

на правах рукописи

УДК 621.396.99

Карутин Андрей Николаевич

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ
НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ В КОМПЛЕКСЕ
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДОПОЛНЕНИЯ ГЛОНАСС**

Специальность 05.12.14— Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2016

Работа выполнена в АО «Российские космические системы»

Научный доктор технических наук, профессор
руководитель: **Харисов Владимир Назарович**

Официальные доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО
оппоненты: «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»
Поваляев Александр Александрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
АО «Научно-исследовательский институт приборостроения
имени В.В. Тихомирова» (АО «НИИП»)
Перьков Александр Евгеньевич

Ведущая Федеральное государственное унитарное предприятие
организация: «Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш)

Защита состоится 15 декабря 2016 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.141.11 в Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва,
2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте
www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью
учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская
ул., д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного
совета Д 212.141.11.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.11
доктор технических наук, профессор



И.Б.Власов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В результате выполнения федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система» в 2011 г. орбитальная группировка системы ГЛОНАСС была восстановлена до штатного состава в количестве 24 навигационных космических аппаратов (НКА), что обеспечило предоставление услуг навигационно-временных определений (НВО) в глобальном масштабе с погрешностью 2,8 м (СКО). Такая точность удовлетворяет требованиям широкого круга потребителей. Вместе с тем, расширяется круг практически важных задач, при решении которых предъявляются более высокие требования к точности и целостности НВО, а также к объему и составу служебной информации (СИ), передаваемой потребителю с борта НКА.

Проблему дальнейшего повышения точности и целостности НВО глобальных (ГНСС) и региональных (РНСС) навигационных спутниковых систем решают путем создания функциональных дополнений (ФД) – специальных комплексов наземного и космического базирования, обеспечивающих потребителей необходимой дополнительной информацией.

В настоящее время в системе ГЛОНАСС создана и введена в эксплуатацию система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) – функциональное дополнение, которое обеспечивает потребителя контрольной информацией (КИ) для достижения точности НВО на уровне 1 м (СКО) и информацией о целостности (ИЦ) со временем доставки 10 с.

В рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» поставлена задача создания на базе СДКМ высокоточного комплекса функционального дополнения (КФД) ГЛОНАСС, обеспечивающего в глобальном масштабе предоставление потребителям услуг высокоточных навигационных определений с погрешностью 0,1 м (СКО) в реальном времени и доставку сигналов тревоги о нарушении целостности за время менее 6 с.

Решение поставленной задачи достигается, прежде всего, за счет дополнения структуры СДКМ новыми структурами сигналов. Технология SBAS (Satellite Based Augmentation System) реализуется (WAAS, EGNOS) за счет трех НКА на геостационарных орбитах (ГСО), выполняющих функции ретрансляторов высокоточной КИ, которая будет доступна пользователям всех ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Compass), а также РНСС (QZSS, IRNSS).

Достижение указанной выше точности НВО позволит на новом уровне подойти к использованию аппаратуры потребителя (АП) в сельском хозяйстве, при добыче полезных ископаемых и строительстве, картографировании и геоинформационных работах, в авиации, на морском и речном транспорте,

железнодорожном транспорте, в жилищно-коммунальном хозяйстве и других отраслях. Требования к точности НВО (требуемое значение СКО измерений), несмотря на существенные различия условий, в которых выполняются работы, в частности особенностей наблюдения (затенения и переотражения) сигналов, имеют порядок $0,03 \dots 0,1$ м.

Принципиально важно, что высокоточные НВО могут быть реализованы только при условии передачи потребителю расширенного, по сравнению со стандартным режимом, объема КИ, включающей высокоточную эфемеридно-временную информацию (ЭВИ) радиосигналов НКА, дополнительную ассистирующую информацию о параметрах вращения Земли и т.д. Принятые в работе требования, которым должна удовлетворять скорость передачи в радиолинии, предназначенной для передачи необходимой при высокоточных измерениях эфемеридной и временной информации, базируются на следующих оценках и предположениях.

Определяющим здесь является интервал корреляции соответствующей величины, иными словами интервал времени, на котором сохраняет актуальность прогноз ее изменения. Точность прогноза эфемерид слабо зависит от времени, что естественно, поскольку движение НКА практически полностью определяется детерминированными законами. На интервале времени порядка 1 часа СКО прогноза эфемерид имеет порядок 1 см.

Напротив, СКО прогноза частотно-временной поправки (ЧВП), возрастает во времени по закону, близкому к линейному, причем интервал времени, на котором прогноз ЧВП сохраняет требуемую (погрешность прогноза не более 0,5 м) точность, не превышает 60 с.

Анализ тенденций развития глобальных и региональных навигационных спутниковых систем, а также их ФД(СДКМ, WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN), позволяет прогнозировать, что в ближайшее 10-летие (2015–2025) число НКА достигнет 200–210 единиц.

В соответствии с приведенными оценками и предположениями в главе 1 выполнен расчет скорости передачи в радиолинии, необходимой для передачи требуемых объемов КИ, ИЦ и СИ при максимальном возможном количестве НКА. Результаты расчета показывают, что если допустимая погрешность прогноза эфемерид сохраняется на интервале 5 мин, а ЧВП – 30 с, необходимая скорость передачи КИ, ИЦ и СИ для всей совокупности НКА составит 3360 бит/с.

Такая скорость передачи существенно превышает пропускную способность стандартного канала передачи информации НКА ГЛОНАСС, в котором используется принцип последовательной передачи навигационной информации путем двоичной фазовой манипуляции навигационного

(дальномерного) сигнала, что обеспечивает скорость передачи 50...250 бит/с, т.е. в 10 и более раз ниже, чем требуется в КФД.

Максимальная скорость передачи данных в существующих структурах сигналов составляет 1744 бит/с (сигнал LEX системы QZSS) или 1000 бит/с (использование модификации сигнала E1 системы Galileo) без учета помехоустойчивого кодирования.

Необходимо отметить, что в интересах потребителей GPSпередача корректирующей информации осуществляется в региональной навигационной системы QZSS, зарубежных коммерческих систем StarFire (максимальная скорость 100 бит/с) и OmniSTAR (максимальная скорость 1 200 бит/с). Следовательно, ни один из существующих навигационных радиосигналов ГНСС и их ФД не может обеспечить требуемую скорость передачи КИ в КФД.

Таким образом, актуальность данной работы обусловлена необходимостью разработки структуры нового сигнала, позволяющего передавать с недостижимыми в настоящий момент скоростями КИ, СИ и ИЦ потребителям КФД ГЛОНАСС, решающим задачи высокоточного местоопределения. При этом необходимо максимально использовать известные технические решения, апробированные в процессе эксплуатации ГНСС и РНСС: использование общей несущей для передачи как дальномерного (навигационного) сигнала, так и указанной выше служебной информации.

Как показано в диссертации, увеличение скорости передачи информации может быть основано на использовании квазиортогональных M -ичных сигналов, причем каждый из таких сигналов способен передавать одновременно m бит информации. Это позволяет при той же занимаемой полосе частот сигнала увеличить скорость, поскольку возможно получение ансамбля из $M = 2^m$ сигналов. Такие сигналы могут быть сформированы за счет циклического сдвига уже существующих M -последовательностей ГНСС. Полученные таким способом сигналы являются квазиортогональными. Получение квазиортогональных сигналов на базе псевдослучайной последовательности (ПСП) ГНСС позволит избавиться от основного недостатка ортогональных сигналов – расширения полосы частот, которая для ортогональных сигналов в разы больше, чем у привычных для связи сигналов с фазовой модуляцией. В случае сигнала на базе ПСП ГЛОНАСС отсутствует проблема по ширине занимаемой полосы, так как сигнал изначально занимает полосу частот, достаточную для передачи информации со скоростью 3360 бит/с. Поэтому следует только воспользоваться всей выделенной полосой частот и скорость передачи информации повысится в разы.

На основе дальномерных кодов стандартных сигналов ГЛОНАСС диапазонов L2 и L1, представляющих собой 511-битовые

M-последовательности, можно получить ансамбли из 511 квазиортогональных сигналов. Однако сигналы L1 и L2 ГЛОНАСС уступают последовательностям, использованным в перспективном сигнале диапазона *L3* ГЛОНАСС, которые представляют собой укороченные последовательности Касами длиной 10230 элементов. Такая длина дает возможность реализовать, в соответствии с числом максимально возможных циклических сдвигов, до 10230 квазиортогональных сигналов. В диссертации показано, что большое количество возможных квазиортогональных сигналов позволяет построить систему синхронизации канала связи без использования дополнительных синхронизирующих сигналов.

В диссертации предлагается совместное использование квазиортогональных сигналов и недвоичного помехоустойчивого кода. В качестве недвоичного кода выбран код Рида–Соломона, поскольку он обладает минимальным кодовым расстоянием среди блочных кодов. Такая комбинация (квазиортогональные сигналы и код Рида–Соломона) позволяет приблизиться к границе Шеннона.

Аналогичное решение использовано в японской системе QZSS, где наиболее скоростным и перспективным является экспериментальный сигнал LEX. Структура формирователя сигнала представлена на Рис. 1. При таком способе формирования сигнал LEX состоит из двух составляющих: синхронизирующей и информационной. Модулирующие символы каждой из составляющих формируются с частотой 2,5575 МГц, а на выходе коммутируются с частотой 5,115 МГц. Информация передается с помощью ортогональных сигналов, общее количество которых составляет 256. Квазиортогональный сигнал, используемый для передачи выбирается в зависимости от входной комбинации восьми информационных бит. Скорость передачи составляет 2000 бит/с. Для повышения помехоустойчивости цифровой информации используется код Рида–Соломона (255, 223).

Сигнал LEX является по структуре наиболее близким к предлагаемому в диссертации сигналом. Отличительная особенность LEX – наличие пилот-сигнала для синхронизации, который посимвольно чередуется с информационным. Чередование сигналов происходит на выходе формирователя сигналов с помощью ключа. Генератор меандра предназначен для получения модуляции ВОС (*binary offset carrier*). В работе показано, что использование дополнительного сигнала для синхронизации необязательно, что позволяет выиграть дополнительные 3 дБ по мощности.

Похожие ортогональные сигналы используются в GALILEO. Вместо кода Рида–Соломона применяется код с малой плотностью проверок на четность (*low-density parity-check* – LDPC). Полезная скорость передачи информации составляет 1 000 бит/с.

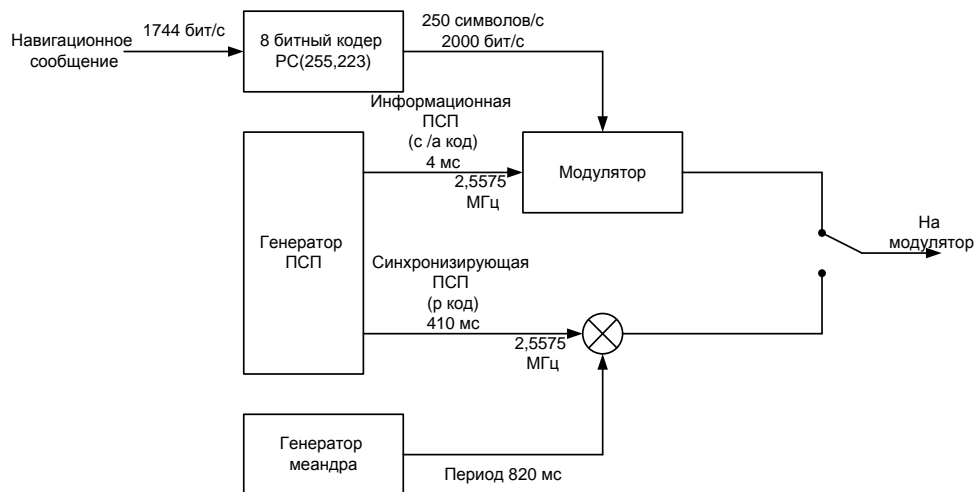


Рис.1. Схема формирования сигнала LEX

Анализ показывает, что существующие сигналы не могут полностью удовлетворить требования к скорости передачи информации в КФД. Предложенная в диссертационной структуре сигнала выигрывает у существующих как по скорости передачи, так и по помехоустойчивости, кроме этого позволяет осуществить синхронизацию системы без дополнительных пилот-сигналов или синхровставок.

Цель диссертационной работы—создание новой структуры сигнала для высокоскоростной передачи навигационной информации потребителям высокоточного комплекса функционального дополнения ГЛОНАСС.

Для достижения поставленной цели исследования проводились по следующим **основным направлениям**:

- разработка и обоснование структуры сигнала на основе навигационного сигнала диапазона L3 ГЛОНАСС, позволяющего передавать КИ, ИЦ и СИ со скоростью до 3360 бит/с;
- разработка алгоритмов приема, синхронизации канала связи, а также анализ характеристик системы, использующей предложенную структуру сигнала, со скоростью передачи информации 3360 бит/с.

При этом решены следующие **основные задачи**:

- по результатам анализа перспективных требований потребителей к скорости передачи информации при высокоточных навигационных определениях и соответствия этим требованиям параметров существующих каналов передачи навигационной информации обоснована необходимость разработки новой структуры сигнала для удовлетворения указанных требований;
- предложен метод повышения скорости передачи навигационной информации для высокоточного комплекса функционального дополнения ГЛОНАСС;
- оценены потенциальные характеристики помехоустойчивости рассматриваемой структуры сигнала, позволяющей передавать информацию с

высокой скоростью, и проведено сравнение помехоустойчивости с существующими сигналами;

- предложена и обоснована структура сигнала для КФД (количество ортогональных сигналов и параметры кода Рида-Соломона) с наилучшей помехоустойчивостью и позволяющая передавать информацию с требуемой скоростью;

- разработан алгоритм синхронизации системы по ортогональным сигналам на базе ПСП ГЛОНАСС без дополнительных пилот-сигналов или синхровставок;

- проведено исследование разработанных предложений методами математического моделирования и подтверждена их эффективность при решении поставленной задачи.

Методы исследований. При решении поставленных задач в работе использован аппарат математического анализа, статистической радиотехники, теории вероятностей и случайных процессов, теории радиосистем передачи информации, статистического моделирования, вычислительной математики и программирования. Программная реализация предлагаемых методов повышения скорости передачи информации, а также моделирование систем синхронизации, выполнены в среде Matlab.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

- разработан метод повышения скорости передачи навигационной информации в КФД ГЛОНАСС за счет использования новой структуры сигнала на базе дальномерной ПСП ГЛОНАСС диапазона L3;

- составлена методика и соотношения для определения характеристик помехоустойчивости предлагаемой структуры сигнала;

- получены результаты математического моделирования помехоустойчивости предлагаемой структуры сигнала КФД ГЛОНАСС;

- обоснован выбор параметров сигнала для КФД ГЛОНАСС при заданной скорости с наилучшей помехоустойчивостью;

- разработан алгоритм синхронизации системы по предлагаемой структуре сигнала, полученной из ПСП сигнала ГЛОНАСС диапазона L3 без использования дополнительного пилот-сигнала.

Практическая значимость работы. Практическую ценность представляют следующие результаты работы:

- структура сигнала ГЛОНАСС в диапазоне L3 для высокоскоростной передачи ЭВИ для высокоточных навигационно-временных определений;

- методика, математические модели и полученные с их помощью оценки помехоустойчивости предложенного метода высокоскоростной передачи навигационной информации;
- алгоритм работы и параметры системы синхронизации для радиосигнала, сформированного из сигналов с циклическим сдвигом ПСП ГЛОНАСС без использования дополнительного синхронизирующего сигнала;
- циклические задержки для формирования 500 квазиортогональных сигналов из псевдослучайных последовательностей сигнала диапазона L3 ГЛОНАСС.

Положения, выносимые на защиту:

- метод повышения скорости передачи навигационной информации в КФД системы ГЛОНАСС за счет использования циклически сдвинутых сигналов ПСП ГЛОНАСС диапазона L3 и недвоичного помехоустойчивого кода;
- структура и параметры сигнала для повышения скорости передачи информации (количество ортогональных сигналов и параметры кода Ридда-Соломона);
- алгоритм синхронизации системы по предлагаемым сигналам, полученных из ПСП сигнала ГЛОНАСС диапазона L3, без дополнительных синхровставок или пилот-сигналов;
- методика, математические модели и полученные с их помощью оценки помехоустойчивости предложенной структуры сигнала для высокоскоростной передачи навигационной информации;
- структура радиосигнала КФД в диапазоне L3 для передачи высокоточной ЭВИ.

Реализация и внедрение результатов исследования. Алгоритмы, математические модели и методики использованы при выполнении НИР и ОКР в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы», выполненных в АО «Российские космические системы» в 2011–2015 годах, что подтверждено соответствующими документами.

Результаты диссертации использованы при проведении НИР «Комплекс» (2011 г.) и «Развитие» (2014–2015 г.) об исследовании направлений расширения функциональных возможностей системы ГЛОНАСС в части повышения помехоустойчивости, точности и чувствительности приема сигналов модернизируемой системы ГЛОНАСС, а также ОКР по теме «КФД-В» при разработке бортового ретрансляционного комплекса, выполненных АО «Российские космические системы» при непосредственном участии автора.

Апробация результатов. По результатам диссертации сделано четыре доклада на научно-технических конференциях:

1) V Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва, 2012 г.);

2) II Международная научно-техническая конференция «Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека» (Железногорск, 2012 г.);

3) VI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва, 2013 г.);

4) Научно-техническая конференция «Радионавигационные технологии в приборостроении» (Небуг, 2014 г.).

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации являются оригинальными и получены либо автором, либо при его непосредственном участии. Постановка задач, интерпретация результатов моделирования выполнены совместно с научным руководителем.

Автором самостоятельно выполнено следующее:

- математическое моделирование помехоустойчивости ортогональных сигналов;
- математическое моделирование помехоустойчивости предлагаемой структуры сигнала с различными параметрами (число ортогональных сигналов и параметры код Рида-Соломона);
- осуществлен выбор структуры сигнала, удовлетворяющей требованиям КФД ГЛОНАСС в части скорости передачи информации;
- разработана структура информационного кадра для передачи информации;
- расчет бюджета радиолинии передачи сигнала с борта космического аппарата до аппаратуры потребителя;
- осуществлен выбор значений задержек для циклического сдвига ПСП.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и решаемых в диссертационной работе задач, сформулирована цель и направление исследований, определен подход к решению задачи повышения скорости передачи навигационной информации в ГНСС, аргументированы научная новизна и ценность результатов.

В главе 1 проанализировано назначение и функции КФД ГЛОНАСС, сформулированы требования к каналу передачи информации с бортов геостационарных космических аппаратов, входящих в состав космического сегмента КФД. Обоснована требуемая скорость передачи информации с этих КА,

равная 3360 бит/с. Показано, что существующие сигналы ФД обеспечивают максимальную скорость передачи от 1000 бит/с (E1 Galileo) до 1744 бит/с (LEX, QZSS), т.е. не удовлетворяют предъявляемым требованиям, поэтому необходима разработка новой структуры сигнала, обеспечивающей требуемую информативность. Описаны два вида линейных кодов, используемых в ГНСС для помехоустойчивого кодирования: блочные и сверточные. Показано, что используемые в традиционных сигналах ГНСС блочные коды Хемминга не обеспечивают нужных показателей качества кодирования высокоскоростных сигналов. Более высокими показателями обладают сверточные коды, используемые в сигнале L3 ГЛОНАСС с кодовым разделением в сигналах L2C и L5 GPS, но для передачи сигналов со скоростями несколько килобит они тоже недостаточно эффективны.

Наиболее скоростным и перспективным с точки зрения задач, решаемых в диссертации, является сигнал LEX японской РНСС QZSS. Предложено рассматривать сигналы этого типа в качестве наиболее близкого прототипа высокоскоростного сигнала для КФД ГЛОНАСС. Однако, его характеристики не удовлетворяют требованиям КФД по скорости передачи информации. Кроме того, в сигнале LEX для синхронизации используется дополнительный пилот-сигнал, что снижает мощность информационного сигнала в 2 раза или на 3 дБ.

В главе 2 подробно исследована возможность использования для повышения скорости передачи навигационной информации квазиортогональных сигналов, которые могут быть получены за счет циклического сдвига дальномерных ПСП ГНСС. Уровень боковых лепестков корреляционной функции (КФ) для перспективных сигналов ГНСС не превышает минус 30 дБ, поэтому полученные таким способом сигналы можно считать квазиортогональными.

Предложен способ расчета помехоустойчивости ортогональных сигналов при когерентном и некогерентном приеме. Предложенный способ позволяет проводить расчет помехоустойчивости при больших количествах ортогональных сигналов. Сравнение результатов расчетов по предложенному способу с известными теоретическими границами (граница Шеннона, Фано) показало, что методика дает правильные результаты. Выполненный сравнительный расчет помехоустойчивости ортогональных сигналов при когерентном и некогерентном приеме показал, что помехоустойчивость некогерентного приема ортогональных сигналов уступает помехоустойчивости когерентного приема менее чем на 1 дБ.

Передача информации осуществляется следующим образом, каждому блоку из m бит входной цифровой последовательности ставится в соответствие один из $M = 2^m$ сдвигов ПСП, т.е. получаем M квазиортогональных сигналов. Причем сформированные таким способом сигналы не увеличивают ширину

занимаемой полосы частот, а скорость увеличивается в m раз, по сравнению с двоичной фазовой модуляцией. Каждому блоку $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_m\}$ из m бит входной цифровой последовательности можно сопоставить один из $M = 2^m$ сдвигов ПСП, в результате получаем M квазиортогональных сигналов. Такой способ построения сигналов называется манипуляция циклическими кодовыми последовательностями (cyclic code shift keying – CCSK). Принципы формирования и приема таких сигналов иллюстрируются Рис.2.

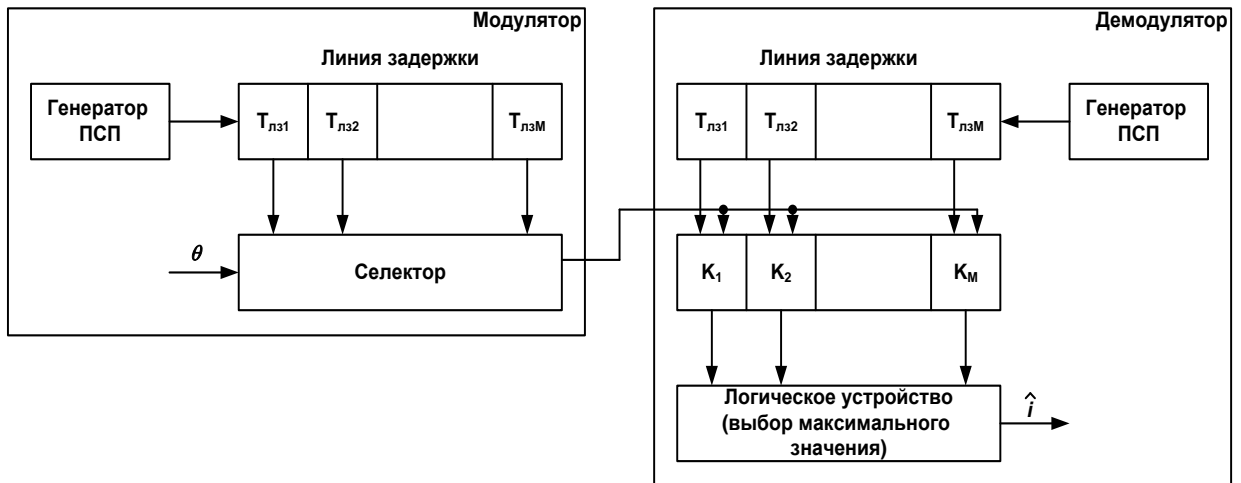


Рис.2. Схема модулятора и демодулятора
для сигналов с манипуляцией временным сдвигом

Формирователь (модулятор) состоит из линии задержки с M выходами, на вход которой поступает ПСП. Выходной мультиплексор (селектор) управляется блоком θ , пропуская на выход ПСП с соответствующим значению θ временным сдвигом. Демодулятор состоит из линии задержки, выходы которой являются опорными сигналами для M корреляторов, а также из логического устройства для определения максимального значения на выходах корреляторов. Номер коррелятора \hat{i} в двоичной системе исчисления является оценкой входного блока $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_m\}$.

С учетом сказанного и анализа влияния способа кодирования информации на структуру устройства и стоимость его технической реализации, а также на его быстродействие и надежность, предложено использовать недвоичный блочный код Рида–Соломона, который обладает минимальным кодовым расстоянием среди других кодов. Кодовые слова Рида–Соломона используются в качестве управляющего блока для модулятора с временным сдвигом, на выходе которого формируется итоговая кодовая последовательность, где каждому символу кода Рида–Соломона ставится в соответствие один из сдвигов ПСП. Всего для формирования структуры сигнала из квазиортогональных сигналов и кода Рида–Соломона потребуется число сдвигов (квазиортогональных сигналов) $M = 2^m - 1$.

Проведенное исследование помехоустойчивости предлагаемой структуры сигнала при различных значениях m (m – любое целое положительное число, равное числу бит информации, передаваемой одним квазиортогональным сигналом) и кодовой скорости кода Рида-Соломона показало, что при любых значениях кодовой скорости ($1/2, 2/3, 3/4, 7/8$) помехоустойчивость повышается при увеличении числа квазиортогональных сигналов ($M = 2^m - 1$) и длины блока кода ($N = M - 1$). При $m = 9$ и 12 значение отношения энергии одного бита информации к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 составляет соответственно 1,6 и 1,2 дБ при кодовой скорости $3/4$ при вероятности ошибки на бит 10^{-5} , что уступает границе Шеннона для той же кодовой скорости 0,7 и 0,3 дБ соответственно.

В главе 3 обоснован выбор параметров сигнала и кода Рида-Соломона для использования в комплексе ФД ГЛОНАСС. Предложено использовать ПСП сигнала L3 ГЛОНАСС, у которого период повторения равен 1 мс, а число элементов последовательности – 10230, т.е. максимально возможное количество реализуемых ортогональных сигналов тоже составляет 10230.

Проведенные в гл.3 расчеты для разных комбинаций длительности информационного символа и числе бит m позволяют сделать вывод, что при длительности информационного символа 2 мс заданная скорость (3360 бит/с) достигается при значениях $m \geq 7$. Увеличение длительности символа приведет к усложнению приемной аппаратуры, из-за большого количества квазиортогональных сигналов (4096 при $m = 12$ и 8192 при $m = 13$). Поэтому рекомендовано использовать информационные символы с длительностью 2 мс, при этом ограничиться числом $m \leq 10$, т.е. число корреляторов в приемнике не более 1024.

В КФД предлагается передавать информацию транспортными кадрами размером 4500 бит, в котором 3366 информационным бит и 1134 проверочных бита. В каждом кадре выделено 1050 информационных бит для передачи информации о целостности. Такой кадр получается при $m=9$ и укороченном коде Рида-Соломона (500, 383). Использование укороченного кода не ухудшает корректирующие свойства кода, а процедура декодирования практически не отличается от обычной. При такой структуре сигнала скорость передачи информации в радиоканале с учетом помехоустойчивого кодирования составляет 4 500 бит/с. Такой размер кадра при выбранной структуре сигнала позволяет получать потребителю информацию обо всех 210 НКА в течение 70 с (быстрее, чем за требуемые 90 с) и обновлять данные целостности каждую секунду. Если учитывать, что число реально существующих, функционирующих или видимых НКА будет меньше 210, то частоту обновления информации можно

повысить в рамках предложенной структуры кадра за счет повторной передачи информации в течение 70 с данных о работающих НКА вместо неиспользуемых.

В диссертации проведено исследование и показано, что наилучшая помехоустойчивость предлагаемой структуры сигнала достигается при кодовой скорости $r = 3/4$ кода Рида–Соломона. Это обусловлено тем, что при фиксированной длительности информационного символа увеличение числа проверочных символов в блочном коде не всегда обеспечивает уменьшение вероятности ошибки в символе. Наименьшая вероятность ошибки в блоке кода Рида–Соломона соответствует кодовой скорости $r=3/4$. На Рис.3 приведены результаты расчетов для различного энергопотенциала и постоянной скорости передачи 4500 бит/с при когерентном и некогерентном приемах при различных значения исправляемых символов в коде Рида-Соломона.

Сравнение описанного метода с методом формирования сигнала LEX, сигналом с ФМ2 и сверточным кодом или кодом Хемминга показали, что помехоустойчивость в КФД лучше остальных (Рис. 4). Использование других методов требует значительного увеличения энергопотенциала. Для сигнала LEX для передачи всего блока информации требуется использование нескольких кадров.

Для метода высокоскоростной передачи информации проанализирована радиолиния доставки информации потребителю. Полученные результаты показали возможность создания радиолинии с запасом по энергетике 3...5 дБ при необходимом энергопотенциале $C/N_0=38,1$ дБГц.

Сравнения представленной структуры сигнала для КФД ГЛОНАСС с ФМ2 со сверточным кодом или кодом Хемминга, а также сигналом LEX показали, что разработанный сигнал обеспечивает заданную скорость при наименьшем энергопотенциале по сравнению с другими сигналами с полезной скоростью передачи 3360 бит/с. Для ФМ2 и сверточного кода или кода Хемминга требуемый C/N_0 гораздо выше (42,25 и 45,8 дБГц соответственно), чем в предлагаемом методе для КФД (38,1 дБГц) или в сигнале LEX (38 дБГц) при вероятности битовой ошибки 10^{-5} . Энергопотенциал при использовании предлагаемого метода и сигнала LEX практически одинаковый. Причем кодовая скорость у сигнала LEX выше ($r=7/8$), т.е. избыточность в передаваемой информации будет ниже. Однако с точки зрения удобства использования структура КФД предпочтительнее, поскольку позволяет передавать информацию о целостности в каждом транспортном кадре кадром. Еще стоит, отметить, что сравнение проводилось без учета дополнительного синхронизирующего сигнала в LEX, т.е. в случае отказа в предлагаемой структуре сигнала от синхронизирующих сигналов (пилот-сигналов) можно повысить энергопотенциал еще на 3 дБ.

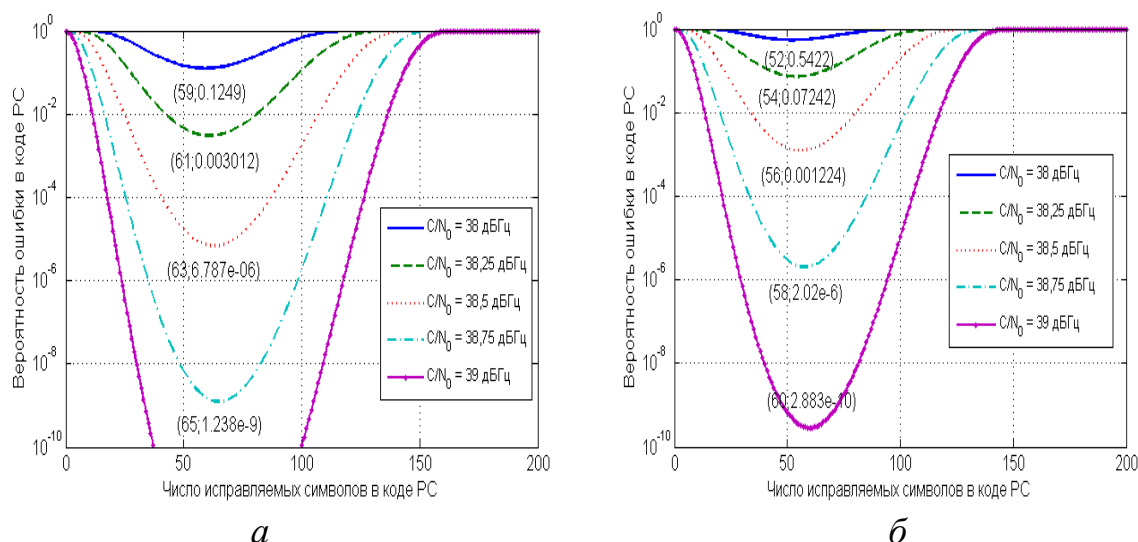


Рис.3.Вероятность ошибки в коде Рида–Соломона:*а* – при когерентном приеме; *б* – при некогерентном приеме

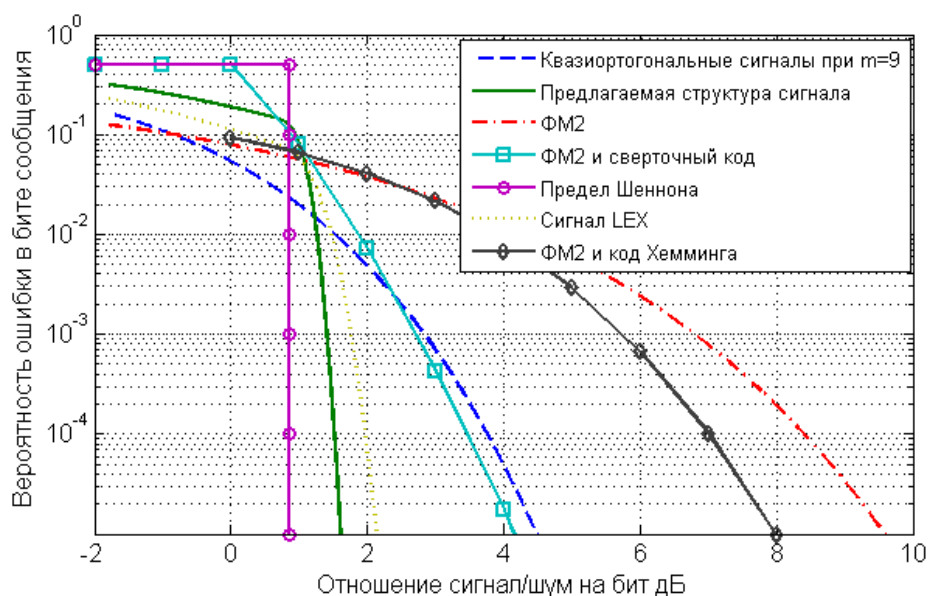


Рис. 4. Вероятность ошибки в бите сообщения

В главе 4 рассмотрены возможности синхронизации системы, использующей квазиортогональные сигналы без дополнительного пилот-сигнала.

Для синхронизации системы по сигналам с манипуляцией временным сдвигом можно традиционно воспользоваться специальным (дополнительным) пилот-сигналом. При этом выходная мощность передающего устройства поделится между пилот-сигналом и квазиортогональными сигналами, точно также как и в традиционных навигационных сигналах. За счет отказа от пилот-сигнала помехоустойчивость (ПУ) возможно повысить на 3 дБ и, как показано в диссертации, такое решение достижимо.

Особенность сигналов без пилот-сигнала состоит в том, что в них манипуляция искажает параметр, за которым осуществляется слежение систем синхронизации – сдвиг по времени.

В данной главе исследована возможность слежения за сигналами с манипуляцией циклическими кодовыми последовательностями по фазе и задержке сигнала. Для этого на базе методов оптимальной фильтрации синтезирован алгоритм слежения за такими сигналами, проведено исследование его характеристик методами имитационного статистического моделирования. Показано, что при рабочих уровнях сигнал-шум ($C/N_0=38$ дБГц) характеристики точности слежения за фазой и задержкой сигнала практически не отличаются от точности слежения за сигналами без модуляции целевой информации (пилот-сигналами).

Для входа в синхронизм по сигналам с манипуляцией временным сдвигом предлагается специальный выбор возможных значений сдвигов, обеспечивающий однозначное определение задержки сигналов без специальных синхронизирующих вставок (посылок). Предложен несложный в реализации алгоритм входа в синхронизм по таким сигналам. Методом имитационного статистического моделирования исследованы характеристики входа в синхронизм при рабочих уровнях энергопотенциала $C/N_0=38$ дБГц. Показано, что вход в синхронизм осуществляется после приема 5-6 квазиортогональных сигналов при вероятности ошибки приема сигнала 10^{-3} .

Для входа в синхронизм в диссертации предлагается специальный алгоритм. В каждом принятом квазиортогональном сигнале (информационном символе) содержится информация о задержке входного сигнала τ_0 и информационном сдвиге τ_i , являющемся одним из значений совокупности $\{\tau_i, i=\overline{1, M}\}$. Информационные сдвиги τ_i меняются вместе со значением информационных символов, однако каждый новый принятый символ обязательно содержит значение τ_0 . Поэтому в T последовательно принятых символов истинная задержка будет повторяться T раз. Другие значения тоже могут встречаться неоднократно, но с гораздо меньшей вероятностью.

Характеристики алгоритма существенно зависят от ансамбля задержек $\{\tau_i, i=\overline{1, M}\}$, которые должны выбираться неравномерно, т.е. отличного от равномерного выбора $\{\tau_i = i\Delta, i=\overline{1, M}\}$. Методом статистического моделирования проведен выбор наилучшего неравномерного ансамбля задержек.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа методов передачи навигационной информации в ГНСС, РНСС и их ФД установлено, что в КФД для повышения скорости передачи информации до 3360 бит/с целесообразным и наиболее эффективным является использование 511 квазиортогональных сигналов, полученных циклическим сдвигом ПСП сигнала L3 ГЛОНАСС. Для повышения помехоустойчивости предлагается использовать укороченный код Рида–Соломона (500, 383).

2. Разработанная методика определения ПУ ортогональных сигналов позволяет проводить исследование при когерентном и некогерентном приеме при любом количестве квазиортогональных сигналов. Для вычисления значений ПУ большого количества сигналов при $m > 10$ разработанная методика позволяет не пользоваться приближенными значениями для оценки верхних границ ПУ.

3. Методом математического моделирования показан энергетический выигрыш по ПУ в 8 дБ при использовании квазиортогональных сигналов совместно с кодом Рида–Соломона, относительно сигналов с модуляцией ФМ2 и 2 дБ относительно сигналов с модуляцией ФМ2 и сверточным кодом при вероятности битовой ошибки 10^{-5} . Кроме этого предложенная структура имеет выигрыш в ПУ в 0,5 дБ относительно сигнала LEX.

4. Исследованы характеристики ПУ сигналов с манипуляцией временным сдвигом. Такой вид модуляции не оказывает влияния на схему объединенной синхронизации, а точнее не нарушает работу схемы ФАП при скачкообразном изменении задержки сигнала. Это позволяет не использовать дополнительные пилот-сигналы для системы слежения, т.е. не расходовать энергию на передачу синхросигналов (пилот-сигнала), что в свою очередь дает дополнительный выигрыш в 3 дБ в помехоустойчивости за счет эффективного использования мощности бортового передающего устройства.

5. Выбранные значения $\{\tau_i\}$, $i = 1, 2^m$, сдвигов ПСП в зависимости от входной комбинации m бит, обеспечивают возможность однозначного определения задержки сигнала без использования специальных синхросигналов или синхровставок, непосредственно по сигналам, модулированным навигационной информацией. Уже после приема шести таких сигналов вероятность ошибки оценки задержки составляет менее 10^{-3} .

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Карутин А.Н., Карутин С.Н., Харисов В.Н. Использование ортогональных сигналов для повышения скорости передачи информации в

системе дифференциальной коррекции и мониторинга ГНСС // Радиотехника. 2012. №6. С.131–140 (1,1 п.л./0,6 п.л.);

2. Харисов В.Н., Карутин А.Н. Метод синхронизации по квазиортогональным сигналам с манипуляцией временным сдвигом // Радиотехника. 2013. №7. С.122–125 (0,5 п.л./0,3 п.л.);

3. Харисов В.Н., Пельтин А.В., Карутин А.Н. Метод временного накопления для исследования формы сигналов ГНСС. Научно-технические серии. Выпуск 3. Радионавигационные технологии / Под ред. А.И. Перова и И.Б. Власова. М.: Радиотехника, 2013. С.120–124 (0,5 п.л./0,1 п.л.);

4. Ефименко В.С., Ворончихин Д.Н., Карутин А.Н. Оптимальная траекторная фильтрация в задаче восстановления слежения. Научно-технические серии. Выпуск 3. Радионавигационные технологии / Под ред. А.И. Перова и И.Б. Власова. М.: Радиотехника, 2013. С. 21–24 (0,5 п.л./0,1 п.л.).