

Ю. А. КОВАЛЬ, д-р техн. наук, Е. А. ИВАНОВА, А. А. КОСТЫРЯ, канд. техн. наук,
А. Ф. ХУСЕЙН, Б. А. АЛ-ТВЕЖРИ, Х. Х. АСААД

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ синхронизации при использовании СИГНАЛОВ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ИСЗ СИСТЕМЫ SBAS

Введение

Синхронизация (сравнение, сличение) территориально разнесенных стандартов времени и частоты – основа для реализации современных частотно-временных методов, позволяющих решать актуальные научно-технические и оборонные задачи в области метрологии времени и частоты, при создании систем координатно-временного обеспечения (включая спутниковые радионавигационные системы – СРНС), радиоастрономии, радиолокации, радиопеленгации, цифровой синхронной связи. Успешное решение таких задач определяется как стабильностью стандартов времени и частоты, так и точностью их сличения. Высокие темпы совершенствования стандартов наивысшей точности – эталонов (относительная нестабильность современных эталонов составляет $10^{-13} - 10^{-15}$, а в перспективе – $10^{-16} - 10^{-18}$) определяет актуальность задачи повышения точности методов сличения [1, 2].

В настоящее время основным для сравнения шкал времени как государственных эталонов друг с другом, так и с вторичными эталонами является метод, основанный на использовании сигналов СРНС GPS (США) и ГЛОНАСС (РОССИЯ). В стадии разработки находятся Европейская СРНС (GALILEO), в создании которой участвует Украина [2, 3], и СРНС Китая COMPASS/BEIDOU. Сигналы СРНС используются также для частотно-временной синхронизации в других отраслях науки и техники.

Монопольное положение, которое занимает СРНС в области синхронизации, играет отрицательную роль. К негативным последствиям могут привести, например, ситуации, когда СРНС по различным причинам будут заблокированы или переведены в режим трансляции ложной информации. Помимо зависимости от зарубежных систем, к недостаткам применения СРНС для синхронизации относятся: малое соотношение сигнал/помеха; недостаточная оперативность; низкая помехоустойчивость.

В связи с этим актуальны работы, направленные на создание альтернативных методов синхронизации.

Постановка задачи

Предложенный авторами статьи альтернативный метод синхронизации основан на реализации алгоритма общего охвата (АОО), сущность которого поясняет рис. 1, и приеме сигналов геостационарных ИСЗ [4–6]. На рис. 1 приняты обозначения: A, B, O – сличаемые пункты и общий источник соответственно; $H_A(t), H_B(t)$ – соответствующие шкалы времени; τ_p^{OA}, τ_p^{OB} – время распространения сигналов между общим источником и сличаемыми пунктами; $\Delta T^{AB} = -\Delta T^{BA}$ – сдвиги шкал пунктов; $\Delta T^{AO}, \Delta T^{BO}$ – временные сдвиги шкал пунктов относительно сигнала общего источника; t_1^A, t_1^B – оценки временного положения принятых в пунктах сигналов общего источника.

Для анализа предложенного метода разработана модель системы [7]. Отличительными особенностями модели являются использование различных методов обработки (взаимокорреляционная и согласованная фильтрация) и оценки временного положения сигналов, а также учет многолучевости канала. Модель может быть использована для оценок потенциальных погрешностей широкого класса систем синхронизации и возможности применения в таких системах различных видов сигналов и способов их обработки.

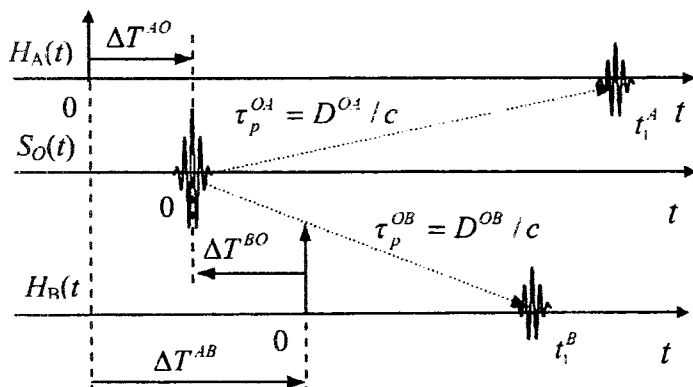


Рис. 1

(таблица), принадлежащих компаниям Artemis и Inmarsat, каждая из которых имеет свою независимую сеть наземных станций.

Название	Номер	Номер по ID Garmin	Долгота ИСЗ
Inmarsat 3f2	120	33	W15.5
Inmarsat 3f4(AOR-W)	122	35	W142
ARTEMIS	124	37	E21.4
Inmarsat 3f5(IOR-W/F5)	126	39	E25.0
Inmarsat 3f1 (IOR)	131	44	E64
Inmarsat 3f3(POR)	134	47	E178

Исходные данные измерений были предоставлены коллективом базовой GPS-станции «SURE») НУЦ РТ кафедры ОПТ ХНУРЭ. В состав аппаратно-программного комплекса GPS-станции входят [3]:

- двухчастотная универсальная GPS/EGNOS/HP-станция (PROPAK-LB+HP-L1L2 Plus), NovAtel Inc. (Канада);
- одночастотный мобильный GPS/EGNOS навигационно-геодезический приемник Superstar II (SSII) (комплект Development Kit) – NovAtel Inc. (Канада);
- программное обеспечение обработки GPS-наблюдений (GrafNav/GrafNet), NovAtel/Waypoint Consulting (Канада).

Для измерений применялись штатные слабонаправленные антенны.

На первом этапе исследований проводилась обработка сигналов, полученных в течение суток при приеме сигналов одного ГС ИСЗ (№131 Inmarsat 3f1).

Общее число данных составляло примерно 85000, каждое из которых включало:

- 1) псевдодальность, полученную по огибающей сигнала (кодированная псевдодальность);
- 2) псевдодальность, полученную по фазе когерентной несущей частоты (фазовая псевдодальность);
- 3) радиальную скорость;
- 4) отношение сигнал/шум.

Приведенный в качестве примера на рис. 2 график зависимости псевдодальности от времени $D_{\text{SURE}}^{\text{код}}(t)$ при кодовых измерениях наглядно показывает характер перемещения ГС ИСЗ, которое получило название *нутация* [8].

Для определения параметров нутации, которые необходимы при обработке результатов в соответствии с АОО, можно применить разработанную при участии авторов модель [9].

На первом этапе была проведена статистическая обработка результатов, полученных от одного из ГС ИСЗ в пункте SURE. На втором этапе обрабатывались в соответствии с АОО наблюдения в двух пунктах при приеме сигналов двух ИСЗ. На заключительном этапе исследований был проведен учет параметров нутации ГС ИСЗ.

Для экспериментальной проверки потенциальной точности предлагаемого метода синхронизации использованы результаты приема GPS-подобных сигналов геостационарных (ГС) ИСЗ глобальной системы дифференциальных поправок СРНС GPS SBAS, состоящей из систем EGNOS (Европа), WAAS (США), MSAS (Япония). Территория Украины находится в зоне приема сигналов системы EGNOS, которая включает в свой состав несколько ГС ИСЗ

Обработка результатов измерений

Вначале была проведена статистическая обработка времени задержки

$$t_{\text{ISURE}}(t) = D_{\text{SURE}}(t) / c$$

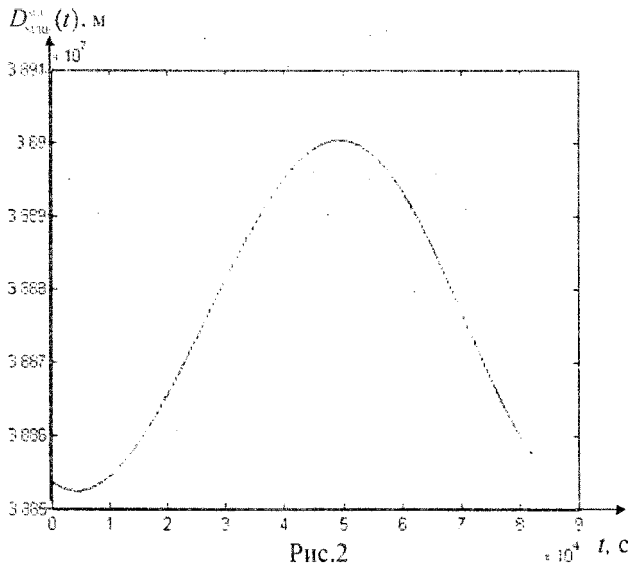
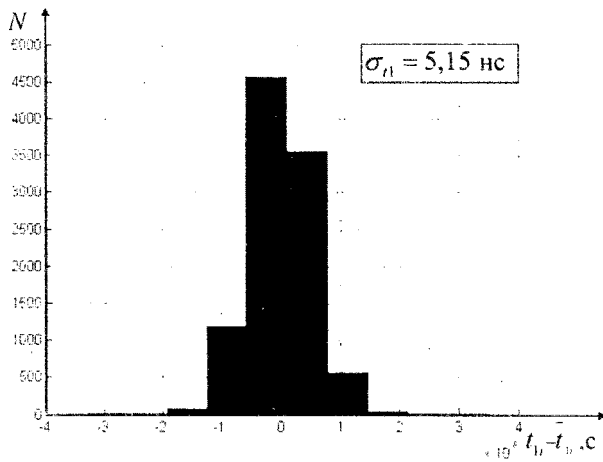


Рис.2

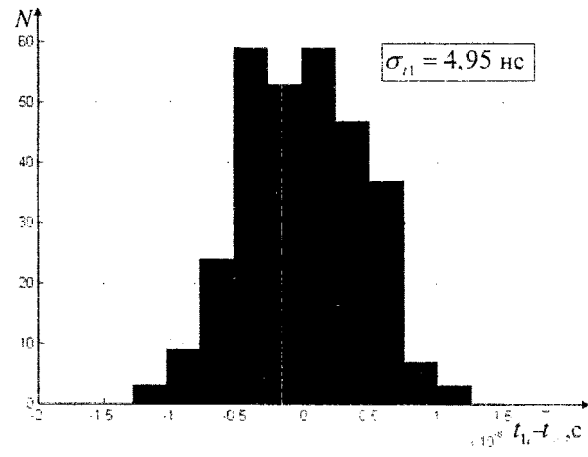
рассчитанных по наблюдениям кодовых и фазовых псевдодалейностей при приеме сигналов одного ГС ИСЗ.

Обработка выполнялась для двух интервалов – 2.7 часа и 5 мин.

Гистограммы обработанных зависимостей $t_{\text{ISURE}}(t)$ для кодовых и фазовых измерений приведены соответственно на рис. 3 и 4 (а – для интервала 2.7 часа; б – для интервала 5 мин), где указаны значения СКО σ_{t1} . Как показала обработка, СКО времени запаздывания составляет порядка единиц наносекунд при кодовых измерениях и менее наносекунды при фазовых измерениях.

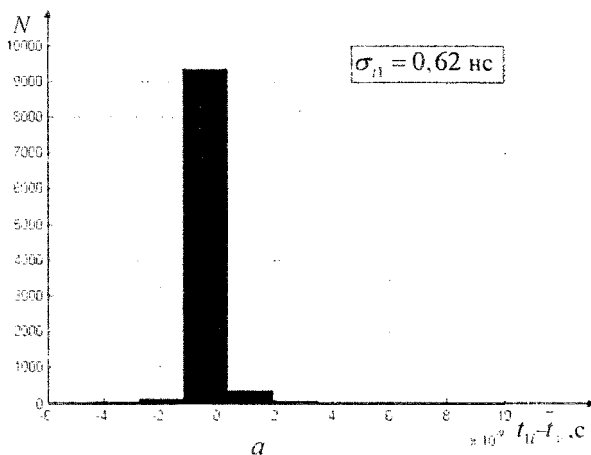


а

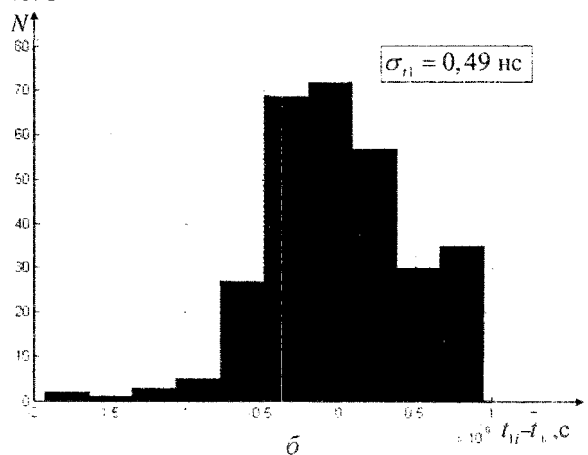


б

Рис. 3



а



б

Рис. 4

На втором этапе исследований обрабатывались результаты измерений двух GPS-приемников, первый из которых (приемник №1) был размещен в ХНУРЭ («SURE»), а второй приемник №2 – на удалении 4 км («TEST»). В течение суток осуществлялся прием сигналов двух ГС ИСЗ – № 120 Inmarsat 3f2 и № 124 ARTEMIS (см. табл. 1).

Для ГС ИСЗ № 120 Inmarsat 3f2 на рис. 5 и 6 приведены соответственно результаты кодовых и фазовых измерений псевдодальности, а на рис.7 – значения скорости (а – приемник №1, б – приемник №2).

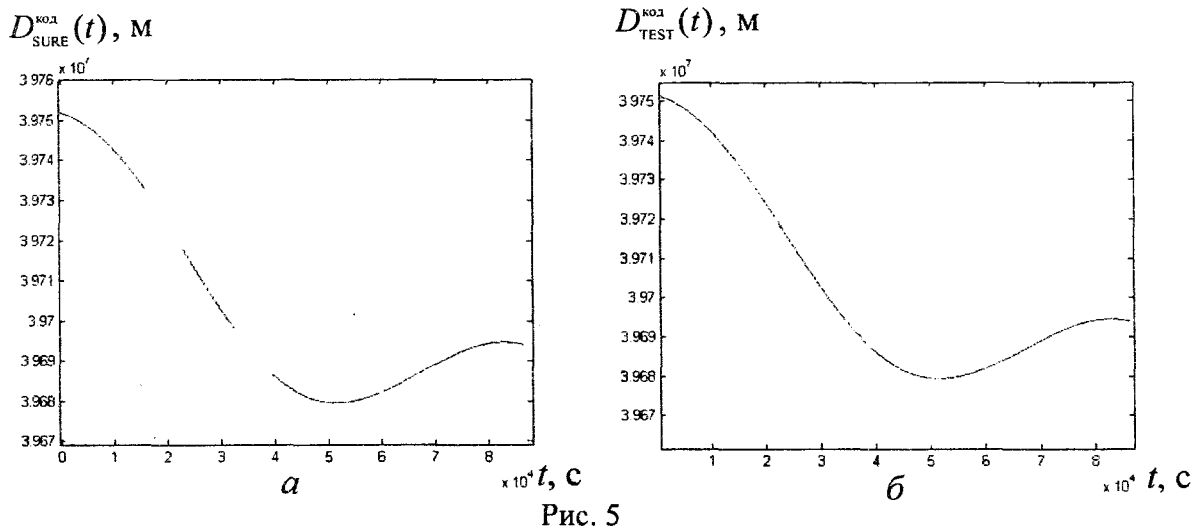


Рис. 5

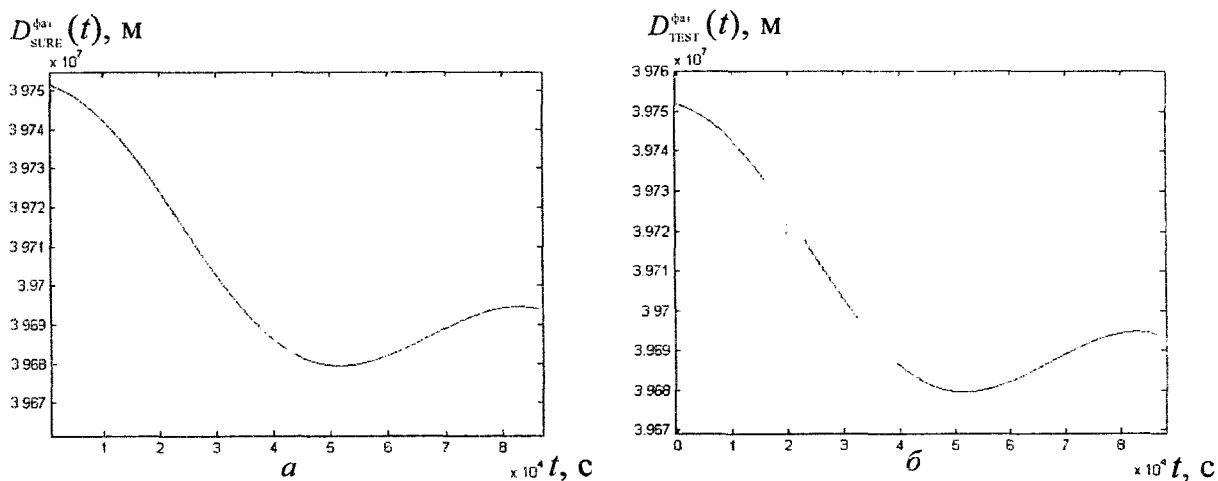


Рис. 6

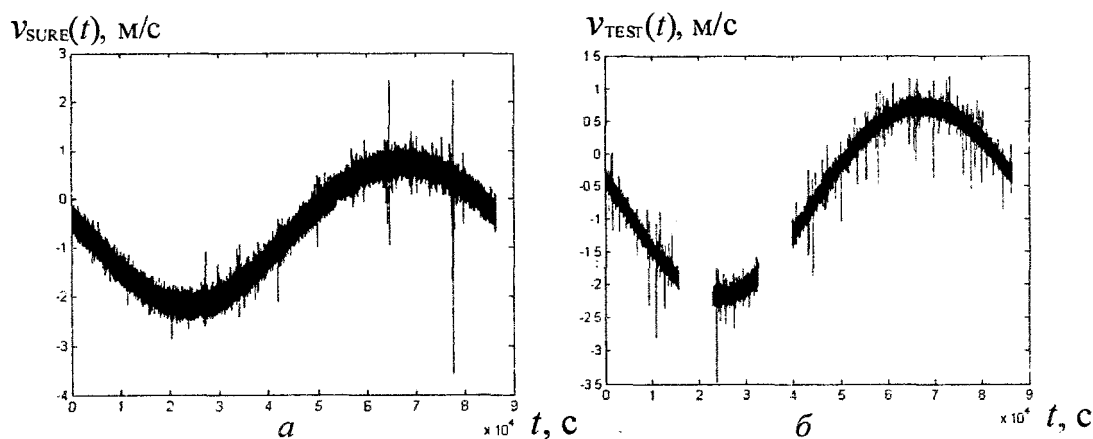


Рис. 7

Из-за имеющих место разрывов в измерениях, вызванных снижением отношения сигнал помеха, для дальнейшей обработки были выбран участок в начале суток продолжительностью ≈ 9000 с.

Графики единичных значений сдвига шкал

$$\Delta T(t) = t_{\text{ISURE}}(t) - t_{\text{ITEST}}(t),$$

вычисленных в соответствии с АОО для кодовых и фазовых измерений, приведены соответственно на рис. 8, а, б.

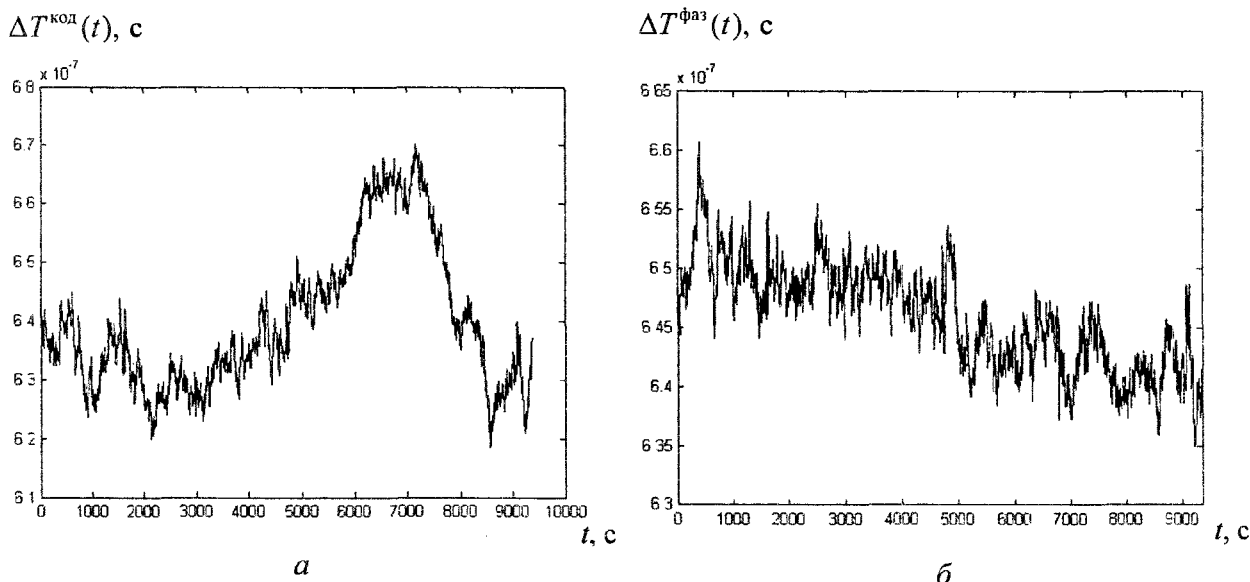


Рис. 8

Единичные измерения сдвига шкал ΔT в выбранном участке разбивались на 11 интервалов, продолжительностью 13 мин^1 (780 с) каждый. Далее для каждого i -го интервала определялись средние значения $\overline{\Delta T}_i$ и СКО σ_i .

Составляющая погрешности, обусловленная нутацией ГС ИСЗ – $\delta_{\text{нут}}(t)$, является медленно меняющейся функцией времени в пределах каждого интервала наблюдения. Также медленно изменяется и аппаратная погрешность $\delta_{\text{ап}}(t)$, поскольку она, в данном случае, вызвана подстройками внутренних шкал времени приемников. Поэтому погрешности $\delta_{\text{нут}}(t)$ и $\delta_{\text{ап}}(t)$ можно отнести к систематическим и для оценки закона изменения суммарной систематической погрешности $\delta_{\Sigma}(t) = \delta_{\text{нут}}(t) + \delta_{\text{ап}}(t)$ применить аппроксимацию $\overline{\Delta T}_i$ по методу наименьших квадратов (МНК),

Помеховая погрешность $\delta_{\text{с/п}}$ представляет собой случайный процесс с интервалом корреляции, который значительно меньше интервала наблюдения. Оценкой помеховой погрешности могут служить остатки

$$\delta_{\text{с/п}} = \overline{\Delta T}_i - \delta_{\Sigma}$$

Результаты линейной и кубической МНК-аппроксимаций значений $\overline{\Delta T}_i$ приведены на рис. 9 (кодовые измерения) и рис. 10 (фазовые измерения). СКО остатков $\delta_{\text{с/п}}$ составило для кодовых измерений порядка единиц наносекунд, а для фазовых – менее наносекунды.

¹ Продолжительность интервала выбрана совпадающей с принятой в международной методике обработки результатов измерения сдвига шкал в режиме „common view” с использованием сигналов СРНС GPS.

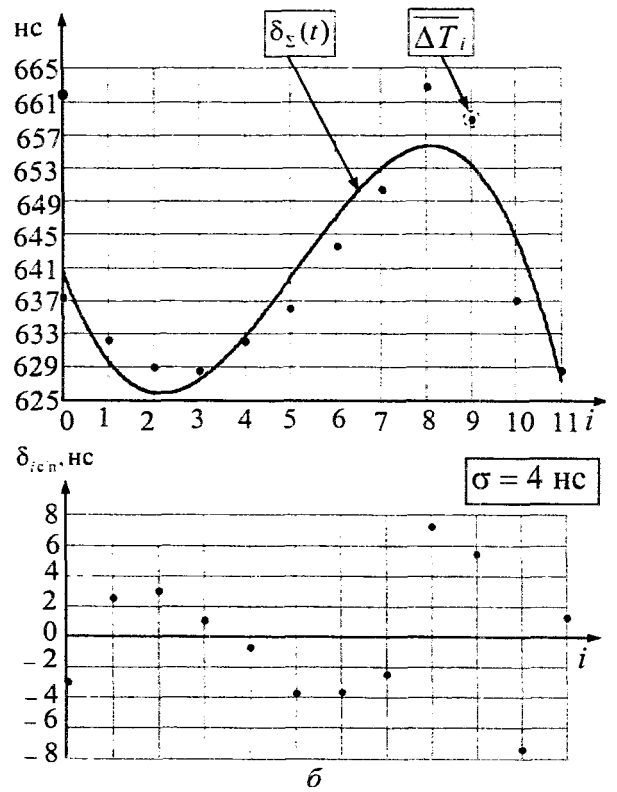
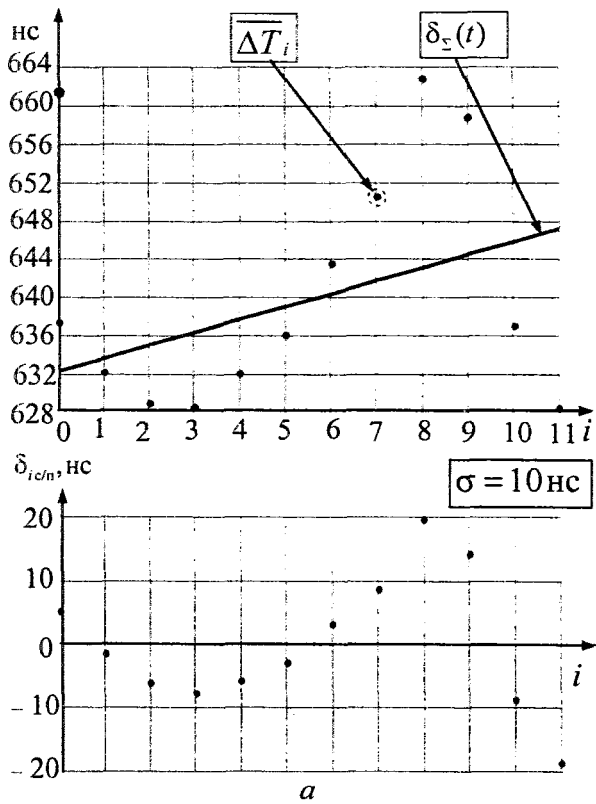


Рис. 9

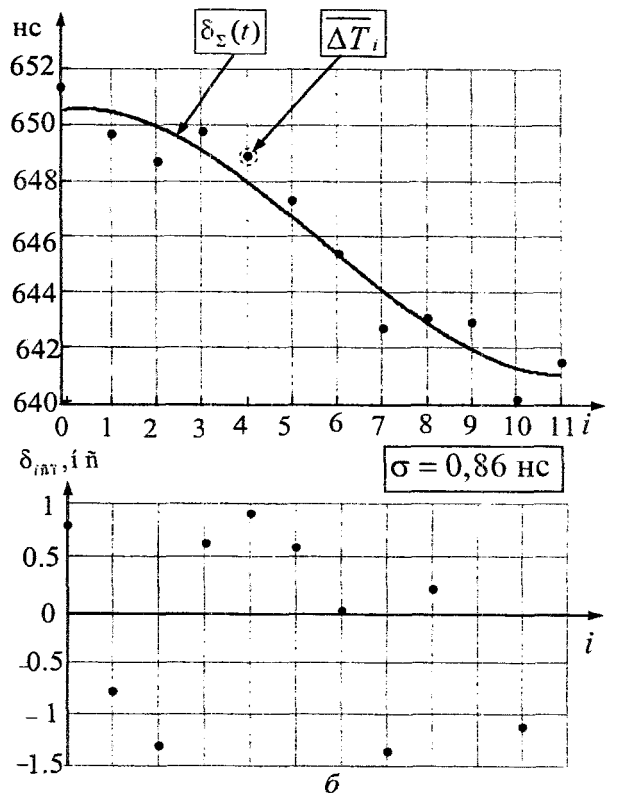
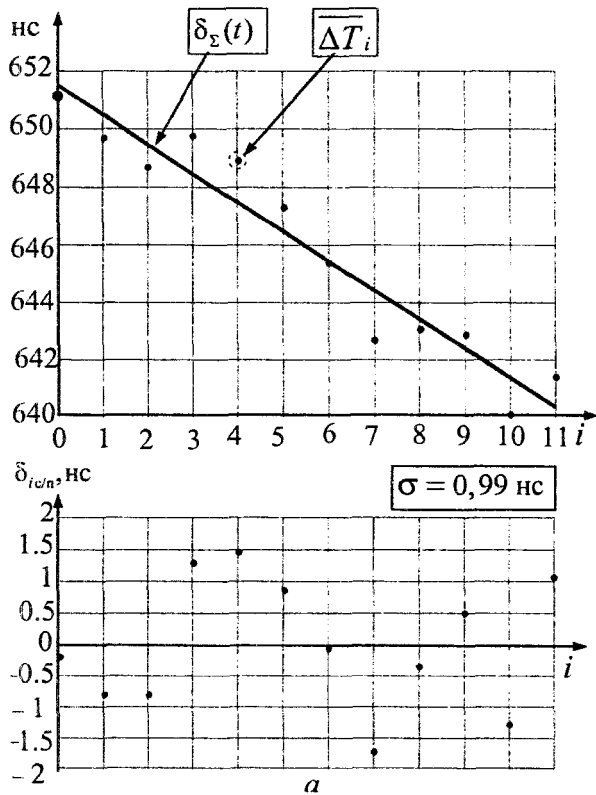


Рис. 10

На заключительном этапе исследований была проведена обработка результатов измерений с учетом параметров нутации, полученных с применением модели [9]. При этом были использованы результаты приема в тех же пунктах («SURE» и «TEST») сигналов ГС ИСЗ № 124 ARTEMIS (см. табл. 1).

Исходные результаты измерений в пунктах SURE (рис. 11) и TEST (рис. 12) содержали: кодовые (а) и фазовые (б) измерения псевдодальностей; наблюдения радиальной скорости (в); данные о соотношении сигнал/шум (г).

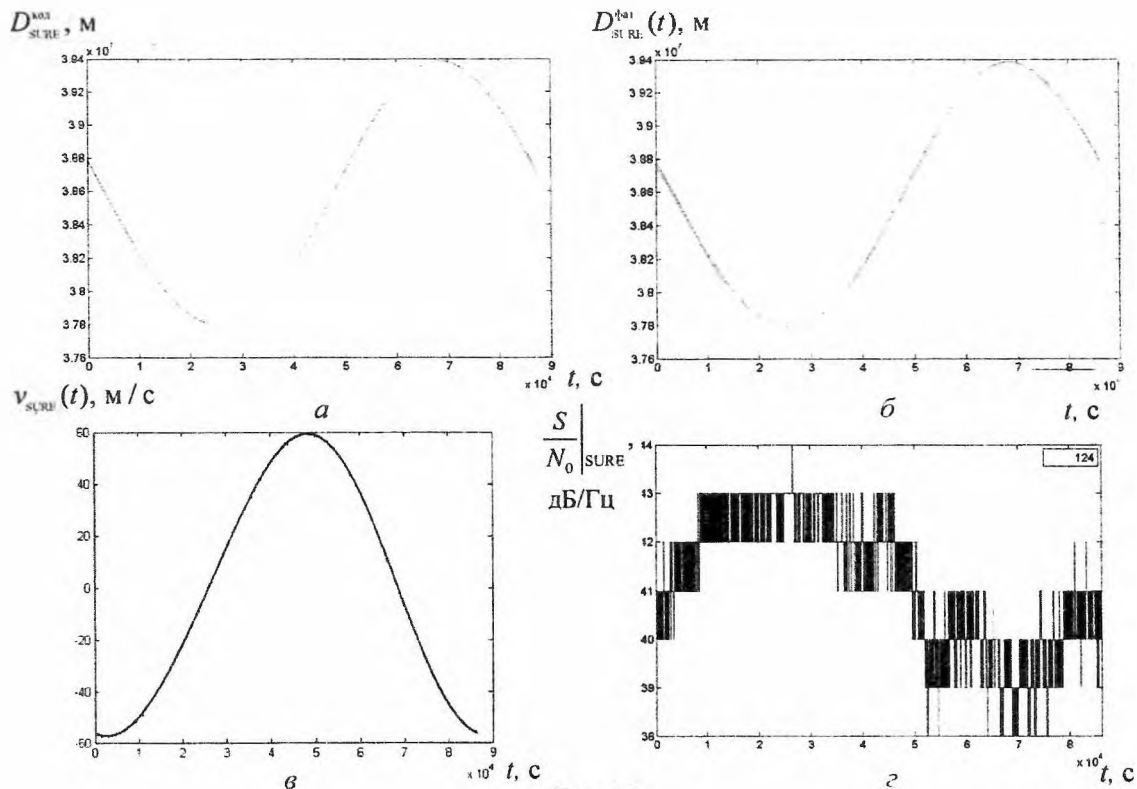


Рис. 11

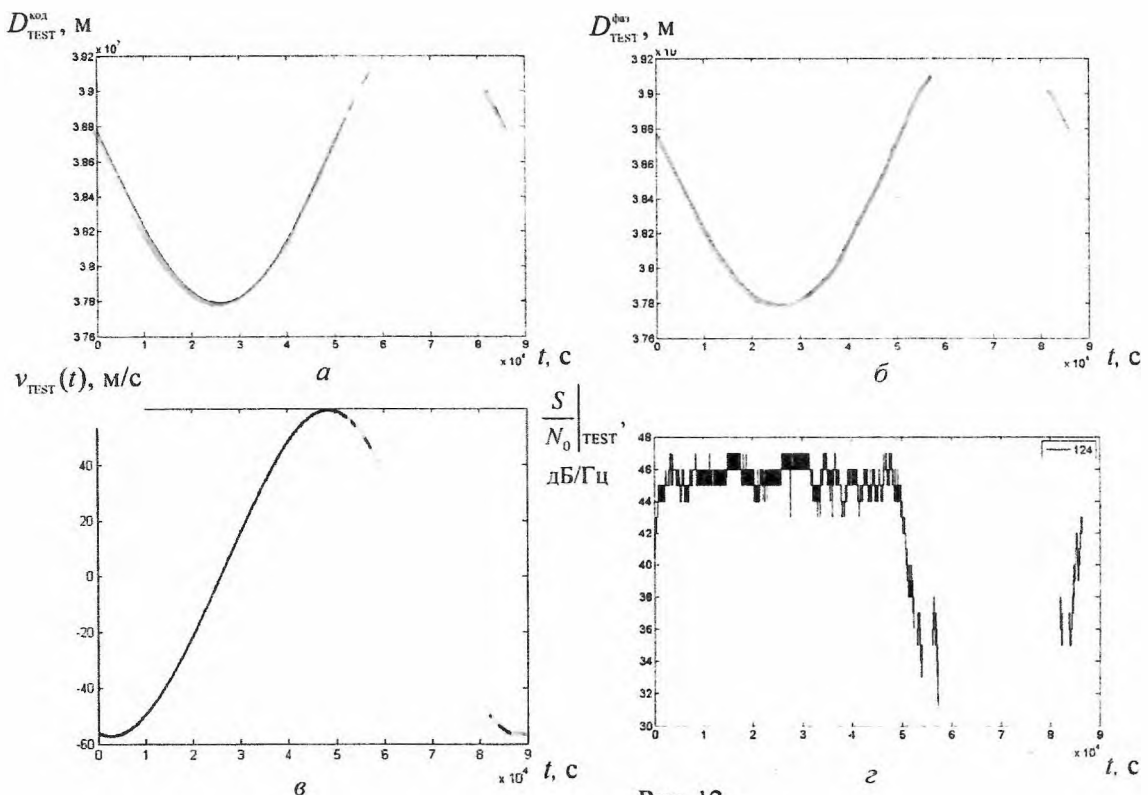


Рис. 12

На рис. 13 приведены графики разностей фазовых (а) и кодовых (б) экспериментальных наблюдений псевдодальностей.

На рис. 14 и 15 приведены модельные значения разностей псевдодальностей и скоростей между пунктами и данным ГС ИСЗ.

Анализ экспериментальных данных (см. рис. 13) позволил выбрать интервал времени для дальнейшей обработки в пределах $(0 \dots 5 \cdot 10^4)$ с.

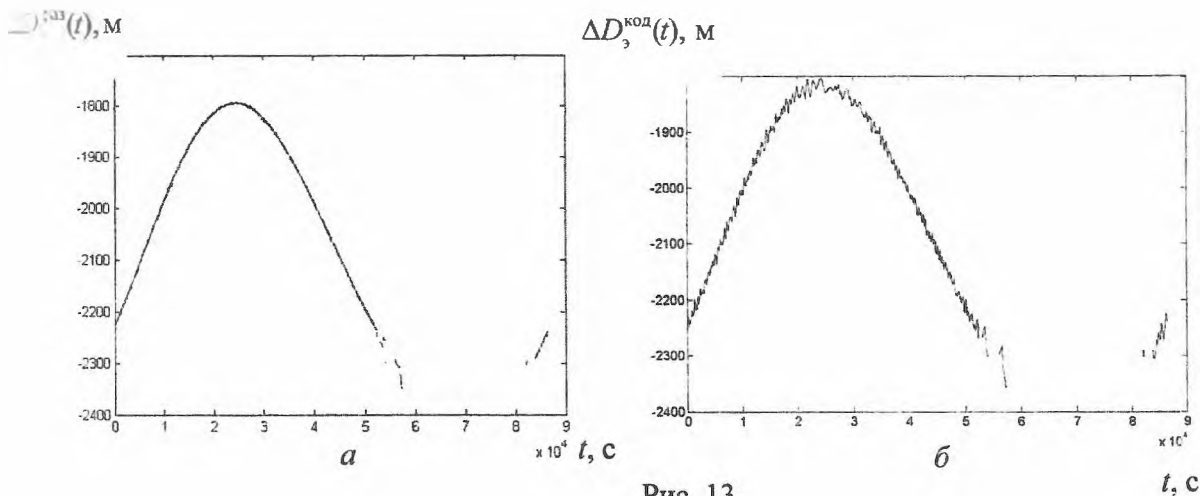


Рис. 13

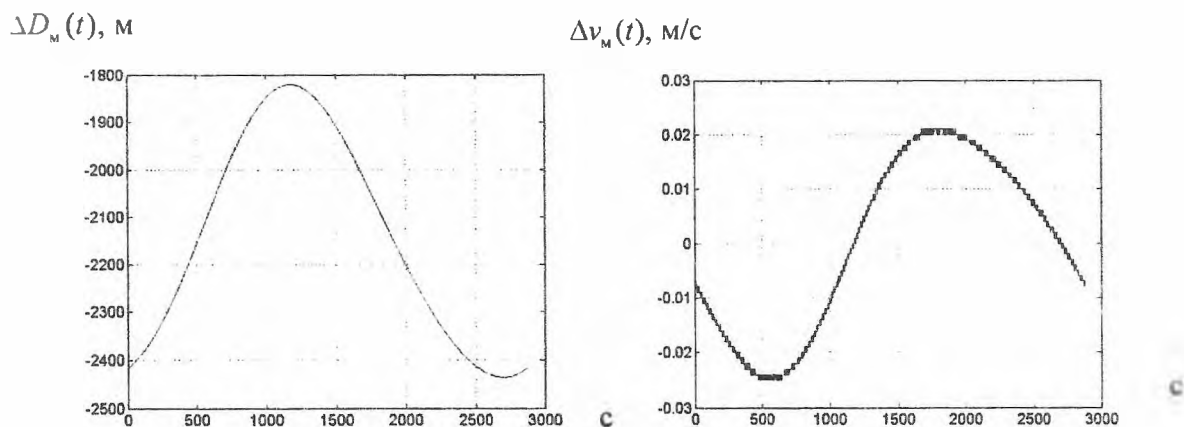


Рис. 14

Рис. 15

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

$$\Delta D_{\text{СК}}(t) = \Delta D_{\text{э}}(t) - \Delta D_{\text{м}}(t);$$

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

Графики зависимостей $\Delta D_{\text{СК}}(t)$, полученных по фазовым и кодовым измерениям, приведены соответственно на рис. 16 и 17, а рассчитанные зависимости $\Delta T_{\text{СК}}(t)$ – на рис. 18 и 19.

Статистическая обработка зависимостей $\Delta T_{\text{СК}}(t)$ (рис. 18 и 19) позволила оценить сред-

ние значения сдвига шкал $\overline{\Delta T}$ и СКО σ различных методов:

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

– по кодовым наблюдениям $\overline{\Delta T}^{\text{код}} = 25,6 \text{ нс}$, $\sigma^{\text{код}} = 22,6 \text{ нс}$.

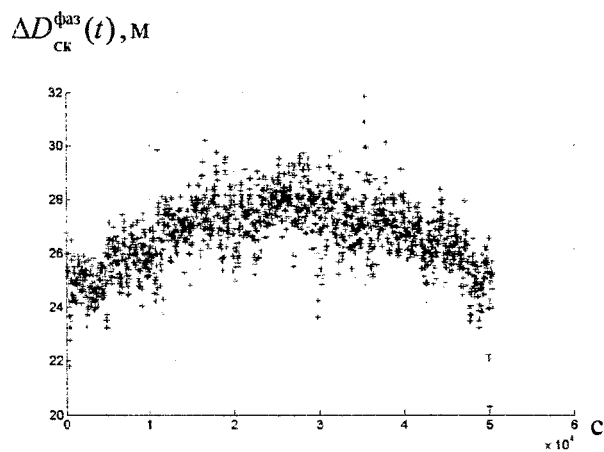


Рис. 16

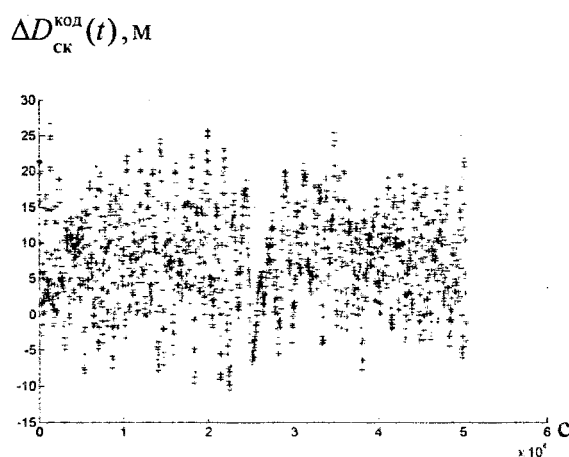


Рис. 17

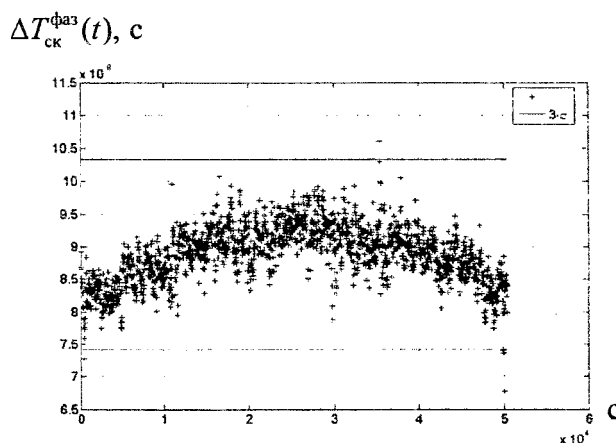


Рис. 18

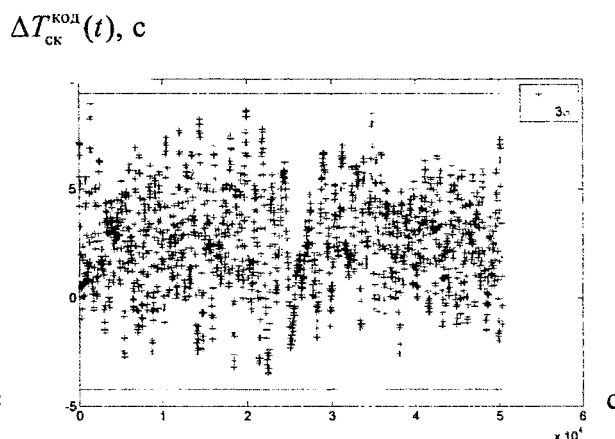


Рис. 19

Выводы

1) помеховая погрешность по оценкам СКО составляет порядка единиц наносекунд при измерениях по коду и менее наносекунды при фазовых измерениях; указанные СКО имеют место в случае ГС ИСЗ № 126 для единичных наблюдений с интервалом 1 с, а в случае ГС ИСЗ №№ 120 и 124 – с интервалом 13 мин;

2) различия в точности измерений для использованных ГС ИСЗ объясняются их азимутами (долгота г. Харькова и ГС ИСЗ № 126 практически совпадают, а ГС ИСЗ №№ 120 и 124 расположены значительно западнее);

3) разрывы в измерениях (см. рис. 6, 7, 12, 13) объясняются широкими диаграммами направленности штатных антенн, в два раза большей высотой ГС ИСЗ ($\approx 4 \cdot 10^4$ км) по сравнению с орбитальными ИСЗ СРНС ($\approx 2 \cdot 10^4$ км) и наличием помех;

4) увеличение погрешностей при учете модельных параметров нутации ГС ИСЗ (до единиц наносекунд при фазовых и десятка наносекунд при кодовых измерениях) приводит к необходимости, кроме совершенствования модели нутации, дополнительной калибровки параметров нутации экспериментальными методами, например с применением радиометеорной аппаратуры синхронизации [10, 11];

5) помеховая погрешность сличения с применением сигналов ГС ИСЗ SBAS может быть существенно снижена, а помехозащищенность и надежность приема сигналов значительно повышены с использованием направленных антенн (рис. 20).

При дальнейших исследованиях целесообразно синхронизировать GPS-приемники стандартами времени и частоты, а также использовать направленные антенны.

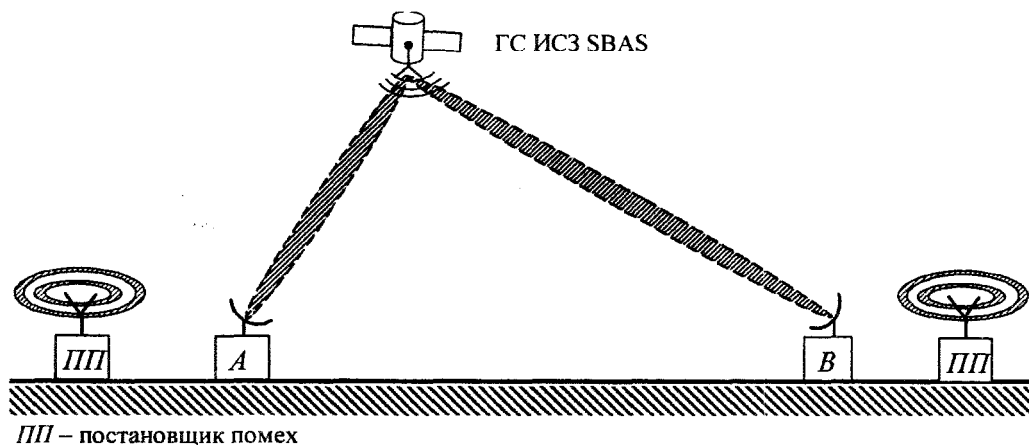


Рис.20

Список литературы: 1. *Финкельштейн А. М.* Фундаментальное координатно-временное обеспечение Вестник Российской Академии наук. – 2007. Т. 77, М 7. – С. 608-617. 2. *Програма розвитку державної служби єдиного часу і еталонних частот* : зб. наук. праць за матеріалами VI міжнар. наук.-техн. конференції, 14-16 жовтня 2008 р. / Держ. комітет України з питань техн. регулюв. та споживч. політики, Націон. наук. Центр «Інститут метрології» [та ін.]. – Х. : ХФ ДП «УкрНДНЦ», 2008. – 350 с. 3. *Шокало В. М., Жалило А., А., Коваль Ю. А. и др.* Применение спутниковой навигации в научных исследованиях и учебном процессе кафедры ОРТ // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2006. – Вып. 146. – С.55-65. 4. *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. ун-т радіоелектроніки. – № u2008/9468, подано 21.07.2008; опубл. 25.12.2008. Бюл. № 24.5. *Коваль Ю.А., Костыря А.А., Обельченко В.В., Иванова Е.А. и др.* Анализ возможностей метода общего охвата для высокоточной синхронизации стандартов времени и частоты в пределах прямой видимости // Радиотехника. Информатика. Управление.- 2009. – Вып. 1(20). – С.21-30. 6. *Ткачук А.А., Коваль Ю.А., Иванова Е.А., Шелковенков Д.А.* Возможности повышения точности и помехозащищенности сравнения эталонов времени за счет использования GPS-подобных сигналов геостационарных ИСЗ дифференциальных систем SBAS // VII междунар. науч.-техн. конф. «МЕТРОЛОГИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА» («МИИТ-2010»). – С.144-147. 7. *Коваль Ю.А., Иванова Е.А., Костыря А.А., Ал – Твежри Б.А.* Моделирование систем частотно-временной синхронизации, использующих сигналы общих источников // Известия вузов. Радиотехника. – 2011. – №. 2. – С. – 12-20. 8. *Назаренко А.И., Скребушевский Б. С.* Эволюция и устойчивость спутниковых систем. – М. : Машиностроение, 1981. – 286 с. 9. *Ю.А. Коваль, Е.А. Иванова, А.А. Костыря 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. 10. *Кашеев Б. Л.* Метеоры сегодня / Кашеев Б. Л., Коваль Ю. О., Горбач В. И., Бондарь Б. Г. – К. : Техніка, 1996. – 196 с. 11. *Антипов И. Е.* Развитие теории и совершенствование радиометеорных систем связи и синхронизации. / Антипов И. Е., Коваль Ю. А., Обельченко В. В. – Харьков : Коллегиум, 2006. – 308с.

Харьковский национальный
университет радиотехники

Поступила в редколлегию 15.03.2011