

На правах рукописи



Мухранова Дарья Николаевна

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СИГНАЛЫ И ИХ СТАТИСТИЧЕСКАЯ
ОБРАБОТКА В ПРИСУТСТВИИ АКТИВНЫХ ПОМЕХ В ШИРОКОПОЛОСНЫХ
СИСТЕМАХ С АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ

Специальность 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Спектор Александр Аншелевич**,
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:** **Тяпкин Валерий Николаевич**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра радиотехнических войск ВКС военного учебного центра имени Героя России генерала армии В. П. Дубынина, профессор (г. Красноярск);

Шпилов Сергей Эдуардович
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра радиофизики, профессор (г. Томск).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (г. Новосибирск).

Защита диссертации состоится «06» декабря 2022 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.347.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр-кт Карла Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан «___» октября 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



М.А. Степанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Заметным направлением развития радиотехнических систем (РТС) на современном этапе являются исследования и разработки систем, использующих широкополосные сигналы, антенные решетки (АР), цифровые технологии формирования сигналов и их обработки при радиоприеме. На повестку дня выдвигаются задачи создания цифровых антенных решеток (ЦАР), при использовании которых преобразование принимаемых сигналов в цифровую форму осуществляется в аналого-цифровых преобразователях, располагаемых на АР.

Степень разработанности темы исследования. Большое число работ российских (Ратынский М.В., Воскресенский Д.И., Журавлев А.К., Лукошкин А.П., Поддубный С.С., Григорьев В.А. и др.) и зарубежных (Слюсар В.И., Melvin W. L., Scheer J. A., Monzingo R.A., Miller T.W. и др.) ученых посвящены исследованию подходов к адаптивной обработке сигналов в РТС с АР, а также вопросов цифрового диаграммообразования.

Основным принципом формирования диаграммы направленности является установление максимума диаграммы направленности антенны (ДНА) в направлении на цель с подавлением помех, поступающих с других направлений, путем формирования глубоких провалов в ДНА. Адаптивная обработка сигналов позволяет изменять вид диаграммы направленности так, чтобы оптимальным образом учесть различия в пространственном расположении источников полезного сигнала и помех. Самым распространенным является подход, который сводится к нахождению оптимальных весовых коэффициентов для элементов антенной решетки, для чего необходимо оценивать и затем обращать корреляционную матрицу помех и шумов. На практике это сопряжено с такими проблемами, как большой размер корреляционных матриц и их плохая обусловленность. Для решения этой проблемы имеются различные подходы, например, разбиение ЦАР на подрешетки, или использование ортогональных преобразований.

Существующие тенденции развития РТС направлены на применение широкополосных сигналов (ШПС), что обусловлено необходимостью повышения скорости передачи информации в системах связи, разрешающей способности и точности при измерении координат и параметров объекта в системах радиолокации и радионавигации.

Теория адаптивной обработки сигналов широкополосных сигналов успешно применяется при воздействии узкополосных помех. Но адаптивная пространственная обработка, ориентированная на узкополосный сигнал, не может применяться для подавления широкополосных помех, поскольку нули ДНА смещаются при изменении частоты. В связи с этим необходимо оптимизировать

параметры решётки не только по углу прихода помехи, но и по частоте. При этом проблема большого размера корреляционной матрицы помех остается актуальной.

В силу пространственного распределения источников помех и сигналов, а также пространственного положения элементов антенной решетки, в данной работе предлагается использовать представление сигналов и помех как пространственно-временных функций, зависящих от времени и пространственных координат. На основе данного подхода к описанию сигналов и помех строятся методы обработки при радиоприеме.

Таким образом, рассматривается актуальная задача разработки и исследования иных подходов к обработке широкополосных сигналов в РТС с ЦАР, опирающихся на многомерный характер формируемых процессов на антенной решетке.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью работы является исследование применения принципов многомерной обработки при обнаружении широкополосных импульсных сигналов в радиотехнических системах с цифровыми антенными решетками на фоне активных помех.

Для достижения заявленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ математического описания сигналов и помех в радиотехнических системах с цифровыми антенными решетками как многомерных пространственно-временных процессов, в том числе спектральный анализ пространственно-временных сигналов.

2. Исследование корреляционных характеристик спектров пространственно-временных помех.

3. Разработка алгоритмов пространственно-временной обработки при обнаружении сигналов на фоне активных помех и тепловых шумов для случаев приема полностью известного сигнала и сигнала со случайной начальной фазой.

4. Разработка моделирующей программы для проведения статистической оценки качества предложенных алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов на фоне активных помех и тепловых шумов.

5. Проведение сравнительного анализа эффективности разработанных и известных алгоритмов обработки при обнаружении сигналов с использованием методов статистического моделирования.

Объектом исследования в диссертационной работе являются пространственно-временные сигналы в РТС с ЦАР.

Предмет исследования – алгоритмы обработки многомерных сигналов при обнаружении в РТС с ЦАР в условиях активных помех.

Методы исследований основаны на теории статистической радиотехники, методах математического моделирования, математической статистики и вычислительного эксперимента. При этом используются средства современной информатики и вычислительной техники, включая среду моделирования MATLAB.

Научная новизна результатов заключается в следующем:

1. Развито математическое описание сигналов и помех в радиотехнических системах с цифровыми антенными решетками как многомерных пространственно-временных процессов.

2. Проведен спектральный анализ пространственно-временных сигналов, основанный на непрерывной аппроксимации дискретной антенной решетки.

3. Статистическое исследование корреляционных характеристик спектров пространственно-временных помех показывает, что отсчеты пространственно-временной помехи в спектральной области можно считать некоррелированными.

4. Предложен и исследован алгоритм многомерной обработки сигналов на основе принципа максимального правдоподобия, при этом в качестве входных данных используется пространственно-временной спектр пространственно-временных сигнала и помехи.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением современного математического аппарата с учетом влияющих факторов и заданных ограничений. Достоверность научных положений и выводов базируется также на непротиворечивости применяемых моделей и методов, а также близости теоретических и экспериментальных результатов исследований.

Теоретическая значимость результатов проведенных исследований состоит в разработке и исследовании многомерной модели сигнала, формируемого на антенной решетке, как многомерного пространственно-временного процесса. Многомерная модель сигнала позволяет адекватно описывать реальные физические явления, на основе которых созданы алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов на фоне активных помех в радиотехнической системе с антенной решеткой, учитывающие тип сигнала, количество источников активных помех и их размещение в пространстве и тепловые шумы элементов антенной решетки.

Практическая ценность. Результаты диссертационной работы послужили основой для разработки методов и алгоритмов пространственно-временной обработки когерентно-импульсных ШПС в радиолокационных системах (РЛС) обзора, направленных на повышение эффективности подавления активных помех. Данные исследования вошли в разработанную в ходе научно-исследовательской работы программу, моделирующую РЛС обзора. Практическая ценность результатов исследования подтверждается соответствующими актами, представленными в приложении А к работе. Автор диссертационной работы за полученные результаты отмечена премией мэрии города Новосибирска в сфере науки и инноваций в номинации «Лучший молодой исследователь в образовательных организациях высшего образования» в 2022 году. Работа была поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований 2019-2021гг., проект №19-37-90069 «Методы и алгоритмы пространственно-временной

обработки сигналов в локационных системах с распределенными приемными элементами».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическое описание сигналов и помех в радиотехнических системах с цифровыми антенными решетками как многомерных пространственно-временных процессов является адекватным описанием реальных физических явлений на антенной решетке, которое может служить основой для разработки алгоритмов обработки радиосигналов при воздействии внешних помех и тепловых шумов. Для различных углов прихода колебания положение активной области пространственно-временного спектра различно, что справедливо для сигналов несущей, промежуточной и «нулевой» частот. Такое различие является основой для разделения сигналов, и, в том числе, для борьбы с помехами.

2. Статистическое исследование корреляционных характеристик спектров пространственно-временных помех показывает, что отсчеты пространственно-временной помехи в спектральной области можно считать некоррелированными, а корреляционную матрицу помехи при построении алгоритма многомерной обработки в спектральной области на основе метода максимального правдоподобия – диагональной.

3. Алгоритм многомерной обработки сигналов на основе принципа максимального правдоподобия, реализуемый в спектральной области, обладает простотой реализации, поскольку не требует оценки и обращения корреляционной матрицы помехи, а ограничивается оцениванием спектральных интенсивностей. Разработанный алгоритм показывает высокую эффективность подавления активных помех.

Апробация работы. Основные результаты обсуждались на Международных конференциях и всероссийских конференциях: International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – Altai, 2020, 2021; 1 International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE). – Novosibirsk, 10 – 11 December 2020; VI Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020). – Самара, 26-29 мая 2020; XV Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ). – Новосибирск, 2018, 2019, 2021; Международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации, посвящённая памяти профессора Г. С. Шарыгина, – «Шарыгинские чтения» – Томск, 2019, 2021; Всероссийская конференция с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM). – Бердск, 2019, 2021; Всероссийская конференция "Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций". – Самара, 14-16 мая 2019.

Публикация результатов работы. По теме диссертации автором опубликовано 25 работ, в том числе 4 статьи из перечня изданий, рекомендованных ВАК, 8 работ в изданиях, включенных в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, 2 главы в коллективной монографии. Получены 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Постановка задач исследования осуществлялась совместно с научным руководителем. Все основные практические исследования выполнены автором диссертационной работы самостоятельно.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и 2 приложений. Основная часть работы изложена на 187 страницах машинописного текста, включает 54 рисунка, 5 таблиц, список литературы содержит 113 наименований, в том числе 25 работ автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, представлены ее цель и задачи, научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность, краткое содержание.

В первой главе представлен аналитический обзор подходов к обработке сигналов в РТС с антенными решетками, направленных на борьбу с активными помехами (АП), ориентированных на применение пространственной обработки и пространственно-временной обработки. Рассмотрен вопрос цифрового диаграммообразования при приеме ШПС.

Проанализированы достоинства и выявлены ограничения существующих решений, а также сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Рассмотрена структурная схема приема-передающего модуля (ППМ) ЦАР, на совокупности которых происходит формирование сигнала как пространственно-временного процесса. Определены основные точки схемы ППМ для анализа сигналов в них.

Во второй главе проведен анализ математического описания сигналов и помех в РТС с ЦАР как многомерных пространственно-временных процессов, в том числе спектральный анализ пространственно-временных сигналов (ПВС).

Факторизация ПВС, формируемого на антенной решетке, на пространственную и временную составляющие не возможна, если такой сигнал является широкополосным в пространственном смысле, т.е. нельзя пренебречь разностью фаз принятых комплексных огибающих на элементах ЦАР. Для таких случаев следует рассматривать сигналы и помехи как пространственно-временные процессы, а для их обработки использовать алгоритмы многомерной обработки.

В главе дан анализ пространственно-временных сигналов и их многомерных спектров в различных точках ППМ: сигналы высокой, промежуточной и «нулевой»

частот, что необходимо для обоснования применяемого метода математического моделирования и построения алгоритма. Вопрос формирования ПВС раскрыт для линейной цифровой антенной решетки (ЛЦАР) и плоской цифровой антенной решетки (ПЦАР).

В качестве ЛЦАР рассматривается набор линейно и эквидистантно расположенных в пространстве антенных элементов. На ЛЦАР формируется двумерное пространственно-временное колебание, и оно зависит от двух аргументов, представляющих собой временной аргумент t текущего времени и пространственный аргумент i , соответствующий номеру антенного элемента:

$$u_i(t) = U(t - (i-1)\tau_0) \cos(\omega_0(i-1)\tau_0 + \psi(t - (i-1)\tau_0)), \quad (1)$$

где $U(\cdot)$ и $\psi(\cdot)$ – законы амплитудной и фазовой модуляции сигнала, $\tau_0 = d \sin \theta / c$ – временная задержка между двумя соседними элементами ЛЦАР, $d = \lambda/2$ – расстояние между элементами, θ – угол прихода сигнала, ω_0 – несущая частота, $i = \overline{1, I}$, I – количество элементов ЛЦАР.

Заменяя целочисленные сдвиги $(i-1)$ в (1) непрерывными x/d , совпадающими в узловых точках с дискретными, произведена замена пространственной переменной i на непрерывную координату x :

$$u(t, x) = U\left(t - \frac{x}{d}\tau_0\right) \cos\left[\omega_0\left(t - \frac{x}{d}\tau_0\right) + \psi\left(t - \frac{x}{d}\tau_0\right)\right], \quad (2)$$

где $x = [-x_m/2, x_m/2]$, x_m – линейный размер антенны. Физический смысл имеет непрерывно-дискретный сигнал.

В каждый момент времени на ЛЦАР имеется квазигармонический пространственный сигнал, и при последовательном попадании на линейку пространственно-распределенных элементов различных участков широкополосного сигнала в дискретном спектре пространственного сигнала видно только одну частоту. Данное свойство удобно при наличии нескольких сигналов помехи с разными направлениями прихода и справедливо при рассмотрении пространственно-временного колебания.

Особенностью двумерного ПВС является то, что сигналы на каждом элементе антенной решетки одинаковы, отличаясь временными задержками τ_x :

$$u(t, x) = u(t - \tau_x) \quad (3)$$

где $\tau_x = \frac{x \sin(\theta)}{c} = k_t x$, $k_t = \sin \theta / c$ – коэффициент трансформации, зависящий от направления прихода сигнала.

Применяя двумерное преобразование Фурье к (2), с учетом (3), получаем спектр ПВС:

$$\begin{aligned}\dot{U}(\omega_t, \omega_x) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-x_m/2}^{x_m/2} u(t, x) e^{-j\omega_t t - j\omega_x x} dt dx = \\ &= \dot{U}(\omega_t) x_m \frac{\sin[(\omega_t k_t + \omega_x) x_m / 2]}{(\omega_t k_t + \omega_x) x_m / 2} e^{-j(\omega_t k_t + \omega_x) x_m / 2},\end{aligned}\quad (4)$$

где $\dot{U}(\omega_t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-j\omega_t t} dt$ – спектр одномерного сигнала $u(t)$, ω_t и ω_x – частоты, соответствующие временным и пространственным колебаниям и называемые временная и пространственная частота.

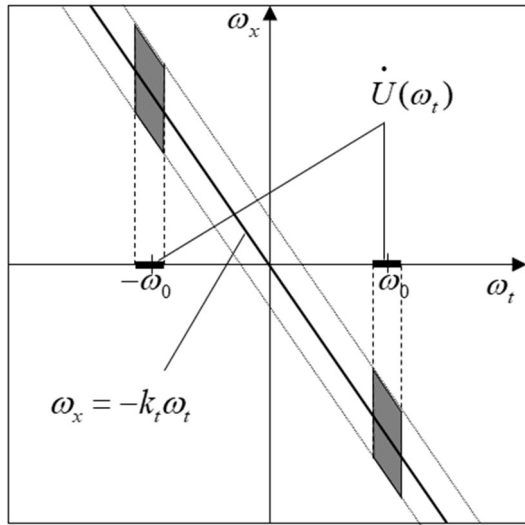


Рисунок 1 – Качественный вид спектра ПВС несущей частоты на ЛЦАР при $\theta > 0^\circ$

Качественный вид двумерного пространственно-временного спектра при $\theta > 0^\circ$ показан на рисунке 1. Множитель вида $\sin(\cdot)/(\cdot)$ в (4) образует отличную от нуля полосу на частотной плоскости вдоль прямой:

$$\omega_x = -k_t \omega_t. \quad (5)$$

Двумерная спектральная функция сосредоточена на пересечении, показанном на рисунке 1 серым цветом.

После преобразования принимаемого сигнала в сигнал промежуточной частоты $\omega_{nc} = |\omega_2 - \omega_0|$, где ω_2 – частота гетеродина, выражение ПВС промежуточной частоты примет вид:

$$u_{nc}(t, x) = U(t - k_t x) \cos[\omega_{nc}(t - k_t x) + \omega_{nc} k_t x - \omega_0 k_t x + \psi(t - k_t x)]. \quad (6)$$

Пространственно-временной спектр (6) определяется выражением:

$$\dot{U}(\omega_t, \omega_x) = \begin{cases} x_m \dot{U}_c(\omega_t) \frac{\sin\left\{\left[(\omega_2 + \omega_t)k_t + \omega_x\right] \frac{x_m}{2}\right\}}{\left[(\omega_2 + \omega_t)k_t + \omega_x\right] \frac{x_m}{2}} e^{-j\left[(\omega_2 + \omega_t)k_t + \omega_x\right] \frac{x_m}{2}}, & \text{при } \omega_t > 0, \\ x_m \dot{U}_c(\omega_t) \frac{\sin\left\{\left[(\omega_2 - \omega_t)k_t - \omega_x\right] \frac{x_m}{2}\right\}}{\left[(\omega_2 - \omega_t)k_t - \omega_x\right] \frac{x_m}{2}} e^{-j\left[(\omega_2 - \omega_t)k_t - \omega_x\right] \frac{x_m}{2}}, & \text{при } \omega_t < 0. \end{cases} \quad (7)$$

где $\dot{U}_c(\omega_t) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \cos[\omega_{nc} t + \psi(t)] e^{-j\omega_t t} dt$ – одномерный спектр синфазной составляющей квадратурных компонент сигнала промежуточной частоты.

На рисунке 2 изображен качественный вид пространственно-временного спектра сигнала промежуточной при $\theta > 0^\circ$. Множитель вида $\sin(\cdot)/(\cdot)$ в (7) образует отличную от нуля полосу на частотной плоскости вдоль прямых линий:

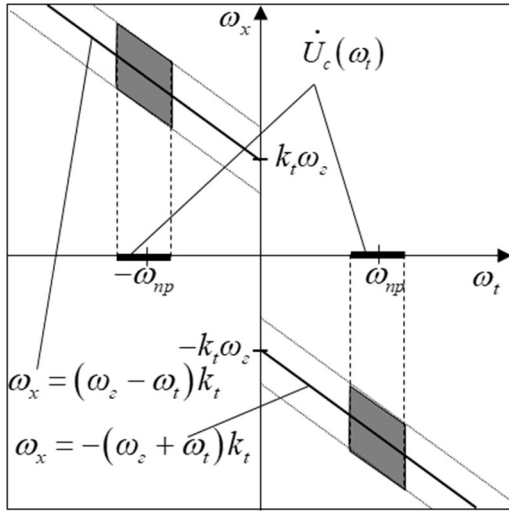


Рисунок 2 – Качественный вид спектра ПВС промежуточной частоты на ЛЦАР при $\theta > 0^\circ$

$$\begin{aligned} \omega_x &= -(\omega_2 + \omega_t)k_t, \text{ при } \omega_t > 0, \\ \omega_x &= (\omega_2 - \omega_t)k_t, \text{ при } \omega_t < 0, \end{aligned} \quad (8)$$

Двумерная спектральная функция сосредоточена на пересечении, показанном на рисунке 2 серым цветом.

Выражение ПВС промежуточной частоты (6) можно представить в виде:

$$u_{нч}(t, x) = \text{Re} \left\{ \dot{U}(t, x) e^{j\omega_m t} \right\}. \quad (9)$$

В (9) $\dot{U}(t, x)$ – комплексная огибающая пространственно-временного сигнала:

$$\dot{U}(t, x) = A(t, x) + jC(t, x),$$

где квадратурные компоненты определяются выражениями:

$$\begin{aligned} A(t, x) &= U(t - k_t x) \cos[\psi(t - k_t x) - \omega_0 k_t x], \\ C(t, x) &= U(t - k_t x) \sin[\psi(t - k_t x) - \omega_0 k_t x]. \end{aligned} \quad (10)$$

Квадратурные компоненты (10) являются низкочастотными ПВС и полностью характеризуют сигналы и высокой, и промежуточной частот. Это позволяет при изучении свойств сигналов и помех, в том числе методами моделирования, а также при обработке принимаемых сигналов использовать метод комплексных огибающих. Как и для высокочастотных сигналов и сигналов промежуточной частоты, фазовые сдвиги $\psi_x = \omega_0 k_t x$ на различных элементах ЛЦАР, зависящие от угла прихода сигнала θ , и формирующиеся на несущей частоте ω_0 , присутствуют и в сигнале «нулевой» частоты. Ввиду наличия данных фазовых сдвигов сигналы вида (10) на разных элементах ЛЦАР не являются точными копиями, в отличие от сигналов несущей частоты.

Пространственно-временной спектр комплексной огибающей определяется как:

$$\dot{G}(\omega_t, \omega_x) = \dot{G}(\omega_t) x_m \frac{\sin\left[\left((\omega_0 + \omega_t)k_t + \omega_x\right)x_m/2\right]}{\left((\omega_0 + \omega_t)k_t + \omega_x\right)x_m/2} e^{-j\left((\omega_0 + \omega_t)k_t + \omega_x\right)x_m/2}, \quad (11)$$

где $\dot{G}(\omega_t) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) e^{j\psi(t) - j\omega_t t} dt$ – одномерный спектр комплексной огибающей.

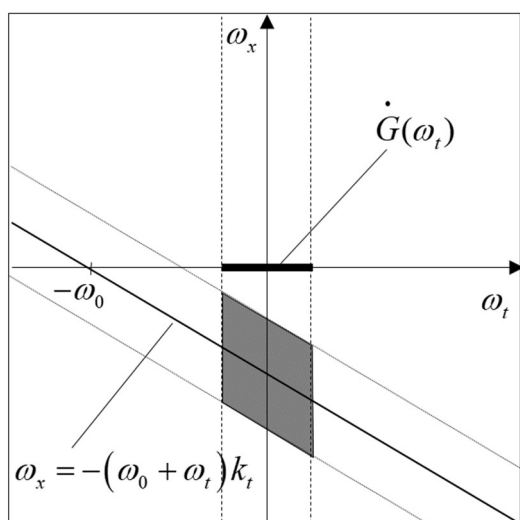


Рисунок 3 – Качественный вид спектра ПВС «нулевой» частоты на ЛЦАР при $\theta > 0^\circ$

На рисунке 3 изображен качественный вид пространственно-временного спектра сигнала промежуточной частоты при $\theta > 0^\circ$. Множитель вида $\sin(\cdot)/(\cdot)$ в (11) образует отличную от нуля полосу на частотной плоскости вдоль прямой линий:

$$\omega_x = -(\omega_0 + \omega_t)k_t. \quad (12)$$

Двумерная спектральная функция сосредоточена на пересечении, показанном на рисунке 3 серым цветом.

Ширина полос вдоль прямых (5), (8) и (12) определяется размером антенны x_m , а положение на плоскости – углом прихода волны θ . Чем больше размер антенны x_m ,

тем меньше ширина пространственного спектра сигнала. Как видно из рисунков 1–3, для различных углов прихода колебания положение активной области спектра различно, что является основой для разделения сигналов, и в том числе для борьбы с помехами.

Рассмотрен вопрос формирования пространственно-временного колебания для антенной решетки на примере ПЦАР. Для описания ее геометрии используется двумерная декартова система координат, и сигнал и помеха становятся функциями трех независимых переменных t, y, z . Процесс формирования сигнала на ПЦАР аналогичен формированию ПВС на ЛЦАР.

Основная ориентация в обработке, развиваемая в данной работе, направлена на ее реализацию в многомерной частотной области, поэтому исследованы корреляционные характеристики комплексного спектра пространственно-временных помех (ПВП), формируемых на ЛЦАР и ПЦАР. Это включает в себя получение оценок автокорреляционных функций вещественной и мнимой составляющих спектров двумерных и трехмерных ПВП несущей, промежуточной и «нулевой» частот, а также функции взаимной корреляции этих составляющих. При переходе от пространственно-временного колебания к его многомерному спектру отсчеты помехи в спектральной области можно считать некоррелированными, а корреляционную матрицу помех при построении алгоритма многомерной обработки в спектральной области на основе метода максимального правдоподобия – диагональной, что справедливо как для процессов, формируемых на ЛЦАР, так и для ПЦАР.

В третьей главе разработан алгоритм обнаружения пространственно-временного сигнала, основанный на методе максимального правдоподобия (ММП)

в спектральной области для случаев приема полностью известного сигнала и сигнала со случайной начальной фазой. Такой подход имеет характер корреляционной обработки, выполняемой в данном случае в спектральной области, без обращения и оценивания прямой корреляционной матрицы помех, чего требует классический подход к оптимальной обработке. Алгоритм разработан для ЛЦАР и ПЦАР. Далее приведены выражения для ЛЦАР.

Получено выражение решающей статистики при приеме полностью известного сигнала:

$$Z(\mathbf{U}) = \sum_{n=1}^K \sum_{m=1}^I \frac{(y_{nm} S_{\text{Re}_{nm}} + z_{nm} S_{\text{Im}_{nm}})}{\sigma_{nm}^2}, \quad (13)$$

где $S_{\text{Re}_{nm}}$ и $S_{\text{Im}_{nm}}$ – вещественная и мнимая части спектра ПВС, y_{nm} и z_{nm} – вещественная и мнимая части спектра аддитивной суммы сигнала, помех и тепловых шумов, σ_{nm}^2 – дисперсия наблюдаемых спектральных составляющих помех и тепловых шумов, $n = \overline{1, K}$ и $m = \overline{1, I}$ – дискретные отсчеты частот ω_t и ω_x соответственно, K и I – количество временных и пространственных спектральных отсчетов.

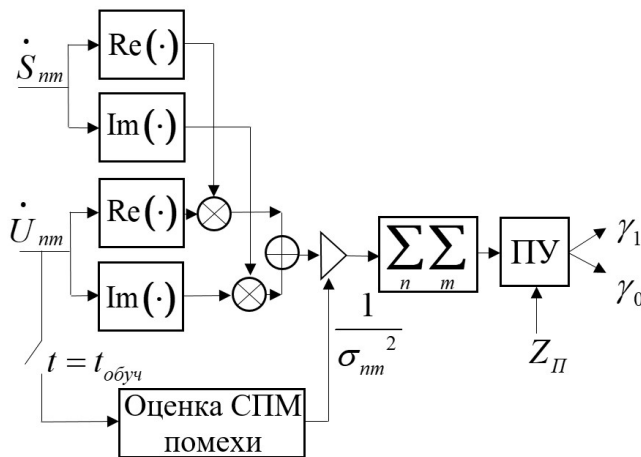


Рисунок 4 – Структурная схема обнаружителя двумерного детерминированного сигнала

Структурная схема приемника ПВС на основе ММП, согласно алгоритму (13), приведена на рисунке 4.

На практике не удастся обеспечить условия для когерентного приема сигналов и один или несколько параметров принимаемого колебания являются неизвестными. Получено выражение решающей статистики при приеме сигнала со случайной начальной фазой:

$$Z(\mathbf{U}) = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^K \sum_{m=1}^I \frac{(y_{nm} S_{\text{Re}_{nm}} + z_{nm} S_{\text{Im}_{nm}})}{\sigma_{nm}^2} \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^K \sum_{m=1}^I \frac{(y_{nm} S_{\text{Im}_{nm}} - z_{nm} S_{\text{Re}_{nm}})}{\sigma_{nm}^2} \right)^2}. \quad (14)$$

Структурная схема приемника пространственно-временного сигнала на основе ММП, соответствующая алгоритму (14) приведена на рисунке 5.

Структурные схемы на рисунках 4 и 5 включают блок преобразования пространственно-временного процесса в спектр путем применения двумерного

преобразования Фурье. Правило приема сигнала основано на сравнении (13) и (14) с порогом Z_{Π} .

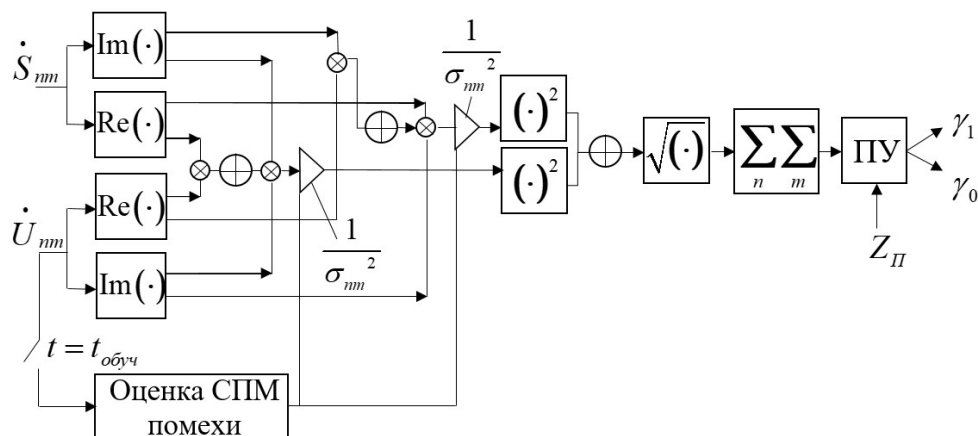


Рисунок 5 – Структурная схема обнаружителя двумерного сигнала со случайной начальной фазой

Выражения (13) и (14) справедливы для пространственно-временных спектров сигналов как высокой и промежуточной частот, так и сигналов «нулевой» частоты.

Для обработки, согласно (13) и (14), необходимо проводить адаптацию по помехам и тепловым шумам, т.е. должна выполняться оценка дисперсии их спектральных составляющих σ_{nm}^2 при отсутствии полезного сигнала, как оценка спектральной плотности мощности аддитивной смеси помех и внутренних шумов.

Разработана моделирующая программа для проведения статистической оценки качества предложенных алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов на фоне активных помех и тепловых шумов. При цифровом моделировании ПВС непосредственное использование выражений, описывающих ПВС, невозможно ввиду того, что коэффициент k_t зависит от угла прихода волны θ и является непрерывной величиной с диапазоном значений $-1 \leq k_t \leq 1$. Вследствие этого величины $k_t d(i-1)$, описывающие задержки сигналов на различных элементах антенны, также принимают значения из непрерывного множества, а использование выражений, описывающих ПВС, потребовало бы применения интерполяционных процедур. Чтобы избежать этого в математической модели на одном из элементов антенны формируется реализация помехи или полезный сигнал с дальнейшей трансляцией спектров на другие элементы антенной решетки.

На рисунке 6 приведены двумерные спектры сигналов и помех «нулевой» частоты, поступающие на ЛЦАР, с направлений прихода для сигнала (1) при $\theta_c = 5^\circ$ и помехи (2) при $\theta_n = 30^\circ$, полученные путем моделирования.

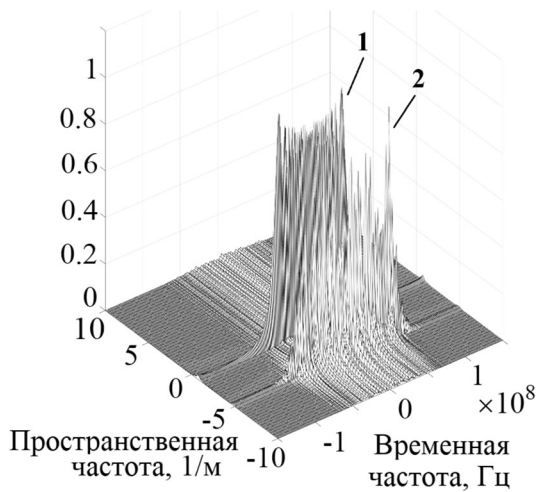


Рисунок 6 – Пространственно-временные спектры ЛЧМ сигнала и помехи; 1 – $\theta_c = 5^\circ$, 2 – $\theta_n = 30^\circ$

комплексных огибающих. В качестве полезного сигнала используется ЛЧМ-импульс, имеющим следующие параметры: несущая частота $f_0 = 3$ ГГц, девиация частоты $f_d = 100$ МГц, длительность $\tau_u = 1$ мкс. Эффективность подавления АП определялась в ходе статистического эксперимента, состоящего из 10^4 испытаний.

Для сравнения эффективности разработанных алгоритмов были определены значения величины улучшения ОСПШ для алгоритма пространственно-временной обработки на основе ММП в областях временной и пространственной переменных (А-ПВ) и для пространственно-временной согласованной фильтрации (А-СФ).

Проведено исследование алгоритмов пространственно-временной обработки на основе ММП для случаев приема полностью известного сигнала согласно (13) (А-СП1) и приема сигнала со случайной начальной фазой (А-СП2) согласно (14) для ЛЦАР с количеством антенных элементов $I = 70$.

На рисунке 7 приведена зависимость улучшения ОСПШ от угла прихода одиночной помехи для ОПШ 0 дБ для разных алгоритмов: (1) – А-СП1, (2) – А-ПВ, (3) – А-СФ. Угол прихода полезного сигнала $\theta_c = 0^\circ$. Из рисунка 7 видно, что наилучшее подавление активных помех происходит при применении обработки в

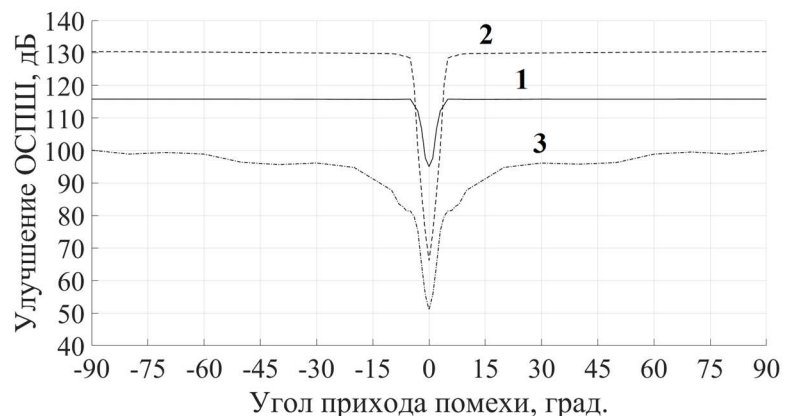


Рисунок 7 – Улучшение ОСПШ по углу прихода одиночной АП: 1 – А-СП, 2 – А-ПВ, 3 – А-СФ

областях временной и пространственных переменных, для чего проводились оценка и обращение корреляционной матрицы смеси помехи и шумов. Для обработки А-СП1 при совпадении угла прихода сигнала и помехи $\theta_c = \theta_n = 0^\circ$ улучшение составляет 95,1 дБ, с дальнейшим ростом до 115,8 дБ при $\theta_n > 5^\circ$. Алгоритм А-СФ показывает более низкие значения и медленный рост при увеличении разницы между углами прихода помехи и полезного сигнала.

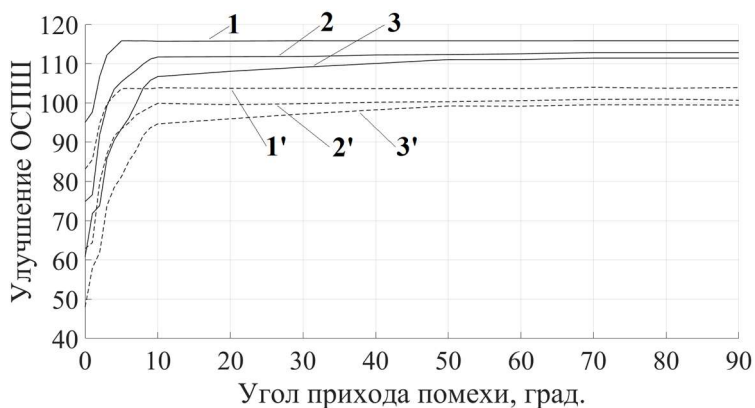


Рисунок 8 – Улучшение ОСПШ по углу одиночной помехи для алгоритмов А-СП1 (линия) и А-СП2 (пунктир):
1 и 1' – ОПШ=0 дБ, 2 и 2' – ОПШ=20 дБ,
3 и 3' – ОПШ=30 дБ

АП, составляет 116.4 дБ. Из рисунка 8 видно, что по мере удаления помехи от направления прихода полезного сигнала улучшение ОСПШ стремится к значению улучшения ОСПШ при обработке. Мощность АП существенно влияет на качество подавления в направлениях, близких к углу прихода полезного сигнала. Так при увеличении мощности помехи на 50 дБ, значение улучшения ОСПШ при $\Delta\theta = \theta_n - \theta_c = 0^\circ$ уменьшается на 59.17 дБ.

Рассмотрена эффективность алгоритмов пространственно-временной обработки на основе ММП для случаев приема полностью известного сигнала (А-СП3) и приема сигнала со случайной начальной фазой (А-СП4) для ПЦАР путем статистического моделирования. Моделирование проводилось для ПЦАР с количеством антенных элементов $I \times J = 70 \times 70$. На рисунке 9 приведена зависимость улучшения ОСПШ для алгоритмов А-СП3 (обозначено непрерывной линией) и А-СП4 (обозначено пунктирной линией) от азимута прихода одиночной помехи α_n для разных значений угла места помехи β_n . Угол прихода полезного сигнала $\alpha_c = 0^\circ$, $\beta_c = 0^\circ$. ОПШ принято равным 0 дБ. Ухудшение подавления помехи при применении алгоритма А-СП4 по сравнению с алгоритмом А-СП3 составляет 12.3 дБ при совпадении значения угла места источника полезного

На рисунке 8 приведена зависимость улучшения ОСПШ для алгоритмов А-СП1 (обозначено непрерывной линией) и А-СП2 (обозначено пунктирной линией) от угла прихода одиночной помехи для разных значений ОПШ. Угол прихода полезного сигнала $\theta_c = 0^\circ$. Улучшение по ОСПШ для А-СП2 на 12 дБ ниже, чем результаты для А-СП1. Улучшение ОСПШ при обработке, т.е. при отсутствии

сигнала и помехи $\beta_c = \beta_n = 0^\circ$. При отклонении на 1° по углу места помехи улучшение ОСПШ возрастает на 9.7 дБ.

Мощность активных помех существенно влияет на качество подавления в направлениях, близких к углу прихода полезного сигнала. Так при увеличении мощности помехи на 50 дБ, значение улучшения ОСПШ при $\Delta\alpha = \alpha_n - \alpha_c = 0^\circ$ и $\Delta\beta = \beta_n - \beta_c = 1^\circ$ снижается на 49.52 дБ. Но при этом уровень подавления повышается на 16 дБ при увеличении разницы по углу места на 1° .

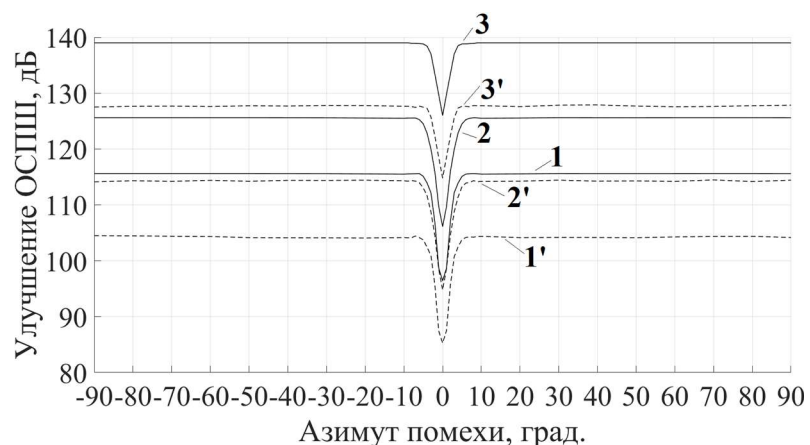


Рисунок 9 – Улучшение ОСПШ по азимуту одиночной помехи для алгоритмов А-СПЗ (линия)

и А-СП4 (пунктир): 1 и 1' – $\beta_n = 0^\circ$,

2 и 2' – $\beta_n = 1^\circ$, 3 и 3' – $\beta_n = 2^\circ$

Показано, что ширина полосы сигнала и, соответственно, ширина полосы помехи не влияет на качество подавления АП.

Количество и места расположения АП V существенно влияют на качество их подавления. При $V < 10$, величина улучшения ОСПШ снижается на 20 дБ. При $V > 20$ улучшение ОСПШ составляет величину не менее 48 дБ.

В приложении А приведены акты о внедрении результатов работы.

В приложении Б приведены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе было исследовано применение принципов многомерной обработки при обнаружении широкополосных импульсных сигналов в РТС с ЦАР на фоне активных помех, основанных на представлении сигналов и помех как пространственно-временных функций, зависящих от времени и пространственных координат.

Поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведен анализ математического описания сигналов и помех в РТС с ЦАР как многомерных пространственно-временных процессов, в том числе спектральный анализ пространственно-временных сигналов.

2. Исследованы корреляционные характеристики спектров пространственно-временных помех.

3. Разработаны алгоритмы пространственно-временной обработки при обнаружении сигналов на фоне активных помех и тепловых шумов для случаев приема полностью известного сигнала и сигнала со случайной начальной фазой.

4. Разработана моделирующая программа для проведения статистической оценки качества предложенных алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов на фоне активных помех и тепловых шумов.

5. Проведен сравнительный анализ эффективности разработанных и известных алгоритмов обработки при обнаружении сигналов с использованием методов статистического моделирования.

Полученные результаты послужили основой для разработки методов и алгоритмов пространственно-временной обработки когерентно-импульсных ШПС, направленных на повышение эффективности подавления активных помех.

В качестве направлений дальнейших исследований уместно расширение теории многомерной обработки для разрешения сигналов, оценки координат и параметров движения объектов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. Зима Д. Н. Пространственно-временная обработка широкополосных сигналов в радиолокационных системах с линейной цифровой антенной решеткой в присутствии активных помех / Д. Н. Зима, А. А. Спектор // Автотметрия. - 2021. – Т. 57, № 2. – С. 4–12.

2. Зима Д. Н. Широкополосные сигналы и их радиоприем в радиосистемах с антенными решетками с применением многомерного преобразования Фурье / Д. Н. Зима // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2022. – № 1 (54). – С. 37–50.

3. Методы пространственно-временной обработки широкополосных сигналов и подходы к их моделированию / В. Н. Васюков, Д. Н. Зима, И. Ф. Лозовский, Ю. В. Морозов, А. А. Мурасев, И. А. Пшеничников, М. А. Райфельд, Д. О. Соколова, А. А. Спектор // Автотметрия. – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 61–68.

4. Зима Д. Н. Пространственно-временная обработка широкополосных сигналов на основе модели линейного предсказания / Д. Н. Зима, Д. О. Соколова, А. А. Спектор // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2020. – № 4. – С. 17–31.

Публикации в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science или Scopus:

5. Zima D. N. Spatiotemporal processing of broadband signals in radars with a linear digital antenna array in the presence of active interference / D. N. Zima, A. A.

Spector // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. - 2021. - Vol. 57, iss. 2. – P. 115-122.

6. Zima D. N. Investigation and modeling of the spatiotemporal signal recorded by the digital antenna array / D. N. Zima, D. O. Sokolova, A. A. Spector // IEEE 22 International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM): proc., Altai Region, 30 June – 4 July 2021. – Novosibirsk: IEEE, 2021. - P. 218-221.

7. Zima D. N. Processing Spatiotemporal Signals Recorded Linear Array / D. N. Zima, A. A. Spektor // 1 International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, 10-11 Dec. 2020. — Novosibirsk: IEEE, 2020. – P. 54-58.

8. Zima D. N. Signal processing in the receiving system with spatially distributed receiving elements / D. N. Zima, D. O. Sokolova, A. A. Spector // CEUR Workshop Proceedings. - 2020. - Vol. 2534: Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes(SDM-2019), Berdsk, 26-30 Aug. 2019. – P. 104-108.

9. Zima D. Spatiotemporal Spectral Analysis of Signals and Active Interference in Radar with Digital Antenna Arrays / D. Zima, A. Spector, D. Sokolova. // VI International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2020): proc., Samara, 26-29 May 2020, Russia: IEEE.

10. Zima D. Spectral Characteristics of Spatiotemporal Signals and Interference on a Linear Antenna Array / D. Zima, A. Spector, D. Sokolova // 21st INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICRO/NANOTECHNOLOGIES AND ELECTRON DEVICES (EDM 2020): proc., Novosibirsk, 29 June – 03 July 2020. – Novosibirsk: IEEE, 2020. – P. 195-199.

11. Investigation of principles of simulation of space-time processing of wideband signals / V. N. Vasyukov, D. N. Zima, I. F. Lozovskiy, Y. V. Morozov, A. A. Murasev, I. A. Pichkov, M. A. Rajfeld, D. O. Sokolova, A. A. Spektor. // CEUR Workshop Proceedings. - 2021. - Vol. 3006: Spatial data processing for monitoring of natural and anthropogenic processes : proc. of the all-Russian conf. with intern. participation (SDM-2021), Novosibirsk. – P. 260-271.

12. Methods of Spatial-Temporal Processing of Broadband Signals and Approaches to Their Modeling / V. N. Vasyukov, D. N. Zima, Y. V. Morozov, A. A. Murasev, I. A. Pshenichnikov, M. A. Rajfeld, D. O. Sokolova, A. A. Spector [et. al.] // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2022. – Vol. 58, iss. 2. – P. 160-166.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

13. Свид. 2020661442 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Моделирование пространственно-временных сигналов с известными параметрами и помех в радиотехнической системе с линейной антенной решеткой. / Д.Н. Зима, А.А.

Спектор, Д.О. Соколова; заяв. и правообл. ФГБОУ ВО НГТУ (RU). – №2020660781; заявл. 24.09.2020; опубл. 24.09.2020.

14. Свид. 2020661443 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Моделирование радиоприема пространственно-временных сигналов с известными параметрами на фоне пространственно-временных активных помех в радиотехнической системе с линейной антенной решеткой. / Д.Н. Зима, А.А. Спектор, Д.О. Соколова; заяв. и правообл. ФГБОУ ВО НГТУ (RU). – №2020660782; заявл. 24.09.2020; опубл. 24.09.2020.

15. Свид. 2020661444 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Моделирование радиоприема пространственно-временных сигналов со случайной начальной фазой на фоне пространственно-временных активных помех в радиотехнической системе с линейной антенной решеткой. / Д.Н. Зима, А.А. Спектор; заяв. и правообл. ФГБОУ ВО НГТУ (RU). – №2020660783; заявл. 24.09.2020; опубл. 24.09.2020.

16. Свид. 2021669854 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для моделирования радиолокационной станции с цифровой антенной решеткой. / Васюков В.Н., Зима Д.Н., Лозовский И.Ф. и др.; заяв. и правообл. ФГБОУ ВО НГТУ (RU). – №2021669393; заявл. 30.11.2021; опубл. 03.12.2021.

Монография:

17. Пространственно-временная обработка широкополосных сигналов в радиолокационных системах с адаптивными цифровыми антенными решетками: монография / В. Н. Васюков, И. Ф. Лозовский, Ю. В. Морозов, А.А. Мурасев, Д.Н. Мухранова и др.; под редакцией И. Ф. Лозовского и А. А. Спектора. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. – 239 с. – (Монографии НГТУ). ISBN 978-5-7782-4743-7.

Публикации в других научных изданиях:

18. Зима Д. Н. Пространственно-временные сигналы в РЛС с плоской антенной решеткой / Д. Н. Зима, А. А. Спектор // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. 15 Всерос. науч. конф. молодых ученых, посвящ. Году науки и технологий в России, Новосибирск, 6–10 дек. 2021 г.: в 10 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – Ч. 6. – С. 98–101.

19. Зима Д. Н. Пространственно-временной спектральный анализ сигналов и активных помех в РЛС с цифровыми антенными решетками / Д. Н. Зима, А. А. Спектор, Д. О. Соколова // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020): сб. тр. по мат. конф.: в 4 т., Самара, 26–29 мая 2020 г. – Самара: Изд-во Самарский университет, 2020. – Т. 3. – С. 808–805.

20. Зима Д. Н. Анализ полезного сигнала и активной помехи на линейной антенной решетке / Д. Н. Зима; [науч. рук. А. А. Спектор] // Наука. Технологии.

Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 2–6 дек. 2019 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – Ч. 6. – С. 82–85.

21. Зима Д. Н. Пространственно-временные сигналы и помехи в радиотехнических системах с цифровыми антенными решетками / Д. Н. Зима, А. А. Спектор. // Шарыгинские чтения. III Международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации: сб. докл., Томск, 29 сен.–1 окт. 2021г. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2021. – С. 146–153.

22. Зима Д. Н. Изучение метода подавления широкополосной помехи пространственно-распределенными элементами / Д. Н. Зима, Д. О. Соколова, А. А. Спектор // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всерос. науч.-техн. конф., Самара, 14–16 мая 2019 г. – Самара: АРТЕЛЬ, 2019. – С. 36–37.

23. Зима Д. Н. Обработка сигналов в приемной системе с пространственно-распределенными приемными элементами / Д. Н. Зима, Д. О. Соколова, А. А. Спектор // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM–2019): сб. тр. Всерос. конф., Бердск, 26–30 авг. 2019г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2019. – С. 103–107.

24. Зима Д. Н. Пространственная обработка сигналов линейной антенной решеткой на основе модели авторегрессии / Д. Н. Зима, А. А. Спектор, Д. О. Соколова // Шарыгинские чтения. I Всероссийская научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации, посвященная памяти профессора Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники академика Германа Сергеевича Шарыгина: сб. докл., Томск, 18–19 сен. 2019г. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2019. – С. 102–106.

25. Зима Д. Н. Исследование метода подавления широкополосной активной помехи в РЛС / Д. Н. Зима, Д. О. Соколова, А. А. Спектор // Наука. Технологии. Инновации: сб. научн. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 3–7 дек. 2018 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 6. – С. 66–68.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ №Р-01335. Подписано в печать 30.09.2022 г.