

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУДУЩИХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИГНАЛОВ ГНСС

А. В. Вейцель

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4
E-mail: A.Veitsel@mail.ru

Анализируется текущее состояние спутниковых навигационных систем GPS, ГЛОНАСС, GALILEO (европейская система), COMPASS (китайская система) и перспективы их развития для различных приложений позиционирования. Рассматриваются особенности построения навигационной мультисистемной аппаратуры. Анализируются возможности использования новых сигналов глобальных навигационных спутниковых систем и их влияние на построения навигационной аппаратуры и точностные характеристики позиционирования. Рассматриваются различные методы высокоточного позиционирования и методы слежения за сигналами в сложных условиях. Приводятся достигаемые точности позиционирования в различных режимах навигационной аппаратуры. Рассматриваются свойства навигационных сигналов и их влияние на ошибку многолучевости. Приводятся примеры широкополосных сигналов, которые позволяют существенно уменьшить ошибку многолучевости.

Ключевые слова: одиночный приемник, глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), GPS, ГЛОНАСС, фазовые приращения, относительная точность, сельское хозяйство.

UPDATE OF NAVIGATION RECEIVERS CHARACTERISTICS WITH THE USE OF THE FUTURE LONG-RANGE GNSS SIGNALS

A. V. Veitsel

Moscow Aviation Institute (national research university)
4 Volokolamskoe highway, Moscow, GSP-3, A-80, 125993, Russia
E-mail: A.Veitsel@mail.ru

Current state of GNSS, such as GPS, GLONASS, GALILEO (European system), COMPASS (Chinese system) and prospects in the development of various positioning applications designed for these systems are analyzed. Design of multisystem navigation receivers are analyzed. Capabilities of new signals of global navigation satellite systems and effects on designing navigation devices and accuracy parameters of positioning are considered as well. Different methods of precision positioning and tracking algorithms in different conditions is presented. Results of using different signals received from GNSS systems along with attainable positioning accuracies for various navigation modes are given. Topcon's new generation of navigation receivers designed with the help of ASIC Vanguard" with 226 universal navigation channels are presented. Characteristics and different operational modes of this precise positioning equipment are described. The characteristics of navigation signals and multipath errors are analyzed. The wide band navigation signals with minimal multipath error are presented.

Keywords: isolated receiver, global navigation satellite system (GNSS), GPS, GLONASS, phase increment, relative precision, agriculture.

1. Сигналы спутниковых навигационных систем. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) предназначены для определения местоположения пользователя, имеющего специальный навигационный приемник. Навигационные приемники нашли широкое применение в таких областях как геодезия, геология, картография, сельское хозяйство, строительство, мореплавание, авиация, системы управления различной техникой и т. д. Разные приложения накладывают свои требования по точности, обеспечиваемой навигационными приемниками.

В настоящее время в ГНСС применяются два основных типа позиционирования – абсолютное и относительное (дифференциальное) позиционирование. Под абсолютным позиционированием понимается определение местоположения одного навигационного приемника, установленного в точке с координатами, которые необходимо определить. При этом используются только собственные кодовые измерения навигационного приемника. Дифференциальное позиционирование производится с использованием как минимум двух навигационных приемников, где один из них является базовой станцией и располагается

в точке с известными координатами. При этом по радиоканалу с базовой станции передается корректирующая информация на другой навигационный приемник, координаты которого необходимо определить. Также существуют сети базовых станций, когда корректирующая информация передается, учитывая измерения многих приемников.

В настоящее время происходит модернизация существующих и развитие новых спутниковых навигационных систем. К существующим спутниковым навигационным системам относятся системы GPS и ГЛОНАСС. Создаются европейская система GALILEO и китайская система COMPASS. Планируется японская навигационная система QZSS, которая будет состоять из 3 навигационных спутников в дополнение к существующей системе GPS.

В спутниковых навигационных системах сигналы используют фазовую манипуляцию несущей частоты на 180° , при этом модулирующий сигнал является псевдощумовым кодом (ПШК). К таким сигналам применяют название Binary phase shift keying (BPSK). Для некоторых сигналов ПШК складывается по модулю 2 с информационной последовательностью. Некоторые новые навигационные сигналы являются *меандровыми псевдощумовыми* сигналами (Binary offset carrier – BOC), в которых используют дополнительную модуляцию меандровой последовательностью разной частоты. Для таких сигналов в качестве параметра вводится отношение тактовой частоты ПШК, и тактовой частоты меандровой последовательности, к тактовой частоте C/A кода GPS, которая равняется 1.023 МГц. Например, один из новых первых сигналов в классе меандровых псевдощумовых сигналов обозначается BOC(1,1), в котором тактовая частота кодовой последовательности и тактовая частота меандровой последовательности равны 1.023 МГц. Аналогичные обозначения вводятся с использованием коэффициента отношения тактовой частоты ПШК к C/A коду и для BPSK сигналов. Например, сигнал GPS L5 может быть записан как BPSK(10).

В табл. 1 приводятся передаваемые и планируемые сигналы для системы GPS [1].

В системе GALILEO для навигационных сигналов будут использоваться три частотных диапазона, которые обозначаются E1 (совпадает с L1 GPS), E6 и E5, который состоит из поддиапазонов E5a (совпадает с L5 GPS) и E5b. Большинство сигналов будут являться BOC-сигналами с разными тактовыми частотами ПШК и меандровых последовательностей. В качестве ПШК будут применяться для некоторых сигналов так называемые «методы кода», которые задаются в виде элементов кодовой последовательности. В качестве сигнала L1C в диапазоне E1 будет передаваться сигнал CBOC, который является суммой сигналов BOC(1,1) и BOC(6,1). В диапазоне E5 будет передаваться сигнал AltBOC, который является комбинацией нескольких сигналов в частотных диапазонах E5a и E5b.

В табл. 2 приводятся сигналы, которые передаются и планируются в системе GALILEO.

В китайской навигационной системе COMPASS предполагаются к передаче сигналы в перекрывающихся с системами GALILEO и GPS диапазонами. В японской системе QZSS будут передаваться сигналы, полностью совместимые с сигналами будущей системы GPS в диапазонах L1 (1575.42 МГц), L2 (1227.60 МГц) и L5 (1176.45 МГц).

На рис. 1 приводятся квадратуры сигналов для некоторых навигационных систем в разных частотных диапазонах.

2. Приемник спутниковых навигационных сигналов. Общее построение приемника иллюстрируется рис. 2 [2]. На данном рисунке приведен пример структуры многоканального навигационного приемника для приема сигналов систем ГЛОНАСС и GPS в двух частотных диапазонах L1 и L2.

На рис. 2 штрих-пунктиром выделены основные части навигационного приемника. На вход приемника поступают радиосигналы с выхода антенны, в состав которой входит собственно антенный элемент и малощумящие усилители (МШУ).

Таблица 1

Сигналы системы GPS

Диапазон	Частота	Код	Модуляция
L1	1575.42 МГц	C/A,P(Y),L1C	BPSK(1), BPSK(10), TMBOC(BOC(1,1),BOC(6,1))
L2	1227.60 МГц	L2C,P/Y	BPSK(1),BPSK(10)
L5	1176.45 МГц	L5	BPSK(10)

Таблица 2

Сигналы системы GALILEO

Диапазон	Частота	Код	Модуляция
E1(L1)	1575.42 МГц	L1C	CBOC(BOC(1,1),BOC(6,1)) BOC(15,2.5)
E6	1278.75 МГц		BPSK(5), BOC(10,5)
E5 (E5a,E5b)	1176.45 МГц, 1207.14 МГц	AltBOC(15,10)	AltBOC(15,10)

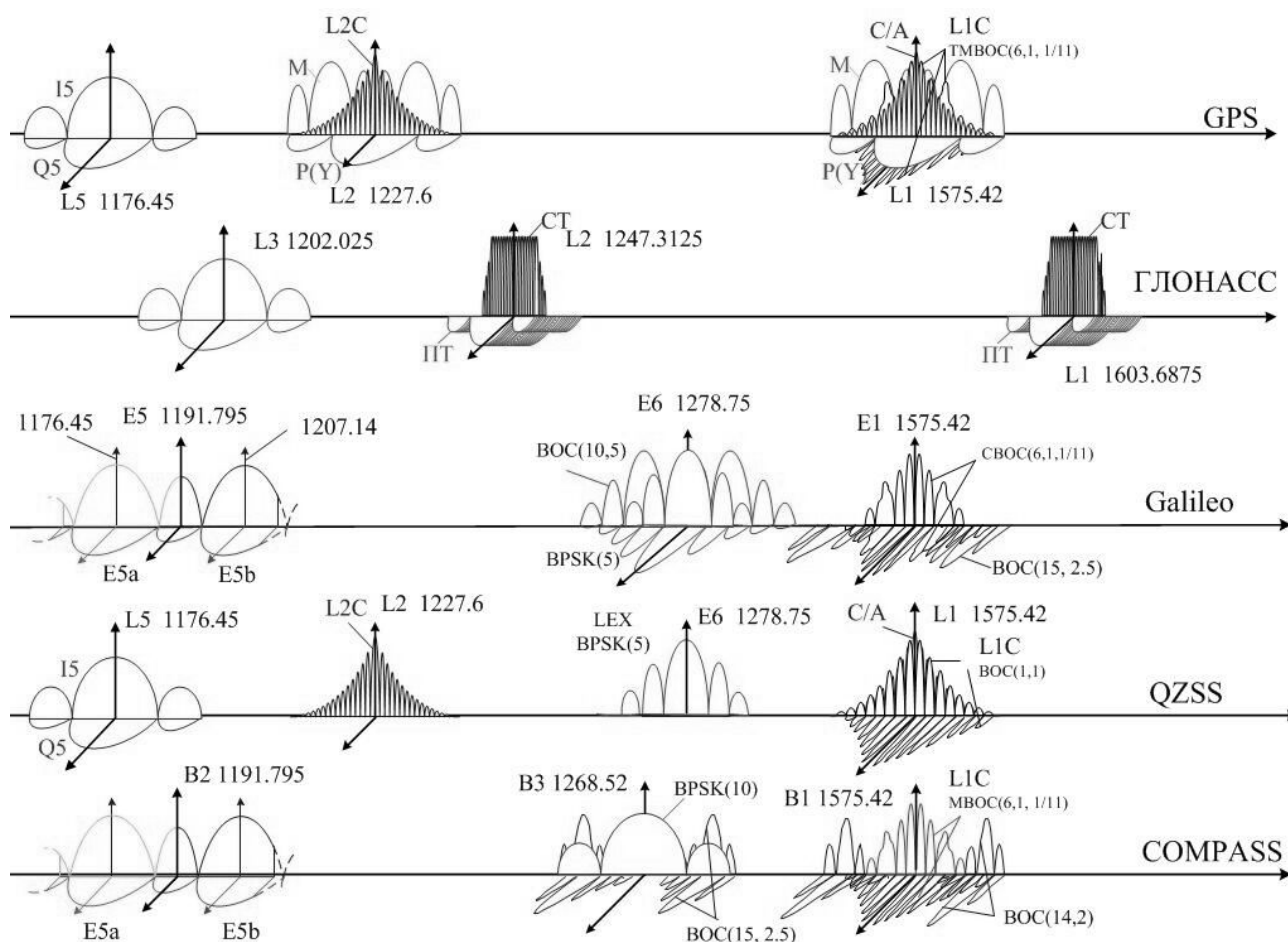


Рис. 1. Спектры сигналов навигационных систем



Рис. 2. Блок-схема многоканального навигационного приемника

Аналоговая часть приемника производит супергетеродинную обработку принимаемых сигналов (усиление, преобразование частоты, фильтрацию). Заканчивается эта часть аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП). Дальнейшая цифровая обработка производится в аппаратной цифровой части, обычно – в специализированной большой интегральной схеме (СБИС или английское название – Application Specific Integral Circuit (ASIC)), которая является основной базовой частью приемника. В этой части цифровой обработки реализуют те алгоритмы или их фрагменты, которые требуют высокого быстродействия и параллельности обработки сигналов. В процессе этой обработки происходит сжатие спектра широкополосного входного сигнала, что позволяет на несколько порядков снизить частоту поступления чисел в цифровую программную часть. В программной части реализуют относительно медленные алгоритмы обработки, требующие, однако, более развитой логики и расширенных арифметических возможностей. Для выполнения этих алгоритмов используется центральный процессор (ЦП), который выполняет программу из блоков памяти (ПЗУ и ОЗУ) приемника. Универсальный характер программной реализации алгоритмов позволяет совместить в процессоре различные по характеру алгоритмы поиска и обнаружения сигналов, синхронизацию и демодуляцию двоичных символов информационной посылки, синхронизацию несущего и модулирующего колебаний и др.

Построение приемника (особенно его аналоговой части) существенно зависит от количества частотных диапазонов (только L1; или L1 плюс L2; или L1 плюс L2 плюс L5 и т. д.) и от количества используемых систем (GPS; или GPS плюс ГЛОНАСС; или GPS плюс ГЛОНАСС плюс GALILEO и т. д.).

Радиосигналы, принятые антенной, вначале разделяются по аналоговым каналам, каждый из которых принимает сигналы от множества спутников в одном частотном диапазоне. Затем обработка выполняется в индивидуальном цифровом аппаратном канале.

Как было сказано выше, базовым элементом навигационного приемника является СБИС (ASIC), которая выполняет основную цифровую обработку сигналов. В первых поколениях ASIC реализовывали только цифровые навигационные каналы, но в дальнейшем широкое распространение получили «Системы-на-кристалле». При этом в ASIC реализуется практически вся цифровая часть навигационного приемника.

На рис. 3 приведена фотография многоканального мультисистемного навигационного приемника с использованием Vanguard ASIC.

Этот приемник имеет 226 навигационных каналов и позволяет принимать все сигналы навигационных систем GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, COMPASS, QZSS, которые сейчас излучаются. Используемый в этом приемнике ASIC, является Системой-на-кристалле с цифровыми навигационными каналами

и интегрированными процессорами для цифровой обработки сигналов с поддержкой массива оперативной памяти и множеством различных интерфейсов [3].

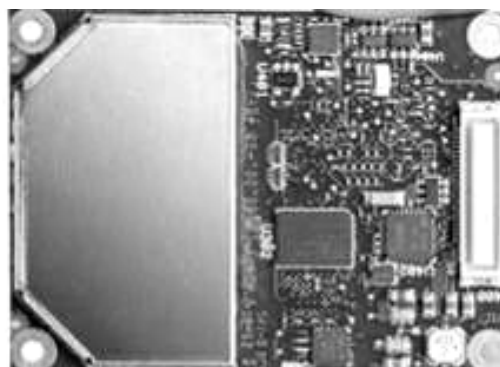


Рис. 3. Мультисистемный навигационный приемник

3. Специальные методы обработки сигналов для сложных условий работы. Существует определенный круг приложений, где не важна абсолютная точность, а важно иметь высокую точность в некоторой локальной системе координат с центром в точке, координаты которой были определены в первый момент времени навигационным приемником. Для этого существует метод *локального позиционирования*, который позволяет использовать неоднозначные фазовые измерения по несущей частоте в течение некоторого промежутка времени для определения приращений координат и при этом получать достаточно высокую относительную точность. Примером приложений для данного метода может быть сельское хозяйство, когда трактор или комбайн должен работать на огромной пашне в отсутствии ориентиров.

Использование наряду с кодовыми измерениями еще и фазовых измерений, как известно, позволяет значительно увеличить точность позиционирования. Однако, в ГНСС фазовые измерения неоднозначны (неизвестно целое количество длин волн) и для их полноценного использования при позиционировании необходимо производить целочисленное разрешение неоднозначностей, что возможно только при наличии измерений с базовой станции. Метод локального позиционирования основывается на использовании приращений фаз несущих частот без разрешения неоднозначности, что в ряде случаев обеспечивает высокую точность, даже если применяется только одиночный приемник. Такие измерения весьма эффективны на ограниченных интервалах времени, но постепенно теряют точность из-за накопления ошибок [4]. На рис. 4 приводятся результаты оценки точности такого позиционирования как плановая ошибка в метрах. Из приведенного примера видно, что в течение 2500 сек, можно было обеспечить точность локальных координат в пределах 10–20 см, тогда как в режиме абсолютного позиционирования отмечались скачки и дрейф ошибки с отклонениями до 80 см.

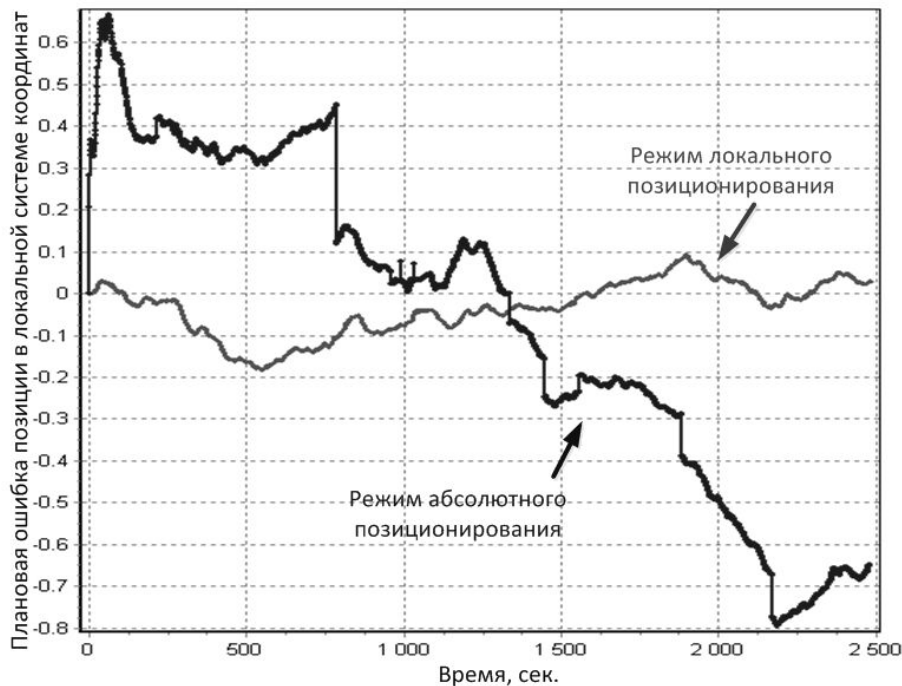


Рис. 4. Плановая ошибка в локальной системе координат в режиме абсолютного позиционирования и локального позиционирования

В процессе работы навигационная аппаратура, установленная на подвижном объекте, может подвергаться сильным динамическим возмущениям из-за тряски при движении, толчков при действиях работающих агрегатов и вибрациях от работы двигателя. Это влияет на кварц опорного генератора, вызывая уход его частоты, и приводят к фазовым ошибкам слежения и даже к срыву слежения за сигналами спутников.

Существует возможность демпфирования опорного генератора по сигналам спутников за счет создания в приемнике многоконтурной следящей системы с использованием общей кварцевой петли (ОКП). Алгоритм ОКП заключается в том, что в дополнение к индивидуальным петлям слежения за сигналом каждого спутника, реализуется широкополосная петля управления, использующая сигналы от всех спутников и формирующая общий для всех спутниковых каналов сигнал ошибки. Этот общий сигнал ошибки возникает при наличии воздействия на опорный генератор приемника, каким является механическое воздействие на его корпус. Общий сигнал ошибки вычисляется в дискриминаторе ОКП и с большой частотой выдается на управляемый генератор каждого спутникового канала [5]. На рис. 5 приводится блок-схема такой ОКП. Сигнал после аналогового радиотракта и аналого-цифрового преобразователя поступает на N входов аппаратных цифровых каналов (Correlator), в которых осуществляется предварительная цифровая обработка сигналов. Выходные значения (I, Q) с каждого цифрового канала используются в индивидуальной петле слежения за фазой прини-

маемого сигнала (ФАП) от навигационного спутника. В индивидуальной петле слежения сигналы последовательно поступают на индивидуальный дискриминатор (Discriminator), с которого сформированная ошибка слежения поступает на петлевой фильтр (LF) и затем в качестве сигнала управления поступает на цифровой управляемый генератор (NCO), который формирует цифровые отсчеты опорных колебаний для цифрового аппаратного канала. Также выходные значения (I, Q) каждого канала поступают на единый дискриминатор (Discriminator of common quartz loop) общей кварцевой петли, с выхода которого формируется общий сигнал ошибки, который подается в каждый индивидуальный канал.

4. Ошибка многолучевости в навигационном приемнике. При работе по сигналам спутниковых навигационных систем одной из существенных ошибок измерений является ошибка многолучевости. В литературе описано много разных решений по подавлению ошибки многолучевости. Например, известна технология Narrow Correlator, стробовые методы, MEDLL и др. Эти технологии различаются по сложности реализации и по эффективности подавления многолучевости.

Более подробно рассмотрим обработку сигнала при использовании стробовых методов. Метод предназначен для уменьшения ошибки многолучевости с помощью корреляции входного псевдослучайного сигнала с особым опорным сигналом - стробовой последовательностью, состоящей из импульсов (стробов) со специально подобранной формой. Устройства, выполняющие операцию вычисления корреляции,

т. е. операцию умножения сигнала на стробовую последовательность и последующего интегрирования, называют *стробовыми корреляторами*. На основе выходных сигналов (чисел) стробовых корреляторов строятся дискриминаторы следящих систем с уменьшенной ошибкой многолучевости.

Инструментом по уменьшению ошибки многолучевости в данном случае является форма строба. При усложнении формы строба (по сравнению с простой прямоугольной) часто возникает взаимобмен (взаиморазмен) между многолучевой и шумовой ошибками. В первых работах выбор формы строба осуществлялся эмпирическим путем, а затем у строба с такой формой начинали варьироваться временные параметры для обеспечения подавления ошибки многолучевости при приемлемой шумовой ошибке [6; 7]. В реальных условиях ошибка кодовых измерений зависит от внешних воздействий и, прежде всего, от влияния отраженных сигналов и собственных шумов. В первом приближении эти воздействия можно рассматривать отдельно и оценивать шумовую ошибку и ошибку многолучевости для заданного сигнала, заданной частотной характеристики радиотракта и структуры стробового коррелятора.

Для некоторых новых сигналов был произведен расчет огибающей ошибки многолучевости при стробе в виде одиночного прямоугольного импульса. При изменении задержки отраженного сигнала относительно прямого, кодовая ошибка многолучевости колеблется с изменением величины ошибки между максимальным положительным и отрицательным значением, но производился расчет только для максимальных положительных и отрицательных ошибок.

На рис. 6 приведены *огibaющие* кодовой ошибки многолучевости (в зависимости от задержки отраженного сигнала) для сигнала с тактовой частотой кода 10.23 МГц. При расчетах использовалась модель зеркально отраженного сигнала с амплитудой в два раза меньше прямого сигнала и радиотракт приемника с полосой 20 МГц.

На рис. 7 приводятся огибающие ошибки многолучевости для сигналов ВОС(1,1) и сигнала ВОС(6,1). При этом все величины на рис. 7 приводятся в относительных величинах относительно длительности C/A кода GPS. Результаты расчетов показывают, что максимальная ошибка многолучевости для сигнала ВОС(6,1) несколько меньше, чем для сигнала BPSK(10).

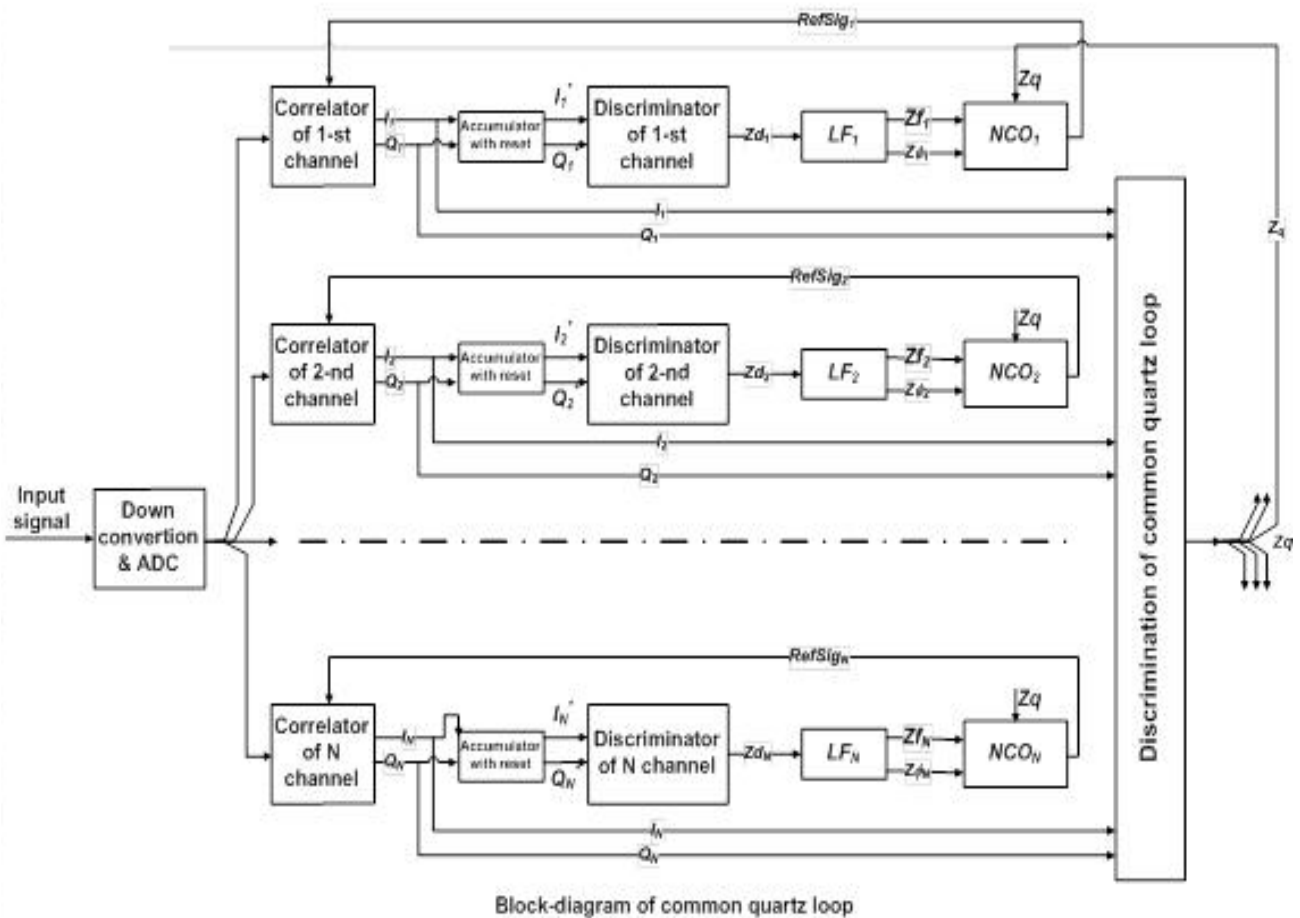


Рис. 5. Блок-схема общей кварцевой петли

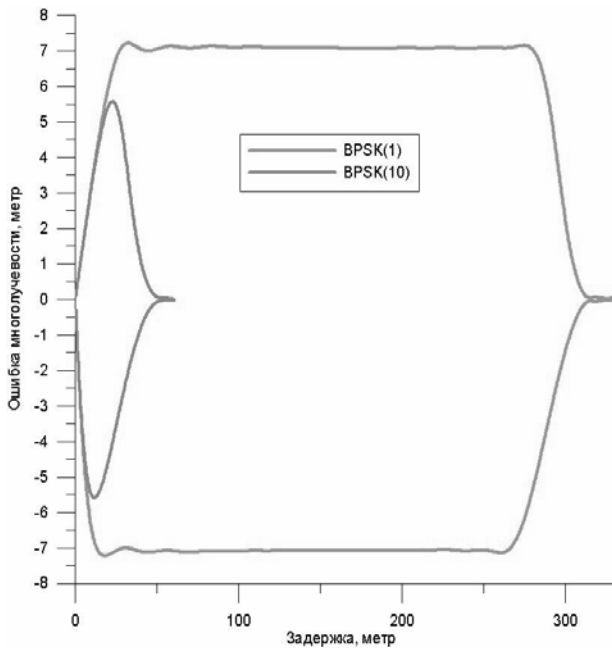


Рис. 6. Ошибка многолучевости BPSK сигналов

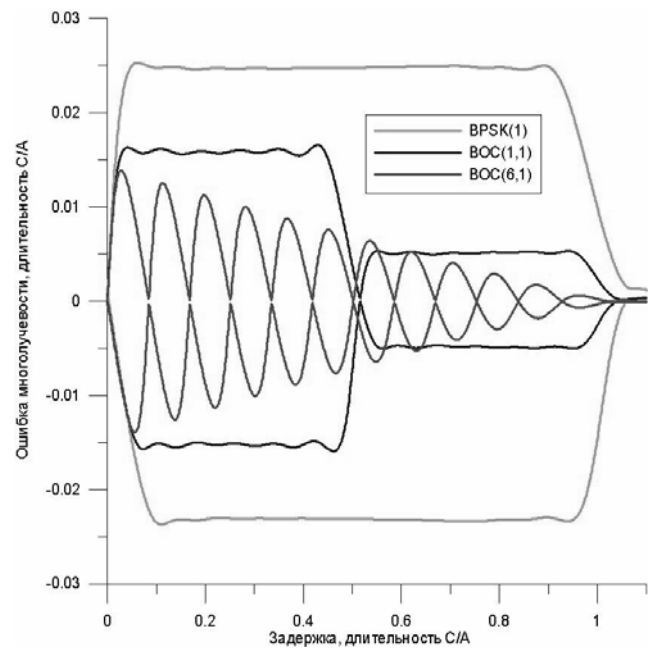


Рис. 7. Ошибка многолучевости BOC сигналов

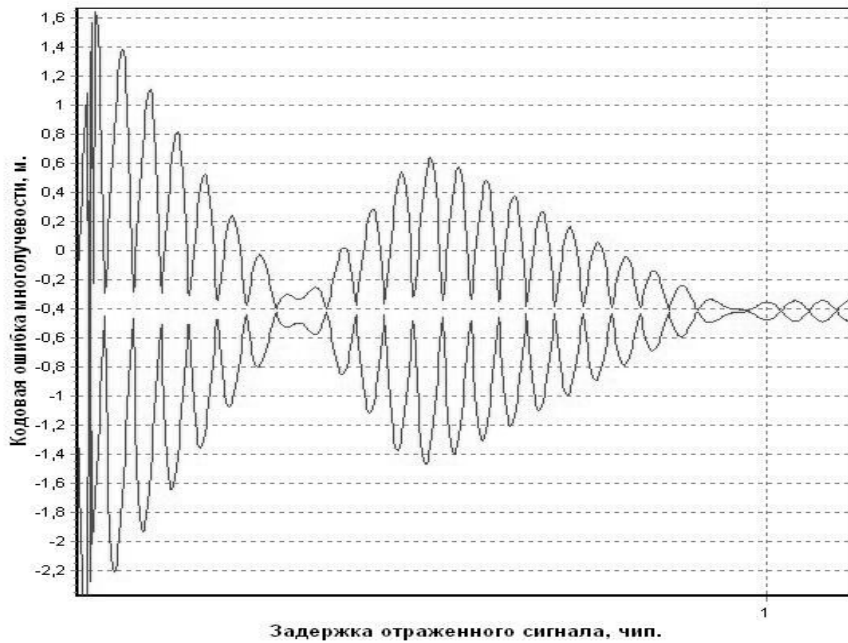


Рис. 8. Огибающая ошибки многолучевости для сигнала DuoBOC(12,1,1)

Существуют новые широкополосные сигналы, которые дают возможность использовать общие частотные диапазоны для GPS и ГЛОНАСС. Один из таких сигналов DuoBOC(12,1,1) приводится в статье [8]. Этот сигнал основывается на сигнале BOC(1,1), но имеет дополнительную модуляцию на основе меандрового колебания с тактовой частотой 12.276МГц. При этом этот сигнал имеет спектральные составляющие как в диапазоне ГЛОНАСС L1, так и в диапа-

зоне GPS L1 и общая полоса сигнала более 40 МГц. На рис. 8 приводится огибающая ошибки многолучевости для сигнала DuoBOC(12,1,1) предложенного в этой работе сигнала при изменении задержки отраженного сигнала относительно прямого до длительности элемента C/A кода GPS.

В табл. 3 приводятся результаты расчета ошибки многолучевости для разных сигналов при указанных выше параметрах отраженного сигнала.

Кодовые ошибки многолучевости

Тип сигнала	Максимальная ошибка кодовой многолучевости, метр
C/A BPSK(1)	7,284
ВОС(1,1)	3,86
ВОС(10, 5)	2,8
ДuoВОС(12,1,1)	2,341

Результаты исследования показывают, что широкополосный сигнал класса DuoВОС обладает наилучшими точностями показателями за счет уменьшения многолучевой ошибки.

Библиографические ссылки

1. Борискин А. Д., Вейцель А. В., Вейцель В. А., Жодзишский М. И. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных спутниковых навигационных систем: приемники-потребители навигационной информации : монография / под ред. М. И. Жодзишского. М. : Изд. МАИ-Принт, 2010.
2. Поваляев А. А., Вейцель А. В., Мазепа Р. Б. Глобальные спутниковые системы синхронизации и управления движением в околоземном пространстве : учеб. пособие. М. : Вузовская книга, 2012.
3. URL: <http://www.topconpositioning.com/products/gps/receivers/hiper-v/vanguard-technology>
4. Никитин Д. П., Вейцель А. В. Экспериментальное исследование характеристик локального позиционирования в автономном режиме работы навигационного приемника // Информационно-измерительные и управляющие системы. М. : Радиотехника, 2012. № 8.
5. Белоглазов В. В., Вейцель А. В. Алгоритмы обработки сигналов в навигационных приемниках для высокоточного временного обеспечения // Метрология времени и пространства : материалы 6 Междунар. симпозиума. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». 2012.
6. Вейцель А. В., Вейцель В. А., Татарников Д. В. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных спутниковых навигационных систем: Высокоточные антенны. Специальные методы повышения точности позиционирования : монография / под ред. М. И. Жодзишского. М. : Изд. МАИ-Принт, 2010.
7. Вейцель В. А., Вейцель А. В. Радиоприемники спутниковых систем определения координат. М. : Вузовская книга, 2013.
8. Вейцель А. В. Новый класс меандровых шумоподобных радиосигналов для радионавигационных

систем // Вестник МАИ. М. : Изд-во «МАИ», 2009. Т. 16. № 7.

References

1. Boriskin A. D., Veytsel A. V., Veytsel V. A., Zhodzishsky M. I. *Apparatura visokotochnogo pozicionirovaniya po signalam globalnih navigatsionnih system: priemniki potrebiteli navigatsionnoy informatsii* (Apparatus for high accuracy positioning on the signals of global satellite navigation systems: Receivers-consumers of navigation information). Moscow, MAI-Print, 2010.
2. Povalayev A. A., Veytsel A. V., Mazepa P. B. *Globalnie sputnikovye sistemi cinhronizatcii i upravleniya dvizheniem v okolozemnom prostranstve* (Global satellite synchronization system and motion control in near-Earth space). Moscow, Vuzovskaya kniga, 2012.
3. Available at: <http://www.topconpositioning.com/products/gps/receivers/hiper-v/vanguard-technology>.
4. Nikitin D. P., Veytsel A. V. *Informatsionno-izmeritel'nyye i upravlyayushchiye sistemy*. Moscow, Radiotekhnika, Informatsionnye systemi. 2012. № 8.
5. Beloglazov V. V., Veytsel A. V. *Algoritmi obrabotki signalov v navigatsionnih priemnikah dly visokotochnogo vremennogo obespecheniya*. Mendeleev, 6-oy simpozium, VNIIFTRI, 2012.
6. Veytsel A. V., Veytsel V. A., Tatarnikov D. V. *Apparatura visokotochnogo pozicionirovaniya po signalam globalnih sputnikovih system: visokotochniye anteny. Specialnye metody povisheniya tochnosti pozicionirovaniya* (Apparatus for high accuracy positioning on the signals of global satellite navigation systems: High-precision antennas. Special techniques to improve the positioning accuracy). Moscow, MAI-PRINT, 2010.
7. Veytsel V. A., Veytsel A. V. *Radiopriemniki system opredeleniya koordinat* (Radio positioning satellite systems). Moscow, Vuzovskaya kniga, 2013.
8. Veytsel A. V. *Vestnik MAI*, 2009, Vol. 16, №7.