

УДК 621.396

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПСЕВДОДАЛЬНОСТЕЙ В АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ С ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

В. Н. Тяпкин¹, Ю. Л. Фатеев², Т. Г. Шарфунова³, А. С. Курносов², П. В. Штро²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: tyapkin58@mail.ru

²Сибирский федеральный университет, Институт инженерной физики и радиоэлектроники Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 28

³ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52.

Уменьшение погрешности измерений псевдодальности – одна из основных задач, решаемых в высокоточной аппаратуре, работающей по сигналам ГНСС. В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований современной высокоточной аппаратуры ГНСС, определены основные источники погрешности измерений псевдодальности. Показано, что современные методы обработки сигналов НКА в навигационной аппаратуре позволили уменьшить случайную погрешность измерения псевдодальности до единиц сантиметров при измерении по открытым сигналам ГНСС. Совершенствование эфемеридно-временного обеспечения ГНСС, успехи в компенсации ионосферной и тропосферной погрешности вывели на первый план такие составляющие погрешности как погрешность многолучевого приема и систематическая погрешность в аналоговых трактах приемной аппаратуры.

Рассмотрены методы уменьшения погрешности многолучевости для некоторых применений высокоточной НАП и варианты калибровки систематической погрешности НАП.

Ключевые слова: спутниковая навигация, погрешность измерения, псевдодальность, фильтрация, ионосфера, коррекция, эксперимент, синхронизация.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF PSEUDORANGES MEASUREMENT ERRORS IN NAVIGATION RECEIVER WITH PHASED ARRAY

V. N. Tyapkin¹, Yu. L. Fateev¹, T. G. Sharfunova², A. S. Kurnosov¹, P. V. Shtro¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev 31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: tyapkin58@mail.ru

²Siberian Federal University, Institute of Engineering Physics and Radioelectronics 28 Kirenskiy str., Krasnoyarsk, 660074. Russia

³JSC “Information Satellite Systems” named after academician M. F. Reshetnev 52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

The main problem to be solved during the development of high-precision GNSS equipment is the reduction of the positioning error. The article describes the experimental results for high-precision navigation equipment. The experiment identified the main sources of pseudorange measurement error. Modern processing methods of satellite signals allow to reduce the pseudorange measurement random error to a few centimeters. Such errors as the ionosphere and troposphere, ephemeris error, and the error of GNSS time support may be excluded from the consideration. Therefore, the main components of positioning error are multipath error and bias error in the analog paths of the receiving equipment.

The methods of the multipath error reduction and calibration options for bias error of navigation equipment are examined.

Keywords: satellite navigation, measurement error, pseudorange, filtration, ionosphere correction experiment synchronization.

Технологии координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) успешно внедряются в различные области экономики и оборонного комплекса, при этом расширение сферы применения определяет растущие требования к точности КВНО. Федеральной целевой программой «Поддер-

жание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» предусматривается существенное повышение точности эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) навигационных космических аппаратов (НКА) ГЛОНАСС с обеспечением дециметрового уровня погрешности координат [1]. Повышенные требования к погрешности измерения кодовой и фазовой

псевдодальности предъявляются в специализированной высокоточной аппаратуре [2–6], работающей по сигналам ГНСС:

- приемная аппаратура беззапросных измерительных систем (БИС), используемых в контуре ЭВО ГЛОНАСС;
- опорные станции дифференциальной коррекции;
- станции мониторинга навигационного поля КНС;
- аппаратура частотно-временной синхронизации (АЧВС), обеспечивающая высокоточное воспроизведение эталонной ШВ и опорной частоты по сигналам ГНСС;

На современном этапе развития методов обработки сигналов НКА в навигационной аппаратуре потребителя (НАП), случайная погрешность измерения кодовой псевдодальности по открытым сигналам ГНСС уменьшена до единиц сантиметров [7; 8]. Ионосферная и тропосферная погрешности в ряде высокоточных приложений (геодезическая аппаратура, угломерная НАП, АЧВС), предусматривающих одновременный прием сигналов НКА в нескольких точках пространства и реализацию относительных измерений, в значительной мере компенсируются за счет малых пространственных градиентов данных погрешностей. Для высокоточной НАП, работающей в абсолютном режиме (БИС, АЧВС), компенсация ионосферной погрешности обеспечивается с использованием измерений сигналов НКА в нескольких частотных диапазонах, а также при реализации одночастотных подходов к определению ионосферной погрешности [9–11]. Эффективное уменьшение тропосферной погрешности для этих приложений обеспечивается с применением измерителей метеопараметров, включая радиометры водяного пара, а также при использовании «слепых» моделей тропосферной задержки.

В качестве иллюстрации достигнутого на сегодняшний день уровня погрешности кодовых и фазовых измерений можно привести экспериментальные результаты, полученные на макете высокоточной БИС нового поколения выполненной на основе цифровой антенной решетки.

Структура макета цифровой антенной решетки (МЦАР) приведена на рис. 1. Аналоговая часть МЦАР состоит из 8-ми антенных модулей с подключенными к ним радиотрактами. Сигналы с радиотрактов поступают на АЦП, и далее на цифровую часть макета.

Цифровая часть содержит 12 независимых каналов обработки сигналов L1, L2, ГЛОНАСС. Каждый канал состоит из диаграммообразующей схемы (ДОС) и цифрового канала обработки сигналов.

Диаграммообразующая схема представляет собой весовой сумматор сигналов, поступающих с 8-ми аналоговых трактов. Весовые коэффициенты K1...K8 задаются из вычислителя и формируются исходя из заданной диаграммы направленности. В частности, в режиме высокоточных измерений весовые коэффициенты подбираются так, чтобы скомпенсировать разность хода полезного сигнала между антеннами, т. е. на сумматор полезные сигналы поступают с одной фазой.

Для оценки случайной составляющей погрешности измерений МЦАР по навигационным сигналам НКА использовались разностные методы, в которых оценка случайной погрешности определяется по разности параметров, измеренных на два независимых однотипных устройства, которые синхронизированы от одного стандарта частоты и времени.

ДОС можно сконфигурировать так, чтобы в отдельном канале обработки данных использовалась только часть антенн, для этого нужно для неиспользуемых антенн установить весовые коэффициенты, равные нулю. В частности, можно сделать так, чтобы каждый канал цифровой обработки принимал сигналы с разных антенн, и таким образом получить до 8-ми полностью независимых приемных трактов. При этом эти приемные тракты полностью синхронизированы, поскольку работают от единого синтезатора опорных сигналов.

Аналогично, можно создать независимые приемные тракты, которые работают с отдельными антенными решетками, состоящими из 2-х или 4-х антенн. Оценка случайной составляющей погрешности измерений проводится по реальным сигналам НКА. Для оценки СКО случайной составляющей погрешности кодовых измерений формируются выборки между разностями одномоментных одночастотных кодовых измерений МЦАР для каждого диапазона частотного интервала не менее 30 минут:

$$\Delta S_i^j = S_{i1}^j - S_{i2}^j \quad (1)$$

где i – номер измерения, j – номер НКА, S – измеренный навигационный параметр.

Случайная составляющая погрешности измерений

$$\sigma^j = \sqrt{\frac{1}{N_j - 1} \sum_{i=1}^{N_j} (\Delta S_i^j - \overline{\Delta S^j})^2}, \quad (2)$$

где $\overline{\Delta S^j}$ – среднее арифметическое параметра (1); N_j – количество измерений в сеансе для j -го НКА.

Эксперимент по сравнению псевдодальностей, измеренных по сигналам с различных элементов антенной решетки. Эксперимент проводился 4–5 марта 2013 г. В нулевой канал приемника подавался суммарный сигнал со всех элементов антенной решетки, с формированием луча в направлении на космический аппарат. Каналы приемника № 1 – № 8 были подключены каждый к одному из элементов антенной решетки А0–А7, соответственно. Все каналы приемника были настроены на прием сигнала ГЛОНАСС с литерой –3.

Конфигурация антенной системы приведена на рис. 2. Траектория космического аппарата в системе координат азимут-угол места приведена на рис. 3.

На рис. 4 и 5 приведена разность фазовых и кодовых псевдодальностей, полученных по сигналам с антенн А2 и А1, усредненная на интервале 30 секунд и угол места НКА. Разность псевдодальностей приведена с учетом компенсации разности хода.

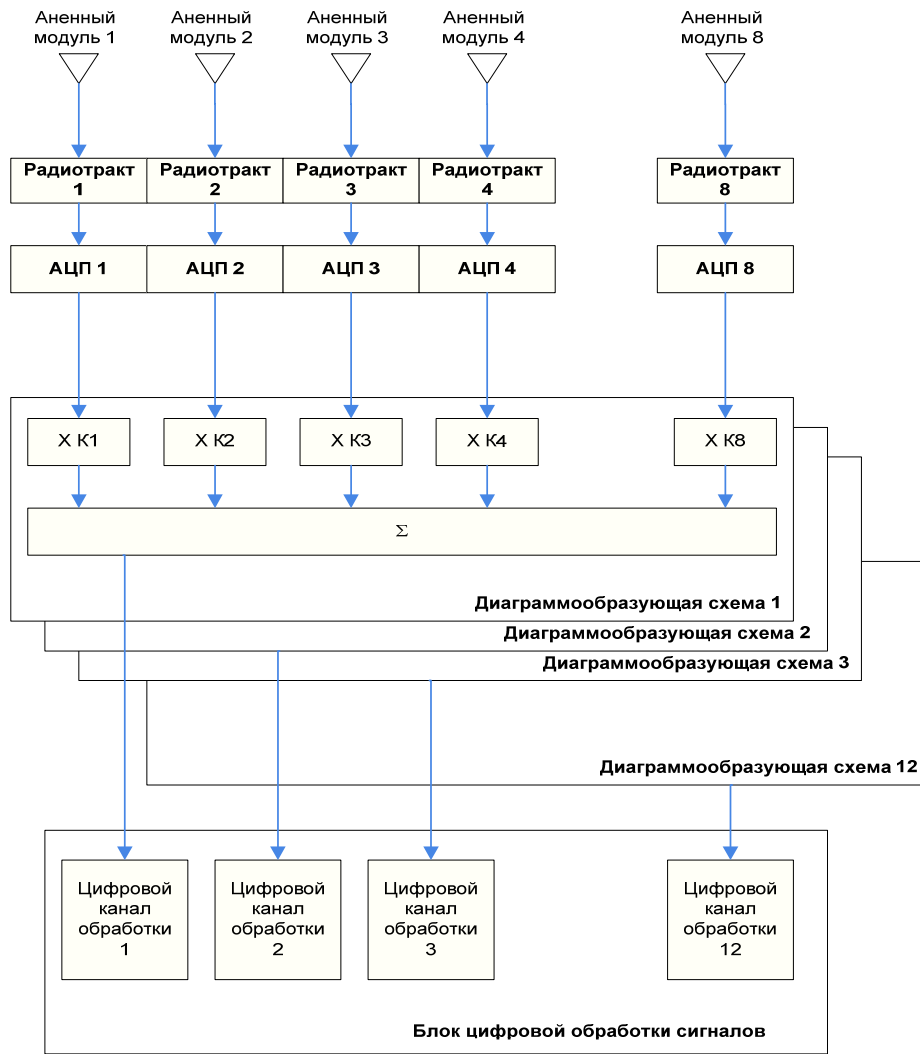


Рис. 1. Структурная схема навигационного приемника МЦАР

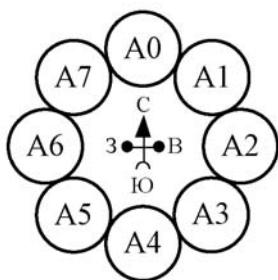


Рис. 2. Конфигурация антенной системы

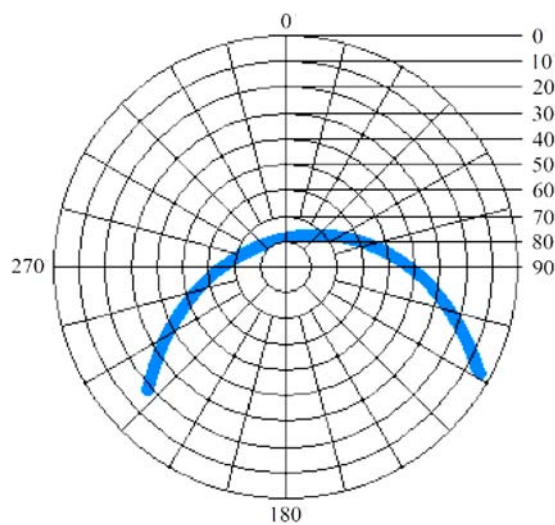


Рис. 3. Траектория космического аппарата в системе координат азимут-угол места

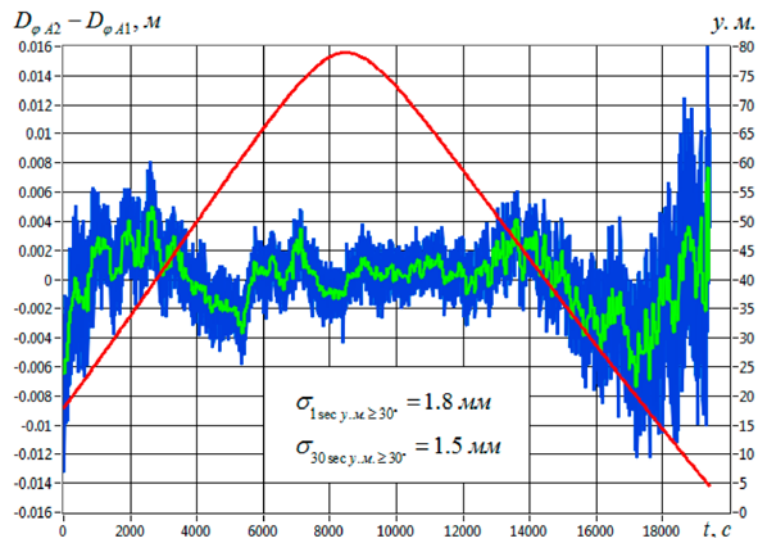


Рис. 4. Разность фазовых псевдодальностей, измеренных по сигналам с антенн А2 и А1:
 ■ – полученная по сигналам с антенн А2 и А1; ■ – усредненная на интервале 30 с; — – угол места НКА

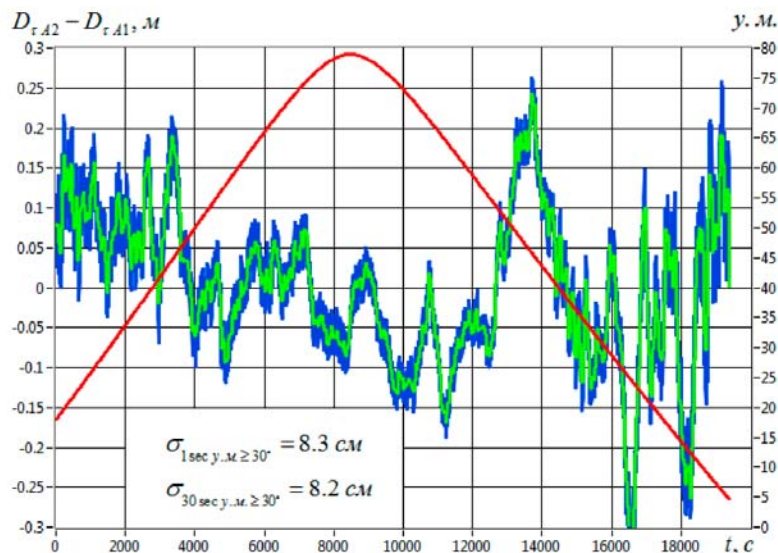


Рис. 5. Разность кодовых псевдодальностей, измеренных по сигналам с антенн А2 и А1:
 ■ – полученная по сигналам с антенн А2 и А1; ■ – усредненная на интервале 30 с; — – угол места НКА

Таким образом на полном пролете СКО разности фазовых псевдодальностей двух полукомплектов работающих на отдельные антенны составило 4 мм. Погрешность фазовой псевдодальности одного полукомплекта будет в $\sqrt{2}$ раз меньше и составит 2,8 мм.

Разности кодовых псевдодальностей двух полукомплектов работающих на отдельные антенны составило 10 см. Погрешность фазовой псевдодальности одного полукомплекта будет в $\sqrt{2}$ раз меньше и составит 7,07 см.

Аналогично были проведены эксперименты в режиме измерений по антенным решеткам, состоящей из двух антенн и четырех антенн.

Кроме того были получены результаты измерений между двумя полукомплектами штатной БИС выпус-

каемой серийно МРК-33М. Все результаты испытаний сведены в таблицу.

Эксперимент по определению погрешности многолучевости. Устранение ошибок многолучевости для любых задержек обеспечивается использованием оптимальных алгоритмов, основанных на пространственно-временных различиях основного и отраженного сигналов. В целом, проблема многолучевости стоит весьма остро, ее решению посвящается большое число проводимых в настоящее время исследований.

Постановка задачи эксперимента. В аппаратуре измеряется псевдодальность, измеренная по коду и фазе несущей частоты. Многолучевой прием оказывает различное влияние на кодовые и фазовые измере-

ния – погрешность фазовой псевдодальности, вызванная многолучевостью, намного меньше погрешности кодовой псевдодальности. Поскольку сама псевдодальность одна и та же для кодовых и фазовых измерений, то разность кодовой и фазовой псевдодальности будет отражать погрешность многолучевости кодовых измерений.

Погрешности измерения псевдодальностей

Вариант полуккомплекта антенной решетки	Погрешность измерения псевдодальности, мм	
	ПСВД	Фаза
Одиночные антенны	70,7	2,8
Антенная решетка с двумя антеннами	99,0	1,1
Антенная решетка с четырьмя антеннами	84,0	0,84
Полуккомплекты МРК-33	224,6	9,5

В то же время нужно учесть, что фазовая псевдодальность измеряется с точностью до постоянной величины, обусловленной неоднозначностью фазовых измерений в начальный момент времени. Кроме того, ионосферная погрешность для кодовых и фазовых измерений равна по величине и противоположна по знаку. Для устранения ионосферной погрешности используются двухчастотные измерения, а для устранения фазовой неоднозначности – рассматривается приращение разности кодовой и фазовой псевдодальностей.

Задачей эксперимента является сравнение параметра определяемого выражением (3) рассчитанного по ИТНП измеренных аппаратурой МРК-33М и макетом цифровой антенной решетки приемника МРК-37 с 4-х элементной антенной системой в режиме формирования лучей

$$Z(CT) = \left[C1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot (C2 - C1) \right] - \left[L1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot (L2 - L1) \right]. \quad (3)$$

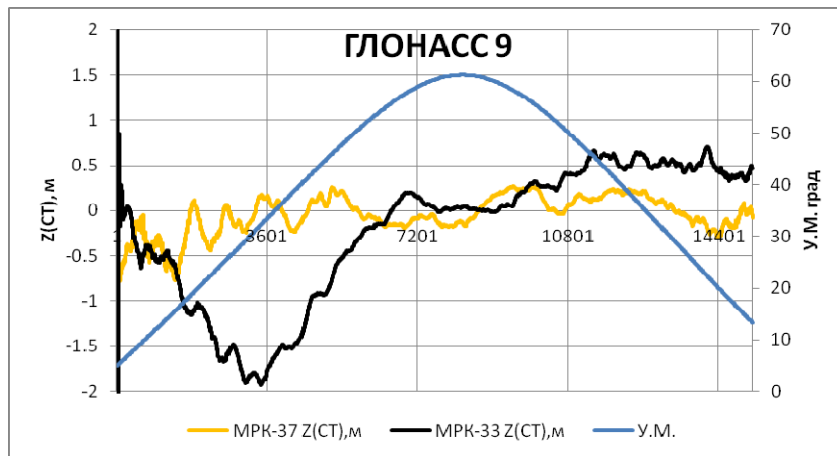


Рис. 7. Параметр Z(CT) для НКА ГЛОНАСС № 9

В выражении (3): C1 и C2, кодовые псевдодальности измеренные на частотах f1 и f2 по коду стандартной точности, единицы измерения метры, L1 и L2, фазовые псевдодальности измеренные на частотах f1 и f2, единицы измерения метры.

Измерения проводились в период с 16:06 12.11.2012 по 06:00 13.11.2012 (МДВ) в Сибирском федеральном университете. На рис. 6 приведена схема включения.

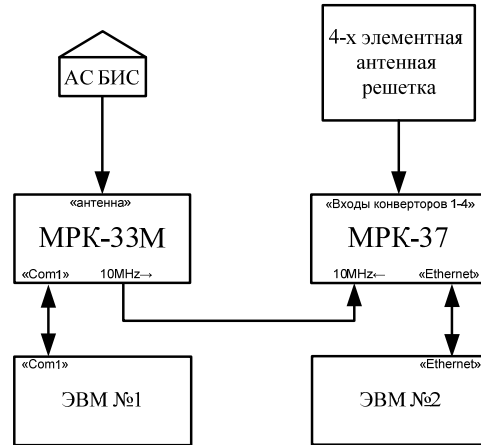


Рис. 6. Схема включений при проведении эксперимента

На рис. 7 представлены экспериментальные результаты для НКА ГЛОНАСС с совпадающей гринвичской долготой в период наблюдения.

Сравнение результатов расчета параметра Z по формуле (3) на основе ИТНП, полученных аппаратурой МРК-33М и МЦАР показывает существенно более лучшие точностные характеристики аппаратуры МЦАР.

Таким образом, полученные на МЦАР экспериментальные данные позволяют сделать выводы о необходимости применения в новых комплектах БИС антенных решеток, которые позволят наряду с повышением помехоустойчивости обеспечить требования, предъявляемые к новому поколению БИС.

Библиографические ссылки

1. Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 гг. : Федеральная целевая программа : [утв. постановлением Правительства РФ № 189 от 03.03.2012]. М., 2012.
2. Создание сети БИС для эфемеридно-временного обеспечения системы «ГЛОНАСС» / В. А. Бартенев, А. В. Гребенников, А. К. Гречкосеев и др. // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека : сб. тезисов Всерос. науч.-техн. конф. Железнодорожск, 2007.
3. Жуков А. Н., Пасынков В. В., Титов Е. В. Достижение конкурентоспособного уровня эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека : сб. тезисов 2-й Междунар. науч.-техн. конф. Железнодорожск, 10–14 октября 2012 г. 195 с.
4. Сушкин И. Н. Применение ГНСС ГЛОНАСС и GPS для оценки электронной концентрации в ионосферном слое F для предсказания и регистрации землетрясений // Известия вузов. Физика. 2008. Т. 51, № 9/3. С. 214–217.
5. Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС : монография. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. 260 с.
6. Калибровка измерительного тракта для испытания навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем / В. Н. Тяпкин, Ю. Л. Фатеев, Д. Д. Дмитриев, В. Г. Коннов // Вестник СибГАУ. 2012. № 4 (44). С. 139–142.
7. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. 4-е изд., перераб. / под ред. А. И. Перов, В. Н. Харисов. М. : Радиотехника, 2010.
8. Гребенников А. В. Совместная фильтрация кодовых и фазовых измерений в высокоточной аппаратуре радионавигации // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 118–128.
9. Казанцев М. Ю., Фатеев Ю. Л. Определение ионосферной составляющей погрешности измерения псевдодальности в одночастотной аппаратуре систем ГЛОНАСС и GPS // Журнал радиоэлектроники : электронный журнал 2002, № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec02/index.html>.
10. Казанцев М. Ю. Уменьшение погрешности навигационных измерений в одночастотной аппаратуре потребителя систем ГЛОНАСС и GPS за счет учета влияния ионосферы : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.04 : Красноярск, 2003. 150 с. РГБ ОД, 61:04-5/3721
11. Пат. №2313103 Российская Федерация. Способ одночастотного определения задержки сигналов навигационной спутниковой системы в ионосфере / Сушкин И. Н.; опубл. 20.12.2007 Бюл. № 35.

References

1. *Podderzhanie, razvitie i ispol'zovanie sistemy GLONASS na 2012–2020 gody : Federal'naya tselevaya programma: [utv. postanovleniem Pravitel'stva RF № 189 ot 03.03.2012]* (Maintain, develop and use the GLONASS system for 2012-2020 : Federal program [ratified. Government Decree № 189 of 03.03.2012]) Moscow, 2012.
2. Bartenev V. A., Grebennikov A. V., Grechkoseev A. K. et al. *Sb. tezisov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Navigatsionnye sputnikovye sistemy, ikh rol' i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka"*. (Navigation satellite systems, their role and importance in the life of modern man. Mon. Abstracts of All-Russian. scientific and engineering conf.). Zheleznogorsk. 2007.
3. Zhukov A. N., Pasyнков V. V., Titov E. V. *Sb. tezisov 2-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Navigatsionnye sputnikovye sistemy, ikh rol' i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka"* (Navigation satellite systems, their role and importance in the life of modern man. Mon. theses of the 2nd Int. scientific and engineering conf.). 10–14 oct. 2012, Zheleznogorsk, 195 p.
4. Sushkin I. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2008, 51 (9/3), p. 214–217.
5. Tyapkin V. N., Garin E. N. *Metody opredeleniya navigatsionnykh parametrov podvizhnykh sredstv s ispol'zovaniem sputnikovoy radionavigatsionnoy sistemy GLONASS* (Methods of navigation parameters of the mobiles using the GLONASS satellite navigation system). Krasnoyarsk, Sib. feder. un-t, 2012. 260 p. ISBN 978-5-7638-2639-.
6. Tyapkin V. N., Fateev Yu. L., Dmitriev D. D., Konnov V. G. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 4 (44), p. 139–142.
7. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. The principles of construction and operation). Moscow, Radiotekhnika, 2010.
8. Grebennikov A. V. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 2012, № 9, p. 118–128.
9. Kazantsev M. Yu., Fateev Yu. L. *Zhurnal radioelektroniki*, 2002, № 12, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/dec02/index.html>.
10. Kazantsev M. Yu. *Umen'shenie pogreshnosti navigatsionnykh izmereniy v odnochastotnoy apparature potrebitelya sistem GLONASS i GPS za schet ucheta vliyaniya ionosfery. Dis. kand. tekhn. nauk : 05.12.04* (Reducing uncertainty navigation measurements in a single frequency consumer equipment GLONASS and GPS systems by taking into account the influence of the ionosphere. Dis. ... candidate tehn. sciences: 05.12.04). Krasnoyarsk, 2003, 150 p. RGB OD, 61:04-5/3721
11. Sushkin I. N. *Sposob odnochastotnogo opredeleniya zaderzhki signalov navigatsionnoy sputnikovoy sistemy v ionosfere* (Pat. Number 2313103 Russian Federation . Method of determining the single-frequency signals delay satellite navigation system in the ionosphere), publ. 20.12.2007, Bull. Number 35.