

На правах рукописи



БУЙ Куок Вьонг

**ЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-
ВРЕМЕННОЙ КОМПЕНСАЦИИ КОМПЛЕКСА
ШИРОКОПОЛОСНОЙ И УЗКОПОЛОСНОЙ ПОМЕХ**

Специальность

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2025

Работа выполнена на кафедре радиотехнических устройств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».

Научный руководитель:

Паршин Юрий Николаевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических устройств ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

Официальные оппоненты:

Федосов Валентин Петрович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретических основ радиотехники института радиотехнических систем и управления ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Таганрог

Курганов Владислав Владимирович

кандидат технических наук, доцент института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникации и информатики»

Защита состоится «19» сентября 2025 г. в 14.00 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на сайте университета <https://rsreu.ru/post-graduate/dissertatsii>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.375.03
д.т.н, доцент



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время подавление комплекса широкополосных и узкополосных помех является чрезвычайно актуальной задачей. Развитие технологий связи, радиолокации и беспроводной передачи данных приводит к увеличению плотности сигнального спектра, что повышает вероятность возникновения помех различной природы. Эти помехи могут существенно снижать качество и надежность передачи информации, поэтому эффективное их подавление представляет собой важную задачу в современных системах. Комплекс помех может включать узкополосные и широкополосные помехи, а также другие виды сигналов помехового характера. Эти помехи могут обладать временной и частотной изменчивостью, а также статистической взаимозависимостью, что значительно усложняет задачу построения эффективных методов обработки. Каждая помеха обладает своими особенностями, например:

1. Широкополосная пространственно-сосредоточенная помеха, распространяющаяся в широкой полосе частот и поступающая с одного направления. Как правило, от одного мощного источника. Хорошо подавляется пространственной фильтрацией.

2. Узкополосная пространственно-распределённая помеха имеет узкую полосу частот, но занимает широкий сектор углов прихода. Часто связана с радиопередатчиками или сетевыми сигналами. Требуется временной обработки для подавления.

Использование уникальных особенностей каждого типа помех в процессе их подавления позволяет улучшить качество обработки сигналов. Например, анализ временно-частотных характеристик помех позволяет адаптировать методы подавления к текущим условиям сигнала. Это может включать применение адаптивных фильтров или методов машинного обучения для автоматического распознавания и адаптации к параметрам помех. Таким образом, разработка эффективных методов подавления комплекса широкополосных и узкополосных помех играет ключевую роль в обеспечении качества современных радиотехнических систем, а также в расширении их функциональных возможностей.

Степень разработанности темы. В области пространственно-временного подавления помех, цифровой обработки сигналов внесли большой вклад такие ученые, как Сосулин Ю.Г., Бакулев П.А., Костров В.В., Паршин Ю.Н., Быховский М.А., Ширман Я.Д., Котоусов А.С., Григорьев В.А., Перов А.И., Ширман Я.Д., Тихонов В.И., Монзинго Р.А., Федосов В.П., Джиган В. И., Леволицкий Д. И., Витязев В.В., Сергиенко А.Б., и другие.

Целью исследования являются исследование и повышение эффективности обработки сигналов на фоне комплекса широкополосных и узкополосных помех

путем разработки новых принципов и алгоритмов пространственно-временной компенсации комплекса помех.

Объектом исследования являются радиосистемы обработки сигналов в пространственной и временной областях.

Предметом исследования являются алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Анализ характеристик широкополосных и узкополосных помех, их влияния на работу радиотехнических систем и сложности их совместного подавления.
2. Обоснование выбора методов пространственно-временной обработки сигналов для компенсации комплекса помех различной природы.
3. Разработка математических моделей пространственно-временной обстановки, учитывающих параметры источников помех, структуру антенной решетки.
4. Разработка и исследование влияния алгоритмов фазовой адаптации подавления широкополосной помехи на характеристики узкополосной помехи.
5. Разработка алгоритмов обработки сигналов на фоне комплекса широкополосной и узкополосной помех с разделением на пространственный и временной компоненты.
6. Моделирование и экспериментальная оценка эффективности предложенных алгоритмов.

Методы исследования. В диссертационной работе используются методы математического анализа, статистической радиотехники, линейной и векторной алгебры, математической статистики, математического и компьютерного моделирования, теории матриц и цифровой обработки сигналов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны модифицированные алгоритмы фазовой адаптации антенной решетки, отличающиеся от классического фазового метода случайной инициализацией фаз, а также увеличенным числом фазовых состояний и параболической аппроксимацией целевой функции.
2. Установлено, что адаптация фазовых состояний антенной решетки и соответствующие изменения диаграммы направленности вызывают искажения спектра узкополосной помехи, что необходимо учитывать при её последующем временном подавлении.
3. Предложено осуществлять адаптацию компенсатора комплекса помех, значительно отличающихся своими пространственными и спектральными характеристиками, раздельно: широкополосной помехи в пространственной области, а узкополосной помехи во временной области, что повышает эффективность адаптации.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Модифицированный алгоритм фазовой адаптации антенной решетки со случайной инициализацией фаз позволяет достичь глобального минимума мощности помех на выходе антенной решетки, что дает выигрыш 5...7 дБ в подавлении помех.
2. Модифицированный алгоритм фазовой адаптации антенной решетки с увеличенным числом фазовых состояний и параболической аппроксимации целевой функции более точно определяет минимум целевой функции, что дает выигрыш 5 дБ в подавлении помех.
3. Спектр узкополосной помехи при адаптации фазовых состояний имеет вид последовательности гармоник, расстояние между которыми определяются законом адаптивной подстройки фаз.
4. Если комплекс помех состоит из помех, значительно отличающихся своими пространственными и спектральными характеристиками, то раздельное подавление помех в пространственной области и последующая обработка во временной области уменьшает число весовых коэффициентов, повышает эффективность адаптивной подстройки.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертации внедрены:

1. В учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» на кафедре радиотехнических устройств.
2. В разработки компании АО "Разработка коммерческих и электронных технологий E-STARs".

Внедрения подтверждены соответствующими актами.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационного исследования доклады вались и обсуждались на 6 международных и 5 всероссийских научно-технических конференциях:

1. Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании», г. Рязань, 2021, 2022, 2024 гг.
2. Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства», г. Рязань, 2023 г.
3. Научно-практическая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Инновационные технологии в науке и технике», г. Рязань, 2023 г.
4. Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании» г. Рязань, 2022 г.
5. Международные конференции «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2022, 2023, 2024 гг.
6. 25th, 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), г. Москва, 2023, 2024 гг.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертационной работы опубликовано 21 научная работа, включая 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 тезиса докладов, индексируемых в базе Scopus, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и 14 тезисов докладов, представленных на международных и всероссийских конференциях.

Личный вклад автора. Автором, на правах соавтора, сформулированы критерий эффективности и математические модели широкополосной и узкополосной помех, разработаны методы и алгоритмы компенсации комплекса помех, проведено компьютерное моделирование функционирования предложенных алгоритмов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы. Материал изложен на 156 страницах, включает 54 рисунка и 6 таблиц, а также 4 приложения. Список использованной литературы содержит 105 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, определена научная новизна и раскрыта практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен всесторонний аналитический обзор отечественных и зарубежных публикаций, посвященных методам и алгоритмам пространственно-временной компенсации комплекса широкополосной (ШП) и узкополосной (УП) помех в радиотехнических системах. Особое внимание уделено характеристикам и ограничениям существующих алгоритмов в условиях присутствия одновременно ШП и УП помех. По результатам анализа выявлены основные направления научных исследований, а также сформулированы предпосылки к постановке задач, решаемых в последующих главах диссертационной работы.

Во второй главе изложены теоретические основы и результаты разработки оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов пространственно-временной компенсации комплекса ШП и УП гауссовских помех. Рассмотрен подход, предусматривающий разделение обработки на пространственную и временную компоненты, что позволяет независимо настраивать весовые коэффициенты каждой компоненты и снижать вычислительные затраты.

Пусть наблюдаемый процесс представляет собой $KN \times 1$ вектор-столбец пространственно-временных отсчетов

$$\underline{\mathbf{Y}} = \underline{\mathbf{S}} + \underline{\mathbf{V}}_{\text{nb}} + \underline{\mathbf{V}}_{\text{wb}} + \underline{\mathbf{V}}_{\text{noise}},$$

где $\underline{\mathbf{S}}$ – вектор отсчетов полезного сигнала, $\underline{\mathbf{V}}_{\text{nb}}$ – вектор отсчетов пространственно распределенной УП, $\underline{\mathbf{V}}_{\text{wb}}$ – вектор отсчетов пространственно сосредоточенной ШП, $\underline{\mathbf{V}}_{\text{noise}}$ – вектор отсчетов некоррелированного гауссовского шума, K – число отсчетов во времени, N – число пространственных отсчетов, равное числу

антенн. Пространственно-временные отсчеты в каждом из векторов упорядочены сначала во времени, а потом по пространству. Корреляционная матрица некоррелированного шума равна:

$$\mathbf{R}_{\text{noise}} = D_{\text{noise}} \mathbf{I}_{\text{noise}},$$

где $\mathbf{I}_{\text{noise}}$ – единичная матрица размером $KN \times KN$, D_{noise} – дисперсия шума.

Корреляционные матрицы ШП и УП представим как кронекеровское произведение матриц пространственной корреляции и матриц коэффициентов временной корреляции

$$\mathbf{R}_{\text{wb}} = \mathbf{R}_{\text{wb s}} \otimes \mathbf{r}_{\text{wb t}} = \mathbf{R}_{\text{wb s}} \otimes \mathbf{I}_K,$$

где $\mathbf{R}_{\text{wb s}} = \sum_{m=1}^M D_{\text{wb m}} \mathbf{W}_{\text{wb m}} \mathbf{W}_{\text{wb m}}^H$, $\mathbf{r}_{\text{wb t}}(k_1, k_2) = e^{-\alpha_{\text{wb t}} |k_1 - k_2|}$, $\mathbf{W}_{\text{wb m}}$ – направляющий вектор m -го источника ШП, $\alpha_{\text{wb t}} > 1$ – коэффициент затухания временной корреляции, k_1, k_2 – номера отсчетов во времени

Аналогичным образом для описания пространственной корреляции УП используем угловой спектр мощности $p(\alpha, \gamma)$, задающий распределение интенсивности помехи по угловым координатам α, γ

$$\mathbf{R}_{\text{nb}} = \mathbf{R}_{\text{nb s}} \otimes \mathbf{r}_{\text{nb t}},$$

где $\mathbf{r}_{\text{nb t}}(k_1, k_2) = e^{-\alpha_{\text{nb t}} |k_1 - k_2|}$, $\mathbf{R}_{\text{nb s}}$ – матрица пространственной корреляции УП.

Пространственная корреляция УП в элементах антенной решетки практически незначительная, если УП во времени изменяется очень медленно, то ее матрицы пространственной и временной корреляции может быть приняты равными $\mathbf{R}_{\text{nb s}} = D_{\text{nb}} \mathbf{I}_N$, $\mathbf{r}_{\text{nb t}} = \mathbf{E}_K$ и корреляционная матрица УП имеет вид:

$$\mathbf{R}_{\text{nb}} = \mathbf{R}_{\text{nb s}} \otimes \mathbf{r}_{\text{nb t}} = D_{\text{nb}} \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{E}_K,$$

Так как помехи и шумы статистически независимы друг от друга, то

$$\mathbf{R}_V = \mathbf{R}_{\text{wb}} + \mathbf{R}_{\text{nb}} + \mathbf{R}_{\text{noise}}.$$

Оптимальная обработка детерминированного сигнала на фоне гауссовских помех по критерию максимизации отношения сигнал-помеха (ОСП) имеет вид:

$$\underline{z} = \underline{\mathbf{W}} \underline{\mathbf{Y}},$$

где $\underline{\mathbf{W}}$ – вектор весовых коэффициентов размером $1 \times NK$, $\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{S}^H \mathbf{R}_V^{-1}$.

С помощью пространственной обработки (ПО) осуществляется подавление ШП, а с помощью временной обработки (ВО) осуществляется подавление УП. Рассмотрим обработку сигнала на фоне суммы ШП и шума с матрицей корреляции

$$\underline{\mathbf{R}}_{\text{wb}} = (\underline{\mathbf{R}}_{\text{wb s}} + D_{\text{noise}} \mathbf{I}) \otimes \mathbf{I}.$$

Оптимальный вектор весовой обработки равен $\underline{\mathbf{W}}_{\text{opt}} = \underline{\mathbf{W}}_{\text{wb s}} \otimes \underline{\mathbf{s}}_0^H$,

где $\underline{\mathbf{W}}_{\text{wb s}} = \underline{\mathbf{V}}_S^H (\underline{\mathbf{R}}_{\text{wb s}} + D_{\text{noise}} \mathbf{I})^{-1}$ – вектор пространственной обработки. Результат обработки сигнала равен:

$$\underline{z} = (\underline{\mathbf{W}}_{\text{wb s}} \otimes \underline{\mathbf{s}}_0^H) \underline{\mathbf{Y}} = \sum_{k=1}^K s_{0k}^* \sum_{n=1}^N w_{\text{wb s } n} y_{-1+(n-1)K}.$$

Рассмотрим обработку сигнала на фоне суммы УП и шума с матрицей корреляции $\underline{\mathbf{R}}_{\text{nb}} = (D_{\text{nb}} \mathbf{I} + D_{\text{noise}} \mathbf{I}) \otimes \frac{1}{D_{\text{nb}} + D_{\text{noise}}} (D_{\text{nb}} \mathbf{E} + D_{\text{noise}} \mathbf{I})$. Оптимальный вектор весовой обработки равен:

$$\underline{\mathbf{W}}_{\text{opt}} = \underline{\mathbf{W}}_S^H \otimes \underline{\mathbf{W}}_{\text{nb t}},$$

где $\underline{\mathbf{W}}_{\text{nb t}} = \frac{1}{D_{\text{noise}}} \underline{\mathbf{s}}_0^H \left(\mathbf{I} - \frac{q_{\text{nb}}}{1 + K q_{\text{nb}}} \mathbf{E} \right)$ – вектор временной обработки. В результате алгоритм линейной обработки сигнала имеет вид:

$$\underline{z} = \sum_{k=1}^K w_{\text{nb t } k} \sum_{n=1}^N w_{\text{S } n}^* y_{-1+(n-1)K}.$$

При обработке сигнала сначала осуществляется ПО в фильтре с вектором весовых коэффициентов

$$\underline{\mathbf{W}}_S = \{w_{S1}, w_{S2}, \dots, w_{SN}\} = \underline{\mathbf{W}}_S^H (\underline{\mathbf{R}}_{\text{wb s}} + \underline{\mathbf{R}}_{\text{noise}})^{-1},$$

где учитываются только матрицы пространственной корреляции ШП и шума. Так как ШП имеет сильную пространственную корреляцию, то она значительно ослабевает на этапе ПО.

На этапе ВО производится подавление УП, которая имеет слабую пространственную корреляцию и незначительно подавляется на этапе ПО. Весовые коэффициенты для реализации ВО равны

$$\underline{\mathbf{W}}_t = \{w_{t1}, w_{t2}, \dots, w_{tK}\} = \underline{\mathbf{s}}_0^H (\underline{\mathbf{R}}_{\text{nb t}} + \underline{\mathbf{R}}_{\text{noise}})^{-1}.$$

Таким образом, при реализации разделяющей обработки учитываются характерные особенности помех с целью их эффективного подавления. Для записи алгоритма обработки в матричном виде представим пространственно-временные отсчёты наблюдаемого процесса в матричном виде $K \times N$, тогда $\underline{\mathbf{Y}}$ – наблюдаемый процесс. Результат ПО будет иметь вид $1 \times N$ вектор строки

$$\underline{\underline{\mathbf{Y}}}_s = \underline{\underline{\mathbf{W}}}_s \underline{\underline{\mathbf{Y}}} = \left\{ \sum_{n=1}^N w_{s n} y_{nk}, k=1, \dots, K \right\},$$

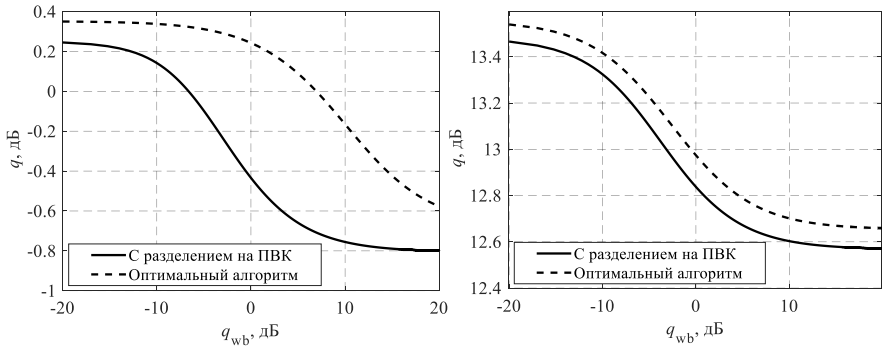
а после проведения ВО получим

$$\underline{z} = \underline{\mathbf{W}}_t \underline{\underline{\mathbf{Y}}}_s = \underline{\mathbf{W}}_t \left(\underline{\underline{\mathbf{W}}}_s \underline{\underline{\mathbf{Y}}} \right)^T = \sum_{k=1}^K \underline{w}_t k \sum_{n=1}^N w_{s n} y_{nk}.$$

Пусть при обработке сигнала сначала осуществляется ВО входного процесса $\underline{\underline{\mathbf{Y}}}$ в фильтре с вектором весовых коэффициентов $\underline{\mathbf{W}}_t$, одинаковым для всех пространственных каналов, после проведения ПО получим

$$\underline{z} = \underline{\mathbf{W}}_s \underline{\underline{\mathbf{Y}}}_t = \underline{\mathbf{W}}_s \left(\underline{\underline{\mathbf{Y}}} \underline{\mathbf{W}}_t^T \right) = \sum_{n=1}^N w_{s n} \sum_{k=1}^K y_{nk} \underline{w}_t k.$$

Полученное выражение совпадает с результатом работы алгоритма, в котором сначала производится ПО, а затем ВО. На рисунке 1 приведены зависимости ОСП от отношения широкополосная помеха-шум для постоянного и переменного во времени сигналов при условии, что корреляция помех учитывается как в оптимальном, так и в квазиоптимальных алгоритмах.



а) для постоянного сигнала б) для переменного сигнала
Рисунок 1 – Эффективность оптимального и квазиоптимального алгоритмов

В третьей главе рассмотрены подходы и выполнена постановка задачи к построению и исследованию адаптивных алгоритмов пространственно-временной компенсации комплекса ШП и УП помех. Выполнен синтез алгоритм фазовой адаптации на фоне комплекса ШП и УП помех. Разработаны модифицированные алгоритмы фазовой адаптации, обеспечивающие устойчивую сходимость весовых коэффициентов к глобально оптимальному решению. Разработаны адаптивные алгоритмы с разделением обработки на пространственную и временную компоненты, основанный на критерии максимума ОСП.

В алгоритмах фазовой адаптации, изложенных в работах Щапова Ю. М. и Курганова В. В., Джигана В. И., сигнал на выходе АР представлен в виде суммы сигнала от определенного n -го элемента АР и суммы сигналов от всех остальных $N-1$ элементов: $\underline{z} = E_n e^{j\varphi_n} + E_\Sigma e^{j\varphi_\Sigma}$, $n=1,2,...,N$, где E_n – амплитуда сигнала n -го элемента АР, E_Σ – амплитуда сигналов всех остальных $N-1$ элементов АР.

При значениях фаз n -го элемента АР $\varphi_n = \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$ или $\varphi_n = \{0^\circ, 90^\circ, 270^\circ\}$ амплитуды выходного сигнала E_0, E_{90}, E_{180} или E_0, E_{90}, E_{270} формируются путем сложения вектора сигнала n -го элемента АР $\underline{E}_n = E_n e^{j\varphi_n}$ после фазовой адаптации и вектора всех других элементов $\underline{E}_\Sigma = E_\Sigma e^{j\varphi_\Sigma}$. Амплитуду выходного сигнала АР можно представить в виде:

$$E_\varphi = \sqrt{E_\Sigma^2 + E_n^2 + 2E_\Sigma E_n \cos(\varphi_0 + \varphi_n)},$$

где φ_0 – некоторое начальное значение фазы.

На основе работ Щапова Ю. М. и Курганова В. В., Джигана В. И. разработан алгоритм фазовой адаптации путем изменения трех значений фаз $\varphi_n = \{0^\circ, 90^\circ, 270^\circ\}$ и измерения мощности на выходе.

$$\varphi_0 = \arctg\left(\frac{E_{90}^2 - E_{270}^2}{E_{90}^2 + E_{270}^2 - 2E_0^2}\right) - \pi \begin{cases} 0, E_{90}^2 + E_{270}^2 - 2E_0^2 > 0 \\ 1, E_{90}^2 + E_{270}^2 - 2E_0^2 < 0 \end{cases}.$$

Значение фазы $\varphi_{\text{opt}} = 180^\circ - \varphi_0$ обеспечивает минимальную мощность помех на выходе АР.

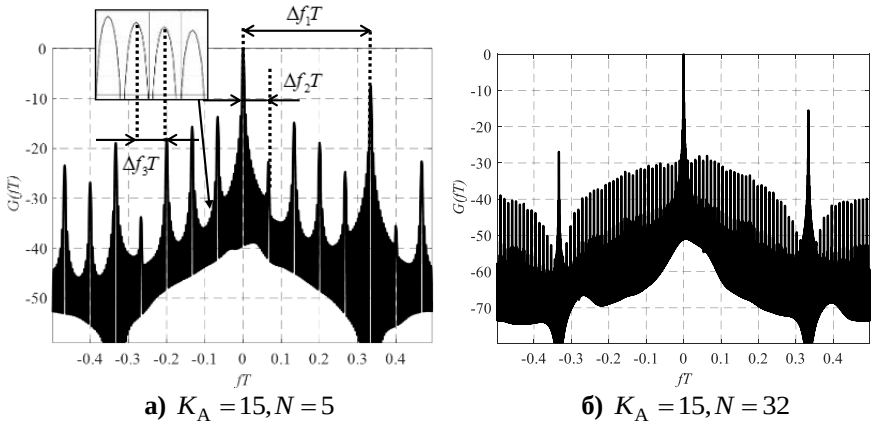


Рисунок 2 – Спектры узкополосной помехи на выходе АР

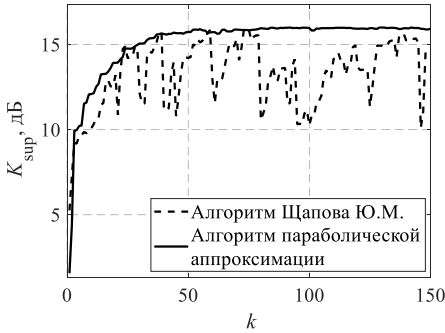


Рисунок 4 – Коэффициенты подавления широкополосной помехи АР одной реализации адаптивного процесса при количестве выборки для измерения мощности $N_{sample} = 1200$

В связи с ошибками при измерении выходной мощности использование только трёх фазовых значений не позволяет точно определить положение минимума.

Реализован модифицированный алгоритм фазовой адаптации антенной решётки, использующий метод параболической аппроксимации минимума. Особенностью подхода является то, что оценка положения оптимальной фазы осуществляется по трем точкам измеренной мощности: центральной фазе φ_{min} , соответствующей минимуму среди дискретного перебора, а также двум фазам, смещенным на $\pm\delta$ относительно этого минимума φ_+ , φ_- (рисунок 3). Пусть для n -го элемента адаптивной антенной решётки задан дискретный набор фазовых сдвигов:

$$\varphi_i = 2\pi i / N_\varphi, \quad i = 0, 1, \dots, N_\varphi - 1,$$

где N_φ — количество фаз в решетке поиска.

После оценки мощности сигнала $P(\varphi_i)$ на всех фазах φ_i , выбирается фаза, соответствующая минимуму мощности:

$$\varphi_{min} = \arg \min_{\varphi_i} P(\varphi_i).$$

Для уточнения положения истинного минимума используется аппроксимация кривой зависимости мощности от фазы с помощью параболы. Значение φ_{min}

На рисунке 2 приведены нормированные спектры алгоритмов фазовой адаптации и для разного числа полных циклов адаптации K_A , числа элементов АР N и число опытов $N_{exp} = 10^4$.

Результаты анализа показывают, что изменение весовых коэффициентов при адаптации для подавления ШП влияет на характеристики УП. В спектре УП появляются максимумы на частотах $f_1 T = 1/3$, $f_2 T = 1/3N$ и $\Delta f_3 T = 1/3NK_A$, а также увеличивается уровень спектра между этими максимумами.

выбирается среди 10 равномерно-распределенных фазовых точек, расчет оптимального значения фазы проводится по трем точкам $\varphi_{\min}$, $\varphi_{\min} - \delta$, $\varphi_{\min} + \delta$:

$$P_0 = P(\varphi_{\min}), P_- = P(\varphi_{\min} - \delta),$$

$$P_+ = P(\varphi_{\min} + \delta).$$

На основе этих трех значений строится система уравнений для аппроксимации квадратичной функции:

$$P(\varphi) \approx a\varphi^2 + b\varphi + c,$$

Оптимальное фазовое значение, соответствующее минимуму параболы, находится как:

$$\varphi_{\text{opt}} = -b/2a, \text{ при } a > 0,$$

$$\varphi_{\text{opt}} = \varphi_{\min}, \text{ при } a \leq 0.$$

На рисунке 4 приведены коэффициенты подавления ШП помехи K_{sup} АР одной реализации при $N_{\text{sample}} = 1200$.

На рисунке 5 представлены нормированные диаграммы направленности АР при фазовой адаптации алгоритмом Щапова Ю. М. и алгоритмом параболической аппроксимации с одинаковым количеством выборок для измерения мощности N_{sample} .

Одним из недостатков методов фазовой адаптации является многоэкстремальная целевая функция значений выходной мощности от фаз весовых коэффициентов. Оптимальное значение фазового распределения и мощность помех на выходе АР зависят от начального значения фаз. Для получения глобального минимума помех предлагается модификация алгоритма фазовой адаптации, использующая многократное формирование начальных условий в каждом из K_1 периодов полной адаптации и последующее определение минимальной мощности и оптимального значения фазы, которое обеспечивает наименьшую мощность помех на выходе АР.

Начальное фазовое распределение может формироваться различными способами:

– с помощью датчика равномерно распределенных независимых случайных чисел

$$\varphi_0(k) = \{\varphi_{0n}(k) = 2\pi \times \text{rand}, n = 1, \dots, N\}, k = 1, \dots, K_1,$$

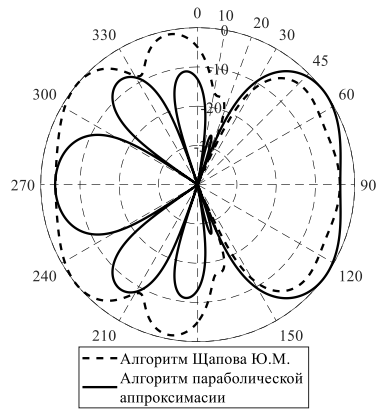


Рисунок 5 – Нормированные диаграммы направленности АР при применении различных алгоритмов фазовой адаптации

– равномерно с априорно заданным шагом $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{b}$ путем перебора всех воз-

можных $K_A = b^N$ комбинаций фаз элементов АР

$$\Phi_0(k) = \left\{ \varphi_{0n}(k) = \frac{\pi}{N} + \frac{2\pi}{N} k_n, \quad n=1, \dots, N, \quad k_n=1, \dots, b \right\}, \quad k=1, \dots, K_1.$$

Для каждого из K_1 вариантов начального фазового распределения производится полный цикл адаптации и определяется фазовое распределение в соответствии с алгоритмами выше поставленными фазовой адаптации $\Phi(k) = \{\varphi_n(k), \quad n=1, \dots, N\}$ и мощность помех $P_{\text{out}}(k) = E_{\text{out}}^2(k)$. После этого определяется оптимальное фазовое распределение:

$$\Phi_{\text{opt}} = \{\varphi_{\text{opt}n}, \quad n=1, \dots, N\} = \arg \min_{k=1, \dots, K_1} P_{\text{out}}(k).$$

На рисунках 6 и 7 приведены зависимости коэффициентов подавления ШП от номера цикла полной адаптации и от отношения мощностей ШП к шуму. Для немодифицированного алгоритма $K_A = 100$ и для модифицированного алгоритма при $K_1 = 10$ и $K_2 = 10$, а число отсчетов при измерении мощности помехи равно $N_{\text{sample}} = 10$.

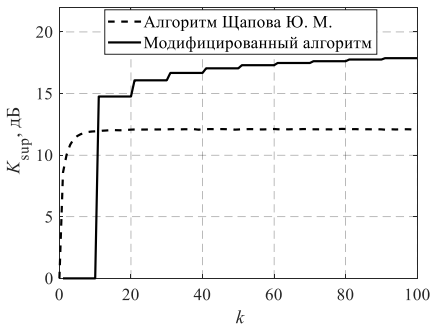


Рисунок 6 – Коэффициент подавления широкополосной помехи АР

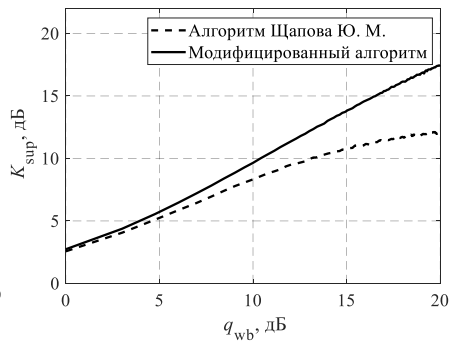


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента подавления широкополосной помехи от отношения широкополосная помеха-шум

Для реализации алгоритмов обработки на фоне комплекса помех с разделением на ПВК по критерию максимума ОСП, представленных во второй главе, используются методы прямого и рекуррентного обращения корреляционной матрицы.

Оценка корреляционной матрицы $\hat{\mathbf{R}}_V$ методом максимального правдоподобия равна выборочному среднему по выборке размером K :

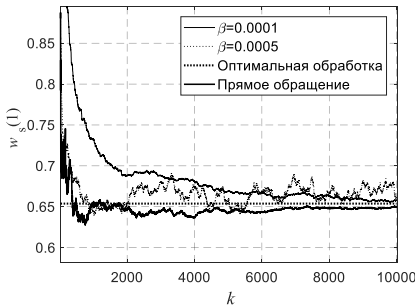
$$\hat{\mathbf{R}}_V = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{v}(k) \mathbf{v}^H(k),$$

где $\mathbf{v}(k)$ – вектор помех.

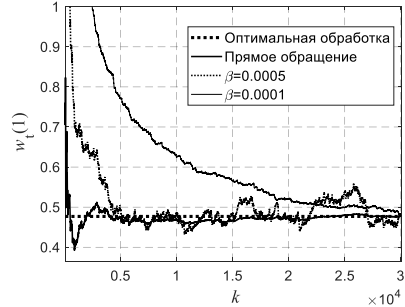
Рекуррентный алгоритм с регулируемой памятью для вычисления обратной матрицы пространственной корреляции имеет вид:

$$\hat{\mathbf{R}}_V^{-1}(k+1) = \frac{1}{(1-\beta)} \hat{\mathbf{R}}_V^{-1}(k) - \frac{\beta}{(1-\beta)(1-\beta) + \beta} \frac{[\hat{\mathbf{R}}_V^{-1}(k) \mathbf{v}(k+1)] [\mathbf{v}^H(k+1) \hat{\mathbf{R}}_V^{-1}(k)]}{[\mathbf{v}^H(k+1) \hat{\mathbf{R}}_V^{-1}(k) \mathbf{v}(k+1)]}$$

где $0 \leq \beta \leq 1$ — коэффициент памяти рекуррентного алгоритма обращения, который отражает влияние предыдущего отсчета наблюдаемого процесса на последующее значение оценки обратной матрицы.



а) пространственная обработка



б) временная обработка

Рисунок 8 – Весовые коэффициенты оптимальной, адаптивной пространственных и временных обработок

На рисунке 8 представлены зависимости весовых коэффициентов, полученных методами прямого и рекуррентного обращения матрицы, от объема обучающей выборки.

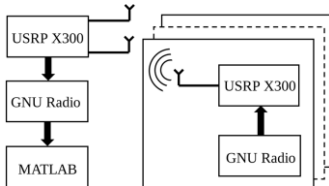
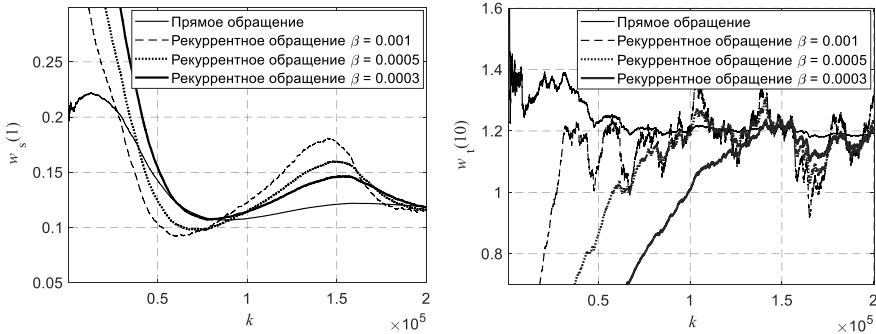


Рисунок 9 – Структурная схема экспериментального стенда

В четвертой главе рассмотрены вопросы технической реализации разработанных алгоритмов пространственно-временной компенсации комплекса ШП и УП, а также приведены результаты экспериментальной верификации их эффективности в условиях, приближенных к реальным.

Проанализированы типовые источники ошибок, включая дискретизацию сигналов, ограниченную разрядность аналого-цифрового преобразователя. Представлены принципы и схемные решения по реализации алгоритмов на аппаратных и программных средствах, включая моделирование в среде MATLAB, GNU Radio, реализацию на программируемой логической интегральной схеме (рисунок 9).

На рисунке 10 представлены весовые коэффициенты адаптивной пространственных и временных обработок разными методами.



а) пространственная обработка

б) временная обработка

Рисунок 10 – Весовые коэффициенты адаптивной пространственных и временных обработок разными методами

В заключении диссертационной работы сформулированы основные результаты:

1. Анализ линейного оптимального алгоритма пространственно-временной обработки сигналов на фоне комплекса ШП и УП. Анализ эффективности по критерию максимума ОСП показал, что использование широкополосного, знакопеременного во времени сигнала приводит к увеличению отношения сигнал-помеха на выходе по сравнению с узкополосным, постоянным во времени сигналом.

2. Разработан квазиоптимальный алгоритм с разделением на ПВК. Установлено, что использование квазиоптимального алгоритма позволяет независимо настраивать весовые коэффициенты пространственной и временной обработок, а также уменьшить общее число весовых коэффициентов с NK до $N + K$ при незначительном, 0,5...1 дБ снижении отношения сигнал-помеха по сравнению с оптимальным алгоритмом.

3. Алгоритмы фазовой адаптации с периодической настройкой фаз искажают спектр узкополосной помехи, уменьшают потенциальную помехоустойчивость. Разработан алгоритм фазовой адаптации параболической аппроксимации с большой устойчивостью к ошибке в измерении мощности. Разработан модифицированный алгоритм фазовой адаптации, который обеспечивает сходимость выходной мощности помехи к глобальному минимуму. Выигрыш от

применения модифицированного алгоритма по сравнению с немодифицированным алгоритмом увеличивается с увеличением числа циклов адаптации и достигает 5...7 дБ и более.

4. Проведена разработка и выполнен анализ эффективности адаптивных алгоритмов обработки сигналов с разделением на ПВК по критерию максимума ОСП.

5. Проведен экспериментальная проверка алгоритмов адаптивной обработки сигналов на фоне комплекса ШП и УП помех с разделением на ПВК. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность и практическую реализуемость предложенных решений, что открывает возможности их применения в современных радиотехнических системах, работающих в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Паршин, Ю.Н. Повышение помехоустойчивости радиотехнических систем с помощью модифицированного алгоритма фазового адаптации / Паршин Ю. Н., Буй К. В. // Цифровая обработка сигналов. – 2023. – №2. – С. 44–48.

2. Паршин, Ю.Н. Эффективность алгоритмов обработки сигналов с разделением на пространственный и временной компоненты на фоне комплекса помех / Паршин Ю. Н., Буй К. В. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, – 2024. – вып. 3(55). – С. 43–52.

3. Паршин, Ю. Н. Адаптивные алгоритмы обработки сигналов с разделением на пространственный и временной компоненты на фоне комплекса широкополосной и узкополосной помех / Паршин Ю. Н., Буй К. В. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – №91. – С. 3–12.

Публикации в изданиях, индексируемых SCOPUS:

4. Parshin, Yu. Spatial Suppression of Interference Complex using Phase Adaptation Algorithms / Parshin Yu., Bui Q. V. // 2023 25th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). – IEEE. – 2023. – Pp. 1–4.

5. Parshin, Yu. Linear Optimal Signal Processing in the Presence of Narrowband and Wideband Spatio-Temporal Interference Complex. 2024 / Parshin Yu., Bui Q. V. // 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). – IEEE. – 2024. – Pp. 1–6.

Другие статьи и материалы конференций:

6. Буй К.В. Разработка имитационной модели устройства защиты от пассивных помех // Новые информационные технологии в научных исследованиях / Материалы XXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Т. 1. – 2021. – С 289–291.

7. Буй К.В. Влияние фазовой адаптации на спектр помехи в антенной решетке // Новые информационные технологии в научных исследованиях / Материалы XXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Т. 1. – 2022. – С. 126–128.

8. Буй К.В. Спектральные характеристики пассивных помех при наличии мультипликативных искажений / Сборник трудов V Международного научно-технического форума Современные технологии в науке и образовании – СТНО–2022. – Т. 1. – Рязань. – 2022. – С. 99–105.

9. Буй К.В. Влияние мультипликативных искажений на спектральные характеристики узкополосной помехи / Материалы VIII научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань: РГРТУ. – 2022. – С. 49–50.

10. Буй К.В. Исследование вариантов пространственно-временной обработки сигналов на фоне комплекса помех / Материалы VIII научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань: РГРТУ. – 2022. – С. 42–43.

11. Паршин, Ю.Н. Спектральные характеристики узкополосной помехи в антенной решетке с фазовой адаптацией / Паршин Ю. Н., Буй К. В. // Сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции Радиолокация, навигация, связь. – Т. 5. – Воронеж. – 2022. – С. 326–332.

12. Паршин, Ю.Н. Алгоритм оптимальной линейной обработки дискретных сигналов на фоне комплекса широкополосных и узкополосных помех / Паршин Ю. Н., Буй К. В. // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции Актуальные проблемы современной науки и производства. – Рязань. – 2023. – С. 67–73.

13. Паршин, Ю.Н. Пространственное подавление помех с помощью модифицированного алгоритма фазовой адаптации / Паршин Ю. Н., Буй К. В. // Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции Радиолокация, навигация, связь. – 2023. – Т.5. – С. 21–25.

14. Буй К.В. Модифицированный алгоритм подавления помех. / Информационные технологии. радиоэлектроника. телекоммуникации (ITRT–2023) // Сборник тезисов докладов X международной заочной научно-технической конференции. – Тольятти. – 2023. – С. 21–25.

15. Буй К.В. Взаимосвязь устройств пространственного и временного подавления комплекса помех / Инновационные технологии в науке и технике // Сборник материалов и научно-практической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань. – 2023. – С. 68–71.

16. Паршин, Ю.Н. Квазиоптимальная обработка сигнала на фоне комплекса узкополосной и широкополосной пространственно-временных помех / Паршин Ю. Н., Буй К. В. // Сборник трудов XXX Международной научно-

технической конференции Радиолокация, навигация, связь (RLNC-2024). – 2024. – Т.4. – С. 392–400.

17. Буй К. В. Адаптивный пространственно-временной алгоритм подавления помех / Новые информационные технологии в научных исследованиях // Материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2024. – С. 129–130.

18. Буй К.В. Адаптивная пространственно-временная обработка сигналов на фоне комплекса помех / Информационные технологии. радиоэлектроника. телекоммуникации (ITRT–2024) // Сборник тезисов докладов XI международной заочной научно-технической конференции. – Тольятти. – 2024. – С. 462–469.

19. Буй К.В. Эффективность цифровой обработки сигналов на фоне комплекса помех / Материалы XI научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань: РГРТУ. – 2025. – С. 42.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

20. Буй К. В., Паршин Ю. Н. Программа для анализа мощности помех на выходе пространственного компенсатора помех с фазовой адаптацией: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2024686444. – Зарегистр. 01.11.2024; опубл. 08.11.2024. – 6 кБ. – Яз. программирования: MATLAB R2021a. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

21. Буй К. В., Паршин Ю. Н. Программа для расчета отношения сигнал–помеха квазиоптимальным алгоритмом с разделением пространственной и временной обработки: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2024686774. – Зарегистр. 01.11.2024; опубл. 12.11.2024. – 6 кБ. – Яз. программирования: MATLAB R2021a. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

БУЙ Куок Вьонг

**ЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-
ВРЕМЕННОЙ КОМПЕНСАЦИИ КОМПЛЕКСА
ШИРОКОПОЛОСНОЙ И УЗКОПОЛОСНОЙ ПОМЕХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____. Формат бумаги 60 × 84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.