
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 612.397.5

В. А. АВДЕЕВ, В. С. БАХОЛДИН, Д. А. ГАВРИЛОВ, И. С. ГЕРАСИМЕНКО,
В. А. ДОБРИКОВ, В. Ф. ИВАНОВ, А. В. КОЗЛОВ, И. В. САХНО,
А. Б. СИМОНОВ, Е. А. ТКАЧЕВ

ПРОГРАММНЫЙ ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ “COMPASS”

Представлен разработанный программно-аппаратный комплекс, предназначенный для приема и обработки сигнала спутниковой навигационной системы “Compass” (Китай). Приведены описание технологии программного приема навигационных сигналов, которая обеспечивает возможность корреляционной обработки новых сигналов, а также результаты экспериментов.

Ключевые слова: спутниковая навигация, обнаружение сигнала, программный приемник, программный коррелятор, система “Compass”.

Появление новых сигналов спутниковых навигационных систем обуславливает необходимость разработки навигационной аппаратуры нового поколения и модернизации используемых образцов. Выполнение этих условий возможно при создании новых приемников спутниковых навигационных систем, основанных на технологии программного приема и обработки сигналов.

Используемая для систем ГЛОНАСС/GPS/Galileo технология программного приема позволяет в короткие сроки осуществлять прием и обработку сигналов глобальной спутниковой навигационной системы “Compass” (BeiDou, Китайская Народная Республика). В перспективе к 2020 г. система должна иметь орбитальную группировку в составе 35 спутников, из них пять — на геостационарной орбите, три — на наклонной геосинхронной орбите, четыре — на средневысотной круговой орбите. На момент написания статьи (лето 2013 г.) в системе насчитывалось 13 спутников: шесть геостационарных, три геосинхронных, четыре среднеорбитальных. 27 декабря 2011 г. Управление по спутниковой навигации Китая опубликовало предварительную версию интерфейсного контрольного документа системы “Compass”. Основные параметры сигналов системы “Compass” приведены в таблице.

Обозначение сигнала	Несущая частота, МГц	Ширина спектра, МГц	Тактовая частота дальномерного кода, МГц	Тип модуляции
B1	1561,098	4,092	2,046	QPSK
B1-2	1589,742	4,092	2,046	QPSK
B2	1207,14	24	10,23	QPSK
B3	1268,52	24	10,23	QPSK

Примечание. QPSK — Quadrature Phase Shift Keying (квадратурная фазовая манипуляция).

В настоящей статье, в продолжение работ [1—3], представлено описание экспериментального программного приемника и приведены результаты приема и обработки навигационных сигналов системы “Compass”. Для приема открытого сигнала В1 системы авторами настоящей статьи разработан программно-аппаратный комплекс (макет программного приемника навигационных сигналов). Экспериментальный комплекс, структурная схема которого приведена на рис. 1, содержит широкополосную антенну АТ302 диапазонов L1 и L2, входящую в состав геодезического навигационного приемника LEIKA GPS—System 300; широкополосный малошумящий усилитель (МШУ) с центральной частотой 1590 МГц со сплиттером производства ЗАО „КБ НАВИС“ (Санкт-Петербург); устройство преобразования и оцифровки сигнала на базе блока NI PXIe-1062Q фирмы “National Instruments” (США) и персональный компьютер. В качестве опорного генератора для макета приемника использовался рубидиевый стандарт частоты Ч1-81/2.

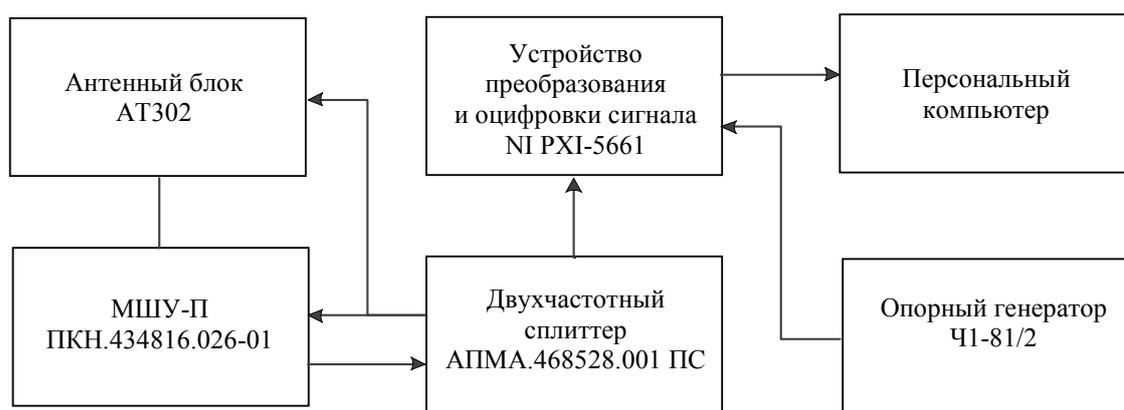


Рис. 1

Антенна, установленная на крыше здания высотой около 40 м, соединена с приемником кабелем длиной 30 м. Сигнал с выхода антенны поступает на МШУ с коэффициентом усиления 29,5 дБ и затем на сплиттер, обеспечивающий подачу питания напряжением 12 В на антенну и на усилитель, а также развязку по питанию с векторным анализатором высокочастотных сигналов NI PXI-5661. Входящий в состав анализатора модуль NI PXI-5600 обеспечивает понижение частоты сигнала до видеочастоты, а модуль NI PXI-5142 обеспечивает аналого-цифровое преобразование квадратурного сигнала с частотой дискретизации 5 МГц в 16-разрядные отсчеты. Далее оцифрованный видеосигнал поступает на персональный компьютер для последующей обработки.

Экспериментальный прием сигнала осуществлялся в Санкт-Петербурге 11.07.2012 г. в 16.49 по московскому времени, когда по данным целеуказаний в зоне радиовидимости находились среднеорбитальные навигационные спутники с номером псевдослучайного дальномерного кода (ПДК, или англ. Pseudo-Random Noise (PRN) Ranging Code) 11 и 12. Обработка записанного сигнала проводилась в два этапа: сначала поиск и обнаружение, затем слежение за параметрами сигнала.

Поиск сигналов по доплеровской частоте осуществлялся в диапазоне ± 5 кГц с шагом 100 Гц, поиск по задержке — на интервале от 0 до 4091 с шагом 0,5 длительности отсчета ПДК, равного $t=0,24$ мкс. Интервал когерентного накопления сигнала в программном корреляторе задавался равным 1 мс, а интервал некогерентного накопления на выходе коррелятора — 5 мс. На рис. 2, а, б представлены результаты обнаружения сигналов спутников с кодами PRN 11 и PRN 12 (а — по задержке, б — по частоте) в виде сечений двумерной корреляционной функции.

Анализ графиков показывает, что сигналы обоих спутников устойчиво обнаруживаются. При этом время запаздывания и доплеровский сдвиг частоты для PRN 11 и PRN 12 составляют соответственно $t_{11} = 8,28$ мкс и $t_{12} = 151,44$ мкс, $F_{d,11} = 900$ Гц и $F_{d,12} = -2300$ Гц.

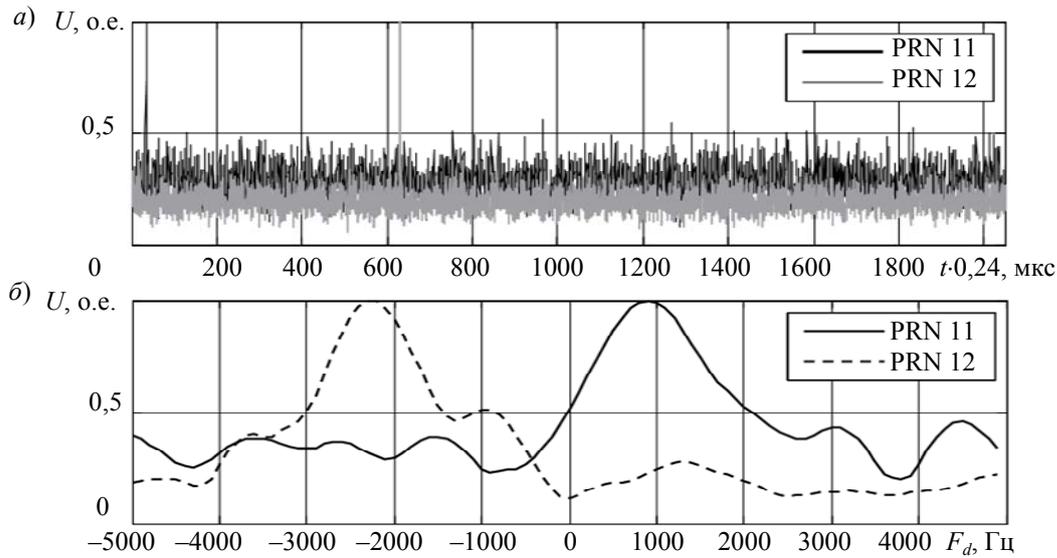


Рис. 2

График результатов некогерентного накопления сигналов с кодами PRN 11 и PRN 12 на выходе коррелятора (рис. 3) показывает, что при увеличении интервала накопления (T) до 200 мс отношение сигнал/шум (q) возрастает от 9—10 до 16,5 дБ.

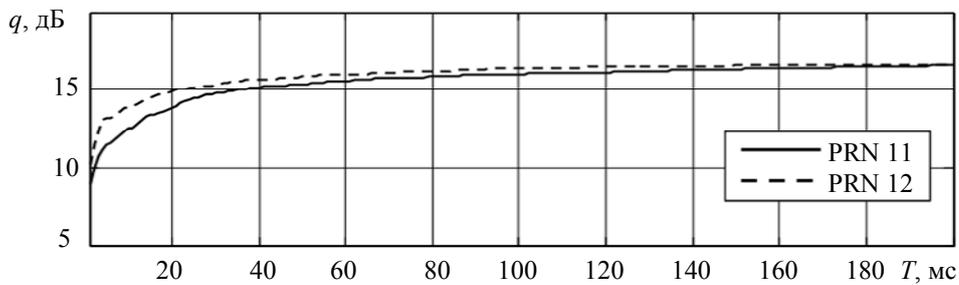


Рис. 3

На рис. 4 представлены синфазная (I) и квадратурная (Q) составляющие сигнала на выходе программного коррелятора в режиме слежения за сигналом спутника с кодом PRN 12. Синфазная составляющая сигнала отражает его модуляцию символами навигационного сообщения, длительность которых составляет 20 мс. Для наглядности представления символов информации сигнал был демодулирован вторичным кодом Ньюмана — Хофмана [4, 5], длительность которого также составляла 20 мс. Выделение навигационного сообщения на время проведения эксперимента не представлялось возможным, поскольку описание структуры навигационного кадра отсутствовало.

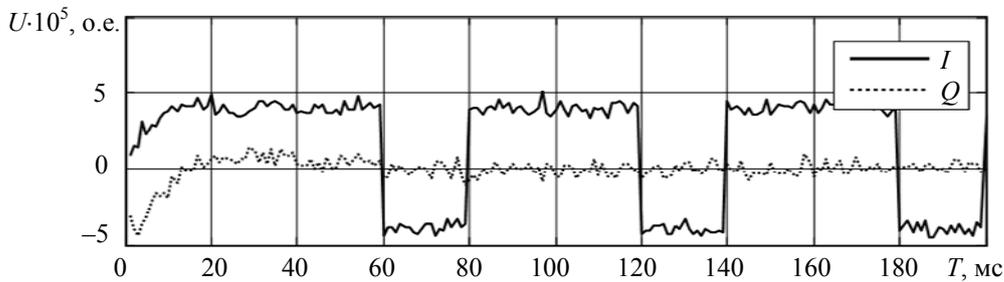


Рис. 4

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

- навигационные сигналы системы “Compass” устойчиво обнаруживаются и отслеживаются по задержке дальномерного кода и несущей частоте;
- основные характеристики принятых навигационных сигналов типа В1 соответствуют заявленным в интерфейсном контрольном документе;

— экспериментальный комплекс на основе макета программного навигационного приемника позволяет отрабатывать технологию приема и обработки сигналов системы “Compass” и сигналов других навигационных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахолдин В. С., Герасименко И. С., Добриков В. А., Иванов В. Ф., Сахно И. В., Ткачев Е. А. Применение нейропроцессора L1879VM1 для поиска и обнаружения сигналов ГЛОНАСС/GPS // Прил. к журн. „Нейрокомпьютеры: разработка, применение“. 2006. № 21. С. 95—99.
2. Бахолдин В. С., Герасименко И. С., Добриков В. А., Дубинко Ю. С., Иванов В. Ф., Сахно И. В., Симонов А. Б., Ткачев Е. А. Прием и обработка сигналов первого навигационного спутника системы Galileo // Тр. Второй Всерос. конф. „Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО—2007)“, 2—5 апр. 2007 г., Санкт-Петербург. СПб: Ин-т прикладной астрономии РАН, 2007. Вып. 17. С. 148—157.
3. Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Герасименко И. С., Добриков В. А., Иванов В. Ф., Симонов А. Б., Сахно И. В., Ткачев Е. А. Программный приемник сигналов спутниковых навигационных систем на базе СБИС K1879XK1Я // Тр. ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 230—235.
4. BeiDou-SIS-ICD-Test, 2011-12 [Электронный ресурс]: <<http://www.beidou.gov.cn>>.
5. [Электронный ресурс]: <http://www.witchnav.cz/doku.php?id=beidou_b1_story1>.

Сведения об авторах

- Владимир Алексеевич Авдеев** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: apex7@rambler.ru
- Владимир Станиславович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: bvs@email.ru
- Денис Александрович Гаврилов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: gdanas@yandex.ru
- Игорь Станиславович Герасименко** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: iger60@mail.ru
- Владимир Анатольевич Добриков** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: dwa33@mail.ru
- Вадим Федорович Иванов** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; ст. преподаватель; E-mail: vf_ivanov@list.ru
- Алексей Васильевич Козлов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: kozlov_aleks@mail.ru
- Игорь Викторович Сахно** — д-р техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: Vstrecha10@mail.ru
- Андрей Борисович Симонов** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; преподаватель; E-mail: ab_simonov@rambler.ru
- Евгений Андреевич Ткачев** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: tke33@mail.ru

Рекомендована кафедрой
космической радиолокации и радионавигации

Поступила в редакцию
27.06.13 г.