

На правах рукописи



Краснов Тимур Валериевич

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ К ВЗАИМНЫМ
ПОМЕХАМ В РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
СО СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫМИ ШУМОПОДОБНЫМИ
СИГНАЛАМИ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бондаренко Валерий Николаевич

Официальные оппоненты: Майстренко Василий Андреевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», кафедра «Средства связи и информационная безопасность», заведующий кафедрой, профессор

Сидоров Виктор Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева», кафедра «Системы автоматического управления», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск

Защита состоится « 16 » февраля 2016 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.21 на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 28, ауд. Б 3-19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Дмитриев Дмитрий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Как показывает практика, спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС и GPS, являющиеся в настоящее время основным средством навигационного обеспечения подвижных объектов, нуждаются в поддержке радионавигационных систем наземного базирования. При этом наземные радионавигационные системы (РНС) становятся средством навигации, дополняющим спутниковые системы, и могут использоваться как совместно с ними, так и вместо них в случае отсутствия доступа к сигналам спутниковых систем.

С целью расширения рабочей зоны РНС наземного базирования используют средневолновый и длинноволновый диапазоны, для которых характерна перегруженность сигналами сторонних радиосредств и значительные помехи техногенного происхождения. По этой причине в последние десятилетия проявляется повышенный интерес к применению в подобных системах спектрально-эффективных методов модуляции, концентрирующих излучение в минимально узких спектральных зонах и ощутимо смягчающих тем самым остроту проблемы тесноты эфира.

В радионавигационных системах большой дальности действия (порядка 600 км) динамический диапазон сигналов достигает 80 дБ. В связи с этим особенно остро стоит проблема приема сигналов на границах рабочей зоны из-за действия мощных системных помех, называемых также взаимными, сигналоподобными, структурными помехами. Вопросам теории и практики повышения помехоустойчивости к структурным помехам в системах с шумоподобными сигналами (ШПС) посвящено большое число работ отечественных и зарубежных ученых: Л. Е. Варакина, В. П. Ипатова, М. Б. Свердлика, Г. И. Тузова, С. Голомба, Р. К. Диксона, Д. Хаффмена и др.

Кардинальный подход к решению указанной проблемы связан с увеличением базы сигналов, определяющей уровень подавления структурных помех при кодовом разделении сигналов. Однако увеличение базы сигнала влечёт увеличение времени синхронизации, рост аппаратных и вычислительных затрат. Для наземных систем дальней навигации в большей мере, чем для спутниковых систем, характерна ограниченность частотного ресурса, в связи с чем практическую значимость приобретает разработка спектрально-эффективных видов модуляции и алгоритмов обработки шумоподобных сигналов. Практически достижимым в таких системах уровнем помехозащищённости к структурным помехам являются значения порядка 40 дБ, что требует дополнительных мер по подавлению структурных помех.

Наиболее успешный подход к решению указанной проблемы связан с использованием автокомпенсаторов помех. Вопросам теории и практики компенсации структурных помех в системах с шумоподобными сигналами посвящено большое число работ отечественных и зарубежных ученых: В. Б. Крейнделина, Ю. Г. Сосулина, В. А. Родзивилова, А. Г. Вострецова, А. С. Грибанова, Г. Питера, Ю. В. Невзорова, В. И. Чугаевой, Yan Bai.

Из-за высокого динамического диапазона сигналов каждый из подходов в отдельности (увеличение базы сигнала и компенсация помехи) не может полностью решить проблему повышения помехоустойчивости к взаимным помехам в наземных широкополосных системах радионавигации с кодовым разделением.

Таким образом, повышение устойчивости наземных систем радионавигации со спектрально-эффективными шумоподобными сигналами и кодовым разделением к мощным мешающим сигналам (взаимным помехам) представляет собой весьма актуальную научно-практическую задачу. Успешное решение этой задачи позволяет существенно расширить рабочую зону, повысить точность и достоверность координатно-временного обеспечения потребителей при сохранении возможности совместной работы наземных и спутниковых навигационных систем.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование методов повышения устойчивости к мощным взаимным помехам в широкополосных радионавигационных системах с кодовым разделением, использующих спектрально-эффективные шумоподобные сигналы.

Научно-технические задачи, решаемые в диссертационной работе:

- 1) выбор и обоснование вида модуляции спектрально-эффективных шумоподобных сигналов радионавигационных систем;
- 2) выбор и обоснование структуры и параметров дальномерных кодов для сигналов широкополосных РНС;
- 3) разработка методов компенсации мощных взаимных помех;
- 4) определение требований к точности оценки параметров мощных взаимных помех;
- 5) оценка эффективности предложенных методов компенсации взаимных помех;
- 6) исследование помехоустойчивости корреляционного приемника шумоподобного сигнала с автокомпенсатором помехи;
- 7) оценка влияния аппаратурных погрешностей на эффективность компенсации взаимных помех.

Методы исследования. В диссертационной работе используются методы теории сигналов, теории оптимального оценивания параметров сигналов и оптимальной фильтрации, теории автоматического управления, методы математического анализа, статистического моделирования, методы цифровой обработки сигналов.

Научная новизна. Новыми являются следующие результаты работы:

1. Предложенный критерий спектральной эффективности в отличие от известных критериев позволяет осуществить оптимальный выбор вида модуляции, обеспечивающего минимальную дисперсию ошибки измерения задержки ШПС при заданной полосе частот.

2. Предложенный способ компенсации взаимных помех, основанный на фильтрации помехи с оценкой информационного символа в режиме реального времени, в отличие от известных способов не требует дополнительной задержки ШПС.

3. Разработанные алгоритмы оценки параметров мощной взаимной помехи в системах со спектрально-эффективными сигналами, основанные на квазиоптимальных алгоритмах фильтрации задержки и фазы помехи, обеспечивают близкую к потенциальной помехоустойчивость по отношению к шуму.

4. Разработанный автокомпенсатор мощной взаимной помехи для средневолновой РНС со спектрально-эффективными ШПС позволяет увеличить допустимый уровень помехи с 40 до 80 дБ.

5. Показано, что среди аппаратурных погрешностей наибольшее влияние на эффективность компенсации мощной взаимной помехи оказывают амплитудно-фазовые искажения при полосовой фильтрации сигналов и нелинейность тракта аналого-цифрового преобразования.

6. Разработанный способ поиска по задержке шумоподобных сигналов существенно сокращает аппаратурные затраты по сравнению с известным способом параллельного поиска при сохранении минимального времени поиска.

Новизна полученных результатов подтверждается 6 патентами РФ на изобретения.

Защищаемые научные положения:

1. Обобщённый показатель спектральной эффективности, равный отношению эффективной ширины спектра к полосе частот сигнала, позволяет оптимизировать вид модуляции по критерию минимума СКО ошибки измерения задержки сигнала.

2. Двухкомпонентный формат спектрально-эффективных *MSK*-сигналов с пилотной и информационной компонентами позволяет значительно ослабить негативное влияние модуляции сигнала данными, обеспечивая улучшение системных характеристик: сокращение времени поиска, повышение точности и устойчивости слежения за кодовой задержкой и фазой.

3. Требуемый для широкополосных РНС с кодовым разделением допустимый уровень взаимной помехи 80 дБ может быть обеспечен с использованием ансамбля дальномерных кодов длины 16383 и дополнительной компенсации мощной взаимной помехи.

4. Автокомпенсатор мощной взаимной помехи на основе двух петлевого следающего фильтра с кольцами слежения за задержкой и фазой помехи обеспечивает подавление помехи не менее 40 дБ при отношении помеха/сигнал от 40 до 80 дБ.

5. Алгоритм параллельного поиска шумоподобного *MSK*-сигнала с использованием аппроксимации опорных видеочастотных квадратурных сигналов знаковыми функциями проигрывает в помехоустойчивости оптимальному алгоритму менее 1 дБ, обеспечивая существенные преимущества в реализации.

Значение для теории. Научные результаты диссертационной работы создают теоретическую основу для разработки методов повышения устойчивости наземных систем радионавигации со спектрально-эффективными шумоподобными сигналами и кодовым разделением к мощным мешающим сигналам (взаимным помехам).

Практическая значимость результатов диссертационной работы. Результаты диссертации использованы при проектировании и разработке в интересах Министерства обороны РФ новой широкополосной наземной радионавигационной системы «Спрут», превосходящей существующие системы по точности, помехозащищённости и дальности действия.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью используемого математического аппарата, совпадением теоретических выводов, статистических результатов компьютерного моделирования и экспериментально полученных данных, а также сопоставлением с результатами работ других авторов.

Использование результатов диссертации. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научных проектов: «Адаптивный компенсатор структурных помех для приемников широкополосных радионавигационных систем» (2014 г., СФУ КФ-406 НИЧ СФУ, Грант Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности), «Исследование методов подавления структурных помех в широкополосных радионавигационных системах» (2014 г., № 20595 НИЧ СФУ), «Разработка и исследование способа синхронизации станций наземных радионавигационных систем с использованием спутниковых систем навигации» (2013 г., СФУ КФ-384, Грант Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности), «Разработка способа частотной синхронизации станций наземных радионавигационных систем с использованием навигационной аппаратуры потребителя глобальных навигационных спутниковых сигналов» (2013 г., № 20553 НИЧ СФУ).

Предложенные в диссертации технические решения также позволяют расширить рабочую зону навигационной системы «Спрут», повысить точность координатно-временного обеспечения потребителей (получен акт внедрения).

Апробация работы. Основные результаты работы представлены на конференциях «Digital Signal Processing and its Applications – 2012» (РНТОРЭС им. А. С. Попова), «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2010, 2011, 2013, 2014 и 2015 гг.), «SibCon» (Красноярск, 2011, 2013 гг., Омск, 2015 г.), «Междисциплинарные исследования в науке и образовании» (Киев, 2012), «67-я Научно-техническая конференция, посвященная Дню радио» (Санкт-Петербург, 2012), «Системы связи и радионавигации» (Красноярск, 2014, 2015 гг.).

Публикации и личный вклад автора. По материалам диссертации опубликовано 35 работ, в том числе: 13 – статьи в изданиях по списку ВАК; 6 – патенты на изобретения РФ; 16 – в сборниках докладов международных и всероссийских конференций. Все представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором или при его непосредственном участии.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка сокращений, списка литературы и приложений. Работа изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков, 10 таблиц. Список литературы включает 101 наименование.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и задачи исследования, определены основные научные результаты, их новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе проведён сравнительный анализ шумоподобных сигналов спектрально-эффективных форматов модуляции $MSK-BOC(n)$:

$$s(t) = \sqrt{2P_c} [I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t)], \quad (1)$$

$$I(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_0(t - kT), \quad Q(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s_k H_0(t - kT - T/2), \quad H_0(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{n\pi t}{T} + n\pi/2\right), & |t| \leq T/2; \\ 0, & |t| > T/2, \end{cases} \quad (2)$$

отличающихся от ШПС с традиционной модуляцией MSK видом элементов $H_0(t)$, представляющих собой n знакопеременных импульсов (чипов) в форме полуволны синуса длительностью T/n (кривая 1 на рисунке 1 соответствует $n=2$). Временной сдвиг элементов квадратурного Q -сигнала относительно I -сигнала составляет $T/2n$. При $n=1$ выражение (2) определяет форму чипов при традиционной MSK (кривая 2 на рисунке 1):

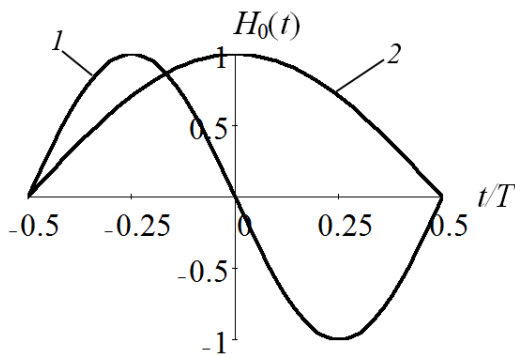


Рисунок 1 – Вид элементов сигналов I и Q при модуляции MSK и $MSK-BOC(2)$

$$H_0(t) = \begin{cases} \cos(\pi t/T), & |t| \leq T/2; \\ 0, & |t| > T/2. \end{cases} \quad (3)$$

Проведённый сравнительный анализ свидетельствует о преимуществах сигналов $MSK-BOC$ перед сигналами традиционного формата MSK в точности измерения задержки: СКО потенциальной ошибки уменьшается в n раз. Рассмотрены вопросы влияния ограничения спектра шумоподобных сигналов на точность измерения задержки даль-

номерного кода. В таблице 1 приведены характеристики сигналов при ограничении спектра согласованной полосой $W = 400$ кГц, соответствующей определению ширины спектра по нулям главных лепестков. Значения тактовой частоты $f_T = 200, 100, 80$ и 67 кГц для сигналов $BPSK, BOC(2), BOC(3)$ и $BOC(4)$ соответственно. Для сигналов $MSK, MSK-BOC(2), MSK-BOC(3)$ и $MSK-BOC(4)$ тактовая частота $f_T = 200, 100, 80$ и 67 кГц соответственно.

Таблица 1 – Выигрыш по СКО ошибки σ_τ при одинаковом ограничении спектра

Вид модуляции	Полоса частот сигнала W , кГц*	Коэффициент использования мощности γ	Эффективная ширина спектра F_3 , кГц	Выигрыш в СКО ошибки σ_τ **	Эквивалентный энергетический выигрыш, дБ
1	2	3	4	5	6
<i>BPSK</i>	400	0.903	67.0	1.00	0.00
<i>BOC(2)</i>	400	0.856	84.3	1.26	2.00
<i>BOC(3)</i>	400	0.841	107.5	1.60	4.11
<i>BOC(4)</i>	400	0.831	123.3	1.84	5.30
<i>MSK</i>	400	0.995	87.0	1.30	2.27
<i>MSK-BOC(2)</i>	400	0.989	94.3	1.41	2.97
<i>MSK-BOC(3)</i>	400	0.989	114.2	1.70	4.63
<i>MSK-BOC(4)</i>	400	0.982	128.4	1.92	5.65

* – полоса, согласованная с шириной спектра по нулям главных лепестков

** – по сравнению с сигналом *BPSK*

Показатель спектральной эффективности F_3/W (F_3 – эффективная ширина спектра, W – заданная полоса), характеризую реальную точность измерения задержки с учётом ограничения спектра сигнала, позволяет оптимизировать вид модуляции ШПС по критерию минимума СКО ошибки измерения задержки сигнала. Результаты проведённого анализа свидетельствуют о том, что рассмотренные сигналы с *BOC*-модуляцией обеспечивают значительные преимущества в точности измерения задержки по сравнению с ШПС с традиционными способами модуляции *BPSK* и *MSK* при заданной полосе частот и фиксированном отношении сигнал/шум. С учётом технических ограничений, связанных с реализацией аппаратуры формирования, приёма и обработки сигналов, можно считать, что применение сигналов *MSK-BOC(2)* в широкополосных РНС большой дальности наиболее целесообразно.

Рассмотрены составные шумоподобные *MSK*-сигналы с пилотной и информационной компонентами. Составной сигнал описывается формулой (1), в которой I - и Q -компоненты представляют пилот-сигнал и информационный сигнал соответственно (Q -компонента промодулирована данными). Пилот-сигнал представляет собой ШПС с модуляцией *MSK-BOC(n)*. Информационная компонента – ШПС с модуляцией *MSK(n)*, отличающийся от сигнала *MSK-BOC(n)* знакопостоянными синусными чипами. Сдвиг чипов квадратурных сигналов $I(t)$ и $Q(t)$ составляет $T/2n$. Графики нормированных по мощности спектров $G(f)$ сигналов *MSK(2)* и *MSK-BOC(2)* с тактовой частотой квадратурных ПСП $f_T = 100$ кГц представлены на рисунке 2 (кривые 1 и 2 соответственно). Там же приведён спектр полного сигнала (кривая 3). Реальной (99-процентной) шириной спектра сигналов

$MSK-BOC(2)$ и $MSK(2)$ можно считать полосу $W_1 \approx 4f_T$ и $W_2 \approx 4.8f_T$, что составляет 0.4 и 0.48 МГц соответственно. При ограничении спектра сигнала $MSK(2)$ полосой $W_2 \approx 4f_T$ (0.4 МГц) внутриполосная мощность составляет 95%.

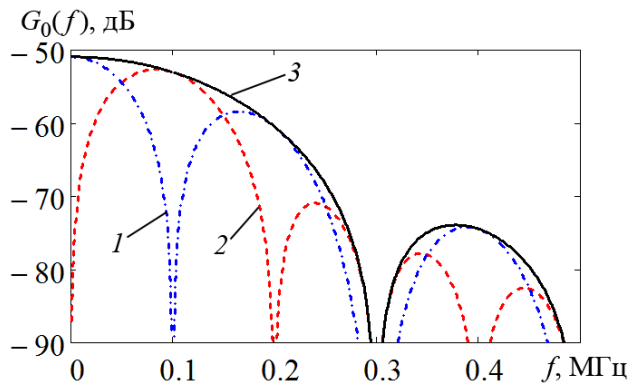


Рисунок 2 – Энергетический спектр двухкомпонентного сигнала

Как видно из рисунка 2, спектр сигнала $MSK-BOC(2)$ имеет характерные провалы в области локализации основного и боковых лепестков спектра сигнала $MSK(2)$. Это позволяет уменьшить уровень взаимных помех за счёт частичного спектрального разделения пилотного и информационного сигналов.

Двухкомпонентный формат спектрально-эффективных сигналов с пилотной компонентой $MSK-BOC(2)$ и информационной компонентой $MSK(2)$ позволяет

значительно ослабить негативное влияние модуляции сигнала данными, обеспечивая улучшение системных характеристик: сокращения времени поиска, повышения точности и устойчивости слежения за кодовой задержкой и фазой.

В широкополосных системах с кодовым разделением сигналов, занимающих общую полосу частот, в результате неидеальной ортогональности сигналов образуются взаимные помехи, называемые также помехами *множественного доступа* или *структурными (сигналоподобными)*. Для надёжного выделения сигналов на фоне совокупных взаимных помех необходимо, чтобы модуль нормированной двумерной взаимной корреляционной функции (ДВКФ) имел малый уровень при любых взаимных сдвигах по запаздыванию и частоте. Уровень взаимных помех, характеризуемый максимальным R_{\max} и эффективным R_e значениями ДВКФ ансамбля сигналов, определяется, прежде всего, длиной N псевдослучайных модулирующих последовательностей, используемых при формировании ШПС. Структура кода при $N \gg 1$ и вид модуляции ШПС (форма чипа) слабо влияют на указанные показатели уровня взаимных помех.

В широкополосных РНС средневолнового диапазона максимальное абсолютное значение доплеровского частотного сдвига составляет $F_{\max} = 0.2$ Гц, поэтому уровень взаимных помех достаточно характеризовать максимальным R_{\max} и эффективным R_e значениями ПВКФ ансамбля кодовых последовательностей. В таблице 2 приведены результаты расчёта уровня взаимных помех, характеризуемого значениями максимального бокового лепестка R_{\max} и эффективного значения модуля нормированной ПВКФ для кодов длины $N = 16383$: 1) циклические сдвиги общей M -последовательности (вариант сдвига на $m = 4096$ элементов); 2) общая

M -последовательность с частотными сдвигами, кратными элементу разрешения по частоте (вариант сдвига на 400 элементов разрешения по частоте $\Delta F = 1/T_n$); 3) разные M -последовательности; 4) последовательности *Касами*.

Таблица 2 – Уровень ПВКФ ансамблей кодовых последовательностей

Ансамбль кодовых последовательностей	ПВКФ R_0 (без модуляции)		ПВКФ (с модуляцией)	
	R_{\max} , дБ	R_3 , дБ	R_{\max} , дБ	R_3 , дБ
1	2	3	4	5
<i>а</i>) в «широком» интервале временных сдвигов				
Циклические сдвиги M -последовательности	-84.288	-84.288	-34.377	-43.933
M -последовательность с частотными сдвигами	-42.141	-42.144	-34.668	-42.117
M -последовательности	-28.178	-42.144	-32.489	-42.908
Последовательности <i>Касами</i>	-42.076	-42.179	-31.720	-42.233
<i>б</i>) в «узком» интервале временных сдвигов				
Циклические сдвиги M -последовательности	-84.288	-84.288	-40.260	-52.524
M -последовательность с частотными сдвигами	-42.141	-42.146	-37.548	-42.271
M -последовательности	-28.178	-42.120	-28.043	-42.119
Последовательности <i>Касами</i>	-42.076	-42.179	-35.693	-42.150

«Широкий» интервал соответствует временным сдвигам последовательностей в диапазоне $m = (0 \dots N)$ элементов, а «узкий» интервал – в диапазоне $(-820 \dots 820)$ элементов (максимальная дальность). Первый случай соответствует поиску сигнала в режиме автономной синхронизации. «Узкому» интервалу задержек отвечает задача поиска сигнала в режиме внешней синхронизации, когда априорная неопределённость по времени обусловлена лишь отсутствием информации о координатах станции. Данная модель задержек адекватна также условиям приема сигналов при наличии мощного сигнала. В этом случае вначале производится поиск сигнала мощной ОС (в «широком» интервале), после чего – поиск сигналов трёх других опорных станций (в «узком» интервале). Эти данные также характеризуют уровень взаимных помех в режимах слежения за кодовой задержкой и фазой сигналов.

Наиболее перспективными для формирования шумоподобных спектрально-эффективных сигналов широкополосных РНС с кодовым разделением являются ансамбли из циклических сдвигов общей M -последовательности длины $N=16383$, оптимальные среди бинарных кодов по критерию минимума мощности взаимных помех.

Проведённый анализ свидетельствует о том, что требуемый для средневолновых широкополосных РНС большой дальности действия допустимый уровень вза-

имных помех 80 дБ может быть обеспечен с использованием в качестве дальномерных кодов ансамблей из циклических сдвигов общей M -последовательности длины 16383 и дополнительной компенсации мощных взаимных помех.

В главе 2 представлены результаты разработки способов нейтрализации мощной взаимной (структурной) помехи в широкополосных РНС. Проведён обзор работ, посвящённых подавлению структурных помех в широкополосных системах. Синтез оптимального алгоритма измерения задержки шумоподобного MSK -сигнала при воздействии структурной и флуктуационной помех позволил получить структуру квазиоптимального автоматического компенсатора (АКП) структурной помехи (СП) (рисунок 3). На вход блока оценки параметров помехи (БОПП) поступает смесь $y(t)$ полезного сигнала, СП и флуктуационной помехи.

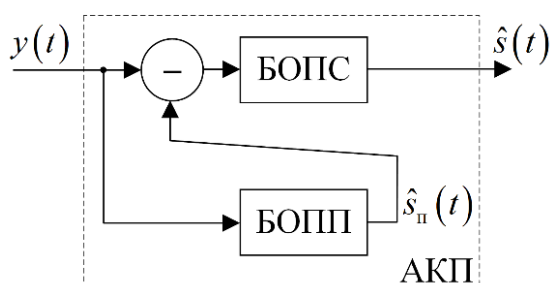


Рисунок 3 – Структура квазиоптимального автокомпенсатора помехи

В случае мощной СП мешающее влияние сигнала на точность оценивания параметров СП и формирования её копии пренебрежимо мало. На вход блока оценки параметров сигнала (БОПС) поступает смесь сигнала и флуктуационной помехи: СП исключается путём вычитания из принятой реализации её копии, сформированной БОПП.

Рассмотрены различные варианты реализации автокомпенсатора: двухканальный АКП с копиями СП, соответствующими противоположным информационным битам; АКП с задержкой в приемном тракте; АКП с бланкированием в тракте полезного сигнала. Дано обоснование перспективности алгоритма компенсации с бланкированием первого элемента СП, позволяющего значительно ослабить негативное влияние модуляции данными на эффективность подавления помехи (рисунок 4).

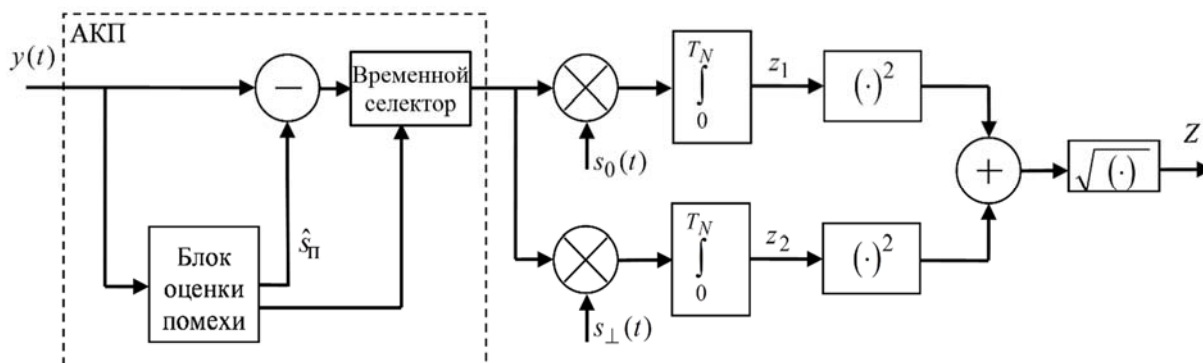


Рисунок 4 – Структура корреляционного приёмника с АКП с бланкированием

Правая часть схемы (тракт полезного сигнала) описывает корреляционный приёмник с квадратурными каналами, который формирует синфазную z_1 и квадратурную z_2 составляющие, а также модуль Z ВКФ принятой реализации и опорных MSK -сигналов.

Принятая реализация $y(t)$ поступает на вход АКП, содержащего блок оценки параметров помехи на основе двухпетлевого следящего фильтра, формирователь копии помехи, вычитатель, временной селектор и коммутатор (рисунок 5).

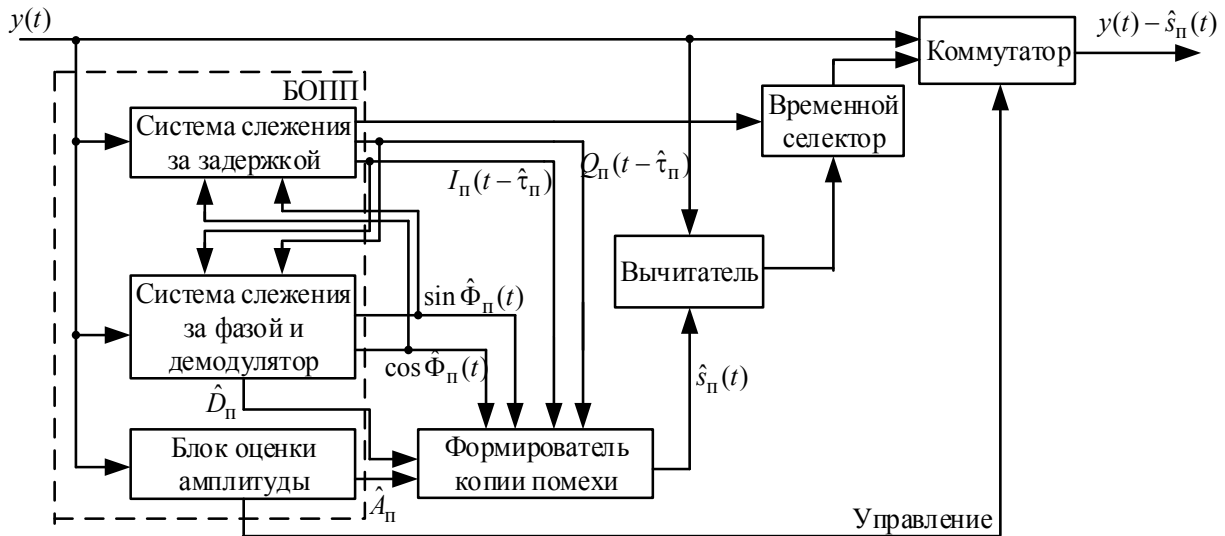


Рисунок 5 – Структура АКП с бланкированием в канале сигнала

При обнаружении мощного мешающего сигнала (превосходящего полезный сигнал более чем на 35 дБ) АКП автоматически включается в тракт полезного сигнала. Точность формирования копии СП определяется точностью оценок её параметров: кодовой задержки, фазы несущего колебания, доплеровского сдвига частоты, амплитуды, информационного символа. Требуемая точность оценок параметров и формирования копии СП достигается применением в блоке оценок двухпетлевого следящего фильтра, включающего систему слежения за задержкой и систему слежения за фазой.

Режиму следящего приёма СП предшествует поиск сигналов по задержке и обнаружение мощного мешающего сигнала. На рисунке 6 приведена блок-схема алгоритма поиска и обнаружения мощной структурной помехи. На первом этапе производится поиск сигнала мощной ОС в «широком» интервале задержек ($0 \dots T_p$). Для этого вычисляются значения модуля ВКФ на одном периоде ШПС в каждом из 4-х каналов приёма сигналов $Pr1 - Pr4$ (по числу опорных станций). Затем определяется максимальный выброс ВКФ Z_{mj} в каждом из 4-х каналов приёма сигналов $Pr1 - Pr4$. Среди значений Z_{mj} ($j=1,2,3,4$) определяется максимальный выброс ВКФ Z_m и 2-й по величине максимум ВКФ Z'_m . Превышение мешающего сигнала от близкой ОС над сигналами других ОС на 34 дБ и более соответствует наличию

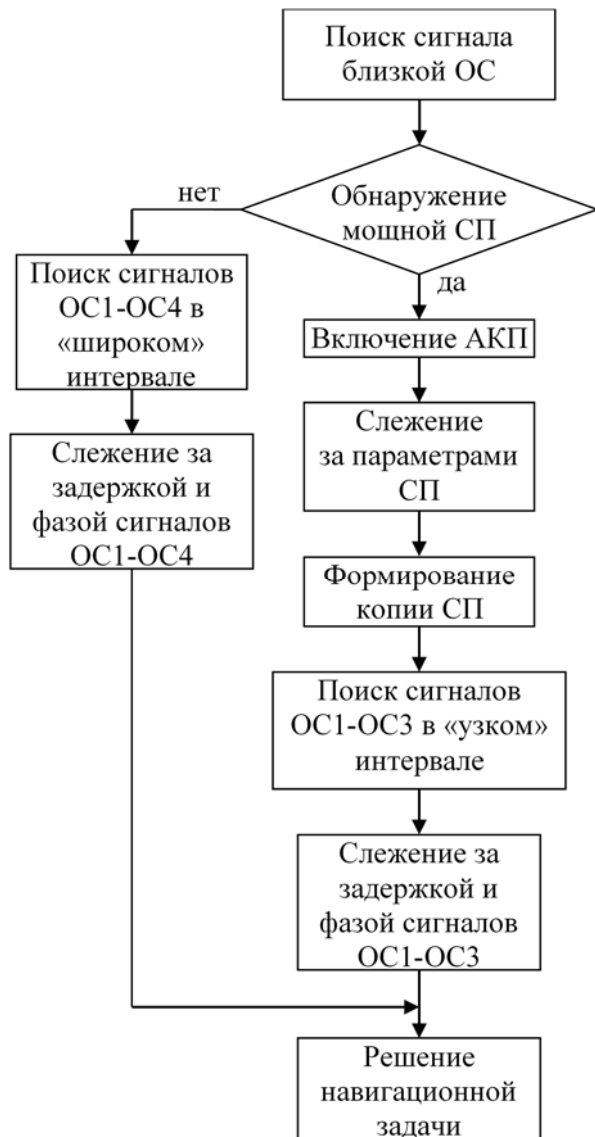


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма поиска и обнаружения мощной структурной помехи

мощной СП. В этом случае включается автокомпенсатор в тракт приёма каждого из 3-х оставшихся сигналов.

Номер t канала с максимальным значением выходной величины (модуля корреляции) соответствует оценке $\hat{\tau}_n$ времени запаздывания СП на этапе поиска. После этого производится поиск сигналов трёх других опорных станций в «узком» интервале задержек (-2 мс... 2 мс), а затем слежение за кодовой задержкой и фазой указанных сигналов. В случае отсутствия мощного сигнала производится поиск сигналов всех четырёх опорных станций в «широком» интервале задержек с накоплением по L периодам ШПС, а затем слежение за кодовой задержкой и фазой сигналов.

Предложен алгоритм параллельного поиска шумоподобного *MSK*-сигнала с использованием аппроксимации опорных видеочастотных квадратурных сигналов знаковыми функциями, позволяющий существенно сократить аппаратные и временные затраты на реализацию по сравнению с оптимальным алгоритмом.

Структура квазиоптимального алгоритма поиска поясняется схемой на рисунке 7. Квадратурный преобразователь (КП) формирует наблюдения x_i и y_i путём перемножения отсчётов v_i принятой реализации с отсчётами квадратурных опорных сигналов несущей частоты f_0 . В устройстве поэлементной обработки (УЭО) реализуется алгоритм равновесовой корреляционной обработки наблюдений x_i и y_i на интервалах, равных длительности элемента ПСП. Результаты X_{jk} и Y_{jk} поэлементной обработки запоминаются в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ), а затем используются для вычисления квадратурных составляющих и модуля ВКФ принятой реализации и опорных *MSK*-сигналов в каждом из N каналов блока поиска. Опорные кодовые последовательности $\{c_{jk}\}$ и $\{s_{jk}\}$ вырабатываются формирователем кодовых последовательностей (ФКП).

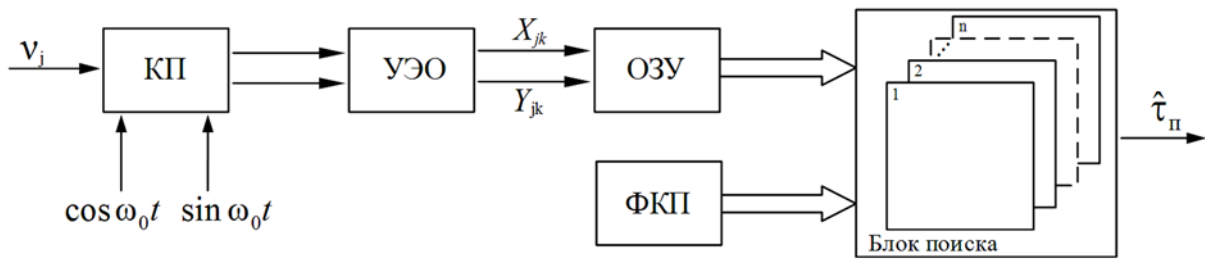


Рисунок 7 – Структура квазиоптимального алгоритма поиска

Решающее устройство блока поиска определяет номер канала с максимальным значением выходной величины (модуля корреляции), формируя оценку $\hat{\tau}_\pi$ времени запаздывания СП.

В **третьей главе** исследуется эффективность подавления структурной помехи приёмником шумоподобного *MSK*-сигнала с автокомпенсатором. Анализ помехоустойчивости алгоритмов оценивания параметров СП, проведённый с использованием моделирования в среде программирования *Matlab Simulink*, показал, что при отношении СП/шум на входе АКП равном минус 5 дБ (пороговое значение для включения АКП) СКО оценок составляют: 0.002 по амплитуде (относительной), 1.3 нс по задержке, 0.0012 рад по фазе. Вероятность ошибки оценки текущего информационного символа менее 10^{-4} при оценивании по первым 25 элементам ПСП.

С использованием программного пакета *National Instrument®* проведено компьютерное моделирование АКП при длине ПСП $N = 16383$. На рисунке 8а представлены временные диаграммы коэффициента подавления помехи в децибелах при отношениях СП/шум на входе АКП 40, 20 и 0 дБ (кривые 1, 2 и 3). Мощность остатка подавленной помехи определялась на интервалах одного периода ПСП.

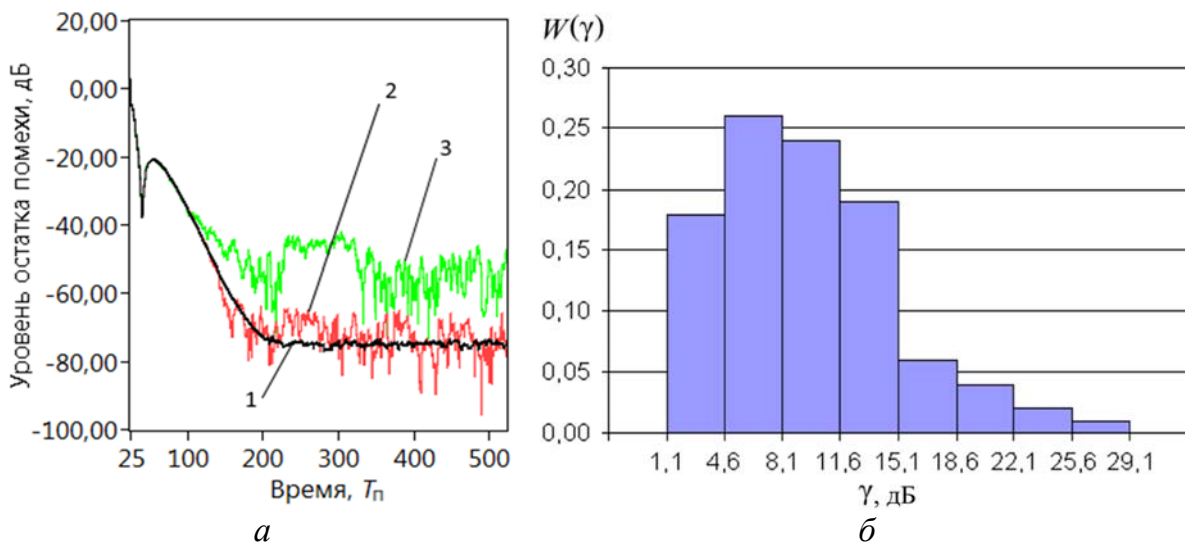


Рисунок 8 – Подавление структурной помехи в АКП

Для указанных условий автокомпенсатор структурной помехи на основе двухпетлевого следящего фильтра с кольцами слежения за задержкой и фазой помехи обеспечивает подавление помехи не менее 40 дБ.

На рисунке 8б представлена гистограмма распределения $W(\gamma)$ параметра γ , равного отношению сигнал/СП на выходе корреляционного приёмника с АКП при отношении СП/сигнал 80 дБ и СП/шум 40 дБ на входе АКП и длине ПСП $N = 16383$. Как видно из рисунка, в 100% испытаний обеспечивается превышение полезного сигнала над СП на уровне более 1 дБ, а в 82% отношение сигнал/СП более 4.6 дБ. Предложенный автокомпенсатор структурной помехи позволяет повысить запас помехоустойчивости приемника *MSK*-сигнала с 40 дБ (без АКП) до 80 дБ и более, что соответствует динамическому диапазону сигналов РНС «Спрут».

Показано, что алгоритм параллельного поиска шумоподобного *MSK*-сигнала с использованием прямоугольной аппроксимации элементов опорных видеочастотных квадратурных сигналов проигрывает в помехоустойчивости оптимальному алгоритму менее 1 дБ, обеспечивая существенные преимущества в реализации по сравнению с оптимальным алгоритмом.

Исследована эффективность подавления структурной помехи в АКП с бланкированием. Система слежения за задержкой вырабатывает импульс бланкирования для управления временным селектором, запрещая прохождение сигнала с выхода вычитателя на выход АКП. Импульс бланкирования формируется на интервале первого элемента каждого периода повторения кода. Использование бланкирования позволяет нейтрализовать действие импульсной помехи, образующейся на выходе вычитателя вследствие несовпадения информационных символов принимаемой СП и её копии.

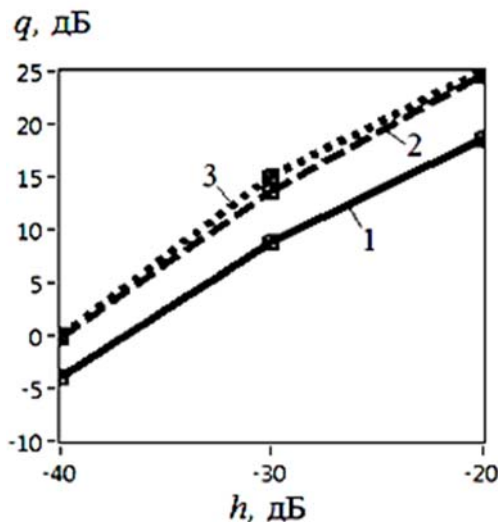


Рисунок 9 – Зависимости отношения сигнал/(СП+шум) на выходе приемника от отношения сигнал/шум на входе АКП

На рисунке 9 представлены графики зависимости отношения сигнал/(помеха+шум) от отношения сигнал/шум на входе АКП, полученные по результатам моделирования. Кривые 1 соответствуют АКП без бланкирования, кривые 2 – АКП с бланкированием, а кривые 3 – отсутствию СП. Приведенные зависимости получены при следующих условиях: отношение СП/сигнал на входе АКП 80 дБ, временной сдвиг СП соответствует максимальному значению ВКФ помехи и сигнала, длина ПСП $N = 16383$. Анализ представленных результатов свидетельствует о том, что применение рассмотренного способа блан-

кирования в автокомпенсаторе помехи позволяет дополнительно подавить мощную структурную помеху на 4 дБ, обеспечивая тем самым требуемый запас помехоустойчивости не менее 80 дБ (предельно допустимое значение отношения СП/сигнал). Это соответствует условиям приема слабого сигнала наиболее удаленной опорной станции (дальность 600 км) на фоне мощного мешающего сигнала близко расположенной станции (дальность 2 км) при одинаковой мощности передатчиков обеих станций.

В четвертой главе проведен анализ влияния аппаратных погрешностей АКП на эффективность компенсации мощной взаимной помехи. Наибольшее негативное влияние оказывают амплитудно-фазовые искажения при полосовой фильтрации сигналов. Для нейтрализации указанных искажений предложено ввести дополнительный полосно-пропускающий фильтр (ППФ) с АЧХ и ФЧХ, идентичными характеристикам фильтра приёмного тракта (рисунок 10). Задержку τ_ϕ , вносимую дополнительным ППФ, необходимо компенсировать включив в приёмный тракт элемент задержки на длительность импульсной характеристики фильтра.

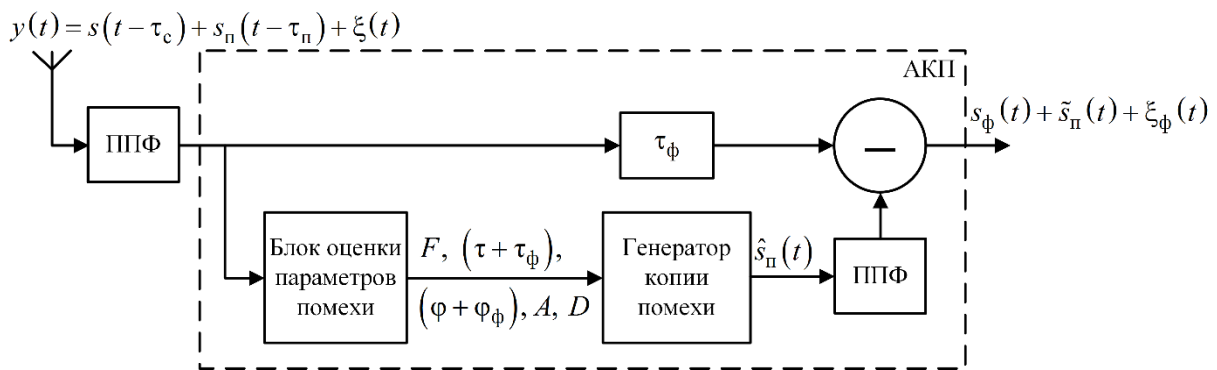


Рисунок 10 – Схема модели АКП с вторым ППФ

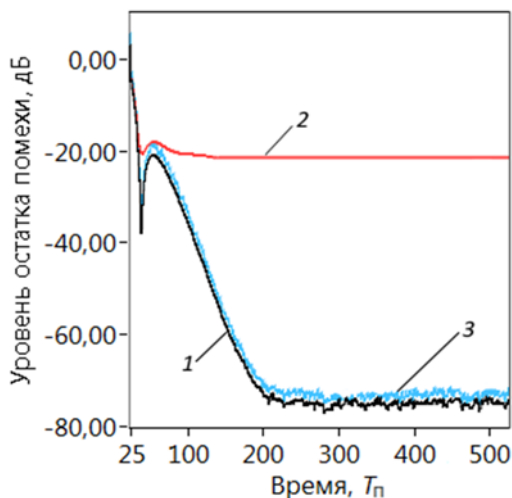


Рисунок 11 – Уровень остатка СП при наличии ППФ

Как видно из рисунка 11, введение в канал формирования копии структурной помехи полосового фильтра, идентичного полосовому фильтру приёмника, позволяет практически нейтрализовать амплитудно-фазовые искажения СП и повысить эффективность компенсации структурной помехи с 20 до 70 дБ.

Проведённый анализ свидетельствует, что нелинейность тракта аналого-цифрового преобразования в меньшей мере, чем амплитудно-фазовые искажения СП, влияет на эффективность подавления

структурной помехи. При этом основное негативное влияние оказывает ограничение динамического диапазона аналого-цифрового преобразователя. Повышение разрядности АЦП с 14 до 18 практически не оказывает влияния на уровень подавления структурной помехи.

Основные результаты работы

1. С учётом технических ограничений, связанных с реализацией аппаратуры формирования, приёма и обработки сигналов следует признать целесообразным применение в широкополосных РНС большой дальности сигналов *MSK-BOC(2)*.

2. Двухкомпонентный формат спектрально-эффективных сигналов с пилотной компонентой *MSK-BOC(2)* и информационной компонентой *MSK(2)* позволяет значительно ослабить негативное влияние модуляции сигнала данными: сократить время поиска, повысить точность и устойчивость слежения за кодовой задержкой и фазой.

3. Требуемый допустимый уровень взаимных помех 80 дБ может быть обеспечен с использованием в качестве дальномерных кодов ансамблей из циклических сдвигов общей *M*-последовательности длины 16383 и дополнительной компенсации мощных взаимных помех.

4. Автокомпенсатор мощной взаимной помехи на основе двухпетлевого слеящего фильтра с кольцами слежения за задержкой и фазой помехи, обеспечивает подавление помехи не менее 40 дБ для реальных условий приёма сигналов опорных станций.

5. Предложенный автокомпенсатор структурной помехи позволяет повысить запас помехоустойчивости приемника *MSK*-сигнала с 40 дБ (без компенсатора) до 80 дБ, что соответствует динамическому диапазону сигналов РНС «Спрут».

6. Предложенный квазиоптимальный алгоритм параллельного поиска шумоподобного *MSK*-сигнала проигрывает в помехоустойчивости оптимальному алгоритму менее 1 дБ, обеспечивая существенные преимущества в реализации.

7. Среди аппаратурных погрешностей АКП наибольшее влияние на эффективность компенсации мощной взаимной помехи оказывают амплитудно-фазовые искажения при полосовой фильтрации сигналов. Введение в канал формирования копии структурной помехи полосового фильтра, идентичного полосовому фильтру приёмника, позволяет практически нейтрализовать амплитудно-фазовые искажения СП и повысить эффективность компенсации структурной помехи с 20 до 70 дБ. Нелинейность тракта аналого-цифрового преобразования в меньшей мере влияет на эффективность подавления структурной помехи.

Основные публикации по теме работы

1. Noise immunity of a quasi-optimal correlation receiver of noiselike signals with minimum frequency-shift keying / V. Bondarenko, T. Krasnov, E. Bogatyrev, V. Garifullin // *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 58 (12), 2013 – pp. 1194–1199.

2. Бондаренко, В. Н. Помехоустойчивость корреляционного приемника шумоподобного сигнала с автокомпенсатором структурной помехи / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – 2012. – Вып.1. – С. 58–65.

3. Поиск шумоподобного сигнала при наличии помехи-отражения / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – 2013. – №1. – С. 64–70.

4. Помехоустойчивость алгоритма поиска шумоподобного сигнала с минимальной частотной модуляцией при воздействии гармонической помехи / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – 2014. – Т. 4. – С. 3–6.

5. Эффективность подавления структурной помехи корреляционным приемником шумоподобного сигнала с автокомпенсатором / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – 2013. – №5 – С. 18–22.

6. Квазикогерентный алгоритм накопления при поиске составного шумоподобного сигнала / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // *Наукоёмкие технологии*. – 2014. – Т.15, №9. – С. 11–16.

7. Временной дискриминатор шумоподобного сигнала с минимальной частотной модуляцией формата MSK-BOC/ В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // *Радиотехника*. – 2013. – №6. – С. 89–92.

8. Квазиоптимальный алгоритм поиска шумоподобного сигнала с минимальной частотной манипуляцией / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2012. – №9. – С. 85–90.

9. Поиск по времени запаздывания шумоподобных сигналов с модифицированной минимальной частотной модуляцией/ В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2014. – №5. – С. 20–23.

10. Помехоустойчивость алгоритма поиска двухкомпонентного шумоподобного сигнала / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2014. – №12. – С. 28–32.

11. Галеев, Р. Г. Эффективность подавления структурных помех в широкополосной радионавигационной системе / Р. Г. Галеев, Т. В. Краснов // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2011. – Т. 4. – №1. – С. 58–67.

12. Помехи множественного доступа в широкополосных системах радионавигации со спектрально-эффективными шумоподобными сигналами / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2015. – Т. 3. – №8. – С. 313–318.

13. Статья на спецтему / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, В. Ф. Гарифуллин, А. В. Куликов // Сборник материалов 41 ВНК ВА ВКО. Секция 4. – Тверь, ВА ПВО, 2011. – С. 53–57.

14. Пат. 2431919 Российская Федерация, МПК⁷ Н 04 В 1/10. Корреляционный приемник шумоподобных сигналов / В. Н. Бондаренко, В. И. Кокорин, А. Г. Клевлин, Т. В. Краснов; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – №2010138226/09; заявл. 15.09.2010; опубл. 20.10.2011, Бюл. №29. – 13 с.: ил.

15. Пат. 020746 Российская Федерация, МПК⁷ Н 04 L 27/14. Способ поиска шумоподобных сигналов с минимальной частотной манипуляцией / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, В. Ф. Гарифуллин; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – №201200722; заявл. 08.06.2012; опубл. 30.01.2015, Бюл. №1. – 6 с.: ил.

16. Пат. 2450445 Российская Федерация, МПК⁷ Н 04 В 1/10. Устройство компенсации структурных помех / В. И. Кокорин, В. Н. Бондаренко, А. Г. Клевлин, Т. В. Краснов; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – №2010118571/08; заявл. 07.05.2010; опубл. 10.05.2012, Бюл. №13. – 12 с.: ил.

17. Пат. 2486683 Российская Федерация, МПК⁷ Н 04 L 7/10. Способ поиска шумоподобных сигналов с минимальной частотной манипуляцией / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, В. Ф. Гарифуллин; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – №2012113757/08; заявл. 06.04.2012; опубл. 27.06.2013, Бюл. №18. – 12 с.: ил.

18. Пат. 2534221 Российская Федерация, МПК⁷ Н 04 В 1/10. Устройство компенсации структурных помех / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, В. Ф. Гарифуллин; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – №2013113817/07; заявл. 27.03.2013; опубл. 27.11.2014, Бюл. №33. – 12 с.: ил.

19. Пат. 2548010 Российская Федерация, МПК⁷ Н 04 L 27/10. Корреляционный приемник шумоподобных сигналов с минимальной частотной модуляцией /

В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, В. Ф. Гарифуллин; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – №2014100412/07; заявл. 09.01.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. №10. – 11 с.: ил.

20. Bondarenko, V. N. Adjacent-Channel Interference Compensation Efficiency for Correlation Technique / V. N. Bondarenko, T. V. Krasnov // 2011 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2011 — Proceedings, DOI: 10.1109/SIBCON.2011.6072630, pp. 194–197

21. Bondarenko, V. Navigation system with the separated data channel / V. Bondarenko, T. Krasnov, V. Garifullin // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013 – Proceedings, DOI: 0.1109/SIBCON.2013.6693617

22. Bondarenko, V. Search algorithm of quasi-periodic spread spectrum signal propagation delay / V. Bondarenko, T. Krasnov, V. Garifullin // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 — Proceedings, DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147026

23. Краснов, Т. В. Цифровой корреляционный приемник шумоподобного сигнала с автокомпенсатором структурной помехи / Т. В. Краснов // Сб. труд. РНТОРЭС им. А.С. Попова, Серия «Цифровая обработка сигналов и её применение», Выпуск: XIV; Том-1. – Информпресс-94, Москва, 2012. – С. 204–207.

24. Краснов, Т. В. Анализ алгоритма поиска по времени запаздывания шумоподобных сигналов с минимальной частотной манипуляцией / Т. В. Краснов // Междисциплинарные исследования в науке и образовании, г. Киев – 2012. – №1 Sp; URL: www.es.rae.ru/mino/157-742

25. Краснов, Т. В. Анализ эффективности применения сигнала ВОС(1,1) и сигнала ГНСС ГЛОНАСС стандартной точности / Т. В. Краснов // Сб. труд. 67-й научн.-техн. конф., посв. Дню Радио – СПбНТОРЭС, 2012.

26. Краснов, Т. В. Анализ помехоустойчивости алгоритма поиска шумоподобного сигнала / Т. В. Краснов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. [Электронный ресурс] / Электрон. дан. (32 Мб). – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 606 с. – 1 электрон. опт. диск. – С. 226–229.

27. Краснов, Т. В. Влияние нелинейности тракта аналого-цифрового преобразования на помехоустойчивость приема шумоподобных сигналов / Т. В. Краснов // Сб. науч. тр. Всеросс. НТ «Соврем. проблемы РЭ», Красноярск, ИПК СФУ, 2011. – С.170–174.

28. Краснов, Т. В. Повышение эффективности автокомпенсатора структурной помехи / Т. В. Краснов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / Сиб. федер. ун-т – Красноярск, 2013. – С. 166–170.

29. Бондаренко, В. Н. Помехоустойчивость квазиоптимального алгоритма поиска шумоподобного сигнала с минимальной частотной манипуляцией / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // Системы связи и радионавигации : сб. тезисов. – Красноярск: ОАО «НПП «Радиосвязь», 2014. – С. 112–113.

30. Бондаренко, В. Н. Точность измерения задержки спектрально-эффективных шумоподобных сигналов / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2015. – С. 158–161.

31. Краснов, Т. В. Составной шумоподобный MSK-сигнал с пилотной и информационной компонентами / Т. В. Краснов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. [Электронный ресурс] / Электрон. дан. (32 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 628 с. – 1 электрон. опт. диск. – С. 193–196.

32. Бондаренко, В. Н. Квазиоптимальный алгоритм поиска двухкомпонентного шумоподобного MSK-сигнала / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2015. – С. 169–172.

33. Краснов, Т. В. Структуроподобные помехи в широкополосных радионавигационных системах со спектрально-эффективными шумоподобными сигналами / Т. В. Краснов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. [Электронный ресурс] / Электрон. дан. (32 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 628 с. – 1 электрон. опт. диск. – С. 189–192.

34. Бондаренко, В. Н. Помехоустойчивость квазиоптимального алгоритма поиска двухкомпонентного шумоподобного MSK-сигнала / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов, Р. Г. Галеев, В. Ф. Гарифуллин // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2015. – С. 166–169.

35. Бондаренко, В. Н. Адаптивный компенсатор структурной помехи / В. Н. Бондаренко, Т. В. Краснов // Сб. науч. тр. Всеросс. НТК «Соврем. проблемы РЭ», Красноярск, ИПК СФУ, 2010. – С. 179–183.