



Евгений Александрович Рылов

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В КВ РАДИОЛИНИЯХ С
МОРСКИМИ СУДАМИ**

2.2.13. Радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Научный руководитель: **Глушанков Евгений Иванович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Чесноков Михаил Николаевич**
доктор технических наук, профессор
заместитель начальника отдела Акционерного общества «Конструкторское бюро «Луч»,
г. Санкт-Петербург

Манаенко Сергей Сергеевич
кандидат технических наук
доцент кафедры радиосвязи Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военная академия связи имени С.М. Буденного», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Акционерное общество «Концерн «Созвездие»,
г. Воронеж

Защита состоится 25 апреля 2023 года в 14-00 на заседании диссертационного совета У.2.2.13.31 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, учебный корпус 2, аудитория 347.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте университета www.spbstu.ru.

Автореферат разослан “ _____ ” марта 2023 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Коротков Александр Станиславович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Успешное выполнение задач по обеспечению экипажей морских судов всеми видами связи в различных регионах мирового океана возможно только при комплексном использовании различных родов связи. При этом немаловажная роль принадлежит КВ радиосвязи, которая в отдельных регионах может стать единственным средством, обеспечивающим управление морским судном. В то же время широкому применению КВ радиосредств препятствуют такие недостатки этого вида радиосвязи как зависимость ее качества и устойчивости от условий прохождения радиоволн, связанных не только с особенностями прохождения, но и перегруженностью диапазона радиосредствами и, соответственно, сложной помеховой обстановкой, а, следовательно, низкая помехоустойчивость и малая пропускная способность.

Для повышения помехоустойчивости КВ радиолиний с морскими судами требуется комплексное применение различных методов и алгоритмов. При этом пространственно-временная обработка сигналов (ПВОС) в приемных и передающих антенных системах является одним из наиболее распространенных методов обеспечения требуемой помехоустойчивости КВ радиолиний. Данный метод, с одной стороны, не требует расширения полосы частот передаваемого радиосигнала, а с другой стороны, может быть использован совместно с другими методами.

Известны различные подходы к ПВОС в радиотехнических системах. Наиболее общим является подход, предполагающий синтез оптимальных алгоритмов обработки для различных систем сигналов и основанный на статистических методах принятия решения путем вычисления отношения функций правдоподобия непосредственно для многомерного случая, определяемого числом антенных элементов, что позволяет получить совместные алгоритмы ПВОС и оптимального приема, максимизирующие энергетическую эффективность радиолинии в целом. Такие методы рассмотрены в ряде работ [Кремер И. Я., Нахмансон Г.С., Перов А. И., Тихонов В. И., Харисов В. Н. и др.] для различных пространственных фильтров и сигналов различной пространственной когерентности. В случае же пространственно-некогерентных сигналов, имеющих место при реализации пространственно-разнесенного приема, теоретическая основа данных методов была заложена в работе Андропова И. С. и Финка Л.М. Однако получаемые при таких подходах алгоритмы требуют высоких вычислительных затрат, а при большом числе антенных элементов приемной антенны становятся нереализуемыми в практических приложениях.

Другой подход основан на построении подоптимальных алгоритмов, при использовании которых предполагается декомпозиция задачи на задачу пространственно-временной обработки сигналов до демодулятора и задачу оптимального приема. Для этого случая получены более простые и реализуемые алгоритмы ПВОС [Журавлев А. К., Монзинго Р., Миллер Т.,

Ратынский М.В., Уидроу Б., Van Trees H.L V. 4 и др.], однако в данных работах не были разработаны подоптимальные быстрые алгоритмы и не учтена специфика КВ радиосвязи с морскими судами, приводящая к изменениям пространственной когерентности сигналов и к необходимости осуществления обработки в нестационарных ситуациях сигнально-помеховой обстановки.

Известны реализуемые варианты пространственной обработки сигналов в КВ радиоприемниках, учитывающие специфику организации КВ радиосвязи, виды принимаемых сигналов и особенности практического построения антенных систем [Будко П.А., Ворфоломеев А. А., Дворянчиков В. А., Жуков Г. А., Маковий В.А., Мирошников В. И., Николашин Ю. И. и др.]. При этом предлагается применение адаптивных компенсаторов помех и методов формирования парциальных диаграмм направленности в кольцевых антенных решетках с минимумами в направлениях на помехи. Данные работы представляют несомненный практический интерес, однако в них, во-первых, не учтена специфика КВ радиоприемников с морскими судами и размещения ААР с малым числом элементов на судах, что не позволяет использовать данные методы и алгоритмы без существенной модификации и проведения дополнительных исследований, во-вторых, не представлены адекватные реальным сигнально-помеховым ситуациям математические модели сигналов различной пространственной когерентности и реализуемые на современной элементной базе быстрые алгоритмы ПВОС, исследование которых должно включать предложения по реализации на береговых и корабельных станциях КВ радиоприемников с морскими судами и создание макетов цифровых процессоров ПВОС, а в-третьих, предложенные алгоритмы функционируют только в стационарных ситуациях сигнально-помеховой обстановки.

В связи с изложенным тема диссертационной работы, посвящённой разработке математических моделей сигналов и помех в КВ радиоприемниках с морскими судами, синтезу и анализу быстрых алгоритмов ПВОС и предложений по их реализации, включая размещение адаптивных антенн на береговых станциях и морских узлах и создание процессоров для реализации алгоритмов, является **актуальной** и практически важной.

Объектом исследований являются КВ радиоприемники с морскими судами. **Предметом исследований** являются алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов.

Целью данной работы является повышение эффективности пространственно-временной обработки сигналов в КВ радиоприемниках с морскими судами на основе разработки и совершенствования быстродействующих алгоритмов и предложений по их практической реализации.

Для достижения указанной цели требуется решение **следующей основной научной задачи** – разработки быстродействующих алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов в КВ радиоприемниках с морскими судами и их практической реализации на существующих и перспективных судах и береговых узлах связи морского флота РФ.

Достижение указанной цели требует решение следующих **частных задач**:

1. Обоснования показателей эффективности ПВОС в КВ радиоперелиниях с морскими судами.
2. Оценки потенциальной (гарантированной) эффективности ПВОС в КВ радиоперелиниях с морскими судами.
3. Разработки математических моделей сигналов и помех в КВ радиоперелиниях с морскими судами с учетом особенностей распространения радиоволн и размещения антенных систем на морских объектах.
4. Оценки адекватности разработанных математических моделей в форме стохастических дифференциальных уравнений.
5. Разработки алгоритмов ПВОС в КВ радиоперелиниях с морскими объектами для стационарных и нестационарных ситуаций сигнально-помеховой обстановки и размещения ААР на морских объектах и береговых узлах связи.
6. Разработки структур параллельных систолических вычислителей и ПЛИС для реализации алгоритмов ПВОС и создания макетов на их основе.
7. Разработки предложений по практической реализации устройств ПВОС на морских объектах и береговых узлах связи.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Осуществлена разработка математических моделей сигналов и помех в КВ радиоперелиниях с морскими судами на основе синтеза стохастических дифференциальных уравнений по заданным статистическим характеристикам сигналов и помех.

2. Разработаны быстрые модифицированные алгоритмы ПВОС в приемных антенных системах, основанные на градиентных итерационных процедурах поиска экстремумов и обладающие более высокой скоростью сходимости при той же помехоустойчивости по сравнению с известными.

3. Разработаны алгоритмы ПВОС в КВ радиоперелиниях с морскими судами, основанные на непосредственном обращении корреляционных матриц, учитывающие специальную структуру матриц в зависимости от геометрии антенной системы, обладающие на порядок меньшей вычислительной сложностью по сравнению с известными.

4. Разработаны алгоритмы ПВОС на основе модифицированных фильтров Калмана, функционирующие в нестационарных сигнально-помеховых ситуациях.

Теоретическая ценность проведенного исследования заключается в том, что:

1. Получены стохастические дифференциальные уравнения, позволяющие моделировать сигналы и помехи в КВ радиоперелиниях с морскими судами при их различных, в общем случае негауссовских распределениях.

2. Получены модифицированные градиентные алгоритмы адаптации приемных и передающих антенных систем КВ радиолиний с морскими судами с переменным шагом сходимости.

3. Разработаны прямые алгоритмы адаптации с теплицевыми, блочно-теплицевыми и циркулянтными корреляционными матрицами.

4. Получены алгоритмы ПВОС для нестационарных сигнально-помеховых ситуаций на основе модифицированных фильтров Калмана.

Методы исследований. Теоретическая часть работы основана на применении методов теории синтеза пространственно-временных алгоритмов, теории систем сигналов, теории нелинейной фильтрации и методов моделирования на ЭВМ. Программная реализация решенных задач выполнена в средах Simulink и Matlab.

Практическая ценность научных исследований заключается в следующем:

1. Предложена модель КВ радиоканала с морскими судами, основанная на стохастических дифференциальных уравнениях, в средах MATLAB и SIMULINK, позволяющая моделировать сигналы различной пространственной когерентности и анализировать помехоустойчивость радиолиний морской радиосвязи.

2. Разработан в среде MATLAB программный комплекс для анализа различных классов алгоритмов ПВОС в КВ радиолиниях с морскими судами.

3. Разработаны структуры цифровых процессоров для реализации алгоритмов ПВОС в виде систолических структур и на ПЛИС, выполнена практическая реализация модифицированных градиентных алгоритмов и алгоритмов непосредственного обращения матриц на ПЛИС семейства Xilinx и Intel (Altera).

4. Предложены практические варианты реализации и размещения разработанных адаптивных антенн на береговых и морских объектах.

Внедрение результатов работы (акты представлены в приложении к диссертационной работе):

1. В АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс» при выполнении научно-исследовательской работы «ППМ-АФАР-Связь» (отчет о НИР № 18/217) при создании научно-исследовательского задела в области радиотехнических линий связи с беспилотными летательными аппаратами, а именно:

- математические модели сигналов в каналах морской радиосвязи на основе стохастических дифференциальных уравнений;
- алгоритмы пространственной обработки сигналов в системах морской радиосвязи;
- процессоры пространственной обработки сигналов на базе ПЛИС.

2. В АО НВП «ПРОТЕК» на этапе теоретического обоснования принципов построения и алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов в компенсаторе помеховых сигналов в ходе выполнения составной части опытно-конструкторской работы «Мобилок-П» использованы материалы исследований, а именно:

- математические модели сигналов в каналах морской радиосвязи на основе стохастических дифференциальных уравнений;
- алгоритмы пространственной обработки сигналов в системах морской радиосвязи;

- структура процессора пространственной обработки сигналов на базе ПЛИС.

3. При разработке архитектуры модуля специального программного обеспечения платы специального вычислителя опытного образца на этапе «Разработка РКД для изготовления опытного образца» опытно-конструкторской работы шифр «Ригель» в ООО «Специальный технологический центр» (СТЦ) использована структура процессора пространственной обработки сигналов на базе ПЛИС.

4. В учебном процессе Балтийского государственного технического университета «Военмех» имени Д. Ф. Устинова использованы полученные в работе научные результаты:

- математические модели сигналов в каналах морской радиосвязи на основе стохастических дифференциальных уравнений;

– алгоритмы пространственной обработки сигналов, основанные на непосредственном обращении корреляционных матриц и на методах калмановской фильтрации.

5. В учебном процессе Санкт-Петербургского Государственного университета телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича реализованы материалы диссертационной работы:

- математические модели сигналов различной пространственной когерентности на основе стохастических дифференциальных уравнений;
- алгоритмы пространственной обработки сигналов на основе калмановской фильтрации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели сигналов и помех в приемных многоэлементных антеннах, основанные на стохастических дифференциальных уравнениях, параметры которых определяются по статистическим характеристикам сигналов и помех радиолиний КВ радиосвязи с морскими судами, позволяющие в отличие от известных учесть различную пространственную когерентность сигналов и помех, адекватность которых доказана при сравнении с реальными экспериментальными данными.
2. Быстрые алгоритмы ПВОС в КВ радиолиниях с морскими судами, обеспечивающие более чем на порядок повышение скорости сходимости вычислительных процедур по сравнению с известными и позволяющие осуществлять настройку параметров к изменениям сигнально-помеховой обстановки в нестационарных ситуациях, характерных для функционирования приемных антенн морских объектов.
3. Разработанные конструкции и созданные макеты цифровых процессоров обработки сигналов для реализации синтезированных алгоритмов ПВОС и предложения по практической реализации

алгоритмов на существующих и перспективных судах и береговых узлах связи морского флота РФ, применение которых позволит повысить отношение мощности сигнала к суммарной мощности помех и шума в КВ радиолиниях с морскими судами на величину до нескольких десятков децибел в зависимости от количества антенных элементов.

Апробация работы

Материалы, представленные в диссертации, прошли апробацию на международных и всероссийских научно-практических конференциях:

- 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2021;
- CEUR Workshop Proceedings, 2021;
- Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании, X Международная юбилейная НТК, СПбГУТ, 2021;
- Труды V научного форума телекоммуникации: Теория и технология ТТТ-2021, XXIII Международная НТК – Самара: ПГУТИ, 2021;
- Электронные средства и системы управления. Международная НПК – Томск: ТУСУР, 2021;
- Всероссийская НМК «ПКМ-2021». – СПб: СПбГУТ, 2022;
- Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании, XI Международная юбилейная НТК, СПбГУТ, 2022.

Публикации

По теме представленных в диссертации исследований опубликовано 20 работ, из них 2 статьи в ведущих рецензируемых отечественных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 3 – в сборниках материалов международных конференций, индексируемых в Scopus; 12 – в сборниках материалов всероссийских конференций и журналов, входящих в список РИНЦ; 3 – в патентах на изобретения.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объём диссертационной работы вместе с приложениями составляет 156 страниц, в том числе, 149 страниц основного текста, 68 рисунков, 6 таблиц, списка использованной литературы из 86 наименований и одного приложения.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность и новизна темы исследования, определены цель и основные задачи работы, приведены сведения о практической и теоретической значимости полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертационной работы и приведены сведения о практическом внедрении результатов диссертации.

В **первой главе** проанализированы условия распространения радиоволн и помеховая обстановка в диапазоне коротких волн при

организации радиосвязи с морскими судами. Показано, что особенности ионосферного распространения радиоволн делают КВ-канал каналом со случайными параметрами, когда амплитуда сигнала может изменяться в весьма широких пределах. Вследствие этого отношение уровня сигнала к помехе в точке приема в отдельные промежутки времени становится недопустимо малым и связь практически нарушается. Поэтому одной из основных задач, требующих решения при внедрении КВ радиосвязи для организации связи с морскими судами, является задача повышения помехоустойчивости радиолиний в условиях воздействия взаимных помех и помех, возникающих вследствие многолучевости.

Среди различных методов повышения помехоустойчивости одними из наиболее эффективных в КВ радиолиниях с морскими судами являются методы пространственно-временной обработки сигналов в приемных многоэлементных антенных системах судов и береговых узлов связи.

Наиболее универсальным и общепринятым при синтезе алгоритмов обработки сигналов является подход, основанный на вычислении отношения правдоподобия (ОП) и сравнении с порогом ОП. Запишем ОП для ПВОС в виде системы $(m-1)$ выражения, связывающих в общем случае функции правдоподобия при приеме m - позиционных сигналов:

$$\Lambda_{lr}(X) = \frac{f(X/H_l, \mu_c, \mu_s)}{f(X/H_r, \mu_c, \mu_s)} > \Lambda_{0lr}, \quad (1)$$

где $f(X/H_l, \mu_c, \mu_s)$ – L - мерная условная ПРВ (функция правдоподобия), X – (L -мерный вектор принимаемых сигналов, L – число каналов ПВОС, H_l – гипотеза о передаче l - го сигнала, $l=1,2,\dots,m$, $l \neq r$, μ_c, μ_s – L – мерные векторы квадратурных составляющих коэффициентов передачи каналов, Λ_{0lr} – порог.

В зависимости от степени пространственной когерентности принимаемых сигналов выражение (1) может быть преобразовано для пространственно-когерентных, частично-когерентных и пространственно-некогерентных сигналов. В то же время для вычисления входящих в отношение правдоподобия (1) функций правдоподобия требуется учет большого количества факторов, а именно типов сигналов, коэффициентов передачи каналов по различным путям распространения радиоволн и пр., и даже наличие априорных данных по функциям правдоподобия и порогу отношения правдоподобия, определяющего критерий принятия решения, приводит к достаточно сложным оптимальным решениям. В случае же, когда имеется априорная неопределенность относительно параметров функций правдоподобия, то, как правило, применяются подоптимальные алгоритмы, в которых функции правдоподобия становятся еще и условными по априорно неизвестным параметрам. Существует синтезированные в данном случае алгоритмы ПВОС, оптимизирующие в целом процедуру обработки и приема [Кремер И. Я., Нахмансон Г.С., Перов А. И., Тихонов В. И., Харисов В. Н. и др.]. Однако, учитывая тот факт, что ПВОС выполняется до входа

демодулятора возможен синтез алгоритмов, оптимизирующих только процедуру обработки сигналов.

При этом для случая приема пространственно-когерентных сигналов возможно строгая декомпозиция решения задачи оптимального приема сигналов в системах с ПВОС на два этапа – синтез алгоритмов обработки сигналов и синтез демодулятора. В этом случае полученные в результате решения задачи синтеза алгоритмы ПВОС будут являться оптимальными по выбранному критерию адаптации.

В случае же частично-когерентных сигналов такая декомпозиция невозможна. При этом возможно получение лишь подоптимальных алгоритмов, однако их вычислительная сложность будет существенно меньше, чем у оптимальных и появится возможность более простой их технической реализации в КВ радиолиниях с морскими судами.

Поэтому качество подоптимальной ПВОС будем оценивать по величине отношения мощности сигнала на выходе устройства ПВОС (на входе демодулятора) к суммарной мощности помех и шума на выходе устройства ПВОС (ОСПШ). Значение ОСПШ можно вычислить по следующей формуле:

$$\eta(W) = \frac{W^T S S^T W}{W^T R_{PP} W}, \quad (2)$$

где W – ВВК, S – вектор сигнала на выходе антенных элементов ААР, его можно определить по значениям полезного сигнала в одном элементе и угла прихода сигнала, определяющего фазовые сдвиги между элементами ААР, которые либо постоянны и определяются лишь геометрией антенны (для пространственно-когерентных сигналов), либо изменяются в зависимости от различных коэффициентов передачи (для частично-когерентных сигналов), R_{PP} – корреляционная матрица помех и шумов.

Данный показатель является основным при анализе эффективности подоптимальных алгоритмов ПВОС. В то же время при разработке алгоритмов ПВОС в КВ радиолиниях с морскими судами важнейшую роль играет быстроедействие алгоритмов ПВОС, что оправдывается быстрыми изменениями сигнально-помеховой обстановки. Поэтому в работе будем понимать под эффективностью ПВОС минимизацию следующей целевой функции:

$$\min_W B(W) \quad (3)$$

при ограничении на ОСПШ вида

$$\eta(W) \geq \eta_{\text{треб}}(W), \quad (4a)$$

где $B(W)$ – быстроедействие алгоритма ПВОС, определяемое либо числом арифметических операций, либо временем выполнения алгоритма, вычисляемым путем измерения временного параметра при реализации в

MATLAB или на ПЛИС при проведении эксперимента, при выполнении условия (4а) для прямых методов адаптации, непосредственно вычисляющих значение ВВК, и условия

$$|\eta[W(t)] - \eta_{\text{треб}}[W(t)]| \leq \varepsilon_{\text{тр}}, \quad (4б)$$

для итерационных алгоритмов ПВОС, у которых ВВК флуктуирует около оптимального по заданному критерию адаптации значения, $\eta_{\text{треб}}(\mathbf{W})$ – требуемое (пороговое) значение ОСПШ, необходимое для работы демодулятора. В дальнейшем будем проводить оценку эффективности ПВОС по критериям (2) – (4).

Также в первой главе оценена потенциальная (гарантированная) эффективность пространственной обработки сигналов в КВ радиолиний с морскими судами и на этой основе подтверждена целесообразность синтеза быстрых алгоритмов ПВОС в КВ радиолиниях с морскими судами по критерию (2) – (4).

Во второй главе разработаны математические модели сигналов и помех в КВ радиолиниях с морскими судами. При этом представим векторный в общем случае негауссовский случайный процесс, описывающий случайные параметры частично-когерентных сигналов, в виде следующего многомерного СДУ:

$$\frac{dX(t)}{dt} = F[X(t)] + G[X(t)]V(t), \quad (5)$$

где $X(t)$ – векторный L -мерный случайный процесс, L – число каналов ПВОС, $F[X(t)]$ – L -мерный векторный коэффициент СДУ, $G[X(t)]$ – $(L \times L)$ -мерный матричный коэффициент СДУ, $V(t)$ – L -мерный векторный возбуждающий процесс, компоненты которого представляют собой центрированные белые шумы единичной интенсивности при моделировании непрерывных случайных процессов или пуассоновские последовательности дельта-импульсов при моделировании дискретно-непрерывных (разрывных) случайных процессов и др., при начальных условиях $X(0) = X$. При решении задачи синтеза моделей в виде СДУ (5) необходимо определить неизвестные коэффициенты СДУ $F[X(t)]$ и $G[X(t)]$. Рассмотрено моделирование сигналов различной пространственной когерентности.

Для пространственно-когерентных сигналов случайные амплитуду и фазу можно представить в виде одномерных стохастических дифференциальных уравнений:

$$\frac{dA(t)}{dt} = f_A[A(t)] + g_A[A(t)]\vartheta_A(t), \quad (6)$$

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = f_\varphi[\varphi(t)] + g_\varphi[\varphi(t)]\vartheta_\varphi(t), \quad (7)$$

где $f_A[A(t)]$, $g_A[A(t)]$, $f_\varphi[\varphi(t)]$, $g_\varphi[\varphi(t)]$ – неизвестные коэффициенты СДУ, $\vartheta_A(t)$, $\vartheta_\varphi(t)$ – белые шумы единичной интенсивности. Векторный непрерывный случайный процесс, описывающий случайные амплитуды и фазы сигналов на выходе антенных элементов L -элементной АР, представим многомерным уравнением (5), где

$$X^T(t) = [A_1(t), A_2(t), \dots, A_L(t), \varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_L(t)],$$

$A_i(t)$, $\varphi_i(t)$ – амплитуда и фаза сигнала на выходе i -го элемента ($i = \overline{1, L}$). Коэффициенты получим в форме

$$F^T[X(t)] = \{f_A[A(t)], f_A[A(t)], \dots, f_A[A(t)], f_\varphi[\varphi(t)], f_\varphi[\varphi(t)] + \Delta\varphi_{21}, \dots, f_\varphi[\varphi(t)] + \Delta\varphi_{L1}\}; \quad (8)$$

$$G[X(t)] = \text{diag}\{g_A[A(t)], g_A[A(t)], \dots, g_A[A(t)]; g_\varphi[\varphi(t)], g_\varphi[\varphi(t)] + \Delta\varphi_{21}, \dots, g_\varphi[\varphi(t)] + \Delta\varphi_{L1}\}; \quad (9)$$

$$V^T(t) = [\vartheta_A(t), \vartheta_A(t), \dots, \vartheta_A(t), \vartheta_\varphi(t), \vartheta_\varphi(t)], \quad (10)$$

где $\Delta\varphi_{i1}$ – фазовый сдвиг между i -м и первым антенными элементами, рассчитываемый по геометрии АР и углам прихода сигнала (пространственный набег фазы). Так, например, для линейной эквидистантной АР имеем $\Delta\varphi_{i1} = (i-1)(2\pi/\lambda)d\sin\theta$, где λ – длина волны; d – расстояние между элементами АР; θ – угол прихода сигнала. Для других видов геометрии АР также возможен однозначный пересчет $\Delta\varphi_{i1}$ в i -м элементе относительно первого, исходя из заданной геометрии антенны.

Таким образом, вычисление коэффициентов многомерных СДУ (8) - (10) для пространственно-когерентных сигналов сводится к вычислению коэффициентов одномерных СДУ (6) - (7). Данная модель реализована в среде Simulink и состоит из двух частей: модели самого непрерывного канала и блока, моделирующего случайный процесс на основе СДУ. Вид процесса задается в блоке параметров. На рисунке 1 представлена разработанная модель. По итогам моделирования был проведен анализ чувствительности модели канала связи на основе СДУ, результаты которого представлены на рисунках 2, 3.

При моделировании частично-когерентных сигналов, воспользовавшись методом функциональной аппроксимации и статистической линеаризации, получим коэффициенты многомерного СДУ в виде

$$\frac{dx_k(t)}{dt} = \sum_{i=1}^L \varphi_{1,i}^{(k)} x_i^0(t) + \sqrt{B_0} \vartheta_k(t), \quad k = \overline{1, L},$$

где $\varphi_{1,i}^{(k)}$ – коэффициенты разложения при линеаризации, B_0 – коэффициент диффузии. Пример такого СДУ для распределения Релея имеет вид

$$\frac{dx_k(t)}{dt} = \frac{B_0}{2} \left\{ \left[\frac{x_k}{2\sigma_k^2} - \frac{x_k}{\sigma_k^2} \ln \frac{x_k}{\sigma_k^2} \right] + \frac{\sum_{j=1 \neq k}^L \frac{r_{jk}}{r_{jj} r_{kk}} x_j^0(t)}{1 + \sum_{i=2}^L \sum_{j=1}^{i-1} \frac{r_{ij}}{r_{ij} r_{ii}} x_i^0(t) x_j^0(t)} \right\} + \sqrt{B_0} \vartheta_k(t).$$

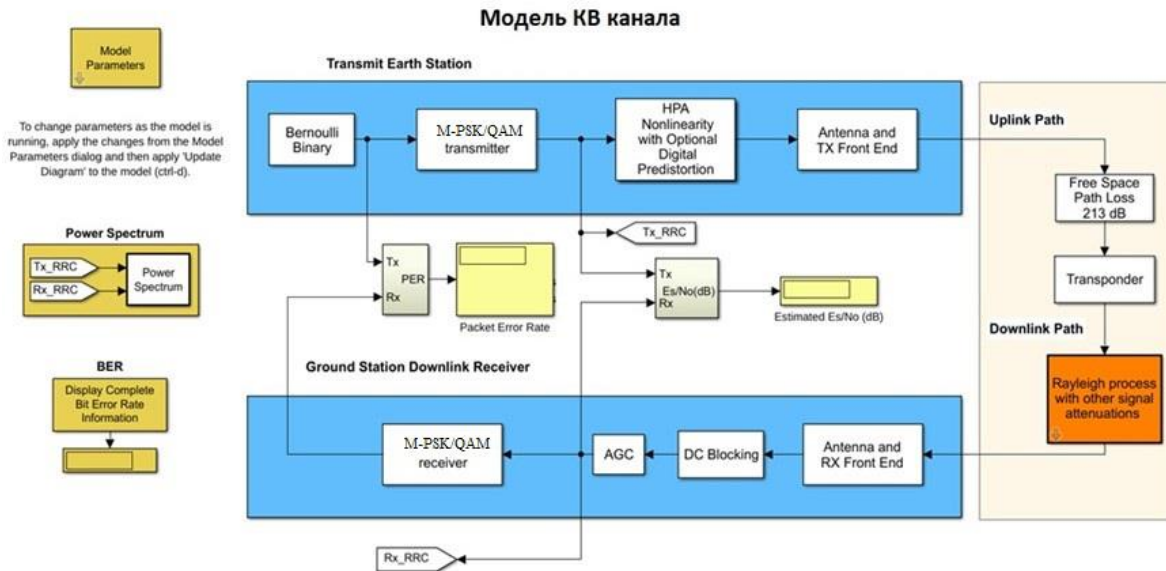


Рисунок 1 - Реализация модели в Simulink

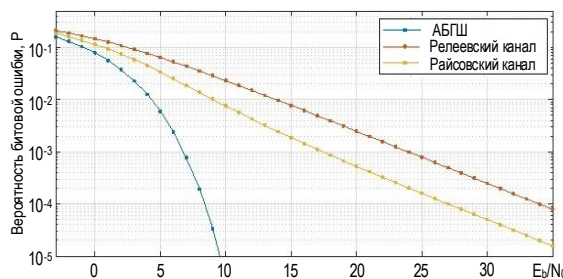


Рисунок 2 - Вероятность ошибки при передаче по каналу (модуляция ФМ-8)

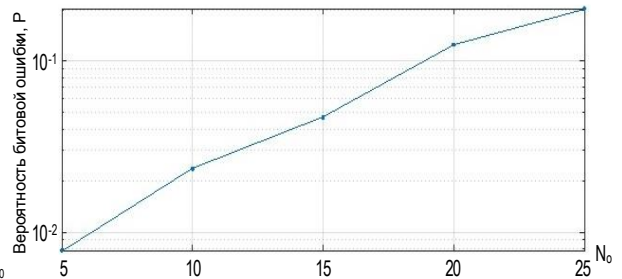


Рисунок 3 - Вероятность ошибки при различном значении N_0 релейского процесса (модуляция ФМ-8, $E_b = 10$)

Здесь же проведена оценки соответствия между теоретической, моделируемой и экспериментальной ПРВ по критерию согласия Колмогорова-Смирнова, результаты которой представлены на рисунке 4.

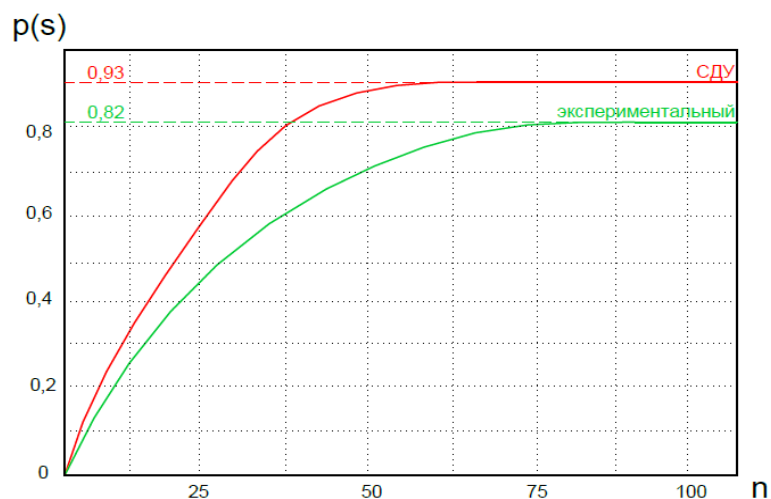


Рисунок 4 - Вероятность выполнения гипотезы о теоретической плотности Релея

Из рисунков видно, что представление математических моделей сигналов в форме СДУ хорошо аппроксимируется релеевским распределением и укладывается в десятипроцентный доверительный интервал по совпадению с экспериментальными данными, что позволяет рекомендовать данный метод для описания сигналов в КВ радиоканалах с морскими объектами.

В третьей главе синтезированы быстрые алгоритмы ПВОС для различных ситуаций сигнально-помеховой обстановки и различных объектов размещения ААР. Так, для стационарных в широком смысле ситуаций и корабельных ААР предложен модифицированный градиентный алгоритм, для которого рекуррентная формула имеет вид

$$W_{k+1} = W_k + \mu_k (z_{эт k} - W_k^T X_k) X_k,$$

где W_k – значение вектора весовых коэффициентов (ВВК) ААР на k -м шаге, $z_{эт k}$ – эталонный сигнал на k -м шаге, определяемый по известной структуре полезного сигнала, X_k – вектор пространственно-когерентных или частично-когерентных входных сигналов на входе антенных элементов ААР на k -м шаге, μ_k – переменный шаг адаптации, определяемый следующим образом:

$$\mu_k = \frac{\mu_0}{\sum_{i=1}^k x'_i x_i + \varepsilon},$$

$x'_k x_k$ – мгновенная оценка энергии сигнала, μ_0 – фиксированное значение шага, влияющее на сходимость алгоритма адаптации ($0 < \mu_0 < 2$), ε – малая положительная константа, определяющая максимальное значение μ_k , равное μ_0/ε при нулевом входном сигнале. Структурная схема алгоритма приведена на рисунке 5.

На рисунках 6, 7 приведены зависимости среднего значения ошибки алгоритма с переменным шагом после сходимости от μ_0 , а также сравнение с другими алгоритмами при оптимальных значениях μ . Из рисунков 6, 7 видно,

что предлагаемый алгоритм имеет меньший уровень средней ошибки по сравнению с известным градиентным алгоритмом LMS.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что модифицированный градиентный алгоритм обладает более высокой скоростью сходимости по сравнению с известным градиентным алгоритмом при практически близкой к нему вычислительной сложности.

Для больших центрально-симметричных ААР береговых узлов связи эффективность методов адаптации во многом зависит от вида корреляционных матриц (КМ) входных сигналов. Если КМ принадлежит к матрицам специального типа (теплицевым, блочно-теплицевым, циркулянтным и др.), то вычислительная сложность прямых методов может быть снижена с $O(L^3)$ до $O(L^2)$ (L - размерность АР). В работе доказаны утверждения, касающиеся типов КМ в задачах адаптации АР, сведенные в таблицу 1.

Таблица 1

№	ВИД АР	ВИД ЭЛЕМЕНТОВ КМ	ТИП МАТРИЦЫ
1.	Линейная эквидистантная	Комплексные/ Действительные	Теплицевая/Блочно-теплицевая
2.	Кольцевая эквидистантная	Комплексные/ Действительные	Циркулянтная/Блочно-циркулянтная
3.	Прямоугольная эквидистантная	Комплексные/ Действительные	Блочно-теплицевая/Блочно-теплицевая

Также предложены выражения для оценивания выборочных КМ матрицами специального вида и регуляризованный алгоритм адаптации при ограниченном объеме обучающей выборки. В среде MATLAB было проведено моделирование регуляризованного алгоритма адаптивной обработки на основе обращения блочно-теплицевой регуляризованной КМ в сравнении с прямым обращением КМ для 8-ми элементной АР, результаты которого представлены на рисунке 8, 9.

В нестационарных случаях вместо стационарного винеровского решения, определяемого по градиентному алгоритму с переменным шагом адаптации или регуляризованному алгоритму, целесообразно использовать нестационарные фильтры. К подобным в линейном случае относится фильтр Калмана, который применяется для адаптации АР в гауссовом приближении и будет иметь вид

$$\frac{d\hat{W}(t)}{dt} = F(t)\hat{W}(t) + K(t)[z(t) - X^T(t)\hat{W}(t)], \quad (11)$$

$$K(t) = P_{\hat{w}}(t) \frac{X(t)}{q_z(t)}, \quad (12)$$

$$\frac{dP_{\hat{w}}(t)}{dt} = F(t)P_{\hat{w}}(t)F^T(t) - \frac{(P_{\hat{w}}(t)X(t)X^T(t)P_{\hat{w}}(t))}{q_z(t)} + Q_{\hat{w}}(t), \quad (13)$$

где $\hat{W}(t)$ – оценка ВВК $W(t)$, $K(t)$ – L -мерный векторный коэффициент усиления фильтра, $q_z(t)$ – спектральная плотность мощности шума $v_z(t)$, $\text{cov}[v_z(t), v_z(\tau)] = q_z(t)\delta'(t - \tau)$, $\delta'(t - \tau)$ – дельта-функции, $P_{\hat{w}}(t)$ – $(L \times L)$ -мерная матрица дисперсии ошибки, $Q_w(t)$ – $(L \times L)$ -мерная матрица спектральной плотности мощности шума $V_w(t)$. Структурная схема модифицированного дискретного фильтра Калмана представлена на рисунке 10.

Для сравнения винеровского и калмановского решений были разработаны программы в среде MATLAB, с помощью которых была проанализирована эффективность вычисления ВВК в соответствии с (11) – (13) в сравнении для стационарных случаев с фильтром Винера. Результаты анализа представлены на рисунке 11 (для стационарного случая) и рисунке 12 (для нестационарного случая, когда происходит изменения параметров сигнально-помеховой обстановки в моменты, отмеченные

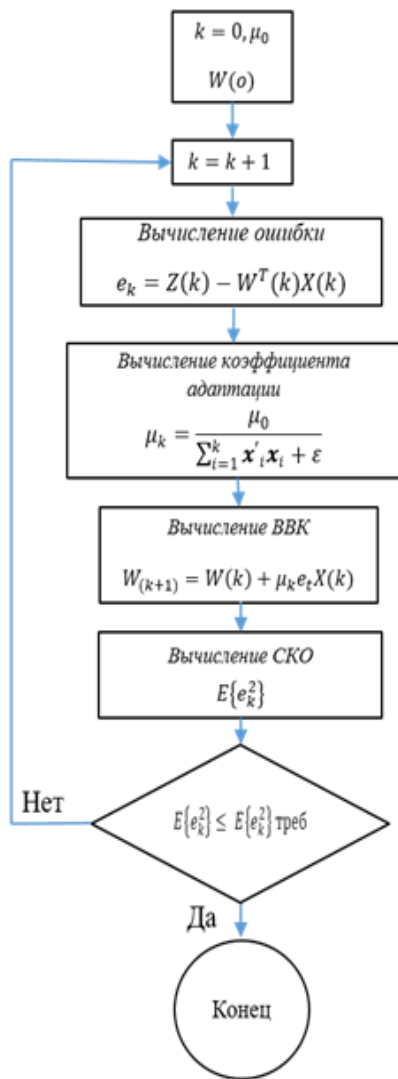


Рисунок 5 - Структурная схема модифицированного градиентного алгоритма

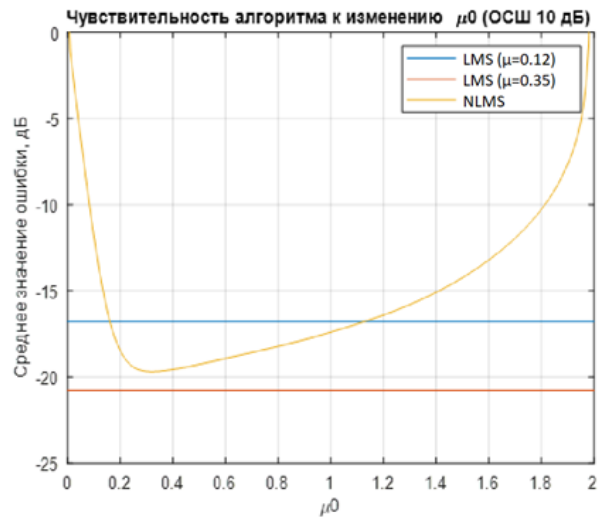


Рисунок 6 - Чувствительность алгоритма к изменению μ_0

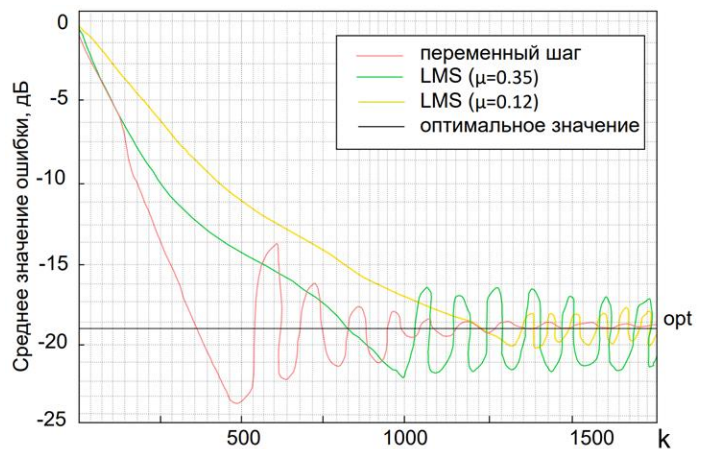


Рисунок 7 - Сходимость алгоритма

штриховой линией) в зависимости от объема обучающей выборки для винеровского или от шага сходимости для калмановского решения при $L=16$ и $\Delta\varphi=20$. Из результатов видно, что в стационарных сигнально помеховых ситуациях алгоритмы практически идентичны друг другу, в нестационарных же условиях эффективность фильтра Калмана существенно выше. Проанализированы отклонения параметров моделей от реальных значений и их влияние на точность калмановской фильтрации (чувствительность фильтра к отклонению параметров модели).

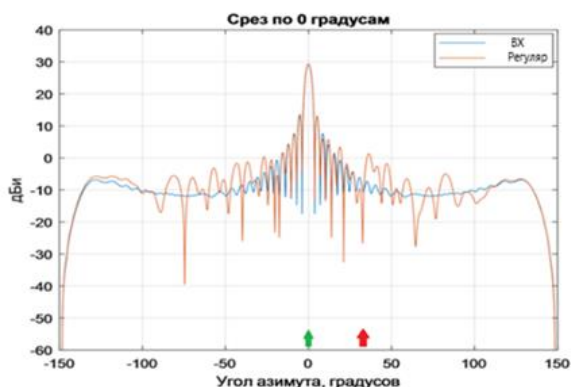


Рисунок 8 - Результаты моделирования регуляризованного алгоритма адаптивной обработки

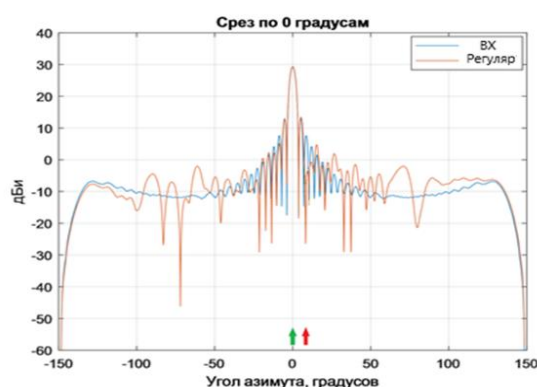


Рисунок 9 - Результаты моделирования регуляризованного алгоритма адаптивной обработки

В четвертой главе представлены результаты практической реализации синтезированных алгоритмов ПВОС на ПЛИС. Анализ вычислительных ресурсов для реализации алгоритма непосредственного обращения матриц (НОМ) и градиентного алгоритма с переменным шагом адаптации показывает, что для реализации градиентного алгоритма требуется значительно меньше вычислительных ресурсов: по числу LUT выигрыш примерно в 3,5–4 раза у Xilinx и 2,5 – 3 раза у Intel, по числу DSP 4-5 раз на обоих ПЛИС (таблицы 2 - 3).

Таблица 2 - Количество занимаемых ресурсов на микросхеме Zynq XC7Z020

Блоки	Разрядность 10 на 3 элемента	Разрядность 16 на 3 элемента	Разрядность 16 на 8 элементов	Разрядность 16 на 16 элементов
Градиентный алгоритм с переменным шагом				
LUT	4039	4608	10454	19114
DSP	2	11	26	52
Алгоритм НОМ				
LUT	12963	15937	57375	496663
DSP	12	40	220	220

Для практической реализации указанных алгоритмов была использована плата Xilinx ZedBoard Zynq-7000, созданный на ее основе макет, осуществляющий вычисления по предложенному в третьей главе модифицированному градиентному алгоритму, представлен на рисунке 13.

Предложены варианты размещения антенн на центральной части палубы морских судов, позволяющие повысить помехоустойчивость приема радиосообщений за счет ПВОС, минимизировать затенение областей передачи (приема) радиосигнала и обеспечить возможность заваливания антенн для технического обслуживания.

Таблица 3 - Количество занимаемых ресурсов модулем NLMS и Winer на микросхеме Cyclone 10 LP 10CL120

Блоки	Разрядность 10 на 3 элемента	Разрядность 16 на 3 элемента	Разрядность 16 на 8 элементов	Разрядность 16 на 16 элементов
Градиентный алгоритм с переменным шагом				
LUT	5334	11348	26723	51326
DSP	20	25	55	104
Алгоритм НОМ				
LUT	12458	22725	92230	529715
DSP	63	66	376	576

В **заключении** сформулированы достигнутые результаты и основные выводы по работе:

1. В качестве показателя эффективности ПВОС в КВ радиолиниях с морскими судами предложен показатель быстродействия алгоритмов адаптации ААР при ограничении на значение ОСПШ вы выходе ААР. Анализ потенциальной (гарантированной) эффективности ПВОС подтвердил целесообразность использования данного показателя и необходимость разработки быстрых алгоритмов ПВОС в КВ радиолиниях с морскими судами.

2. Разработанные математические модели сигналов и помех в КВ радиолиниях с морскими судами с приёмными и передающими многоэлементными антеннами, основанные на стохастических дифференциальных уравнениях, коэффициенты которых определяются на основе анализа статистических характеристик сигналов и помех, позволяют моделировать сигналы с различной пространственной когерентностью в многоэлементных антеннах. Это особенно важно для КВ диапазона, когда фронт принимаемой электромагнитной волны в большинстве случаев нельзя считать плоским и сигналы являются частично-когерентными. Для проведения исследований разработан программный комплекс в средах MATLAB и SIMULINK, позволяющий моделировать сигналы и помехи в КВ радиолиниях с приёмными ААР различной пространственной когерентности и имеющих различные негауссовские законы распределения. Сравнение разработанных СДУ с экспериментальными данными подтвердило

адекватность разработанных математических моделей на уровне десятипроцентного доверительного интервала.

3. Разработанные быстрые алгоритмы ПВОС, основанные на модифицированных градиентных процедурах для приёмных и передающих антенных систем, на непосредственном обращении корреляционных матриц специального вида, случайном поиске и калмановской фильтрации могут быть рекомендованы к использованию, как на наземных узлах связи, так и на морских объектах, в зависимости от типов антенных систем, статистических характеристик СПО и типа объекта. Так, достаточно простые в реализации модифицированные градиентные алгоритмы, обеспечивающей более чем на порядок повышение скорости сходимости вычислительных процедур по сравнению с известными, целесообразно использовать для адаптации антенных систем морских судов при достаточно длительных интервалах квазистационарности, например, на судах материального снабжения морского флота. Алгоритмы непосредственного обращения корреляционных матриц специального вида, позволяющих более чем на порядок уменьшить количество арифметических операций, целесообразно применять для адаптации больших центрально-симметричных антенных систем береговых узлов связи. Алгоритмы калмановской фильтрации, способные функционировать в нестационарных сигнально-помеховых ситуациях, целесообразно использовать для адаптации антенных систем морских судов, действующих на значительном удалении от береговых узлов связи и в северных широтах, когда затрудняется выполнение требований к помехоустойчивости КВ радиолиний с морскими судами.

4. Разработанные цифровые процессоры обработки сигналов для реализации предложенных алгоритмов ПВОС позволили создать натурные макеты на основе ПЛИС и провести испытания алгоритмов в реальных условиях функционирования. Эксперименты показали, что применение разработанных цифровых процессоров позволило повысить отношение мощности сигнала к суммарной мощности помех и шума в КВ радиолиниях с морскими судами на величину от 4–6 до нескольких десятков децибел. Результаты также показали возможность реализации предложенных в работе алгоритмов ПВОС в реальном масштабе времени.

5. Представленные варианты реализации ААР на различных типах морских объектов – на судах «Илья Муромец» (ледокол проекта 21180), «Эльбрус» и «Всеволод Бобров» (морские суда материального обеспечения) и на береговых приёмных радиоцентрах приняты к реализации в перспективных морских радиолиниях.

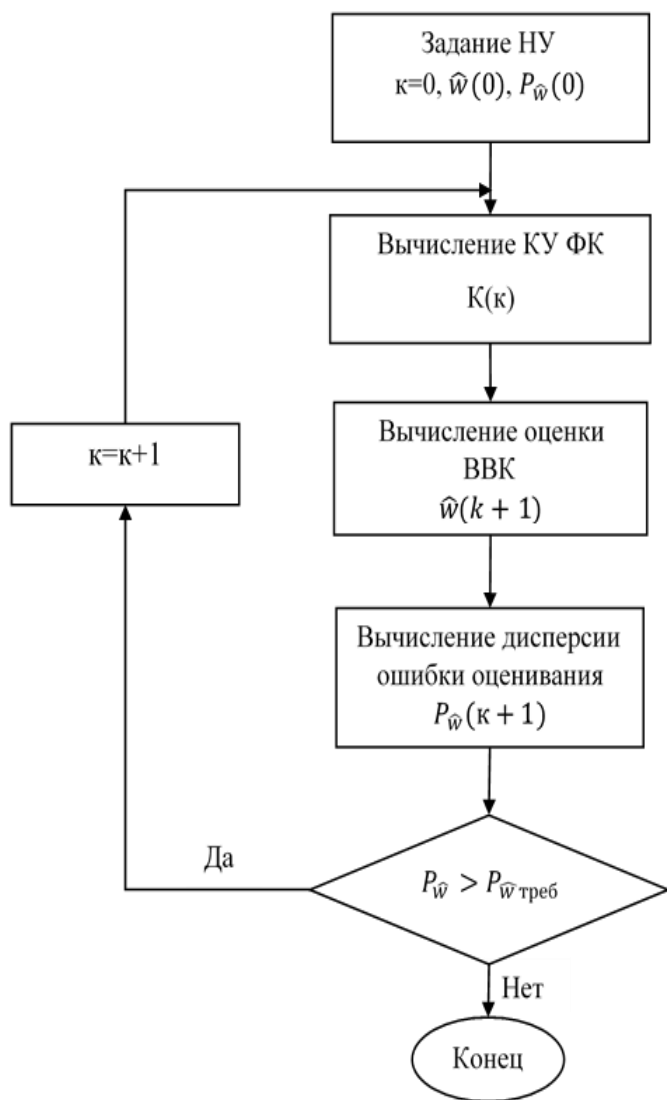


Рисунок 10 - Структурная схема алгоритма калмановской фильтрации

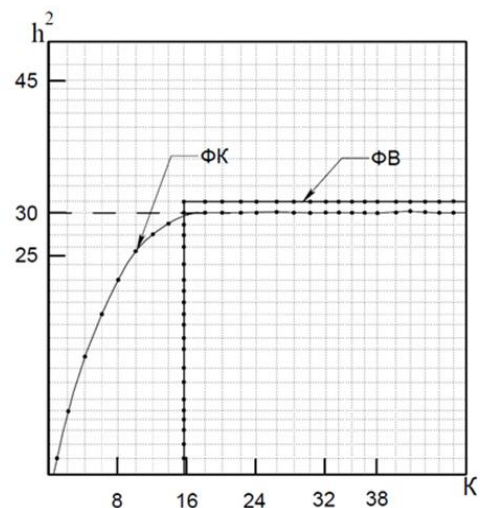


Рисунок 11 - Стационарный случай

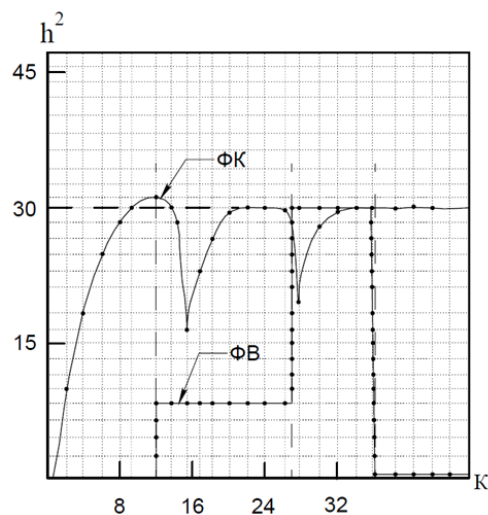


Рисунок 12 - Нестационарный случай

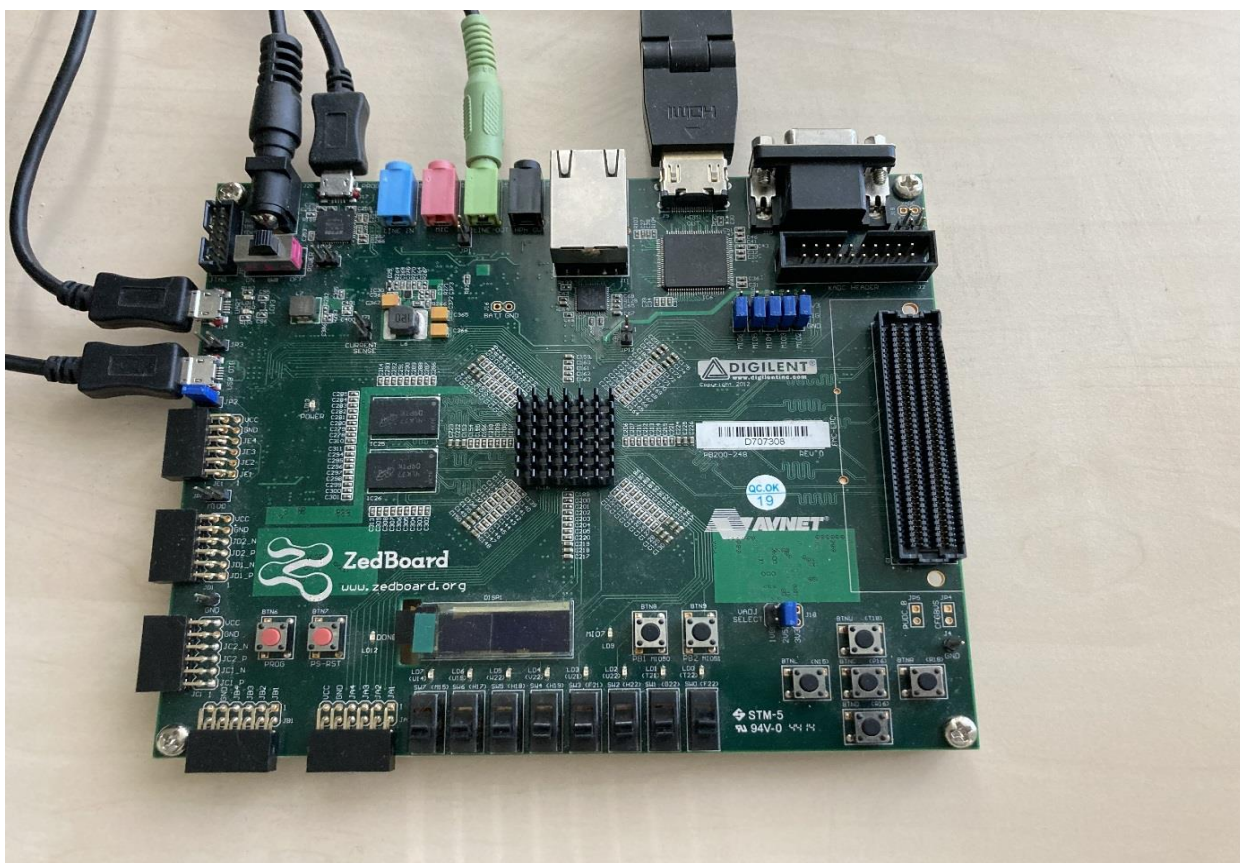


Рисунок 13 - Плата Xilinx ZedBoard Zynq-7000

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Афанасьев Н. А., Глушанков Е.И., Кирик Д.И., Рылов Е. А. Сравнение винеровского и калмановского решения в задачах адаптации антенных решеток // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2021, № 3, с. 33–39.
2. Бойко И. А., Глушанков Е.И., Рылов Е. А. Моделирование градиентного алгоритма адаптации антенной решетки в среде MATLAB // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2022, № 1, с. 55–61.

Статьи в журналах и доклады на конференциях, входящих в базу Scopus:

3. Glushankov, E.I., Kirik, D.I., Kirsanov, D.M., Rylov, E.A. Adaptation of antenna arrays with using correlation matrices of a special types. -2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2021 - Conference Proceedings, 2021, 9488331
4. Boyko, I.A., Glushankov, E.I., Kirik, D.I., Korovin, K.O., Rylov, E.A. Algorithms for multiple signals adaptive processing in radio engineering systems antenna arrays. – 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2021 - Conference Proceedings 2021, 9488370.

5. Glushankov, E., Lyalina, A., Rylov, E. Modeling the satellite communication channel based on stochastic differential equations. – CEUR Workshop Proceedings, 2021, 2922, с. 52–59.

Публикации, входящие в базу РИНЦ:

6. Рылов Е. А. Сферы использования и принципы построения радиостанций СДВ диапазона. // Морской вестник, 2020, №3 (75), с. 96–98.
7. Рылов Е. А., Николаев В. В., Руптанова О. Д., Сорокин А.В., Николаев Р.В. Многофункциональные абонентские терминалы – перспективные средства связи надводных кораблей // Морской вестник, 2020, №4 (76), с. 71- 73.
8. Глушанков Е.И., Рылов Е. А., Цветков Д. А. Анализ электромагнитной совместимости в системах морской радиосвязи с многоэлементными антеннами // Морской вестник, 2021, № 3(79), С. 114–115.
9. Глушанков Е.И., Рылов Е. А., Хренов А.А. Потенциальная эффективность систем морской радиосвязи // В сб.: Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной НПК – Томск: ТУСУР, 2021, № 1–2. – С. 269–270.
10. Глушанков Е.И., Рылов Е. А., Цветков Д. А. Адаптивные алгоритмы случайного поиска весовых коэффициентов в антенных решетках // В сб.: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании, X Международная юбилейная НТК, СПб: СПбГУТ, 2021, Т. 3, С. 83–86.
11. Бойко И.А., Глушанков Е.И., Рылов Е.А. Моделирование градиентного алгоритма адаптации антенной решетки в среде MATLAB // В сб.: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании, X Международная юбилейная НТК, СПб: СПбГУТ, 2021, Т. 3, С. 49-54.
12. Глушанков Е.И., Лялина А.Ж., Рылов Е.А. Моделирование в среде Simulink стохастических дифференциальных уравнений, описывающих сигналы в непрерывных каналах связи // В сб.: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании, X Международная юбилейная НТК, СПб: СПбГУТ, 2021, Т. 3, С. 78-83.
13. Глушанков Е.И., Рылов Е. А., Цветков Д. А. Моделирование каналов случайной структуры с использованием стохастических дифференциальных уравнений // Труды V научного форума телекоммуникации: Теория и технология ТТТ-2021. Материалы XXIII Международной НТК – Самара: ПГУТИ, 2021. – С. 35–36.
14. Рылов Е. А. Пространственно-временная обработка сигналов с ППРЧ в линиях КВ радиосвязи // В сб.: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании, XI Международная НТК, СПб: СПбГУТ, 2022. – С. 334–339.
15. Гизатулин Д.Д., Глушанков Е.И., Рылов Е. А., Свиридов А. А. Систематические вычислители для реализации алгоритмов адаптации антенных решеток // В сб.: Актуальные проблемы

инфотелекоммуникаций в науке и образовании, XI Международная НТК, СПб: СПбГУТ, 2022. – С. 124–129.

16. Глушанков Е.И., Горобцов И. А., Кирик Д.И., Прасолов А.А., Рылов Е. А., Титов П. А. Особенности реализации алгоритмов пространственной обработки сигналов на ПЛИС // Сборник лучших докладов Всероссийской НМК «ПКМ-2021». – СПб: СПбГУТ, 2022. - С. 51–54.
17. Глушанков Е.И., Цветков Д. А., Рылов Е. А. Анализ помехоустойчивости пространственной обработки сигналов в адаптивных антенных системах // Научно-исследовательские публикации, 2022, № 4, С. 36–39.

Патенты на изобретения:

18. Катанович А.А., Кашин А. Л., Канаев А.К., Жадан О. П., Вершенник Е.В., Рылов Е. А., Терехов А. С., Цыванюк В. А. Способ моделирования процессов функционирования сети связи с учетом воздействия дестабилизирующих факторов // Свидетельство о государственной регистрации, Заявка №2020126841 от 18.03.2021. — М.: Роспатент, 2021.
19. Катанович А.А., Кашин А. Л., Комиссаров А.Е., Рылов Е. А., Цыванюк В. А. Способ формирования выходного сигнала сверхдлинноволновой радиостанции // Свидетельство о государственной регистрации, Заявка №2020120772 от 15.03.2022. — М.: Роспатент, 2022.
20. Катанович А.А., Кашин А. Л., Рылов Е. А., Муравченко В.Л., Цыванюк В. А., Солодский Р.А. Корабельное радиопередающее устройство коротковолнового диапазона // Свидетельство о государственной регистрации, Заявка №2021107084 от 17.11.2021. — М.: Роспатент, 2021.