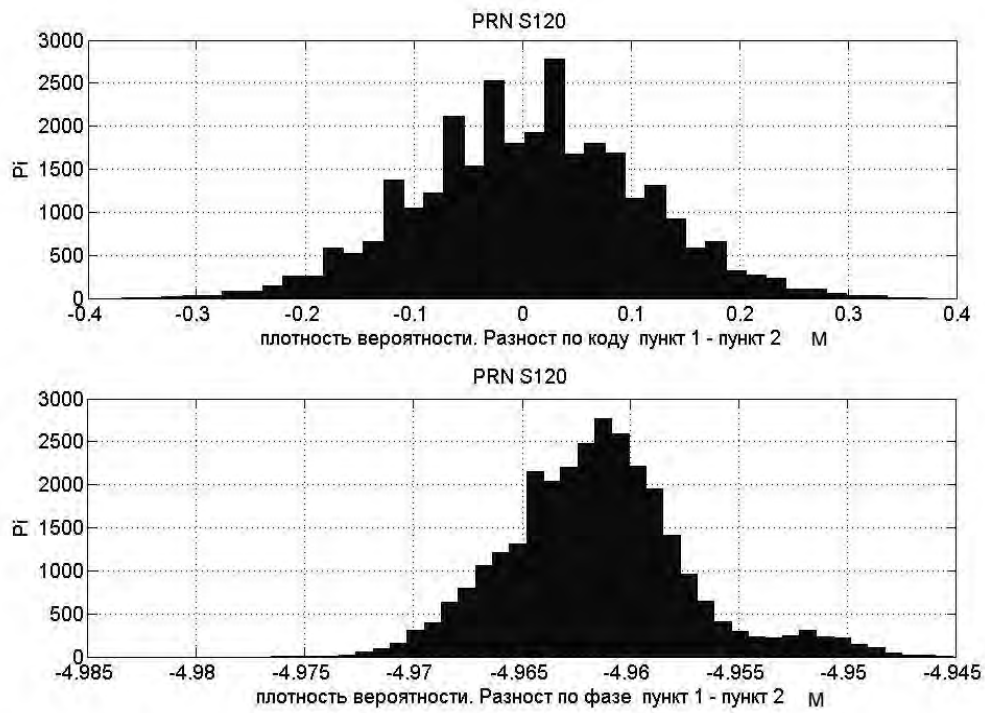


Рис. 7. Гистограммы разностей псевдодальностей

Таблица 2

Результаты статистической обработки данных

Вид измерений	Среднее значение аппаратурной неопределенности типа <b>B</b>		Оценка $u_{A/\Delta T}$	
	м	с	м	с
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	$3.4 \cdot 10^{-10}$

## Выводы

Анализ погрешности и неопределенности АОО сличения эталонов времени и частоты показал, что СКО помеховой погрешности измерений при сличениях совпадает со стандартной неопределенностью типа А.

Статистический анализ оценок канальных и аппаратурных погрешностей позволяет получить слагаемые стандартной неопределенности типа В –  $u_B(\text{кан})$  и  $u_B(\text{ап})$ . Для этого применимы модели и дополнительные измерения. Это обуславливает необходимость совершенствования моделей РРВ и методов измерения аппаратурных задержек.

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

Для контроля аппаратурной составляющей типа В необходим оперативный контроль сдвигов шкал приемников и сличаемых стандартов.

## Список литературы

1. Финкельштейн А.М. Фундаментальное координатно-временное обеспечение / А.М. Финкельштейн // Вестник Российской Академии наук. – 2007. – Т. 77, № 7. – С. 608-617.
2. Антипов И.Е. Развитие теории и совершенствование радиометeorных систем связи и синхронизации / И.Е. Антипов, Ю.А. Коваль, В.В. Обельченко. – Х.: Коллегиум, 2006. – 416 с.
3. Multi-Channel GPS/GLONASS Common-View between NIST and USNO / V.S. Zhang, T.E. Parker, M.A. Weiss, F.M. Vannicola, // IEEE International Frequency Control Symposium. – June 2000. – P. 598-606,
4. 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., Іванова О.О., заявник та власник Харківський нац. університет радіоелектр. – № u2008 09468, подано 21.07.2008; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24.
7. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. – ISO, Switzerland, 1993.
8. РМГ 91-2009. ГСИ. Совместное использование понятий "погрешность измерения" и "неопределенность измерения". Общие принципы.
9. The evaluation of uncertainties in [UTC - UTC(k)] / W. Lewandowski, D. Matsakis, G. Panfilo, P. Tavella // Metrologia 43 (2006). – P. 278-286.
10. Petley B.W. Time and frequency in fundamental metrology / B.W. Petley // PИЕЕЕ. – 1991. – Vol. 79, No. 1. – P. 1070-1076.
11. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации / Ю.А. Соловьев. – М.: Эко-Тендз, 2001. – 270 с.
12. Погрешности частотно-временной синхронизации при использовании сигналов телекоммуникационных геостационарных спутников с учетом модели их перемещения / Е.А. Иванова, Ю.А. Коваль, Костыря, А.А. Ткаченко, В.А. Ямницкий, С.И. Ушаков. // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – №. 4/10 (40). – С. 25-29.
13. Влияние коррелированных помех в многолучевых каналах на погрешность оценки временного положения сигналов / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, Е.А. Иванова, В.Ю., Приймак, Б.А. Ал-Твежри, А.Ф. Хусейн. // Восточно-европейский журнал передовых технологий – 2011. – № 3/12 (51). – С. 51-60.

Поступила в редколлегию 7.02.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.И. Волощук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## АНАЛІЗ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ЗСУВУ ШКАЛИ ЧАСУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СИГНАЛІВ СИСТЕМИ SBAS

Ю.О. Коваль, В.Ю. Приймак, О.С. Плехно, О.О. Костирия, Б.А. Ал-Твежрі, А.Ф. Хуссейн

Розглянуто сучасний стан порівняння еталонів часу і частоти пасивним методом із застосуванням алгоритму загального охоплення (АЗО). Проведено аналіз та оцінено потенційну можливість АЗО. Наведено співвідношення для оцінки зсуву шкал еталонів і похибок. Подано класифікацію та запропоновано способи оцінювання невизначеності вимірювань для АЗО.

**Ключові слова:** звірення еталонів часу і частоти, методи та алгоритми вимірювань зсуву шкал, похибки і невизначеність

## THE ANALYSIS AND EXPERIMENTAL MEASUREMENTS UNCERTAINTY EVALUATIONS OF TIME SHIFT USING THE SBAS-SYSTEM SIGNALS

Y. A. Koval, V.Y. Pryimak, A.S. Plehno, A.A. Kostyria, B.A Al-Tvezhri, A.F. Hussein

The current state of time and frequency comparison by the passive method with general coverage algorithm (GCA) is examined. The potentiality of GCA is analyzed and evaluated. Standards' scales shift estimation and errors formulas are given. The classification and measurements uncertainty estimation methods for GCA are proposed.

**Keywords:** comparison of time and frequency standards, methods and algorithms for measuring the shear scale, the errors and uncertainties.