

На правах рукописи



Ефимов Евгений Николаевич

**Оценка времени задержки циклостационарных
радиосигналов для локализации источников
излучений**

Специальность 05.12.04 —
«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Кузнецов Юрий Владимирович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Сизых Вадим Витальевич**,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Московский технологический университет»,
профессор кафедры КБ-7

Анциперов Вячеслав Евгеньевич,
кандидат физико-математических наук,
Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики»

Защита диссертации состоится « 27 » февраля 2018 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.03,
д.т.н., с.н.с.

 М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современная тенденция создания радиотехнических устройств, применяемых в составе комплексов обработки инфокоммуникационных сигналов со сложными видами модуляции, определяет высокую актуальность разработки алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС), позволяющих осуществлять на основе наблюдений сигналов оценивание заданных информационных параметров с требуемой точностью при выполнении ограничений по объёму вычислительных ресурсов, обусловленных временем выдачи результата или ограничением габаритных размеров и потребляемой мощности радиотехнических систем. Выбор алгоритмов, применяемых при решении задачи оценивания, непосредственно определяется выбором моделей представления рассматриваемого класса сигналов.

В большинстве современных радиолокационных и телекоммуникационных систем обработка сигналов выполняется с использованием моделей, представляющих сигналы в виде реализаций случайных процессов (СП). Хотя такие сигналы нельзя считать периодическими функциями на длинных интервалах наблюдения, они имеют структурную повторяемость. Периодическая структура вносится в эти сигналы намеренно в процессе их формирования для того, чтобы сделать сигналы пригодными для предсказуемой и надёжной работы алгоритмов в системах их обработки. Примерами таких сигналов являются практически все виды сигналов цифровых систем связи и передачи информации и иные сигналы, в которых используются различные виды модуляции. Статистические параметры и характеристики, описывающие сигналы подобного класса, такие как среднее значение и автокорреляционная функция, изменяются во времени по периодическому или почти-периодическому закону. Феномен периодической корреляции в случайных процессах в первые описан в работах отечественного ученого Гладышева Е. Г., позднее в работах Franks L. E. для описания данного феномена был предложен термин «циклостационарность», значительный вклад в развитие теории циклостационарности внесли зарубежные исследователи Franks L. E., Gardner W. A., Spooner C. M., Napolitano A., Brown W. A., Antoni J., Dobre O. A., Derakhshani M. Среди отечественных исследователей методы обработки циклостационарных сигналов начинают находить признание в работах Горячкина О. В., Стоянова Д. Д., Анциперова В. Е. Продолжительный научный интерес исследователей к такому типу сигналов позволил разработать специализированный математический аппарат, применение которого обеспечивает выигрыш в характеристиках верности и точности по сравнению с моделями, не учитывающими пери-

одические свойства принимаемых случайных сигналов.

Одним из возможных подходов к выполнению требований по ограничению объёма затрачиваемых вычислительных ресурсов при решении задач оценивания информационных параметров сигналов является синтез оценщика, реализующего метод максимального правдоподобия (ММП), с использованием нейронных сетей (ИНС) прямого распространения сигнала. В научной литературе данный подход освещен слабо: так в ведущей отечественной монографии Галушкина А. И. и зарубежной Хайкина С. сети данного типа не упоминаются. Применимость ИНС для решения задачи оценивания параметров по ММП впервые продемонстрирована и затем развита зарубежными учеными Ваун Е. , Setiono R. , в настоящее время исследования по данной теме так же ведут Cervellera C. , Maccio D. и Muselli M. D. Возможность использования ИНС для снижения требований к вычислительным ресурсам при решении задач в области радиолокации продемонстрирована в монографии отечественного исследователя Татузова А. Л.

Таким образом, задача оценивания заданных информационных параметров сигналов, обладающих циклостационарными свойствами, с использованием методов цифровой обработки сигналов и изображений и аппарата искусственных нейронных сетей является актуальной.

Целью работы является повышение точности оценивания информационных параметров радиотехнических сигналов за счет применения моделей и методов, описывающих такие сигналы в форме реализаций циклостационарных случайных процессов.

В диссертационной работе в качестве **объекта исследования** рассматриваются обладающие циклостационарными свойствами сигналы, создаваемые радиоэлектронными средствами.

Предметом исследования являются алгоритмы цифровой обработки сигналов, позволяющие проводить оценивание спектральных характеристик циклостационарных сигналов и времени задержки их прихода.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Синтез моделей радиосигналов, являющихся реализациями циклостационарных случайных процессов.
2. Разработка алгоритмов оценивания спектральных характеристик циклостационарных радиосигналов и структурных схем анализаторов циклической спектральной плотности мощности и взаимной циклической спектральной плотности мощности.
3. Синтез алгоритмов оценивания времени прихода циклостационарного сигнала на основе двухчастотных циклических характеристик.

4. Разработка алгоритма формирования оценки направления прихода циклостационарного сигнала на основе обработки его характеристик с использованием искусственных нейронных сетей специальной структуры.
5. Определение статистических характеристик оценок параметров модели на основе разработанных алгоритмов.
6. Экспериментальное исследование разработанных алгоритмов и анализ результатов обработки.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были использованы методы теории сигналов и систем, методы цифрового спектрального анализа, методы цифровой обработки сигналов и изображений, математический аппарат линейной алгебры и теории матричных преобразований, теория вероятностей, математическая статистика и теория случайных процессов, математическое и статистическое моделирование, методы теории оптимизации, методы машинного обучения и прикладного искусственного интеллекта.

Научная новизна:

1. Предложена методика оценки циклостационарных характеристик радиосигналов посредством корреляционного анализа их квадратурных компонент в частотной области.
2. Исследовано изменение компонент взаимных спектральных характеристик циклостационарных сигналов с временной задержкой.
3. Представлено аналитическое описание и получены характеристики точности разработанного алгоритма оценки параметров циклостационарных радиосигналов, обладающего повышенной точностью за счет выделения компонент сигнала с различными характерными циклическими частотами.
4. Предложен способ визуализации циклостационарных характеристик, позволяющий явно выявлять характерные циклические частоты.
5. Предложен детерминированный алгоритм оценки параметров сигналов, оптимально приближающий оценки, получаемые по методу максимального правдоподобия, и реализуемый на основе искусственной нейронной сети специальной топологии.

Практическая значимость результатов работы. Полученные результаты могут быть использованы при разработке быстродействующих алгоритмов, реализуемых в программно-аппаратных комплексах станций радиоразведки и пассивных радиолокационных станций, применяемых для оценивания направления прихода радиосигналов, обладающих циклостационарными свойствами, и пространственных координат их источников. Разработанные алгоритмы позволяют про-

водить селекцию циклостационарных сигналов с различающимися характерными циклическими частотами, селекцию периодических, циклостационарных и стационарных сигналов. Предложенная методика построения искусственной нейронной сети произвольной топологии на основе адаптивных элементов позволяет выполнить синтез быстродействующих алгоритмов оценивания параметров сигналов с априорно известными аналитическими моделями.

Реализация и внедрение результатов работы. Научные и практические результаты работы использованы в процессе выполнения научно-исследовательских работ, поддержанных:

- грантом РФФИ №14-01-31399 мол_а «Синтез искусственных нейронных сетей на основе адаптивных элементов для моделирования сложных технических и экономических систем» (выполнен под руководством диссертанта),
- грантом РФФИ №16-37-00395 мол_а «Формирование оценок местоположения целей в задачах многопозиционной пассивной радиолокации с использованием искусственных нейронных сетей максимального правдоподобия».
- проектом в рамках базовой части госзадания Минобрнауки РФ №8.8502.2017/БЧ «Разработка методов анализа и оценки параметров циклостационарных процессов в информационных системах со сложной обработкой сигналов».

Результаты работы внедрены в учебный процесс.

Достоверность полученных результатов обуславливается корректностью исходных положений и преобразований, использованием апробированного адекватного математического и статистического аппарата, компьютерных программ и логической обоснованностью выводов. Полученные результаты многократно подтверждены экспериментальными исследованиями.

Апробация результатов работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные оценки на:

зарубежных научных конференциях: XXXI-th General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS) (г. Пекин, КНР, 2014); 29-th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (г. Санкт-Петербург, 2014); 17-th International Radar Symposium (г. Краков, Польша, 2016).

отечественных научных и научно-технических конференциях: 10-я, 11-я и 12-я международные конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва, МАИ, 2011, 2012, 2013); 3-й и 4-й международные межотраслевые молодёжные научно-технические форумы «Молодёжь и бу-

дущее авиации и космонавтики» (г. Москва, МАИ, 2011, 2012); 14-я и 19-я международные конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» (г. Москва, ИПУ РАН 2012, 2017); 19-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2013); 70-я и 72-я международные конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (г. Москва, МТУСИ, 2015, 2017); 5-я, 9-я и 10-я конференции «Радиолокация и радиосвязь» (г. Москва 2011, 2015, 2016); научно-практическая конференция молодых учёных и студентов «Инновации в авиации и космонавтике» (г. Москва, МАИ, 2011, 2012, 2013, 2014); 4-ая научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО» (г. Москва, 2013); научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов по тематике «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО», посвященная 80-летию со дня рождения А. А. Леманского (г. Москва, 2015); 42-я и 43-я международные молодёжные научные конференции «Гагаринские чтения» (г. Москва, МАИ, 2016, 2017).

Публикации. По основным результатам выполненных исследований опубликовано 33 работы: 8 статей опубликовано в рецензируемых журналах и изданиях рекомендованных ВАК; 3 доклада в сборниках трудов зарубежных научных конференций, входящих в список изданий, цитируемых WEB OF SCIENCE и SCOPUS; 20 докладов на отечественных научных конференциях; получены 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Повышение точности определения параметров циклостационарных сигналов достигнуто за счет применения модели и методов обработки в спектральной области, рассматривающих сигналы в качестве циклостационарных случайных процессов, по сравнению с моделями, рассматривающими сигналы в качестве стационарных случайных процессов.
2. Возможна селекция сигнала с заданной циклической частотой на фоне шума и помех, при условии отсутствия у последних циклостационарных свойств на этой частоте.
3. Увеличение точности оценки задержки сигнала в 4–6 раз в присутствии белого гауссовского шума достигнуто за счет учета циклостационарных свойств сигнала.
4. Применение искусственных нейронных сетей для получения единичной оценки параметров модели для аппроксимирующего оценщика по методу максимального правдоподобия позволяет снизить

требования к вычислительным ресурсам до 10 раз при увеличении СКО не более чем на 10%.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 172 машинописных страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Иллюстративный материал представлен в виде 72 рисунков и 9 таблиц. Список литературы включает 101 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решения задачи оценивания заданных информационных параметров сигналов, обладающих циклостационарными (ЦС) свойствами с использованием ЦОС во временной и частотной области, применения аппарата ИНС; сформулированы цель и задачи исследований, представлена научная новизна и практическая значимость работы, раскрыта структура диссертации.

В **первой главе** выполнен обзор литературы по материалам отечественных и зарубежных источников в области применения методов ЦОС с целью повышение точности оценивания информационных параметров радиотехнических сигналов. В главе рассмотрены модели и методы, рассматривающие сигналы в качестве реализаций ЦС СП; теория циклостационарности. Рассмотрена задача оценки местоположения пассивных источников радиоизлучения на основе анализа сигналов, наблюдаемых в пространственно-разнесенных точках приема антенной системы. Рассмотрены особенности описания сигналов, наблюдения сигналов в присутствии помех и шума, формирования оценки задержки приходов сигнала с целью дальнейшего решения задачи оценки местоположения. В главе рассмотрена теория нейросетевой обработки информации, топологии ИНС и возможности применения ИНС в радиотехнических системах.

В **второй главе** приведено теоретическое описание ЦС СП и выполнена задача синтеза моделей сигналов, являющихся реализациями ЦС СП. Показано, что использование циклических спектральных плотностей мощности (ЦСПМ) — двухчастотных (биспектральных) характеристик, заданных в форме двумерных функций, зависящих от линейной частоты f и циклической частоты α , — позволяет компактно и наглядно отобразить свойства ЦС сигналов. Приведено теоретическое описание ЦС свойств радиосигналов с амплитудной и амплитудно-импульсной модуляциями. Выведены характеристики для собственных и взаимных спектральных циклических характеристик (ЦХ) радиосигналов на несущей частоте, равной удвоенной центральной частоте, представленных квадратурными компонентами; предложены структурные схемы устройств для оценки собственных и взаим-

ных спектральных характеристик радиосигналов на заданной циклической частоте.

В **третьей главе** дано теоретическое описание методов оценки ЦСПМ сигнала на основе процедур усреднения во временной области при обработке конечных последовательностей отсчётов, получаемых с частотой дискретизации F_s . Показан периодический характер таких ЦСПМ, подробно рассмотрена область основного носителя ЦСПМ, геометрически представляющего собой ромб на двухчастотной области, заданный уравнением $|\alpha| + 2|f| \leq F_s$. Представлено расположение элементов разрешения оценки ЦСПМ на биспектральной плоскости, определены эффективные полосы, занимаемые элементами разрешения в областях частоты и циклической частоты. Разработано два алгоритма оценки собственных и взаимных ЦСПМ: алгоритм $2N$ -БПФ и блочный алгоритм усреднения циклических периодограмм (БАУЦП).

Алгоритм $2N$ -БПФ состоит в формировании оценки ЦСПМ на основе разбиения наблюдаемой реализации во временной области на K перекрывающихся в общем случае интервалов длительности W отсчетов каждый: $\mathbf{SM} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{XL}(k) \circ \mathbf{XR}^*(k)$, где \mathbf{SM} — матрица, элементы которой представляют собой отсчёты ЦСПМ, соответствующие точкам равномерной сетки на двухчастотной плоскости с шагами δf и $\delta \alpha$ по частоте и циклической частоте соответственно, $\mathbf{XR}(k)$ и $\mathbf{XL}(k)$ — циркулянтная и антициркулянтная матрицы размером $2N \times 2N$ каждая, вычисленные для текущих спектров фрагментов сигнала $x[n]$, N — количество отсчетов сигнала, знаком \circ обозначена операция поэлементного умножения матриц (произведения по Адамару). Для исключения пропусков по оси циклической частоты шаг по частоте выбирается следующим образом:

$$\delta f = \frac{\delta \alpha}{2} = \frac{\Delta \alpha}{2} = \frac{1}{2T_x} = \frac{F_s}{2N}, \quad (1)$$

где $\Delta \alpha$ — ширина элемента разрешения по циклической частоте, T_x — интервал наблюдения сигнала. Ключевое отличием $2N$ -БПФ от описанных в литературе методов на основе БПФ состоит в том, что необходимая для полного покрытия двухчастотной плоскости плотность узлов сетки достигается интерполяцией спектра: увеличением числа его отсчётов до удвоенного числа ($2N$) отсчётов, содержащихся в полной реализации сигнала.

С целью преодоления недостатка $2N$ -БПФ, состоящего в увеличении размерности результирующей матрицы \mathbf{SM} с ростом количества анализируемых отсчетов N , был разработан БАУЦП. Алгоритм обеспечивает сохранение одинакового размера элементов разрешения на всей области оценки ЦСПМ и заключается в вычислении оценки

$\tilde{S}_x(f, \alpha)$, представляющей собой интегральную характеристику, получаемую на основе анализа двухчастотной плоскости:

$$\tilde{S}_x(f, \alpha) = \frac{1}{H} \sum_{h=-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \left| \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} X_T(t_k, f + f_h) X_T^*(t_k, f - f_h) \right|, \quad (2)$$

где H — количество дополнительных точек в окрестности заданной циклической частоты, $\delta\alpha$ — шаг по оси циклической частоты, а $X_T(t_k, f)$ — текущие спектры анализируемого сигнала, вычисляемые на основе фрагментов сигналов, наблюдаемых на каждом из подынтервалов, t_k — время начала k -ого подынтервала, K — общее число подынтервалов, приращение $f_h = (\alpha + h\delta\alpha)/2$.

В **четвертой главе** описана разработанная автором процедура оценки времени задержки ЦС сигналов. Приведено описание модели приема сигнала и получено преобразование ЦХ под влиянием задержки во времени. Подробно рассмотрен случай наблюдения полезного сигнала на фоне помехи в двух точках приема (ТП); показано, что в случае отсутствия у помехового сигнала выраженных ЦС свойств на характерных полезному сигналу циклических частотах, осуществима селекция полезного сигнала и корректная оценка его задержки путем анализа срезов ЦСПМ на характерных циклических частотах:

$$\begin{aligned} S_i^\alpha|_{\alpha=\beta}(f) &= |A_i^s|^2 S_s^\alpha|_{\alpha=\beta}(f) \exp(-j2\pi\beta D_i^s) \text{ для } i = 1, 2; \\ S_{12}^\alpha|_{\alpha=\beta}(f) &= A_1^s A_2^s S_s^\alpha|_{\alpha=\beta}(f) \exp(-j2\pi(f + \beta/2) D_s), \end{aligned} \quad (3)$$

где $S_i^\alpha|_{\alpha=\beta}(f)$ и $S_{12}^\alpha|_{\alpha=\beta}(f)$ — соответственно собственные и взаимная ЦСПМ сигналов, наблюдаемых в первой и второй ТП, β — характерная циклическая частота полезного сигнала, A_i^s — коэффициенты ослабления принимаемого полезного сигнала, D_i^s — величины задержки времени прихода сигнала в ТП номер i относительно момента излучения, D_s — величина задержки времени прихода полезного сигнала в первую ТП относительно второй ТП. Оценка задержки \hat{D}_s в частотной области выполнима двумя способами: по паре ЦСПМ $S_1^\alpha|_{\alpha=\beta}$ и $S_2^\alpha|_{\alpha=\beta}$, либо по ВЦСПМ $S_{12}^\alpha|_{\alpha=\beta}$. В первом случае задержка оценивается по отношению ЦСПМ сигналов:

$$\frac{S_2^\alpha|_{\alpha=\beta}}{S_1^\alpha|_{\alpha=\beta}} = \frac{|A_2^s|^2}{|A_1^s|^2} \exp(-j2\pi\beta D_s), \quad (4)$$

во втором случае задержка оценивается по наклону фазовой характеристики ВЦСПМ $S_{12}^\alpha|_{\alpha=\beta}$.

Также в **четвертой главе** представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученных в ходе натуральных экспериментов с помощью цифрового осциллографа Teledyne LeCroy — SDA

813ZiA с полосой пропускания 13 ГГц и частотой дискретизации 40 ГГц. С использованием пары пробников ближнего электромагнитного поля, подключенных к осциллографу, выполнено измерение и запись последовательностей цифрового сигнала побочного электромагнитного излучения платы Atlys Spartan-6 FPGA, работающей в тестовом режиме. Пробники располагались над дорожками шины передачи цифровых данных. В процессе эксперимента выполнялась синхронная запись в двух каналах осциллографа, пробник одного из которых (опорный) оставался неподвижным и располагался непосредственно над областью начала шины данных, т.е. над пространственным источником сигналов. Второй пробник (тестовый) располагался в точках с различными координатами по ходу трассы шины. Для каждого положения тестового пробника, выполнялось наблюдение двух сигналов, один из которых соответствовал сигналу, передаваемому источником в начальной точке шины, другой — сигналу, протекающему в шине на некотором удалении от начала. Описанный в **третьей главе** БАУЦП был применен для анализа сигналов, наблюдаемых в каждом из пробников.

Получена оценка ЦСПМ (рис. 1): количество цифровых отсчетов в выборке $N = 60000$, частота дискретизации $F_s = 10$ ГГц, параметры алгоритма $f_c = 0$, $\Delta F_\alpha = 2F_s$, $N_\alpha = 1024$. Из приведенного рисунка видна характерная область циклической характеристики при $\alpha \approx 667$ МГц. Построение более подробной характеристики позволило уточнить значение характерной циклической частоты $\alpha_0 = 666.659$

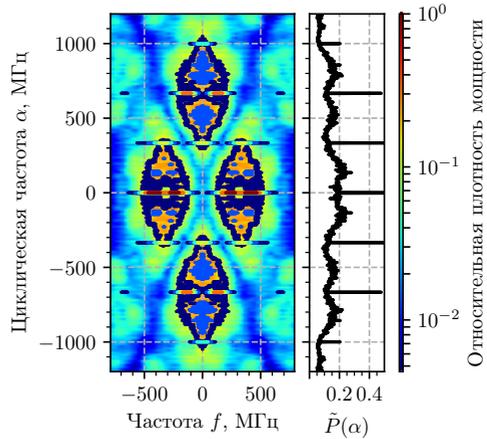


Рис. 1 — Модуль ЦСПМ сигнала, измеренного при помощи пробника электромагнитного поля

МГц по пику предложенной в работе интегральной характеристики $\tilde{P}(\alpha)$. При вычислении оценки ЦСПМ априорная информация о режиме работы устройства и сигнале, передаваемом по шине, не использовалась, однако анализ графиков позволяет сделать обоснованное заключение о типе анализируемого сигнала, он представляет

собой последовательность прямоугольных импульсов со случайной амплитудой, пропущенную через фильтр верхних частот, эквивалентный описанию процессов излучения дорожками платы и приема измерительной системы.

Частота повторения импульсов в последовательности, определенная по ЦСПМ, равна $f_p = 333,329$ МГц, что соответствует номинальной частоте работы цифровой шины, установленной режимом работы платы.

В рамках эксперимента положение второго пробника менялось так, чтобы обеспечить его удаление от источника сигнала по направлению, соответствующему

планарному движению сигнала в проводниках, выполненных производителем платы. После изменения положения пробник фиксировался и выполнялась синхронная запись сигналов, наблюдаемых в канале опорного и перемещенного пробников. Согласно предложенному в данной главе алгоритму выполнена оценка задержки между парами синхронно наблюдаемых сигналов по величине фазового сдвига (4).

Для сравнения были использованы оценки задержки, полученные другими методами: оценка по положению источника излучения, трассы и пробника в плоскости платы

(планарная) и оценка по взаимной корреляционной функции (ВКФ). В качестве примера на рис. 2 представлены модуль и аргумент отношения собственных циклических характеристик для положения №1 пробника. Численные результаты для восьми положений подвижного пробника показаны в таблице 1. Оценки задержек, полученные при

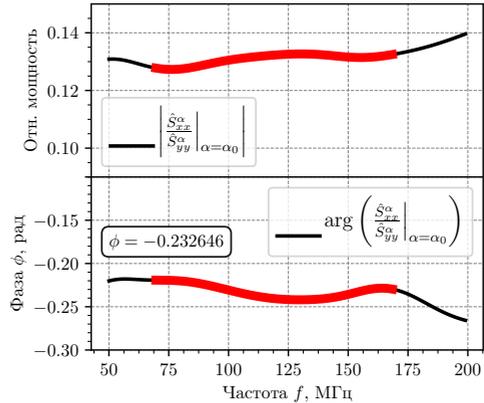


Рис. 2 — Модуль и аргумент отношения ЦСПМ при $\alpha = \alpha_0$

Таблица 1 — Оцененные величины задержки сигналов при различных положения пробника

№	Планарная, нс	ВКФ, нс	ЦСПМ, нс
1	0,046	0,2	0,054
2	0,140	0,3	0,104
3	0,176	0,4	0,132
4	0,210	0,4	0,171
5	0,276	0,5	0,242
6	0,293	0,5	0,308

помощи предложенного блочного алгоритма усреднения циклических периодограмм, упорядочились верно — величина оценки возрастает с удалением подвижного пробника от опорного. В отличие от альтернативных методов точность разработанного алгоритма не ограничена периодом дискретизации.

В **пятой главе** решена задача разработки быстродействующего алгоритма формирования оценок направления прихода радиосигналов на основе обработки их ЦХ с использованием ИНС специальной структуры. Приведено краткое теоретическое описание принципов нейросетевой

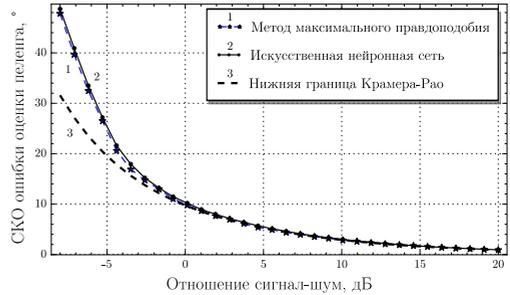


Рис. 3 — Зависимость точности пеленга от ОСШ

обработки цифровых сигналов и предложен подход к построению ИНС произвольной структуры с использованием адаптивных элементов, являющийся развитием диаграмматического метода описания ИНС. Приведено описание оптимального формирования оценки направления прихода сигнала по результатам наблюдения сигнала в нескольких ТП. В качестве альтернативного решения на основе разработанного подхода синтезирована ИНС прямого распространения сигнала, обладающая структурой, подобной многослойному персептрону, но отличающейся от него организацией выходного слоя, в основу которого положен нейрон специального вида, отвечающий физическому смыслу решаемой задачи: топология ИНС приведена в соответствии модели двухточечного приема сигнала и модели применяемой антенной системы. Такая сеть после своего обучения, проводимого по детерминированной схеме на основе модельных данных, позволяет значительно снизить требуемую вычислительную мощность за счет незначительного снижения точности получаемой оценки. В качестве данных, поступающих на вход ИНС предложенной топологии, выступают попарные оценки задержек сигналов в ТП антенной системы, описание метода получения которых приведено в **четвертой главе**, при этом в качестве характеристик сигналов выступают отсчеты ЦСПМ, алгоритм оценки которых предложен в **третьей главе**.

Применение ИНС позволило повысить быстродействие алгоритма формирования оценок направления прихода радиосигналов на основе

обработки их ЦХ. Результаты проведенного численного моделирования показывают, что вычисление единичной оценки с использованием ИНС требует в 12 раз меньше времени по сравнению с максимизацией функции правдоподобия посредством итеративного численного алгоритма поиска экстремума. При этом для вычисляемых посредством ИНС оценок пеленга отсутствует зависимость от его истинного значения в широком диапазоне углов. Снижение точности оценки по сравнению с ММП, как показано на рис. 3, не более 10% в диапазоне ОСШ от -8 дБ до 18 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке алгоритмов ЦОС, обеспечивающих повышение точности оценивания параметров моделей сигналов за счет рассмотрения сигналов как реализаций ЦС СП. Проведенный обзор по материалам отечественных и зарубежных источников в области теории ЦС СП, ЦОС, параметрической обработки сигналов и теории ИНС показал, что выбранное направление исследований является востребованным, актуальным и перспективным. Проведенные в рамках настоящей работы исследования позволили получить следующие основные результаты:

1. Приведено теоретическое описание ЦС свойств и синтезированы модели радиосигналов, являющихся реализациями ЦС СП: радиосигналов с амплитудной и амплитудно-импульсной модуляциями.
2. Выведены аналитические выражения для собственных и взаимных ЦСПМ радиосигналов, представленных квадратурными компонентами и синтезированы структурные схемы систем, формирующих их оценки.
3. Разработано два алгоритма оценки собственных и взаимных ЦСПМ: алгоритм $2N$ -БПФ и БАУЦП, позволяющих выполнить оценку ЦХ на всей двухчастотной плоскости с одинаковой точностью.
4. Предложен подход к обработке сигналов в двухточечной модели приема с целью определения задержки сигнала на основе анализа собственных и взаимных ЦХ.
5. Выполнен анализ точности определения задержки с использованием разработанного алгоритма на примере модели приема сигнала с квадратурно-фазовой манипуляцией на фоне помехи в виде сигнала со ступенчатой квадратурно-фазовой манипуляцией и в присутствии случайного широкополосного гауссовского процесса. Анализ показал возможность оценки задержки в присутствии помехового сигнала, а также увеличения точности оценки задержки в 4-6 раз в присутствии белого гауссовского шума.

6. Проведен анализ применения разработанных алгоритмов обработки циклостационарных сигналов для определения пути распространения информационного сигнала по шине данных цифрового устройства на основе обработки экспериментальных данных, полученных с помощью опытного стенда измерения побочного электромагнитного излучения в ближней зоне.
7. Разработан быстродействующий алгоритм формирования оценок направления прихода радиосигналов на основе обработки их ЦХ с использованием ИНС. Предложена топология ИНС, соответствующая модели двухточечного приема сигнала и модели применяемой антенной системы. Анализ быстродействия предложенного алгоритма показал снижение требуемого для получения единичной оценки времени в 12 раз по сравнению с методами численной оптимизации при снижении точности не более 10% в диапазоне ОСШ от -8 дБ до 18 дБ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах перечня ВАК

1. *Шевгунов Т. Я., Ефимов Е. Н., Жуков Д. М.* Алгоритм 2N-БПФ для оценки циклической спектральной плотности мощности // *Электросвязь*. — 2017. — № 6. — С. 50–57.
2. Оценка направления прихода сигнала с использованием искусственных нейронных сетей максимального правдоподобия / Т. Я. Шевгунов, **Е. Н. Ефимов**, Д. В. Филимонова, Д. И. Воскресенский // *Цифровая обработка сигналов*. — 2017. — № 2. — С. 59–64.
3. **Ефимов Е. Н.**, Шевгунов Т. Я. Циклостационарные модели радиосигналов с квадратурной амплитудной модуляцией // *Электросвязь*. — 2016. — № 11. — С. 61–67.
4. **Ефимов Е. Н.**, Шевгунов Т. Я. Формирование оценки направления прихода сигнала с использованием искусственных нейронных сетей // *Труды МАИ*. — 2015. — № 82. — С. 1–17. — ISSN: 1727-6942. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=58786>.
5. Шевгунов Т. Я., **Ефимов Е. Н.**, Филимонова Д. В. Применение нейронных сетей прямого распространения для формирования оценок параметров по методу максимального правдоподобия // *Радиотехника: «Наукоемкие технологии»*. — 2015. — № 8. — С. 42–47. — ISSN: 1999-8465. URL: <http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr8&art=16727>.

6. **Ефимов Е. Н., Шевгунов Т. Я.** Идентификация точечных рассеивателей радиолокационных изображений с использованием нейронных сетей радиально—базисных функций // *Труды МАИ.* — 2013. — № 68. — С. 1–10. — ISSN: 1727-6942. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41959>.
7. **Ефимов Е. Н., Шевгунов Т. Я.** Построение нейронных сетей прямого распространения с использованием адаптивных элементов // *Журнал радиоэлектроники.* — 2012. — № 8. — С. 1–16. — ISSN: 1684-1719. URL: <http://jre.cplire.ru/win/aug12/4/text.html>.
8. **Ефимов Е. Н., Шевгунов Т. Я.** Разработка и исследование методики построения нейронных сетей на основе адаптивных элементов // *Труды МАИ.* — 2012. — № 51. — С. 1–22. — ISSN: 1727-6942. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29159>.

**Публикации, входящие в международные системы
цитирования WEB OF SCIENCE и SCOPUS**

9. **Efimov E., Shevgunov T.** Radar target identification based on feature extraction performed with RBF artificial neural networks // Proceedings of the General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS) / XXXIth URSI. — Beijing: IEEE, 2014. — Pp. 1–4. — DOI: [10.1109/URSIGASS.2014.6929360](https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929360). ISBN: 978-1-4673-5225-3. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6929360/>.
10. Artificial neural network based signal processing for perspective onboard systems / **E. Efimov**, T. Shevgunov, A. Valaytite, E. Sadovskaya // Proceedings of the 29-th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS — 2014). — St. Petersburg: 2014. — ISBN: 3-932182-80-4.
11. **Efimov E., Shevgunov T., Filimonova D.** Angle of arrival estimator based on artificial neural networks // 17-th International Radar Symposium (IRS). — Krakow: 2016. — ISSN: 2155-5753. ISBN: 978-1-5090-2518-3. DOI: [10.1109/IRS.2016.7497355](https://doi.org/10.1109/IRS.2016.7497355). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7497355/>.

Тезисы и доклады на отечественных конференциях

12. **Шевгунов Т. Я., Ефимов Е. Н., Фильмонова Д. В.** Синтез искусственных нейронных сетей прямого распространения, приближающих оценки максимального правдоподобия // 19-я Международная Конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение» / ИПУ РАН. — Москва: 2017. — С. 818–822.

13. **Ефимов Е. Н., Шевгунов Т. Я.** Оценка циклостационарных характеристик случайных процессов с использованием алгоритма усреднённых циклических периодограмм // 72-я Международная конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (REDS — 2017) / МТУСИ. — Москва: 2017. — С. 87–91.
14. **Ефимов Е. Н., Шевгунов Т. Я.** Оценка времени задержки циклостационарных радиосигналов // XLIII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» / МАИ. — Москва: 2017. — С. 621–622. — ISBN: 978-5-90363-115-5.
15. **Ефимов Е. Н., Шевгунов Т. Я., Фильмонова Д. В.** Применение циклостационарных характеристик при оценке времени запаздывания сигналов // X Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» / Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. — Москва: 2016. — С. 353–358.
16. **Ефимов Е. Н., Шевгунов Т. Я.** Оценка времени задержки приема циклостационарных сигналов в пассивной системе радиолокации при помощи искусственных нейронных сетей // Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» / МАИ. — Т. 1. — Москва: 2016. — С. 559–560.

Результаты интеллектуальной деятельности

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2012610557, *Python NeuralLib for SageMath*. Авторы: Т. Я. Шевгунов, **Е. Н. Ефимов**. Заявка № 2011618648. Дата поступления 17 ноября 2011 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10 января 2012 г.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2015663432, *Фреймворк для синтеза и анализа искусственных нейронных сетей произвольной топологии*. Авторы: Т. Я. Шевгунов, **Е. Н. Ефимов**. Заявка № 2015660235. Дата поступления 28 октября 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 декабря 2015 г.

Тираж 100 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)»

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4
Тел. +7 499 158-43-33, 158-58-70, 158-00-02