

На правах рукописи



Коротков Андрей Владимирович

Частотно-временной анализ сигналов малозаметных радиолокационных станций

Специальность 05.12.14 –
«Радиолокация и радионавигация»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2015

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель

Веремьев Владимир Иванович
кандидат технических наук,
Директор НИИ систем прогнозирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций “Прогноз” СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Быстров Николай Егорович, доктор технических наук, профессор кафедры радиосистем,
Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого.

Официальные оппоненты:

Маковский Вячеслав Николаевич, кандидат технических наук, подполковник, докторант 55 кафедры ВКА им. А.Ф. Можайского.

Ведущая организация

АО «СКАРД-Электроникс», г.Курск.

Защита состоится « 23 » декабря 2015г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета на сайте СПб ГЭТУ www.eltech.ru.

Автореферат разослан « 22 » октября 2015 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 212.238.03

к.т.н., доцент



Шевченко М.Е

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В структуре радиомониторинга система радиотехнического контроля (РТК) играет важную роль при решении задач оперативного слежения за военно-политической обстановкой в сопредельных с РФ государствах и кризисных районах мира, а так же при проведении контртеррористических операций. Динамичность изменения обстановки в контролируемых регионах определяет высокие требования к эффективному функционированию технических средств контроля, входящих в состав таких систем. Важными показателями эффективности их применения являются своевременность, полнота и достоверность получения информации об источниках радиотехнического контроля – радиолокационных станциях (РЛС), применяемых для управления войсками и оружием.

Интенсивное использование ведущими зарубежными странами современных радиолокационных станций (в первую очередь так называемых малозаметных РЛС с низкой вероятностью перехвата), приводит к необходимости совершенствования известных и разработки новых средств РТК. Основными причинами, усложняющими решения этой проблемы, являются: низкое (часто менее 0 дБ) отношение сигнал/шум на входе приемника РТК, многообразие видов модуляции и априорная неопределенность параметров принимаемых излучений.

Важность задачи построения средств обработки широкополосных сигналов с усложненной частотно-временной структурой, привела к тому, что она выделилась в настоящее время в самостоятельную область исследований, в рамках которой предложено ряд формальных процедур и методов.

Общетеоретической основой ее решения являются методы частотно-временного анализа нестационарных сигналов, к классу которых относятся и сигналы МРЛС, а также методы распознавания видов модуляции.

Вместе с тем следует сказать, что эффективных систем обработки сигналов МРЛС в условиях структурной (частотной, фазовой, временной) неопределенности излучений, обеспечивающих комплексное решение задач обнаружения, измерения параметров и распознавания видов модуляции в целом с учетом отмеченных особенностей данного класса нестационарных сигналов, практически не создано.

Таким образом, особенностью радиотехнического контроля на современном этапе является то обстоятельство, что в связи с ростом числа перспективных РЛС с усложненной частотно-временной структурой, возрастающим объемом анализируемой информации и сокращением времени на выработку решения существующие технические средства часто оказываются не в состоянии решать задачи радиомониторинга с требуемой надежностью и оперативностью, а используемый при их модернизации методологический аппарат не в полной мере учитывает специфику ведения РТК в сложной РЭО.

Так, например, в применяемых в настоящее время станциях РТК «Кольчуга» и «Орион» возможности автоматизированной обработки сигналов РЛС ограничены классом простых излучений, а анализ сложных сигналов выполняется в визуально-ручном режиме, что требует значительных временных затрат.

Таким образом, возникает противоречие между необходимостью дальнейшего повышения эффективности ведения РТК за счет совершенствования системы обработки сигналов РЛС и проблематичностью реализации на существующей теоретической и методологической базе автоматизированного аппаратно-программного комплекса обработки малозаметных радиолокационных сигналов, отвечающего современным требованиям.

В связи с этим актуально решение задачи создания научно обоснованных и проверенных на практике методов и алгоритмов обработки сигналов МРЛС и построения на этой базе аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего эффективное решение задач радиотехнического контроля в сложной РЭО.

Цель диссертационной работы состоит в повышении оперативно-технических возможностей средств РТК по добыванию сведений в условиях применения радиолокационных станций с усложненной частотно-временной структурой излучения, приводящих к образованию в точке приема нерегулярного входного потока сигналов с неизвестными параметрами.

Для достижения цели исследований сформулирована **научная задача** по разработке метода частотно-временного анализа сигналов МРЛС в условиях структурной неопределенности излучений. Суть задачи заключается в целостном, системном рассмотрении вопросов обнаружения, измерения параметров и

распознавание видов модуляции сигналов МРЛС с учетом неопределенности их частотной, фазовой и временной структуры и низкого соотношения сигнал/шум.

Для решения научной задачи проведена ее декомпозиция и сформулированы следующие частные задачи.

1. Анализ состояний и перспектив развития радиолокационной техники. Классификация видов модуляции сигналов МРЛС.

2. Разработка частотно-временного представления сигнала МРЛС, учитывающего структурную (частотную, фазовую и временную) неопределенность излучения.

3. Разработка метода и алгоритмов частотно-временного анализа сигналов МРЛС с целью обнаружения, измерения параметров и распознавание вида модуляции.

4. Разработка методики применения метода частотно-временного анализа сигналов МРЛС в общей схеме радиотехнического контроля.

5. Разработка предложений по построению аппаратно-программного комплекса обработки потока радиолокационных сигналов с усложненной частотно-временной структурой, создание программных макетов его основных компонентов, удовлетворяющих основным требованиям по оперативности и достоверности частотно-временного анализа сигналов МРЛС.

Объектом исследования в предлагаемой работе являются излучения МРЛС, процессы обнаружения, измерения их параметров и распознавания видов модуляции, а **предметом** исследования – методы и средства автоматизации этих процессов.

В ходе исследований применялся математический аппарат теории частотно-временного анализа, теории вероятностей и математической статистики, а также методы теории обнаружения, измерения и распознавания образов.

Научная новизна работы определяется тем, что сформулированная в ней задача, имеющая важное оборонное значение для повышения оперативности и достоверности ведения РТК в условиях структурной неопределенности излучений МРЛС, решается с позиций единой методологии, основой которой являются методы частотно-временного анализа, развиваемые в направлении создания формального описания класса нестационарных сигналов (радиолокационных

сигналов МРЛС с усложненной частотно-временной структурой) и метода анализа их частотно-временных параметров. Это позволяет провести теоретическое обобщение «сложившихся» и новых вопросов обработки и предложить систему алгоритмов решения взаимосвязанных задач обнаружения, измерения параметров и распознавания вида модуляции сигналов МРЛС.

В рамках выбранных направлений исследований в диссертации получены следующие новые **научные положения**, определяющие ее теоретическую значимость, которые выносятся на защиту:

1. Частотно-временное представление сигнала МРЛС на основе Фурье преобразования с некогерентным интегрированием.

2. Метод и алгоритмы частотно-временного анализа сигналов МРЛС, основанные на применении Фурье преобразования с некогерентным интегрированием.

3. Методика применения метода частотно-временного анализа сигналов при ведении радиотехнического контроля.

4. Предложения по построению аппаратно-программного комплекса ЧВА сигналов МРЛС.

Представленные научные положения в совокупности являются решением актуальной задачи обработки радиолокационных сигналов МРЛС, внедрение которых вносит существенный вклад в совершенствования средств РТК.

Ценность научных результатов диссертации состоит в дальнейшем развитии теоретических основ частотно-временного анализа нестационарных сигналов в условиях структурной неопределенности излучений.

Практическая значимость работы. Полученные результаты могут быть использованы при разработке требований к средствам добывания и обработки радиолокационных сигналов с усложненной частотно-временной структурой, в специальной работе подразделений радиомониторинга, а так же в учебном процессе военных учебных заведений.

Разработана методика применения метода в работе поста радиомониторинга и разработан комплекс программ частотно-временного анализа сигналов МРЛС.

Реализация. Результаты диссертационных исследований (разработанные в ней метод и алгоритмы частотно-временного анализа реализованы в ОКР «М-ЛС»,

ведущейся в НПФ «Вектор-Н7» ОАО «НИИ «Вектор» (г.Санкт-Петербург). Реализация подтверждена соответствующими актами научно-технических комиссий.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на 4 конференциях, в том числе и международных: Всеармейская научно-практическая конференция «Инновационная деятельность в Вооруженных силах РФ» (г.Санкт-Петербург, 2009, 2010 г.), 13-я Международная научно-техническая конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2011» (г.Москва, 2011 г.), Всероссийская научно-практическая конференция АПСиОИ, ВКА им. А. Ф.Можайского, (г.Санкт-Петербург, 2014).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 статьи в научно-технических журналах (все из списка ВАК), 4 доклада на научно-технических конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников из 112 наименований. Материал изложен на 132 страницах текста. Работа содержит 11 таблиц и 92 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы, направления исследований, положения выносимые на защиту, приводятся краткие сведения о структуре диссертации.

В первой главе в контексте общей проблематики развития системы оперативного радиомониторинга, проводится анализ научно-технических предпосылок постановки задачи исследования, обосновывается ее актуальность и определяются основные направления ее решения.

В настоящее время в США, Великобритании, Канаде и других развитых странах ведутся работы по совершенствованию существующих и созданию новых средств радиолокационного наблюдения на базе новейших научно-технических достижений, а также с использованием уже известных принципов на новом технологическом уровне.

Радиолокационные системы, использующие новые технологии условно подразделяют на две группы: с низкой вероятностью идентификации и с низкой вероятностью перехвата. Первая группа РЛС характеризуется применением сигналов с быстрым изменением от импульса к импульсу несущей частоты и периода повторения импульсов (ППИ). Вторая – отличается специальными мерами снижения мощности передатчика и уровня боковых лепестков, а так же существенным увеличением полосы пропускания. При этом энергия радиоизлучения распределяется достаточно равномерно во всей полосе частот с уровнем, не превышающим мощность собственных шумов радиоприемных устройств. Такие РЛС получили название малозаметных (МРЛС).

В настоящее время существуют МРЛС морского, воздушного и наземного базирования.

Основными видами внутриимпульсной модуляции, применяемыми в МРЛС, являются: частотная модуляция, частотная и фазовая манипуляция и их комбинации.

Изменившиеся условия ведения радиотехнического контроля выдвигают новые требования к их аппаратно-программным комплексам (АПК), главными из которых являются: широкая полоса мгновенного приема (500 - 2000 МГц), высокая чувствительность (90-100 дБ/Вт), различные типы анализируемых сигналов (как импульсные с быстрой перестройкой параметров, так и квазинепрерывные), различные виды модуляции.

Техническими средствами, применяемыми в настоящее время для частотно-временного анализа излучений современных РЛС, являются акустооптический процессор, анализатор на дисперсионной линии задержки и цифровой анализатор.

Их сравнительный анализ показал, что наиболее перспективным средством для анализа нестационарных сигналов (к которым относятся и сигналы МРЛС) является цифровой анализатор, далее по тексту ЧВА. В основе ЧВА лежит реализация оконного (динамического) дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

В тоже время, широкое применение получили различные виды вейвлет-анализа и преобразование Вигнера.

В этой связи актуальной становится задача развития теории частотно-временного анализа (применительно к условиям радиотехнического контроля) в

направление создания усовершенствованного метода ЧВА сигналов МРЛС, с учетом неоднородности их частотной, фазовой и временной структуры и низкого соотношения сигнал/шум.

Во второй главе проводится анализ возможностей различных частотно-временных представлений (ЧВП) сигналов МРЛС на основе преобразований: Фурье, Вигнера и вейвлет. Даны рекомендации по их применению в средствах РТК. С целью развития общей теории частотно-временного анализа разрабатывается формальное описание сигнала МРЛС на основе его частотно-временных представлений.

Спектр, полученный на основе оконного преобразования Фурье часто не обеспечивает требуемого разрешения одновременно по частоте и по времени во всем диапазоне сигнала. Следовательно, для сложных колебаний с широким спектром и низким соотношением сигнал/шум (к этому классу сигналов относятся и излучения МРЛС), применение только данного преобразования не позволит получить набор признаков обеспечивающих требуемую контрастность образов, необходимую для реализации процедур достоверного распознавания.

Для разрешения этого противоречия в современной математике разработан ряд методов анализа таких сигналов.

Вместе с тем, каждое отдельно взятое преобразование имеет свои сильные и слабые стороны. Представляется целесообразным применение комплексного подхода к анализу сигналов МРЛС, который позволил бы компенсировать недостатки одних преобразований достоинствами других.

В первом разделе главы рассматривается частотно-временное представление сигнала МРЛС на основе преобразование Вигнера.

Преобразование Вигнера (ПВ), введенное в 1932 г. Е. Вигнером в задачах квантовой термодинамики и в 1948 г. использованное Дж. Виллем при обработке сигналов, имеет вид:

$$P_V[f(t)] = P_V f(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f\left(\tau + \frac{t}{2}\right) f^*\left(\tau - \frac{t}{2}\right) \exp(-i\omega t) dt \quad (1)$$

ПВ позволяет получить информацию о том, в какие моменты времени и на каких частотах сосредоточена энергия, содержащаяся в исследуемом сигнале, а так

же определить некоторые его параметры, такие как, например, ширина спектра и вид модуляции.

В тоже время, ПВ для любого многокомпонентного сигнала характеризуется наличием интерференционных составляющих с такой же амплитудой, как и у реального сигнала и частотой равной среднему значению двух истинных частот. Вследствие этого необходимо применение специальных алгоритмов фильтрации данных составляющих. В работе сделан вывод о нецелесообразности применения данного преобразования для анализа сигналов МРЛС.

Во втором разделе главы рассматривается частотно-временное представление сигнала МРЛС на основе вейвлет-преобразования.

Вейвлет-преобразование (ВП) основано на алгоритме Мала. Оно выполняется при помощи так называемого банка квадратурно-зеркальных фильтров, посредством которых входной одномерный сигнал раскладывается на высоко и низкочастотные компоненты.

Основным преимуществом данного преобразования является хорошее частотно-временное разрешение и возможность одновременно получить различные его варианты для исследуемого сигнала.

В третьем разделе главы рассматривается частотно-временное представление на основе дискретного преобразования Фурье с некогерентным интегрированием.

Данное частотно-временное представление сигнала МРЛС основывается на некогерентной интеграции выходных отсчетов ДПФ с разными длинами, которую можно представить в виде следующей формулы:

$$I_i(m, k) = \sum_{r=1+L_i(m-1)}^{L_i m} |S(rM, k)|^2, \quad (2)$$

где $I(m)$ – модифицированная спектрограмма l_i – длина интегрирования, $S(rM, k)$ – отсчеты ДПФ, взвешенной окном входной последовательности. Множество таких модифицированных спектрограмм с разными значениями l_i может быть применено для анализа сигналов с низким соотношением сигнал/шум (рисунок 1).

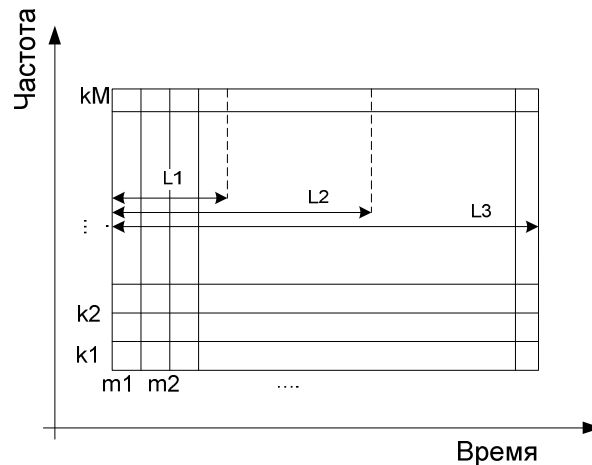


Рисунок 1 – ЧВП на основе ДПФ с некогерентным интегрированием.

Основное отличие от классического подхода частотно-временного представления состоит в том, что в зависимости от входного сигнала, используется несколько интеграторов переменной длины.

Применение усовершенствованного частотно-временного представления позволяет получить выигрыш в соотношении сигнал/шум до 7 дБ. Так как с увеличением длины интеграции ухудшается разрешение по времени, необходима совместная обработка полученных спектрограмм.

Исходя из проведенного анализа, представляется целесообразным совместное применение как ВП, так и ДПФ, что позволит более качественно обнаружить и определить параметры сложных сигналов МРЛС.

Третья глава посвящена разработке метода и алгоритмов решения задачи анализа сигналов МРЛС в условиях структурной (частотной, фазовой, временной) неопределенности.

Исходными данными для реализации метода анализа сигналов является последовательность цифровых отсчетов сигнала, задача получения которой решается на аппаратном уровне и включает в себя прием, преобразование сигнала на промежуточную частоту и его аналого-цифровое преобразование. Затем производится обнаружение сигнала и измерение его параметров.

Обнаружение осуществляется с использованием предложенных спектрограмм. В этом случае, вектор признаков θ описывается индексом спектрограммы i , ее числовыми значениями $I_i(m, n)$, индексом по оси времени m ,

индексом частотного канала k , а также списком мгновенных частот Df при данной длине интегратора L_i (для ЧВП на основе ДПФ с некогерентным интегрированием) или номером уровня (для ЧВП на основе для ВП).

$$\theta = [i, I_i(m, k), m, k, Df(r_1, k), Df(r_1 + 1, k), \dots, Df(r_2, k)], \quad (3)$$

Так как несколько векторов признаков могут принадлежать одному и тому же сигналу, требуется операция их объединения и формирования нового описания, так называемого дескриптора импульсов сигнала, который включает в себя следующие параметры: амплитуда, несущая частота, длительность, период повторения, вид внутриимпульсной модуляции, вид перестройки ППИ.

Метод анализа сигналов МРЛС условно можно разделить на несколько этапов.

На первом этапе производится оценка амплитуды сигнала по формуле:

$$PA = \begin{cases} \max(2\sqrt{I(\theta)/L_i}, & \theta \in \Psi, \text{ если } \Psi \neq 0 \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $I(\theta)$ – амплитуда сглаженной спектрограммы, соответствующая вектору признаков θ . На основе оценки амплитуды сигналы классифицируются по длительности импульса τ на три категории: «короткие» (интегратор l_1), «средние» (интегратор l_2) и «длинные» (интегратор l_3).

На втором этапе оценивается время прихода сигнала и его длительность.

Формулы для расчета имеют вид:

$$n_start = \min(m(\theta) - 1)L_i + 1 \quad \theta \in \Psi, \quad (5)$$

$$n_end = \max(m(\theta))L_i \quad \theta \in \Psi \quad (6)$$

Здесь n_start и n_end определяют, соответственно, начало и конец импульса.

На третьем этапе производится оценка частоты сигнала.

Измерение данного параметра осуществляется путем взвешенного усреднения отсчетов мгновенных значений частоты сигнала Df на интервале соответствующем длительности импульса по формуле:

$$\hat{f} = \frac{\sum_{r=n_start}^{n_end-1} I_1(r, k) Df(r, k)}{\sum_{r=n_start}^{n_end-1} I_1(r, k)}, \quad (7)$$

Весовыми коэффициентами при этом являются значения сглаженной спектрограммы I_1 .

На четвертом этапе производится определение вида внутриимпульсной модуляции с помощью алгоритма, основанного на методе наименьших квадратов.

Он предназначен для различения трех наиболее часто встречающихся в современных МРЛС видов внутриимпульсной модуляции: линейную частотную модуляцию (ЛЧМ), фазовую манипуляцию (ФМн) и фазо-частотную манипуляцию (ФЧМн). Работоспособность алгоритма подтверждена на реальных исходных данных (записи сигналов РЛС с различными видами модуляции).

Установлено, что вероятность правильного определения вида модуляции на основе вейвлет-спектрограмм для ФМн сигналов выше на 5-25%, чем при применении Фурье-спектрограмм.

На пятом этапе выполняется разделение импульсных последовательностей по периоду повторения с помощью алгоритма на основе дельта-гистограммы. Исходными данными для алгоритма является последовательность времен прихода импульсов произвольной длины. Суть алгоритма состоит в последовательном выполнении двух шагов: 1) определении с помощью гистограммы наиболее вероятного значения периода последовательности; 2) поиск и выделение предполагаемой последовательности.

Показано, что определяющим фактором, влияющим на правильность разделения последовательностей, является точность определения времени прихода импульса. Экспериментально установлено, что максимальное число «шумовых» значений периодов, при котором еще возможно правильное выделение последовательностей, составляет порядка 8–9 % от общего числа.

После разделения смешанных последовательностей для каждой выделенной последовательности определяется вид перестройки периода повторения импульсов.

Четвертая глава посвящена практической реализации результатов диссертационной работы. Предложена методика применения разработанного метода ЧВА в средствах РТК (рисунок 2).

Место предложенных в диссертации процедур в общей методике добывания сведений об источниках радиоизлучения отмечено на рисунке 2 цветом.



Рисунок 2 –Общая схема добывания информации.

Рассмотрены принципы построения аппаратно-программного комплекса частотно-временного анализа сигналов МРЛС, позволяющие повысить эффективность добывания информации в сложной РЭО.

Аппаратная часть комплекса включает в себя радиоприемный модуль с антенно-фидерной системой, модуль цифровой обработки и ПЭВМ. Радиоприемный модуль предлагается реализовать на базе РПУ серии СКЭ1Р “Эфир-1” и АФС "АСП" АО "Скард-Электроникс".

АПК ЧВА, реализующий предложенный метод анализа сигналов МРЛС, может быть применен на постах радиотехнического контроля, различного вида базирования.

В работе проведен анализ показателей качества методов обработки сигналов МРЛС по полноте, оперативности и достоверности. Показано преимущество разработанного метода (рисунок 3).

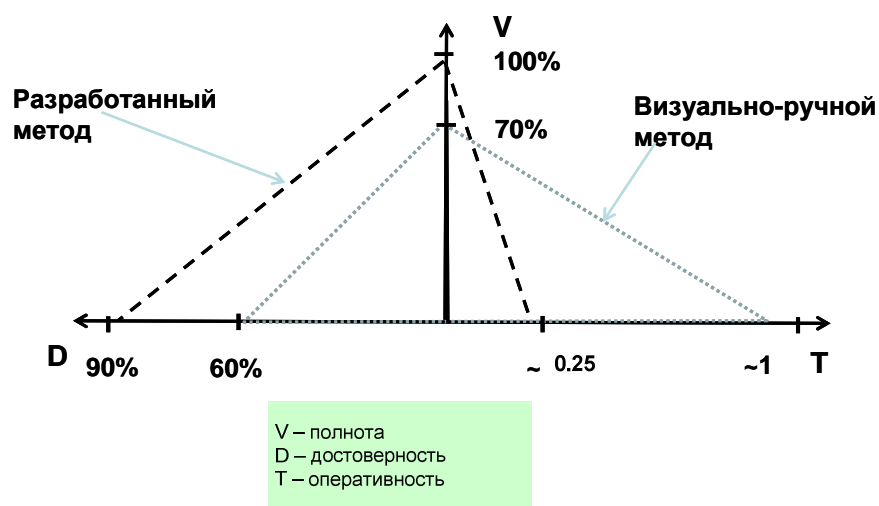


Рисунок 3 – Сопоставление показателей качества методов ЧВА при ведении радиотехнического контроля.

Согласно данным сравнительного анализа для обработки типового радиолокационного поля сигналов, принятых за смену (4 часа) станцией с аналоговым процессором БПФ на ДЛЗ, при использовании визуально-ручного метода затрачивается 60 минут рабочего времени. При этом вскрываются не все источники излучения.

Обработка сигналов станцией РТК при использовании разработанного метода выполняется в квази-реальном масштабе времени. Причем полнота вскрытия структуры излучения не ниже 99%.

Показано, что время, необходимое для анализа принятых за смену и не обработанных в автоматическом режиме сигналов, составляет порядка 15 минут.

Таким образом, применение разработанного метода и алгоритмов, позволит получить больше информации о исследуемом сигнале, повысить достоверность и оперативность распознавания источников излучения, что в конечном итоге приведет к повышению оперативно-технических возможностей современных и перспективных средств РТК.

В заключении приведены основные результаты и выводы по работе.

Совокупность полученных результатов можно рассматривать как научное обобщение в теории и практике построения средств радиотехнического контроля с широкополосным трактом приема, определяющее новый метод и алгоритмы частотно-временной обработки сигналов с усложненной структурой излучения и

имеющее важное оборонное значение для повышения оперативности и достоверности анализа сигналов МРЛС.

Основными научными и практическими результатами, полученными в ходе теоретических и экспериментальных исследований являются:

1. На основе анализа состояния и развития РЛС ведущих зарубежных стран сделано заключение о необходимости создании эффективных методов и алгоритмов частотно-временной обработки сигналов МРЛС, ориентированных на применение в средствах РТК с широкополосным трактом приема и анализа.

2. С целью развития аппарата ЧВА исследована возможность использования для обработки сигналов МРЛС комплексного подхода, основанного на преобразованиях Фурье, Вигнера и вейвлет. Предложено частотно-временное представление на основе дискретного преобразования Фурье с некогерентным интегрированием.

3. Разработан метод анализа частотно-временных параметров сигналов МРЛС на базе предложенного частотно-временного представления, учитывающий неопределенность структуры излучения. В том числе:

3.1 Представлены результаты анализа предложенного метода для обнаружения сигналов МРЛС с априорно неизвестными параметрами.

3.2. Выявлены информативные признаки сигналов МРЛС.

3.3 Представлены формулы для оценки частотно-временных параметров сигналов МРЛС.

4. Разработаны, реализующие предложенный метод, алгоритмы частотно-временного анализа сигналов МРЛС в смешанном (нерегулярном и неоднородном) потоке радиолокационных сигналов, позволяющие повысить достоверность и оперативность решения задач радиомониторинга в сложной радиоэлектронной обстановке. В том числе:

4.1 Показана целесообразность дополнения предложенной схемы обработки сигналов МРЛС аппаратом вейвлет-преобразования. Обоснована возможность его использования для анализа фазоманипулированных сигналов. Показано, что совместное применение Фурье и вейвлет преобразований позволяет улучшить достоверность определения параметров сигналов МРЛС.

4.2. Разработан алгоритм распознавания вида внутриимпульсной модуляции сигнала МРЛС, позволяющий разделять их на четыре класса излучений: немодулированные, частотно-модулированные, фазоманипулированные, частотно-фазо-манипулированные.

4.3. Предложен алгоритм разделения смешанного потока сигналов на отдельные импульсные последовательности.

4.4 Предложен алгоритм распознавания сигналов МРЛС по виду перестройки периода повторения импульсов, позволяющий с высокой достоверностью различать следующие классы излучений: J-сигналы, SL- сигналы, DS- сигналы, W- сигналы.

5. Разработана методика применения предложенного метода частотно-временного анализа сигналов МРЛС при ведении радиомониторинга в сложной РЭО. Предложенную методику целесообразно использовать при модернизации существующих комплексов РТК.

5.1. Сформулированы общие положения по реализации технологии широкополосного ЧВА радиолокационных сигналов. Реализация данной технологии основывается на построении аппаратно-программного комплекса, эффективно обеспечивающего взаимосвязанные процессы обнаружения, измерения, селекции и распознавания РЛС в сложной РЭО. Определены базовые черты аппаратно-программного комплекса (АПК), включающие: поддержку диалогового режима работы, развитую систему визуализации данных, применение древовидной схемы обработки, с возможностью возврата в любую точку анализа.

5.2. Предложена структура и общий алгоритм функционирования АПК ЧВА сигналов МРЛС.

6. Результаты диссертационной работы нашли применение при разработке специального программного обеспечения в ОКР «М-ЛС», ведущейся в НПФ «Вектор-Н7» ОАО «НИИ «Вектор» (г.Санкт-Петербург).

Публикации по теме диссертации

1. Коротков А.В. Анализ сигналов малозаметных РЛС на основе их частотно-временных представлений //Цифровая обработка сигналов и ее применение: Доклады 13-й Международной научно-технической конференции. М., 2011. С.29-30.
2. Коротков А.В. Использование вейвлет-анализа для обнаружения сигналов //Инновационная деятельность в Вооруженных силах РФ: Труды Всеармейской научно-практической конференции. СПб., 2009. С.303-307.
3. Коротков А.В. Классификация сигналов малозаметных РЛС //Инновационная деятельность в Вооруженных силах РФ: Труды Всеармейской научно-практической конференции. СПб., 2010. С.320-325.
4. Коротков А.В. Комбинированный метод анализа сигналов малозаметных РЛС с использованием их частотно-временных представлений// Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. –№6. – 49-53.
5. Коротков А.В. Частотно-временной анализ сигналов малозаметных РЛС. // АПСиОИ: Доклады Всероссийской научно-практической конференции, ВКА им.А.Ф.Можайского. Спб., 2014.
6. Коротков А.В. Частотно-временной анализ сигналов малозаметных радиолокационных станций, с использованием вейвлет-преобразования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. –№5. – 44-48.
7. Коротков А.В., Мухин А.И. Усовершенствованный алгоритм анализа сигналов малозаметных радиолокационных станций на основе оконного преобразования Фурье// Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. –№1. – 32-36.