

## ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ С КВАДРАТУРНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ И ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ

А. П. АЛЕШКИН, В. С. БАХОЛДИН, Д. А. ГАВРИЛОВ, Д. А. ЛЕКОНЦЕВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: vka@mil.ru*

Предложены новые алгоритмы обработки сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, повышающие разрешающую способность, точность оценки времени задержки сигнала и отношение сигнал/шум для решения навигационной задачи, задач обнаружения и разрешения сигналов. Оценена точность решения навигационной задачи с использованием разностных измерений. Приведены результаты экспериментальной обработки сигналов ГЛОНАСС, показывающие увеличение отношения сигнал/шум при использовании алгоритма совместной обработки сигналов с учетом квадратурного уплотнения и уменьшения ширины главного максимума в области высокой корреляции в случае применения алгоритма совместной обработки сигналов с частотным разделением от двух навигационных космических аппаратов.

**Ключевые слова:** *квадратурное уплотнение сигналов, отношение сигнал/шум, частотное разделение сигналов, программная обработка навигационных сигналов*

**Введение.** За последние годы отечественные и зарубежные производители навигационной аппаратуры потребителя (НАП) разработали сотни модификаций приемников спутниковых радионавигационных систем различных классов точности. Современная НАП может обрабатывать сигналы нескольких глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС): ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou.

Навигационная задача может решаться в

- режиме абсолютного позиционирования с использованием дальномерных кодов;
- дифференциальном режиме, обеспечивающем устранение сильнокоррелированных погрешностей измерений;
- относительном режиме, базирующемся на фазовых измерениях;
- режиме прецизионного высокоточного позиционирования PPP (Point Precise Positioning), в котором используются практически все способы повышения точности.

С увеличением вычислительной мощности современной аппаратуры стало возможно применять сложные алгоритмы для решения навигационной задачи (НЗ). Благодаря выполнению Федеральной целевой программы „ГЛОНАСС“ (2001—2011 гг.) среднеквадратическая ошибка (СКО) определения местоположения с использованием сигналов ГЛОНАСС снизилась до 5,6 м [1]. Тем не менее, в настоящее время значения СКО определения координат и скорости с использованием сигналов ГНСС не всегда удовлетворяют требованиям для решения ряда задач. Для физически реализуемых систем потенциальная точность определения координат цели всегда конечна вследствие технологических и технических ограничений, а также физических процессов, протекающих в аппаратуре.

Точность измерения параметров сигнала тем выше, чем больше энергетическое соотношение сигнал/шум на входе приемного устройства и чем уже глобальный максимум автокорреляционной функции сигнала [2]. При традиционных способах обработки сигналов повысить отношение сигнал/шум, разрешающую способность, точность оценки времени задержки сигнала можно, лишь увеличив время когерентного накопления.

Для повышения точности измерения параметров целесообразно расширять полосу сигнала и повышать его энергию. Для решения этих задач требуется разработка методов и алгоритмов программной обработки радионавигационных сигналов ГНСС. С целью увеличения отношения сигнал/шум, повышения разрешающей способности, точности оценки времени задержки сигнала за счет расширения его спектра предлагается использовать алгоритм совместной обработки сигналов с частотным разделением, принимаемых одновременно от двух навигационных космических аппаратов (НКА) с различными номерами (литерами) несущих частот (НЧ) радиосигнала или от одного НКА, но в двух частотных диапазонах.

Рассмотрим модернизируемую ГЛОНАСС, в которой планируется применение новых навигационных сигналов L1SC, L1OC, L2SC, L2OC, L2 КСИ, L3OC с кодовым разделением в частотных диапазонах L1, L2, L3, использующих ВОС (Binary Offset Carrier) модуляцию [3]. Для сигнала, немодулированного данными ( $d$ ), используется почиповое временное уплотнение, а для сигналов открытого (OC) и санкционированного доступа (SC) — квадратурное (рис. 1). Использование  $(0; \pi)$  манипуляции для кода стандартной точности (СТ) и  $\left(\frac{\pi}{2}; -\frac{\pi}{2}\right)$

для кода высокой точности (ВТ) позволяет осуществить квадратурное уплотнение сигналов [4]. Радиосигналы OC и SC с кодовым разделением имеют следующие номинальные значения несущих частот:

$$\begin{aligned} f_{L1} &= 1565 f_b = 1600,995 \text{ МГц}, \\ f_{L2} &= 1220 f_b = 1248,06 \text{ МГц}, \\ f_{L3} &= 1175 f_b = 1202,025 \text{ МГц}, \end{aligned}$$

$f_b = 1,023 \text{ МГц}$  — базовая частота.

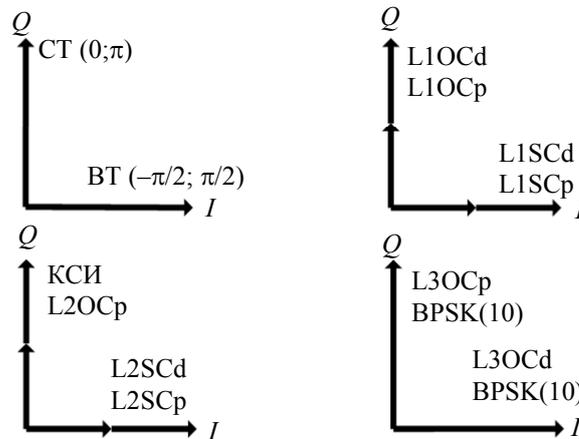


Рис. 1

Излучаемые сигналы когерентны, а их мощность равномерно распределена между соответствующими компонентами, что обеспечивает возможность их совместной обработки с использованием общего опорного сигнала.

**Алгоритм совместной обработки сигналов с частотным разделением от двух НКА.** Принимаемый у поверхности Земли сигнал одного НКА можно представить действительной функцией времени

$$S(t) = A(t) \cos[2\pi(f_0 + f_D)t + \varphi(t)],$$

где  $A(t)$  — функция, выражающая амплитудную модуляцию;  $f_0$  — несущая частота;  $f_D$  — частота Доплера;  $\varphi(t)$  — функция, описывающая фазовую модуляцию сигнала.

При совместной обработке сигналов НКА с частотным разделением [5] на первый вход коррелятора подаются навигационный сигнал НКА, прогетеродинированный НЧ с номером „0“ соответствующего диапазона L1 или L2, а на второй вход коррелятора подаются опорный сиг-

нал  $S_{nm}(t)$ . Для каждой пары спутников с номерами НЧ  $n$  и  $m$  опорный сигнал формируется путем суммирования двух дальномерных кодов  $A(t)$ , смещенных во временной области на ожидаемые задержки сигнала  $t_n$  и  $t_m$ , а в частотной области — на величину соответствующего литерного смещения частоты  $t_n$  и  $t_m$  и прогнозируемую частоту доплеровского смещения  $f_{Дn}$  и  $f_{Дm}$ . Опорный сигнал описывается следующим выражением:

$$S_{nm}(t) = A(t - t_n)\exp(2\pi(f_n + f_{Дn})t) + A(t - t_m)\exp(2\pi(f_m + f_{Дm})t).$$

Для подтверждения работоспособности предложенного алгоритма корреляционной обработки была проведена экспериментальная обработка сигналов НКА с номерами –1 и 3 в частотном диапазоне L1 системы ГЛОНАСС. Обработка проводилась в среде MatLab R2009a с использованием реального сигнала, записанного 13 марта 2015 года в 10 ч 02 мин 28 с с частотой дискретизации 40,96 МГц [6].

На рис. 2 приведены спектральные плотности средней мощности сигналов (СПМ) для каждого НКА, а также совместная СПМ. Ширина спектра объединенного сигнала приблизительно в четыре раза больше, чем каждого из сигналов.

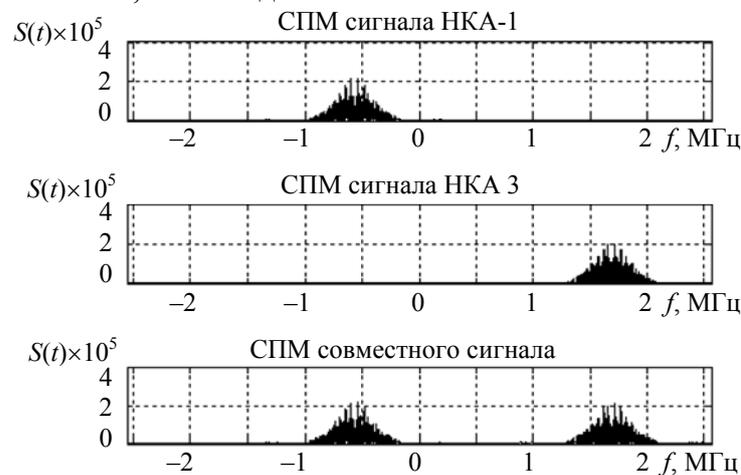


Рис. 2

На рис. 3 приведены графики взаимокорреляционных функций (ВКФ) принимаемого и опорного сигналов для каждого НКА, а также взаимокорреляционная функция с единым опорным сигналом.

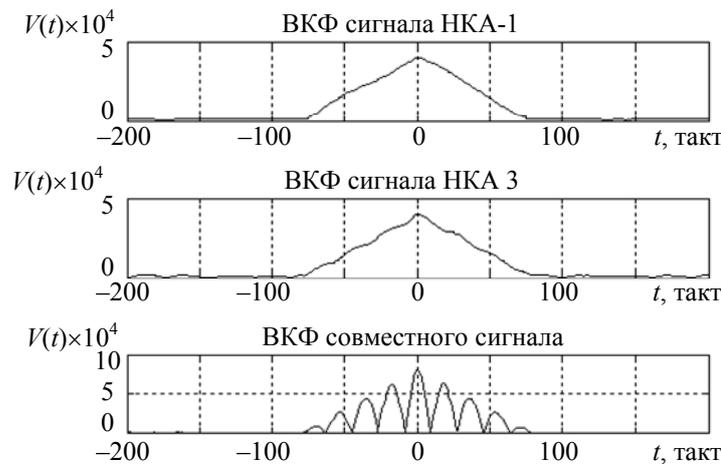


Рис. 3

Анализ ВКФ принимаемого и опорного сигналов показывает, что ширина главного максимума уменьшилась в девять раз, а в области высокой корреляции вместо единственного экстремума функции появились дополнительные боковые лепестки (артефакты), которые

могут оказывать негативное влияние при решении НЗ (срыв слежения за глобальным максимумом функции). Число боковых лепестков пропорционально сдвигу между несущими частотами  $n$  и  $m$ .

**Результаты оценки точности решения навигационной задачи с использованием разностных измерений.** Для оценки точности решения НЗ проведен эксперимент по программной обработке навигационного сигнала ГЛОНАСС, записанного на промежуточной частоте в среде MatLab. Длительность записи составила 40 с в частотном диапазоне L1. Используемые в обработке НКА представлены на рис. 4.

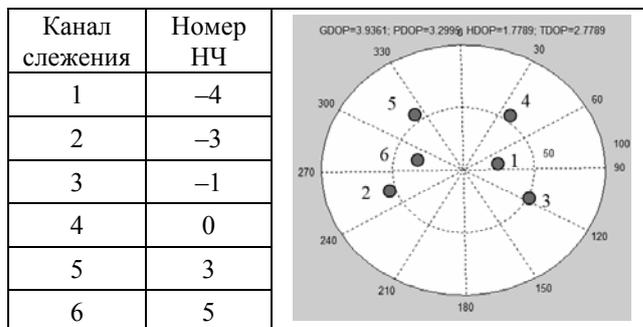


Рис. 4

Результаты эксперимента представлены в таблице. Навигационная задача решалась как без компенсации ошибок тропосферы и ионосферы, так и с использованием модели компенсации. Сначала было получено стандартное решение НЗ на всем интервале записи сигнала, которое далее сравнивалось с опорным. В качестве опорной (истинной) точки приняты осредненные результаты решения НЗ в течение суток двухдиапазонной НАП.

Режимы решения НЗ	Погрешность, м		
	без коррекции	с коррекцией тропосферы	с коррекцией тропосферы и ионосферы
Без использования разностных измерений	31,47	26,83	24,45
Коррекция разностями 1-2, 1-3, 1-4	24,00	22,68	22,29
Коррекция разностями 1-2, 1-3, 1-4, 1-5	22,97	21,29	20,72
Коррекция разностями 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6	15,65	14,90	15,02

В последующих решениях помимо шести каналов слежения вводились три дополнительных канала обработки общего сигнала каналов 1 и 2, 1 и 3, 1 и 4. При этом в алгоритме вторичной обработки, реализуемом на основе метода наименьших квадратов, использовались не непосредственные измерения псевдодальностей, а разности псевдодальностей соответствующих каналов.

Результаты эксперимента показали повышение точности измерений опорной точки вследствие уменьшения абсолютной погрешности в два раза.

**Алгоритм совместной обработки сигналов с учетом квадратурного уплотнения.** Фазоманипулированный сигнал ГНСС имеет вид последовательности радиоимпульсов с прямоугольной огибающей:

$$S_{\text{фм}}(t) = A(t) \cos[2\pi f_0 t + (1 + x_c(t))\Delta\varphi_m],$$

где  $x_c(t)$  — нормированная функция, принимающая значения  $-1$  и  $1$  в зависимости от изменения дальномерного кода;  $\Delta\varphi_m$  — девиация фазы.

Величина  $\Delta\varphi_m$  может быть любой, однако для лучшего различения сигналов целесообразно, чтобы  $\Delta\varphi_m = \pi$ .

Для повышения отношения сигнал/шум предлагается использовать корреляционную обработку с единым опорным сигналом открытого и санкционированного доступа. Опорный

сигнал формируется в виде комплексного, вещественная компонента которого представляет собой дальномерный код ВТ, а мнимая — дальномерный код СТ.

При экспериментальной проверке предложенного алгоритма использовались сигналы ГЛОНАСС с частотным разделением открытого и санкционированного доступа диапазона L1. Единый опорный сигнал формировался с учетом квадратурного уплотнения в виде:

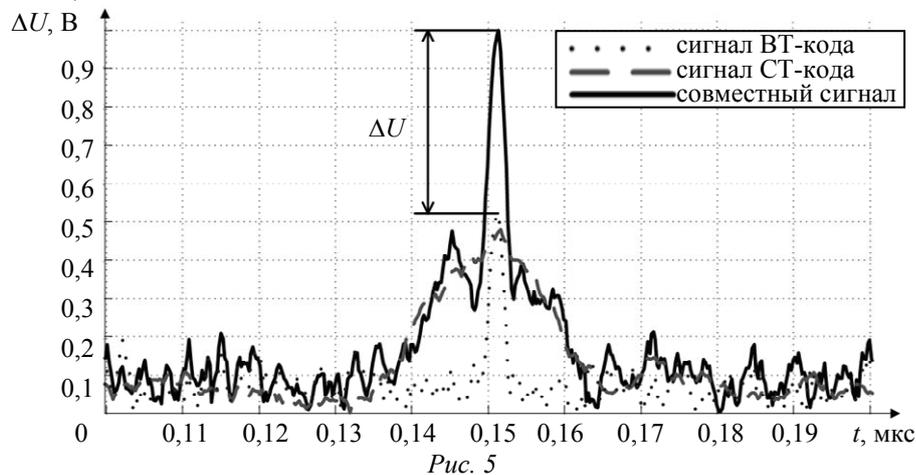
$$S_{I_{ВТ}Q_{СТ}}(t) = I_{ВТ}(t) \cos 2\pi f_0 t + Q_{СТ}(t) \sin 2\pi f_0 t,$$

Квадратурные составляющие модуляции

$$I_{ВТ}(t) = A_{ВТ}(t) \cos((1 + x_c(t))\Delta\phi_{ВТ}), \quad Q_{СТ}(t) = A_{СТ}(t) \sin((1 + x_c(t))\Delta\phi_{СТ})$$

выделяются из действительного сигнала  $S(t)$  гетеродинированием на  $\cos 2\pi f_0 t$  и на  $\sin 2\pi f_0 t$  соответственно с последующей фильтрацией.

На рис. 5 приведены результаты экспериментальной обработки сигналов СТ и ВТ нормированной взаимной корреляционной функции сигнала прямого распространения НКА с номером 5 системы ГЛОНАСС и соответствующих опорных сигналов. Обработка сигнала проводилась в среде Matlab R2009a для 1000 дискретных отсчетов сигнала с частотой дискретизации 40,96 МГц.



Преимуществом предложенного алгоритма обработки сигнала является параллельная обработка двух сигналов системы ГЛОНАСС. Ортогональные преобразования, выполненные в поле комплексных чисел, позволяют в полной мере реализовать все достоинства, предоставляемые квадратурным уплотнением сигналов. В сравнении с последовательной обработкой, когда производится формирование ВКФ с помощью прямого и обратного дискретного преобразования Фурье, в предложенном алгоритме требуется в два раза меньше операций умножения и сложения комплексных чисел, что облегчает выполнение вычислений в реальном масштабе времени.

Результаты экспериментальной обработки показали увеличение отношения сигнал/шум на 1,5 дБ.

**Заключение.** Таким образом, внедрение предлагаемых алгоритмов обработки сигналов позволяет создавать приемники, обладающие повышенной точностью. Результаты проведенных экспериментов подтверждают уменьшение погрешности навигационных определений в 1,6—2 раза и увеличение отношения сигнал/шум на 1,5 дБ при решении НЗ с учетом квадратурного уплотнения и частотного разделения сигналов. Алгоритмы формирования единого опорного сигнала, позволяющие повысить точность навигационно-временных определений, могут быть также применены для обработки сигналов с кодовым разделением модернизируемой системы ГЛОНАСС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [Электронный ресурс]: <www.federalsspace.ru>.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
3. КА Глонасс-K2 Структура излучаемых навигационных радиосигналов L1SC, L1OC, L2SC, L2OC, L2 КСПС, L3OC с кодовым разделением частотных диапазонов L1, L2, L3. НИИКП. 2011.
4. Способ формирования опорного сигнала для совместной обработки сигналов стандартной и высокой точности системы ГЛОНАСС / В. С. Бахолдин, Д. А. Гаврилов, Д. А. Леконцев. Заявка на изобретение № 2015139207 от 14.09.2015 г.
5. Способ обработки сигнала системы ГЛОНАСС с частотным разделением / В. А. Авдеев, В. С. Бахолдин, Д. А. Гаврилов, В. А. Добриков, Д. А. Леконцев, Е. А. Ткачев. Заявка на изобретение № 2016102735 от 27.01.16 г.
6. Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Леконцев Д. А. Совместное обнаружение сигналов ГЛОНАСС стандартной и высокой точности // 6-я Всерос. конф. „Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение“ КВНО-2015. 20—24 апреля 2015. СПб: ИПА РАН, 2015. С. 123.

## Сведения об авторах

**Андрей Петрович Алешкин**— д-р техн. наук профессор; ВКА им. А.Ф. Можайского, кафедра передающих, антеннофидерных устройств и средств СЕВ;  
E-mail: a\_aleshkin@mail.ru**Владимир Станиславович Бахолдин**— канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А.Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации;  
E-mail: bvs@email.ru**Денис Александрович Гаврилов**— канд. техн. наук; ВКА им. А.Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации;  
E-mail: gdanas@yandex.ru**Дмитрий Александрович Леконцев**— адъюнкт; ВКА им. А.Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации;  
E-mail: kuvalda13@mail.ruРекомендована кафедрой  
космической радиолокации  
и радионавигацииПоступила в редакцию  
09.12.15 г.

**Ссылка для цитирования:** Алешкин А. П., Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Леконцев Д. А. Обработка сигналов спутниковых навигационных систем с квадратурным уплотнением и частотным разделением // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 4. С. 261—267.

**SIGNAL PROCESSING OF SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS  
WITH QUADRATURE MULTIPLEXING AND FREQUENCY DIVISION**

**A. P. Aleshkin, V. S. Bakholdin, D. A. Gavrillov, D. A. Lekontsev**

*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia  
E-mail: vka@mil.ru*

New algorithms for processing of signals from global satellite navigation systems are proposed. The algorithms increase the system resolution, accuracy of the time delay estimation, and improve the signal-to-noise ratio in the problems of navigation, signal detection and recognition. An estimate is derived for accuracy of navigation problem solution with the use of differential measurements. Results of experimental processing of GLONASS signals with frequency division multiplexing are presented to demonstrate the increase in signal-to-noise ratio when the algorithm of joint processing of signal from two navigation spacecraft is applied.

**Keywords:** quadrature multiplexing of signals, the signal-to-noise ratio, frequency division multiplexing, software processing of navigation signals

**Data on authors**

- Andrey P. Aleshkin** — Dr. Sci, Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Transmission, Antenna-Feeder Devices and Means for SEV; E-mail: a\_aleshkin@mail.ru
- Vladimir S. Bakholdin** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Space Radiolocation and Radionavigation; E-mail: bvs@email.ru
- Denis A. Gavrilov** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Space Radiolocation and Radionavigation; E-mail: gdanas@yandex.ru
- Dmitry A. Lekontsev** — Adjunct; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Space Radiolocation and Radionavigation; E-mail: kuvalda13@mail.ru

**For citation:** *Aleshkin A. P., Bakholdin V. S., Gavrilov D. A., Lekontsev D. A.* Signal processing of satellite navigation systems with quadrature multiplexing and frequency division // *Izv. vuzov. Priborostroenie.* 2016. Vol. 59, N 4. P. 261—267 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-4-261-267