

На правах рукописи

ТКАЧЕВ Александр Борисович

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ
ИНФОРМАЦИИ ПРИ КОДИРОВАНИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИГНАЛОВ
СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Специальность: 05.12.13 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена на кафедре 402 «Радиосистемы передачи информации и управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Поваляев Александр Александрович

Официальные оппоненты: **Шорин Олег Александрович**
доктор технических наук, профессор
Московского Технического Университета Связи и Информатики
Бахтин Александр Александрович
кандидат технических наук, доцент национального исследовательского университета «МИЭТ»

Ведущая организация: ОАО «Российская корпорация космического приборостроения и информационных систем»

Защита диссертации состоится «1» ноября 2012 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.02 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ».

Автореферат разослан: «28» сентября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.02
кандидат технических наук, доцент

А.М. Петраков

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Начало XXI столетия характеризуется интенсивным развитием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), их создание многими странами и использованием во многих отраслях экономики, инфраструктуры, обороны, культуры, туризма и других сторон жизни человечества. На данный момент происходит модернизация американской ГНСС GPS и развертывание новых систем: европейской GALILEO и китайской COMPASS. Продолжается развертывание японской ГНСС QZSS, являющейся региональным дополнением к системе GPS.

Существующая скорость и помехоустойчивость передачи информации о параметрах движения спутникового созвездия ГЛОНАСС становится тормозом для повышения точности и оперативности позиционирования потребителей навигационных услуг. В связи с развитием системы ГЛОНАСС и освоением других частотных диапазонов появилась возможность создавать и использовать сигналы с новыми свойствами, обеспечивающими повышение скорости и помехоустойчивости передачи информации в условиях кодового разделения каналов. Таким образом, процесс развития системы ГЛОНАСС обуславливает актуальность исследований методов обеспечения помехоустойчивости и скорости передачи информации, включая снижение помех множественного доступа (ПМД) при передаче сигналов с кодовым разделением каналов, учитывающих присущие ГЛОНАСС ограничения.

Объектом исследования является система совмещенной передачи информации о параметрах движения спутникового созвездия ГЛОНАСС и информации для дальнометрии.

Предметом исследования являются теоретические и практические вопросы повышения скорости и помехоустойчивости передачи информации о параметрах движения спутникового созвездия ГЛОНАСС, совмещенной с информацией для дальнометрии, на основе выбора соответствующего множества сигналов.

Целью диссертации является исследование способов обеспечения низкого уровня ПМД при кодовом разделении каналов, а также высокой скорости передачи информации о параметрах движения спутникового созвездия ГЛОНАСС при обеспечении высокой точности дальнометрии путем выбора сигналов кодового разделения каналов, используемых совместно для дальнометрии, и способа их оверлейного кодирования с учетом доплеровских частотных сдвигов между сигналами, принимаемыми от разных космических аппаратов; вариантов предварительного помехоустойчивого кодирования информации о параметрах движения спутникового созвездия ГЛОНАСС.

Задачи диссертации

1. Анализ структуры, методов формирования и характеристик навигационных и информационных сигналов в существующих и модернизируемых ГНСС.
2. Исследование свойств псевдослучайных последовательностей (ПСП), применяемых в навигационных и информационных сигналах с кодовым разделением, и формулировка предложений по выбору типов ПСП в перспективных сигналах ГЛОНАСС.
3. Исследование свойств оверлейных кодов, применяемых в навигационных и информационных сигналах современных ГНСС, и разработка предложений по оверлейному кодированию в перспективных сигналах ГЛОНАСС.
4. Анализ существующих и разработка новых методов повышения помехоустойчивости передачи информации в перспективных сигналах ГЛОНАСС.

Методы исследования Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы теории сигналов и методы математического моделирования.

Научная новизна диссертационной работы состоит в:

1. Результаты сравнительного анализа применения различающихся и одинаковых оверлейных кодов в навигационных и информационных сигналах разных навигационных космических аппаратов

2. Результаты сравнительного анализа нового метода использования ортогональных многопозиционных сигналов и кода Рида-Соломона с существующими методами повышения помехоустойчивости передачи информации о параметрах движения спутникового созвездия.

3. Обоснованности, на основе анализа структуры навигационных и информационных сигналов, переноса сигнала словной синхронизации в пилотный канал.

Практическая ценность работы состоит:

1. В обосновании возможности применения простых схем генерации дальномерных кодов в навигационных и информационных сигналах с кодовым разделением каналов.

2. В рекомендации применения различающихся оверлейных кодов в навигационных и информационных сигналах разных космических аппаратов по сравнению с применением одинаковых оверлейных кодов, что при длине периода дальномерного кода 10230 символов и длине оверлейного кода 100 символов, как предложено в системе Galileo, позволяет снизить максимальную величину ПМД на 11 дБ.

3. В полученных оценках преимуществ сочетания ортогональных многопозиционных сигналов с кодом Рида-Соломона: при вероятности битовой ошибки 10^{-6} энергетический выигрыш по сравнению со сверточным кодированием более 2,5 дБ, по сравнению с кодами Хемминга около 5 дБ, по сравнению с безызбыточным кодированием сигналов ФМ2 около 8 дБ.

4. В рекомендации передавать сигнал словной синхронизации в виде оверлейного кода пилотного канала, что позволит при сохранении прежней помехоустойчивости повысить скорость передачи информации о параметрах движения спутникового созвездия ГЛОНАСС на 17,6 %.

Внедрение результатов работы:

Результаты научных исследований и разработанные на их основе рекомендации использованы в отчете, выполненном для ОАО «Российская корпорация космического приборостроения и информационных систем» -

головного разработчика бортового информационно-измерительного комплекса космических аппаратов ГЛОНАСС, о чём имеется соответствующий акт внедрения.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, трех приложений и библиографического списка. Она изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка, 4 таблицы, библиографический список включает 42 наименования.

Положения, выносимые на защиту

1. Помехи множественного доступа сигналов с кодовым разделением при наличии частотных сдвигов практически не зависят от используемого ансамбля ПСП, что позволяет применять более просто генерируемые ансамбли ПСП.
2. Использование различающихся оверлейных кодов в сигналах разных космических аппаратов по сравнению с использованием одинаковых оверлейных кодов снижает максимальную величину помех множественного доступа.
3. Преимущество нового принципа передачи информации о параметрах движения спутникового созвездия ГЛОНАСС на основе использования ортогональных многопозиционных сигналов для повышения помехоустойчивости по сравнению с существующими способами кодирования, использующими бинарную фазовую модуляцию.
4. Передача сигнала словной синхронизации не в информационном, а в пилотном канале обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости либо скорости передачи информации о параметрах движения спутникового созвездия ГЛОНАСС.

Основное содержание работы

В первой главе проведен обзор новых тенденций в развитии навигационных сигналов ГНСС, подвергающихся модернизации в настоящее время.

В процессе модернизации GPS, развертывания систем Galileo и Compass появились новые идеи в формировании навигационных сигналов: применяются новые виды ПСП, осуществляется разделение сигналов на информационную и пилотную компоненты, осуществляется дополнительная модуляция дальномерных сигналов меандровыми поднесущими (модуляция Binary Offset Carrier (BOC)), используется оверлейное кодирование, в сигнале LEX японской системы QZSS для передачи информации о параметрах движения спутникового созвездия применяется ортогональное многопозиционное кодирование.

Для повышения помехоустойчивости слежения и формирования измерений по слабым сигналам применяется разделение сигналов на информационную и пилотную компоненты. Информационная компонента модулируется случайными символами информации о параметрах движения спутникового созвездия и используется в основном для её передачи. Пилотная компонента такой модуляции не содержит и используется для формирования измерений. Отсутствие модуляции в пилотной компоненте позволяет повысить точность измерений, особенно при малых значениях отношения сигнал/шум.

В качестве новых видов модуляции в модернизируемых и вновь развертываемых ГНСС получает всё большее распространение модуляция BOC, в которой каждый элементарный символ дальномерного кода заполняется меандровым колебанием определенной частоты. Использование меандрового заполнения расширяет спектр дальномерного сигнала, что обеспечивает более эффективное использование выделенной полосы частот. Более короткие импульсы меандрового заполнения обостряют основной пик корреляционной функции дальномерного сигнала, что приводит к повышению точности измерения псевдофазы. Недостатком модуляции BOC является «многопиковость» АКФ на интервале элементарного символа дальномерной ПСП, которая может приводить к захвату ложного пика в аппаратуре потребителя (АП).

В перспективных сигналах ГНСС дальномерные ПСП часто подвергаются дополнительной модуляции с помощью оверлейных кодов.

Такая модуляция улучшает работу системы синхронизации АП, расщепляет мощные компоненты в спектре сигнала на менее мощные составляющие и улучшает корреляционные свойства ПСП.

Отдельно следует выделить новый метод передачи информации в перспективном сигнале LEX японской системы QZSS. Передача информации в этом сигнале осуществляется посылками, образуемыми 8 двоичными символами. Для передачи 256 таких возможных посылок каждый космический аппарат использует 256 квазиортогональных ПСП, получаемых из уникальной для каждого космического аппарата ПСП путем её циклического сдвига. Таким образом, в сигнале LEX системы QZSS используется принципиально новый способ передачи информации на основе применения многопозиционного ортогонального кодирования. Такое кодирование позволяет повысить помехоустойчивость и скорость передачи информации.

Во второй главе проведено исследование корреляционных свойств сигналов современных ГНСС с учетом применяемых в них методов дальномерного и оверлейного кодирования. На основе полученных результатов сделаны предложения по формированию дальномерных и оверлейных кодов в перспективных сигналах ГЛОНАСС.

В качестве параметров корреляционных свойств сигналов рассматривались квадрат максимального бокового пика двумерных авто- и взаимокорреляционных функций (ДАКФ, ДВКФ) ρ^2_{\max} , что соответствует максимальной относительной мощности ПМД, и среднеквадратическое значение всех боковых лепестков ДАКФ и ДВКФ ρ^2_m , что соответствует средней относительной мощности ПМД (таблица 1).

Выбор длины последовательности дальномерного кода может зависеть от параметров поднесущей меандровой модуляции. У перспективных сигналов ГЛОНАСС для диапазона L1 существует требование, ограничивающее уровень излучения в расположенной справа, рядом с диапазоном, выделенным для ГЛОНАСС, радиоастрономической полосе (1610,6 – 1613,8 МГц). Наиболее перспективным способом удовлетворения данного требования в литературе

считается использованием сигналов ВОС(6,4). Тактовая частота следования символов дальномерного кода в таком сигнале составляет 4,092 МГц, что при длительности периода дальномерного кода 1 мс определяет требуемую длину последовательности 4092 символа. В диссертации проведено сравнение корреляционных свойств разных псевдослучайных последовательностей длиной 4092 символа: дальномерных кодов в перспективных сигналах Galileo E1B, последовательностей Вейла и последовательностей Касами, порождаемых простыми схемами генерации (таблица 1).

В большинстве перспективных навигационных сигналов мировых ГНСС принята длина периода дальномерного кода 10230 символов. Для обеспечения совместимости в перспективных сигналах ГЛОНАСС предполагается использовать последовательности такой длины. В диссертации проведено сравнение корреляционных свойств псевдослучайных последовательностей, используемых в качестве дальномерных кодов в перспективных сигналах Galileo E5, GPS L5I и L5Q, GPS L1C, а также последовательностей Касами, порождаемых простыми схемами генерации.

Таблица 1 – Корреляционные свойства последовательностей

ПСП	Длина ПСП	ДАКФ ρ^2_{\max} , дБ	ДАКФ ρ^2_m , дБ	ДВКФ ρ^2_{\max} , дБ	ДВКФ ρ^2_m , дБ
Касами	4092	-26.2	-36.1	-25.9	-36.1
Galileo E1B	4092	-24.3	-36.1	-25.1	-36.1
Вейл	4092	-24.3	-36.1	-25.2	-36.1
Galileo E5a	10230	-28.7	-40.1	-28.3	-40.1
Galileo E5b	10230	-29.0	-40.1	-27.4	-40.1
GPS L5I	10230	-28.4	-40.1	-28.5	-40.1
GPS L5Q	10230	-28.2	-40.1	-28.5	-40.1
GPS L1C Вейл	10230	-28.5	-40.1	-28.8	-40.1
Касами	10230	-28.4	-40.1	-28.5	-40.1

Характерные гистограммы распределения величин боковых лепестков ДАКФ и ДВКФ для последовательностей Касами, усеченных до длины 10230 символов приведены на рисунках 1 и 2. Установлено, что распределение

величин лепестков корреляционных функций для разных видов последовательностей одинаковой длины является практически одинаковым.

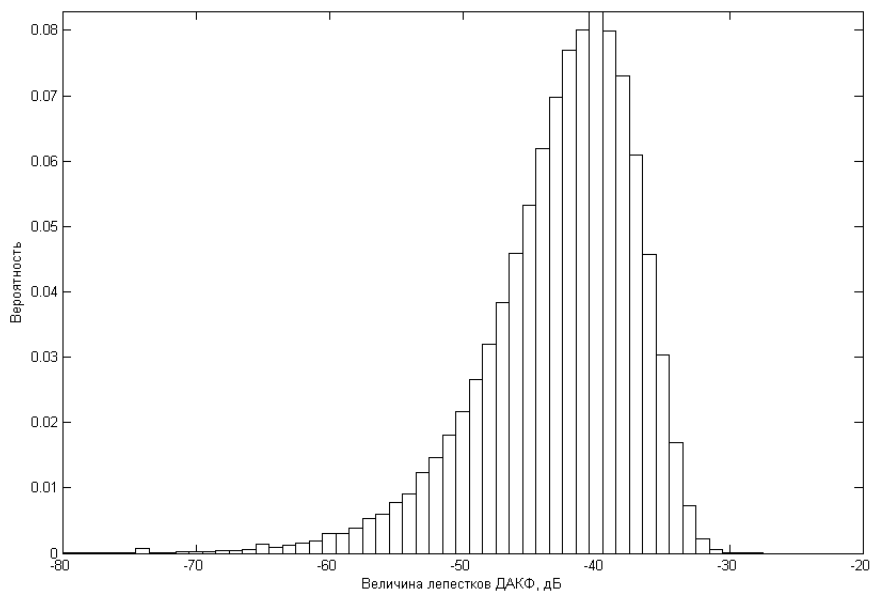


Рисунок 1 – Гистограмма величин лепестков ДАКФ последовательностей Касами длиной 10230 символов

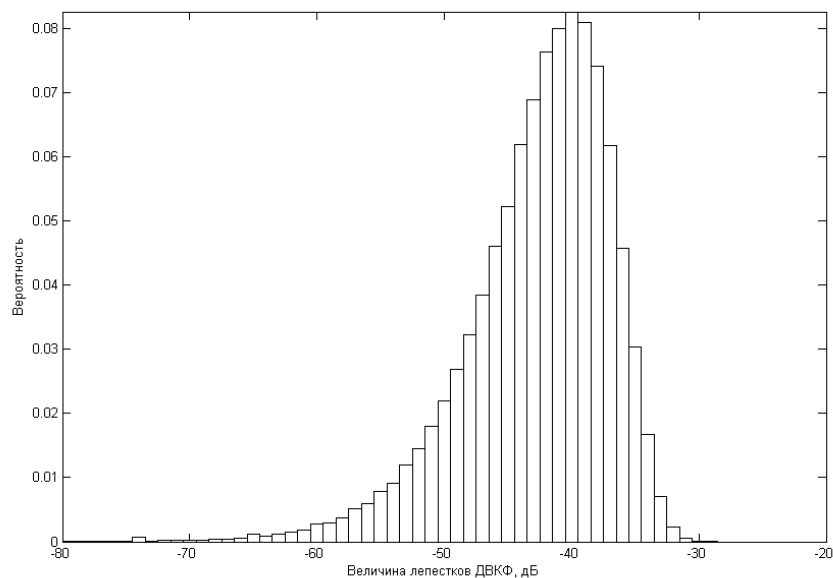


Рисунок 2 – Гистограмма величин лепестков ДВКФ последовательностей Касами длиной 10230 символов

Из сравнения строк таблицы 1 и анализа гистограмм можно сделать вывод о том, что при одинаковой длине ПСП нет заметного отличия

корреляционных свойств рассмотренных кодовых ансамблей. Следовательно, для использования в качестве дальномерных можно рекомендовать ПСП, порождаемые наиболее простыми схемами генерации.

В сигналах GPS L1C и Galileo E5a-Q, E5b-Q применяются различающиеся оверлейные коды для модуляции дальномерных сигналов разных НКА. В сигналах GPS L5 и Galileo E5a-I, E5b-I, E1-C, также использующих оверлейное кодирование, применяется один и тот же оверлейный код для модуляции сигналов всех космических аппаратов. В работе путем моделирования проведено сравнение авто- и взаимокорреляционных свойств дальномерных кодов, промодулированных одинаковыми и разными оверлейными кодами. Были исследованы авто- и взаимокорреляционные свойства дальномерных и оверлейных кодов из ансамблей сигналов Galileo E5a-Q. Найдены величины лепестков ДАКФ и ДВКФ кодовых последовательностей для обоих случаев, представленные в таблице 2. Для сравнения были проведены аналогичные исследования корреляционных свойств двухслойных кодовых последовательностей, полученных на основе последовательностей Касами, усеченных до длины 10230 символов, которые обладают более простой схемой генерации, чем коды Galileo.

Таблица 2 – Корреляционные свойства сигналов при оверлейном кодировании

Дальномерные коды	Оверлейные коды	ДАКФ ρ^2_{\max} , дБ	ДАКФ ρ^2_m , дБ	ДВКФ ρ^2_{\max} , дБ	ДВКФ ρ^2_m , дБ
Galileo E5a	Разные	-12.3	-57.4	-41.2	-60.0
	Одинаковые	-12.9	-57.4	-29.8	-59.9
Касами	Разные	-12.3	-57.4	-42.4	-60.2
	Одинаковые	-12.9	-57.4	-31.5	-60.0

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что использование последовательностей Касами и последовательностей Galileo с оверлейным кодированием, практически не различается по корреляционным свойствам. При этом применение разных оверлейных кодов в сигналах разных

космических аппаратов практически не влияет на средние величины лепестков, но значительно уменьшает максимальную величину лепестков ДВКФ. Таким образом, применение разных оверлейных кодов для модуляции дальномерных сигналов в разных космических аппаратах может быть оправдано в случае установки жестких требований по величине максимальной ПМД.

В третьей главе проведен обзор существующих методов помехоустойчивого кодирования в сигналах ГНСС и предложены новые способы повышения помехоустойчивости при передаче навигационных данных.

В подавляющем числе современных и перспективных навигационных сигналов ГНСС с кодовым разделением передача информационных символов осуществляется путем модуляции ФМ2 или ОФМ2 отрезков, из одного либо нескольких периодов уникальной для каждого космического аппарата дальномерной ПСП. Эта ПСП (прямая или инвертированная) модулирует соответствующий несущий сигнал. Под ПСП здесь понимается дальномерный код, либо дальномерный код, подвергнутый дополнительным преобразованиям, таким как, изменение формы чипа для получения ВОС модуляции, оверлейное кодирование и пр. – в любом случае возможных посылок всего две, и эти посылки противоположны. Таким образом, для передачи информации используются только бинарные противоположные сигналы – один бит передается одним или несколькими периодами некоторой ПСП или ее инверсией.

Разделение спутниковых сигналов в приемнике основано на вычислении степени корреляции принимаемого сигнала с опорной немодулированной ПСП, на интервале интегрирования, который не может превышать длительности информационных символов. Для достижения низкого уровня помех множественного доступа (ПМД) количество N элементарных символов ПСП, укладываемых на интервале интегрирования (длительности информационного символа) должно быть достаточно большим (в

перспективных сигналах $N > 4 \cdot 10^3$). При полосе W , выделенной для ГНСС, длительность информационного символа ограничивается величиной $2N/W$ и поэтому скорость передачи информации не может превышать $W/2N$. Т. е. при использовании модуляции ФМ2 или ОФМ2 требование низкого уровня ПМД ограничивает скорость передачи информационных символов, а используемая для этого полоса $W/2N$ составляет ничтожную часть W .

Для преодоления указанного ограничения в работе предложено вместо модуляции ФМ2 (ОФМ2) использовать многозначную передачу информации, при которой каждому космическому аппарату вместо одной выделяется 2^m уникальных для этого космического аппарата квазиортогональных ПСП. При длине периода ПСП $> 4 \cdot 10^3$ нетрудно подобрать нужное количество таких ПСП с низким уровнем ПМД для всех космических аппаратов системы.

Передача каждой такой ПСП означает передачу m двоичных символов, т. е. скорость передачи НС R возрастает в m раз. Известный из теории связи основной недостаток ортогональных сигналов, заключающийся в существенном расширении их спектра по сравнению с ФМ2 (примерно в $2^m/m$ раз), не проявляется в ГНСС, где для обеспечения высокой точности местоопределений для размещения сигналов выделены полосы в десятки мегагерц. Это существенно больше, чем ширина полосы $\Delta f = (R \cdot 2^m)/m$ при любых m , приемлемых с точки зрения сложности построения приемного устройства, которая возрастает по мере роста m .

В диссертации были вычислены зависимости вероятности ошибки на бит при $m=6;8;10$ для когерентного приема ортогональных сигналов и модуляции ФМ2 в канале с аддитивным белым гауссовым шумом. Результаты показывают, что энергетический выигрыш когерентного приема ортогональных сигналов по сравнению с используемой в настоящее время ФМ2 составляет при $m=6$ около 3,5 дБ, при $m=8$ около 4,5 дБ, при $m=10$ около 5 дБ. Для сравнения были вычислены также характеристики некогерентного (не предполагающего использования ФАП) приема, из которых следует, что при некогерентном приеме ортогональных сигналов уступает когерентному приему менее чем на 1

дБ. Это открывает перспективу использования некогерентного приема ортогональных сигналов в условиях низкого отношения сигнал/шум, когда нарушается работоспособность ФАП и, следовательно, когерентный прием становится невозможным.

Также было рассмотрено каскадное помехоустойчивое кодирование, где в качестве внутреннего кода используются ортогональные многопозиционные сигналы, а внешним кодом является многоосновный ($M=256$) код Рида-Соломона (РС). Для сравнения были получены характеристики помехоустойчивости других методов помехоустойчивого кодирования: сверточного кода со скоростью $R=1/2$ и длиной кодового ограничения $K=7$, применяемого в перспективных сигналах Galileo и в сигналах L2C и L5 системы GPS, а также кодов Хемминга, применяемых в старых сигналах ГЛОНАСС и GPS. На рисунке 3 приведены характеристики помехоустойчивости рассмотренных методов помехоустойчивого кодирования.

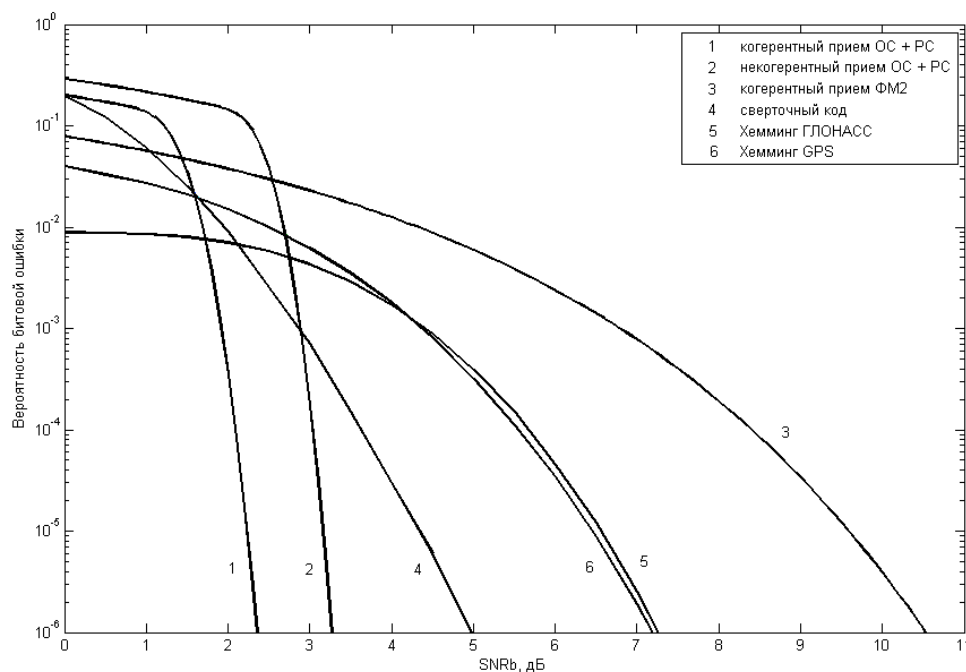


Рисунок 3 — Вероятность битовой ошибки разных методов помехоустойчивого кодирования

Из сравнения полученных результатов можно заключить, что применение ортогональных многопозиционных сигналов в сочетании с кодом РС при вероятности битовой ошибки 10^{-6} по сравнению с используемым в настоящее время сверточным кодированием дает энергетический выигрыш более 2,5 дБ, по сравнению с кодами Хемминга около 5 дБ, по сравнению с безызбыточным кодированием сигналов ФМ2 около 8 дБ. Следует отметить, что минимально возможное значение битового отношения сигнал/шум определяется пределом Шеннона и составляет -1,6 дБ. Таким образом, результаты рассмотренного каскадного кодирования, при когерентном приеме отстоят от потенциальной границы менее, чем на 4 дБ. При этом использование многопозиционных ортогональных сигналов в m раз ослабляет ограничения, порождаемые требованием обеспечения заданного уровня междуканальных помех. При ФМ2 дальнейшее повышение скорости передачи невозможно даже при ухудшении помехоустойчивости, потому что это приводит к росту помех множественного доступа. При использовании сочетания ортогональной модуляции и кодов Рида-Соломона возможно дальнейшее наращивание скорости передачи с ухудшением помехоустойчивости, но без роста уровня междуканальных помех.

Для упрощения построения приемного устройства в работе рассмотрены способы использования ортогональных сигналов, получаемых сдвигами одной и той же ПСП. Рассмотрены особенности формирования измерений псевдодальностей по ПСП, фазы которых подвергаются случайным сдвигам, соответствующим передаче многозначных информационных символов.

С целью упрощения построения приемного устройства в работе предложено использовать биортогональные сигналы, получаемые расширением ансамбля ортогональных сигналов за счет их инверсий. Применение биортогональных сигналов позволяет снизить количество корреляторов в приемном устройстве в два раза. Недостатком применения биортогональных сигналов является невозможность их некогерентного приема.

Дополнительное повышение помехоустойчивости навигационных сигналов возможно осуществить за счет неиспользуемых резервов оверлейного

кодирования. Для этого предлагается использовать оверлейный код пилотного канала в качестве сигнала словной синхронизации. В отличие от кодовых символов сигнал словной синхронизации неизменен и может быть перенесен в пилотный канал в виде оверлейного кода. В структуре существующих навигационных сигналов ГЛОНАСС длительность строки информационного сообщения составляет 2000 мс, а длительность сигнала словной синхронизации составляет 300 мс. Если передавать сигнал словной синхронизации в виде оверлейного кода пилотного канала, и его длительность будет равна длительности строки информационного сообщения, то энергия этого сигнала увеличится в 6,66 раза, а энергия остальной части информационного сообщения за счет освободившегося ресурса увеличится в 1,18 раза или на 17,6 %.

В заключении дается перечень основных результатов диссертационной работы.

В приложениях приведен программный код на языке MATLAB программы для анализа корреляционных свойств ансамбля двоичных последовательностей и программ для анализа корреляционных свойств ансамбля двоичных последовательностей, промодулированных одинаковыми и разными оверлейными кодами.

Основные результаты работы

1. На основе результатов моделирования установлено, что разные виды псевдослучайных последовательностей одинаковой длины при кодовом разделении сигналов создают незначительно отличающиеся по величине помехи множественного доступа. Предложено использовать для дальномерного кодирования последовательности с наиболее простыми способами генерации.
2. На основе результатов моделирования установлено, что использование разных оверлейных кодов в сигналах разных космических аппаратов обеспечивает меньшую максимальную величину помех множественного доступа по сравнению с использованием одинаковых оверлейных кодов.

3. Установлено, что применение каскадного кода на основе ортогональных многопозиционных сигналов и кода Рида-Соломона обеспечивают значительный энергетический выигрыш по сравнению с используемыми в настоящее время сверточным кодированием и кодами Хемминга.
4. Предложен метод передачи сигнала словной синхронизации в пилотном канале, обеспечивающий выигрыш в помехоустойчивости либо скорости передачи информации о параметрах движения спутникового созвездия.

Публикации

Публикации в изданиях из перечня ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных в действующем перечне ВАК:

1. Ткачев А. Б. Исследование корреляционных свойств последовательностей для сигналов с кодовым разделением системы ГЛОНАСС. // Вестник Московского авиационного института, Москва, 2009. – т.16, №7 – С. 61-66
2. Ткачев А. Б., Богданов А. С. Помехоустойчивое кодирование в глобальных навигационных спутниковых системах. // Информационно-измерительные и управляющие системы, Москва, 2010. – т.8, №10 – С. 44-47
3. Ткачев А. Б. Новые способы повышения помехоустойчивости сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. // Вестник Московского авиационного института, Москва, 2011. – т.18, №5 – С. 61-66
4. Ткачев А. Б. Корреляционные свойства оверлейного кодирования в сигналах глобальных навигационных спутниковых систем. // Вестник Московского авиационного института, Москва, 2012. – т.19, №2 – С. 143-147

в сборниках трудов международных конференций:

5. Ткачев А. Б. Обеспечение помехоустойчивости при модернизации сигналов ГЛОНАСС // Вторая Международная научно-практическая конференция «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях», Москва, 2010 – С. 200