

## ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОГРЕШНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ SBAS

В статье рассмотрены пути снижения ионосферной составляющей погрешности частотно-временной синхронизации при использовании в алгоритме общего охвата (АОО) одночастотных GPS-подобных сигналов, излучаемых геостационарными ИСЗ системы SBAS. Оценены возможности решения данной задачи с использованием двух моделей для компенсации задержек сигналов в ионосфере (*IONEX* и *Klobuchar*) и метода, основанного на обработке результатов измерений сигналов по их огибающим и фазам.

**Ключевые слова:** модель ионосферы, синхронизация времени и частоты, алгоритм общего охвата, результаты моделирования, *IONEX*, *Klobuchar*.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для синхронизации территориально разнесенных стандартов времени и частоты (для сличения – применительно к эталонам времени и частоты) в основном применяются сигналы спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS и ГЛОНАСС. В ХНУРЕ предложен и разрабатывается альтернативный метод, основанный на применении алгоритма общего охвата (АОО) и сигналов геостационарных спутников (ГС) (в частности, одночастотных GPS-подобных сигналов, излучаемых ГС системы SBAS) [1, 2].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В АОО используется общий источник (ОИ), сигнал которого  $s_0(t)$  принимается в пунктах *a* и *b*. На рис. 1 приведены структурная схема (а) и временная диаграмма (б) АОО

ма (б) для АОО, а структурная схема системы синхронизации, реализующей АОО, – на рис. 2.

На рис. 1 и рис. 2 введены обозначения:  $H_a(t)$ ,  $H_b(t)$  – шкалы времени пунктов;  $t_1^a$ ,  $t_1^b$  – временные положения сигналов в пунктах;  $\tau_p^{oa}$ ,  $\tau_p^{ob}$  – задержка сигнала в канале РРВ от ОИ до пунктов *a* и *b*, соответственно;  $\Delta T^{ab} = \Delta T^{ao} - \Delta T^{bo}$  – сдвиг шкал пунктов *a* и *b*, выраженный через временные сдвиги между сигналом общего источника и шкалами пунктов;  $\tau_{прд}^0$  – задержка сигнала в передатчике ОИ;  $\tau_{прм}^a$ ,  $\tau_{прм}^b$  – задержки сигнала в приемных трактах пунктов;  $\delta_{t1}^a$ ,  $\delta_{t1}^b$  – абсолютные значения помеховых погрешностей оценок временного положения (ОВП) сигнала в пунктах;  $\widehat{\Delta T}^{ab}$ ,  $\widehat{\Delta T}^{ba}$  – оценки сдвигов шкал пунктов.

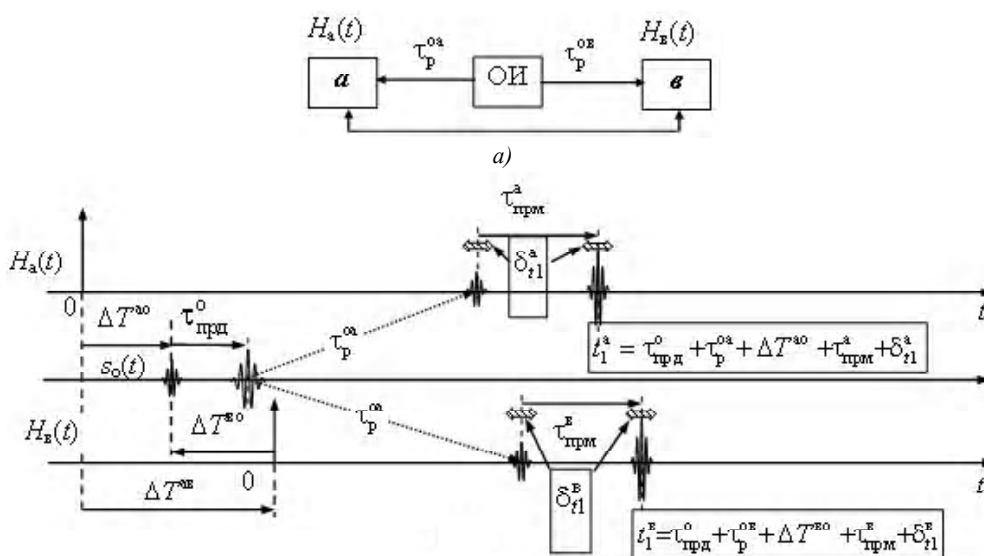


Рис. 1. Структурная схема (а) и временная диаграмма (б) АОО

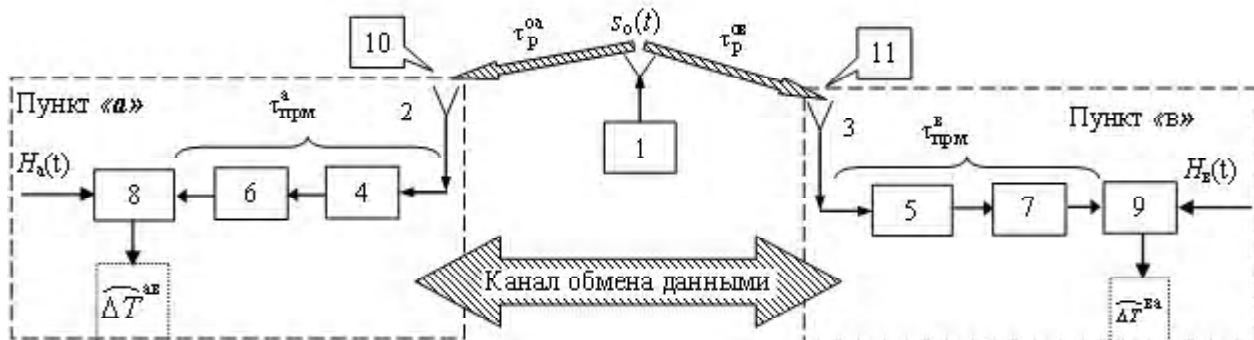


Рис. 2. Структурная схема системы синхронизации, реализующей АОО:

1 – источник общего сигнала; 2, 3 – антенны; 4, 5 – приемные устройства; 6, 7 – устройства оценки временного положения сигналов; 8, 9 – устройства, реализующие алгоритм измерений и методы обработки результатов; 10, 11 – источники помех

Выражение для общей погрешности измерения сдвига шкал в АОО можно представить в виде:

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\Sigma) = \widehat{\Delta T}^{ab} - \Delta T^{ab} = \delta_{\Delta T}^{ab}(ап) + \delta_{\Delta T}^{ab}(с/п) + \delta_{\Delta T}^{ab}(РРВ), \quad (1)$$

где  $\delta_{\Delta T}^{ab}(ап) = (\tau_{прм}^a - \tau_{прм}^b) - (\widehat{\tau}_{прм}^a - \widehat{\tau}_{прм}^b)$  – аппаратурная погрешность;  $\widehat{\tau}_{прм}^a, \widehat{\tau}_{прм}^b$  – оценки задержек в приемных трактах пунктов;  $\delta_{\Delta T}^{ab}(с/п) = \delta_{t1}^a - \delta_{t1}^b$  – помеховая погрешность;  $\delta_{\Delta T}^{ab}(РРВ) = (\tau_p^{oa} - \tau_p^{ob}) - (\widehat{\tau}_p^{oa} - \widehat{\tau}_p^{ob})$  – погрешность в канале РРВ;  $\widehat{\tau}_p^{oa}, \widehat{\tau}_p^{ob}$  – оценки задержек сигнала ОИ до пунктов.

Если помеховые погрешности могут быть оценены путем статистической обработки результатов измерений (и существенно снижены при использовании направленных антенн), а аппаратурные погрешности – измерены, то каналные погрешности  $\delta_{\Delta T}^{ab}(РРВ)$  в случае применения сигналов ГС существенно зависят от перемещения (нутаии) ГС, многолучевости РРВ, а также от параметров тропосферы и ионосферы.

Возможности учета влияний на погрешность синхронизации нутаии ГС и многолучевости РРВ рассмотрены в работах [3, 4]. Тропосферная составляющая канальной погрешности может быть снижена традиционными для СРНС методами [5]. Учитывая это, особую актуальность приобретает задача снижения ионосферной погрешности. Особенностью данной задачи является то, что ГС системы SBAS излучают одночастотные GPS-подобные сигналы на частоте  $f_{L1} = 1575,42$  МГц. Это упрощает реализацию рассматриваемого метода синхронизации, поскольку для его реализации могут быть использованы стандартные одночастотные GPS-приемники соответствующего класса. Однако, исключает возможность компенсации ионосферной погрешности, которая имеет место при использовании двухчастотных сигналов [5].

### МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ В АОО

Для решения поставленной задачи проведен сравнительный анализ трех вариантов снижения ионосферной погрешности. В двух из них применены модели Клобушара (*Klobuchar*) и *IONEX* [6, 7], а в третьем – совместная обработка измерений по огибающим сигналам (псевдодальности по коду) и по их когерентным фазам (псевдодальности по фазе) [6].

Расчет ионосферной поправки к задержке общего сигнала по модели *Klobuchar* основан на коэффициентах, которые передаются в навигационном сообщении GPS-сигнала. Эти коэффициенты зависят от значения полной концентрации электронов (ПКЭ) в точке прокола ионосферы (ТПИ). ПКЭ зависит от периода 11-летнего цикла солнечной активности, сезонных и ежедневных вариаций электронной концентрации в ионосфере, угла места и азимута спутника, а также от широты и долготы расположения принимаемого пункта.

Исходными данными для этого являются: координаты приемного пункта (широта –  $\lambda_u$ , долгота –  $\Phi_u$ ); углы под которыми виден SBAS спутник (угол места –  $El$ , азимут –  $Az$ ); коэффициенты *Klobuchar* –  $\alpha_n$  и  $\beta_n$ .

Согласно модели *Klobuchar* ионосферная коррекция  $R_{iono}$ , рассчитываемая в метрах для частоты SBAS  $f_{L1}$ , определяется соотношением:

$$R_{iono} = \begin{cases} F \cdot \left[ 5,0 \cdot 10^{-9} + (AMP) \cdot \left( 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right], & |x| < 1,57 \\ F \cdot (5,0 \cdot 10^{-9}) & , |x| \geq 1,57 \end{cases} \quad (2)$$

Параметры, входящие в состав (2), приведены в табл. 1, где «подионосферная» точка – точка пересечения ионосферы прямой ГС – пункт сличения *a* или *b*.

В модели *IONEX* [8] для расчета ионосферной коррекции  $R_{iono}$  используются глобальные ионосферные карты (*Global Ionosphere Maps – GIM*) в формате *IONEX* (рис. 3). Карты формируются через каждые 2 часа, начи-

Таблица 1.

Параметр		Примечание
Обозначение, наименование, единица измерения в (7)	Соотношение	
$F$ – коэффициент отклонения	$1,0 + 16,0 \cdot (0,53 - El)^3$	
$x$ – фаза модели,	$\frac{2 \cdot \pi \cdot (t - 50400)}{PER}$	
$t$ – местная шкала времени, (с)	$4,32 \cdot 10^4 \cdot \lambda_i + t_{GPS} :$ $t_{GPS}$ – шкала времени GPS	Если: $\begin{cases} t \geq 86400, \text{ то } t - 86400, \\ t < 0, \text{ то } t + 86400 \end{cases}$
$\lambda_i$ – долгота «подионосферной» точки	$\lambda_u + \frac{\psi \cdot \sin(Az)}{\cos(\varphi_i)}$	рад.
$\Psi$ – центральный земной угол	$\frac{0,0137}{El + 0,11} - 0,022$	$PER < 7200$
$PER$ – период модели, (с)	$\sum_{n=0}^3 \beta_n \varphi_m^n$	Если $PER < 7200$ , то $PER = 0$
$AMP$ – амплитуда вертикальной задержки, (с)	$\sum_{n=0}^3 \alpha_n \varphi_m^n$	Если $AMP < 0$ , то $AMP = 0$
$\varphi_m$ – геомагнитная широта точки «подионосферной» точки	$\varphi_i + 0,064 \cdot \cos(\lambda_i - 1,617)$	Если: $\begin{cases} \varphi_i > 0,416, \text{ то } \varphi_i = 0,416, \\ \varphi_i < -0,416, \text{ то } \varphi_i = -0,416 \end{cases}$
$\varphi_i$ – геодезическая широта «подионосферной» точки	$\varphi_u + \psi \cdot \cos(Az)$	рад.

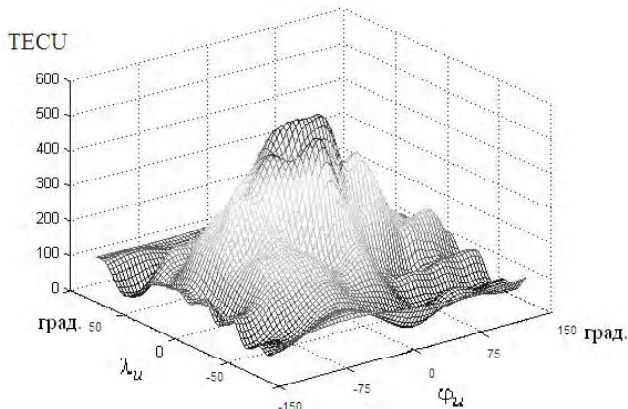


Рис. 3. Вид ионосферной карты в формате IONEX

ная с 00:00 UT (Всемирное время), и показывают зависимость вертикальной электронной концентрации (TECU) от широты ( $-87,5^\circ \leq \lambda_u \leq 87,5^\circ$ , шаг  $2,5^\circ$ ) и долготы ( $-180^\circ \leq \varphi_u \leq 180^\circ$ , шаг  $5^\circ$ ) размещения пунктов приема. В течение каждых суток предоставляется 13 карт – 12 карт на текущие сутки и 1 карта на следующие сутки [9]. В модели IONEX используется такая же система координат, как и в модели Klobuchar (геоцентрическая система WGS-84).

При расчетах ионосферной поправки в модели IONEX одним из важных моментов является определение вер-

тикальной интегральной электронной концентрации TECU, которая рассчитывается методом интерполяции по пространству [8]. Завершающим этапом является расчеты в метрах вертикальной ионосферной поправки  $\Delta_{\text{верт}}$  и расчет значения ионосферной поправки к задержке сигнала  $R_{\text{iono}}$ :

$$\Delta_{\text{верт}} = \frac{40,3 \cdot \text{TECU} \cdot 10^{16 + \text{EXPONENT}}}{(f_{L1})^2};$$

$$R_{\text{iono}} = \Delta_{\text{верт}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \cos^2(El)}}, \quad (3)$$

где EXPONENT – коэффициент, входящий в состав карт IONEX.

Последний вариант возможной коррекции ионосферной погрешности основан на том, что фазовая<sup>1</sup> и групповая<sup>2</sup> скорости распространения радиоволн в первом приближении отличаются только знаком поправок на ионосферную рефракцию. При этом фазовая скорость в ионосфере больше, а групповая скорость в ионосфере меньше, чем скорость света  $c$  в вакууме:

$$v_\phi = c / n \approx c(1 + k \cdot \text{TECU} / f_{L1}^2); \quad (4)$$

<sup>1</sup>Скорость распространения, влияющая на сдвиг моночастотного колебания по фазе.

<sup>2</sup>Скорость, обуславливающая задержку огибающей сигнала с бесконечно узким спектром.

$$v_{гр} = cn \approx c(1 - k \cdot TECU / f_{L1}^2), \quad (5)$$

где  $n$  – коэффициент преломления ионосферы;  $k$  – размерная константа.

Учитывая, что GPS-сигнал является узкополосным, псевдодальности по коду практически определяются групповой скоростью  $v_{гр}$ . Можно также предположить, что псевдодальности по фазе обусловлены фазовой скоростью  $v_{ф}$ . Учитывая это, из выражений 4 и 5 следуют соотношения для псевдодальностей по коду и фазе:

$$R_{\phi} \approx R_0 - R_{iono}; \quad (6)$$

$$R_{к} \approx R_0 + R_{iono}, \quad (7)$$

где  $R_0$  – величина псевдодальности без влияния ионосферы.

Из соотношений 6 и 7 очевидное соотношение для оценки ионосферной поправки в данном методе

$$R_{iono} \approx (R_{к} - R_{\phi}) / 2. \quad (8)$$

**РЕЗУЛЬТАТЫ**

В соответствии с выражениями (2), (3) и (8) была рассчитаны ионосферные поправки для ГС SBAS №134 Inmarsat 3f3. Данные суточных наблюдений для данного спутника (рис. 4) предоставлены коллективом базовой GPS-станции НУЦ РТ кафедры ОПТ ХНУРЭ. Координаты пункта приема  $\lambda_u=50\ 00^{\circ}54'93366''$ , долгота –  $\phi_u=31\ 13^{\circ}48'66807''$  (в системе координат ITRF00).

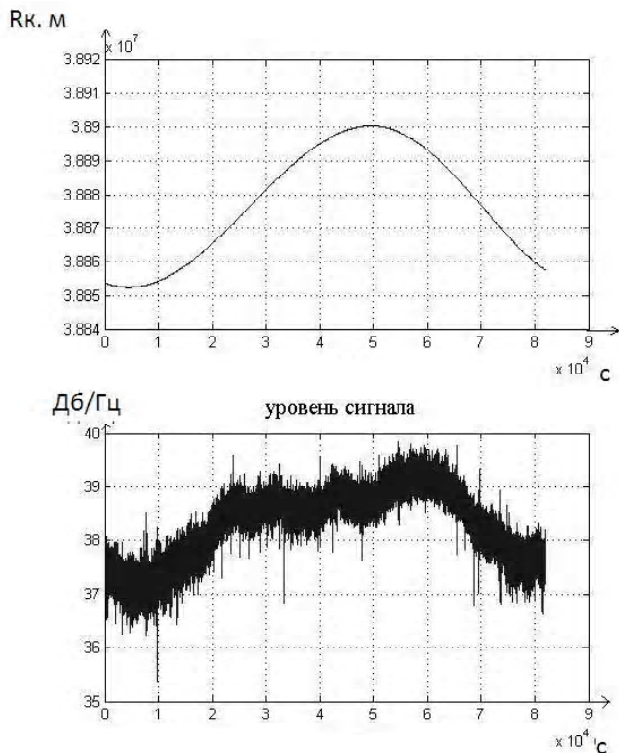


Рис. 4. Исходные данные для ГС SBAS №134 Inmarsat 3f3

Ионосферные поправки, рассчитанные по моделям IONEX и Klobuchar, представлены в табл. 2.

Обработка в соответствии с соотношением (8) производилась как для всего интервала наблюдений, так и для интервала 300 с. Этот интервал выбирался исходя из отсутствия выбросов измерений псевдодальностей (рис. 5). Полученный ход поправок приведен на рис. 6.

Результаты статистической обработки для выбранного интервала (300 с) представлены в табл. 3 (математические ожидания) и табл. 4 (среднеквадратические отклонения).

Таблица 2.

Модель	$R_{iono}$ , м
IONEX	5,2 $\approx$ 17,3 нс
Klobuchar	6,3 $\approx$ 21 нс

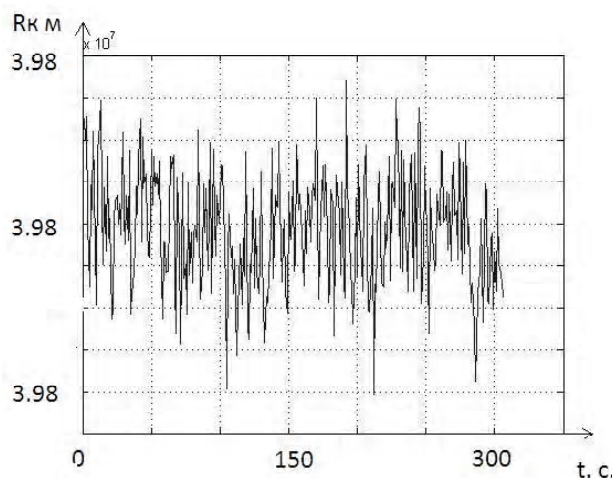
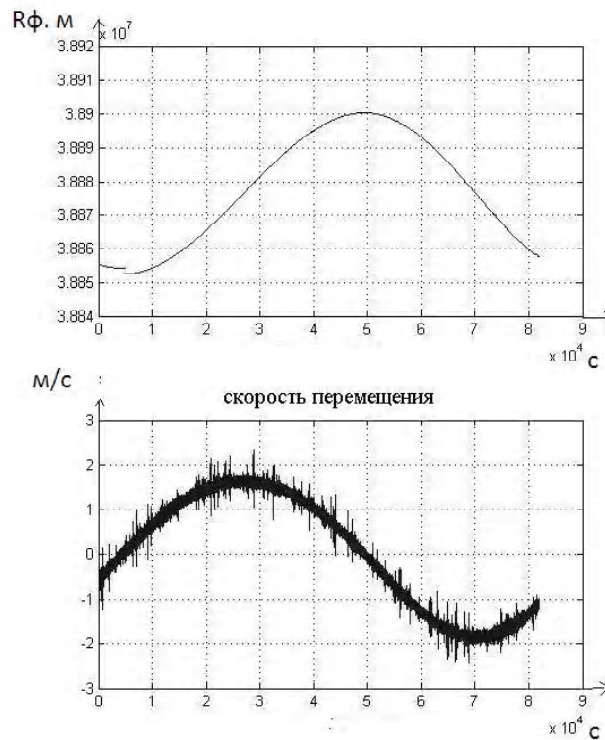


Рис. 5. Псевдодальность на интервале 300 с



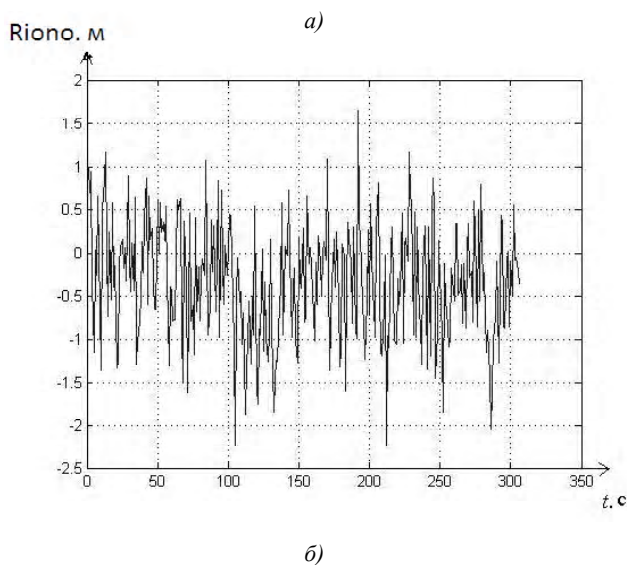
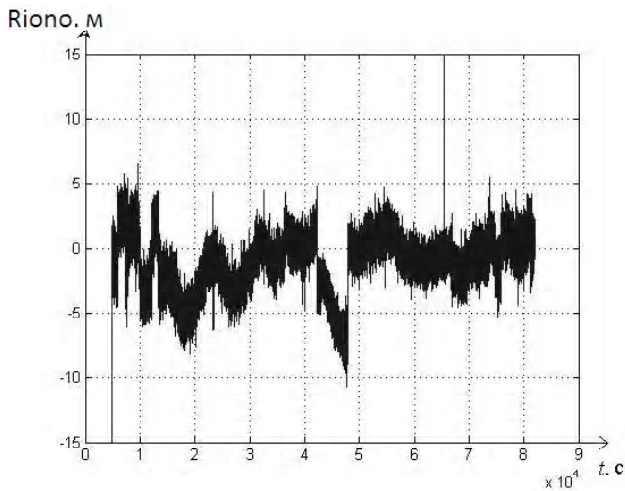


Рис. 6. Ход ионосферных поправок, рассчитанных по соотношению (8)

Таблица 3.

$\bar{R}_k, \text{ м}$	$3,890030358119027 \cdot 10^7$
$\bar{R}_\phi, \text{ м}$	$3,890030425866324 \cdot 10^7$
$(\bar{R}_k + \bar{R}_\phi) / 2, \text{ м}$	$3,890030391992676 \cdot 10^7$
$\bar{R}_{iono}, \text{ м}$	$-0,338736493286 \approx 0,1 \text{ нс}$

Таблица 4.

$\sigma_k, \text{ м}$	1,363919653717050
$\sigma_\phi, \text{ м}$	0,172483342293234
$\sigma_{(k+\phi)/2}, \text{ м}$	0,363320814770151
$\sigma_{iono}, \text{ м}$	0,681518300721 $\approx 2 \text{ нс}$

Коэффициент корреляции измерений по коду и фазе составил 0,06. Ионосферная поправка, рассчитанная по соотношению (8), отличается от поправок, полученных по моделям *IONEX* и *Klobuchar*. Это можно объяснить

несоответствием фазовых измерений псевдодальностей фазовой скорости в ионосфере из-за неоднозначности фазовых измерений, которая в GPS-приемниках устраняется по кодовым измерениям.

## ВЫВОДЫ

В соответствии с интерфейсным контрольным документом GPS [7], применение модели *Klobuchar* позволяет компенсировать, как минимум, на 50 % среднеквадратическую погрешность координатно-временных определений, вызванную влиянием аномалий ионосферных задержек. Недостатком модели *Klobuchar* является необходимость применения коэффициентов, которые передаются в навигационном сообщении с борта спутников GPS. Это приводит к зависимости от системы GPS.

В модели *IONEX* остаточное влияние ионосферы составляет не более 30 % среднеквадратической погрешности временных определений. Недостатком данной модели является невозможность ее использования в реальном масштабе времени, так как ионосферные карты передаются в послесезонном режиме по данным международных сервисных центров обработки GPS/GNSS наблюдений, таких как IGS, EPN, JPL.

Таким образом, при реализации пассивных систем синхронизации, использующих в качестве ОИ сигналы ГС SBAS, для снижения ионосферных погрешностей можно использовать совместно модели *IONEX* и *Klobuchar*. Целесообразно продолжить моделирование с целью получения ионосферных поправок для конкретных размещений пунктов синхронизации.

Вариант оценки ионосферных поправок по совместной обработке измерений псевдодальностей по коду и фазе дал отрицательный результат в случае применения стандартных одночастотных GPS-приемников.

Возможно уменьшить на порядок и более ионосферные погрешности синхронизации при использовании сигналов телекоммуникационных ГС, несущие частоты которых существенно выше, чем у СРНС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 38167 Украина, 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 Харківський нац. університет радіоелектр. – № u2008 09468; подано 21.07.2008; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24.
2. Коваль, Ю. А. Экспериментальные исследования возможностей частотно-временной синхронизации при использовании сигналов геостационарных ИСЗ системы SBAS / Ю. А. Коваль, Е. А. Иванова, А. А. Костыря [и др.] // Радиотехника. – 2011. – №. 165. – С. 46–55.
3. Иванова, Е. А. Погрешности частотно-временной синхронизации при использовании сигналов телекоммуникационных геостационарных спутников с учетом модели их перемещения / Е. А. Иванова, Ю. А. Коваль, А. А. Костыря [и др.] // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 4/10 (40). – С. 25–29.
4. Коваль, Ю. А. Влияние коррелированных помех в многолучевых каналах на погрешность оценки временного по-

- ложения сигналов / Коваль Ю. А., Костыря А. А., Иванова Е. А. [и др.]. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 3/12 (51). – С. 51–60.
5. Соловьев, Ю. А. Системы спутниковой навигации. – М. : Эко-трендз, 2000. – 267 с.
  6. Кошелев, А. В. Влияние ионосферы на результаты GPS-измерений / Кошелев А. В. // Геодезия и картография. – 2010. – №7. – С. 2–5.
  7. Zumberge, J. F The International GPS Service for Geodynamics / J. F. Zumberge, R. Liu, R. E. Nelan // Jet propulsion laboratory California institute of technology. – 1995. – 338 p.
  8. Chang-Moon, Lee Generation of Klobuchar Ionospheric Error Model Coefficients Using Fourier Series and Accuracy Analysis / Chang-Moon Lee, Kwan-Dong Park. // Journal of Astronomy and Space Sciences. ASS.2011.28.1. № 28(1).
  9. Gurtner, S. W. IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1 / S. W. Gurtner // Astronomical institute, university of Berne. – 1998. – 15 p.
  10. IGS Product Table (GPS Broadcast values included for comparison) [Електронний ресурс]; Режим доступу: <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.

Стаття надійшла до редакції 14.11.2012.

Після доробки 25.01.2013.

Коваль Ю. А.<sup>1</sup>, Приймак В. Ю.<sup>2</sup>, Хуссейн А. Ф.<sup>3</sup><sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна<sup>2,3</sup>Аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

### МОЖЛИВОСТІ ЗНИЖЕННЯ ІОНОСФЕРНОЇ СКЛАДОВОЇ ПОХИБКИ СИНХРОНІЗАЦІЇ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СИГНАЛІВ СИСТЕМИ SBAS

У статті розглянуті шляхи зниження іоносферної складової похибки частотно-часової синхронізації при використанні в алгоритмі загального охопту одночастотних GPS-подібних сигналів, що випромінюються геостационарними ШІСЗ системи SBAS. Оцінені можливості рішення даної задачі з використанням двох моделей для компенсації затримок сигналів в іоносфері (*IONEX* і *Klobuchar*) і методу, заснованого на обробці результатів вимірів сигналів по огибаючій і фазі.

**Ключові слова:** модель іоносфери, синхронізація часу та частоти, алгоритм загального охоплення, результати моделювання, *IONEX*, *Klobuchar*.

Koval A.<sup>1</sup>, Pryimak V.<sup>2</sup>, Hussein A.<sup>3</sup><sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine<sup>2,3</sup>Aspirant, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

### POSSIBLE REDUCTION OF IONOSPHERIC COMPONENTS, THE TIMING OF THE USE OF SIGNALS SBAS

The article describes the ways to reduce the ionospheric error's component of the time-frequency synchronization which is used in the algorithm of general coverage (AGC) single-frequency GPS-like signals which are emitted by geostationary satellites of SBAS. The possibilities of solving this problem by using two models to compensate for the delay of signals in the ionosphere (*IONEX* and *Klobuchar*) and the method based on the analysis of the results of measurements of signals on their envelope and phase are evaluated.

The analysis of models *IONEX* and *Klobuchar* showed that application of the model *Klobuchar* can compensate, at least, 50 % of the mean square error of coordinate-time definitions, due to the influence of ionospheric anomalies delays.

The residual influence of the ionosphere is not more than 30 % of the standard error of time specified in the model *IONEX*.

The option of the evaluation of ionospheric corrections for joint working on the pseudorange measurements by code and phase was negative in the case of standard single-frequency GPS-receivers.

**Keywords:** ionosphere model, synchronization of time and frequency, the algorithm is general coverage, modeling, *IONEX*, *Klobuchar*.

### REFERENCES

1. Nesterenko G. V., Koval Y., Ivanova O. Pat. 38167 Ukraine, МРК51 (2006), G04G 7/00. Sposib frequency chasovoї sinhronizatsії prostorovo roznesenih etaloniv that i standativ hour frequency : zayavnik that vlasnik Harkivsky Nat. universitet radioelektr., No. u2008 09468 ; filed 21/07/2008 ; publ. 25.12.2008, Bull. № 24.
2. Koval J. A., Ivanova E. A., Kostyrya A. A., Al-Tvezhri B. A., Hussein A. F., Asaad X. Kh. Experimental research capabilities of frequency-time synchronization signals using geostationary satellites of SBAS. *Radio: Vseukr. Interagency. nauchn.-tehn. sb.*, 2011, No. 165, pp. 46–55.
3. Ivanov E., Koval Y., Kostyrya A., Tkachenko V., Yamnitsky S., Ushakov S. The error frequency-time synchronization when more-traditional telecommunication geostationary satellites with the model of their movement, *Shidno-Evropeysky advanced tehnologiy magazine*, 2009, No. 4/10 (40), pp. 25–29.
4. Koval Y., Kostyrya A., Ivanov E., Pryimak V., Al-Tvezhri B., Hui-sein A. The influence of correlated noise in the multipath channel estimation error on the time-term position signals, *East European Journal of advanced technology*, 2011, No. 3/12 (51), pp. 51–60.
5. Solovyov Y. Satellite Navigation Systems. Moscow, Eco-trendz, 2000, 267 p.
6. Koshelev A. Effect of the ionosphere on the results of GPS-measurements, *Geodesy and car-graphy*, 2010, No. 7, pp. 2–5.
7. Zumberge J. F., Liu R., Nelan R. E., The International GPS Service for Geodynamics. Jet propulsion laboratory California institute of technology, 1995, 338 p.
8. Chang-Moon Lee, Kwan-Dong Park. Generation of Klobuchar Ionospheric Error Model Coefficients Using Fourier Series and Accuracy Analysis, *Journal of Astronomy and Space Sciences. ASS.2011.28.1.*, No. 28(1).
9. Gurtner S. W. IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1, *Astronomical institute, university of Berne*, 1998, 15 p.
10. IGS Product Table (GPS Broadcast values included for comparison) <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.