

На правах рукописи



Лисничук Александр Александрович

**ПРОЦЕДУРЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО СИНТЕЗА
МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ КАНАЛЬНОГО
АЛФАВИТА ДЛЯ АДАПТАЦИИ РАДИОСИСТЕМ
ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ К ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКЕ**

Специальность:

05.12.04 - «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань 2016

Работа выполнена на кафедре радиоуправления и связи ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный радиотехнический университет»

- Научный руководитель – **Кириллов Сергей Николаевич**,
заслуженный работник ВШ РФ,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «РГРТУ», зав. кафедрой
Радиоуправления и связи
- Официальные оппоненты – **Горгадзе Светлана Феликсовна**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский технический университет
связи и информатики», профессор кафедры
Радиооборудования и схемотехники
- **Попов Евгений Александрович**,
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого», доцент кафедры
Радиотехнических и телекоммуникационных систем
- Ведущая организация ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»

Защита состоится «9» декабря 2016 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический
университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский
государственный радиотехнический университет» и на сайте ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный радиотехнический университет» (www.rsgeu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять
по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

Автореферат разослан «__»_____2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.04

доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На практике работа беспроводных систем передачи информации (СПИ) осуществляется в условиях действия различного вида радиопомех. Среди них широкое распространение получили помехи с сосредоточенной по спектру энергией – узкополосные помехи (УП).

На показатели качества СПИ (в том числе и на помехоустойчивость при действии УП) существенное влияние оказывают вид используемых сигналов и характеристики устройств их обработки. Значительный вклад в развитие данной области знаний внесли отечественные и зарубежные ученые В.А. Котельников, И.С. Гоноровский, К. Шеннон, Я.Д. Ширман, Л.С. Гуткин, Л.Е. Варакин, Д.Е. Вакман, Р.М. Седлецкий, С.Б. Макаров, Ч. Кук, М. Бернфельд, Л. Френкс, Г. Ван Трис, и др.

Следует отметить, что спектральный состав действующих УП меняется с течением времени, что при фиксированном виде модуляции и устройстве обработки сигнала не позволяет достигнуть заявленных характеристик. При априорно неизвестной помеховой обстановке наибольшей эффективностью обладают адаптивные системы – интеллектуальные системы передачи информации (ИСПИ).

Для реализации адаптации СПИ в ряде зарубежных работ предлагается технология когнитивного радио (cognitive radio), использующая на вторичной основе участки спектра, не занятые в текущий момент службами, за которыми закреплены эти частоты. Существующие системы когнитивного радио могут перестраивать сигнал путем варьирования несущей частоты, мощности радиопередатчика, скорости передачи информации, а также способов кодирования и модуляции, т.е. эти системы применяют класс известных видов радиосигналов. Однако такой подход не позволяет реализовать многоэшелонированную помехозащищенность радиолинии, т.к. известные виды модуляции и кодирования могут быть распознаны с целью перехвата передаваемого сообщения или постановки эффективной структурной помехи. Кроме того, системы когнитивного радио могут посчитать диапазон частот непригодным для передачи информации при наличии УП, что в свою очередь в целом уменьшает эффективность использования свободных участков спектра.

Другой вариант построения СПИ, адаптивной к сосредоточенным по спектру помехам – это режекция пораженных участков спектра на приемной стороне. Однако при этом наблюдается ухудшение отношения сигнал-шум и увеличение боковых лепестков корреляционной функции на выходе согласованного фильтра при детектировании радиосигналов.

В работах проф. С.Н. Кириллова предложено синтезировать радиосигналы с нелинейной частотной модуляцией, обеспечивающие ослабление влияния УП на СПИ за счет формирования провала в спектре частот в полосе действия помех. Представляет интерес развитие данной теории для случая многопозиционных радиосигналов в адаптивных СПИ с учетом быстродействия современной элементной базы. Следовательно, в условиях ограниченного частотного ресурса или в интересах дальнейшего развития технологии когнитивного радио целесообразно производить синтез радиосигналов для адаптации ИСПИ к действию УП при использовании в том числе и неизвестных видов модуляции. При этом оптимизация по единственному показателю качества приводит к неконтролируемому ухудшению других показателей, поэтому для более эффективного использования ресурсов радиоканала целесообразно применять многокритериальный (МК) синтез сигналов, являющийся в свою очередь задачей нелинейного программирования сравнительно высокой размерности, решение которой необходимо производить при динамичном изменении внешних условий, т.е. в

режиме реального времени. Следует отметить, что, как правило, при передаче цифровой информации по радиоканалу в процессе модуляции осуществляется отображение битового потока данных в набор сигналов, согласованных с характеристиками используемого канала. Причем совокупность таких детерминированных сигналов образует каналный алфавит (КА) данного вида модуляции, который определяет качественные характеристики СПИ (помехоустойчивость, энергоэффективность и др.). Следовательно, для адаптации ИСПИ к действию УП возможно применение представления радиосигналов в виде совокупности элементов КА.

Класс радиосигналов с прямым расширением спектра обладает сравнительно высокой помехоустойчивостью. При этом при использовании таких радиосигналов появляется дополнительная возможность управления характеристиками ИСПИ, в том числе и для минимизации воздействия помех, за счет синтеза ансамбля кодовых последовательностей (КП) с определенными свойствами. В известных работах предлагалось синтезировать структуру сложных двухпозиционных сигналов с помощью прямого расширения спектра. Однако, представляет интерес развитие данной теории для синтеза структуры многопозиционных, в частности четырехпозиционных, радиосигналов, которые на сегодняшний день получили широкое распространение на практике. Кроме того, при использовании известных видов модуляции в ИСПИ необходимо производить адаптацию не только к действию УП, но и – структурных (сигналоподобных) помех (СП). Это связано с тем, что СП оказывают особенно негативное воздействие на СПИ за счет корреляции по некоторым параметрам с полезным радиосигналом при совпадающих частотно-временных диапазонах. Следовательно, при использовании класса радиосигналов с прямым расширением спектра целесообразно производить МК синтез ансамбля КП для адаптации ИСПИ как к УП, так и к СП.

При согласованности используемых процедур кодирования и модуляции по некоторому критерию получают сигнально-кодовые конструкции (СКК), обеспечивающие дополнительное улучшение характеристик СПИ. На практике широко распространены СКК на основе решетчатого кодирования и «зависимых» сигналов длительностью T_s (где T_s – символьный интервал), позволяющие реализовать соответственно повышение помехоустойчивости СПИ к действию аддитивного «белого» гауссовского шума (АБГШ) без расширения занимаемой полосы частот и уменьшение внеполосного излучения. Однако применение перечисленных СКК в условиях действия УП, спектральный состав которых может изменяться с течением времени, не позволяет достигнуть заявленных характеристик. При этом адаптация ИСПИ за счет использования класса известных СКК, как отмечалось выше, не позволяет обеспечить многоэшелонированную помехозащищенность радиолинии. Необходимо отметить, что разработка нестандартных процедур кодирования, удовлетворяющих требованиям вышеперечисленных СКК, представляет собой нетривиальную задачу, так как многие из известных процедур кодирования данных классов разрабатывались на основе эмпирического подхода. Следовательно, адаптацию СКК к действующим УП целесообразно осуществить за счет синтеза многопозиционных радиосигналов, удовлетворяющих требованиям к соответствующему классу СКК.

Цель и задачи работы. Основной целью работы является разработка процедур МК синтеза многопозиционных радиосигналов (на основе определения КА и ансамбля КП) и СКК для адаптации ИСПИ к действующей помеховой обстановке.

Поставленная цель включает решение следующих задач:

1 обосновать обобщенную форму представления радиосигналов в виде элементов КА для описания как известных, так и нестандартных видов модуляции для адаптации ИСПИ к УП; предложить набор критериев качества радиосигналов, учитывающих наиболее значимые характеристики ИСПИ;

2 обосновать процедуру МК синтеза радиосигналов на основе элементов КА и проанализировать ее эффективность;

3 разработать процедуру МК синтеза четырехпозиционных радиосигналов с прямым расширением спектра на основе определения ансамбля КП для адаптации ИСПИ к УП и СП, а также проанализировать их эффективность;

4 обосновать процедуру МК синтеза СКК на основе решетчатого кодирования для адаптации ИСПИ к УП и произвести анализ ее эффективности;

5 разработать процедуру МК синтеза СКК на основе «зависимых» сигналов, для адаптации ИСПИ к УП и проанализировать ее эффективность;

6 оценить требуемые вычислительные затраты для реализации разработанных процедур МК синтеза радиосигналов на современной элементной базе.

Научная новизна. В рамках диссертационной работы были получены следующие новые научные результаты:

1 Предложена процедура МК синтеза радиосигналов на основе КА для адаптации ИСПИ к УП, учитывающая такие показатели качества как ослабление действия УП, внеполосное излучение, помехоустойчивость при действии АБГШ и энергоэффективность формируемого радиосигнала. Показано, что при наиболее неблагоприятном (из рассмотренных) воздействии на радиоканал УП (ширина спектра – 5 % от ширины спектральной плотности мощности (СПМ) синтезированного сигнала; расположение – на частоте несущего колебания сигнала) обеспечивалась помехоустойчивость на уровне сигнала с QPSK при воздействии только АБГШ вплоть до отношения сигнал-помеха –7 дБ, что на 27 дБ лучше данного показателя для QPSK-сигнала.

2 Для адаптации ИСПИ в реальном масштабе времени предложена процедура быстрого МК синтеза четырехпозиционных радиосигналов за счет определения функциональной зависимости между отсчетами КА и значением центральной частоты действующей УП.

3 Обоснована двухэтапная процедура синтеза четырехпозиционных радиосигналов с расширением спектра (на основе определения ансамбля КП) для адаптации ИСПИ к действующим УП, использующая комбинированный критерий качества, в состав которого входят частные критерии, отвечающие за пропускную способность и минимизацию действия УП, помехоустойчивость при действии АБГШ, а также минимизацию перепутывания информационного символа при погрешностях системы тактовой синхронизации. Данная процедура синтеза при наиболее неблагоприятном (из рассмотренных) воздействии на радиоканал УП (ширина спектра – 6 % от ширины СПМ синтезированного сигнала с расширением спектра; расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала) обеспечивает улучшение помехоустойчивости на 2,2 дБ, а для УП с центральной нормированной частотой $0,25 fT_s$ – на 5 дБ по сравнению с QPSK-сигналами с расширением спектра ансамблем дополненных М-последовательностей.

4 Предложена двухэтапная процедура МК синтеза четырехпозиционных радиосигналов с расширением спектра на основе определения ансамбля КП, обеспечивающая за счет использования аппарата вейвлет-пакетного разложения (ВПР) адаптацию ИСПИ к действующим СП. Показано, что радиосигналы с синтезированным ансамблем

блем КП при воздействии АБГШ и СП обеспечивают выигрыш в помехоустойчивости до 5 дБ по сравнению с QPSK-сигналами с расширением спектра ансамблем дополненных M-последовательностей.

5 Предложена процедура синтеза СКК на основе решетчатого кодирования для адаптации ИСПИ к действию УП, использующая комбинированный критерий качества, в состав которого входят частные критерии, отвечающие за пропускную способность и ослабление действия УП, внеполосное излучение, помехоустойчивость при АБГШ для случая решетчатого кодирования, а также энергоэффективность формируемой СКК. Данная процедура синтеза СКК в случае неблагоприятного воздействия на радиоканал УП (ширина спектра – 5 % от ширины СПМ синтезированной СКК; расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала) обеспечивает помехоустойчивость на уровне известной СКК (trellis coded modulation (TCM) PSK-8) при воздействии только АБГШ вплоть до отношения сигнал-помеха –4 дБ, что на 21 дБ лучше данного показателя для рассмотренной известной СКК.

6 Предложена процедура синтеза СКК на основе «зависимых» сигналов для адаптации ИСПИ к действию УП, использующая комбинированный критерий качества, в состав которого входят критерии, отвечающие за пропускную способность и ослабление действия УП, внеполосное излучение, помехоустойчивость при АБГШ, а также энергоэффективность формируемой СКК. Данная процедура синтеза СКК в случае воздействия на радиоканал УП (ширина спектра – 5 % от ширины СПМ синтезированной СКК; расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала) обеспечивает помехоустойчивость на уровне QPSK-сигнала при воздействии только АБГШ вплоть до отношения сигнал-помеха –3 дБ, что на 23 дБ и 20 дБ лучше данного показателя для рассмотренных известных СКК (FQPSK-сигнала) и QPSK-сигнала соответственно. При этом при сравнимых значениях пик-фактора и порога помехоустойчивости синтезированные СКК на основе «зависимых» сигналов позволяют сократить ширину СПМ по уровню –30 дБ на 37 % в сравнении с синтезированными сигналами на основе КА; однако формирование провала в СПМ синтезируемых СКК для адаптации ИСПИ к УП не позволяет достигнуть характеристик, реализуемых FQPSK-сигналами.

Методы исследования. В работе использовались методы спектрального анализа, ортогональных разложений и статистической радиотехники, а также вычислительной математики. Данные теоретические методы сочетались с исследованиями на основе имитационного моделирования разработанных процедур.

Достоверность. Достоверность результатов и выводов, полученных в диссертационной работе, обосновывается корректностью численных экспериментов и адекватностью качественного и количественного сопоставления с известными положениями теории сигналов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Представленные в работе процедуры МК синтеза радиосигналов для адаптации ИСПИ к помеховой обстановке могут быть применены при разработке помехоустойчивых, адаптивных СПИ. Используемый в процедурах МК подход позволит более эффективно распределить представленные ресурсы радиоканала при динамичном изменении помеховой обстановки.

Результаты диссертационной работы нашли применение в разработках открытого акционерного общества «Российские космические системы» (ОАО «РКС») и учебном процессе ФГБОУ ВО «РГРТУ», что подтверждено соответствующими актами.

Положения, выносимые на защиту: 1 Процедура МК синтеза, позволяющая получить радиосигналы на основе КА, обеспечивающие, при воздействии на радиоканал АБГШ и УП, помехоустойчивость на уровне сигнала с QPSK при воздействии только АБГШ вплоть до отношения сигнал-помеха -7 дБ, что на 27 дБ лучше по сравнению с данным показателем для QPSK-сигнала.

2 Двухэтапная процедура МК синтеза, позволяющая получить четырехпозиционные радиосигналы с расширением спектра (на основе определения ансамбля кодовых последовательностей), обеспечивающие, при воздействии на радиоканал АБГШ и УП, выигрыш в помехоустойчивости от 2 до 5 дБ по сравнению с QPSK-сигналами с расширением спектра ансамблем дополненных M-последовательностей.

3 Процедура МК синтеза, позволяющая получить сигнально-кодовые конструкции на основе решетчатого кодирования, обеспечивающие, при воздействии на радиоканал АБГШ и УП, помехоустойчивость на уровне известных СКК (ТСМ PSK-8) при воздействии только АБГШ вплоть до отношения сигнал-помеха -4 дБ, что на 21 дБ лучше по сравнению с данным показателем для рассмотренных известных СКК.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: XVII, XVIII, XIX и XX ВНТК «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань, 2012, 2013, 2014 и 2015 гг.; LX СНТК. Рязань, 2013 г.; XVI и XVIII МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Москва, 2014 и 2016 гг.; LXIX МНТК «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий». Москва, 2014 г.; IV ВНТК «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники». Владимир, 2014 г.; XVIII МНТК молодых ученых и студентов «Молодежь и наука». Москва, 2015 г.; VII ВНТК «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Москва, 2015 г.; XVIII МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2015 г.; XXVIII МНТК «Математические методы в технике и технологиях». Рязань, 2015 г.; МНТК «Современные технологии в науке и образовании». Рязань, 2016 г.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа: 5 статей в научно-технических журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в межвузовском сборнике трудов, 14 тезисов докладов на конференциях и 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 101 наименования и одного приложения. Диссертация изложена на 156 страницах, из которых 113 страниц основного текста, 19 таблиц и 33 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В первой главе обоснована процедура МК синтеза радиосигналов на основе определения элементов КА для адаптации ИСПИ к УП. Сигналы как с известными (PSK, APSK, FSK, QAM, FQPSK), так и с нестандартными видами модуляции возможно представить в виде совокупности элементов КА $s_{r(i)}$:

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N_s} s_{r(i)}(t - iT_s), \quad (1)$$

где $r(i)$ – процедура кодирования, N_s – количество информационных символов. Причем при фиксированной процедуре кодирования параметры КА определяют спектрально-энергетические свойства сигнала. Это позволяет за счет синтеза соответствующего КА осуществить адаптацию ИСПИ к действию помех.

Для рационального использования ресурсов радиоканала применяется комбинированный критерий качества, в состав которого входят частные критерии, отвечающие за максимизацию пропускной способности радиопередачи информации в условиях действия УП (в виде «небелого» гауссовского шума); ограничение уровня внеполосного излучения; помехоустойчивость сигналов при действии АБГШ и энергетическую эффективность сигналов при использовании нелинейного усилителя мощности в радиопередатчике. Следовательно, синтез радиосигналов сводится к решению задачи МК оптимизации, которая требует сведения векторного показателя качества к скалярному. На практике довольно часто применяют способ результирующей целевой функции, как более удобный для использования в методах нелинейного программирования и имеющий возможность прямого определения веса показателей качества через соответствующие коэффициенты. С учетом этого для синтеза радиосигналов обосновано применение следующей целевой функции:

$$k_p(\mathbf{S}) = c_1 M_1 d_2(G_{opt}(f), G(f, \mathbf{S})) + c_2 M_2 / (\langle d_2(s_k, s_l) \rangle) + \\ + c_3 M_3 h(10 \cdot \lg[G(f, \mathbf{S})] - G_{\log}(f)) + c_4 M_4 (D[P_{мщ}(\mathbf{S})] / (M[P_{мщ}(\mathbf{S})])^2), \quad (2) \\ \sum_{i=1}^4 c_i = 1; \quad M_i, c_i > 0; \quad M_i, c_i = const; \quad s_k, s_l \in \mathbf{S}; \quad k, l = \overline{1, M}.$$

Здесь c_i – коэффициенты, определяющие вес каждого входящего критерия качества; M_i – нормирующие коэффициенты, приводящие отдельные слагаемые к общему динамическому диапазону; $d_2(\cdot)$ – расстояние в евклидовой метрике; $G_{opt}(f)$, $G(f, \mathbf{S})$ – соответственно «эталонный» и текущий нормированные СПМ радиосигналов; $\langle \cdot \rangle$ – оператор усреднения по ансамблю элементов КА \mathbf{S} ; $h(\cdot)$ – функция, накладывающая «штраф» за превышение внеполосного излучения; $G_{\log}(f)$ – «маска» СПМ в логарифмическом масштабе; $J_1(\mathbf{S}) = D[P_{мщ}(\mathbf{S})] / (M[P_{мщ}(\mathbf{S})])^2$ – отношение дисперсии к квадрату математического ожидания мгновенной мощности сигнала $P_{мщ}(\mathbf{S})$, вычисленной по элементам КА; M – позиционность вида модуляции.

Для поставленной задачи характерна высокая скорость изменения параметров УП, к которым осуществляется адаптация ИСПИ. Минимизацию целевой функции необходимо производить в реальном масштабе времени, следовательно, целесообразно использовать методы оптимизации, имеющие наибольшую скорость сходимости. При этом необходимо учитывать, что расчет первых и особенно вторых производных целевой функции (2) затруднен из-за ярко-выраженного нелинейного характера. В диссертационной работе показано, что при вышеприведенных требованиях целесообразно использование квазиньютоновских методов оптимизации.

Для адаптации ИСПИ к действию УП, предложена процедура (см. рисунок 1) МК синтеза радиосигналов на основе КА. При получении СПМ помехи вычисляется «эталон» СПМ сигнала $G_{opt}(f)$ (блок 2); далее в соответствии с выражением (2) формируется целевая функция k_p (блок 3). В блоке 4 инициализируется алгоритм опре-

деления области глобального оптимума, на первом этапе которого при помощи функциональной зависимости между синтезированными радиосигналами и параметрами УП вычисляется приближение КА (S_c). На втором этапе производится сравнение

значений целевой функции (2) при S_c с достигнутым на предыдущей ($j-1$) итерации (т.е. при $S(j-1)$); аргумент (т.е. КА) целевой функции с меньшим значением принимается принадлежащим области глобального оптимума. В блоке 5 определяется локальный оптимум в области глобального (вычисленного ранее): $\min_{\mathbf{S}} k_p(\mathbf{S})$. Выход из итерационного цикла 5-6 осуществляется при условии превышения времени адаптации или при выполнении стандартных критериев останова, таких как: достижение требуемой точности решения; снижение скорости движения к минимуму до значений ниже пороговых; или если метод оптимизации начал расходиться или заикливаться. В блоке 7 производится вывод оптимизированного КА S_{opt} , с последующим завершением процедуры. Данная процедура синтеза радиосигналов выполняется при каждом поступлении информации об изменении СПМ действующей УП.

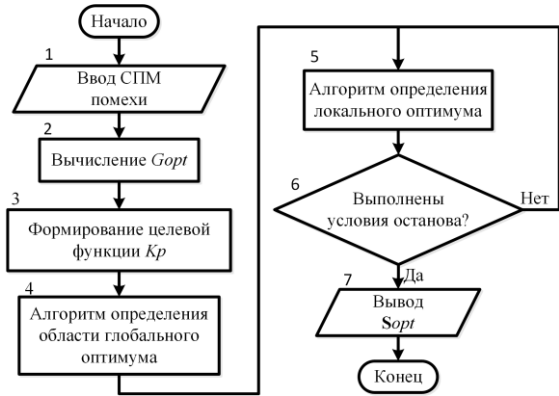


Рисунок 1 – Блок-схема процедуры многокритериального синтеза радиосигналов

Для исследования эффективности работоспособности предложенной процедуры МК синтеза радиосигналов для адаптации ИСПИ к действию УП на рисунке 2 представлены зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных радиосигналов от отношения сигнал-помеха (q). Здесь порог помехоустойчивости (g) определяется как значение равно отношению E_b / N_0 при вероятности битовой ошибки $P_o = 10^{-3}$, в условиях действия АБГШ и УП (ширина спектра – 5 % от ширины спектра синтезированного сигнала; расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала); в интересах получения устойчивых оценок для каждого значения g накапливалась статистика, соответствующая не менее 100 битовым ошибкам; кроме

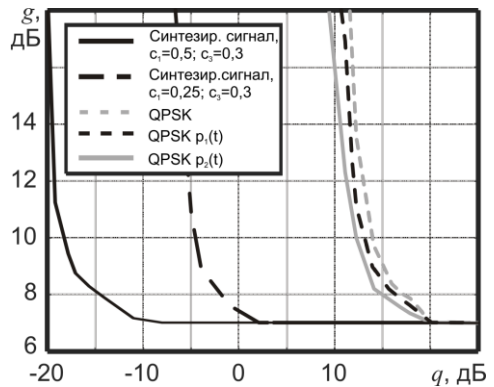


Рисунок 2 – Зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных радиосигналов от отношения сигнал-помеха

того для всех показателей качества ИСПИ статистика накапливалась по 100 реализациям. Из анализа рисунка 2 следует, что синтезированные радиосигналы при значениях весовых коэффициентов $c_1 = 0,5$; $c_3 = 0,3$ и $c_1 = 0,25$; $c_3 = 0,3$ вплоть до $q = -7$ и 2 дБ соответственно сохраняют помехоустойчивость на уровне сигнала с QPSK при воздействии только АБГШ; при этом для рассмотренных известных видов модуляции такое же значение показателя g достигается при отношении сигнал-помеха больше 20 дБ. Характеристики синтезированного сигнала при значениях $c_1 = 0,25$; $c_3 = 0,3$ приведены для иллюстрации показателя помехоустойчивости при уменьшении весового коэффициента c_1 для критерия максимума пропускной способности за счет ослабления действия УП.

Показатели качества внеполосного излучения и энергетической эффективности синтезированных и известных радиосигналов приведены в

Таблица 1 – Показатели качества радиосигналов

	QPSK		Синтезированный сигнал	
	$(p_1(t))$	$(p_2(t))$	$(c_1 = 0,25 ; c_3 = 0,3)$	$(c_1 = 0,5 ; c_3 = 0,3)$
G_{30}	4,6	3,8	5,1	5,6
G_{60}	32,0	13,4	11,1	9,9
П	1,4	1,6	1,4	1,6

таблице 1. Радиосигналы с синтезированным КА при $c_1 = 0,25$; $c_3 = 0,3$ и $c_1 = 0,5$; $c_3 = 0,3$, хотя и имеют большую ширину спектра на уровне -30 дБ (G_{30}) за счет формирования провала в СПМ, выигрывают на уровне -60 дБ (G_{60}) в сравнении с спектрально-эффективными сигналами: с QPSK с элементарным импульсом $p_2(t) = \sin^2(\pi t / T_s)$ – более чем в 1,2 и 1,3 раза; а с QPSK $p_1(t) = \sin(\pi t / T_s)$ – в 2,9 и 3,2 раза соответственно. При этом значение пик-фактора (П) сравнимо для известных сигналов с QPSK ($p_2(t)$) и синтезированных при $c_1 = 0,5$; $c_3 = 0,3$; а также с QPSK ($p_1(t)$) и при $c_1 = 0,25$; $c_3 = 0,3$.

Показана возможность реализации процедуры адаптации ИСПИ к УП на современной отечественной элементной базе (ЦСП 1892ВМ7Я производства НПЦ «ЭЛВИС»). При этом для адаптации ИСПИ к действию УП предлагаемая процедура МК синтеза радиосигналов может быть реализована при количестве отсчетов на символ $l_s = 32$, скорости передачи информации $R_s = 8$ кбит/с и количестве битовых интервалов, через которое производится очередной акт оптимизации КА $n_{opt} = 1000$ (оперативность адаптации к УП – менее 125 мс).

Кроме того, для адаптации ИСПИ в реальном масштабе времени предложена процедура быстрого МК синтеза четырехпозиционных радиосигналов за счет определения функциональной зависимости между отсчетами КА и значением центральной частоты действующей УП. Адекватность процедуры подтверждается при отклонении внешних параметров от значений, в которых производилась аппроксимация данной аналитической зависимости. Данная процедура на ЦСП 1892ВМ7Я может быть реализована в режиме реального времени при $R_s = 10$ Мбит/с и $n_{opt} \leq 1$.

Во второй главе разработаны процедуры МК синтеза четырехпозиционных радиосигналов с прямым расширением спектра на основе определения ансамбля КП для

адаптации ИСПИ к действующим помехам (УП и СП). Сигналы, сформированные методом прямого расширения спектра, также можно представить в виде совокупности элементов КА $s_{r(i)}$, каждый из которых описывается с помощью соответствующей расширяющей КП и элементарного импульса $p_{r(i)}(t)$, то есть:

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N_g} s_{r(i)}(t - iT_S) = \sum_{i=1}^{N_g} \left(\sum_{j_{KPI}=1}^n \left[b_{r(i)}[j_{KPI}] \cdot p_{r(i)} \left(t - iT_S - j_{KPI} \frac{T_S}{n} \right) \right] \right), \quad (3)$$

$$s_r \in \mathbf{S}; \quad r = \overline{1, M};$$

где $p_{r(i)}(t) = 0$, при $t \leq 0$, $t \geq T_S / n$; n – количество элементов $b_{r(i)}[j_{KPI}]$ в расширяющей КП $\mathbf{b}_{r(i)}$, в общем случае комплексных; M – позиционность вида модуляции, соответствующая количеству элементов в КА \mathbf{S} .

Из анализа выражения (3) следует, что свойства ИСПИ, в том числе обеспечивающие минимизацию воздействия помех и различимость радиосигналов на фоне АБГШ, зависят как от набора элементарных импульсов, так и от ансамбля расширяющих КП. Следовательно, возможен синтез сложных многопозиционных радиосигналов для обеспечения более гибкой адаптации ИСПИ к сигнально-помеховой обстановке, чем при формировании одиночной расширяющей КП. Для определения реализуемых свойств, в данной главе рассмотрена адаптация ИСПИ только за счет синтеза ансамбля КП. При этом следует отметить, что рассмотренная задача представляет собой частный случай синтеза КА. Для уточнения постановки задачи МК синтеза необходимо ограничить класс сигналов, используемых при адаптации в ИСПИ. В настоящее время для передачи информации широко используются четырехпозиционные сигналы и, в частности, QPSK-сигналы, позволяющие получить сравнительно высокие показатели качества при малом объеме КА, что в свою очередь положительно отражается на скорости оптимизации.

В процедуре синтеза КП для адаптации ИСПИ к действию УП обосновано применение комбинированного критерия качества, первое слагаемое которого отвечает за максимизацию пропускной способности радиоканала СПИ в условиях действия УП, второе – за различимость сигналов на фоне АБГШ, третье – косвенно за различимость сигналов при погрешностях тактовой синхронизации (в пределах 10 %), четвертое – косвенно за уменьшение ошибок тактовой синхронизации:

$$k_p(\mathbf{B}) = c_1 M_1 d_2 (G_{opt}(f), G_{KPI}(f, \mathbf{B})) + c_2 M_2 / (< d_2(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) >) +$$

$$+ c_3 M_3 < V(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) > + c_4 M_4 < R(\mathbf{b}_k) >, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^4 c_i = 1; \quad M_i, c_i > 0; \quad M_i, c_i = const; \quad \mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l \in \mathbf{B}; \quad k, l = \overline{1, M}, \quad k \neq l;$$

где $G_{KPI}(f, \mathbf{B})$ – СПМ ансамбля КП (\mathbf{B}); $< V(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) >$ – среднеарифметическое сумм модулей (в 10 %-м центральном диапазоне) взаимнокорреляционных функций элементов ансамбля КП; $< R(\mathbf{b}_k) >$ – среднеарифметическое сумм модулей боковых лепестков автокорреляционных функций (АКФ) элементов ансамбля КП.

Для реализации процедуры адаптации ИСПИ к действию СП первое слагаемое в целевой функции (4) заменено на критерий минимума воздействия СП. Данный критерий требует максимума энергии в тех ветвях ВПР синтезируемого ансамбля КП, в которых энергия действующей СП минимальна. Произведен анализ зависимости сте-

пени уменьшения влияния СП от применяемого базиса ВПР, показана целесообразность применения базиса Хаара. Целевая функция для процедуры адаптации ИСПИ к действию СП имеет следующий вид:

$$k_p(\mathbf{B}) = c_1 M_1 \sum_{z=1}^L [d_2(W_{opt}(z), W_{KП}(z, \mathbf{B}))] + c_2 M_2 / \langle d_2(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) \rangle + c_3 M_3 \langle V(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) \rangle + c_4 M_4 \langle R(\mathbf{b}_k) \rangle, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 c_i = 1; \quad M_i, c_i > 0; \quad M_i, c_i = const; \quad \mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l \in \mathbf{B}; \quad k, l = \overline{1, M}, \quad k \neq l;$$

где $W_{opt}(z)$, $W_{KП}(z, \mathbf{B})$ – нормированные энергии в z -ой ветви ВПР соответственно для «эталона» и синтезированного ансамбля КП; L – общее количество ветвей ВПР.

Для уменьшения частоты попадания в локальный экстремум целесообразно применение двухэтапной процедуры оптимизации: на первом этапе определяется, при помощи генетического алгоритма (ГА), предполагаемая область глобального минимума; на втором этапе – используется метод покоординатного спуска (ПС). Таким образом, процедуры МК синтеза четырехпозиционных радиосигналов с расширением спектра для адаптации ИСПИ к УП (СП) включают в себя следующие этапы:

1 По полученной СПМ УП (СП) определяется «эталон» СПМ $G_{opt}(f)$ (ВПР $W_{opt}(z)$).

2 Формируется целевая функция согласно выражению (4) ((5) для случая адаптации ИСПИ к СП) при учете соответствующих весовых коэффициентов c_i .

3 При помощи метода оптимизации ГА (настроенного) определяется предполагаемая область глобального минимума.

4 Методом ПС вычисляется точка оптимума.

В диссертационной работе получены зависимости показателей качества синтезированных четырехпозиционных радиосигналов от значений весовых коэффициентов целевых функций (4) и (5); определены компромиссные значения данных параметров, которые целесообразно использовать при синтезе сигналов с прямым расширением спектра для адаптации ИСПИ к действию УП и СП соответственно.

На рисунках 3 приведены зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных четырехпозиционных радиосигналов от отношения сигнал-

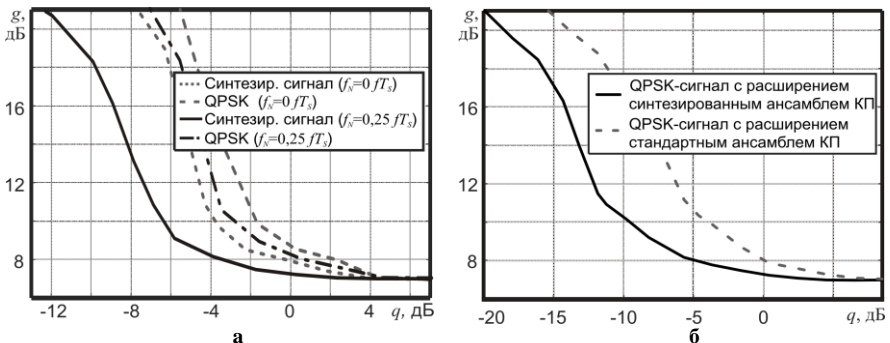


Рисунок 3 – Зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных четырехпозиционных радиосигналов с расширением спектра от отношения сигнал-помеха

помеха (q). На вход соответствующего детектора поступала смесь полезного сигнала, АБГШ и УП (см. рисунок 3 а) с шириной спектра $\Delta f_{N_КП} = 6\%$ от полосы частот полезного сигнала или СП (см. рисунок 3 б) в виде QPSK-сигнала с расширением спектра ансамблем случайных КП; частотно-временные диапазоны для СП и полезного сигнала совпадали; в качестве начальных условий использовался ансамбль дополненных М-последовательностей. Здесь значения весовых коэффициентов составляли $c_1 = 0,5$, $c_2 = 0,1$, $c_3 = 0,1$, $c_4 = 0,3$; (см. рисунок 3 а) и $c_1 = 0,5$, $c_2 = 0,1$, $c_3 = 0,1$, $c_4 = 0,3$ (см. рисунок 3 б); длина КП – 32 элемента (при этом аналогичные результаты были получены при длинах КП 64 и 96), размерность задачи синтеза – 128; для получения устойчивых оценок для каждого значения величины порога помехоустойчивости (g) накапливалась статистика, соответствующая не менее 100 битовым ошибкам; кроме того статистика накапливалась по 100 реализациям.

Следовательно, процедура синтеза четырехпозиционных радиосигналов на основе определения ансамбля КП для адаптации ИСПИ к УП при наиболее сложных, из рассмотренных в диссертационной работе, условиях (нормированная центральная частота УП $f_N = 0 f_{T_S}$, $\Delta f_{N_КП} = 6\%$) обеспечивала порог помехоустойчивости $g < 21$ дБ при отношении сигнал-помеха $q > -7,8$ дБ, а для УП с $f_N = 0,25 f_{T_S}$ – при $q > -12,2$ дБ, что соответственно на 2,2 и 5,0 дБ лучше данных показателей для рассмотренных известных радиосигналов (QPSK с расширением спектра ансамблем дополненных М-последовательностей). При этом у синтезированного четырехпозиционного радиосигнала показатель качества перепутывания информационного символа при погрешностях системы тактовой синхронизации улучшен более чем в 5 раз, а уровень боковых лепестков АКФ по соответствующему критерию при $f_N = 0 f_{T_S}$ возрос на 4 %, а при $f_N = 0,25 f_{T_S}$ обеспечивался выигрыш на 10 % по сравнению с известным сигналом.

Из анализа рисунка 3 б следует, что четырехпозиционные радиосигналы с синтезированным ансамблем КП при воздействии АБГШ и СП обеспечивают порог помехоустойчивости $g < 21$ дБ при отношении сигнал-помеха $q > -20$ дБ, что на 5 дБ лучше данного показателя для рассмотренных известных радиосигналов (QPSK-сигнал с расширением спектра ансамблем дополненных М-последовательностей). При этом у синтезированных радиосигналов показатель качества перепутывания информационного символа при погрешностях системы тактовой синхронизации улучшен более чем в 2 раза, а уровень боковых лепестков АКФ по соответствующему критерию на 5 % меньше по сравнению с известным сигналом.

Показана возможность реализации процедур МК синтеза четырехпозиционных радиосигналов на основе определения ансамбля КП для адаптации ИСПИ как к УП ($l_{КП} = 32$, $R_S = 8$ кбит/с, $n_{опт} = 120$, оперативность адаптации к УП – менее 20 мс), так и к СП ($l_{КП} = 32$, $R_S = 8$ кбит/с, $n_{опт} = 15$, оперативность адаптации к СП составляет менее 2 мс) на современной отечественной элементной базе (ЦСП 1892ВМ7Я).

В третьей главе приведены процедуры МК синтеза СКК на основе определения элементов КА для адаптации ИСПИ к УП. Как отмечалось выше, для эффективного уменьшения влияния УП на ИСПИ целесообразно синтезировать СКК на основе использования многопозиционных радиосигналов, удовлетворяющих заданным требо-

ваниям для ТСМ. При этом применимы известные процедуры кодирования и декодирования. Предлагается использовать целевую функцию (2) с заменой соответствующего слагаемого на критерий максимума помехоустойчивости к собственным шумам приемника при использовании ТСМ. В данном критерии, в интересах выполнения требований, предъявляемых к радиосигналам для реализации решетчатого кодирования, необходимо, чтобы при последовательном разбиении используемого КА на подмножества возрастали минимальные евклидовы расстояния между элементами. Для этого целесообразно соответствующие попарные евклидовы расстояния между элементами КА для синтезируемой СКК $(\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l)$ устремить к эталонным $(\mathbf{s}_k^{(i)}, \mathbf{s}_l^{(i)})$ – используемым при известной ТСМ. Следовательно, в процедуре синтеза СКК на основе решетчатого кодирования для адаптации ИСПИ к действию УП целесообразно применение комбинированного критерия качества:

$$k_p(\mathbf{S}) = c_1 M_1 d_2 (G_{opt}(f), G(f, \mathbf{S})) + c_2 M_2 \sum_k \sum_l (d_2(\mathbf{s}_k^{(i)}, \mathbf{s}_l^{(i)}) - d_2(\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l))^2 + c_3 M_3 h(10 \cdot \lg[G(f, \mathbf{S})] - G_{\log}(f)) + c_4 M_4 (D[P_{\text{мси}}(\mathbf{S})] / (M[P_{\text{мси}}(\mathbf{S})])^2), \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^4 c_i = 1; \quad M_i, c_i > 0; \quad M_i, c_i = \text{const}; \quad \mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l \in \mathbf{S}; \quad k, l = \overline{1, M}.$$

Для уменьшения влияния УП на ИСПИ при использовании СКК на основе «зависимых» сигналов длительностью T_s предлагается применить целевую функцию (2) с модификацией критерия максимума энергоэффективности. В данном критерии необходимо учитывать, что используемая процедура кодирования для рассматриваемых СКК на основе «зависимых» сигналов реализует только разрешенные переходы между элементами КА. Следовательно, при оптимизации значение квадрата коэффициента вариации мгновенной мощности СКК целесообразно вычислять по реализации, состоящей из последовательности всех разрешенных переходов между элементами КА, т.е. вместо $J_1(\mathbf{S})$ использовать $J_2(\mathbf{S})$. Тогда, в процедуре синтеза СКК на основе «зависимых» сигналов для адаптации ИСПИ к действию УП целесообразно применение комбинированного критерия качества вида:

$$k_p(\mathbf{S}) = c_1 M_1 d_2 (G_{opt}(f), G(f, \mathbf{S})) + c_2 M_2 / (< d_2(\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l) >) + c_3 M_3 h(10 \cdot \lg[G(f, \mathbf{S})] - G_{\log}(f)) + c_4 M_4 J_2(\mathbf{S}), \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^4 c_i = 1; \quad M_i, c_i > 0; \quad M_i, c_i = \text{const}; \quad \mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l \in \mathbf{S}; \quad k, l = \overline{1, 16}; \quad k \neq l.$$

Принимая во внимание схожесть целевых функций (6), (7) и (2) (отличие лишь в одном из четырех используемых критериев), а также то, что синтез СКК представляет собой задачу нелинейного программирования сравнительно высокой размерности, решение которой должно производиться в режиме реального времени; в качестве метода оптимизации используется квазиьютоновский метод. Таким образом, процедуры синтеза СКК на основе решетчатого кодирования и «зависимых» сигналов длительностью T_s для адаптации ИСПИ к действию УП включают в себя этапы, приведенные в блок-схеме на рисунке 1, при условии применения целевых функций (6) и (7) соответственно. На рисунках 4 представлены зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных СКК на основе решетчатого кодирования (см. рисунок 4 а) и «зависимых» сигналов (см. рисунок 4 б) от отношения сигнал-помеха.

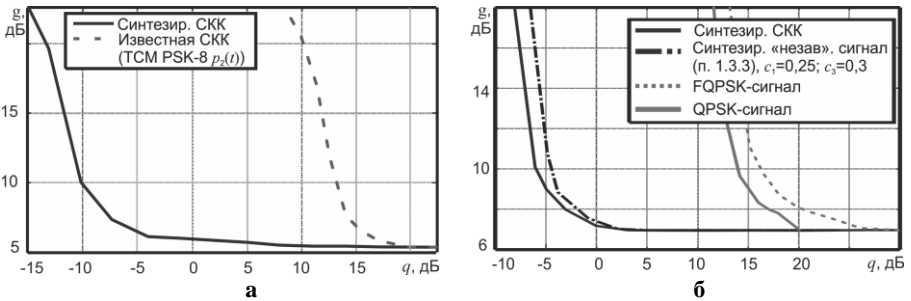


Рисунок 4 – Зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных СКК от отношения сигнал-помеха

Здесь ширина спектра действующей УП – 5 % от ширины СПМ синтезированной СКК; расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала.

Из анализа рисунка 4 а следует, что синтезированные СКК на основе решетчатого кодирования вплоть до $q = -4$ дБ сохраняют свою помехоустойчивость на уровне (при ухудшении показателя g менее чем на 1 дБ) известной СКК (TCM PSK-8 ($p_2(t)$)) при воздействии только АБГШ; при этом для рассмотренной стандартной СКК такие же значения показателя g достигаются при отношении сигнал-помеха больше 17 дБ. Показатели качества внеполосного излучения и энергетической эффективности для рассматриваемых СКК приведены в таблице 2. При сравнимых значениях пик-фактора (см. таблицу 2) синтезированные СКК хотя и имеют большую ширину спектра на уровне -30 дБ (за счет формирования провала в СПМ), но выигрывают на уровне -60 дБ более чем в 1,4 раза (в сравнении с спектрально-эффективной СКК TCM PSK-8 ($p_2(t)$)).

Таблица 2 – Показатели качества СКК на основе решетчатого кодирования

	TCM PSK-8 ($p_2(t)$)	Синтезированные СКК
G_{30}	3,8	5,5
G_{60}	13,4	9,0
П	1,6	1,6

Из анализа рисунка 4 б следует, что синтезированные СКК на основе «зависимых» сигналов вплоть до $q = -3$ дБ сохраняют свою помехоустойчивость на уровне (при ухудшении показателя g менее чем на 1 дБ) QPSK-сигнала при воздействии только АБГШ; при этом для рассмотренной известной СКК и QPSK-сигнала такие же значения показателя g достигаются при отношении сигнал-помеха больше 20 и 17 дБ соответственно. Показатели качества внеполосного излучения и энергетической эффективности для рассматриваемых СКК приведены в таблице 3. Анализ данных результатов показывает, что при сравнимых значениях пик-фактора и порога помехоустойчивости g синтези-

Таблица 3 – Показатели качества СКК на основе «зависимых» сигналов

	FQPSK-сигнал	Синтезир. СКК	Синтезир. «независимый» сигнал (гл. 1, при $c_1 = 0,25$; $c_3 = 0,3$)
G_{30}	2,2	3,2	5,1
G_{60}	8,3	10,6	11,1
П	1,0	1,4	1,4

рованные СКК на основе «зависимых» сигналов позволяют сократить ширину СПМ по уровню -30 дБ на 37 % в сравнении с синтезированными радиосигналами в гл. 1 при $c_1 = 0,25$ и $c_3 = 0,3$; однако формирование провала в СПМ синтезируемых СКК для адаптации ИСПИ к действию УП не позволяет достигнуть характеристик, реализуемых FQPSK-сигналами.

Показана возможность реализации на современной отечественной элементной базе (ЦСП 1892ВМ7Я) процедур МК синтеза СКК на основе как решетчатого кодирования, так и «зависимых» сигналов со следующими параметрами: $I_s = 32$, $R_s = 8$ кбит/с, $n_{opt} = 1000$, оперативность адаптации к УП составила менее 125 мс. Приведены результаты сравнительного анализа реализуемых характеристик и определено при каких требованиях необходимо применять конкретную (из предложенных в диссертационной работе) процедуру МК синтеза радиосигналов для адаптации ИСПИ к действующей помеховой обстановке.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

1 Предложена и проанализирована процедура МК синтеза радиосигналов на основе КА для адаптации ИСПИ к УП, учитывающая такие показатели качества как ослабление действия УП, внеполосное излучение, помехоустойчивость при действии АБГШ и энергоэффективность формируемого радиосигнала. Рассмотрены особенности данной процедуры при различной позиционности вида модуляции. Получены зависимости показателей качества синтезированных четырехпозиционных радиосигналов от значений весовых коэффициентов целевой функции. Показано, что при наиболее неблагоприятном (из рассмотренных) воздействии на радиоканал УП (ширина спектра – 5 % от ширины СПМ синтезированного сигнала; расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала) обеспечивалась помехоустойчивость на уровне сигнала с QPSK при воздействии только АБГШ вплоть до отношения сигнал-помеха -7 дБ, что на 27 дБ лучше данного показателя для QPSK-сигнала. Для адаптации ИСПИ в реальном масштабе времени предложена процедура быстрого МК синтеза четырехпозиционных радиосигналов за счет определения функциональной зависимости между отсчетами КА и значением центральной частоты УП.

2 Обоснована двухэтапная процедура синтеза четырехпозиционных радиосигналов с расширением спектра (на основе определения ансамбля КП) для адаптации ИСПИ к действующим УП, использующая комбинированный критерий качества, в состав которого входят частные критерии, отвечающие за пропускную способность и минимизацию действия УП, помехоустойчивость при действии АБГШ, а также минимизацию перепутывания информационного символа при погрешностях системы тактовой синхронизации. Предлагаемая процедура при наиболее неблагоприятном (из рассмотренных) воздействии на радиоканал УП (ширина спектра – 6 % от ширины СПМ синтезированного сигнала с расширением спектра; расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала) обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости на 2,2 дБ, а для УП с центральной нормированной частотой $0,25 fT_s$ – на 5,0 дБ по сравнению с QPSK-сигналами с расширением спектра ансамблем дополненных М-последовательностей. При этом у синтезированного радиосигнала показатель качества перепутывания информационного символа при погрешностях системы тактовой синхронизации улучшен более чем в 5 раз, а уровень боковых лепестков АКФ по со-

ответствующему критерию при адаптации к действию УП с центральной частотой $f_N = 0 \text{ } fT_S$ возрастал на 4 %, а при $f_N = 0,25 \text{ } fT_S$ был уменьшен на 10 %.

3 Предложена двухэтапная процедура МК синтеза четырехпозиционных радиосигналов с расширением спектра на основе определения ансамбля КП, обеспечивающая за счет использования аппарата ВПР адаптацию ИСПИ к действующим СП. Произведен анализ зависимости степени уменьшения влияния СП от применяемого базиса ВПР. Показано, что радиосигналы с синтезированным ансамблем КП при воздействии АБГШ и СП обеспечивают выигрыш в помехоустойчивости на 5 дБ над QPSK-сигналами с расширением спектра ансамблем дополненных M-последовательностей.

4 Предложена процедура синтеза СКК на основе решетчатого кодирования для адаптации ИСПИ к действию УП, использующая комбинированный критерий качества. Данная процедура в случае неблагоприятного воздействия на радиоканал УП (ширина спектра – 5 % от ширины СПМ синтезированной СКК; расположение – на частоте несущего колебания сигнала) обеспечивает помехоустойчивость на уровне (ухудшение показателя g составляет менее 1 дБ) известной СКК (TCM PSK-8 ($p_2(t)$)) при воздействии только АБГШ вплоть до отношения сигнал-помеха –4 дБ, что на 21 дБ лучше данного показателя для рассмотренной известной СКК. При этом при сравнимых значениях пик-фактора синтезированные СКК хотя и имеют большую ширину спектра на уровне -30 дБ (за счет формирования провала в СПМ), но выигрывают на уровне -60 дБ более чем в 1,4 раза (в сравнении с СКК TCM PSK-8 ($p_2(t)$)).

5 Предложена процедура синтеза СКК на основе «зависимых» сигналов для адаптации ИСПИ к действию УП, использующая комбинированный критерий качества. Данная процедура синтеза СКК в случае воздействия на радиоканал УП (ширина спектра – 5 % от ширины СПМ синтезированной СКК; расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала) обеспечивает помехоустойчивость на уровне (ухудшение показателя g составляло менее 1 дБ) QPSK-сигнала при воздействии только АБГШ вплоть до отношения сигнал-помеха –3 дБ, что на 23 и 20 дБ лучше данного показателя для рассмотренных известной СКК (FQPSK-сигнала) и QPSK-сигнала соответственно. При этом при сравнимых значениях пик-фактора и порога помехоустойчивости синтезированные СКК на основе «зависимых» сигналов позволяют сократить ширину СПМ по уровню –30 дБ на 37 % в сравнении с синтезированными радиосигналами на основе определения КА (см. главу 1; при $c_1 = 0,25$ и $c_3 = 0,3$); однако формирование провала в СПМ синтезируемых СКК для адаптации ИСПИ к УП не позволяет достигнуть характеристик, реализуемых FQPSK-сигналами.

6 Показана возможность реализации процедур МК синтеза радиосигналов (на основе КА) и СКК (на основе как решетчатого кодирования, так и «зависимых сигналов») для адаптации ИСПИ к УП на современной отечественной элементной базе (ЦСП 1892ВМ7Я производства НПЦ «ЭЛВИС»). При этом скорость передачи информации составит $R_s = 8$ кбит/с, а оперативность адаптации к УП – менее 125 мс (при количестве отсчетов на символ $l_s = 32$). Кроме того, при использовании процедуры быстрого МК синтеза четырехпозиционных радиосигналов на примере МК синтеза радиосигналов на основе КА происходит существенное сокращение вычислительных затрат: на ЦСП 1892ВМ7Я данный алгоритм может быть реализован в режиме реального времени при $R_s = 10$ Мбит/с, $n_{opt} \leq 1$. При этом предлагаемый способ сокраще-

ния вычислительных затрат возможно применить и к процедурам МК синтеза СКК в интересах существенного улучшения скоростных характеристик. Показана возможность реализации (при $l_{KT} = 32$, $R_s = 8$ кбит/с) процедур МК синтеза четырехпозиционных радиосигналов с расширением спектра на основе определения ансамбля КП для адаптации ИСПИ как к УП (оперативность адаптации к УП – менее 20 мс), так и к СП (оперативность адаптации к СП – менее 2 мс) на современной отечественной элементной базе (ЦСП 1892ВМ7Я).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Покровский П.С., Лисничук А.А. Алгоритм синтеза радиосигналов для адаптации интеллектуальных систем передачи информации к действию помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2014. – № 48. – С. 20-26.
2. Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. Процедура синтеза 4-позиционных сигналов с расширением спектра // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2014. – № 50-1. – С. 29-33.
3. Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. Многокритериальный синтез четырехпозиционных радиосигналов на основе канального алфавита // Радиотехника. – 2015. – №11. – С. 14-21.
4. Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. Процедура многокритериального синтеза сигнально-кодовых конструкций для адаптации систем передачи информации к действию узкополосных помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2016. – № 55. – С. 3-9.
5. Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. Многокритериальный синтез четырехпозиционных радиосигналов на основе ансамбля кодовых последовательностей в интересах адаптации радиосистем передачи информации к структурным помехам // Радиотехника. – 2016. – №8. – С. 117-124.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

6. Кириллов С.Н., Лисничук А.А. Имитатор адаптивного к действующим узкополосным помехам радиоканала. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2016611755 от 10.02.2016.

Прочие публикации

7. Лисничук А.А. Программно-управляемый цифровой квадратурный формирователь радиосигналов // ВНТК «Новые информационные технологии в научных исследованиях (НИТ-2012)»: Тез. докл. – Рязань, 2012. – С. 74.
8. Лисничук А.А. Унифицированный программно-управляемый квадратурный формирователь радиосигналов // СНТК: Тез. докл. – Рязань, 2013. – С. 21
9. Покровский П.С., Лисничук А.А. Разработка алгоритма адаптации радиосигналов интеллектуальных систем передачи информации к изменениям радиообстановки // ВНТК «НИТ-2013»: Тез. докл. – Рязань, 2013. – С. 107-108.
10. Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. и др. Адаптивная к мешающим факторам, помехозащищенная радиопередача информации // МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2014)»: Тез. докл. – М., 2014. С. 80-83.
11. Акопов Э.В., Лисничук А.А., Лукьянов Д.И. и др. Адаптивная система передачи информационных сообщений, устойчивая к воздействию мешающих факторов // МНТК «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (REDS-2014)»: Тез. докл. – М., 2014. С. 186-189.
12. Покровский П.С., Лисничук А.А. Процедура многокритериального синтеза расширяющих кодовых последовательностей для адаптации телекоммуникационных систем к действию узкополосных помех // ВНТК «НИТ-2014»: Тез. докл. – Рязань, 2014. С. 117-119.

13. Лисничук А.А. Математические методы синтеза адаптивных к действию узкополосных помех радиосигналов // МНТК «Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-28)»: Тез. докл. – Рязань, 2015. С. 14-18.

14. Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. Синтез 4-позиционных адаптивных к действию узкополосных помех радиосигналов при сокращении размерности задачи // МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций»: Тез. докл., – Рязань, 2015. С. 83-84.

15. Лисничук А.А. Процедура синтеза структурно-защищенных многопозиционных радиосигналов для адаптации системы передачи информации к действию узкополосных помех // ВНТК «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники»: Тез. докл. – Владимир, 2014. С. 96-98.

16. Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. и др. Устойчивая к мешающим факторам космическая радиолиния передачи интегрированных цифровых информационно-управляющих потоков // ВНТК «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий»: Тез. докл. – М., 2015. – С. 85-89.

17. Лисничук А.А. Процедура синтеза ансамбля расширяющих кодовых последовательностей для адаптации интеллектуальных систем передачи информации к действию узкополосных помех // МНТК «Молодежь и наука»: Тез. докл. – М., 2015. Часть 3. С. 20-22.

18. Лисничук А.А. Процедура многокритериального синтеза радиосигналов для адаптации телекоммуникационных систем к действию структурных помех // ВНТК «НИТ-2015»: Тез. докл. – Рязань, 2015. С. 102-104.

19. Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. Многокритериальный синтез сигнально-кодовых конструкций для адаптации радиосистем передачи информации к действию узкополосных помех // МНТК «Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2016)»: Тез. докл. – Рязань, 2016. С. 110-114.

20. Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. Быстрый многокритериальный синтез четырехпозиционных радиосигналов на основе канального алфавита // МНТК «DSPA-2016»: Тез. докл. – М., 2016. С. 65-70.

21. Покровский П.С., Лисничук А.А. Синтез адаптивных к действию помех радиосигналов с заданным уровнем внеполосного излучения // Межвузовский сборник научных трудов «Методы и средства обработки и хранения информации». – Рязань: РГРТУ, 2014. – С. 160-164.

Лисничук Александр Александрович

Процедуры многокритериального синтеза
многопозиционных радиосигналов
на основе канального алфавита для адаптации радиосистем
передачи информации к помеховой обстановке

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Отпечатано в НПЦ «Информационные технологии»
390035, г. Рязань, ул. Островского, д. 21/1
Формат бумаги 60x84 1/16
Условных печатных листов 1
Тираж 100 экз. Заказ

2016 г.