

На правах рукописи



Хачатурян Алёна Борисовна

**СИНТЕЗ СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ СИГНАЛОВ  
ДЛЯ НАВИГАЦИОННЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ НОВОГО  
ПОКОЛЕНИЯ**

Специальность: 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», на кафедре радиотехнических систем

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Ипатов Валерий Павлович

Официальные оппоненты:

Быстров Николай Егорович, доктор технических наук, профессор, Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, заведующий кафедрой радиосистем (г. Великий Новгород)

Баринов Сергей Прокопьевич, кандидат технических наук, ОАО «Российский институт радионавигации и времени (РИРВ)», начальник отдела (г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация: ОАО «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» (ОАО «ВНИИРА»), г. Санкт-Петербург

Защита состоится «\_\_\_» июня 2014 г. в \_\_\_ часов \_\_\_ минут 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 СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru).

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» апреля 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.238.03,  
д.т.н., проф.



Баруздин С.А.

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Современные приложения радионавигации космического базирования чрезвычайно многообразны. В настоящее время гражданскому потребителю доступны две равноценные и взаимодополняющие глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС): GPS и ГЛОНАСС. На стадии тестирования находятся ГНСС Galileo, продвигаемая Европейским Сообществом, и китайская ГНСС BeiDou. Кроме того, Япония начала практическое развертывание региональной навигационной спутниковой системы (РНСС) QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*), которую можно считать функциональным дополнением GPS. Одновременно Индия планирует развертывание собственной РНСС IRNSS двойного применения.

Названные ГНСС и РНСС как действующие, так и планируемые к осуществлению занимают различные участки спектра в диапазоне L. Существенное наращивание числа систем, занимающих одни и те же полосы, неизбежно ведет к коллизиям, как между ними, так и со сторонними системами, в частности системами радиоастрономических наблюдений и с аэронавигационными службами. В свете указанной проблемы представляется оправданной заинтересованность в перемещении новых сигналов спутниковой навигации в менее загруженные частотные диапазоны.

Регламентом ИТУ радионавигационным линиям «космос–Земля» помимо упомянутого диапазона L выделены узкие спектральные полосы в диапазонах S, C и Ku. С учетом конфликта функционирующей версии ГНСС ГЛОНАСС с радиоастрономической службой в диапазоне L при проектировании новых радиоинтерфейсов требуется с особой тщательностью подойти к выбору модуляционных форматов навигационных систем с тем, чтобы уложиться в жесткие нормы ИТУ по проникновению стороннего излучения в смежные диапазоны. Тем самым набор приоритетных требований к сигналу дополняется ограничениями на компактность спектра

Традиционные для ГНСС навигационные сигналы (НС) с бинарной фазовой модуляцией обладают высоким уровнем внеполосного излучения и требуют введения режекции спектральных компонент в конфликтной частотной области, приводящей к паразитной амплитудной модуляции фильтрованного НС. Последнее вынуждает разработчиков устанавливать фильтрующие каскады после усилителя мощности, что приводит к ухудшению их массогабаритных характеристик и снижению полезной отдачи передатчика.

Радикальное решение указанной проблемы состоит в переходе от стандартной фазовой модуляции к спектрально-эффективным форматам, в частности, к модуляции с непрерывной фазой. В то же время решиться на подобный шаг можно лишь оценив возможные последствия от их применения.

Названные факторы обуславливают актуальность исследований по поиску подходящих спектрально-эффективных модуляционных форматов, всестороннему

анализу их характеристик и уточнению их параметров для конкретных частотных диапазонов.

**Цели и задачи работы.** Целью диссертационной работы является выработка предложений по оптимизации модуляционного формата навигационного сигнала ГНСС ГЛОНАСС с учетом ограничений на уровень внеполосных излучений. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе предстояло решить следующие задачи:

- на основе обзора литературных источников, рассмотреть подходы к решению проблемы электромагнитной совместимости ГНСС L диапазона со сторонними системами;
- систематизировать критерии выбора модуляционных форматов для новых частотных диапазонов;
- проанализировать теоретические решения задачи оптимизации формы посылки по критериям минимума внеполосных излучений и максимума энергии сигнала в заданной полосе;
- принять для дальнейшего рассмотрения конкретные формы спектрально-эффективной модуляции;
- выполнить детальный теоретический и численный анализ характеристик НС, построенных на основе выбранных модуляционных форматов и сформулировать предложения по конкретизации их параметров.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы теории сигналов, теории вероятностей и математической статистики, гармонического анализа, численные методы и методы математического моделирования.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Для устранения имеющихся в навигационном сообществе разночтений в интерпретации спектральных ограничений целесообразно опираться на определение занимаемой полосы согласно статье 1.153 Регламента ИТУ.
2. Анализ конкретных видов частотной модуляции с непрерывной фазой (МНФ) и полным откликом показал, что за счет усложнения закона угловой модуляции не удастся добиться дополнительного сужения регламентной полосы сигнала.
3. Спектрально-эффективные форматы с частичным откликом сводятся к амплитудно-ограниченной суперпозиции фазоманипулированных квадратур. Применение разложения в базисе Уолша позволяет локализовать полезные и комбинационные составляющие сигнала.
4. В условиях фиксированного частотно-временного ресурса МНФ форматы существенно выигрывают у ФМ форматов по точности измерения времени, иммунитету к многолучевым эффектам, качеству фильтрации преднамеренных, внутрисистемных и межсистемных помех.
5. Усложнение МЧМ за счет введения памяти (форматы с частичным откликом) или нелинейного закона изменения фазы не сопровождаются дополнительными выигрышами

по перечисленным показателям.

**Научная новизна работы.** Диссертация посвящена улучшению электромагнитной совместимости сигналов спутниковых радионавигационных систем с кодовым разделением со службами, работающими в соседних диапазонах, за счет применения спектрально-эффективной модуляции. В частности, новыми являются следующие результаты:

Предложен модуляционный формат НС, построенный на основе оффсетной КФМ с синусоидальным чипом и памятью  $L = 2$ . Показано, что при амплитудном ограничении указанный формат относится к классу МНФ с памятью.

Получено разложение МНФ сигнала с памятью  $L = 2$  в базисе Уолша, разделены полезные и комбинационные составляющие, проанализирована спектральная эффективность формата МЧМ с памятью.

Получено аналитическое выражение для численного расчета автокорреляционной функции МНФ сигнала с произвольными объемом памяти и законом изменения частоты.

В рамках жесткого спектрального регламента исследованы важнейшие характеристики НС со спектрально-эффективной модуляцией: потенциальная точность оценки радионавигационных параметров, устойчивость к многолучевой помехе при измерении времени прихода сигнала, иммунитет к преднамеренным помехам, качество фильтрации внутрисистемных и межсистемных помех, а также совместимость с радиоастрономическим диапазоном.

**Практическая ценность работы.** Основным практическим выходом работы является обоснование преимуществ спектрально-эффективных модуляционных форматов в плане таких тактических показателей ГНСС как потенциальная точность определения псевдодальности, устойчивость к многолучевым помехам, иммунитет к помехе множественного доступа и т.д. в условиях жестких требований к компактности спектров сигналов.

**Внедрение результатов работы.** Теоретические и практические результаты диссертационной работы использованы в НИР, выполненных в рамках следующих грантов и федеральных целевых программ:

1. федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. «Разработка архитектуры радиоинтерфейса будущего сегмента ГЛОНАСС Ku диапазона» (соглашение № 14.В37.21.0432 от 01 сентября 2012 г.);

2. федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. «Алгоритмические методы исключения многолучевой погрешности из спутниковых радионавигационных измерений в рамках спектрально-эффективных форматов модуляции сигналов ГЛОНАСС/GPS» (государственный контракт № 14.740.11.1325 от 27 июня 2011 г.);

3. грант РФФИ: 12-07-31187 мол\_а по теме «Двухлучевые модели многолучевости в ГНСС ГЛОНАСС и GPS в применении к спектрально-эффективным и ВОС-сигналам»;

4. грант «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» по программе «У.М.Н.И.К.» «Разработка предложений по оптимизации формы спектрально-эффективных сигналов с целью минимизации побочных излучений» (соглашение №105ГУ1/2013 от 07.10.2013).

5. «Разработка и исследование архитектуры, пользовательских интерфейсов и информационных технологий нового поколения радиоэлектронных комплексов и сетей сбора, передачи и обработки информации», шифр РС-109, 2011-2013 гг.

6. «Исследование методов моделирования и классификации сигналов радиотехнических систем», шифр РС-102, 2012-2013 гг.

Теоретические и практические результаты диссертационной работы использованы при проведении НИР «Сигнал» в ОАО «Российский институт радионавигации и времени (РИРВ)» 2011-2012 гг.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на 66-68-й научных сессиях, посвященных Дню Радио (СПб, 2011, 2012, 2013); на V всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и связь» (Москва, 2011); на VIII-IX международных молодежных научно-технических конференциях «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (Севастополь, 2012, 2013); на научно-технической школе-семинаре «Инфокоммуникационные технологии в цифровом мире» (СПб, 2012); на 64-66-й конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (СПб, 2011, 2012, 2013).

**Публикации.** Всего по теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 5 в центральных рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК, и 8 в сборниках трудов научных конференций. Получено свидетельство о регистрации одной программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка и содержит 136 страниц машинописного текста, 24 рисунка, 21 таблицу. Библиографический список включает 107 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 модернизации спутниковых радионавигационных систем. Рассмотрены принципы построения и функционирования современных ГНСС: ГЛОНАСС, GPS, Galileo и Beidou, а также РНСС QZSS и IRNSS. Особое внимание уделяется проблеме электромагнитной совместимости указанных систем с радиоастрономической службой, лимитирующей плотность потока мощности сигнала одного спутника у поверхности Земли уровнем – 194 дБ Вт/м<sup>2</sup> в полосе  $F = 20$  кГц. Показано, что в силу исчерпанности ресурсов L диапазона, заинтересованность разработчиков в перемещении новых сигналов СРНС в

менее загруженные частотные диапазоны S (2483,5 –2500 МГц), C (5010–5030 МГц) и Ku (14,3–14,4 ГГц) оказывается оправданной. Кратко проанализированы преимущества и недостатки продвижения в указанные частотные диапазоны и рассмотрены варианты организации в них новых сервисов. Обращается внимание на отечественные планы развития спутникового корабельного комплекса курсоуказания Ku диапазона. Подчеркивается в связи с этим актуальность модернизации пользовательского интерфейса ГНСС ГЛОНАСС по линии освоения диапазона Ku в дополнение к традиционному L-диапазону.

Сформулированы общие требования к подходящим вариантам модуляции:

- модуляционный формат должен допускать уплотнение двух независимых сигналов на одной несущей (сигналы стандартной и высокой точности);
- у полного навигационного сигнала должна отсутствовать амплитудная модуляция;
- уровень внеполосных излучений должен соответствовать требованиям ИТУ, либо допускать режекцию критических участков спектра приемлемыми по сложности средствами.

**Во второй главе** сформулированы подходы к модернизации модуляционного формата системы ГЛОНАСС в свете приведенных требований. В первой части главы рассмотрены классические решения задач оптимизации формы радиоимпульса согласно критериям максимума энергии сигнала в фиксированной частотной полосе и минимума внеполосных излучений. Показано, что прямое их использование для построения спектрально-компактного дальномерного сигнала невозможно из-за нарушения требования постоянства его мгновенной мощности.

Исходя из этого, остальной материал главы посвящен повышению спектральной эффективности за счет применения частотной модуляции с непрерывной фазой. В качестве критерия спектральной компактности предлагается использовать ширину занимаемой сигналом полосы (регламентной полосы), определяемой ст. 1.153 Регламента ИТУ частотным интервалом, содержащим 99% полной мощности сигнала.

Как известно, МНФ с полным откликом и индексом модуляции 0,5 может трактоваться как квадратурная фазовая модуляция со сдвигом (КФМС/OQPSK), так что соответствующий сигнал может быть записан как сумма двух квадратурных потоков, сдвинутых друг относительно друга на половину длительности элементарной посылки (чипа). При этом форма последнего определяется соотношением

$$s_0(t) = \begin{cases} \sqrt{P} \sin[\pi\varphi(t)], & 0 \leq t \leq 2\delta \\ 0, & t \geq \delta. \end{cases}$$

где  $P$  – пиковая мощность,  $\varphi(t)$  – фазовый отклик МНФ сигнала,  $\delta$  – интервал изменения фазового отклика. Наиболее популярным видом МНФ является минимальная частотная модуляция (МЧМ). Сопоставление спектров МЧМ и БФМ сигналов ГНСС показывает, что регламентная полоса МЧМ на порядок меньше аналогичной у БФМ. Скачкообразный характер изменения частоты МЧМ сигнала указывает на резерв

дальнейшего выигрыша в компактности спектра за счет применения модуляционных форматов, обеспечивающих непрерывность не только фазы, но и ее производных.

Вследствие этого далее рассмотрены модуляционные форматы с более сложными законами изменения фазы сигнала – полиномиальными и гармоническими.

Исследование их спектральных характеристик подтвердило ускорение спада спектра с увеличением числа непрерывных производных фазы, которое, однако, сопровождается, расширением одного или нескольких боковых лепестков, ведущим в конечном счете к расширению регламентной полосы. Для дальнейшего исследования были отобраны форматы, обеспечивающие наименьшее значение регламентной полосы и имеющие следующие фазовые отклики:

1. формат, рекомендованный Amoroso (МНФА):

$$\varphi(t) = \begin{cases} \pi t / (2\delta) - 0,25 \sin(2\pi t / \delta), & 0 \leq t < \delta, \\ \pi/2, & t \geq \delta, \end{cases}$$

2. формат рекомендованный, Ponsonby J. E (МНФП)

$$\varphi(t) = \begin{cases} 0,25\pi(1 - \cos(\pi t / \delta)), & 0 \leq t < \delta, \\ \pi/2, & t \geq \delta, \end{cases}$$

3. полиномиальный модуляционный формат (МНФПЛ)

$$\varphi(t) = \begin{cases} \pi t^2 / \delta^2, & 0 \leq t \leq \delta/2, \\ -\pi t^2 / \delta^2 + 2\pi t / \delta - \pi/2, & \delta/2 < t \leq \delta, \\ \pi/2, & t > \delta. \end{cases}$$

**В третьей главе** рассмотрена возможность повышения компактности спектра дальнего сигнала за счет применения МНФ с частичным откликом (МНФ с памятью), в рамках которой мгновенная фазовая траектория определяется не только текущим, но и  $L-1$  предыдущими символами.

В качестве исходного принят сигнал, состоящий из суммы квадратурных компонент, смещенных друг относительно друга на  $\delta$  и представляющих собой потоки симметричных неотрицательных посылок  $s_0(t)$  длительности  $3\delta$ , следующих с периодом  $2\delta$  и манипулированных бинарными последовательностями  $\{a_i\}$  и  $\{b_i\}$ , соответственно (см. рис. 1). Амплитудное ограничение преобразует подобную сумму в сигнал МНФ с памятью (МНФП)  $L = 2$ , имеющий комплексную огибающую

$$\dot{S}(t) = \exp \left\{ j \arg \left[ \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_i s_0(t - 2i\delta) + j \sum_{i=-\infty}^{\infty} b_i s_0(t - 2i\delta - \delta) \right] \right\}.$$

В работе приведен алгоритм, позволяющий восстановить форму чипа  $s_0(t)$  по заданному закону угловой модуляции  $\varphi(t)$ , и тем самым сконструировать двухкомпонентный НС на основе любого МНФ формата памяти  $L = 2$ . Выяснилось, что



форма чипа, рассчитанная для линейного фазового отклика, практически полностью повторяет полуволну синуса.

Нелинейность амплитудного ограничения приводит к образованию комбинационных составляющих в виде произведения кодовых последовательностей, отнимающих на себя часть полной мощности сигнала и создающих дополнительные помехи. Количественно оценить названные эффекты можно, прибегнув к разложению сигнала в базисе Уолша, явно локализирующему полезные и комбинационные компоненты:

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) = & \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_i \rho(t - 2i\delta) + j \sum_{i=-\infty}^{\infty} b_i \rho(t - 2i\delta - \delta) + \\ & + j \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_{i-1} a_i b_{i-1} r(t - 2i\delta) + \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_i b_{i-1} b_i r(t - 2i\delta - \delta), \end{aligned}$$

где  $\rho(t)$  и  $r(t)$  - формы чипов полезной и паразитной составляющих соответственно. В частности при разложении сигнала с посылкой  $s_0(t) = \sin[\pi t/(3\delta)]$ ,  $t \in [0, 3\delta]$  (МЧМ с памятью – МЧМП) установлено, что полезная составляющая превышает комбинационную более чем на 15 дБ (см. рис. 2). Как следует из рисунка 3, расширение спектра за счет паразитной составляющей незначительно в сравнении с его сужением за счет увеличения длительности чипа. Следствием этого факта является заметное сужение регламентной полосы.

В качестве следующего потенциально привлекательного варианта МНФ памятью была рассмотрена популярная гауссовская МЧМ с параметром  $B\delta = 0,3$  (ГМЧМ). Поскольку в данном случае полезную и комбинационную составляющие сигнала явно разделить не удастся, для анализа характеристик МНФ сигнала с частичным откликом был разработан алгоритм численного расчета автокорреляционной функции (АКФ) по известному закону изменения фазы

$$R(\tau) = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} \prod_{i=-m-1}^{L-1} \cos\{\varphi(i\delta + \varepsilon) - \varphi[(i+m)\delta + \varepsilon + \mu]\} d\varepsilon,$$

где  $\tau = m\delta + \mu$ , причем  $m \in [0, L)$  – целое,  $\varepsilon, \mu \in [0, \delta)$ . Как видно из рисунка 3, расширение АКФ за счет обработки фазового отклика фильтром с гауссовской импульсной характеристикой приводит к сужению спектра сигнала и, следовательно, уменьшению регламентной полосы.

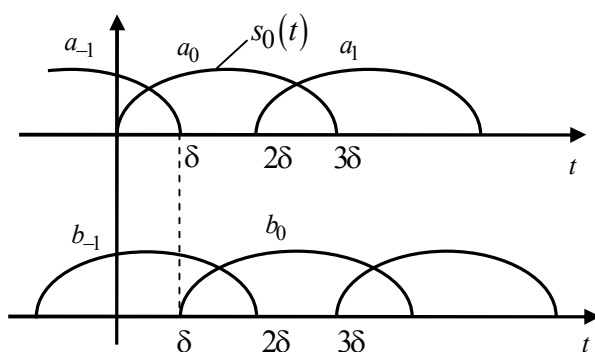


Рисунок 1 – К построению МНФП

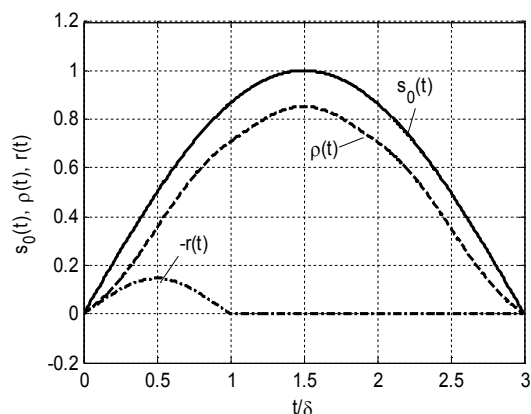


Рисунок 2 – Формы чипов МЧМП

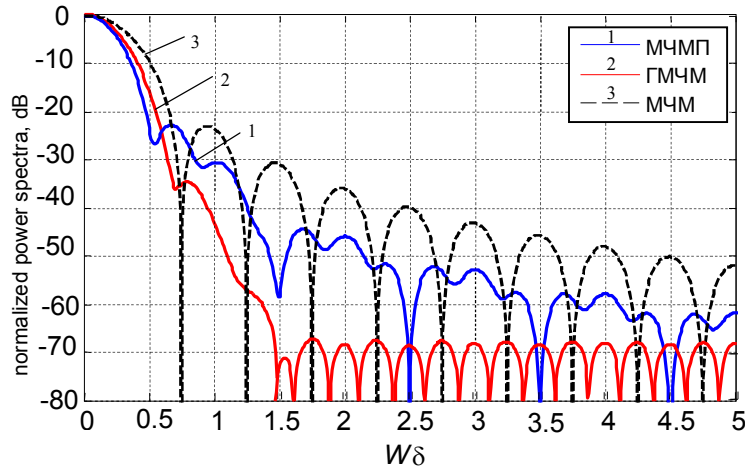


Рисунок 3 – Нормированные спектральные плотности мощности МНФ сигналов

Основным выходом второй и третьей глав являются кандидатуры модуляционных форматов (см. таблицу 1), отобранные по значению регламентной полосы и представляющие интерес с точки зрения построения спектрально-эффективных навигационных интерфейсов.

**В четвертой главе** представлены результаты сравнительного анализа важнейших характеристик спектрально-эффективных и традиционных сигналов ГНСС в условиях жестких ограничений частотно-временного ресурса. За временной ресурс принят интервал когерентной обработки сигнала  $T$ , определяющий быстродействие системы и лимитированный для динамических объектов десятками миллисекунд. Учет спектрального ресурса сводится к выбору длительности чипа  $2\delta$  таким образом, чтобы регламентная полоса  $2W_{99}$  оставалась фиксированной. Тем самым, фиксация частотно-временного ресурса сводилась к удержанию постоянным произведения  $W_{99}T$ . Ограничение же энергоресурса учитывалось фиксацией энергопотенциала, т.е. отношения средней мощности сигнала  $\bar{P}$  к спектральной плотности шума  $N_0$ .

С учетом введенных ресурсных ограничений для всех отобранных форматов были рассчитаны зависимости потенциальной дисперсии оценки  $\hat{\tau}$  запаздывания  $\tau$  от нормированной полосы приемного тракта  $2W$ . На рисунке 4 представлены кривые для отношения дисперсий, соответствующих БФМ и МНФ сигналам. Как видно, переход от используемой ныне БФМ к МНФ позволяет существенно повысить точность измерения запаздывания сигнала. В частности, выигрыш от использования МЧМ в энергетическом пересчете достигает 12 дБ. Даже при полосе приемника, трехкратно превосходящей регламентную, соответствующие цифры удерживаются на уровне 8 дБ. Приведенные

Таблица 1 - Регламентная полоса исследуемых сигналов

Параметр	Вид модуляции						
	БФМ	МЧМ	МНФА	МНФП	МНФПЛ	МЧМП	ГМЧМ
$2W_{99}\delta$	10,28	1,18	2,2	1,42	1,88	0,86	0,91

графики также свидетельствуют о том, что усложненные МНФ форматы в сравнении с МЧМ никакого заметного резерва повышения точности не содержат.

Следующим шагом явилась оценка влияния многолучевых эффектов на потенциальную точность измерения навигационного параметра. Результаты анализа, иллюстрируемые рис.5, показывают, что при измерении запаздывания сигнала в условиях многолучевого распространения МНФ форматы также существенно выигрывают в точности по сравнению с ФМ. При этом для МЧМ выигрыш в энергетическом пересчете составляет 9-14 дБ в зависимости от истинного запаздывания многолучевого

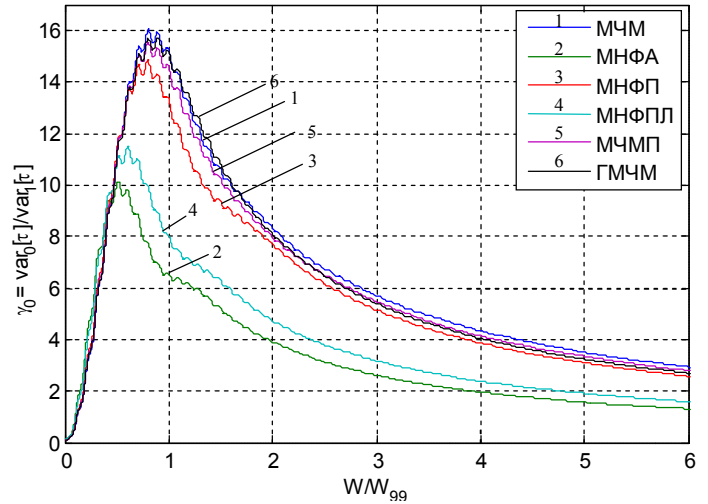


Рисунок 4 – Отношения дисперсий оценок  $\tau$  для БФМ и МНФ сигналов

сигнала в условиях многолучевого распространения МНФ форматы также существенно выигрывают в точности по сравнению с ФМ. При этом для МЧМ выигрыш в энергетическом пересчете составляет 9-14 дБ в зависимости от истинного запаздывания многолучевого

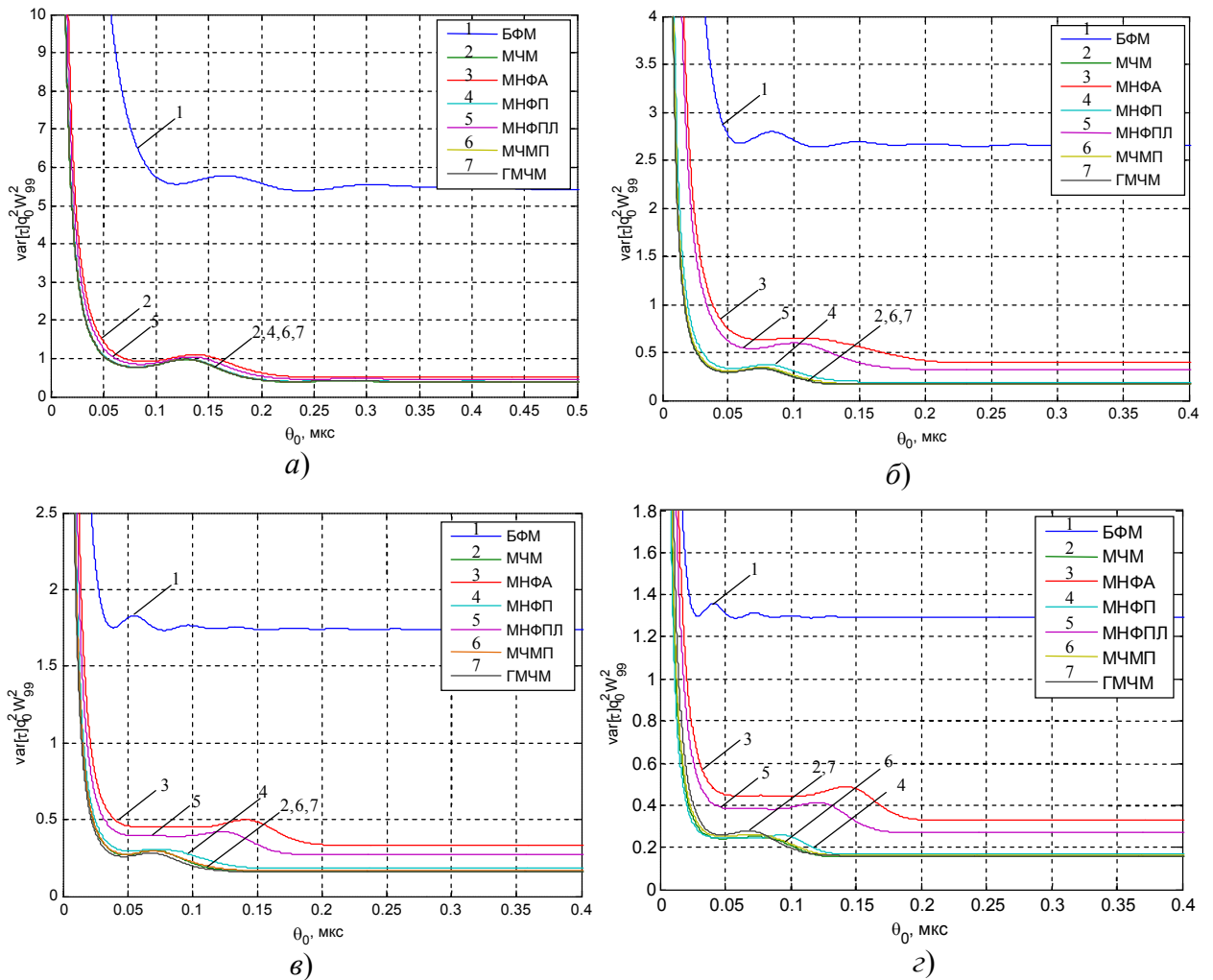


Рисунок 5 – Дисперсия оценки запаздывания сигнала в условиях многолучевости при ширине полосы приемного устройства а)  $W/W_{99}=0,5$ ; б)  $W/W_{99}=1$ ; в)  $W/W_{99}=1,5$ ; г)  $W/W_{99}=2$ .

отражения  $\theta_0$ . Среди форматов с полным откликом наибольший выигрыш по-прежнему обеспечивает МЧМ. Усложнение модуляционного формата за счет введения памяти дополнительных преимуществ не приносит и в этом случае.

Для приближения к найденным границам точности оценки запаздывания навигационного сигнала в присутствии многолучевого отражения требуется проведение совместного измерения нескольких его параметров. Поскольку указанная процедура подразумевает применение довольно сложных в реализации алгоритмов, на практике применяют следующие системы на основе временного дискриминирования. Смещение дискриминационной характеристики относительно нуля за счет влияния отраженного сигнала составляет ошибку многолучевости. В литературе подобные ошибки часто описывают графиками их огибающих в зависимости от задержки отраженного сигнала относительно прямого. На рисунке 6 представлены

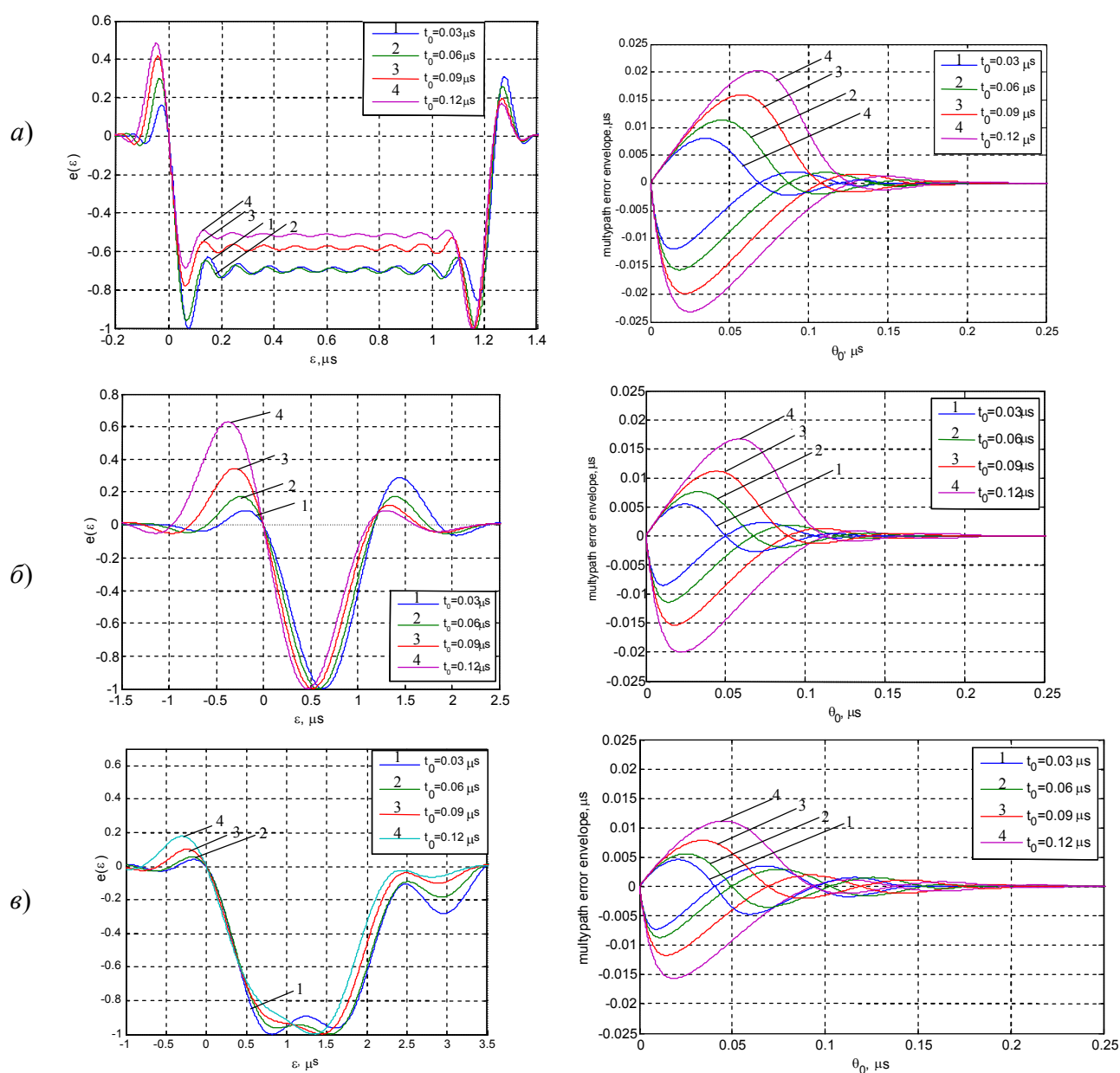


Рисунок 6 – Дискриминационные характеристики и огибающие ошибок многолучевости: а) БФМ; б) МЧМ; в) ГМЧМ

дискриминационные характеристики оптимального дискриминатора, работающего по «чистому» участку прямого сигнала и огибающие ошибок многолучевости для трех вариантов модуляционного формата: ФМ, МЧМ и ГМЧМ при ограничении спектра регламентной полосой. Как можно видеть, и в этой ситуации спектрально-эффективные форматы превосходят ФМ по показателю многолучевой ошибки.

Очередным показателем, подвергнутым анализу, была глубина подавления внутрисистемных помех в радиоинтерфейсе CDMA. В отсутствие ресурсных ограничений влияние модуляционного формата на подавление помех множественного доступа (ПМД) носит косвенный характер, а решающая роль принадлежит длине  $N$  кодовых сигнатур. При введении ограничения на частотно-временной ресурс значение  $N$  обретает критическую зависимость от формата модуляции. Иммунитет к внутрисистемным помехам адекватно оценивается отношением средней мощности ПМД ( $\bar{P}_{kl}$ ), к мощности полезного эффекта  $|z_{kk}|^2$  на выходе пользовательского приемника. Итоги численного анализа, приведенные в таблице 2, явно свидетельствуют о преимуществах спектрально-эффективных форматов в плане подавления ПМД.

В частности, использование МЧМ сигналов в условиях лимитированного частотно-временного ресурса обеспечивает выигрыш в уровне ПМД относительно ФМ порядка 10 дБ. Форматы с частичным откликом хоть и имеют меньшую регламентную полосу, но из-за наличия памяти обладают «растянутой» АКФ. Расширение главного лепестка АКФ фактически эквивалентно сокращению числа посылок, приходящихся на временной интервал  $T$ , пропорционально снижающему эффективность фильтрации ПМД. Усложнения МЧМ с полным откликом также не дают положительного эффекта, поскольку для удержания регламентной полосы в требуемых пределах необходимо увеличить длительность посылки (а, следовательно, и расширить АКФ), тем самым снизив качество подавления ПМД.

Исследование иммунитета спектрально-эффективных сигналов к преднамеренным помехам проводилось для двух сценариев: адаптивного и неадаптивного приема. Рассмотрены наиболее опасные модели помехи для каждого из сценариев: при неадаптивном приеме – помеха, спектр мощности которой сосредоточен на частоте максимума спектра сигнала; при неадаптивном – помеха, энергетический спектр которой повторяет амплитудно-частотный спектр сигнала. Результаты расчета выигрыша в отношении сигнал-помеха  $\eta_i = q_{\text{ВЫХ}}^2 / q_{\text{ВХ}}^2$  ( $i = 1, 2$  – номер сценария,  $q_{\text{ВХ}}$  и  $q_{\text{ВЫХ}}$  – отношения сигнал-помеха на входе и выходе приемника соответственно) представлены в

Таблица 2 – Относительный уровень помехи множественного доступа

Параметр	Вид модуляции						
	ФМ	МЧМ	МНФА	МНФП	МНФПЛ	МЧМП	ГМЧМ
$(\bar{P}_{kl} /  z_{kk} ^2) W_{99} T$	13,7	1,39	2,16	1,49	1,92	1,42	1,4

таблице 3, указывая на существенное превосходство форматов МНФ относительно ФМ и в степени подавления и преднамеренных помех, обязанное большей равномерности МНФ спектров в пределах регламентной полосы. В частности, из таблицы видно, что МЧМ выигрывает у ФМ в помехоустойчивости к преднамеренной помехе в сценариях адаптивного и неадаптивного приема соответственно 6 и 10 дБ.

Далее были рассчитаны показатели воздействия на приемник сигналов сторонних систем, работающих на близких несущих. В роли мешающих рассматривались как ФМ, так и МНФ сигналы. В таблице 4 даны значения отношения мощностей помехи  $\overline{P_{ab}}$  и полезного сигнала  $|z_{bb}|^2$  после корреляционной обработки, вновь демонстрирующие достоинства спектрально-эффективной модуляции. Так, для МЧМ средняя мощность межсистемной помехи оказывается на 8 дБ ниже, чем для ФМ.

В качестве заключительного шага была проанализирована электромагнитная совместимость сигналов со спектрально-эффективной модуляцией со службой радиоастрономических наблюдений. Для беспрепятственной работы данной службы внеполосные излучения ГНСС ГЛОНАСС в окне 1610,6 – 1613,8 МГц должны соответствовать требованиям Регламента ИТУ. Оценки плотности потока мощности, проникающей в указанное окно, как правило, указывают на необходимость дополнительной режекции соответствующих спектральных компонент сигнала ГЛОНАСС. В этом смысле модуляционные форматы можно ранжировать по необходимой глубине режекции. В таблице 5 приведены значения необходимой глубины режекции для форматов МНФ, а также ВОС. Как видно использование большинства модуляционных

Таблица 3 - Выигрыш в отношении сигнал-помеха

Параметр	Вид модуляции						
	БФМ	МЧМ	МНФА	МНФП	МНФПЛ	МЧМП	ГМЧМ
$\eta_1/(W_{99}T)$	0,097	1,046	0,666	0,971	0,751	1,015	1,029
$\eta_2/(W_{99}T)$	0,108	0,430	0,305	0,410	0,329	0,424	0,430

Таблица 4 – Относительный уровень межсистемной помехи

$(\overline{P_{ab}}/ z_{aa} ^2)W_{99}T$		Вид модуляции полезного сигнала						
		БФМ	МЧМ	МНФА	МНФП	МНФПЛ	МЧМП	ГМЧМ
Вид модуляции помехи	БФМ	13,70	1,86	2,87	2,00	2,56	1,91	1,89
	МЧМ	1,86	1,39	1,16	1,43	1,58	1,40	1,39
	МНФА	2,87	1,16	2,16	1,72	2,03	1,67	1,65
	МНФП	2,00	1,43	1,72	1,49	1,66	1,45	1,43
	МНФПЛ	2,56	1,58	2,03	1,66	1,92	1,61	1,59
	МЧМП	1,91	1,40	1,67	1,45	1,61	1,42	1,41
	ГМЧМ	1,89	1,39	1,65	1,43	1,59	1,41	1,40

Таблица 5 – Уровень внеполосных излучений НС (диапазон L1)

Параметр	Вид модуляции							
	ВОС (1,1)	ВОС (5,2.5)	МЧМ	МНФА	МНФП	МНФПЛ	МЧМП	ГМЧМ
Частота несущей, МГц	1594,3455	1600,995	1598,949	1597,4145	1595,88	1596,3915	1594,857	1597,4145
Глубина режекции, дБ	14,92	11,42	1,023	0	10,4	0	11,20	2,65

форматов с непрерывной фазой позволяет заметно смягчить требования к режекции компонент сигнала ГЛОНАСС в радиоастрономическом окне в сравнении с форматами ВОС. Результаты выбора параметров НС, обеспечивающих минимальные значения уровня внеполосных излучений, сведены в таблицу 6. В качестве длительности чипа НС для форматов с памятью выступает интервал изменения его фазового отклика.

Служба радиоастрономических измерений, расположенная вблизи диапазона Ku, занимает полосу 14,47-14,5 ГГц. Установленные Регламентом ИТУ лимиты мощности излучений составляют  $-190$  дБ Вт/м<sup>2</sup> в контрольном окне шириной 150 кГц. Проведенные расчеты показали, что все исследуемые модуляционные форматы удовлетворяют приведенным ограничениям.

Результаты выбора параметров НС для номинала несущей  $f_0 = 14352,69$  МГц сведены в таблицу 7.

**В заключении** дается перечень основных результатов диссертационной работы.

Таблица 6 – Параметры НС (диапазон L1)

Параметр	Вид модуляции					
	МЧМ	МНФА	МНФП	МНФПЛ	МЧМП	ГМЧМ
$\Delta_1 (\delta_1)$ , мкс	0,244	0,489	0,489	0,244	0,489	0,244
Тактовая частота, МГц	4,092	2,046	2,046	4,092	2,046	4,092
Длина кода	4092	2046	2046	4092	2046	4092

Таблица 7 – Параметры НС (диапазон Ku)

Параметр	Вид модуляции					
	МЧМ	МНФА	МНФП	МНФПЛ	МЧМП	ГМЧМ
$\Delta_1 (\delta_1)$ , мкс	0,025	0,047	0,031	0,041	0,018	0,020
Тактовая частота, МГц	39,897	21,483	32,736	24,552	54,219	51,15
Длина кода	1287	1023	1488	1116	1749	2325
Период кода, мс	0,032	0,048	0,046	0,046	0,031	0,047

## Основные результаты работы

1. Предложены варианты построения навигационного сигнала на основе спектрально-эффективной модуляции с полным и частичным откликами.

2. Разработан математический инструментарий для исследования МНФ сигналов с частичным откликом. Доказано, что МНФ с памятью можно свести к суперпозиции бинарно-манипулированных квадратур, т.е. трактовать как оффсетную КФМ. Приведен алгоритм восстановления формы чипа ГНСС сигнала, построенного на основе МНФ с

памятью  $L=2$  с произвольным законом угловой модуляции. Получено разложение МНФ сигнала с памятью  $L=2$  в базисе Уолша, явно разделяющее полезные и комбинационные составляющие сигнала. Получено аналитическое выражение для численного расчета автокорреляционной функции МНФ сигнала с произвольным объемом памяти.

3. Исследована спектральная эффективность модуляционных форматов с непрерывной фазой с полным и частичным откликами. Показано, что усложнение закона частотной модуляции, обеспечивающее непрерывность производных мгновенной фазы, приводит к расширению регламентной полосы сигнала. Установлено, что введение памяти в МНФ за счет увеличения длительности чипа обеспечивает меньшее значение регламентной полосы сигнала, однако приводит к растяжению АКФ сигнала. Для дальнейшего исследования отобраны следующие модуляционные форматы, обеспечивающие наилучшую спектральную компактность: МЧМ, МНФА, МНФП, МНФПЛ, МЧМП, ГМЧМ.

4. В рамках фиксированного частотно-временного ресурса выполнен детальный анализ важнейших характеристик НС со спектрально-эффективной модуляцией: потенциальной точности оценки запаздывания сигнала, устойчивости к многолучевой помехе с неизвестными параметрами, иммунитета к преднамеренным помехам для сценариев неадаптивного и адаптивного приема, уровня внутрисистемных и межсистемных помех, а также совместимости с радиоастрономическим диапазоном. Установлено, что по приведенным критериям в рамках жесткой спектральной регламентации приоритет принадлежит модуляционным форматам с непрерывной фазой.

5. Показано, что сигналы с минимальной частотной модуляцией обеспечивают практически наилучшие значения указанных параметров.

6. Рекомендованы конкретные значения параметров МНФ сигналов, позволяющие минимизировать необходимый уровень режекции спектральных компонент в радиоастрономическом диапазоне.



## Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных трудах.

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

1. Хачатурян А.Б. Модуляция с непрерывной фазой как инструмент улучшения компактности спектра сигналов спутниковой навигации [Текст] / Ипатов В.П., Игнатъев Ф.В., Хачатурян А.Б. // Известия вузов России, Радиоэлектроника, СПб, 2012. - Вып. 4 - С. 28-36.

2. Хачатурян А.Б. Модуляция с непрерывной фазой при наличии памяти: аддитивное разложение и спектральная эффективность [Текст] / Ипатов В.П., Игнатъев Ф.В., Хачатурян А.Б. // Известия вузов России, Радиоэлектроника, СПб, 2012. - Вып. 5 - С. 3-8.

3. Хачатурян А.Б. Спектрально-эффективная модуляция с памятью в приложении к формированию дальномерных сигналов ГНСС [Текст] / Игнатъев Ф.В., Хачатурян А.Б. // Журнал Радиоэлектроники, №2, 2012. – URL: <http://jre.cplire.ru/mac/feb12/6/text.html>.

4. Хачатурян А.Б. Спектрально-эффективные CDMA-сигнатуры и помеха множественного доступа [Текст] / Ипатов В.П., Хачатурян А.Б. // Радиотехника, Москва, 2012. - № 7 - С. 9-13.

5. Хачатурян А.Б. Точность измерения запаздывания спектрально-эффективных сигналов с полным и частичным откликом [Текст] / Ипатов В.П., Хачатурян А.Б. // Известия вузов России, Радиоэлектроника, СПб, 2013. - Вып.2 - С. 13-17.

свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

6. «Программа для изучения характеристик спектрально-эффективных сигналов с полным и частичным откликом согласно рекомендованной шкале показателей (SRM signal)»: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭФМ: Хачатурян А.Б.; заявитель и правообладатель СПбГЭТУ. - №2013660775; заявл. 02.11.2013; выд. 19.11.2013.

в сборниках трудов международных конференций

7. Хачатурян А.Б. Спектральная эффективность ЧМ сигналов с непрерывной фазой и откликом [Текст] / Хачатурян А.Б. // Восьмая международная молодежная научно-техническая конференция РТ-2012, Севастополь, 2012. - С. 50.

8. Хачатурян А.Б. Спектральная эффективность ЧМ сигналов с непрерывной фазой и откликом [Текст] / Хачатурян А.Б. // Девятая международная молодежная научно-техническая конференция РТ-2013, Севастополь, 2013. - С. 50.

9. Хачатурян А.Б. Точность измерения запаздывания спектрально-эффективных сигналов полным и частичным откликом [Текст] / Хачатурян А.Б. // Международная научно – практическая конференция «Современные тенденции в образовании и науке», Тамбов, 2013. - С. 149 - 150.

в сборниках трудов региональных конференций

10. Хачатурян А.Б. Перспективные применения спектрально-эффективной модуляции в радиоинтерфейсах спутниковой модуляции [Текст] / Хачатурян А.Б. // 66-я научно-техническая конференция, посвященная Дню Радио, СПб, 2011. - С. 37.

11. Хачатурян А.Б. Уровень помехи множественного доступа в ансамбле сигналов с непрерывной фазой и памятью [Текст] / Хачатурян А.Б. // 67-я научно-техническая конференция, посвященная Дню Радио, СПб, 2012. - С. 40-41.

12. Хачатурян А.Б. Точность измерения запаздывания ЧМ сигналов с непрерывной фазой и памятью [Текст] / Хачатурян А.Б., Никоноров А.А. // 68-я научно-техническая конференция, посвященная Дню Радио, СПб, 2013. - С. 60-61.

13. Хачатурян А.Б. Спектрально-эффективная модуляция с памятью в приложении к формированию дальномерных сигналов ГНСС [Текст] / Игнатьев Ф.В., Хачатурян А.Б. // Пятая всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и связь», Москва, 2011. - С. 162 - 165.

14. Хачатурян А.Б. Потенциальная точность измерения запаздывания спектрально-эффективных сигналов с полным и частичным откликом [Текст] / Хачатурян А.Б. // Научно-техническая школа – семинар «Инфокоммуникационные технологии в цифровом мире», СПб, 2012. - С. 27-28.