

На правах рукописи

Гайворонский Дмитрий Вячеславович



**РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ
ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО РАДИОИНТЕРФЕЙСА СПУТНИКОВОЙ
РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС**

Специальность: 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор ИПАТОВ Валерий Павлович

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Гантмахер Владимир Ефимович
- кандидат технических наук Саута Олег Иванович

Ведущая организация: ОАО «Российский институт радионавигации и времени (РИРВ)»

Защита состоится «___» **июня** **2010** г. в _____ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций **Д 212.238.03** в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат диссертации разослан «___» **мая** **2010** г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций

Баруздин С.А.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В настоящее время для определения местоположения объекта на поверхности Земли и в околоземном пространстве нашли широкое распространение спутниковые радионавигационные системы (СРНС), главным преимуществом которых является всепогодное и непрерывное определение координат. Обширны сферы применения таких систем: авиация, судовождение, определение местоположения автомобиля на трассе или человека на местности и т.д. Ведущие державы считают своим долгом поддерживать в рабочем состоянии и постоянно модернизировать СРНС. Для обеспечения высокой точности определения координат кроме жестких требований к эталонам частоты передатчиков существует необходимость подбора таких дальномерных кодов, длина и внутренняя структура которых позволяют достичь потенциальной точности определения координат и удовлетворить требованиям устойчивости к преднамеренным и непреднамеренным помехам. Дальномерные коды, заложенные в первоначальные радиointерфейсы СРНС более 30 лет назад, на данном этапе уже не в полной мере отвечают требованиям к тактическим характеристикам СРНС, особенно в части работоспособности в условиях динамического разбаланса сигналов (позиционирование внутри помещений, в обстановке плотной застройки, под лесным покровом и т.п.). В этой связи возникла необходимость модернизации форматов сигналов СРНС.

Задача поиска новых классов сигналов усложняется многообразием применений навигационных систем. Так, для комплекса самолетной радионавигации и определения координат автомобиля в городе следует применять приемники различной сложности и разных по точности и энергетике сигналов. На первое место выходит задача обеспечения целостности и высокой надежности каждого компонента системы. По этим причинам и были введены несколько диапазонов, предназначенных для конкретного класса пользователей.

На современном этапе развернуты и доступны для работы две СРНС – американская GPS и российская ГЛОНАСС; европейская GALILEO будет введена в эксплуатацию в будущем.

Следует особо отметить, что сочетание высокого быстродействия аппаратуры потребителя и грамотное построение сигналов системы в будущем позволит значительно повысить точность определения координат пользователя в городской местности с плотной застройкой, а также внутри зданий. А современные возможности по миниатюризации приемников систем уже сейчас позволяют размещать приемные модули в мобильных телефонах, что оказывает неоценимую помощь по определению координат пользователя в чрезвычайных ситуациях в сложной помеховой обстановке.

Названные факторы обуславливают актуальность проведения исследований по поиску подходящих ансамблей дальномерных сигналов, перспективных для применения в новом поколении радиointерфейсов СРНС, всестороннему анализу их характеристик и разработке рекомендаций по их техническому воплощению.

Цели и задачи работы. Целью диссертационной работы является выработка предложений по модернизации пользовательского радиointерфейса СРНС ГЛОНАСС. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе предстояло решить следующие задачи:

1. на основе обзора литературных источников, посвященных системам GPS и Galileo, выделить перспективные направления модернизации радиointерфейса отечественной СРНС ГЛОНАСС;
2. систематизировать критерии выбора ансамблей сигналов с кодовым и частотным разделением; выявить классы ансамблей, отвечающие современным требованиям к пользовательскому интерфейсу СРНС;
3. проанализировать существующие методы расширения спектра за счет усложнения структуры чипов и по возможности предложить конструкции с лучшими разрешающими и точностными характеристиками;
4. скомплектовать каталог ансамблей дальномерных сигналов, которые могли бы быть рекомендованы для использования в новом поколении радиointерфейса СРНС ГЛОНАСС с учетом возможной вариабельности их ключевых параметров и технологической приемлемости;
5. выполнить детальный теоретический и численный анализ базовых характеристик отобранных сигналов и сформулировать предложения по аппаратной реализации устройств генерирования рекомендованных ансамблей.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы теории сигналов, теории вероятностей и математической статистики, современной абстрактной алгебры, численные методы и методы математического моделирования.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Предлагаемые способы расширяющей модуляции обладают лучшими характеристиками точности и разрешающей способности в сравнении с форматом ВОС, пропагандируемым в зарубежных источниках.
2. Поскольку статистические характеристики помехи множественного доступа практически инвариантны к структуре дальномерного ансамбля выбранной длины, в основу выбора последнего целесообразно положить уровень наиболее опасной помехи этого типа, соответствующей нулевой расстройке по частоте;
3. Оптимальным вариантом построения дальномерных ансамблей с частотным разделением является литерный сдвиг бинарной m -последовательности. Любые попытки сочетания частотного уплотнения с кодовым ведут не к снижению, а к росту уровня помех множественного доступа;
4. Как показывают теоретический анализ и моделирование, наиболее вероятна нулевая разностная доплеровская частота сигналов космических аппаратов (КА), поэтому литерный разнос при частотном разделении следует выбирать кратным периоду дальномерного кода;

5. В отсутствие априорных ограничений на длину кода оптимальным дальномерным ансамблем следует считать построенный на базе семейства минимаксных последовательностей, лежащих на границе Велча;
6. При фиксации длины значением, для которого минимаксные последовательности неизвестны, весьма продуктивна оптимизация семейства дальномерных кодов путем укорочения ансамбля большей длины.
7. Из всех минимаксных семейств бинарных последовательностей предпочтительными для применения в радиоинтерфейсе ГЛОНАСС с кодовым разделением оказываются ансамбли Кердока и Касами как наиболее простые в плане техники формирования. При этом ансамбли Кердока обладают уникально большим объемом, что весьма ценно с точки зрения наделения однотипными сигналами ряда СРНС, а также осуществления криптозащиты путем смены передаваемого кода.

Научная новизна работы. Диссертация посвящена методам улучшения характеристик дальномерных сигналов за счет применения расширяющей модуляции, а также оптимизации ансамблей с частотным и кодовым разделением для следующего поколения пользовательского интерфейса СРНС ГЛОНАСС. В частности, новыми являются следующие результаты:

1. Показана неэффективность применения модуляции типа ВОС с точки зрения повышения потенциальной точности местоопределения и ослабления влияния многолучевой помехи. Предложены альтернативные варианты структуры элемента дальномерного сигнала с лучшими разрешающими и точностными характеристиками.
2. Предложены варианты сигнатурных ансамблей для сигнальных форматов с частотным разделением, проведена оценка их качественных показателей при наличии доплеровского смещения частоты.
3. Аналитически и численно получена оценка распределения разности доплеровских частот сигналов КА. Даны рекомендации по выбору оптимального разноса литерных частот сигналов с частотным разделением. На примере ансамбля Касами подтверждена бесперспективность идей комбинирования частотного и кодового разделения.
4. В рамках двух подходов (отсутствие и наличие априорных ограничений на длину) отобраны и рекомендованы для применения в CDMA радиоинтерфейсе ГЛОНАСС семейства бинарных сигналов, оптимальные по уровню помехи множественного доступа. Выполнен детальный анализ корреляционных свойств предлагаемых сигналов в зонах доплеровских расстройек.

Практическая ценность работы. Основным практическим выходом работы является заверченный перечень ансамблей дальномерных кодов, рекомендуемых для использования в радиоинтерфейсе ГЛОНАСС с кодовым разделением.

Внедрение результатов работы. Теоретические и практические результаты диссертационной работы использованы при проведении НИР «Сигнал» в ОАО «Российский институт радионавигации и времени (РИРВ)» 2007-2009 гг.

Предложения по выбору кодовой структуры дальномерного сигнала диапазона L3 ГЛОНАСС вошли в проект соответствующего интерфейсного контрольного документа, к

настоящему моменту прошедшего стадию согласования во всех заинтересованных инстанциях.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на V международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (Севастополь, 2009); на VIII международном симпозиуме и выставке по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (СПб, 2009); на 64-й Научной сессии, посвященной Дню Радио (СПб, 2009); на 63-й Научной сессии, посвященной Дню Радио (СПб, 2008); на 62-й конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (СПб, 2009); на 61-й конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (СПб, 2008).

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 13 работ. Из них три работы опубликованы в центральных рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК, одна работа в рецензируемом научно-техническом журнале, восемь работ содержатся в сборниках материалов научных конференций. Получен один патент. При участии автора написано пять отчетов по НИР.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка. Она изложена на 183 страницах машинописного текста, содержит 74 рисунка, 28 таблиц, библиографический список включает 106 наименований.

Основное содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели, направления исследований и основные научные положения, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В **первой** главе проведен обзор современного состояния и направлений дальнейшего развития СРНС. Рассмотрены предпосылки появления спутниковой радионавигации, исследованы принципы построения и функционирования современных СРНС, включая ГЛОНАСС, GPS и Galileo. Совершенствование сигналов СРНС направлено на расширение сфер их применения, устранение недостатков, выявленных в процессе длительной эксплуатации, дальнейшее повышение точности, надежности и доступности навигационно-временных определений. Для этого используются коды с лучшими корреляционными характеристиками, расширение спектра, излучение пилот-сигнала, многочастотный режим функционирования. Новые форматы сигналов уже приняты к реализации в СРНС GPS и в создаваемой системе Galileo.

В России эти работы проводятся целым рядом организаций. Выполненные в ОАО «РИРВ» исследования показали, что стереотипное копирование принятых в зарубежных системах решений по новым сигналам в отечественных разработках нецелесообразно, так как существуют более перспективные альтернативы. Появление концепции развития сигналов ГЛОНАСС, в которой наряду с частотным разделением предусматривается кодовое, потребовало углубленного исследования ранее намеченных путей совершенствования сигналов применительно к обоим названным форматам деления.

Согласно концепции развития СРНС ГЛОНАСС планируется к уже существующим диапазонам L1 и L2 добавить третий L3, который свободен от других сигналов и предоставляет разработчику полную свободу в выборе структуры дальномерных кодов. Одновременно с этим предполагается сохранить возможность использования в диапазонах L1 и L2 старых сигналов наряду с модернизированными, что ставит перед разработчиком задачу оценки уровня взаимной помехи между дальномерными кодами разных поколений.

Если подытожить обзор сигналов существующих и развертываемых СРНС и оценить возможность применения зарубежного опыта в модернизации системы ГЛОНАСС, то требования, предъявляемые к пользовательскому радиointерфейсу будут следующими:

1. длина ансамбля дальномерных кодов не должна превышать 20 000 элементов (ограничение связано с продолжительностью «холодного старта» и временем поиска спутников);
2. мощность ансамбля должна быть достаточной для наделения каждого КА как минимум двумя сигналами (в случае использования сигнала с модуляцией данными и без таковой);
3. период следования дальномерного кода целесообразно сохранить равным или близким к 1 мс.

В ходе модернизации пользовательского радиointерфейса целесообразно первоначально набрать достаточно представительное множество конкурентоспособных альтернативных вариантов сигнатурных ансамблей, как с частотным, традиционным для ГЛОНАСС, так и с перспективным кодовым разделением, отвечающих приведенным выше требованиям. Среди них на втором этапе можно провести отбор лучших кандидатов, обладающих высокими качественными показателями в сочетании с простотой аппаратной реализации. Также актуальной является задача оценки перспектив применения расширяющей модуляции при излучении нескольких сигналов одним КА в выделенном частотном диапазоне.

Во **второй** главе сформулированы подходы к модернизации сигнальных форматов системы ГЛОНАСС. Проведен обзор критериев выбора сигналов с кодовым и частотным разделением, обобщены сведения о количественных и качественных показателях известных ансамблей с наилучшими корреляционными свойствами.

Для измерения преводоальности во всех без исключения СРНС используются сигналы, модулированные бинарными псевдослучайными последовательностями (ПСП). При этом индивидуальным признаком сигнала, передаваемого конкретным КА, служит либо сама манипулированная ПСП (при кодовом разделении), либо литерный сдвиг несущей (при частотном разделении). В любом из этих случаев специфический закон модуляции сигнала k -го КА ниже будет именоваться сигнатурой, а модель комплексной огибающей этого сигнала записываться в виде

$$\dot{S}_k(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_{k,i} S_0(t - i\Delta), \quad (1)$$

где $S_0(t)$ – закон, описывающий форму элементарного импульса, часто называемого *чипом*, Δ – его длительность, а фазоманипулированная (ФМ) кодовая последовательность периода

N удовлетворяет соотношению $|a_{k,i}|=1, i = \dots, -1, 0, 1, \dots; a_{k,i} = a_{k,i+N}, \forall i$, для всех $k = 1, 2, \dots, K$, где K – общее число сигналов, т.е. мощность сигнатурного ансамбля.

Как видно из (1), синтез подходящего ансамбля сигналов КА распадается на выбор формы и длительности чипа и оптимизацию ансамбля сигнатур. Первая из этих задач направлена на эффективное использование выделенной полосы, т.е. обеспечение максимальной потенциальной точности измерения задержки прихода сигнала и требуемой разрешающей способности по отношению к многолучевой помехе. Для этого длительность чипа следует положить примерно обратной выделенной ширине спектра, а его форму выбрать с учетом ограничений, наложенных на уровень внеполосной мощности. В рамках предлагаемого анализа чип допустимо считать прямоугольным.

В то же время оптимизация набора из K сигнатур связана со сложной и более кропотливой аналитической работой. Все базовые характеристики качества ансамбля K сигналов выражаются в терминах нормированной двумерной взаимной корреляционной функции (ВКФ) $\rho_{kl}(\tau, F)$, характеризующей степень сходства k -го и l -го сигналов, смещенных друг относительно друга на τ с по времени и на F Гц по частоте:

$$\rho_{kl}(\tau, F) = \frac{1}{E} \int_0^T \dot{S}_k(t) \dot{S}_l^*(t - \tau) \exp(-j2\pi Ft) dt, \quad k, l = 1, 2, \dots, K, \quad (2)$$

где $T = N\Delta$ – период сигнала в секундах, а E – энергия сигнала за период T . Подстановка (1) в (2) приводит к равенству

$$|\rho_{kl}(\tau, F)| = \left| \sum_{m=-\infty}^{\infty} \rho_{c,kl}(m, F\Delta) \rho_0(\tau - m\Delta, F) \right|, \quad k, l = 1, 2, \dots, K, \quad (3)$$

связывающему двумерную ВКФ k -го и l -го сигналов с двумерными ВКФ чипа $\rho_0(\tau, F)$ и кодовой последовательности

$$\rho_{c,kl}(m, F\Delta) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a_{k,i} a_{l,i-m} \exp(-j2\pi i F\Delta). \quad (4)$$

Последняя величина есть мера сходства k -й и l -й сигнатур при их относительном сдвиге на m позиций по времени и взаимном набеге фазы на чип $F\Delta$. Физически (2) выражает отклик фильтра, согласованного с k -м сигналом, на l -й сигнал, расстроенный относительно фильтра на F Гц, отнесенный к реакции на полезный сигнал. Иначе говоря, при $l \neq k$ $\rho_{kl}(\tau, F)$ характеризует помеху, создаваемую l -м сигналом приему k -го сигнала, называемую в источниках, посвященных CDMA, помехой множественного доступа (ПМД). Присутствие в (2)-(3) произвольной задержки τ между полезным и мешающим сигналами связано с асинхронной природой СРНС, т.е. значительным разбросом длин трасс распространения от КА до потребителя. Частотный же сдвиг F обусловлен различием доплеровских сдвигов сигналов КА, а в режиме поиска – расстройкой между бортовым и системным эталоном. Учитывая, что $\rho_0(\tau)$ обращается в нуль при $|\tau| > \Delta$ и представляя взаимную задержку сигналов в виде $\tau = m_0\Delta + \tau_0$, где m_0 – целое, а $0 \leq \tau_0 < \Delta$, легко привести (3) к удобной для численного анализа форме

$$\begin{aligned} |\rho_{kl}(\tau, F)| &= |\rho_{c,kl}(m_0, F\Delta)\rho_0(\tau_0, F) + \rho_{c,kl}(m_0 + 1, F\Delta)\rho_0(\tau_0 - \Delta, F)|, \\ k, l &= 1, 2, \dots, K, \end{aligned} \quad (5)$$

где для случая прямоугольного чипа

$$\rho_0(\tau_0, F) = \frac{\sin[\pi F(\Delta - |\tau_0|)]}{\pi F \Delta} \exp[-j\pi F(\Delta + \tau_0)].$$

Главной целью оптимизации набора сигналов КА является минимизация уровня ПМД. Из (3), (5) видно, что уровень ПМД при фиксированной форме чипа полностью управляется ВКФ кодовых последовательностей (4). Поэтому для снижения интенсивности ПМД сигнатурный ансамбль следует выбирать из условия минимально возможного уровня взаимной корреляции между кодовыми последовательностями.

Интегральным по ансамблю показателем интенсивности ПМД мог бы служить среднеквадратический уровень взаимной корреляции

$$\rho_{\text{rms}} = \sqrt{|\rho_{c,kl}(m, F\Delta)|^2},$$

где усреднение происходит по всем парам сигнатур ($k \neq l$), а также всем возможным сдвигам по времени ($0 \leq m \leq N-1$) и частоте $|F| \leq F_m$, где F_m – максимальное абсолютное значение частотной расстройки. В случае охвата зоной частотных расстроек нескольких элементов разрешения по частоте значение ρ_{rms} для любых двух ФМ последовательностей не может быть ниже уровня $1/\sqrt{N}$. Для СРНС характерны доплеровские расстройки до десятков кГц при периоде сигнала, измеряемом миллисекундами, т.е. частотном элементе разрешения не более кГц. Очевидно, что в столь широких частотных зонах невозможно рассчитывать на существование сигнатурного ансамбля со среднеквадратическим уровнем взаимной корреляции ниже, чем $1/\sqrt{N}$. В то же время при случайном выборе ФМ сигнатур ожидаемое значение средней мощности ПМД ρ_{rms}^2 равно строго $1/N$, что означает инвариантность ρ_{rms} к конкретной структуре сигнатур и зависимость этого параметра только от длины кодовых последовательностей N . Поэтому задача поиска сигнатурного ансамбля по критерию минимума ρ_{rms} становится бессмысленной, как только выбрана кодовая длина N .

Одной из возможных альтернатив ρ_{rms} является использование максимального по ансамблю пика ВКФ сигнатур (4) во всей зоне задержек $0 \leq m \leq N-1$ и частотных сдвигов $|F| \leq F_m$:

$$\rho_{\text{max}} = \max_{\substack{k \neq l \\ m, F}} |\rho_{c,kl}(m, F\Delta)|.$$

Ограниченность этого показателя связана с недостаточным учетом им статистической природы ПМД. Действительно, в широком диапазоне доплеровских расстроек сигнал стороннего КА в значительной степени подобен шумовому процессу, максимальные выбросы которого имеют пренебрежимо малую вероятность. В этом случае предпочтение одного ансамбля другому только потому, что у первого меньше значение ρ_{max} , окажется

Таблица 1 – Примеры бинарных минимаксных сигнатурных ансамблей

Ансамбль	Длина N	Объем K	Квадрат максимума корреляции ρ_{\max}^2
Касами	$2^n - 1$, n – четное 15, 63, 255, 1023	$\sqrt{N+1}$	$\frac{(\sqrt{N+1}+1)^2}{N^2} \rightarrow \frac{1}{N}$
Объединение Касами и бент-последовательностей	$2^n - 1$, $n = 0 \pmod 4$ 15, 255	$2\sqrt{N+1} - 1$	$\frac{(\sqrt{N+1}+1)^2}{N^2} \rightarrow \frac{1}{N}$
Камалетдинов 1	$p(p-1)$, p – простое 42, 110, 342, 506, 930	$p+1 = \frac{\sqrt{4N+1}+3}{2}$ $\rightarrow \sqrt{N}$	$\frac{(p+3)^2}{N^2} \rightarrow \frac{1}{N}$
Камалетдинов 2	$p(p+1)$, p – простое 12, 56, 132, 380, 552, 990	$p-1 = \frac{\sqrt{4N+1}-3}{2}$ $\rightarrow \sqrt{N}$	$\frac{(p+1)^2}{N^2} \rightarrow \frac{1}{N}$
Кердок	$2(2^n - 1)$, n – нечетное, 4094, 16 382	$\frac{N+2}{2}$, 2048, 8192	$\frac{(\sqrt{N+2}+2)^2}{N^2} \rightarrow \frac{1}{N}$

сомнительным, если пик корреляции второго наблюдается на сравнительно малом множестве точек плоскости (m, F) , тогда как остальные выбросы ВКФ у него заметно меньше, чем у первого. Кроме того, на значение ρ_{\max} может влиять густота сетки, особенно по оси F , на которой производится численный анализ ВКФ. Именно по этой причине более надежной представляется ориентация на квантильные характеристики ПМД, т.е. пороговые уровни, вероятность превышения которых выбросами ВКФ равна заранее определенному значению. В численном анализе следующих глав за основу будет принят однопроцентный квантиль, т.е. порог, вероятность выхода за который составляет 0,01.

Фундаментальное ограничение возможности минимизации нежелательных корреляций в ансамбле K асинхронных сигнатур длины N устанавливается границей Велча

$$\rho_{\max}^2 \geq \rho_{\text{rms}}^2 \geq \frac{K-1}{KN-1} \approx \frac{1}{N}, \quad K \gg 1.$$

При ориентации на кодовое разделение технологически наиболее привлекательны бинарные сигнатурные ансамбли, т.е. те, для которых $a_{k,i} = \pm 1, \forall i, k = 1, 2, \dots, K$. В диапазоне требуемых для СРНС значений K (десятки) и длин N (тысяча или более) имеются семейства бинарных ($a_{k,i} = \pm 1$) минимаксных ансамблей, перечисленные в табл. 1. Особого внимания заслуживают обладающие уникально большой мощностью ансамбли Кердока, детально рассмотренные в одном из разделов шестой главы.

Наряду с бинарными ансамблями практически важны и ансамбли частотно-сдвинутых бинарных m -последовательностей, положенные в основу пользовательского

радиоинтерфейса СРНС ГЛОНАСС. Свойства такого ансамбля уникальны, так как периодические ВКФ входящих в него последовательностей обладают исключительной равномерностью при частотных расстройках, кратных элементу разрешения по частоте.

В соответствии со сказанным выше в четвертой и шестой главах детально рассмотрены ансамбли сигнатур с частотным и кодовым разделением, предлагаемые для нового поколения радиоинтерфейса СРНС ГЛОНАСС.

В **третьей** главе рассмотрены возможности улучшения характеристик дальномерных сигналов за счет применения расширяющей модуляции. Проведен анализ корреляционных характеристик пропагандируемых в GPS и Galileo сигналов с ВОС($n_m, 1$) модуляцией (где параметр n_m показывает число периодов меандра, укладываемых на длительности одного чипа), выявивший главный недостаток последней: боковые лепестки АКФ $\rho_{a\max}$, сопоставимые по уровню с основным (см. табл. 2). В результате позитивное влияние на точность оценки времени сужения основного лепестка АКФ, свойственное модуляции ВОС, полностью нейтрализуется высокой вероятностью потери однозначности отсчета (перепутывания основного лепестка с боковым). Неэффективен формат ВОС и в плане разрешения сигнала с многолучевой помехой, поскольку многолепестковая АКФ вряд ли заметно лучше в этом отношении АКФ с широким главным пиком.

Предложены альтернативные ВОС варианты структуры чипа с лучшими разрешающими и точностными характеристиками. Для длин $m = 4 \dots 13$ найдены все последовательности (фрагмент полного перечня приведен в табл. 3), отвечающие критерию минимума максимального уровня бокового лепестка АКФ и минимального уровня ВКФ

Таблица 2 – Параметры чипов ВОС($n_m, 1$)

Тип чипа	$\rho_{a\max}$	$\rho_{c\max}$	ρ_{rms}
ВОС (1,1)	0.5	0.5	0.2887
ВОС (2,1)	0.75	0.25	0.1443
ВОС (3,1)	0.8333	0.1666	0.0962
ВОС (4,1)	0.8750	0.125	0.0722
ВОС (5,1)	0.9	0.1	0.0577

Таблица 3 – Оптимальные последовательности манипуляции микрочипов

№	Последовательность	$\rho_{a\max}$	$\rho_{c\max}$	ρ_{rms}	Предп. .пары	$\rho_{12\max}$
$m = 4$						
1	+ - + +	0.25	0.5000	0.2887	-	-
$m = 5$						
1	+ - + + +	0.2	0.6000	0.3540	-	-
$m = 6$						
1	- - + - + +	0.3333	0.3333	0.2152	1-2	0.6667
2	- + - - + +			0.1667		
$m = 7$						
1	- + - - + + +	0.1429	0.4286	0.2044	-	-
$m = 8$						
1	+ + - - + - + +	0.25	0.2500	0.1443	1-2	0.7500
2	+ - - - + + - +			0.1141		

Таблица 4 – Параметры ПМД для ансамблей с частотным сдвигом m -последовательности
длины $N = 4095$ и $N = 16383$

ρ_{\max} дБ 0 кГц	ρ_{\max} дБ ± 1 кГц	ρ_{\max} дБ ± 5 кГц	ρ_{rms} дБ 0 кГц	ρ_{rms} дБ ± 1 кГц	ρ_{rms} дБ ± 5 кГц	$\rho_{0,01}$ дБ ± 1 кГц	$\rho_{0,01}$ дБ ± 5 кГц
-36.16	-30.03	-29.13	-37.89	-37.89	-37.89	-33.03	-32.13
-42.19	-35.86	-35.38	-43.91	-43.91	-43.91	-38.00	-38.00

между чипом предлагаемой формы и прямоугольным ($\rho_{c_{\max}}$). Данное решение может быть использовано при излучении КА нескольких сигналов в одном частотном диапазоне, например реализации пилот-канала и канала с данными. Показано, что предложенные формы чипов существенно выигрывают в уровне бокового лепестка АКФ (т.е. в итоге в точности измерения и иммунитете к многолучевой помехе) у ВОС.

Анализ спектров предложенных вариантов чипов показал, что присущие последним достоинства оплачиваются некоторой потерей эффективности уплотнения сигналов, имеющих расширяющую модуляцию, с обычными. Роль указанного фактора, однако, не стоит преувеличивать, поскольку главным средством разделения сигналов при CDMA остаются кодовые последовательности.

В **четвертой** главе проведён выбор сигнатурных ансамблей и оптимизация параметров сигналов КА при частотном разделении. Предложены варианты сигнатурных ансамблей для сигнальных форматов с частотным разделением на основе литерного сдвига m -последовательностей длины $N = 4095$ и $N = 16383$, проведена оценка их качественных показателей при наличии доплеровского смещения частоты (см. табл. 4). Очевидно, что описанные сигнатурные ансамбли лежат на границе Велча, имея потенциально низкий корреляционный пик. Литерный разнос, как предписано Концепцией для диапазона L3, был выбран равным $F_0 = 423$ кГц. Для численного расчета этой и последующих глав шаг по частоте принят равным четверти элемента частотного разрешения, по времени – 0.2 длительности чипа.

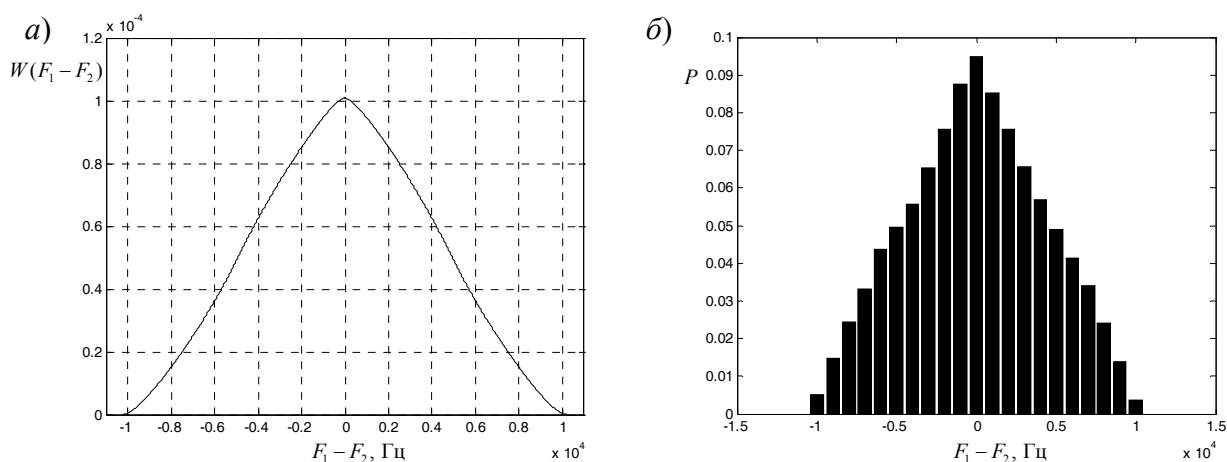


Рисунок 1 – Плотность вероятности разности доплеровских частот, полученная аналитически (а) и численно (б)

Аналитически и численно найдено распределение разности доплеровских частот сигналов КА. Как нетрудно понять, уровень ПМД, создаваемой одним сигналом другому, зависит от расстроек обоих сигналов относительно своих несущих, т.е. разности их доплеровских сдвигов. Поэтому выбор литерного разноса должен быть увязан со статистикой упомянутой разности, т.е. номиналы несущих (разнос) следует выбирать так, чтобы при более вероятных их значениях уровень ПМД был ниже, чем при менее вероятных. Понятно, что реализация подобной стратегии требует знания плотности вероятности (ПВ) доплеровского сдвига принимаемого потребителем сигнала КА. Результат соответствующего анализа представлен на рис. 1, где приведены распределения разности доплеровских частот, полученных аналитически и численно.

Результат, изложенный выше, создает основу для оптимального выбора литерного разноса F_0 в системах с частотным разделением сигналов КА. Поскольку нулевая разность доплеровских частот наиболее вероятна (см. рис. 1), оптимальный литерный разнос должен гарантировать минимум ПМД именно в отсутствие взаимных доплеровских расстроек сигналов соседних литер. Отсюда на основании общих свойств ансамблей частотно-сдвинутых m -последовательностей можно прийти к очевидному выводу, что при периоде дальномерного кода T значение литерного разноса должно выбираться кратным $1/T$.

Если обратиться к численному подтверждению, то на рис. 2 представлена зависимость максимального выброса ВКФ от литерного разноса в окрестности номинала $F_0 = 562,5$ кГц, принятого в диапазоне L1 ГЛОНАСС. Как можно видеть, в наиболее вероятной ситуации нулевой доплеровской расстройке при разносе в 562,5 кГц максимум лепестка ВКФ равен $-30,1$ дБ. В то же время, смещением литерного разноса на 0,5 кГц в сторону от принятого номинала этот уровень можно было бы снизить на 2,4 дБ (до $-32,5$ дБ).

В ходе дискуссии по вопросу совершенствования пользовательского интерфейса ГЛОНАСС нередко возникают гипотезы о возможной выгоде комбинирования частотного разделения с кодовым в части снижения уровня ПМД. Подобные предположения

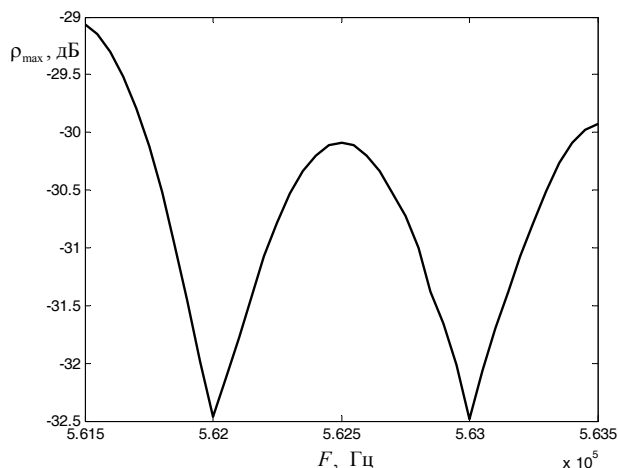


Рисунок 2 – Пик ВКФ для соседних литер диапазона L1 ГЛОНАСС в функции от разноса в полосе ± 1 кГц

Таблица 5 – Уровни ПМД в ансамблях с частотным сдвигом последовательностей Касами

ρ_{\max} дБ	ρ_{\max} дБ	ρ_{rms} дБ	ρ_{rms} дБ	ρ_{rms} дБ	$\rho_{0,01}$ дБ	$\rho_{0,01}$ дБ
0 кГц	± 5 кГц	0 кГц	± 1 кГц	± 5 кГц	± 1 кГц	± 5 кГц
-30.52	-26.50	-37.89	-37.89	-37.89	-31.1	-31.1

Таблица 6 – Сводка параметров сигнатурных ансамблей СРНС GPS и Galileo

Система	Ансамбль	N	K	W_0 МГц	ρ_{\max} дБ 0 кГц	ρ_{\max} дБ ± 5 кГц	ρ_{rms} дБ ± 5 кГц	$\rho_{0,01}$ дБ ± 5 кГц
GPS	L1C/A	1023	32	2	-23.94	-19.23	-31.75	-24.5
	L1C	10230	126	2	-27.21	-26.43	-41.77	-34.8
	L2C	10230	32	2	-25.65	-25.65	-41.78	-34.7
	L5 XI	10230	37	20	-26.35	-26.35	-41.79	-34.7
	L5 XQ	10230	37	20	-26.54	-26.54	-41.77	-34.7
Galileo	E5aI	10230	50	20	-25.68	-25.68	-41.77	-34.7
	E5aQ	10230	50	20	-26.18	-26.18	-41.77	-34.7
	E5bI	10230	50	20	-25.20	-25.20	-41.77	-34.7
	E5bQ	10230	50	20	-25.65	-25.65	41.76	-34.7
	L1F-B	4092	50	2	-24.49	-22.95	37.79	-30.8
	L1F-C	4092	50	2	-24.49	-23.36	-37.79	-30.8

безосновательны, поскольку в рамках отведенного спектрального ресурса потенциальный минимум ПМД устанавливается фундаментальными нижними границами Велча, Левенштейна, Сидельникова, и сигнатурные ансамбли, лежащие на этих границах, уже существуют среди множеств как с кодовым, так и с частотным разделением. Нецелесообразность объединения кодового разделения с частотным можно проиллюстрировать примером использования на разных литерных несущих разных последовательностей Касами взамен одной общей m -последовательности. Соответствующие данные для случая частотно-сдвинутого ансамбля Касами длины $N = 4095$ содержит табл. 5, в которую сведены значения ρ_{\max} и ρ_{rms} для доплеровских зон различной ширины. Из табл. 5 и первой строки табл. 4, отвечающей частотно-сдвинутой m -последовательности той же длины, легко видеть, что сдвинутые по частоте последовательности Касами значительно (3...5,5 дБ) уступают традиционному ансамблю частотно-сдвинутых m -последовательностей, что свидетельствует о непродуктивности дополнения CDMA частотным сдвигом.

В **пятой** главе детальному анализу подвергнуты ансамбли существующих и модернизированных навигационных сигналов открытого доступа СРНС GPS и Galileo с упором на численные оценки уровня взаимной помехи, итогом чего является табл. 6, в которую сведены основные параметры, характеризующие уровень ПМД при разной ширине доплеровской зоны. Полученные результаты интересны в плане сопоставления с ними характеристик предлагаемых далее модернизированных сигналов ГЛОНАСС.

Шестая глава посвящена формированию каталога ансамблей дальномерных сигналов с кодовым разделением, рекомендуемых как основа нового поколения радиointерфейса СРНС ГЛОНАСС. Рассмотрены два сценария выбора ансамблей: при отсутствии априорных ограничений на длину дальномерного кода и при жесткой фиксации длины значением $N = 10\,230$. Отобранные варианты ансамблей отличаются как высокими качественными

Таблица 7 – Сводка параметров сигнатурных ансамблей с кодовым разделением

Ансамбль	N	K	W_0 МГц	ρ_{\max} дБ 0 кГц	ρ_{\max} дБ ± 5 кГц	ρ_{rms} дБ ± 5 кГц	$\rho_{0,01}$ дБ ± 5 кГц
Касами	4095	64	8	-35.99	-26.75	-37.80	-30.5
Касами	16383	128	32	-42.08	-32.77	-43.82	-37.1
Касами+ПБФ	4095	127	8	-35.99	-23.23	-37.80	-30.5
Камалетдинов-2	6972	82	14	-38.38	-25.42	-40.11	-32.9
Камалетдинов-1	10506	104	21	-39.92	-26.74	-41.89	-34.2
Кердок	4094	100*	8	-35.85	-24.26	-37.78	-30.9
Кердок	16382	100*	32	-42.01	-29.96	-43.81	-36.9
Ук. m -посл. $n=20$	10230	100	20	-18.18	-18.18	-41.78	-33.7
Ук. m -посл. $n=30$	10230	100	20	-25.68	-25.68	-41.77	-34.7
Ук. m -посл. $n=22^{**}$	10230	100	20	-19.26	-19.26	-41.78	-34.2
Ук. m -посл. $n=22^{***}$	10230	100	20	-24.58	-24.58	-41.77	-34.6
Ук. Вейль 10243	10230	128*	20	-27.57	-27.21	-41.77	-34.8
Ук. Кердок 16382	10230	100*	20	-26.83	-26.83	-41.77	-34.7
Ук. Касами 16383	10230	128	20	-26.90	-26.90	-41.78	-34.8
Ук. Камалетдинов 10506	10230	104	20	-26.90	-26.87	-41.77	-34.8

* – количество сигнатур, для которого проводились вычисления

** – примитивный полином $f(x) = x^{22} + x + 1$

*** – примитивный полином $f(x) = x^{22} + x^9 + x^5 + x + 1$

показателями, так и простотой аппаратной реализации. Табл. 7 содержит перечень отобранных сигнатурных CDMA ансамблей с указанием их ключевых параметров.

Первые семь строк табл. 7 относятся к характеристикам ПМД минимаксных ансамблей сигналов из табл. 1. Их предпочтение другим альтернативам оправданно в условиях, когда на длину дальномерного кода не накладывается жестких априорных ограничений. При использовании этих ансамблей гарантируется минимизация пиков наиболее неблагоприятной (не расстроенной по частоте) ПМД. Выбор же между ними во многом зависит от целей, которыми руководствуется проектировщик. Когда важнее всего простота генерирования, разумным оказывается выбор в пользу ансамблей Касами, если же наряду с технологической простотой есть потребность в максимальном объеме ансамбля, лучшими следует признать ансамбли Кердока.

В случае априорной фиксации длины дальномерного кода значением $N = 10230$ поиск подходящих ансамблей осуществлялся среди разделенных сегментов длиной m -последовательности либо среди укороченных ансамблей Вейля, Камалетдинова, Касами и Кердока ближайших исходных длин. При этом из ансамблей большой мощности (Вейля и Кердока) отбирается только часть последовательностей, достаточная для наделения сигнатурами всех КА с некоторым запасом. Для наделения, например, 30 КА парой сигнатур мощность ансамбля должна быть не менее, чем $K = 2 \cdot 30 = 60$ сигнатур. Для обеспечения же

некоторого запаса и поля для возможного роста парка КА минимальная мощность ансамбля была зафиксирована на уровне $K = 100$.

Первым и самым простым путем построения ансамбля с кодовым разделением является решение наделять каждый КА сигнатурой, полученной укорочением m -последовательности достаточной длины, большей, чем $NK = 10\,230 \cdot 100 = 1\,023\,000$ чипов. Минимальная подходящая длина m -последовательности, удовлетворяющая поставленному условию, равна $2^{20} - 1 = 1\,048\,575$. Для расширения поля оптимизации рассмотрены варианты построения ансамбля на основе регистра сдвига степеней $n = 20, 21, \dots, 30$. В табл. 7 представлены несколько возможных вариантов таких ансамблей.

Вторым способом построения ансамбля заданной длины (в нашем случае $N = 10\,230$) является укорочение минимаксных ансамблей большей длины. Для этого в частности пригодны:

1. ансамбль Вейля $N = 10243$, $K = 100$;
2. ансамбль Касами $N = 16383$, $K = 128$;
3. ансамбль Кердока $N = 16382$, $K = 100$;
4. ансамбль Камалетдинова-1 $N = 10506$, $K = 104$.

Поиск производился следующим образом: формировался исходный минимаксный ансамбль, затем в нем выделялся прямоугольник размером $10\,230 \times K$, который перемещался по строкам и столбцам исходной матрицы, в результате отыскивалось такое его положение, которое обеспечивало минимальное значение максимального пика взаимной помехи ρ_{\max} .

Обращаясь ко второй части табл. 7, можно сделать вывод, что в случае жесткой априорной фиксации длины сигнатур целесообразна ориентация на укороченные минимаксные ансамбли (Касами, Кердока и др.), причем факторы, влияющие на выбор между ними, не отличаются от тех, которые применялись при выборе ансамбля без априорных ограничений на длину.

В Заключении дается перечень основных результатов диссертационной работы.

Основные результаты работы

1. Предложены варианты расширяющей модуляции, обладающие лучшими характеристиками точности и разрешающей способности по сравнению с пропагандируемым в зарубежных источниках форматом ВОС.
2. С опорой на факт практической инвариантности характеристик ПМД к структуре дальномерного ансамбля выбранной длины сделан вывод о целесообразности при выборе последнего ориентироваться на критерий минимума наиболее опасной помехи этого типа, соответствующей нулевой расстройке по частоте.
3. Установлено, что оптимальным вариантом построения дальномерных ансамблей с частотным разделением является литерный сдвиг бинарной m -последовательности. На примере ансамбля Касами доказано, что попытка сочетания частотного уплотнения с кодовым ведет не к снижению, а к росту уровня ПМД.

4. На основе теоретического анализа и моделирования установлено, что наиболее вероятно нулевая разностная доплеровская частота сигналов КА, поэтому литерный разнос при частотном разделении следует выбирать кратным периоду дальномерного кода. По этой причине, значения литерного разноса существующих сигналов L1 и L2 ГЛОНАСС (562,5 и 437,5 кГц соответственно) оптимальными не являются, в отличие от предложенного Концепцией для диапазона L3 423 кГц.
5. Показано, что в отсутствие априорных ограничений на длину кода оптимальными дальномерными ансамблями следует считать минимаксные (Касами, объединение Касами и бент-функций, Камалетдинова, Кердока), из которых и производился выбор кандидатур, отвечающих требованиям, предъявляемым к пользовательскому интерфейсу СРНС.
6. Показано, что при жесткой фиксации длины сигнатурного ансамбля значением, для которого минимаксные последовательности неизвестны, продуктивна оптимизация семейства дальномерных кодов путем укорочения ансамбля большей длины.
7. Установлено, что из всех минимаксных семейств бинарных последовательностей предпочтительными для применения в радиointерфейсе ГЛОНАСС с кодовым разделением оказываются ансамбли Кердока и Касами как наиболее простые в плане техники формирования. Показано, что ансамбли Кердока обладают уникально большим объемом, что весьма ценно с точки зрения наделяния однотипными сигналами ряда СРНС, а также осуществления криптозащиты путем смены передаваемого кода.
8. Выполнен исчерпывающий анализ характеристик всех исследованных дальномерных ансамблей и детально табулированы параметры ПМД в диапазоне доплеровских расстройек.
9. Сформирован каталог ансамблей бинарных кодовых последовательностей, перспективных с точки зрения применения в новых поколениях радиointерфейса СРНС.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных трудах.

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

1. Гайворонский Д.В. К дискуссии о выборе метода разделения сигналов в новом поколении радиointерфейса ГЛОНАСС [Текст] / Д.В. Гайворонский, В.П. Ипатов // Известия вузов России, Радиоэлектроника, СПб, 2009. - Вып. 1 - С. 53-60

2. Гайворонский Д.В. К выбору сигнатурных ансамблей для нового поколения радиointерфейса системы ГЛОНАСС [Текст] / С.Б. Болошин, Д.В. Гайворонский, В.П. Ипатов, И.М. Самойлов, Б.В. Шибшаевич // Известия вузов России, Радиоэлектроника, СПб, 2009. - Вып. 6 - С. 44-55

3. Гайворонский Д.В. Анализ совместимости новых сигналов ГЛОНАСС с существующими и модернизированными навигационными сигналами [Текст] / С.Б. Болошин, Д.В. Гайворонский, В.П. Ипатов, И.М. Самойлов, Б.В. Шибшаевич // Известия вузов России, Радиоэлектроника, СПб, 2009. - Вып. 6 - С. 56-65

Патент

4. Генератор псевдослучайных бинарных последовательностей [Текст] /пат. 92270 Рос. Федерация: МПК H03M 13/15 G06F 7/58 Гайворонский Д.В., Ипатов В.П., Шебшаевич Б.В., Филатченков С.В., Болошин С.Б.; заявитель и патентообладатель СПб, ОАО «Российский институт радионавигации и времени». - №2009138574/22 заявл. 19.10.2009; опубл. 10.03.10, Бюл. №7 - 3с: ил.

в прочих рецензируемых изданиях

5. Гайворонский Д.В. Варианты дополнения пользовательского интерфейса СРНС ГЛОНАСС дальномерными сигналами с кодовым разделением [Текст] / С.Б. Болошин, Д.В. Гайворонский, В.П. Ипатов, И.М. Самойлов, Б.В. Шебшаевич // Новости навигации, М., 2009. - Вып. 3 - С. 9-16

в сборниках трудов международных конференций

6. Гайворонский Д.В. Возможности улучшения характеристик дальномерных сигналов за счет усложнения структуры чипов [Текст] / Д.В. Гайворонский, В.П. Ипатов // Восьмой международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, СПб, 2009. - С. 153-156

7. Гайворонский Д.В. Предложения по дополнению пользовательского интерфейса СРНС ГЛОНАСС сигналами с кодовым разделением [Текст] / Д.В. Гайворонский // Пятая международная научно-техническая конференция РТ-2009, Севастополь, 2009. - С. 85

8. Гайворонский Д.В. Модернизация структуры чипа сигналов космических аппаратов с меандровой модуляцией [Текст] / Д.В. Гайворонский // Пятая международная научно-техническая конференция РТ-2009, Севастополь, 2009. - С. 273

в сборниках трудов региональных конференций

9. Гайворонский Д.В. Перспективы дополнения пользовательского интерфейса ГЛОНАСС дальномерным сигналом с кодовым разделением [Текст] / Д.В. Гайворонский, В.П. Ипатов // Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых, 62-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2009. - С. 3-7

10. Гайворонский Д.В. Анализ корреляционных свойств сигналов в новом диапазоне СРНС ГЛОНАСС [Текст] / Д.В. Гайворонский // 64-я научно-техническая конференция, посвященная Дню Радио, СПб, 2009. - С.22-23

11. Гайворонский Д.В. Анализ корреляционных свойств частотно сдвинутых последовательностей Касами [Текст] / Д.В. Гайворонский, Т.Г. Платковская // 64-я научно-техническая конференция, посвященная Дню Радио, СПб, 2009. - С. 24-25

12. Гайворонский Д.В. Оптимизация структуры чипа дальномерного сигнала спутниковой радионавигационной системы [Текст] / Д.В. Гайворонский, Д.С. Непогодин // 64-я научно-техническая конференция, посвященная Дню Радио, СПб, 2009. - С. 25-26

13. Гайворонский Д.В. Тенденции совершенствования пользовательского интерфейса глобальных спутниковых радионавигационных систем [Текст] / Д.В. Гайворонский // 63-я научно-техническая конференция, посвященная Дню Радио, СПб, 2008. - С.47-48

Соискатель

Д.В. Гайворонский

Гайворонский Д.В.