

*На правах рукописи*



Лисничук Александр Александрович

**МЕТОДЫ И ПРОЦЕДУРЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО СИНТЕЗА  
МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ  
ДЛЯ АДАПТИВНЫХ К ПОМЕХАМ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность:

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Рязань 2022

Работа выполнена на кафедре радиоуправления и связи ФГБОУ ВО  
«Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»

Научный консультант – **Кириллов Сергей Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «РГРТУ», зав. кафедрой  
Радиоуправления и связи

Официальные оппоненты – **Макаров Сергей Борисович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»,  
Научный руководитель Высшей школы прикладной  
физики и космических технологий

– **Горгадзе Светлана Феликсовна**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Московский технический университет  
связи и информатики», профессор кафедры  
Радиооборудования и схемотехники

– **Самойлов Александр Георгиевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет  
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», профессор кафедры  
Радиотехники и радиосистем

Ведущая организация ФГКВБОУ ВО «Академия Федеральной службы охраны  
Российской Федерации», г. Орёл

Защита состоится «10» июня 2022 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного  
совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический уни-  
верситет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО РГРТУ  
([www.rsreu.ru](http://www.rsreu.ru)).

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

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.375.03  
доктор технических наук, профессор



Г.В. Овечкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** На практике работа беспроводных систем передачи информации (СПИ) осуществляется в условиях действия различного вида радиопомех: узкополосных, структурных, полосовых, импульсных, а также их комбинаций. На важные показатели качества СПИ (в том числе на помехоустойчивость) существенное влияние оказывают вид используемых сигналов и характеристики устройств их обработки. Значительный вклад в данную область знаний внесли отечественные и зарубежные ученые В.А. Котельников, К. Шеннон, И.С. Гоноровский, Л.С. Гуткин, Л.Е. Варакин, Д.Е. Вакман, Р.М. Седлецкий, С.Б. Макаров, Ч. Кук, М. Бернфельд, Л. Френкс, Г. Ван Трис, Ю.Г. Сосулин, В.И. Тихонов, Д.Д. Кловский и др.

Спектральный состав помеховой обстановки меняется с течением времени как под воздействием разнообразных случайных факторов, так и в результате функционирования мешающих радиоканалов. Данное обстоятельство при фиксированном виде модуляции и устройстве обработки сигнала не позволяет достигнуть наилучших характеристик помехоустойчивости и структурной скрытности СПИ. При априорно неизвестной помеховой обстановке наибольшей эффективностью обладают адаптивные системы – интеллектуальные системы передачи информации.

Для реализации адаптации с целью повышения достоверности передаваемых данных применяют СПИ с каналом обратной радиосвязи. В предельном случае для целей квитирования с помощью такой обратной связи может передаваться количество информации равное объему полезных данных (в прямом канале). Такие системы (с «полной обратной связью») зачастую выполняют ретрансляцию принятых сообщений. Однако этот подход требует применения специально отведенных для передачи служебной информации обратных каналов или же значительного снижения для них скорости передачи полезных данных. В современных СПИ применяется «укороченная обратная связь» (limited feedback), позволяющая реализовать повышение показателей качества за счет адаптации СПИ без значительного снижения доступной пропускной способности дуплексного радиоканала.

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 способны перестраивать сигнал путем варьирования несущей частоты, излучаемой мощности, скорости передачи информации, а также процедур кодирования и модуляции. Однако эти системы применяют класс известных радиосигналов, которые могут быть распознаны с целью перехвата передаваемого сообщения или постановки эффективной структурной помехи. Следовательно, данный подход не позволяет удовлетворить потребности современных СПИ в части многоэшелонированной помехозащищенности радиоканалов, т.е. обеспечения скрытности и помехоустойчивости радиолиний на различных этапах формирования, передачи и детектирования сигналов. Кроме того, системы когнитивного радио могут посчитать диапазон частот непригодным для передачи информации при наличии помех, что в свою очередь в целом уменьшает эффективность использования свободных участков спектра.

В работах проф. С.Н. Кириллова предложено синтезировать двухпозиционные радиосигналы, принадлежащие к классу сигналов с нелинейной частотной модуляцией и, на основе формирования провала в спектре полезного сигнала на частотах действия узкополосной помехи (УП), обеспечивающие ослабление влияния УП на СПИ. Представляет интерес развитие данной теории для различных видов многопозицион-

ных радиосигналов (с расширением спектра и без него) и сигнально-кодовых конструкций (на основе решетчатого кодирования, «зависимых» сигналов и битового перемежения) в адаптивных СПИ при действии более широкого класса помех (нескольких УП, структурных, полосовых, импульсных и их комбинаций), а также с учетом быстродействия современной элементной базы. Следовательно, в условиях ограниченного частотного ресурса или для дальнейшего развития технологии когнитивного радио целесообразно производить синтез сигналов (с позиционностью  $M \geq 4$ ) для адаптации СПИ к действию помех при использовании в том числе и неизвестных видов модуляции.

В ряде известных работ синтез радиосигналов осуществляют за счет оптимизации по единственному показателю качества, что приводит к неконтролируемому ухудшению других характеристик. 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.

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 канальный алфавит (КА) данного вида модуляции, который определяет качественные характеристики СПИ (помехоустойчивость, энергоэффективность и др.). Следовательно, в интересах адаптации СПИ к действию различных помех возможно применение математического описания радиосигналов в виде совокупности элементов КА.

Среди действующих на СПИ помех широкое распространение получили УП (ширина спектра – менее 10 % от ширины спектральной плотности мощности (СПМ) полезного сигнала). Это связано с высокой вероятностью непреднамеренного возникновения (или простотой генерации) и достаточно эффективным влиянием на подавляемую радиолинию. Известный 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.

Класс радиосигналов с прямым расширением спектра обладает сравнительно высокой помехоустойчивостью. При использовании таких радиосигналов появляется дополнительная возможность управления характеристиками СПИ, в том числе и для минимизации действия помех, за счет синтеза ансамбля кодовых последовательностей (КП) с определенными свойствами. Однако при использовании известных видов модуляции в СПИ необходимо производить адаптацию не только к действию УП, но и структурных (сигналоподобных) помех (СП). Это связано с тем, что СП оказывают негативное воздействие на СПИ за счет корреляции по некоторым параметрам с полезным радиосигналом при совпадающих частотно-временных диапазонах.

Радиосигналы с прямым расширением спектра допускают изменение своих свойств за счет синтеза как структуры (т.е. ансамбля КП), так и формы огибающей (т.е. набора элементарных импульсов). В сложной помеховой обстановке (когда в полосе частот сигнала действует несколько источников радиопомех) необходимо применение максимального числа способов увеличения помехоустойчивости. В этом случае необходимо учитывать достоинства, недостатки и использовать наиболее эф-

фективный для соответствующей отдельной части сложной помеховой обстановки способ увеличения помехоустойчивости СПИ.

Помимо широко распространенных УП, на практике на беспроводные СПИ действует большое количество полосовых помех (ПП) с шириной спектра 10..40 % от ширины СПМ полезного сигнала. В этом случае также целесообразно производить МК синтез радиосигналов с прямым расширением спектра.

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 (Trellis Coded Modulation – TCM) и «зависимых» сигналов длительностью  $T_s$  (где  $T_s$  – символьный интервал), позволяющие реализовать соответственно повышение помехоустойчивости СПИ к действию аддитивного «белого» гауссовского шума (БГШ) без расширения занимаемой полосы частот и уменьшение внеполосного излучения. В радиолиниях, подверженных влиянию замираний, сравнительно высокие показатели качества реализуют радиосистемы, осуществляющие передачу данных с помощью СКК на основе битового перемежения (Bit-Interleaved Coded Modulation – BICM). В случае действия различного рода импульсных помех также представляется целесообразным применение систем с перемежением. Однако в условиях мешающего воздействия от радиосистем с динамически изменяющимися параметрами модуляции, ведущих передачу в пакетном режиме, (т.е. при действии импульсных пакетных сигналоподобных помех), СКК с фиксированными параметрами также не реализуют потенциальных характеристик.

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 помехам целесообразно осуществить за счет синтеза многопозиционных радиосигналов, удовлетворяющих требованиям к соответствующему классу СКК.

Дополнительное уменьшение отличительных признаков (увеличение структурной скрытности) радиоканала является отдельной важной задачей, так как это затруднит распознавание типа радиосигнала и приведет к невозможности несанкционированного перехвата передаваемой информации или постановки эффективной (сигналоподобной) помехи. Следовательно, представляет интерес разработка процедуры МК синтеза класса структурно-защищенных многопозиционных радиосигналов для адаптации СПИ к действию помех.

При использовании радиосигналов с OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) появляется дополнительный способ задания их характеристик за счет соответствующей настройки параметров на поднесущих. Однако радиосигналы с OFDM обладают высоким значением пик-фактора, т.е. не обеспечивают требований энергетической эффективности СПИ при работе усилителей мощности. Особое внимание следует уделить и уменьшению отличительных признаков (увеличению структурной скрытности) OFDM-радиоканала. Для этого целесообразно применение различных видов модуляций на поднесущих, включающих и нестандартные типы сигналов. С помощью соответствующего синтеза сигнальных созвездий и определения порядка их расстановки по поднесущим можно реализовать снижение величины пик-фактора OFDM-сигналов. Тогда представляет интерес разработка процедуры много-

критериального синтеза OFDM-радиосигналов в интересах снижения пик-фактора и дополнительного повышения структурной скрытности СПИ.

**Объект исследования:** Радиосистемы передачи информации, обладающие устойчивостью к действию помех с изменяющимися параметрами.

**Предмет исследования:** Адаптация радиосистем передачи информации на основе многокритериального синтеза радиосигналов.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является оперативная адаптация СПИ к действующей помеховой обстановке на основе многокритериального синтеза многопозиционных радиосигналов и СКК.

Поставленная цель включает решение следующих задач:

1) обосновать модель радиосигналов в виде элементов КА для математического описания как известных, так и нестандартных видов модуляции в интересах адаптации СПИ к действию помех; обосновать набор критериев качества радиосигналов, учитывающих наиболее значимые характеристики СПИ;

2) разработать метод и процедуру многокритериального синтеза многопозиционных радиосигналов на основе элементов КА и проанализировать их эффективность;

3) разработать процедуры МК синтеза многопозиционных радиосигналов с прямым расширением спектра на основе определения ансамбля КП в интересах адаптации СПИ к действию УП и СП, а также проанализировать их эффективность;

4) разработать метод и процедуры МК синтеза сигналов с прямым расширением спектра на основе определения набора элементарных импульсов и ансамбля КП для адаптации СПИ к действию ПП или нескольких УП и проанализировать их эффективность;

5) разработать процедуры МК синтеза СКК на основе решетчатого кодирования, «зависимых» сигналов и битового перемежения для адаптации СПИ к действию УП и импульсных сигналоподобных помех, а также произвести анализ их эффективности;

6) разработать процедуры МК синтеза сигналов (с прямым расширением спектра и без него) для увеличения помехоустойчивости и скрытности СПИ, а также произвести анализ их эффективности;

7) разработать процедуру МК синтеза OFDM-радиосигналов в интересах снижения пик-фактора и повышения структурной скрытности СПИ, а также проанализировать ее эффективность;

8) оценить требуемые вычислительные затраты для реализации разработанных процедур МК синтеза радиосигналов на современной элементной базе;

9) провести сравнительный анализ разработанных процедур многокритериального синтеза радиосигналов и сигнально-кодовых конструкций.

**Научная новизна** диссертации заключается в разработке методов и процедур многокритериального синтеза многопозиционных радиосигналов и СКК различных классов с целью реализации потенциальных характеристик СПИ, используемых для организации каналов передачи данных в условиях разнообразной сигнально-помеховой обстановки. В диссертационной работе были получены следующие ранее неизвестные научные результаты.

1) Разработаны метод и процедура многокритериального синтеза многопозиционных радиосигналов, на основе определения канального алфавита для адаптации СПИ к действию УП, позволяющие обеспечить повышение помехоустойчивости (по отношению сигнал-помеха).

2) Разработана двухэтапная процедура синтеза многопозиционных радиосигналов с прямым расширением спектра (на основе определения ансамбля КП) для адап-

тации СПИ к действующим УП, обеспечивающая улучшение помехоустойчивости (по отношению сигнал-помеха) по сравнению с известными сигналами с прямым расширением спектра.

3) Разработана двухэтапная процедура многокритериального синтеза многопозиционных радиосигналов с прямым расширением спектра (на основе определения ансамбля КП), обеспечивающая за счет использования аппарата вейвлет-пакетного разложения эффективную адаптацию СПИ к действующим структурным помехам. Показано, что радиосигналы с синтезированным ансамблем КП при воздействии БГШ и структурной помехи обеспечивают выигрыш в помехоустойчивости (по отношению сигнал-помеха) по сравнению с известными сигналами с расширением спектра.

4) Разработаны метод и процедура многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра для адаптации радиосистем передачи информации к сложной помеховой обстановке (в виде нескольких независимых источников УП), позволяющие обеспечить повышение помехоустойчивости (по отношению сигнал-помеха).

5) Разработаны процедуры многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра (на основе определения как набора элементарных импульсов, так и ансамбля кодовых последовательностей) для адаптации радиосистем передачи информации к действию полосовых помех, обеспечивающие выигрыш в помехоустойчивости (по отношению сигнал-помеха) в сравнении с известными сигналами с прямым расширением спектра.

6) Разработана процедура синтеза СКК на основе решетчатого кодирования для адаптации СПИ 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 БГШ для случая решетчатого кодирования, а также энергоэффективность формируемой СКК. Данная процедура при действии на радиоканал УП и БГШ обеспечивает помехоустойчивость на уровне известных СКК при действии только БГШ.

7) Разработана процедура синтеза СКК на основе «зависимых» сигналов для адаптации СПИ к действию УП. Данная процедура в случае действия БГШ и УП обеспечивает помехоустойчивость на уровне QPSK-сигнала при действии только БГШ. При сравнимых значениях пик-фактора и помехоустойчивости синтезированные СКК на основе «зависимых» сигналов дополнительно сокращают ширину СПМ в сравнении с синтезированными радиосигналами на основе канального алфавита.

8) Разработана процедура многокритериального синтеза класса структурно-защищенных радиосигналов. В состав комбинированного критерия качества входят частные критерии, отвечающие за ослабление действия помех; за помехоустойчивость при БГШ, а также обеспечивающие минимизацию внеполосного излучения и отличительных признаков синтезируемого радиосигнала.

9) Разработана двухэтапная процедура многокритериального синтеза OFDM-радиосигналов для снижения пик-фактора СПИ, обеспечивающая выигрыш по показателю энергоэффективности по сравнению со случаем использования известной техники снижения пик-фактора OFDM-сигналов на основе «частичной передачи последовательности» (Partial transmit sequence – PTS).

10) Разработана процедура быстрого многокритериального синтеза многопозиционных радиосигналов за счет определения функциональной зависимости между отсчетами канального алфавита и параметрами помех, реализующая существенное

сокращение вычислительных затрат и обеспечивающая адаптацию СПИ в режиме реального времени.

**Методы исследования.** В работе использовались методы спектрального анализа, ортогональных разложений, вейвлет-функций и статистической радиотехники, а также вариационного исчисления и вычислительной математики. Данные теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями при помощи имитационного моделирования разработанных процедур и СПИ на их основе.

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

**Научная и практическая значимость работы.** Представленные в работе процедуры МК синтеза многопозиционных радиосигналов и СКК для оперативной адаптации СПИ к сигнально-помеховой обстановке обеспечивают увеличение помехоустойчивости СПИ (по отношению сигнал-помеха). Используемый в процедурах МК метод позволяет более эффективно распределить предоставленные ресурсы радиоканала в условиях динамичного изменения помеховой обстановки. Кроме того, разработанные процедуры позволяют реализовать дальнейшее развитие технологии когнитивного радио в части обеспечения устойчивой работы в сложной сигнально-помеховой обстановке без смены частотного диапазона. Классы радиосигналов и сигнально-кодовых конструкций, полученные при помощи разработанных процедур МК синтеза, обеспечивают эффективное функционирование СПИ при действии различных типов помех: структурных, полосовых, узкополосных (как одиночных, так и нескольких), а также их комбинаций.

Результаты диссертации нашли применение в разработках акционерного общества «Российские космические системы» (АО «РКС») – 2 акта о внедрении, ОКБ «Спектр» (филиал АО «РКЦ «Прогресс»), АО «Моринформсистема-Агат-КИП» (АО «Моринсис-Агат-КИП»), публичного акционерного общества «Мобильные ТелеСистемы» (ПАО «МТС») филиал в г. Рязань), АО «МНИИ «Агат» (г. Жуковский, Московской области), а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «РГРТУ», что подтверждено соответствующими актами.

**Положения, выносимые на защиту:** 1) Метод и процедура многокритериального синтеза многопозиционных радиосигналов на основе определения канального алфавита, которые используют для адаптации систем передачи информации (СПИ) и позволяют при действии на радиоканал «белого» гауссовского шума (БГШ) и узкополосной помехи вплоть до отношения сигнал-помеха  $-9$  дБ обеспечить помехоустойчивость на уровне известных сигналов при действии только БГШ.

2) Процедура многокритериального синтеза многопозиционных радиосигналов с прямым расширением спектра на основе определения ансамбля кодовых последовательностей, которая обеспечивает, с помощью аппарата вейвлет-пакетного разложения, адаптацию СПИ к действию структурных помех и при этом увеличивает помехоустойчивость СПИ на 5 дБ (по отношению сигнал-помеха) по сравнению с известным QPSK-сигналом с расширением спектра.

3) Метод и процедура многокритериального синтеза многопозиционных сигналов с прямым расширением спектра, которые используют для адаптации СПИ к сложной помеховой обстановке (в виде трех независимых узкополосных помех) и обеспечивают помехоустойчивость (при сохранении вероятности битовой ошибки на уровне



известных сигналов с расширением спектра при действии только БГШ) до отношения сигнал-помеха  $-4$  дБ.

4) Процедуры многокритериального синтеза многопозиционных сигналов с прямым расширением спектра на основе определения набора элементарных импульсов и ансамбля кодовых последовательностей, которые используют для адаптации СПИ к действию полосовой помехи (ширина спектра –  $10..40$  % от ширины СПИМ полезного сигнала) и БГШ, обеспечивая при этом вплоть до отношения сигнал-помеха  $-7$  дБ помехоустойчивость на уровне известных сигналов с расширением спектра при действии только БГШ.

5) Процедура многокритериального синтеза, которая позволяет получить сигнално-кодовые конструкции на основе «зависимых» сигналов (реализующих гладкие переходы между символами в комплексной огибающей) и обеспечить при воздействии на радиоканал узкополосной помехи и БГШ вплоть до отношения сигнал-помеха  $-3$  дБ помехоустойчивость на уровне QPSK-сигнала при действии только БГШ, кроме того позволяет сократить внеполосное излучение по уровню  $-30$  дБ на величину до  $35$  % (в сравнении с синтезированными радиосигналами на основе канального алфавита).

**Апробация.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: 7th, 8th, 9th, 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). 2018, 2019, 2020, 2021. Budva, Montenegro.; 2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE). Novosibirsk, Russia.; 2020 International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC). Moscow, Russia.; 2018 and 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), 2018, 2020. Moscow, Russia.; IV МНТК «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем – РАДИОИНФОКОМ-2019», Москва, 2019.; 2019 4th International Scientific Conference «Arctic: history and modernity». 2019. St. Petersburg, Russia.; 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2019. Tomsk, Russia.; 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). 2018. Novosibirsk, Russia; МНТК «Современные технологии в науке и образовании». Рязань, 2016, 2018, 2020 гг.; XXVIII МНТК «Математические методы в технике и технологиях». Рязань, 2015 г.; XVIII МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2015 г.; VII, IX ВНТК «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Москва, 2015, 2018 гг.; XVIII МНТК «Молодежь и наука». Москва, 2015 г.; IV ВНТК «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники». Владимир, 2014 г.; LXIX МНТК «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий». Москва, 2014 г.; XVI, XVIII, XX, XXI, XXII МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Москва, 2014, 2016, 2018, 2019, 2020 гг.; XVII, XVIII, XIX, XX, XXII, XXIII, XXIV, XXV ВНТК «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань, 2012, 2013, 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020 гг.; IV и V ВНТК «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань, 2019 и 2020.; XIV ВНТК «Радиолокация и радиосвязь». Москва, 2020 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 72 работы: 18 статей в научно-технических журналах, рекомендованных ВАК РФ; 14 работ проиндексированы в

базы Scopus или Web of Science; 2 статьи в межвузовских сборниках трудов; 32 тезиса докладов на конференциях и 6 свидетельств на программу для ЭВМ.

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 215 наименований и одного приложения. Диссертация изложена на 362 страницах, из которых 273 страницы основного текста, 38 таблиц и 67 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**В первой главе** обоснованы метод и процедура МК синтеза радиосигналов на основе определения элементов КА для адаптации СПИ к действию УП (в виде «небелого» гауссовского шума, ширина спектра – менее 10 % от ширины СПМ сигнала). Сигналы как с известными (PSK, APSK, FSK, QAM, FQPSK и др), так и с нестандартными видами модуляции можно 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 манипуляционного кодирования,  $N_s$  – количество информационных символов. При фиксированной процедуре кодирования параметры КА определяют спектрально-энергетические свойства сигнала. Это позволяет за счет синтеза соответствующего КА осуществить адаптацию СПИ к действию помех. Из-за общности выражения (1) возможно математическое описание и неизвестных сигналов, по меньшей мере, как промежуточных классов между стандартными видами модуляции.

Для рационального использования ресурсов радиоканала применяется комбинированный критерий качества, состоящий из частных критериев, отвечающих за: 1) максимизацию пропускной способности при минимизации действия УП на СПИ путем формирования провалов в СПМ синтезируемого сигнала; 2) максимизацию помехоустойчивости к действию БГШ путем увеличения евклидова расстояния  $d_2(\cdot)$  между элементами синтезируемого КА; 3) минимизацию внеполосного излучения с помощью функции  $h(\cdot)$ , накладывающей «штраф» при превышении заданной СПМ  $G_{\log}(f)$ ; 4) минимизацию пик-фактора путем уменьшения отношения дисперсии к квадрату математического ожидания мгновенной мощности сигнала  $P_{\text{мгн}}(\mathbf{S})$ , вычисленной по элементам КА, т.е.  $J_1(\mathbf{S}) = D[P_{\text{мгн}}(\mathbf{S})] / (M[P_{\text{мгн}}(\mathbf{S})])^2$ . Тогда, синтез радиосигналов сводится к решению задачи МК оптимизации, которая требует сведения векторного показателя качества к скалярному. Применен способ результирующей целевой функции, как более удобный для использования в методах нелинейного программирования и имеющий возможность прямого определения веса показателей качества через соответствующие коэффициенты  $c_i$ . С учетом этого для синтеза радиосигналов обосновано использование следующей целевой функции:

$$k_p(\mathbf{S}) = c_1 M_1 d_2(G_{\text{опт}}(f), G(f, \mathbf{S})) + c_2 M_2 / (< d_2(s_k, s_l) >) + c_3 M_3 h(10 \cdot \lg[G(f, \mathbf{S})] - G_{\log}(f)) + c_4 M_4 (D[P_{\text{мгн}}(\mathbf{S})] / (M[P_{\text{мгн}}(\mathbf{S})])^2), \quad (2)$$

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

Здесь  $M_i$  – нормирующие коэффициенты, приводящие отдельные слагаемые к общему динамическому диапазону;  $G_{opt}(f), G(f, S)$  – соответственно «эталонный» (с провалом на частоте УП) и текущий нормированные СПМ радиосигналов;  $\langle \cdot \rangle$  – оператор усреднения по ансамблю элементов КА  $S$ ;  $\mathcal{M}$  – позиционность вида модуляции. Для ограничения энергии синтезируемого сигнала средняя мощность КА нормирована к единице.

Для поставленной задачи характерна высокая скорость изменения параметров УП, к которым осуществляется адаптация СПИ. Минимизацию целевой функции необходимо производить в реальном масштабе времени, следовательно, целесообразно использовать методы оптимизации, имеющие большую 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 (BFGS с линейным поиском для определения шага).

Для 16-позиционных радиосигналов зависимости показателей качества от весовых коэффициентов приведены на рисунках 1. Здесь для определения характеристики помехоустойчивости к действию УП (расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала; ширина спектра  $\Delta f_N = 5\%$  от ширины СПМ радиосигнала; отношение сигнал-помеха: 3 дБ) и БГШ рассматривается пороговое отношение сигнал-шум (порог помехоустойчивости,  $g$ ), которое определяется как значение, равное отношению  $E_b / N_0$  при вероятности битовой ошибки  $P_o = 10^{-3}$ , в условиях действия БГШ и УП; для получения устойчивых оценок для каждого значения  $g$  накапливалась статистика, соответствующая не менее 100 битовым ошибкам. Для характеристики внеполосного излучения использовались значения ширины СПМ радиосигнала по уровням -30 и -60 дБ ( $G_{30}$  и  $G_{60}$  соответственно); а в качестве показателя энергоэффективности – пик-фактор ( $\Pi$ ). Для всех показателей качества СПИ статистика накапливалась по 100 реализациям. Дове-

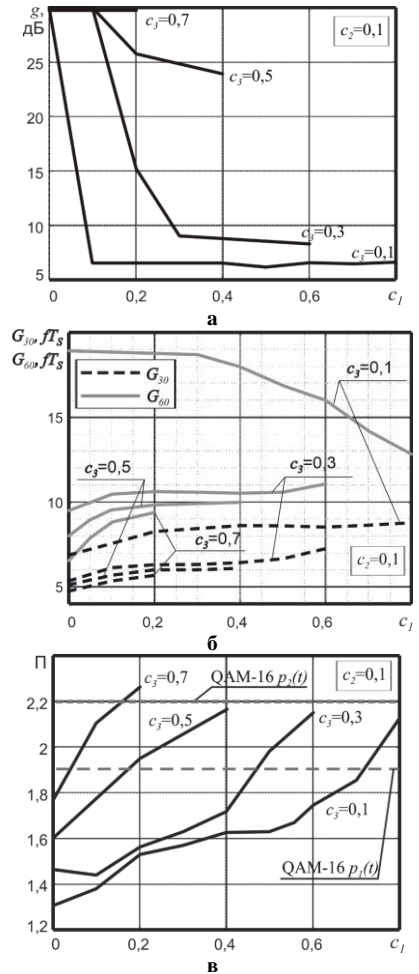


Рисунок 1 – Зависимости показателей качества синтезированных 16-позиционных радиосигналов от весовых коэффициентов

рительные интервалы рассчитаны для доверительной вероятности 0,95, однако не приведены на рисунках, чтобы их не загромождать.

Для процедуры МК синтеза радиосигналов при действии УП и БГШ целесообразно зафиксировать  $c_2 = 0,1$ , т.к. это с одной стороны позволяет реализовать сравнительно высокие показатели качества помехоустойчивости к БГШ (превосходящие реализуемые сигналами с QAM-16), а с другой – оставляет широкий диапазон для вариации других весовых коэффициентов. Из анализа рисунка 1 а следует, что эффективная адаптация к действию УП осуществляется при значениях коэффициентов  $c_3 = 0,1...0,3$ ; а весовой коэффициент  $c_1$  при этом должен быть  $c_1 \geq 0,1...0,3$  соответственно. Причем в этом случае синтезированные 16-позиционные радиосигналы реализуют лучшие показатели помехоустойчивости (при действии УП и БГШ) по сравнению с сигналами с QAM-16 (при действии только БГШ). Из анализа рисунка 1 б следует, что внеполосное излучение синтезируемых радиосигналов снижается по мере увеличения веса коэффициента  $c_3$ . При увеличении значения коэффициента  $c_1$  общая тенденция прослеживается в ухудшении характеристик спектральной эффективности за счет повышения помехоустойчивости к действию УП. Однако при  $c_3 = 0,1$  с увеличением  $c_1$  при МК синтезе радиосигналов достигается предел помехоустойчивости к УП и вследствие этого происходит снижение внеполосного излучения (особенно для показателя качества  $G_{60}$ ) за счет ухудшения энергоэффективности (см. рисунок 1 в). Известные радиосигналы QAM-16  $p_1(t)$ , у которого форма элементарного импульса  $p_1(t) = \sin(\pi t / T_s)$  и QAM-16  $p_2(t) = \sin^2(\pi t / T_s)$  обеспечивают меньшую ширину СПМ на уровне -30 дБ, но по уровню -60 дБ синтезированные радиосигналы реализуют снижение внеполосного излучения (при  $c_3 > 0,1$ ). Из анализа рисунка 1 в следует, что большинство синтезированных 16-позиционных радиосигналов обеспечивают улучшение пик-фактора по сравнению с сигналами с QAM-16  $p_1(t)$  и  $p_2(t)$ . Следует заметить, что показатели качества энергетической эффективности и внеполосного излучения являются антагонистическими.

Таким образом, для обеспечения адаптации СПИ к действию помех значения весовых коэффициентов  $c_i$  целесообразно задавать следующим образом:

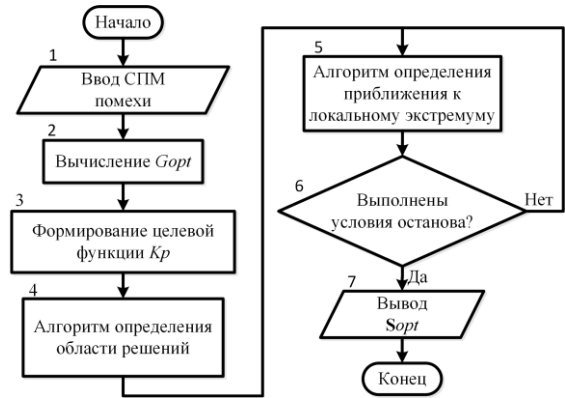
1) зафиксировать минимальное значение коэффициента  $c_2$ , при котором не происходит значительного ослабления (т.е. деградация величины не превышает 0,5 дБ) помехоустойчивости к действию БГШ;

2) определить значение коэффициента  $c_1$ , при котором достигается эффективная минимизация действия помеховой обстановки на СПИ (т.е. когда пороговое отношение сигнал-шум  $g$  соответствует аналогичному показателю качества для известного сигнала при действии только БГШ);

3) из условия  $c_3 + c_4 = 1 - c_1 - c_2$  задать компромисс между критериями качества в интересах недопущения резкого ухудшения (т.е. более чем на 10-15 %) соответствующих характеристик.

Тогда целесообразно рассматривать МК синтез 16-позиционных радиосигналов со следующими весовыми коэффициентами  $c_1 = 0,3$ ;  $c_2 = 0,1$ ;  $c_3 = 0,3$ .

Для адаптации СПИ к действию УП, разработана процедура (см. рисунок 2) 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 определения области решений, на первом этапе которого при помощи функциональной зависимости между синтезированными заранее радиосигналами и параметрами УП вычисляется приближение



**Рисунок 2 – Блок-схема процедуры многокритериального синтеза радиосигналов**

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) для целевой функции с меньшим значением принимается принадлежащим области решений. В блоке 5 определяется точка приближения к экстремуму в области решений (вычисленной ранее):  $k_p(S) \rightarrow \min$ . 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 помехи.

Для реализации процедуры МК синтеза сигналов в интересах адаптации СПИ к действию помех разработана структурная схема формирователя и детектора радиосигналов на основе КА (см. рисунок 3), где УВВ – устройств взятия выборки.

Начало работы данной схемы можно реализовать при помощи использования КА, соответствующего известному виду модуляции или (в случае наличия) полученному КА на предыдущей итерации адаптации СПИ. С помощью радиоканала обратной связи с приемной стороны поступает информация о синтезированном КА (в соответствии с процедурой синтеза см. рисунок 2). Затем полученный КА загружается в устройство памяти, при этом задается режим работы кодера. Информационная двоичная последовательность от источника данных поступает в кодер, который производит манипуляцию сигнала, согласно текущему КА. Полученные синфазная и квадратурная составляющие комплексной огибающей сигнала подаются на квадратурный модулятор, где формируется искомый радиосигнал.

При условии одинаковой вероятности передачи различных символов сигнала приемная часть данной схемы, содержащая  $M$  каналов (по количеству элементов в

КА), построена по критерию максимума отношения правдоподобия, требующего выполнения следующих операций:  $\max_{l=1, \dots, M} \left\{ \operatorname{Re} \left[ \int_0^{T_s} a(t) s_l^*(t) dt \right] - \frac{E_l}{2} \right\}$ , где  $\operatorname{Re}[\cdot]$  – операция взятия вещественной части комплексного числа;  $a(t)$  – сигнал на входе детектора;  $s_l^*(t)$  – сигнал комплексно-сопряженный для  $s_l(t)$ ;  $E_l$  – энергия  $l$ -го элемента КА.

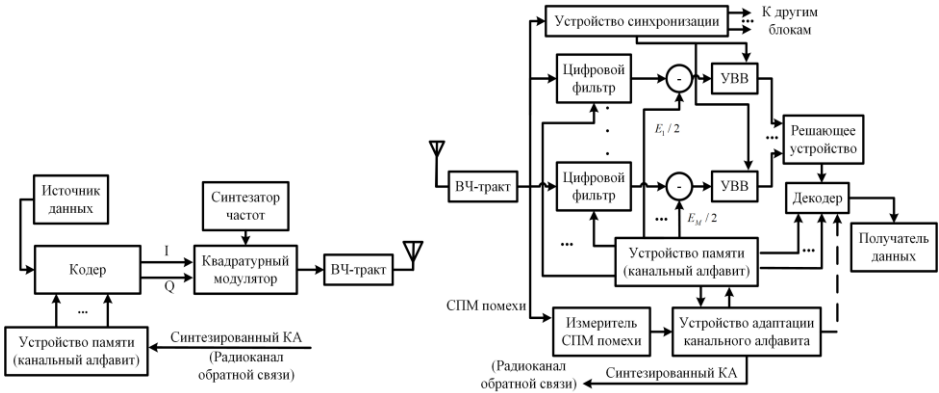


Рисунок 3 – Структурная схема адаптивной к помеховой обстановке СПИ

Выражение  $\operatorname{Re} \left[ \int_0^{T_s} a(t) s_l^*(t) dt \right]$  вычисляется с помощью цифрового фильтра, согласованного с  $l$ -м элементом КА. При обнаружении действия помехи информация о ее СПМ поступает в устройство адаптации КА, в котором выполняется процедура синтеза радиосигналов. Синтезированный КА передается по радиоканалу обратной связи. В соответствии с синтезированным КА в каждом канале из устройства памяти в цифровой фильтр загружаются соответствующие коэффициенты, а на вычитающее устройство подается значение  $E_l / 2$ . На выходе решающего устройства формируется номер канала по критерию максимума отношения правдоподобия, а декодер выводит к получателю информационный символ, соответствующий данному решению.

На рисунке 4 приведены пояснения порядка работы адаптивной к помеховой обстановке СПИ. При отсутствии действующей помехи на приемную часть СПИ возможна передача данных и при помощи стандартных видов модуляции. Однако необходимо проводить регулярную оценку помеховой обстановки. Это целесообразно выполнять с помощью известных подходов с учетом действия довольно мощной помехи и наличия пауз в передаваемых сообщениях, наличие которых продиктовано функционированием современных СПИ преимущественно в пакетном режиме. Для следующей итерации оценки возможен также этап уточнения информации (показан штриховыми линиями на рисунке 4) о помехе во время синтеза КА, т.к. полезный радиосигнал в это время не излучается. После синтеза КА и начала передачи его по обратному каналу в случае сложной помеховой обстановки при необходимости возможна дополнительная оптимизация КА. Передача информации о синтезированном КА с приёмника реализуется за счет стандартных видов модуляции (или в случае

наличия – полученных на предыдущей итерации адаптации СПИ) и процедур помехоустойчивого кодирования. Как правило, приемная и передающая части СПИ находятся в различной радиообстановке, следовательно наличие действующих помех на детектор радиосигналов не означает, в общем случае, проблемы при использовании обратного радиоканала. После получения формирователем радиосигналов синтезированного КА происходит настройка и функционирование данной схемы по приведенному выше описанию. Далее наступает пауза в передаче данных и начинается новая итерация работы адаптивной к помеховой обстановке СПИ.



Рисунок 4 – Порядок работы адаптивной к помеховой обстановке СПИ

Для исследования эффективности разработанной процедуры МК синтеза радиосигналов для адаптации СПИ к действию УП на рисунке 5 представлены зависимости порогового отношения сигнал-шум (порога помехоустойчивости) синтезированных и известных радиосигналов от отношения сигнал-помеха ( $q$ ). Из анализа рисунка 5 следует, что синтезированные 16-позиционные радиосигналы при действии БГШ и УП (ширина спектра – 5 % от ширины СПМ сигнала; расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала) вплоть до отношения сигнал-помеха  $q = -9$  дБ сохраняют помехоустойчивость на уровне сигнала с QAM-16 при воздействии только БГШ; при этом для рассмотренного известного вида модуляции такое же значение показателя  $g$  достигается при отношении сигнал-помеха больше 25 дБ. При этом необходимо заметить, что и при сравнительно высоком отношении

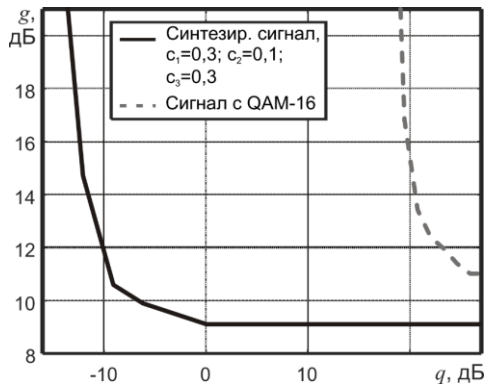


Рисунок 5 – Зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных радиосигналов от отношения сигнал-помеха

сигнал-помеха ( $q > 20$  дБ) по показателю качества помехоустойчивости ( $g$ ) синтезированный 16-позиционный радиосигнал имеет выигрыш (порядка 2 дБ) над сигналом с QAM-16. Это происходит за счет некоторого расширения занимаемой полосы частот. В диссертационной работе показано, что синтезированный 16-позиционный радиосигнал (при весовых коэффициентах  $c_1 = 0,3$ ;  $c_2 = 0,1$ ;  $c_3 = 0,3$ ) по сравнению со спектрально эффективным сигналом с QAM-16  $p_2(t)$  обеспечивает расширение ширины СПМ на уровне -30 дБ на 43% (за счет как формирования провала в СПМ на частоте действия УП, так и дополнительного улучшения помехоустойчивости к БГШ); однако по уровню -60 дБ реализуется уменьшение внеполосного излучения на 30%; кроме того энергоэффективность сигналов (пик-фактор) улучшена на 33%

Для разработанной процедуры МК синтеза радиосигналов необходимая производительность цифрового сигнального процессора (ЦСП) ( $\zeta$ ) составляет:

$$\zeta \geq 200 \cdot (708 \cdot l_s^2 + 2304 \cdot l_s^2 \cdot \log_2(l_s) + 3438 \cdot l_s + 11592 \cdot l_s \cdot \log_2(l_s) + 60) R_s / n_{opt},$$

где  $l_s$  – количество отсчетов на символ;  $R_s$ , бит/с – скорость передачи информации;  $n_{opt}$  – количество битовых интервалов, укладываемых в промежуток времени, через который производится очередной акт оптимизации КА, и включающих преимущественно паузы в передаваемых сообщениях (т.к. современные СПИ работают в пакетном режиме). При  $l_s = 32$ ,  $R_s = 8$  кбит/с,  $n_{opt} = 1000$  необходимая производительность ЦСП составляет порядка 24 GOPS. Следовательно, процедура адаптации СПИ к действию УП может быть реализована на отечественном ЦСП 1892ВМ7Я, который обеспечивает производительность 25,6 GOPS при 16-значных операндах (оперативность адаптации составляет менее 125 мс). Кроме того, для адаптации СПИ в реальном масштабе времени разработана процедура быстрого МК синтеза многопозиционных радиосигналов за счет определения функциональной зависимости, позволяющей вычислить по значению центральной частоты действующей УП отсчеты заранее оптимизированных КА. Разработанная процедура требует порядка 1200 элементарных операций ( $l_s = 32$ ) и 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 многопозиционных радиосигналов с прямым расширением спектра на основе определения ансамбля КП для адаптации СПИ к действующим помехам (УП и СП в виде известного сигнала с расширением спектра ансамблем случайных КП; частотно-временные диапазоны для СП и полезного сигнала совпадают). 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:

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N_S} s_{r(i)}(t - iT_S) = \sum_{i=1}^{N_S} \left( \sum_{j_{КП}=1}^{n_{КП}} b_{r(i)}[j_{КП}] \cdot p_{r(i)} \left( t - iT_S - j_{КП} \frac{T_S}{n_{КП}} \right) \right), \quad s_r \in \mathbf{S}; \quad r = \overline{1, \mathfrak{M}}; \quad (3)$$

где  $p_{r(i)}(t) = 0$ , при  $t \leq 0$ ,  $t \geq T_S / n_{КП}$ ;  $n_{КП}$  – количество элементов  $b_{r(i)}[j_{КП}]$  в расширяющей КП  $\mathbf{b}_{r(i)}$ , в общем случае комплексных;  $\mathfrak{M}$  – позиционность вида модуляции, соответствующая количеству элементов в КА  $\mathbf{S}$ . Из анализа выражения (3)



следует, что свойства СПИ, в том числе обеспечивающие минимизацию воздействия помех, зависят как от набора элементарных импульсов, так и от ансамбля расширяющих КП. Следовательно, возможен синтез сложных многопозиционных радиосигналов для обеспечения гибкой адаптации СПИ к сигнально-помеховой обстановке и дополнительного увеличения структурной скрытности (чем при формировании одиночной расширяющей КП). Для определения реализуемых свойств, в данной главе рассмотрена адаптация СПИ только за счет синтеза ансамбля КП. При этом следует отметить, что текущая задача представляет собой частный случай синтеза КА.

В процедуре синтеза КП для адаптации СПИ 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 БГШ и структурную скрытность, третье – косвенно за различимость сигналов при погрешностях тактовой синхронизации (в пределах 10 %), четвертое – косвенно за уменьшение ошибок тактовой синхронизации:

$$k_p(\mathbf{B}) = c_1 M_1 d_2(G_{opt}(f), G_{КП}(f, \mathbf{B})) + c_2 M_2 / \langle d_2(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) \rangle + c_3 M_3 \langle V(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) \rangle + c_4 M_4 \langle R(\mathbf{b}_k) \rangle, \quad (4)$$

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

где  $G_{КП}(f, \mathbf{B})$  – СПМ ансамбля КП ( $\mathbf{B}$ );  $\langle d_2(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) \rangle$  – среднеарифметическое сумм модулей (в 10 %-м центральном диапазоне) взаимнокорреляционных функций элементов ансамбля КП;  $\langle R(\mathbf{b}_k) \rangle$  – среднеарифметическое сумм модулей боковых лепестков автокорреляционных функций (АКФ) элементов ансамбля КП.

Для реализации процедуры адаптации СПИ к действию СП первое слагаемое в целевой функции (4) заменено на критерий минимума воздействия СП. Данный критерий требует максимума энергии в тех ветвях вейвлет-пакетного разложения (ВПР) синтезируемого ансамбля КП, в которых энергия действующей СП минимальна. Произведен анализ зависимости степени уменьшения влияния СП от применяемого базиса ВПР, показана целесообразность применения базиса Хаара. Целевая функция для процедуры адаптации СПИ к действию СП имеет следующий вид:

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

где  $W_{opt}(z), W_{КП}(z, \mathbf{B})$  – нормированные энергии в  $z$ -й ветви ВПР соответственно для «эталоны» и синтезированного ансамбля КП;  $L$  – общее количество ветвей ВПР. При этом ограничения для данного выражения аналогичны соответствующим для (4).

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

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

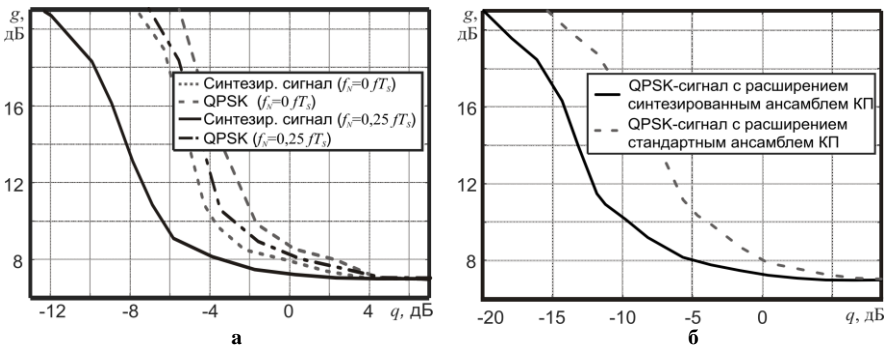
2) Формируется целевая функция согласно выражению (4) ((5) для случая адаптации СПИ к СП) при учете соответствующих весовых коэффициентов  $c_i$ .

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

4) Методом ПС вычисляется точка приближения к экстремуму.

В диссертационной работе получены зависимости показателей качества синтезированных многопозиционных 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 СПИ к действию УП и СП соответственно.

На рисунках 6 приведены зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных четырехпозиционных радиосигналов от отношения сигнал-помеха ( $q$ ). На вход соответствующего детектора поступала смесь полезного сигнала, БГШ и УП (см. рисунок 6 а) или СП (см. рисунок 6 б); в качестве начальных условий



**Рисунок 6 – Зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных четырехпозиционных радиосигналов с расширением спектра от отношения сигнал-помеха**

используется ансамбль дополненных М-последовательностей. Здесь значения весовых коэффициентов составляют  $c_1 = 0,5$ ,  $c_2 = 0,1$ ,  $c_3 = 0,1$ ,  $c_4 = 0,3$ ; длина КП  $l_{КП} = 32$  элемента (при этом аналогичные результаты были получены при длинах КП 64 и 96), размерность задачи синтеза – 128.

Следовательно, процедура синтеза четырехпозиционных радиосигналов на основе определения ансамбля КП для адаптации СПИ к УП при наиболее сложных, из рассмотренных в диссертационной работе, условиях (нормированная центральная частота УП  $f_N = 0 f_{T_S}$ ) обеспечивает порог помехоустойчивости  $g < 8$  дБ при отношении сигнал-помеха  $q > 0$  дБ, а для УП с  $f_N = 0,25 f_{T_S}$  – при  $q > -4$  дБ, что соответственно на 2 и 4 дБ лучше данных показателей для рассмотренных известных радиосигналов (QPSK с расширением спектра ансамблем дополненных М-последовательностей). У синтезированного радиосигнала показатель качества перепутывания информационного символа при погрешностях системы тактовой синхрониза-

ции улучшен более чем в 5 раз, а уровень боковых лепестков АКФ по соответствующему критерию при  $f_N = 0,25 f_{T_S}$  возрос на 4 %, а при  $f_N = 0,05 f_{T_S}$  обеспечивается выигрыш на 10 % по сравнению с известным сигналом.

Из анализа рисунка 6 б следует, что четырехпозиционные радиосигналы с синтезированным ансамблем КП при действии БГШ и СП обеспечивают порог помехоустойчивости  $g < 8$  дБ при отношении сигнал-помеха  $q > -5$  дБ, что на 5 дБ лучше данного показателя для рассмотренных известных радиосигналов (QPSK-сигнал с расширением спектра ансамблем дополненных M-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. При этом разрабатываемые процедуры не теряют общности, и при соответствующих параметрах могут быть применены для МК синтеза радиосигналов с позиционностью  $\mathfrak{M} > 4$ .

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

**В третьей главе** разработаны метод и процедуры МК синтеза многопозиционных радиосигналов с прямым расширением спектра на основе определения как набора элементарных импульсов, так и ансамбля КП для адаптации СПИ к сложной помеховой обстановке (ПП с шириной спектра – 10...40 % от ширины СПМ полезного сигнала или нескольким независимым УП). МК синтез набора элементарных импульсов целесообразно осуществлять на основе определения КА для сигналов без расширения спектра (с учетом СПМ для сложной помеховой обстановки).

Проведенные исследования (см. главы 1 и 2) показывают, что рассмотренные способы увеличения помехоустойчивости обладают следующими особенностями:

- МК синтез набора элементарных импульсов обеспечивает формирование относительно широкого и глубокого провала на частоте действия УП, однако при этом увеличивает занимаемую полосу частот сигнала по уровню СПМ -30 дБ;
- МК синтез ансамбля расширяющих КП реализует формирование сравнительно узких провалов без увеличения ширины СПМ сигнала, однако при этом не достигается сравнимой (с предыдущим способом) помехоустойчивости, особенно при мощных мешающих воздействиях с относительно большой полосой занимаемых частот.

Таким образом, в зависимости от параметров каждой конкретной УП (действующей в составе сложной помеховой обстановки) целесообразно применять наиболее эффективный в данном случае способ увеличения помехоустойчивости СПИ с помощью МК синтеза радиосигналов. Для выбора того или иного способа уменьшения действия на СПИ помех целесообразно рассмотреть следующие параметры мешающих воздействий: мощность (отношение сигнал-помеха) действующей УП, относительная ширина СПМ помехи и близость средней частоты УП к частотам с наибольшей концентрацией энергии сигнала. Тогда для определения мешающего воздействия (например УП), к которому будет осуществляться адаптация СПИ с помощью синтеза набора элементарных импульсов, целесообразно использовать следующее выражение:

$$\min_y \{ \beta_1 M_1 q_{п,у} + \beta_2 M_2 / \Delta f_{п,у} + \beta_3 M_3 \int |G(f) - G_{п,у}(f)|^2 df \},$$

$$\sum_{i=1}^3 \beta_i = 1; \quad M_i, \beta_i > 0; \quad M_i, \beta_i = const. \quad (6)$$

Здесь  $q_{п,у}$ ,  $\Delta f_{п,у}$  и  $G_{п,у}(f)$  – соответственно отношение сигнал-помеха (в дБ), относительная ширина полосы СПМ и непосредственно нормированная СПМ  $y$ -го источника мешающего воздействия;  $G(f)$  – нормированная СПМ полезного радиосигнала;  $\beta_i$  – весовые коэффициенты для каждого входящего критерия качества. В общем случае все перечисленные факторы оказывают равнозначное негативное воздействие на характеристики СПИ, следовательно, при отсутствии априорной информации об эффективности влияния конкретного фактора текущей помеховой обстановки на СПИ можно задать  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 1/3$ .

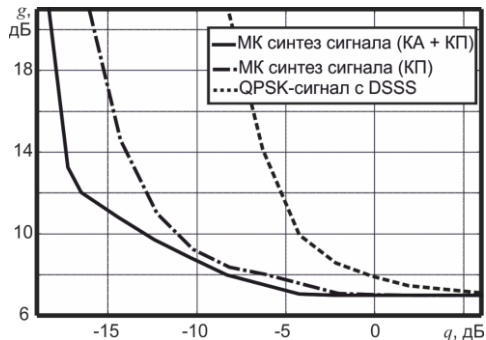
Таким образом, процедура МК синтеза многопозиционных радиосигналов с расширением спектра для адаптации СПИ к действию сложной помеховой обстановки включает в себя следующие этапы:

1) Среди действующих источников помех в данный момент времени произвести определение помеховой составляющей, оказывающей наиболее негативное влияние на СПИ по совокупности выше обозначенных факторов (см. выражение (6)).

2) Для определенной на этапе 1 помеховой составляющей осуществить адаптацию СПИ с помощью МК синтеза набора элементарных импульсов (см. главу 1). При этом с учетом соответствующих весовых коэффициентов  $c_i$  формировать целевую функцию, согласно выражению (2), а при помощи процедуры оптимизации (см. рисунок 2) вычислить предполагаемую точку приближения к экстремуму.

3) После этого к оставшимся источникам мешающих воздействий из состава сложной помеховой обстановки целесообразно производить адаптацию СПИ за счет МК синтеза ансамбля КП. Для этого по полученной СПМ помехи можно определить эталонную СПМ  $G_{opt}(f)$  и сформировать целевую функцию согласно выражению (4) при учете весовых коэффициентов  $\alpha_i$  (соответствуют весовым коэффициентам  $c_i$  в выражении (4), переобозначение введено для избегания путаницы между коэффициентами для разных способов МК синтеза радиосигналов). При помощи метода оптимизации ГА (настроенного) определить предполагаемую область решений, а методом ПС вычислить точку приближения к экстремуму.

На рисунке 7 приведены зависимости порога помехоустойчивости от отношения сигнал-помеха для синтезированных и известного (QPSK-сигнал  $p_2(t) = \sin^2(\pi t / T_s)$ ) радиосигналов с прямым расширением спектра. Здесь «МК синтез сигнала (КА + КП)» – МК синтез сигнала за



**Рисунок 7 – Зависимости порога помехоустойчивости от отношения сигнал-помеха при сложной помеховой обстановке**

счет определения как набора элементарных импульсов, так и ансамбля кодовых последовательностей; «МК синтез сигнала (КП)» – за счет определения ансамбля КП: формировались 3 провала в СПМ (на частотах действия помех), а синтез набора элементарных импульсов не производился. Длина КП – 32 элемента, при этом аналогичные результаты были получены при длинах КП 64 и 96. Применяется следующая модель сложной помеховой обстановки: совокупность 3-х QPSK-сигналов без расширения спектра с параметрами: средние нормированные частоты составляли 0,05; 0,7; -0,8  $fT_s$  соответственно (при данном нормировании 0  $fT_s$  соответствует несущей частоте полезного сигнала); ширина полосы СПМ – 7-8 % от ширины СПМ сигнала (для каждой отдельной помехи); отношение мощностей помех 2:1:1. Данные параметры помеховой обстановки реализуют одну из наиболее сложных ситуаций для СПИ: более мощная помеха действует на частоте, близкой к несущей частоте полезного сигнала, две остальные помехи расположены асимметрично относительно несущей частоты; радиопомехи требуют для минимизации своего действия формирования независимых провалов в СПМ синтезируемого радиосигнала.

Из анализа рисунка 7 следует, что применение МК синтеза как для набора элементарных импульсов, так и для ансамбля КП обеспечивает помехоустойчивость (при сохранении вероятности битовой ошибки на уровне известных сигналов с расширением спектра при действии только БГШ) до отношения сигнал-помеха -4 дБ (в условиях сложной помеховой обстановки). Отказ от синтеза набора элементарных импульсов (при этом адаптация СПИ к помеховой обстановке производится только за счет определения ансамбля КП) приводит к уменьшению показателя качества помехоустойчивости на 2 дБ (по отношению сигнал-помеха). Четырехпозиционные сигналы с синтезированным набором элементарных импульсов при  $c_1 = 0,5$ ;  $c_3 = 0,3$ , хотя и имеют большую ширину спектра на уровне -30 дБ (за счет формирования провала в СПМ), значительно выигрывают на уровне -60 дБ (в сравнении со спектрально-эффективными сигналами: с QPSK ( $p_2(t)$ ) – более чем в 1,5 раза; а с QPSK ( $p_1(t)$ ) – в 3,7 раз).

Для определения реализованных корреляционных характеристик синтезированных радиосигналов в таблице 2 приведены выигрыши по соответствующим критериям качества в сравнении с QPSK-сигналом с расширением ансамблем дополненных М-последовательностей. Здесь отрицательное значение величины, приведенной в таблице, соответствует проигрышу по косвенному критерию качества. Двухкритериальный синтез сигнала с помощью определения ансамбля КП учитывает критерии максимума пропускной способности за счет ослабления действия УП ( $\alpha_1 = 0,95$ ) и максимума помехоустойчивости при действии БГШ ( $\alpha_2 = 0,05$ ). Из анализа таблицы 2 следует, что более адекватные корреляционные характеристики обеспечивает

**Таблица 2 – Нормированные корреляционные характеристики синтезированных радиосигналов в сравнении с известным сигналом**

Метод синтеза сигнала	Выигрыш (проигрыш) по косвенному критерию	
	$\langle V(\mathbf{b}_k, \mathbf{b}_l) \rangle$ (БКФ), %	$\langle R(\mathbf{b}_k) \rangle$ (АКФ), %
Двухкритериальный синтез сигнала (КП)	21	-68
МК синтез сигнала (КП)	1	-18
Двухкритериальный синтез (КП) + МК синтез (КА)	-33	-59
МК синтез сигнала (КА + КП)	19	-4

МК синтез сигнала за счет определения как набора элементарных импульсов, так и ансамбля КП. Следовательно, для СПИ в сложной помеховой обстановке целесообразно применение именно такого способа. При этом и в данном случае возникает незначительное увеличение боковых лепестков АКФ (до 4 %) у синтезированного радиосигнала. Это происходит за счет того, что показатели качества, формирующие провал в СПМ и минимизирующие боковые лепестки АКФ, являются по сути антагонистическими.

Применение двух механизмов минимизации действия помех позволяет более эффективно распределить ресурсы между рассматриваемыми критериями качества. Это, в свою очередь, приводит к улучшению как показателя качества помехоустойчивости на 2 дБ (по отношению сигнал-помеха), так и корреляционных характеристик (по сравнению с МК синтезом радиосигнала только за счет определения ансамбля КП): по критерию минимума перепутывания информационных символов при погрешностях тактовой синхронизации достигается улучшение на 18 %; а по критерию максимума точности тактовой синхронизации – на 14 %.

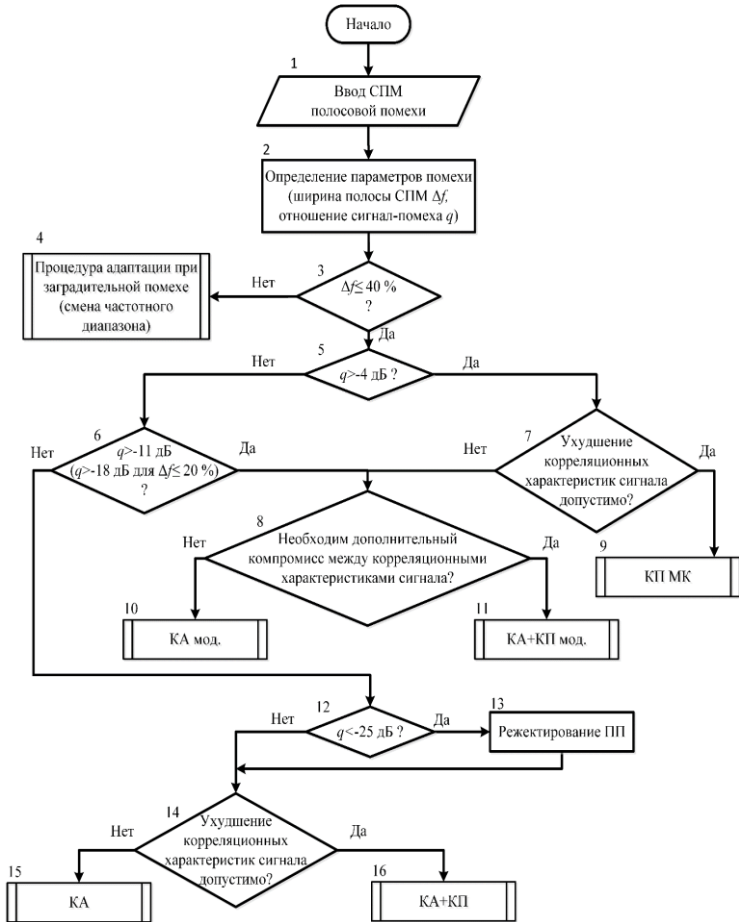
Для адаптации СПИ к действию ПП (ширина спектра – 10..40 % от ширины СПМ полезного сигнала) в диссертационной работе показано, что выбор конкретного типа процедуры МК синтеза радиосигналов целесообразно производить с учетом пороговых значений отношения сигнал-помеха и ширины спектра ПП, а также принимая во внимание наличие дополнительных требований на ограничение внеполосного излучения и компромисс корреляционных характеристик.

На рисунке 8 приведена блок-схема алгоритма выбора процедуры МК синтеза многопозиционных радиосигналов с прямым расширением спектра для адаптации СПИ к действию ПП. Здесь «КП МК» – МК синтез сигнала за счет определения ансамбля КП; «КА мод.» – МК синтез сигнала за счет определения только набора огибающих элементарных импульсов (при котором формировался узкий провал в СПМ сигнала); «КА+КП мод.» – МК синтез сигнала за счет определения набора огибающих элементарных импульсов (при котором формировался узкий провал в СПМ сигнала) и ансамбля КП (формировались 2 провала в СПМ сигнала, дополняющие узкий провал до охвата частот, на которые воздействует ПП); «КА» и «КА+КП» – МК синтез сигнала за счет определения соответственно только набора огибающих элементарных импульсов, или же совместно с этим и ансамбля КП. При этом предполагается, что синтезируемый радиосигнал с меньшим уровнем внеполосных излучений является предпочтительным вариантом.

После получения СПМ полосовой помехи и определения ее параметров в блоке 3 проверяется необходимость выполнения дальнейшего алгоритма, т.к. при ширине СПМ помехи  $\Delta f > 40\%$  целесообразно рассматривать мешающее воздействие как заградительное, и соответствующим образом производить адаптацию СПИ, например выполняя смену (частичную или полную) используемого спектрального диапазона.

Блоки 5, 6 и 12 представляют собой пороговые решающие устройства по отношению сигнал-помеха для определения группы наиболее эффективных процедур МК синтеза радиосигналов. При этом в блоке 6 указаны два порога: для ПП с относительной шириной спектра  $10\% \leq \Delta f \leq 20\%$  и с  $20\% < \Delta f \leq 40\%$ . В блоках 7 и 14 осуществляется выбор конкретных процедур в случаях допустимости управляемого ухудшения корреляционных характеристик синтезируемых радиосигналов. При существенно низких отношениях сигнал-помеха ( $q < -25$  дБ) целесообразно применение

разработанных процедур совместно с режекцией ПП на приемной стороне, как показано в блоках 12, 13.



**Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма выбора процедуры многокритериального синтеза многопозиционных радиосигналов с прямым расширением спектра для адаптации систем передачи информации к действию полосовой помехи**

Данные процедуры синтеза радиосигналов реализованы при помощи как совместного, так и отдельного определения набора огибающих элементарных импульсов и ансамбля расширяющих КП. В зависимости от мощности действующей ПП и наличия дополнительных требований (например, уменьшения внеполосного излучения) показана целесообразность применения той или иной процедуры синтеза радиосигналов, что, в свою очередь, позволяет гибко варьировать реализуемые характеристики СПИ в интересах эффективной адаптации к текущим внешним условиям. МК синтез сигналов с прямым расширением спектра для адаптации СПИ к действию полосовой помехи (ширина спектра – 10..40 % от ширины СПМ полезного сигнала) и БГШ

обеспечивает помехоустойчивость (при сохранении вероятности битовой ошибки на уровне известных сигналов с расширением спектра при действии только БГШ) до отношения сигнал-помеха -7 дБ.

**В четвертой главе** разработаны процедуры МК синтеза СКК (на основе ТСМ, «зависимых» сигналов и ВМСМ) за счет определения элементов КА.

Для минимизации действия УП на СПИ целесообразно синтезировать СКК на основе использования многопозиционных радиосигналов, удовлетворяющих заданным требованиям 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 ТСМ. В данной критерии, для 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 СПИ к действию УП целесообразно применение комбинированного критерия качества:

$$k_p(\mathbf{S}) = c_1 M_1 d_2 (G_{opt}(f), G(f, \mathbf{S})) + c_2 M_2 \sum_k \sum_l (d_2(\mathbf{s}_k^{(i)}, \mathbf{s}_l^{(i)}) - d_2(\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l))^2 + c_3 M_3 h(10 \cdot \lg[G(f, \mathbf{S})] - G_{\log}(f)) + c_4 M_4 (D[P_{мен}(\mathbf{S})] / (M[P_{мен}(\mathbf{S})]))^2. \quad (7)$$

При этом ограничения для данного выражения аналогичны соответствующим для (2).

Для минимизации действия УП на СПИ 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 СПИ к действию УП целесообразно применение комбинированного критерия качества вида:

$$k_p(\mathbf{S}) = c_1 M_1 d_2 (G_{opt}(f), G(f, \mathbf{S})) + c_2 M_2 / (< d_2(\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l) >) + c_3 M_3 h(10 \cdot \lg[G(f, \mathbf{S})] - G_{\log}(f)) + c_4 M_4 J_2(\mathbf{S}), \quad (8)$$

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

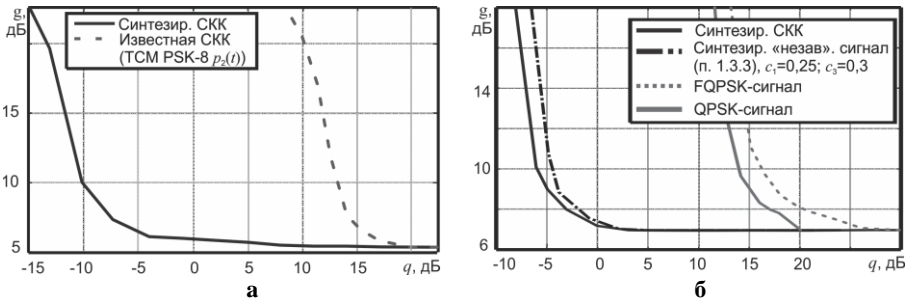
Принимая во внимание схожесть целевых функций (7), (8) и (2) (отличие лишь в одном из четырех используемых критериев), в качестве метода оптимизации используется квазиньютоновский метод. Таким образом, процедуры синтеза СКК на основе решетчатого кодирования и «зависимых» сигналов длительностью  $T_s$  для адаптации



СПИ к действию УП включают в себя этапы, приведенные в блок-схеме на рисунке 2, при условии применения целевых функций (7) и (8) соответственно.

На рисунках 9 представлены зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных СКК на основе решетчатого кодирования (см. рисунок 9 а) и «зависимых» сигналов (см. рисунок 9 б) от отношения сигнал-помеха. Здесь ширина спектра действующей УП – 5 % от ширины СПМ сигнала; расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала.

Из анализа рисунка 9 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



**Рисунок 9 – Зависимости порога помехоустойчивости синтезированных и известных СКК от отношения сигнал-помеха**

( $p_2(t)$ ) при действии только БГШ; для рассмотренной известной СКК такие же значения показателя  $g$  достигаются при отношении сигнал-помеха больше 17 дБ.

Показатели качества энергетической эффективности ( $\Pi$ ) и минимизации внеполосного излучения для рассматриваемых СКК приведены в таблице 3. При сравнимых значениях пик-фактора (см. таблицу 3) синтезированные СКК хотя и имеют большую ширину спектра на уровне -30 дБ  $G_{30}$  (за счет формирования провала в СПМ), но выигрывают на уровне -60 дБ  $G_{60}$  более чем в 1,4 раза (в сравнении с спектрально-эффективной СКК TCM PSK-8  $p_2(t)$ ).

**Таблица 3 – 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
$\Pi$	1,6	1,6

Из анализа рисунка 9 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 действии только БГШ; 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 энергетической эффективности и минимизации внеполосного излучения для рассматриваемых СКК приведены в таблице 4. Анализ данных результатов показывает, что при сравнимых значениях пик-фактора и порога помехоустойчивости  $g$  синтезированные 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 СПИ к действию УП не позволяет достигнуть характеристик, реализуемых FQPSK-сигналами (при значительном проигрыше последних по помехоустойчивости).

**Таблица 4 – 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

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:  $l_s = 32$ ,  $R_s = 8$  кбит/с,  $n_{opt} = 1000$ , оперативность адаптации к УП составляет менее 125 мс.

**В пятой главе** обоснованы процедуры МК синтеза многопозиционных радиосигналов в интересах повышения энергетической и структурной скрытности СПИ. Для достижения уменьшения отличительных признаков (увеличения структурной скрытности) целесообразно потребовать максимизацию расстояний в пространстве сигналов между классом синтезируемых радиосигналов  $\mathbf{S}$  и точками  $\mathbf{S}_\zeta$ , соответствующими известным видам модуляции. При этом предварительные исследования показывают, что при превышении таким расстоянием величины, равной минимальному евклидову расстоянию между элементами КА для QPSK-сигнала  $d_{QPSK}^{\min}$ , дальнейшая максимизация его значения не будет приводить к дополнительному увеличению соответствующего показателя качества, и, следовательно, целесообразно исключить данное расстояние из рассмотрения на текущей итерации. Для каждого известного вида модуляции вычисляется матрица взаимных (с синтезируемым радиосигналом) евклидовых расстояний  $\mathbf{D}_2(\mathbf{S}_\zeta, \mathbf{S})$ , а для выполнения численной оптимизации, как правило, необходимо скалярное значение соответствующей целевой функции. При рассмотрении минимального значения из матрицы взаимных евклидовых расстояний в целевой функции возникает минимаксная метрика:  $\max_s \left( \min \mathbf{D}_2(\mathbf{S}_\zeta, \mathbf{S}) \right)$ , которая приводит к появлению множества локальных экстремумов и в целом затрудняет оптимизацию КА. Предлагается для преодоления данного недостатка вычислять среднее по ансамблю от матрицы взаимных евклидовых расстояний (при помощи оператора математического ожидания  $M[\bullet]$ ). Для учета нескольких (количество которых обозначим  $L$ ) известных видов модуляции в данном критерии необходимо рассматривать взвешенную сумму соответствующих частных критериев (здесь вес определяет важность структурной защиты от определенного сигнала), однако при отсутствии априорной информации веса возможно считать равнозначными. Тогда данный критерий можно записать в виде:

$$k_{st}(\mathbf{S}) = \sum_{\zeta=1}^L 1 / M \left[ \left\{ \mathbf{D}_2(\mathbf{S}_\zeta, \mathbf{S}) \mid d_2(s_{\zeta,i}, s_{opt,j}) < d_{QPSK}^{\min} \right\} \right] \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$d_2(s_{\zeta,i}, s_{opt,j}) \in \mathbf{D}_2(\mathbf{S}_\zeta, \mathbf{S}), \quad s_{\zeta,i} \in \mathbf{S}_\zeta, \quad s_{opt,j} \in \mathbf{S}, \quad i, j = \overline{M}.$$

где  $d_2(s_{\zeta,i}, s_{opt,j})$  – взаимное евклидово расстояние между  $i$ -ым ( $s_{\zeta,i}$ ) и  $j$ -ым ( $s_{opt,j}$ ) элементами канальных алфавитов соответственно для известного  $\mathbf{S}_\zeta$  и синтезируемого сигналов  $\mathbf{S}$ ;  $\overline{M}$  – позиционность радиосигналов (соответствует объему КА).

Без потери общности, рассмотрены четырехпозиционные радиосигналы, как реализующие сравнительно высокие характеристики при компактном объеме КА; а в качестве известных видов модуляции – такие широко распространенные на практике сигналы как фазоманипулированные: QPSK, QPSK с формой элементарного импульса  $p_1(t) = \sin(\pi t / T_s)$ , QPSK  $p_2(t) = \sin^2(\pi t / T_s)$ ; частотно-манипулированные: FSK-4 с индексом модуляции  $h = 0,5$  и FSK-4 ( $h = 1$ ); перспективные: FQPSK.

Для недопущения неконтролируемого изменения других важных характеристик СПИ представляет интерес применение МК подхода, тогда целесообразно рассмотреть следующие критерии качества: максимизация пропускной способности при минимизации действия УП на СПИ путем формирования провалов в СПМ синтезируемого КА; максимизация помехоустойчивости к действию БГШ путем увеличения евклидова расстояния между элементами синтезируемого КА; минимизация внеполосного излучения с помощью задания штрафа при превышении эталонной СПМ; максимизация структурной скрытности синтезируемых радиосигналов. Тогда целевую функцию можно записать в следующем виде:

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

При этом ограничения для данного выражения аналогичны соответствующим для (2).

Для исключения влияния конкретного алгоритма распознавания вида модуляции рассмотрен показатель качества, обеспечивающий уменьшение отличительных признаков (увеличение структурной скрытности) при помощи максимизации вероятности битовой ошибки  $BER_{st}$  от набора детекторов известных типов сигналов в случае подачи на их вход смеси синтезированного сигнала и БГШ при сравнительно высоком отношении сигнал-шум ( $E_b / N_0 = 20$  дБ).

Показатели качества синтезированных структурно-защищенных радиосигналов приведены в таблице 5. Из анализа данной таблицы

**Таблица 5 – Показатели  $BER_{st}$  для синтезированных структурно-защищенных сигналов**

Тип детектора	QPSK	QPSK $p_1(t)$	QPSK $p_2(t)$	FSK-4 $h = 0,5$	FSK-4 $h = 1$	FQPSK
$BER_{st}$	48%	44%	31%	26%	27%	46%

следует, что минимальное значение  $BER_{st}$  не превышает величины 26% (достигается при детекторе FSK-4  $h = 0,5$ ). Применение критерия структурной скрытности при МК синтезе радиосигналов позволяет уменьшить отличительные признаки (увеличить соответствующий показатель качества) на величину 25% (по сравнению с сигналами без структурной защиты). Изложенный подход для повышения структурной

скрытности можно применять в качестве как дополнительного этапа оптимизации радиосигналов или СКК, синтезированных в других разделах данной работы, так и при первоначальном синтезе структурно-защищенных радиосигналов или СКК.

В шестой главе диссертации разработаны процедуры МК синтеза OFDM-сигналов. Радиосигналы с OFDM можно представить на основе набора КА  $\mathbf{S}^{OFDM}$ , при помощи элементов которого осуществляется модуляция на поднесущих, то есть:

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N_{OFDM}} \left( \sum_{j_n=1}^n [s_{r(i)}[j_n] \cdot \exp(j2\pi f_{j_n}(t - iT_{OFDM}))] \right), \quad (11)$$

$$s_{r(i)}[j_n] \in \mathbf{s}[j_n]; \quad \mathbf{s}[j_n] \subset \mathbf{S}^{OFDM}; \quad T_{OFDM} = n \cdot T_s;$$

где  $T_{OFDM}$  и  $N_{OFDM}$  – соответственно длительность OFDM-символа и их количество;  $n$  – число поднесущих;  $f_{j_n}$  и  $\mathbf{s}[j_n]$  – частота и КА  $j_n$ -ой поднесущей соответственно.

В интересах синтеза многопозиционных радиосигналов для увеличения структурной скрытности OFDM-радиосистем передачи информации целесообразно применение двухкритериального подхода, т.к. необходимо учитывать по крайней мере следующие критерии качества СПИ: максимизация структурной скрытности синтезируемых OFDM-радиосигналов; максимизация помехоустойчивости к действию БГШ путем увеличения минимального евклидова расстояния ( $d_{2\min}$ ) между элементами синтезируемого КА. Тогда целевую функцию можно представить в виде:

$$k_p(\mathbf{S}^{OFDM}) = c_1 M_1 k_{si}(\mathbf{S}^{OFDM}) + c_2 M_2 / d_{2\min}(\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l), \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^2 c_i = 1; \quad M_i, c_i > 0; \quad M_i, c_i = const; \quad \mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l \in \mathbf{S}^{OFDM}; \quad k, l = \overline{1, \mathfrak{M}}.$$

В качестве стартовой точки для процедуры двухкритериального синтеза использовался КА, состоящий из случайных чисел, распре-

**Таблица 6 – Показатели  $BER_{si}$  для синтезированного структурно-защищенного OFDM-сигнала**

Тип детектора	QAM-16	APSK-16	PSK-16
$BER_{si}$	42%	49%	42%

деленных по нормальному закону. При таких начальных условиях результаты моделирования двухкритериального синтеза структурно-защищенных OFDM-сигналов приведены в таблице 6; усреднение производилось по 1000 реализациям. В диссертации показана целесообразность применения комбинированного алгоритма оптимизации (квазиньютоновского и Нелдера-Мида).

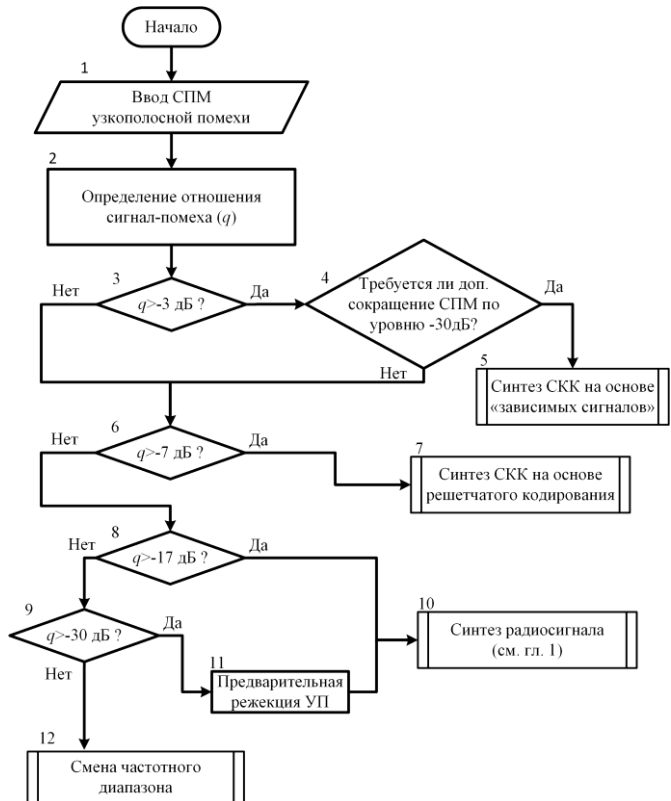
В седьмой главе работы приведены результаты сравнительного анализа реализуемых характеристик и определено при каких требованиях необходимо применять конкретную (из предложенных) процедуру МК синтеза радиосигналов и СКК.

Сравнительно большое внимание в настоящей работе уделено адаптации СПИ к действию УП. Это связано с широким распространением на практике данного мешающего воздействия за счет простоты генерации (или высокой вероятности непреднамеренного возникновения) и достаточно эффективного влияния на подавляемую радиолинию. На рисунке 10 приведена блок-схема алгоритма выбора процедуры МК синтеза многопозиционных радиосигналов и СКК для адаптации СПИ к действию УП. В условиях действия мощной УП (при отношении сигнал-помеха  $q \in [-30, -17]$  дБ) предпочтительно применение синтезированных радиосигналов с дополнительной

режекцией УП на приемной стороне СПИ, как обеспечивающих сравнительно лучшие характеристики помехоустойчивости (показатель  $g \leq 14$  дБ) в рассматриваемом диапазоне отношений сигнал-помеха. В условиях действия сравнительно мощной УП (при отношении сигнал-помеха больше чем  $-14,5$  дБ) целесообразно применение синтезированного в главе 1 радиосигнала ( $c_1 = 0,5$ ;  $c_3 = 0,3$ ), при этом помехоустойчивость сохраняется на уровне (ухудшение составляет менее 1 дБ) QPSK-сигнала при воздействии только БГШ; при УП с отношением сигнал-помеха  $q \in (-17, -14,5]$  дБ также целесообразно использование данного синтезированного радиосигнала ( $c_1 = 0,5$ ;  $c_3 = 0,3$ ), однако тогда ухудшение порога помехоустойчивости составляет порядка 2 дБ в сравнении со случаем QPSK-сигнала при воздействии только БГШ.

При необходимости реализации минимального значения порога помехоустойчивости (без расширения занимаемой полосы частот) в условиях действия БГШ и УП целесообразно применение синтезированной СКК на основе решетчатого кодирования ( $c_1 = 0,4$ ;  $c_3 = 0,3$ ), помехоустойчивость (при отношении сигнал-помеха  $q > -4$  дБ) сохраняется на уровне (показатель  $g \leq 6$  дБ, т.е. ухудшение составляет менее 1 дБ) известной СКК TCM PSK-8 ( $p_2(t)$ ) при действии только БГШ; а при отношении сигнал-помеха  $q > -7$  дБ – на уровне (ухудшение составляет менее 1 дБ) QPSK-сигнала при воздействии только БГШ.

При требованиях минимизации воздействия УП (при отношении сигнал-помеха более  $-3,0$  дБ) и дополнительного сокращения ширины СПИ по уровню  $-30$  дБ целесооб-



**Рисунок 10** – Блок-схема алгоритма выбора процедуры МК синтеза многопозиционных СКК и радиосигналов для адаптации систем передачи информации к действию УП

разно применение синтезированной СКК на основе «зависимых» сигналов ( $c_1 = 0,3$ ;  $c_3 = 0,3$ ), при этом помехоустойчивость сохраняется на уровне (ухудшение составляет менее 1 дБ) QPSK-сигнала при воздействии только БГШ.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

1) Разработаны и проанализированы метод и процедура МК синтеза радиосигналов на основе КА для адаптации СПИ к УП, учитывающая такие показатели качества как пропускная способность при минимизации действия УП, внеполосное излучение, помехоустойчивость при действии БГШ и энергоэффективность формируемого радиосигнала. Рассмотрены особенности данной процедуры при различной позиционности вида модуляции. Получены зависимости показателей качества синтезированных многопозиционных радиосигналов от значений весовых коэффициентов целевой функции. Показано, что при наиболее неблагоприятном (из рассмотренных) воздействии на радиоканал БГШ и УП (расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала) синтезированные радиосигналы вплоть до отношения сигнал-помеха  $q = -9$  дБ сохраняют помехоустойчивость на уровне сигнала с QAM-16 при воздействии только БГШ. Для адаптации СПИ в реальном масштабе времени разработана процедура быстрого МК синтеза многопозиционных радиосигналов за счет определения функциональной зависимости между отсчетами КА и значением центральной частоты УП.

2) Обоснована двухэтапная процедура синтеза многопозиционных радиосигналов с расширением спектра (на основе определения ансамбля КП) для адаптации СПИ к действующим УП, использующая комбинированный критерий качества, в состав которого входят частные критерии, отвечающие за пропускную способность и минимизацию действия УП, помехоустойчивость при действии БГШ, а также минимизацию перепутывания информационного символа при погрешностях системы тактовой синхронизации. Предлагаемая процедура при наиболее неблагоприятном (из рассмотренных) воздействии на радиоканал УП (расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала) обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости на 2 дБ, а для УП с центральной нормированной частотой  $0,25 f_{T_s}$  – на 4 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 соответствующему критерию при адаптации к действию УП с центральной частотой  $f_N = 0 f_{T_s}$  возростал на 4 %, а при  $f_N = 0,25 f_{T_s}$  был уменьшен на 10 %.

3) Разработана двухэтапная процедура МК синтеза многопозиционных радиосигналов с расширением спектра на основе определения ансамбля КП, обеспечивающая за счет использования аппарата ВПР адаптацию СПИ к действующим СП. Произведен анализ зависимости степени уменьшения влияния СП от применяемого базиса ВПР. Показано, что радиосигналы с синтезированным ансамблем КП при действии БГШ и СП обеспечивают выигрыш в помехоустойчивости на 5 дБ (по отношению сигнал-помеха) над известными QPSK-сигналами с расширением спектра.

4) Обоснованы метод и процедура многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра для адаптации СПИ к сложной помеховой обстановке (в виде нескольких независимых источников УП). Показано, что минимизацию действия помех целесообразно производить путем многокритериального синтеза как

набора элементарных импульсов, так и ансамбля кодовых последовательностей. Это позволяет достигнуть выигрыша (в сравнении с QPSK-сигналом с расширением спектра ансамблем дополненных M-последовательностей) по помехоустойчивости порядка 10 дБ (по отношению сигнал-помеха) в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки при сохранении вероятности битовой ошибки на уровне QPSK-сигнала при воздействии только БГШ.

5) Разработаны процедуры многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра для адаптации СПИ к действию полосовых помех. Многокритериальный синтез радиосигналов с прямым расширением спектра обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости (по отношению сигнал-помеха) до 13 дБ (по отношению сигнал-помеха) в сравнении с QPSK-сигналом с расширением спектра ансамблем дополненных M-последовательностей.

6) Разработана процедура синтеза СКК на основе решетчатого кодирования для адаптации СПИ к действию УП, использующая комбинированный критерий качества. Данная процедура в случае неблагоприятного воздействия на радиоканал УП (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 БГШ вплоть до отношения сигнал-помеха –4 дБ. 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 ( $p_2(t)$ )).

7) Разработана процедура синтеза СКК на основе «зависимых» сигналов для адаптации СПИ, которая в случае воздействия на радиоканал УП (расположение – на частоте несущего колебания полезного сигнала) обеспечивает помехоустойчивость на уровне (ухудшение показателя  $g$  составляло менее 1 дБ) QPSK-сигнала при воздействии только БГШ вплоть до отношения сигнал-помеха –3 дБ. При этом при сравнимых значениях пик-фактора и порога помехоустойчивости синтезированные СКК на основе «зависимых» сигналов позволяют сократить внеполосное излучение по уровню –30 дБ на величину порядка 35 % в сравнении с синтезированными радиосигналами на основе определения КА.

8) Обоснован набор критериев качества многопозиционных радиосигналов для синтеза класса структурно-защищенных радиосигналов. В состав комбинированного критерия качества входят частные критерии, отвечающие за ослабление действия помех; за повышение помехоустойчивости при БГШ, а также обеспечивающие минимизацию внеполосного излучения и максимизацию структурной скрытности формируемого сигнала. Разработана процедура многокритериального синтеза класса структурно-защищенных радиосигналов, обеспечивающая уменьшение отличительных признаков (увеличение показателя качества) радиосигналов на 25%. Помимо высокой структурной скрытности, обеспечивается значительная помехоустойчивость путем эффективной адаптации СПИ к действию помех: в условиях БГШ и УП (вплоть до отношения сигнал-помеха -10 дБ) реализуется помехоустойчивость на уровне сигнала с QPSK при действии только БГШ.

9) Обоснована двухэтапная процедура многокритериального синтеза OFDM-радиосигналов для снижения пик-фактора и дополнительного повышения структурной скрытности СПИ. На первом этапе для повышения структурной скрытности

OFDM-радиосигналов осуществляет многокритериальный синтез ограниченного количества сигнальных созвездий, которые затем используются на нескольких поднесущих (в интересах снижения размерности решаемой задачи). На втором этапе выполняется (для сокращения пик-фактора и повышения структурной скрытности) синтез OFDM-символа в целом с помощью вариации расположения на поднесущих синтезированных на этапе 1 сигнальных созвездий. Разработанная двухэтапная процедура многокритериального синтеза OFDM-радиосигналов обеспечивает выигрыш по показателю энергоэффективности (по уровню дополнительной функции распределения  $F_{\Pi} = 10^{-3}$ ) более чем на 0,9 дБ и 6,6 дБ соответственно по сравнению со случаем использования известной техники снижения пик-фактора на основе «частичной передачи последовательности» (Partial transmit sequence – PTS) (при количестве субблоков  $V = 256$ ) и без применения какого-либо способа повышения энергоэффективности OFDM-сигналов.

10) Показана возможность реализации процедур МК синтеза радиосигналов (на основе КА) и СКК для адаптации СПИ к помехам на современной элементной базе (ЦСП 1892ВМ7Я). 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 многопозиционных 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 разработанный способ сокращения вычислительных затрат можно применить и к процедурам МК синтеза СКК для существенного улучшения скоростных характеристик.

11) Приведены результаты анализа реализуемых характеристик и определено при каких требованиях необходимо применять конкретную (из предложенных) процедуру многокритериального синтеза радиосигналов и СКК по типу действующей помеховой обстановки. Проведен сравнительный анализ разработанных процедур многокритериального синтеза в зависимости от класса соответствующего радиосигнала. Показано, что при выборе конкретного типа радиосигналов для адаптации СПИ к помеховой обстановке целесообразно применение многокритериального подхода, учитывающего в текущий момент времени: требуемую скорость передачи данных, сложность действующей сигнально-помеховой обстановки, доступные аппаратные мощности для реализации соответствующих процедур, необходимость дополнительной скрытности сигналов. Показано, что при выборе позиционности синтезированных радиосигналов для адаптации СПИ к помеховой обстановке также целесообразно применение многокритериального подхода, учитывающего в текущий момент времени: устойчивость к действию БГШ и помех, требуемые аппаратные затраты для синтеза сигналов, а также реализуемый компромисс по другим важным показателям качества (энергетическая эффективность, внеполосное излучение, корреляционные характеристики).

На основании выполненных исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение и состоящей в повышении устойчивости беспроводных СПИ к действию различных помех.



**Основные результаты диссертации опубликованы в 72 научных работах.**  
Ниже приведен библиографический список наиболее значимых из них.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Лисничук А.А. Многокритериальный синтез радиосигналов с прямым расширением спектра для адаптивных к узкополосным и структурным помехам систем передачи информации // Цифровая обработка сигналов, № 1, 2022. С. 19-23.
2. Лисничук А.А. Процедура многокритериального синтеза OFDM-радиосигналов для снижения пик-фактора и повышения структурной скрытности систем передачи информации // Вестник РГРТУ, № 77, 2021. С. 17-28.
3. Лисничук А.А., Батищев А.В. Двухкритериальный синтез OFDM-сигналов для повышения энергетической эффективности и помехоустойчивости // Вестник РГРТУ, № 76, 2021. С. 3-14.
4. Кириллов С.Н., Лисничук А.А., Писака П.С., Грибко К.В. Многокритериальный подход к выбору процедуры кодирования телеметрических радиосигналов сложных технических объектов // Вестник РГРТУ, № 75, 2021. С. 3-14.
5. Лисничук А.А. Минимизация воздействия сигналов с прямым расширением спектра на узкополосные радиоканалы / Кириллов С.Н., Лисничук А.А. // Радиотехника, Т.84, № 11(21), 2020. С. 48-54.
6. Лисничук А.А. Процедура многокритериального синтеза сигнально-кодových конструкций на основе битового перемежения для адаптации радиосистем передачи информации к действию пакетных радиопомех // Радиотехника, том 83, № 11(18), 2019. С. 22-27.
7. Лисничук А.А. Процедура многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра для увеличения помехозащищенности радиосистем передачи информации / Кириллов С.Н., Лисничук А.А. // Радиотехника, том 83, № 11(18), 2019. С. 15-21.
8. Лисничук А.А. Многокритериальный синтез класса цифровых структурно-защищенных радиосигналов / Кириллов С.Н., Лисничук А.А. // Цифровая обработка сигналов, № 2, 2019. С. 21-24.
9. Лисничук А.А. Процедуры многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра для адаптации когнитивных радиосистем передачи информации к полосовым помехам / Кириллов С.Н., Лисничук А.А. // Радиотехника. 2019. №5. С. 137-144.
10. Лисничук А.А. Процедура многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра для адаптации когнитивных радиосистем передачи информации к сложной помеховой обстановке // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, № 4, выпуск 66, часть 1, 2018. С. 9-15.
11. Лисничук А.А. Анализ характеристик когнитивных радиосистем передачи информации при адаптации к действию узкополосных помех на основе синтезированных четырехпозиционных радиосигналов / Кириллов С.Н., Лисничук А.А. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, № 4, выпуск 66, часть 1, 2018. С. 3-8.
12. Лисничук А.А. Сравнительный анализ воздействия узкополосных помех на когнитивные радиосистемы передачи информации на основе синтезированных четырехпозиционных радиосигналов / Кириллов С.Н., Лисничук А.А. // Радиотехника. 2018. №5. С. 30-35.
13. Лисничук А.А. Многокритериальный синтез 16-позиционных радиосигналов на основе канального алфавита в интересах адаптации радиосистем передачи информации к узкополосным помехам / Кириллов С.Н., Лисничук А.А. // Радиотехника. 2018. №5. С. 4-12.
14. Лисничук А.А. Многокритериальный синтез сигнально-кодových конструкций на основе зависимых сигналов для адаптации радиосистем передачи информации к действию узкополосных помех / Кириллов С.Н., Лисничук А.А. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 4. С. 3-12.
15. Лисничук А.А. Многокритериальный синтез четырехпозиционных радиосигналов на основе ансамбля кодových последовательностей в интересах адаптации радиосистем передачи ин-

формации к структурным помехам / Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. // Радиотехника. 2016. №8. С. 117-124.

16. Лисничук А.А. Процедура многокритериального синтеза сигнально-кодовых конструкций для адаптации систем передачи информации к действию узкополосных помех / Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 55. С. 3-9.

17. Лисничук А.А. Многокритериальный синтез четырехпозиционных радиосигналов на основе канального алфавита / Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. // Радиотехника. 2015. №11. С.14-21.

18. Лисничук А.А. Процедура синтеза 4-позиционных сигналов с расширением спектра / Кириллов С.Н., Покровский П.С., Лисничук А.А. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-1. С. 29-33.

19. Лисничук А.А. Алгоритм синтеза радиосигналов для адаптации интеллектуальных систем передачи информации к действию помех / Покровский П.С., Лисничук А.А. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 48. С. 20-26.

**Публикации в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования SCOPUS и Web of Science:**

20. Lisnichuk, A.A. DSSS Signals Multi-Criteria Synthesis for Cognitive Radio Systems Adaptation to Complex Interference // 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2020

21. Lisnichuk A.A. Procedure for multi-criteria synthesis of OFDM signals to increase the structural hiding of radio communication systems / Kirillov, S.N., Lisnichuk, A.A. // 2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering, PIERE 2020, pp. 49–53

22. Kirillov, S.N., Lisnichuk, A., Batishchev, A.V. OFDM-Signal Multi-Criteria Synthesis to Improve Energy Efficiency and Minimize Bandpass Interference // 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2021.

23. Lisnichuk A.A. Adaptive to Interference Software-Defined Transmitter and Receiver of Radio Signals Based on Multi-Criteria Synthesis of Signal Set / Kirillov, S.N., Lisnichuk, A.A. // 3rd International Science and Technology Conference "Modern Network Technologies 2020", MoNeTeC 2020 - Proceedings, 2020.

24. Kirillov, S.N., Lisnichuk, A., Batishchev, A.V., Aronov, L.V., Baukov, A.A. Adaptive Software-Configurable System Development to Receive, Transmit and Process Information // 3rd International Science and Technology Conference "Modern Network Technologies 2020", MoNeTeC 2020 - Proceedings, 2020.

25. Lisnichuk A.A. Multi-criteria synthesis of signal-code sequence based on trellis-coded modulation to adapt wireless communication systems to the action of narrow-band interference / Kirillov, S.N., Lisnichuk, A.A. // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 - Proceedings, 2020.

26. Lisnichuk A.A. The Procedure of Multi-Criteria Synthesis of DSSS Radio Signals to Adapt Prospective Wireless Communication Systems to the Action of Narrow-Band Interference / Kirillov, S.N., Lisnichuk, A.A. // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 - Proceedings, 2020.

27. Kirillov, S.N., Lisnichuk, A.A., Batishchev, A.V. Joint Minimization of Band Interference Influence and PAPR Value Reduction to Increase OFDM-System Capacity // 2020 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications, DSPA 2020, 2020.

28. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A., Pokrovsky P.S., Lukashin I.V. Methods to form both anti-interference and hiding radio signals for prospective communication systems // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Proceedings, 2019.

29. Lisnichuk A.A. Multi-criteria signal synthesis procedure for adapting cognitive radio systems to the influence of interfering factors in the Arctic / Kirillov, S.N., Lisnichuk, A.A. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 302 (2019) 012059 doi:10.1088/1755-1315/302/1/012059

30. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A., Pokrovsky P.S., Lukashin I.V. Multi-criteria synthesis of radio signals to increase prospective communication systems noise immunity // 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Proceedings, 2019.

31. Lisnichuk A.A. Analysis of narrow-band interference effect on cognitive radio systems based on synthesized four-position radio signals / Kirillov S.N., Lisnichuk A.A. // 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894 Proceedings APEIE – 2018. Volume 1, Part 3, pp. 50-54.

32. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A., Pokrovsky P.S. Multi-criterion radio signal synthesis and time discriminator development for prospective communication systems // 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Proceedings, 2018.

33. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A., Pokrovsky P.S., Lukashin I.V. Algorithms to form and process signals for multilevel defense of transmitted data based on the principles of cognitive and software-defined radio // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Proceedings, 2018.

### **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ**

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

35. Покровский П.С., Лисничук А.А. Программа технического анализа и обнаружения радиосигналов для оценки текущей помеховой обстановки. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2019611340 от 24.01.2019.

36. Лисничук А.А., Покровский П.С. Программа имитационного моделирования радиолинии, адаптивной к действию текущей помеховой обстановки. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2019662652 от 27.09.2019.

37. Лисничук А.А., Батищев А.В. Программа имитационного моделирования совместной минимизации воздействия полосовой помехи и величины пик-фактора для повышения пропускной способности OFDM-сигнала. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2020615518 от 25.05.2020.

38. Лисничук А.А., Батищев А.В. Программа реализации модифицированного алгоритма по координатного спуска для задач многокритериальной дискретной оптимизации при ограничении на количество ненулевых элементов векторного аргумента. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2021618011 от 21.05.2021.

39. Лисничук А.А., Батищев А.В. Программа имитационного моделирования многокритериального синтеза OFDM-сигнала с приоритетом по помехоустойчивости. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2021614539 от 12.04.2021.

Лисничук Александр Александрович

Методы и процедуры многокритериального синтеза  
многопозиционных радиосигналов  
для адаптивных к помехам систем передачи информации

### **Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Подписано в печать \_\_. \_\_.22. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,0.

Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

2022 г.