

М.Д. МАКСИМЕНКО, О.И. САУТА, А.Ф. КРЯЧКО,  
Ю.С. ЮРЧЕНКО, А.И. СОКОЛОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИСПЕРСИЙ ОШИБОК МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ ПОСАДКИ

---

*Максименко М.Д., Саута О.И., Крячко А.Ф., Юрченко Ю.С., Соколов А.И.* **Исследование методов измерения и прогнозирования дисперсий ошибок многолучевого распространения в системе инструментальной спутниковой посадки.**

**Аннотация.** Приведены результаты исследования ошибок многолучевого распространения сигналов систем GPS и ГЛОНАСС при использовании стандартного кодо-фазового фильтра. Выполнена оценка влияния комплексной фильтрации на величину ошибки многолучевого распространения. Разработаны алгоритмы определения положения области помех, создающих опасные отражения.

**Ключевые слова:** система инструментальной спутниковой посадки, многолучевое распространение сигналов.

*Maximenko M.D., Sauta O.I., Kryachko A.F., Yurchenko Yr.S., Sokolov A.I.* **The research on measurement and prediction methods of multipath error dispersion in instrumental satellite landing system.**

**Abstract.** The results of research of multipath GPS and GLONASS signal propagation errors while using the standard code-phase filter are provided. An estimate of complex filtering influence on multipath error is performed. The algorithms for detection of interference area with dangerous reflections are designed.

**Key words:** satellite landing system, multipath error.

---

**1. Введение.** Требования к системе инструментальной спутниковой посадки [1] предполагают использование комплексного кодо-фазового фильтра для сглаживания шумовой составляющей кодовых измерений и ошибок многолучевого распространения (МЛР). Этот фильтр по отношению к кодовым измерениям является фильтром нижних частот с постоянной времени 100 сек. Для оценки влияния комплексной фильтрации исследуем спектр ошибок МЛР.

**2. Общие сведения о переотражениях.** На рис.1а изображен общий случай, когда на антенну приемника потребителя действует смесь прямого и отраженных сигналов. Исследование спектра отраженных сигналов показывает, что существует зависимость разности доплеровских частот прямого и отраженного сигналов от расстояния между антенной потребителя П и отражателями О [2]. По этой причине ошибка МЛР имеет периодический характер, и ее частота зависит от расстояния до отражателя.

Область поверхности, создающей отражения при работе наземного приемника, определяется длительностью элементарного символа кода навигационного сигнала (рис. 1б). В канале стандартной

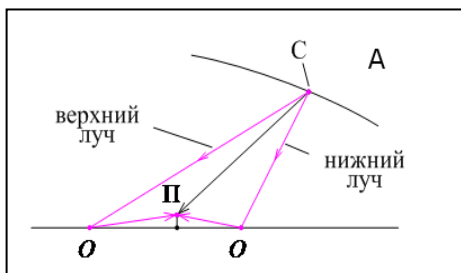


Рис.1 а. Виды отраженных сигналов.

точности системы ГЛОНАСС длительность символа вдвое выше, чем в GPS, поэтому площадь отражающей поверхности для ГЛОНАСС существенно больше. Рис. 1б соответствует положению потребителя в плоскости орбиты спутника, расположенного С. Однако, при наличии комплексной фильтрации наибольшую опасность представляют отражения с низкой частотой, проходящей на выход фильтра. Область опасных отражений выделена на рисунке штриховкой. Ширина этой области  $2\Delta d_\phi$  определяется частотой среза фильтра и скоростью изменения доплеровской частоты  $\Delta f_d$ , причем в системе ГЛОНАСС  $\Delta f_d$  меньше из-за большей скорости движения спутника. Таким образом, площади опасных отражений в системах ГЛОНАСС и GPS различаются менее чем в 2 раза.

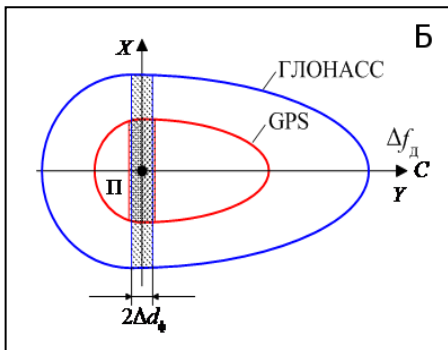


Рис.1б. Область ошибок многолучевого распространения.

**3. Экспериментальные исследования.** Для проверки теоретических результатов было выполнено экспериментальное исследование действия отражений на реальные сигналы систем ГЛОНАСС и GPS. Были исследованы спектры разности кодовых и фазовых отсчетов псевдодалности в канале стандартной точности (СТ) без фильтрации кодовых измерений и с комплексной фильтрацией. Длительность элементарных символов этих систем

различается, и, соответственно, различается ширина спектров сигналов без фильтрации (рис. 2а). Однако после фильтрации (рис. 2б) спектры и среднеквадратичные значения ошибок различаются существенно

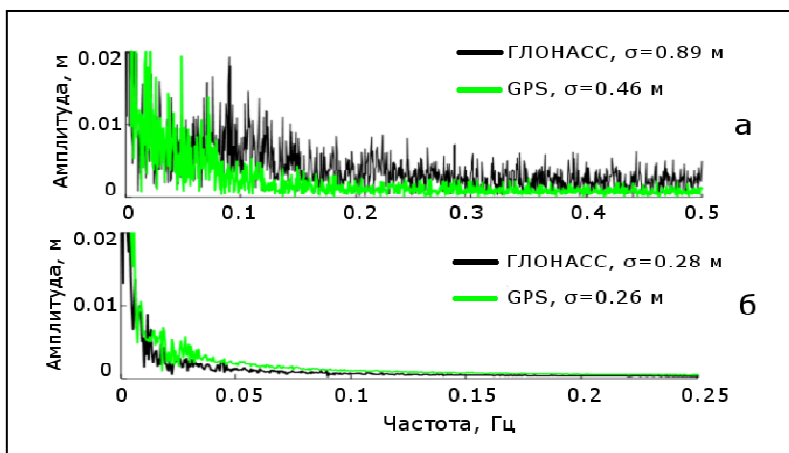


Рис. 2. Спектры разности кодовых и фазовых отсчетов псевдодальности для спутников GPS №23 08-04-2009 и ГЛОНАСС №3 22-04-2009 до и после фильтрации

меньше.

Рассмотрим влияние комплексной фильтрации на величину ошибки многолучевого распространения. В современных приемниках с “узким” коррелятором ошибка, создаваемая отраженными сигналами, практически не зависит от их задержки (график 1 на рис. 3). Относительный уровень отраженного сигнала составлял  $\pm 0.5$ . Можно оценить влияние комплексной фильтрации, используя зависимость частоты помехи от

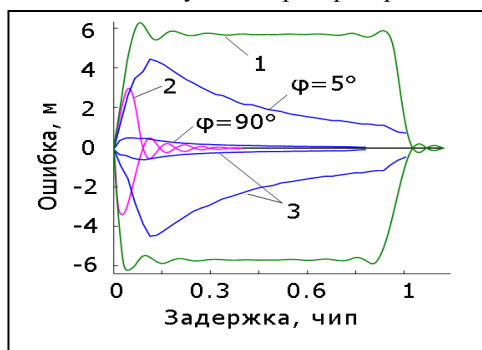


Рис. 3. Зависимость ошибки измерения псевдодальности от задержки отраженного сигнала в системе GPS.

величины задержки отраженного сигнала

(графики 3 для различных значений угла места).

Подавление ошибок, создаваемых отражениями с большой задержкой, можно получить также при использовании в корреляторе стробов специальной формы [3]. Сравнивая ошибки в приемнике со

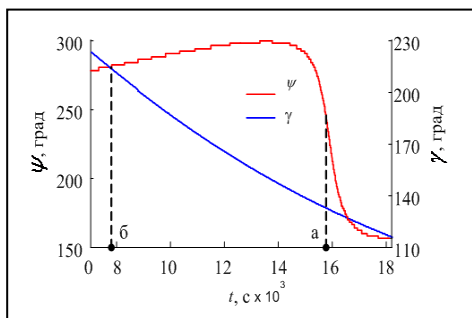


Рис.4. Зависимость направления оси изменения доплеровской частоты от времени для спутника ГЛОНАСС №1

специальной формой строба (график 2) и графики 3, можно сделать вывод о том, что действие кодо-фазовой фильтрации подобно использованию специального строба в измерителе задержки. Поэтому совместное использование коррелятора со сложной формой строба и кодо-фазового фильтра даст заметный результат лишь при малых углах места, и в среднем

выигрыш оказывается незначительным.

На основе стандартных эфемеридных расчетов для систем ГЛОНАСС и GPS были разработаны алгоритмы определения положения области помех, создающих опасные отражения [4]. Пример зависимости от времени углового положения  $\gamma$  вектора изменения доплеровской частоты  $\Delta f_d$ , вычисленной на основе эфемеридных данных, и азимута спутника  $\psi$  показан на рис. 4. Необходимость такого расчета можно показать на примере прогнозирования ошибки, возникающей при отражении сигналов спутника от элементов конструкции летательного аппарата.

Пусть продольная ось летательного аппарата развернута на угол  $-45^\circ$ . Тогда в момент времени  $t_1 = 15890$  сек угол  $\gamma = 132^\circ$ , а  $\psi = 230^\circ$  (рис. 4). Если принять расстояние между антенной и стабилизатором равным 25 м, сдвиг доплеровских частот равен  $f_d = 22.5 \cdot 10^{-3}$  Гц, а ослабление помехи при фильтрации составит  $-23$ дБ. В момент времени  $t_2 = 7300$  сек угол  $\gamma = 220^\circ$ , а азимут  $\psi = 278^\circ$ . Угол сдвига между осью частот доплеровских смещений и азимутом составит  $58^\circ$ . В этом случае частота отражения от стабилизатора окажется в полосе пропускания кодо-фазового фильтра, и ослабления помехи МЛР не происходит. Таким образом, при одной и той же мощности отражений

величина ошибки в зависимости от положения области отражений изменяется на порядок.

**Заключение.** В настоящей работе выполнены исследования по определению ошибок многолучевого распространения сигналов в GPS и ГЛОНАСС при использовании стандартного кодо-фазового фильтра. Проведена оценка влияния комплексной фильтрации на величину ошибки многолучевого распространения радиоволн и разработаны алгоритмы определения положения области переотражений радиосигналов, которые определяют характер интерференции сигналов в точке измерения.

### Литература

1. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Авиационная электросвязь. Том 1. Изд. Шестое. ИКАО, 2006г.
2. *Юрченко Ю.С.* Исследование доплеровских частот помех многолучевого распространения сигналов в глобальной навигационной спутниковой системе // Изв. вузов России. / СПбГЭТУ "ЛЭТИ", – 2010. – Вып. 3: Радиоэлектроника. – С.61-66.
3. *Zhdanov, A.* Multipath error reduction in signal processing / Zhdanov A., Veitsel V., Zhodzishsky M., Ashjaee J. // Proc. of ION GPS-99. Nashville. Tennessee. (GPS Solutions, vol. 5, no. 3, pp. 19–28, 2002.)
4. *Юрченко Ю.С., Шарыпов А.А.* Прогнозирование доплеровских частот помех, возникающих вследствие многолучевого распространения сигналов в глобальной навигационной спутниковой системе // Изв. вузов России. / СПбГЭТУ "ЛЭТИ", – 2011. – Вып. 2: Радиоэлектроника. – С.85-89.

**Максименко Максимилиан Дмитриевич** — д.т.н., ведущий научный сотрудник ОАО "ВНИИРА" Санкт-Петербург ОАО "Концерн ПВО "Алмаз-Антей". Область научных интересов: радиолокация, радионавигация, управление воздушным движением. Число научных публикаций — 36. Адрес: 199406, Санкт-Петербург, ул. Шкиперский проток, д.19. Тел. р.т. +7(812)335-25-55(2878), факс +7 (812)352-35-08.

**Maximenko Maximilian Dmitrievich** — Doctor of Engineering, leading research associate of JSC VNIIRA St. Petersburg JSC Concern PVO Almaz-Antey. Area of scientific interests: radar-location, radio navigation, air traffic control. Number of scientific publications — 36. Address: 199406, St. Petersburg, Shkipersky Canal St., 19. Ph. of river of t. +7 (812) 335-25-55 (2878), fax +7 (812) 352-35-08.

**Саута Олег Иванович** — к.т.н., начальник сектора ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры», г. Санкт-Петербург. Область научных интересов: радиолокация, радионавигация, управление воздушным движением. Число научных публикаций — 35. Адрес: 199406, Санкт-Петербург, ул. Шкиперский проток, д.19. Тел. р.т. +7(812)335-25-55(3715), факс +7 (812)352-35-08.

**Sauta Oleg Ivanovich** — Candidate of Technical Sciences, the chief of sector of JSC «All-Russia research institute of radio equipment», St. Petersburg. Area of scientific interests: radar-location, radio navigation, air traffic control. Number of scientific publications — 35. Address:

199406, St. Petersburg, Shkipersky Canal St., 19. Ph. of river of t. +7 (812) 335-25-55 (3738), fax +7 (812) 352-35-08.

**Крячко Александр Федотович** – д.т.н., профессор по кафедре антенн и эксплуатации РЭА, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения «ГУАП». Область научных интересов: радиолокация, прикладная электродинамика, математическая теория дифракции. Число научных публикаций — 128. Адрес: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. Телефон: +7 (812) 571- 15-22, Факс: +7 (812) 494-70-57. Электронная почта: Alex\_k34.ru@mail.ru.

**Kryachko Alexander Fedotovich** — the Doctor of Engineering, the professor on chair of antennas and operation of radio-electronic equipment, the St. Petersburg state university of space instrumentation “GUAP”. Area of scientific interests: radar-location, applied electro-dynamics, mathematical theory of diffraction. Number of scientific publications — 128. Адрес: 190000, Russia, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya Street, house 67, A . Phone: : +7 (812) 571- 15-22, Fax: +7 (812) 494-70-57. E-mail: Alex\_k34.ru@mail.ru.

**Юрченко Юрий Семенович** — д.т.н., профессор по кафедре радиосистем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ) Область научных интересов: радиолокация, радионавигация. Число научных публикаций — 145. Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5 Телефон: +7 (812) 346-44-87, Факс: +7 (812) 346-27-58. Электронная почта: root@post.etu.spb.ru.

**Yurchenko Yury Semenovich** — the Doctor of Engineering, the professor on chair of radio systems, the St. Petersburg state electrotechnical university "LETI" of V.I. Ulyanov (Lenin) (СПбГЭТУ). Area of scientific interests: radar-location, radio navigation. Number of scientific publications — 145. Адрес: 197376, Russia, St. Petersburg, Professor Popov Street, house 5 Phone: +7 (812) 346-44-87, Fax: +7 (812) 346-27-58. E-mail: root@post.etu.spb.ru.

**Соколов Алексей Иванович** — к.т.н., доцент по кафедре радиосистем Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ) Область научных интересов: радиолокация, радионавигация. Число научных публикаций — 75. Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5 Телефон: +7 (812) 346-44-87, Факс: +7 (812) 346-27-58. Электронная почта: root@post.etu.spb.ru.

**Sokolov Alexey Ivanovich** — Candidate of Technical Sciences, the assistant professor on chair of radio systems the St. Petersburg state electrotechnical university "LETI" of V.I.Ulyanov (Lenin) (СПбГЭТУ) Area of scientific interests: radar-location, radio navigation. Number of scientific publications — 75. Адрес: 197376, Russia, St. Petersburg, Professor Popov Street, house 5. Phone: +7 (812) 346-44-87, Fax: +7 (812) 346-27-58. E-mail: root@post.etu.spb.ru.

Рекомендовано ИГИТО СПИИРАН, рук. ктн, доц. А.В. Тишков.  
Статья поступила в редакцию 09.04.2012.

## РЕФЕРАТ

*Максименко М.Д., Саута О.И., Крячко А.Ф., Юрченко Ю.С., Соколов А.И.*  
**Исследование методов измерения и прогнозирования дисперсий ошибок многолучевого распространения в системе инструментальной спутниковой посадки.**

Требования к системе инструментальной спутниковой посадки предполагают использование комплексного кодо-фазового фильтра для сглаживания шумовой составляющей кодовых измерений и ошибок многолучевого распространения радиоволн. Для оценки влияния комплексной фильтрации исследован спектр ошибок многолучевого распространения радиоволн.

Выполненное исследование спектра отраженных сигналов показало, что существует зависимость разности доплеровских частот прямого и отраженного сигналов от расстояния между антенной потребителя и отражателями. По этой причине ошибка многолучевого распространения радиоволн имеет периодический характер, и ее частота зависит от расстояния до отражателя.

Проведенные исследования показали, что область поверхности, создающей отражения при работе наземного приемника, определяется длительностью элементарного символа кода навигационного сигнала. В канале стандартной точности системы ГЛОНАСС длительность символа вдвое выше, чем в GPS, поэтому площадь отражающей поверхности для ГЛОНАСС существенно больше. Однако, при наличии комплексной фильтрации наибольшую опасность представляют отражения с низкой частотой, проходящей на выход фильтра.

Были исследованы спектры разности кодовых и фазовых отсчетов псевдодальности в канале стандартной точности без фильтрации кодовых измерений и с комплексной фильтрацией. Длительность элементарных символов систем GPS и ГЛОНАСС различается, и, соответственно, различается ширина спектров сигналов без фильтрации. Однако после фильтрации спектры и среднеквадратичные значения ошибок различаются существенно меньше.

На основе стандартных эфемеридных расчетов для систем ГЛОНАСС и GPS были разработаны алгоритмы определения положения области помех, создающих опасные отражения, и приведены соответствующие примеры.

В заключение отмечено, что при одной и той же мощности отражений величина ошибки в зависимости от положения области отражений изменяется на порядок. Проведенная оценка влияния комплексной фильтрации на величину ошибки многолучевого распространения радиоволн и разработанные алгоритмы определения положения области переотражений радиосигналов, которые определяют характер интерференции сигналов в точке измерения, позволяют повышать точность и целостность навигационных данных в системах спутниковой посадки.

## SUMMARY

*Maksimenko M. D., Sauta O. I., Kryachko A.F., Yurchenko Yu.S., Sokolov A.I.*  
**Research of methods of measurement and prediction of dispersions of errors of multibeam distribution in system of instrumental satellite landing.**

Requirements to system of instrumental satellite landing assume use of a complex kodo-all-pass filter for smoothing of a noise component of code measurements and errors of multibeam distribution of radiowaves. For an assessment of influence of a complex filtration the range of errors of multibeam distribution of radiowaves is investigated.

The executed research of a range of the reflected signals showed that there is a dependence of a difference of the Doppler frequencies of the direct and reflected signals on distance between the aerial of the consumer and reflectors. For this reason the error of multibeam distribution of radiowaves has periodic character, and its frequency depends on distance to a reflector.

The carried-out researches showed that the area of the surface creating reflections at operation of the land receiver, is defined by duration of the elementary symbol of a code of a navigation signal. In the channel of standard accuracy of GLONASS system duration of a symbol is twice higher, than in GPS therefore the catopter area for GLONASS essentially is more. However, in the presence of a complex filtration the greatest danger is represented by reflections with the low frequency passing on an exit of the filter.

Ranges of a difference of code and phase counting of pseudo-range in the channel of standard accuracy without a filtration of code measurements and with a complex filtration were investigated. Duration of the elementary symbols of GPS systems and GLONASS differs, and the width of ranges of signals without a filtration, respectively, differs. However after a filtration ranges and root mean square values of mistakes differ essentially less.

On the basis of standard ephemeris calculations algorithms of definition of provision of area of the hindrances creating dangerous reflections were developed for systems of GLONASS and GPS, and the corresponding examples are given.

It is in summary noted that at the same capacity of reflections the mistake size depending on the provision of area of reflections changes on an order. The carried-out assessment of influence of a complex filtration on size of an error of multibeam distribution of radiowaves and the developed algorithms of definition of provision of area of rereflections of radio signals which define character of an interference of signals in a measuring position, allow to increase accuracy and a wholeness of navigation data in systems of satellite landing.