

**УЧЕТ КАНАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ  
СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИГНАЛОВ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ИСЗ**

**Введение**

Для синхронизации территориально разнесенных стандартов (эталонов) времени и частоты в настоящее время наиболее широко применяются сигналы спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS и ГЛОНАСС. В ХНУРЭ предложен и разрабатывается альтернативный метод, основанный на реализации алгоритма общего охвата (АОО) с использованием в качестве общего источника сигналов (ОИС) излучений геостационарных спутников (ГС) (одночастотных GPS-подобных сигналов, излучаемых ГС системы SBAS, а также сигналов телекоммуникационных ГС ИСЗ) [1, 2]. Данный метод позволяет создать независимую от иностранных пассивную систему синхронизации времени и частоты либо получить дополнительный канал синхронизации при использовании уже существующих.

**Постановка задачи**

В АОО используется ОИС, сигнал которого  $S_0(t)$  принимается в пунктах **а** и **в**. На рис. 1: *a* - структурная схема, *б* - временная диаграмма для АОО.

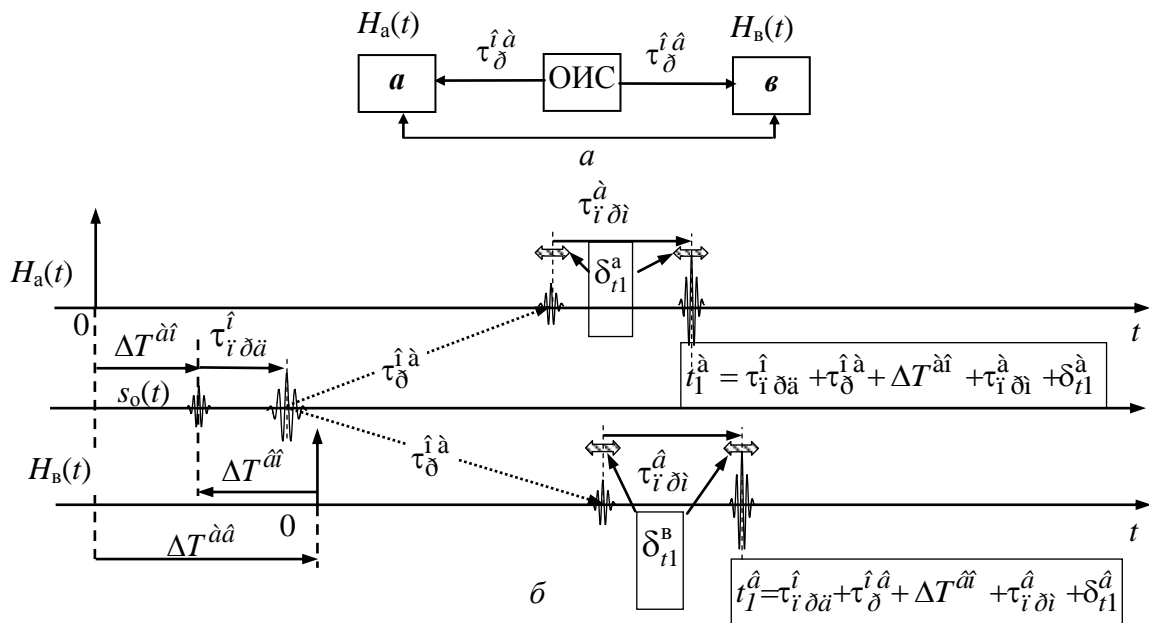


Рис. 1

На рис. 1 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 ОИС до пунктов **а** и **в** соответственно;  $\Delta T^{ab} = \Delta T^{oa} - \Delta T^{ob}$  – сдвиг шкал пунктов **а** и **в**, выраженный через временные сдвиги между сигналом общего источника и шкалами пунктов;  $\tau_i^o\delta_i^a$  – задержка сигнала в передатчике ОИС;  $\tau_i^a\delta_i^a$ ,  $\tau_i^b\delta_i^b$  – задержки сигнала в приемных трактах

пунктов;  $\delta_{i1}^a, \delta_{i1}^b$  – абсолютные значения помеховых погрешностей оценок временного положения (ОВП) сигнала в пунктах;  $\Delta\hat{T}^{ab}, \Delta\hat{T}^{ab}$  – оценки сдвигов шкал пунктов.

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

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\Sigma) = \Delta\hat{T}^{ab} - \Delta T^{ab} = \delta_{\Delta T}^{ab}(\dot{a}\ddot{i}) + \delta_{\Delta T}^{ab}(\tilde{n}/\dot{i}) + \delta_{\Delta T}^{ab}(\mathcal{D}\mathcal{D}\hat{A}), \quad (1)$$

где  $\delta_{\Delta T}^{ab}(\dot{a}\ddot{i}) = (\tau_{i\delta i}^a - \tau_{i\delta i}^b) - (\tilde{\tau}_{i\delta i}^a - \tilde{\tau}_{i\delta i}^b)$  – аппаратная погрешность,  $\tilde{\tau}_{i\delta i}^a, \tilde{\tau}_{i\delta i}^b$  – оценки задержек в приемных трактах пунктов,  $\delta_{\Delta T}^{ab}(\tilde{n}/\dot{i}) = \delta_{i1}^a - \delta_{i1}^b$  – помеховая погрешность,  $\delta_{\Delta T}^{ab}(\mathcal{D}\mathcal{D}\hat{A}) = (\tau_{\delta}^{oa} - \tau_{\delta}^{ob}) - (\tilde{\tau}_{\delta}^{oa} - \tilde{\tau}_{\delta}^{ob})$  – погрешность в канале РРВ,  $\tilde{\tau}_{\delta}^{oa}, \tilde{\tau}_{\delta}^{ob}$  – 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 аппаратные погрешности – измерены, то каналные погрешности  $\delta_{\Delta T}^{ab}(\mathcal{D}\mathcal{D}\hat{A})$  в случае применения сигналов ГС существенно зависят от перемещения (нутаии) ГС, многолучевости РРВ, а также от параметров тропосферы и ионосферы [1]. Данная работа посвящена вопросам учета каналных погрешностей, обусловленных нутациями ГС ИСЗ и неоднородностями ионосферной задержки распространения радиосигналов.

Для сличения стандартов времени и частоты на всей территории Украины предложено использовать в качестве ОИС излучения ГС ИСЗ [7]. Экспериментальная проверка потенциальной точности предлагаемого метода синхронизации осуществлена путем приема GPS-подобных сигналов ГС ИСЗ глобальной системы дифференциальных поправок СРНС GPS SBAS с использованием базовой GPS-станции («SURE») НУЦ кафедры ОПТ ХНУРЭ. Исходные данные измерений предоставлены коллективом лаборатории высокоточного позиционирования НУЦ ОПТ.

### Учет влияния нутаций ГС ИСЗ

Использование сигналов геостационарных спутников для реализации АОО позволяет упростить требования к режиму слежения антенны земной станции и избежать проблемы переориентирования, то есть, перевода ретрансляции на радиолинии с одного спутника на другой, когда один из них уходит из зоны радиовидимости, а другой появляется в ней. Однако при использовании сигналов геостационарных спутников для достижения необходимой точности синхронизации требует решения специфическая задача, связанная с оценкой каналной погрешности, которая вызывается нутацией спутников. Нутация геостационарного спутника вносит весомый вклад в каналные погрешности синхронизации как по времени, так и по частоте.

Для наклонной синхронной орбиты угол места спутника претерпевает суточные изменения, которые вызывают изменения задержки сигналов. Нестабильность положения современных геостационарных ИСЗ по долготе и широте не превышает  $\pm 0,1^\circ$ . Углу  $0,1^\circ$  соответствует расстояние около 74 км.

В [1] выполнена оценка данной составляющей погрешности синхронизации путем моделирования нутации спутника. Моделирование показало, что без учета влияния нутаций спутника каналные составляющие погрешностей рассматриваемого метода синхронизации по времени в зависимости от расстояния между пунктами лежат в пределах  $\pm 200$  нс –  $\pm 1$  мкс, а относительные каналные погрешности по частоте –  $\pm 2 \cdot 10^{-11}$  –  $\pm 10^{-10}$ . Для снижения каналных погрешностей синхронизации можно либо их учитывать, пользуясь рассмотренной моделью, либо усреднять результаты измерений в течение суток.

На рис. 2 приведены графики разностей фазовых (а) и кодовых (б) экспериментальных наблюдений псевдодальностей, а также приведены модельные значения разностей псевдодальностей (в) и скоростей (г) между пунктами и данным ГС ИСЗ [2].

Анализ экспериментальных данных позволил выбрать интервал времени для дальнейшей обработки в пределах  $5 \cdot 10^4$  с.

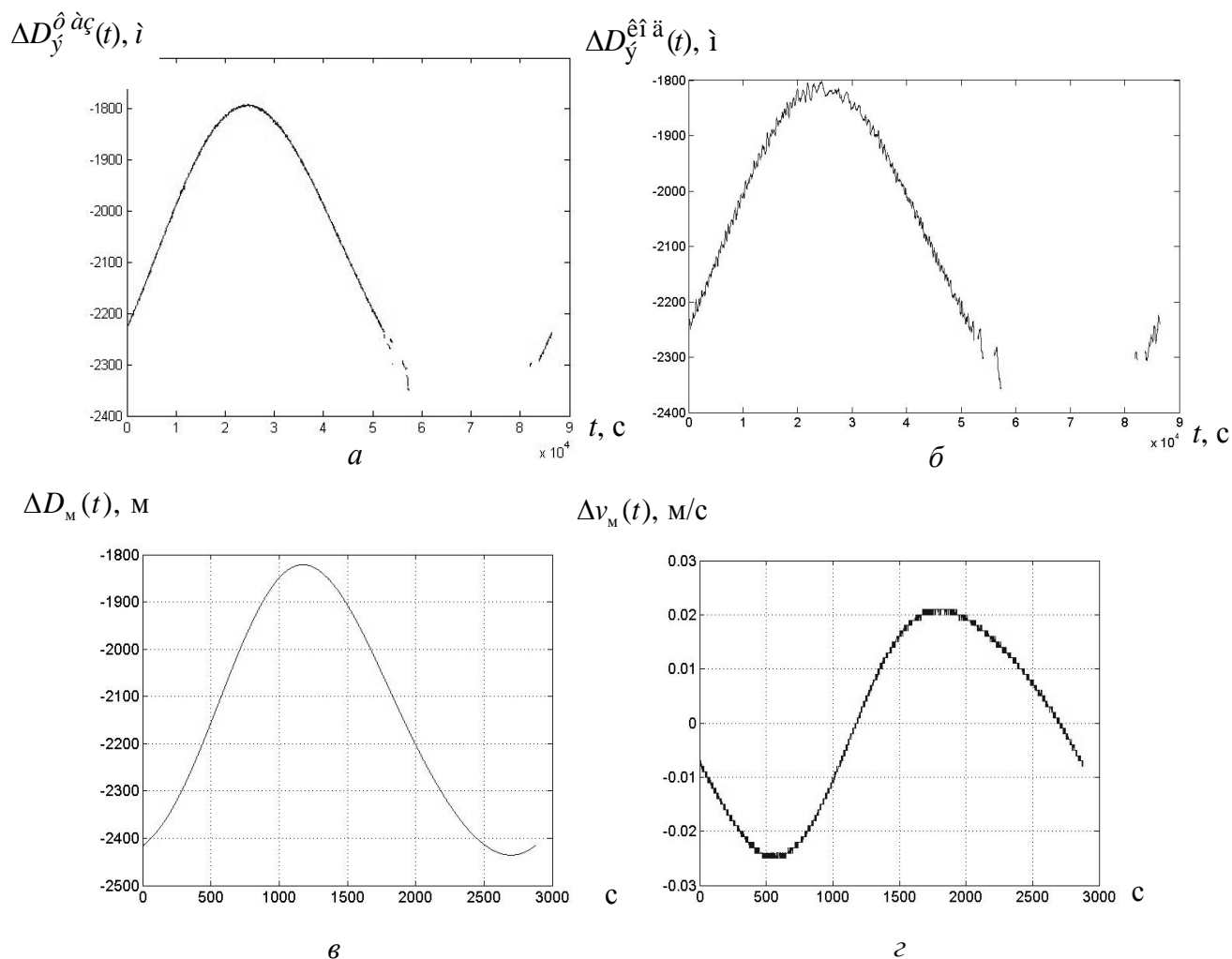


Рис. 2

Для учета нутации ГС ИСЗ были вычислены скорректированные разности дальностей и значения сдвига шкал:

$$\Delta D_{CK}(t) = \Delta D_{\dot{Y}}(t) - \Delta D_{\dot{I}}(t);$$

$$\Delta T_{CK}(t) = \Delta D_{CK}(t) / c.$$

Графики зависимостей  $\Delta D_{CK}(t)$ , полученных по фазовым и кодовым измерениям, приведены соответственно на рис. 3, а, б, а рассчитанные зависимости  $\Delta T_{CK}(t)$  – на рис. 3, в, г.

Статистическая обработка зависимостей  $\Delta T_{CK}(t)$  (рис. 3, в, г) позволила оценить средние значения сдвига шкал  $\overline{\Delta T}$  и СКО  $\sigma$ :

– по фазовым наблюдениям  $\overline{\Delta T}^{\delta \dot{\Delta} \zeta} = 88,75$  нс,  $\sigma^{\delta \dot{\Delta} \zeta} = 4,86$  нс;

– по кодовым наблюдениям  $\overline{\Delta T}^{\hat{e} \hat{i} \hat{a}} = 25,6$  нс,  $\sigma^{\hat{e} \hat{i} \hat{a}} = 22,6$  нс.

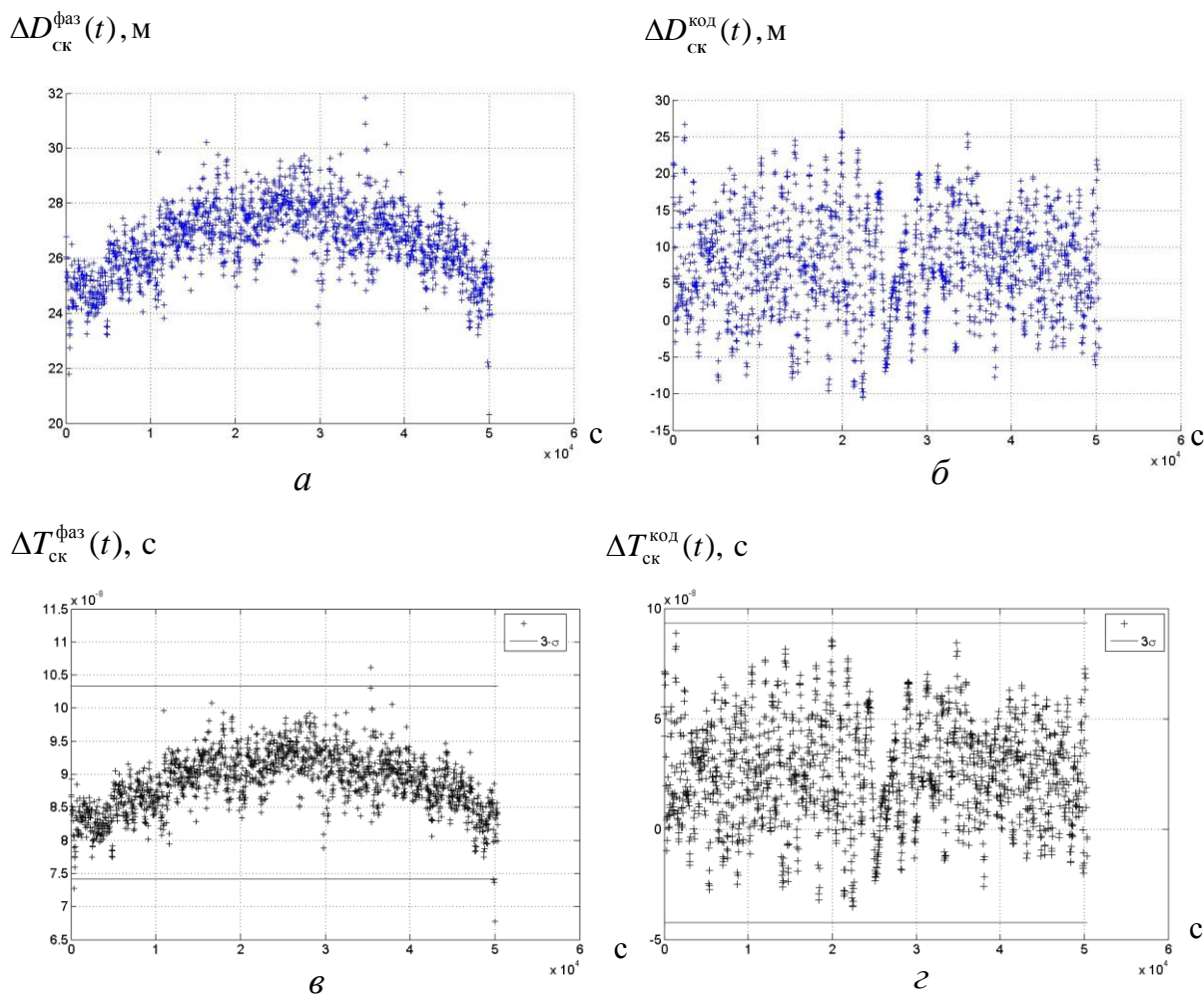


Рис. 3

### Использование моделей расчета ионосферной задержки

Для компенсации нестабильности ионосферной задержки при реализации АОО с использованием сигналов спутников SBAS могут применяться модели расчета ионосферной задержки IONEX и Клобучара (Klobuchar) [4, 5]. С применением этих моделей рассчитана задержка сигнала в слоях ионосферы для спутника SBAS №134 Inmarsat 3f3. Данные суточных наблюдений за спутником представлены на рис. 4.

Применение модели Klobuchar позволяет компенсировать не менее чем на 50 % среднеквадратическую погрешность координатно-временных определений, вызванную аномалиями ионосферных задержек.

В навигационном сообщении GPS передаются параметры для расчета ионосферной задержки согласно модели Klobuchar. К таким параметрам относятся коэффициенты  $\alpha_n$  и  $\beta_n$ , которые 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 так же от широты и долготы расположения принимаемого пункта [3].

Расчет ионосферной коррекции  $R_{iono}$  проводится в метрах для частоты SBAS  $f_{L1}$ . Для этого необходимы: 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  $\beta_n$ . Расчет выполняется в соответствии с выражением

$$R_{iono} = \begin{cases} F \cdot \left[ 5.0 \cdot 10^{-9} + (AMP) \cdot \left( 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right], & |x| < 1.57 \\ F \cdot (5.0 \cdot 10^{-9}) & , |x| \geq 1.57 \end{cases} \quad (2)$$

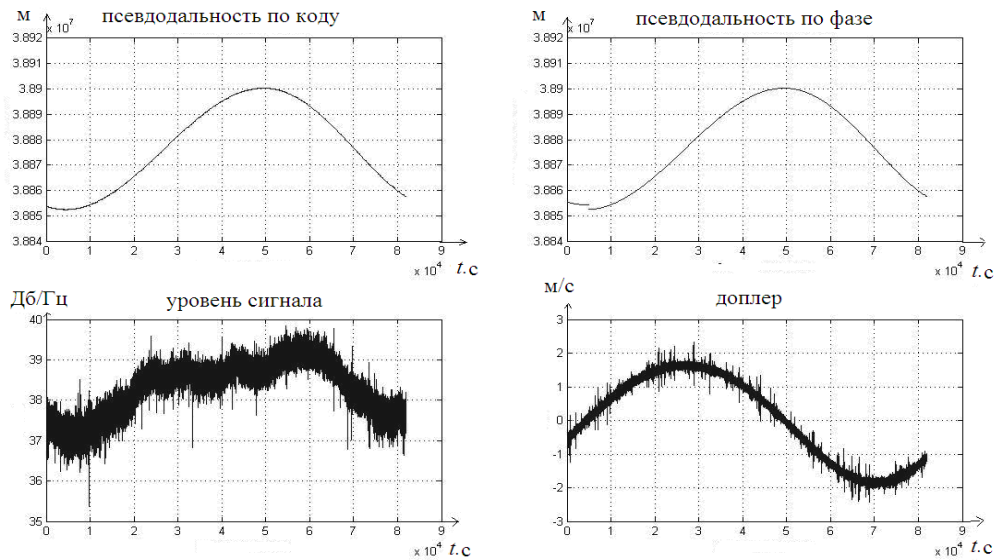


Рис. 4

Параметры, входящие в состав (2), приведены в табл.1.

В табл. 1 под «подионосферной» точкой понимается точка пересечения ионосферы прямой «ГС ИСЗ – пункт сличения **а** или **в**».

Более точно компенсировать влияние ионосферы позволяет математическая модель IONEX [5]. Для расчета ионосферной коррекции  $R_{iono}$  в модели используются глобальные ионосферные карты (Global Ionosphere Maps (GIM)) (рис. 3). В формате IONEX содержатся значения вертикальной концентрации электронов (в TECU единицах) по широте от +87.50 до -87.50 с шагом 2.50, по долготе от -1800 до 1800 с шагом 50. Карты формируются через каждые 2 часа, начиная с 00:00 UT (Всемирное время). В итоге, на каждые сутки предоставляется 13 TEC карт (рис. 5): 12 карт на текущие сутки, 1 карта на следующие сутки [6].

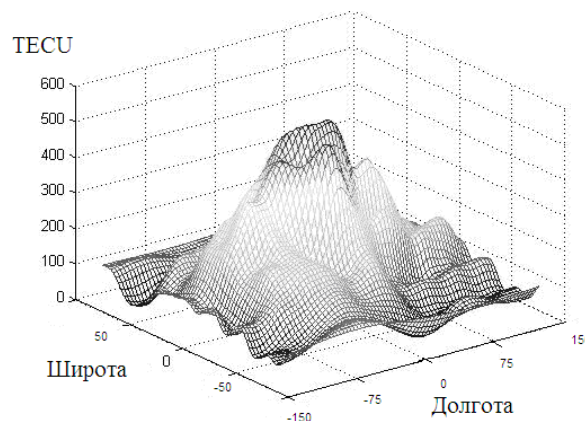


Рис. 5

В модели IONEX используется такая же система координат, как и в модели Klobuchar (геоцентрическая система WGS-84). При расчетах ионосферной задержки одним из важных моментов является определение вертикальной интегральной электронной концентрации,

которая рассчитывается методом интерполяции по пространству [5]. Завершающим этапом является расчет вертикальной ионосферной задержки (3) и расчет наклонного значения ионосферной задержки  $R_{iono}$  в метрах (4):

$$\Delta_{верт} = \frac{40.3 \cdot TECU \cdot 10^{16+EXPONENT}}{(f_{L1})^2}, \quad (3)$$

где  $f_{L1}$  – несущая частота системы SBAS,  $TECU$  – вертикальная интегральная электронная концентрация, EXPONENT – коэффициент входящий в состав карт IONEX;

$$R_{iono} = \Delta_{верт} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \cos^2(El)}}, \quad (4)$$

где  $El$  – угол места, под которым спутник виден для приёмной антенны.

Таблица 1

Параметр		Примечание
Обозначение, наименование, единица измерения	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: $\begin{cases} t \geq 86400, \text{ и } t - 86400, \\ t < 0, \text{ и } t + 86400 \end{cases}$
$\lambda_i$ – долгота «подионосферной» точки	$\lambda_u + \frac{\psi \cdot \sin(Az)}{\cos(\varphi_i)}$	Радян
$\Psi$ – 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: $\begin{cases} \varphi_i > 0.416, \text{ и } \varphi_i = 0,416, \\ \varphi_i < -0.416, \text{ и } \varphi_i = -0,416 \end{cases}$
$\varphi_i$ – геодезическая широта «подионосферной» точки	$\varphi_u + \psi \cdot \cos(Az)$	радиан

По моделям IONEX и Klobuchar рассчитана ионосферная поправка для спутника SBAS №134 Inmarsat 3f3 на 289 GPS сутки. Координаты пункта наблюдения широта – 50 00' 54. 93366", долгота – 31 13' 48. 66807" (в системе координат ITRF00). Данные поправок представлены в табл. 2.

Таблица 2

Модель	Поправка, м
IONEX	4.4
Klobuchar	6.3

Применение модели Klobuchar для компенсации влияния ионосферы при реализации АОО позволяет компенсировать не менее 50 % среднеквадратической погрешности временных определений. Достоинством модели является возможность ее применения в реальном масштабе времени. Для использования модели необходимы коэффициенты Klobuchar, которые передаются в навигационном сообщении с борта спутников GPS.

При применении модели IONEX остаточное влияние ионосферных задержек составляет не более 30 % среднеквадратической погрешности временных определений. Недостатком модели является невозможность ее использования в реальном масштабе времени, так как ионосферные карты создаются в послесеансном режиме по данным международных сервисных центров обработки GPS/GNSS наблюдений, таких как IGS, EPN, JPL.

Существенного снижения влияния ионосферных задержек в реальном масштабе времени можно достичь, используя в качестве ОИС сигналы геостационарных телекоммуникационных спутников, частота которых на порядок выше частоты сигналов спутников SBAS.

### Выводы

Результаты теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности существенного снижения влияния канальных погрешностей, обусловленных нутациями ГС ИСЗ и нестабильностью задержки сигнала в ионосфере, на результирующую погрешность синхронизации пространственно разнесенных стандартов времени и частоты. Количественная оценка результирующего улучшения точности синхронизации зависит от взаимного расположения спутника и синхронизируемых пунктов и может быть определена для каждого конкретного случая.

**Список литературы:** 1. Коваль, Ю.А., Иванова, Е.А., Костыря, А.А. и др. Погрешности частотно-временной синхронизации при использовании сигналов телекоммуникационных геостационарных спутников с учетом модели их перемещения // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – Вып. 4/10 (40). – С. 25-29. 2. Коваль, Ю.А., Иванова, Е.А., Костыря, А.А., Иванова, Е.А., Ал-Твежди Б.А., Хусейн, А. Ф., Асаад, Х. Х. Экспериментальные исследования возможностей частотно-временной синхронизации при использовании сигналов геостационарных ИСЗ системы SBAS // Радиотехника. – 2011. – №. 165. – С. 46-55. 3. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition.* – ISO, Switzerland, 1993. 4. *The International GPS Service for Geodynamics.* 5. 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. № 28(1). 6. Gurtner, S. W. IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1. 1998. 7. Пам. 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., Іванова О.О. ; заявник та власник Харківський нац. ун-тет радіоелектр. – № u2008 09468, подано 21.07.2008; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 06.09.2012