

На правах рукописи



КОЗЛОВ РОМАН ЮРЬЕВИЧ

**ОБРАБОТКА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В
РАДИОЛОКАТОРАХ ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ
ЛЮДЕЙ В ПОМЕЩЕНИИ ЧЕРЕЗ СТЕНУ**

Специальность: 2.2.16. – «Радиолокация и радионавигация»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Научный руководитель: – **Гаврилов Константин Юрьевич**,
доктор технических наук, доцент, профессор каф. 410,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

Официальные оппоненты: – **Чапурский Валерий Викторович**,
доктор технических наук, с.н.с., главный научный
сотрудник НИИРЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

– **Майстренко Евгений Владимирович**,
кандидат технических наук, начальник отдела по
научно-исследовательской работе научно-образова-
тельного центра АО «Концерн радиостроения «Вега»,
АО «Концерн радиостроения «Вега»,

Ведущая организация: ПАО НПО «Алмаз» ТОП «ЛЭМЗ»,
Г. Москва, Дмитровское шоссе, 110

Защита диссертации состоится <<25>> декабря 2024 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.01 Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ (НИУ) и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=182750

Автореферат разослан <<__>> _____ 2024 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу:
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, канд. техн. наук



А.А. Горбунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию алгоритмов обработки сигналов с целью обнаружения живых людей в помещениях с помощью радиолокаторов зондирования через стену (РЗЧС). Задачи обнаружения людей через оптически непрозрачные преграды – стены, перегородки, потолочные и напольные перекрытия и др., представляют большой интерес для различных спецслужб и силовых структур. При этом важным является не только факт обнаружения людей, но также определение их числа, расположения в помещении и траектории перемещения в процессе наблюдения.

Работы в этом направлении начались несколько десятилетий назад и в настоящее время имеются серийно выпускаемые РЗЧС как в России – РО-900, РО-400/2В, Данник-5, так и в других странах – Xaver 100 (400/800) (Израиль), SEM-400 (200) (Китай), Prism 200 (Великобритания). Однако проблема улучшения тактико-технических характеристик подобных радиолокаторов остается актуальной и в настоящее время. На этом пути возникают трудности, связанные со спецификой работы РЗЧС, которые до сих пор преодолены не полностью.

Во-первых, это особенности сигналов, отраженных от людей. Возможность обнаружения этих сигналов может существенно меняться не только от того движется ли человек или нет, но также и от его положения (положение стоя, сидя, лежа) и от направления зондирования – спереди, сзади, сбоку, сверху, снизу. Во-вторых, это особенности радиолокационного зондирования помещений, при котором возникает множество интерференционных помех, приводящих не только к существенному ослаблению полезных сигналов, вплоть до их полного пропадания, но также и к скачкообразным (аномальным) изменениям значений измеряемых координат по дальности и направлению прихода сигналов.

Степень проработанности темы. Существует большое количество работ, направленных на решение указанных проблем и связанных с вопросами первичной и вторичной обработки сигналов в РЗЧС. Среди отечественных ученых – это работы Иммореева И.Я., Ивашова С.И., Бугаева А.С., Чапурского В.В., Вовшина Б.М., среди зарубежных ученых – это Amin M.G., Aftanas M.I., Martone A.F., Ranney K., Lubecke V., Boric-Lubecke O.

Однако наиболее сложной и на сегодняшний день неудовлетворительно решенной является задача одновременного обнаружения подвижных и неподвижных людей, что связано с существенным отличием сигналов для этих двух случаев. Один из путей решения этой проблемы заключается в повышении значения отношения сигнал-шум (ОСШ) при первичной обработке сигналов.

Другая проблема, обусловленная влиянием интерференционных помех на точность измерения координат целей, решается с помощью методов вторичной обработки радиолокационной информации. Здесь следует отметить различные подходы, основанные на использовании как традиционных методов калмановской фильтрации, так и нетрадиционные подходы, в частности, метод описания целей с помощью множества признаков, предложенный в работах Игониной Ю.В.

В диссертационной работе используется комплексный подход к решению задачи обнаружения людей с помощью РЗЧС, основанный на разработке алгоритмов первичной и вторичной обработки радиолокационных данных. При этом рассматривается случай

использования в качестве зондирующих сверхширокополосных сигналов со ступенчатой частотной модуляцией (СЧМ) (англ. Step Frequency Modulation – SFM).

Объект исследования – радиолокаторы зондирования помещений через стену, использующие в качестве зондирующего сверхширокополосные сигналы.

Предмет исследования – алгоритмы первичной и вторичной обработки радиолокационной информации в радиолокаторах зондирования помещений через стену.

Цель работы – разработка эффективных алгоритмов обнаружения людей в помещении с помощью радиолокатора зондирования через стену, позволяющих повысить качество обнаружения целей в условиях действия интерференционных помех.

Повышение вероятности правильного обнаружения достигается путем применения разработанных алгоритмов обработки и фильтрации СЧМ сигналов, позволяющих повысить значение ОСШ для подвижных и неподвижных людей.

Для достижения поставленной цели сформулирована **научная задача**: разработка алгоритмов, позволяющих повысить значение отношения сигнал-шум для подвижных и неподвижных людей при использовании сверхширокополосных сигналов со ступенчатой частотной модуляцией (СЧМ) и точность измерения координат обнаруженных целей.

Декомпозиция научной задачи определила частные **задачи работы**:

1. Разработка алгоритмов предварительной обработки СЧМ сигналов, позволяющая скомпенсировать амплитудно-частотные искажения сигнала при его приеме в условиях зондирования помещений через стену.

2. Разработка модели сигнала с учётом дыхания и перемещения частей тела человека на основе анализа экспериментальных данных, характеризующего форму и основные свойства сигналов, отраженных от людей.

3. Разработка алгоритма согласованной фильтрации сигналов на основе разработанной модели сигналов, отраженных от людей, который реализован в виде программы обработки отсчетов одного периода зондирования.

4. Разработка алгоритма сглаживания траектории движения цели, позволяющего значительно повысить точность измерения координат обнаруженных целей за счет исключения аномальных выбросов.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы математического анализа, теории обработки сигналов, математического и натурального моделирования.

Научная новизна работы

В рамках исследования получены следующие новые результаты:

1. Алгоритм предварительной обработки СЧМ сигналов, использующий нелинейное преобразование амплитуд комплексных отсчетов и позволяющий скомпенсировать амплитудно-частотные искажения сигнала при его приеме в условиях зондирования помещений через стену.

2. Модель сигнала, характеризующего форму и основные свойства сигналов, отраженных от людей с учётом дыхания и движения различными частями тела человека.

3. Алгоритм согласованной фильтрации сигналов на основе разработанной модели сигналов, отраженных от людей.

4. Алгоритм сглаживания траектории движения цели, учитывающий влияние интерференционных помех на точность измерения координат и позволяющий значительно повысить точность измерения координат обнаруженных целей.

Практическая ценность результатов работы

Полученные результаты могут быть использованы для улучшения тактико-технических характеристик существующих радиолокаторов зондирования помещений через стену с целью обнаружения, измерения координат и параметров движения людей, находящихся внутри помещения.

Разработанные модели сигналов, отраженных от людей, позволяют проектировать фильтры, обеспечивающие повышение значения отношения-сигнал-шум. Алгоритмы сглаживания траекторий целей позволяют существенно повысить точность измерения их координат.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм обработки сигнала со ступенчатой частотной модуляцией, основанный на выравнивании амплитуд дискретных значений сигнала на выходе квадратурного детектора путем их нормировки по абсолютному значению, позволяет скомпенсировать неравномерность амплитудно-частотной характеристики входного тракта приемника и получить выигрыш в значении отношения сигнал-шум (ОСШ) в зависимости от входного значения ОСШ и условий зондирования (дальности до цели, углу наблюдения, толщины стены, через которую проводится зондирование, и интерференционных помех) в пределах 1...5 дБ.

2. Разработанная модель сигнала, отраженного от человека, основана на описании амплитудно-дальностного портрета, оптимизация параметров которой по критерию максимума ОСШ, позволяет построить согласованный фильтр, обеспечивающий увеличение выходного значения ОСШ на 1...3 дБ.

3. Алгоритм вычисления текущих координат целей в радиолокаторах зондирования помещений через стену в условиях воздействия интерференционных помех, основанный на использовании робастной оценки, позволяет уменьшить влияние аномальных оценок и повысить точность измерения координат целей в 1,5...2, 5 раза.

Реализация и внедрение результатов

Результаты диссертационной работы внедрены в научно-исследовательские работы АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» и в учебный процесс кафедры 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование» МАИ (НИУ), что подтверждено актами о внедрении.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждена путем компьютерного моделирования, а также результатами натуральных экспериментов, проведенных с помощью макета радиолокатора с СЧМ сигналов, изготовленного в процессе выполнения диссертационной работы.

Публикации

Основные результаты по теме исследования изложены в 8 работах, из которых 3 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 5 работ опубликованы в тезисах докладов научных конференций.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы обсуждались на 5-ти конференциях: XII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» 2018 г., Международная конференция «Авиация и космонавтика» 2018 г., Международная конференция «Гагаринские чтения» 2020 г., Международная конференция «Авиация и космонавтика» 2022 г., Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение» 2022 г.

Объем и структура работы

Диссертация имеет объем 132 машинописную страницу, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Иллюстративный материал состоит из 42 рисунков и 2 таблиц. Список литературы содержит 86 наименований, включая работы автора.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, проведён обзор литературы по теме исследований, сформулирована цель и основные задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены положения, выносимые на защиту. Приведены структура диссертации, форма апробации и список опубликованных статей в научных журналах.

В **первой** главе рассмотрены назначение и принципы работы радиолокаторов зондирования помещений через стену. В качестве зондирующего сигнала выбран сигнал со ступенчатой частотной модуляцией (СЧМ), так как он обладает большей энергией по сравнению с видеоимпульсными и сигналами с линейной частотной модуляцией.

Описан метод обработки СЧМ сигналов, имеющих наибольшее распространение в РЗЧС. СЧМ представляет собой сумму радиоимпульсов разной частоты заполнения (рис. 1)

$$s(t) = u_0 \sum_{n=0}^{N-1} a_n(t - nT) \cos(2\pi f_n(t - nT)), \quad (1)$$

где u_0 – амплитуда радиоимпульсов; $T = \tau_n + \tau_k$ – интервал времени между началами соседних радиоимпульсов; f_0 – начальное значение частоты СЧМ-сигнала (частота первого радиоимпульса); N – общее число импульсов; a_n – функция прямоугольного временного окна.

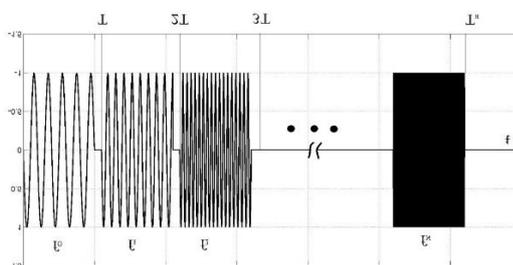


Рис. 1 – Вид СЧМ-сигнала, состоящего из N импульсов

Сжатие СЧМ-сигнала по дальности выполняется с помощью операции обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ). После сжатия СЧМ сигнала на выходе фильтра сжатия получаем функцию отклика, которая для точечной цели повторяет вид автокорреляционной функции (АКФ) СЧМ сигнала. Эту операцию можно записать в виде:

$$s_{cф}(f_{n_p}) = F_N^{-1}\{s_{кд}(t_n)\}, \quad (2)$$

где частотные отсчеты $s_{cф}(f_{n_p})$ соответствуют развертке дальности, т.е. $s_{cф}(f_{n_p}) = s_r(R_{n_p})$;

F_N^{-1} – операция обратного N -точечного ДПФ.

На рис. 2 показана схема согласованного фильтра для СЧМ сигнала.

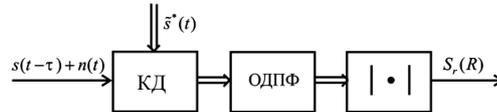


Рис. 2 – Блок-схема алгоритма корреляционного приема СЧМ-сигнала

На рис. 3 показан результат согласованной фильтрации СЧМ сигнала, т. е. развёртка по дальности, на которой можно наблюдать сигнал от объекта, расположенного на 10 м от радиолокатора.

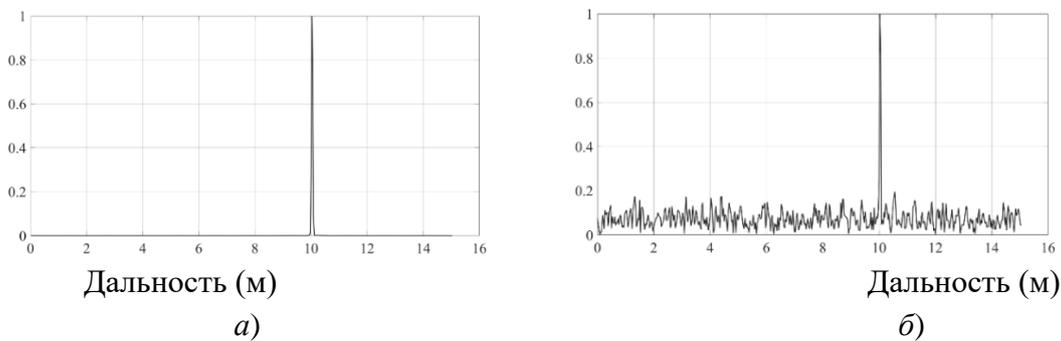


Рис. 3 – Функция отклика точечной цели после сжатия СЧМ сигнала по дальности:
а) без шумов; б) при наличии гауссового шумов, ОСШ 20 дБ

Описан макет радиолокатора малой дальности (рис. 4), который использован при проведении натурных экспериментов с целью исследования различных алгоритмов первичной и вторичной обработки сигналов в радиолокаторах зондирования помещений через стену. Разработанный макет радиолокатора позволяет задать ширину спектра зондирующего СЧМ сигнала в пределах 0,4...3 ГГц. Мощность излучения около 100 мВт. Используются направленные директорные плоские антенны на приём и на передачу.

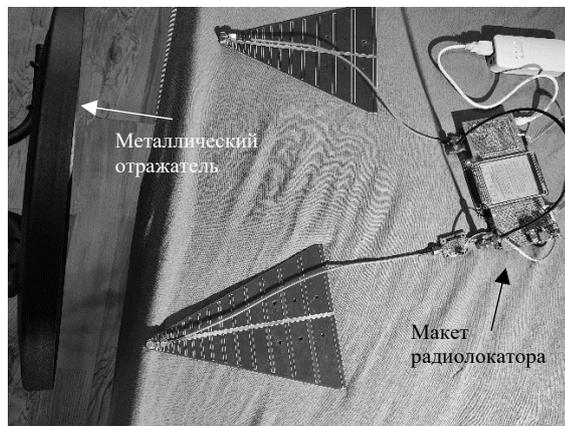


Рис. 4 – Макет радиолокатора при исследовании отражений от металлического экрана в воздушной среде

Описаны методы разделения сигналов, принимаемых с различных угловых направлений при использовании многоканального приема сигналов с помощью нескольких приемных антенн. Разделение сигналов, приходящих с различных направлений азимута, основано на использовании фазосдвигающих фильтров, настроенных на соответствующий угловой канал приема сигналов. Имеется M азимутальных угловых каналов, каждый из которых характеризуется дискретным значением направления главного луча диаграммы направленности антенны (ДНА), равного

$$\theta_m = \frac{90^\circ}{M}(2m-1) \text{ (град)}, \quad m=1, \dots, M. \quad (3)$$

При этом форма луча определяется числом и размерами антенной решетки, образуемой L_N приемными антеннами. Значения углов $\theta_m \in [0, 180^\circ]$ отсчитываются относительно оси Ox в направлении по часовой стрелке.

Вектор фазовых сдвигов, определяющий фокусировку луча на направление θ_m , имеет вид:

$$\mathbf{B}_n^{(m)} = (b_{1n}^{(m)}, b_{2n}^{(m)}, \dots, b_{L_n}^{(m)})^T, \quad (4)$$

где фазовые коэффициенты

$$b_{ln}^{(m)} = \exp\{-jk_n d(l - 0,5(L+1))\cos\theta_m\}, \quad l=1, \dots, L, \quad (5)$$

Пространственное разделение приемных каналов (т.е. пространственной фильтрации) представлены с помощью следующего матричного преобразования

$$\hat{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1^T \mathbf{B}_1^{(1)} & \mathbf{G}_2^T \mathbf{B}_2^{(1)} & \dots & \mathbf{G}_N^T \mathbf{B}_N^{(1)} \\ \mathbf{G}_1^T \mathbf{B}_1^{(2)} & \mathbf{G}_2^T \mathbf{B}_2^{(2)} & \dots & \mathbf{G}_N^T \mathbf{B}_N^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{G}_1^T \mathbf{B}_1^{(M)} & \mathbf{G}_2^T \mathbf{B}_2^{(M)} & \dots & \mathbf{G}_N^T \mathbf{B}_N^{(M)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{S}}_1 \\ \hat{\mathbf{S}}_2 \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{S}}_M \end{bmatrix}. \quad (6)$$

где \mathbf{G} – матрица принятого сигнала до пространственного разделения, а $\hat{\mathbf{S}}$ – после. После сжатия сигнала получится матрица \mathbf{S} , пример которой показан на рис. 5.

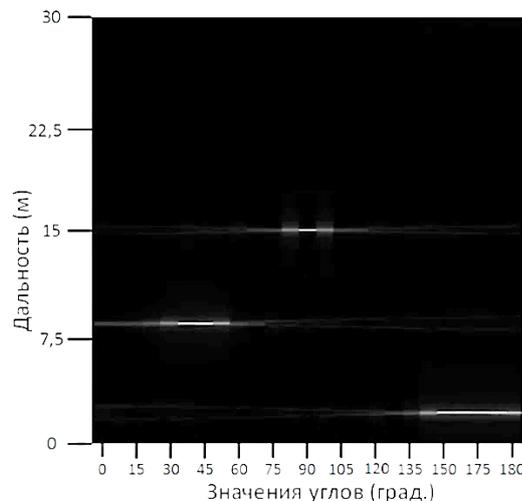


Рис. 5 – Отображение матрицы \mathbf{S} комплексных отсчетов (абсолютные значения) одного кадра при наличии трех точечных целей

Во **второй** главе приведено описание разработанных моделей сигналов, наблюдаемых при отражении от людей. На основе анализа реальных сигналов разработана модель сигнала цели, которая имеет вид:

$$s(n, m) = [1 + a_{ш} \eta(n, m)] \left[G(n \Delta x - x_0, m \Delta y - y_0, \sigma_{x_0}, \sigma_{y_0}) + \sum_{i=1}^L a_i G(n \Delta x - x_i, m \Delta y - y_i, \sigma_{x_i}, \sigma_{y_i}) \right], \quad (7)$$

где

$$G(x, y, \sigma_x, \sigma_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x\sigma_y}} \exp \left\{ -\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right\} \quad (8)$$

– двумерная функция Гаусса с параметрами формы σ_x, σ_y ; $\eta(n, m)$ – независимые гауссовские случайные величины, $n = 0, \dots, N + 1, m = 0, \dots, M + 1$; L – число точек зеркального отражения, которое выбирается равным 1...5 (обычно используются две точки, соответствующие отражениям от задней стенки помещения и пола); $a_i (i = 1, \dots, L), a_{ш} < 1$ – амплитуды помеховых и шумового сигнала соответственно; $(x_0, y_0), (x_i, y_i)$ – координаты цели и точек переотражения ($i = 1, \dots, L$); $\Delta x, \Delta y$ – размеры элементов разрешения по осям Ox и Oy соответственно.

На основе этих моделей получены характеристики фильтров согласованной фильтрации сигналов. Значения параметров (8) $\sigma_{x_0}, \sigma_{y_0} (\sigma_{x_i}, \sigma_{y_i})$ выбираются из условия протяженности сигнала, соответствующего размеру цели около 0,5 м.

Представлены результаты компьютерного моделирования и натуральных экспериментов при исследовании различных алгоритмов обработки сигналов в РЗЧС при наблюдении подвижных и неподвижных людей. На рис. 6 *а* показана двумерная матрица реального сигнала зондирования помещения, в котором присутствует человек (самое яркое пятно) и на рис. 6 *б* – его модель.

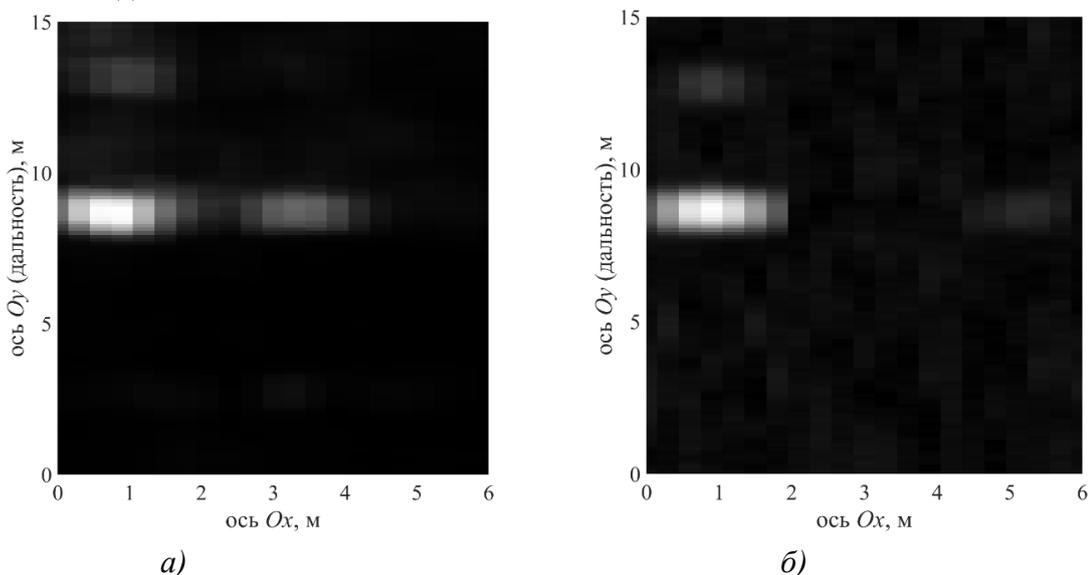


Рис. 6 – Двумерные матрицы кадров: *а*) – результаты натуральных экспериментов; *б*) – результаты моделирования

В **третьей** главе рассмотрены вопросы межпериодной обработки сигналов в РЗЧС. Эта обработка включает в себя предварительную обработку, первичную обработку СЧМ сигналов, формирование первичных отметок и построение траекторий целей (рис. 7).

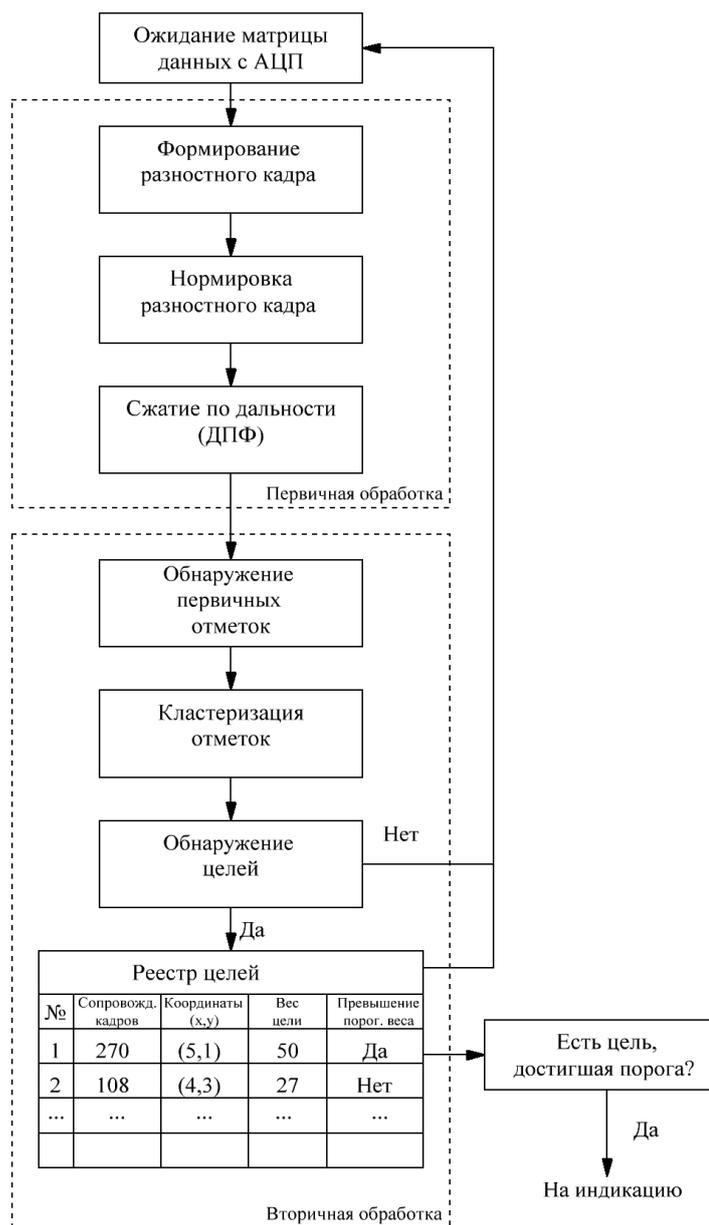


Рис. 7. Схема алгоритма обработки сигналов

Описан предложенный в диссертационной работе алгоритм нормировки дискретных отсчетов СЧМ сигнала, образованных на выходе квадратурного детектора. Поскольку преобразованиям подвергаются отсчеты не матрицы $\mathbf{S}^{(k)}$, а отсчеты на выходе квадратурного детектора, то для них используем обозначение $\mathbf{G} = [g_1^{(k)}, g_2^{(k)}, \dots, g_N^{(k)}]$, т.е. $\mathbf{S}^{(k)} = \mathfrak{I}^{-1}\{\mathbf{G}^{(k)}\}$.

Вначале отсчеты $g_n^{(k)}$ приводятся к нулевому среднему значению с помощью вычисления разностей:

$$u_n^{(k)} = g_n^{(k)} - \bar{g}_n^{(k)}, \quad n = 1, \dots, N, \quad k = K_0, \dots, K, \quad (9)$$

где $\bar{g}_n^{(k)} = \frac{1}{K_0} \sum_{i=0}^{K_0-1} g_n^{(k-i)}$. Величина среднего значения $\bar{g}_n^{(k)}$ вычисляется на основе числа K_0

кадров и для каждого номера периода $k = K_0, \dots, K$ принимает различные значения.

Затем каждый комплексный отсчет $u_n^{(k)}$ нормируется по своему абсолютному значению:

$$\tilde{u}_n^{(k)} = \frac{u_n^{(k)}}{|u_n^{(k)}|}, \quad |\tilde{u}_n^{(k)}| = 1, \quad n = 1, \dots, N. \quad (10)$$

Таким образом, формируется матрица нормированных комплексных отсчетов

$$\tilde{\mathbf{U}} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_1^{(K_0)} & \dots & \tilde{u}_1^{(K)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{u}_N^{(K_0)} & \dots & \tilde{u}_N^{(K)} \end{bmatrix} = [\tilde{\mathbf{U}}^{(K_0)} \dots \tilde{\mathbf{U}}^{(K)}]. \quad (11)$$

Наконец, на основе элементов столбцов матрицы $\tilde{\mathbf{U}}$ вычисляется матрица разверток дальностей

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_1^{(K_0)} & \dots & z_1^{(K)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{N_p}^{(K_0)} & \dots & z_{N_p}^{(K)} \end{bmatrix} = [\mathbf{Z}^{(K_0)} \dots \mathbf{Z}^{(K)}], \quad (12)$$

где каждый столбец матрицы \mathbf{Z} определяется как

$$\mathbf{Z}^{(k)} = \text{abs}(\mathbf{F}_{N_p}^{-1}(\tilde{\mathbf{U}}^{(k)})), \quad k = K_0, \dots, K \quad (13)$$

Операция $\text{abs}(\mathbf{I})$ состоит в вычислении абсолютных значений каждого элемента вектора \mathbf{I} . На рис. 8 показан результат нормировки: рис. 8 а – отражённый от объекта сигнал произвольной амплитуды с гауссовым шумом, рис. 8 б – нормированный сигнал (на рис. 8 представлены результаты компьютерного моделирования).

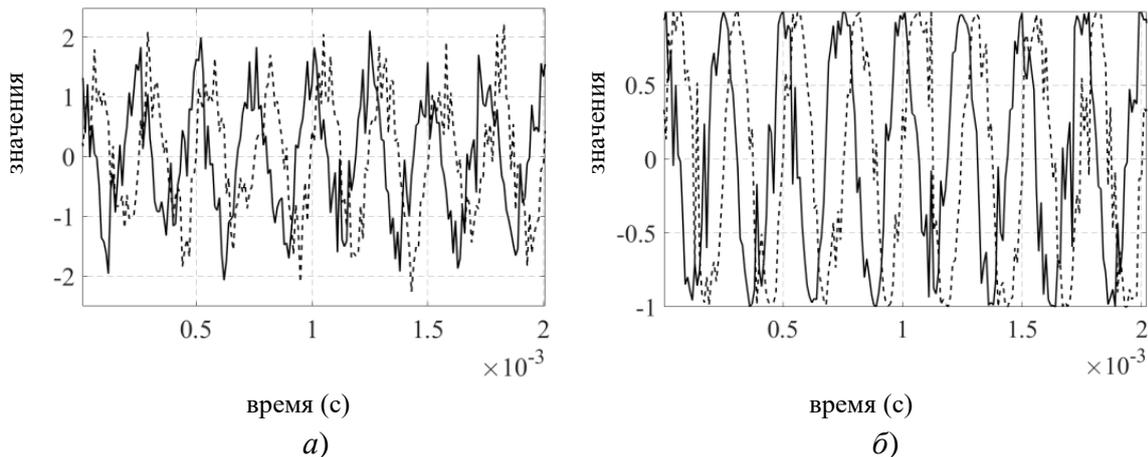


Рис. 8 – Дискретные отсчеты СЧМ-сигнала без нормировки (а) и с нормировкой отсчетов (б)

Проведена оценка эффективности предложенного алгоритма и сравнение с известными алгоритмами, которые получены путем компьютерного моделирования и натуральных экспериментов при наблюдении подвижных и неподвижных людей. На рис. 9 представлены результаты обработки сигналов для трех алгоритмов: с использованием череспериодного вычитания (алгоритм череспериодного вычитания, ЧПВ, рис. 9 а), с вычислением дисперсий (алгоритм локальной дисперсии, ЛД, рис. 9 б) и с использованием

нормировки (алгоритм нормировки разностных отсчётов, НРО, рис. 9 в) при зондировании помещения через стену и наличии одного неподвижного человека на дальности 4 м. Рис. 9 демонстрирует явное преимущество предложенного алгоритма НРО. На рис. 10 показаны виды сигналов для трёх рассмотренных алгоритмов, на основе которых могут быть получены количественные оценки выигрышей в значении ОСШ. Видно, что алгоритм НРО выигрывает в значении ОСШ 4 дБ у алгоритма ЧПВ и 2 дБ у алгоритма ЛД.

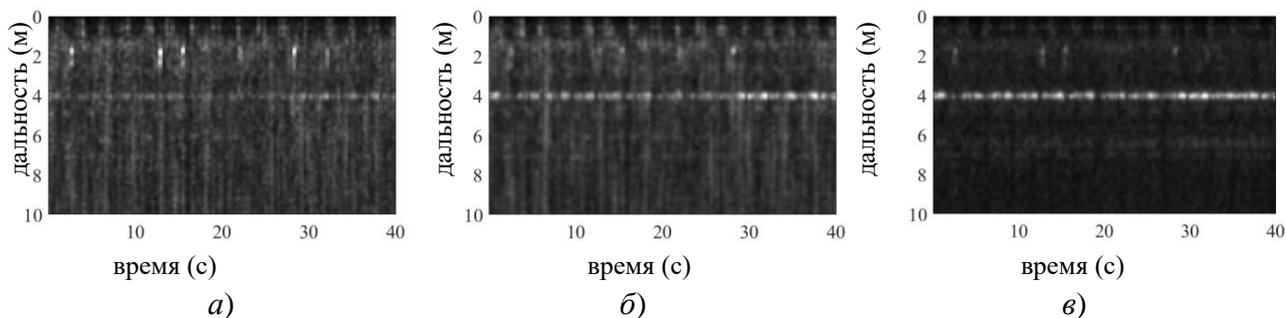


Рис. 9 – Двумерные матрицы сигналов после обработки согласно алгоритмам ЧПВ (а), ЛД (б) и НРО (в)

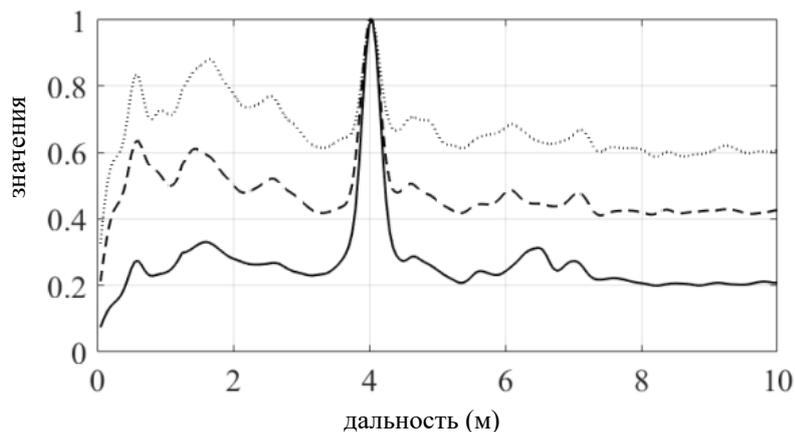


Рис. 10 – Накопленные за 400 кадров значения статистик в зависимости от дальности при использовании алгоритмов ЧПВ (пунктирная линия), ЛД (штриховая линия), НРО (сплошная линия)

На рис. 11 показаны результаты работы 3-х алгоритмов при зондировании помещения с человеком, ходящим вперед-назад вдоль линии визирования (в пределах дальностей 2...6 м).

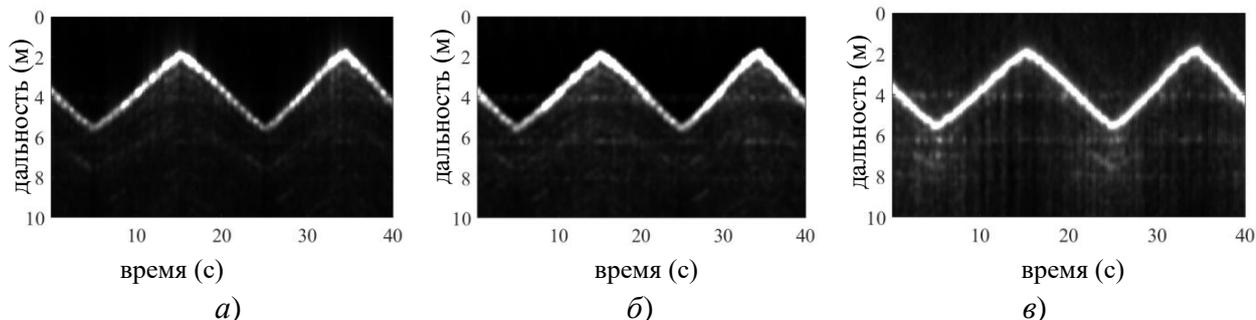


Рис. 11 – Результаты работы алгоритмов ЧПВ (а), ЛД (б) и НРО (в) в виде полутоновых матриц (в градациях яркости серого цвета)

При формировании первичных отметок целей используются методы пороговой обработки сигналов и кластерного анализа. Используется 2 порога: фиксированный и адаптивный. Алгоритм обработки при использовании фиксированного порога имеет вид:

$$i_{mn}^{(k)} = \begin{cases} 1, & |z_{mn}^{(k)}| \geq c_{\phi} h_{\phi}^{(k)}, \\ 0, & |z_{mn}^{(k)}| < c_{\phi} h_{\phi}^{(k)}, \end{cases} \quad (14)$$

где

$$h_{\phi}^{(k)} = \frac{1}{MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |z_{mn}^{(k)}| \quad (15)$$

– значение фиксированного порога. Здесь нижние индексы m, n определяют значения номеров азимутального и дальностного каналов соответственно.

Адаптивный порог формируется на основе методов вычисления среднего локального значения интенсивностей помех в области тестируемой ячейки – методы обнаружения с постоянным уровнем ложных тревог (ПУЛТ) (в англоязычной литературе CFAR обнаружители). Импульсная характеристика (ИХ) двумерного фильтра определяется на плоскости и имеет форму прямоугольника (рис. 12) со сторонами $(2g_x + 1 + 2r_x) \times (2g_y + 1 + 2r_y)$, где $(2g_x + 1) \times (2g_y + 1)$ – размер двумерной сигнальной зоны, иначе говоря, размер двумерной функции отклика цели (ФОЦ), а значения r_x, r_y определяют размер зоны оценивания по осям Ox (азимут) и Oy (дальность) соответственно.

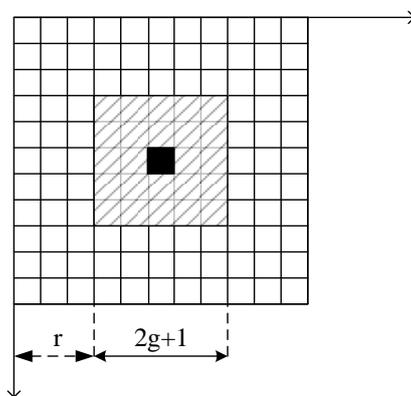


Рис. 12 – Изображение ИХ для вычисления СА-CFAR порога в двумерном случае

Далее, после пороговой обработки следует процедура кластеризации данных, целью которой является объединение «облака» отметок, относящихся к одной цели. В основе процедуры кластеризации лежит принцип пространственной близости отметок одной и той же цели, в то время как отметки различных целей образуют разнесенные в пространстве области, или кластеры. Результат кластеризации данных схематически изображен на рис. 13.

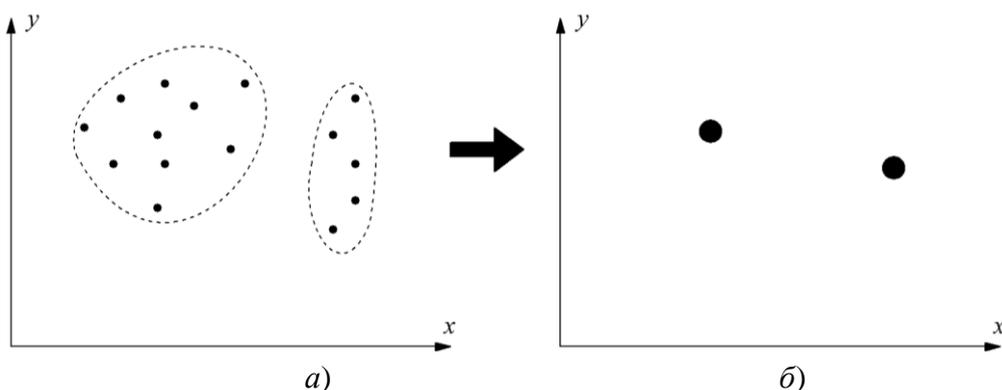


Рис. 13 – Примеры кадров до и после кластеризации, рисунки *а)* и *б)* соответственно

Для построения траекторий перемещения целей используется аппроксимация траектории кусочно-ломаной линией. Накопленные отметки цели за небольшой интервал времени (около 3..5 с), за который можно считать, что цель переместилась на незначительное расстояние, можно аппроксимировать прямой линией методом наименьших квадратов.

С учетом анализа влияния интерференции помех в диссертационной работе предложен алгоритм вычисления текущих координат целей на основе медианной оценки последовательности координат, полученных в серии кадров. На рис. 14 показано сравнение методов сглаживания: на основе медианной оценки (предложенный алгоритм) и на основе среднеарифметического усреднения.

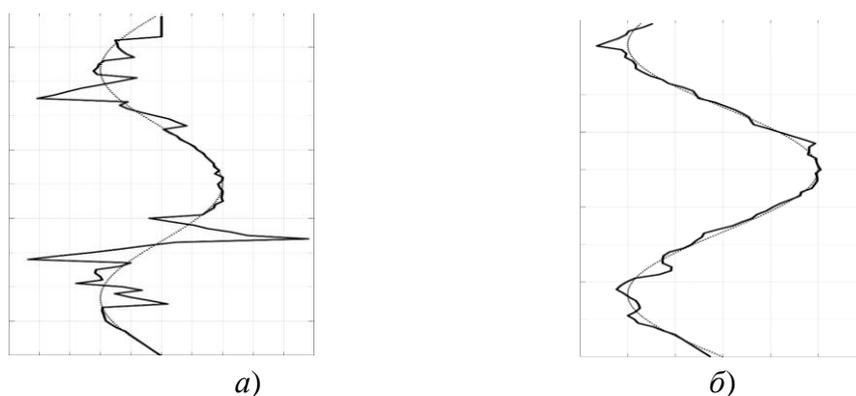


Рис. 14 – Истинная (пунктирные линии) и сглаженные (сплошная линия) траектории для случаев: *а)* среднеарифметического усреднения; *б)* вычисления медианного значения

В **четвертой** главе приведено описание результатов натуральных экспериментов по обнаружению и сопровождению людей, выполненных с помощью макета разработанного радиолокатора.

На рис. 15 показаны результаты зондирования помещения при наличии двух людей: один человек ходит по кругу при перемещении на 4..10 м по оси Oy и на -2..3 м по оси Ox , второй человек стоит в точке с координатами (-2, 10) м. Как видно из рис. 15 *а)*, из-за сильных отличий амплитуд сигналов для подвижного и неподвижного человека, последний практически не виден. Однако, после всех этапов обработки (см. рис. 15 *б)*), уверенно наблюдаются отметки от обоих людей: в виде белой точки для неподвижного человека и в виде траектории из черных точек для ходящего человека.

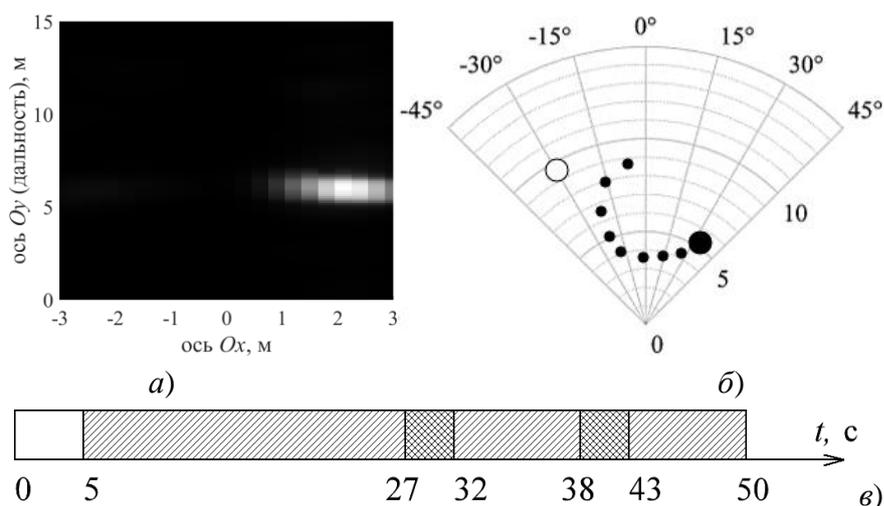


Рис. 15 – Результаты зондирования помещения, в котором один человек неподвижно стоит, а другой ходит: *а* – разностная матрица входных сигналов двух соседних кадров на 30-й с зондирования; *б* – результат обработки в виде индикатора в полярной системе координат (белая большая точка – положение человека); *в* – график хронологии обнаружений (сплошной белый цвет означает отсутствие обнаружений, наклонная штриховая заливка – обнаружение одной цели, перекрестная штриховая линия – обнаружение двух целей).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны назначение и особенности радиолокаторов зондирования помещений через стену (РЗЧС). Приведено описание метода обработки сигналов со ступенчатой частотной модуляцией (СЧМ), обеспечивающего сжатие сигнала по дальности и формирование развертки дальности. В основе этой обработки лежит выделение комплексной огибающей СЧМ сигнала и процедура согласованной фильтрации, которая выполняется с помощью операции обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ).

Приведены характеристики целей, в качестве которых рассматриваются живые люди. Сигналы, отраженные от таких целей, характеризуются небольшим значением эффективной площади рассеяния (ЭПР) порядка $0,5...1 \text{ м}^2$ и микроперемещениями элементов целей, обусловленными наличием дыхания, сердцебиения человека и шевелением отдельных органов.

Описан разработанный макет РЗЧС, с помощью которого получены основные результаты натурных экспериментов. Приведена структурная схема радиолокатора, его тактико-технические характеристики, описан принцип работы. Обработка сигналов в разработанном макете сводится к формированию комплексного спектра принимаемого сигнала путем применения преобразования Гильберта (ПГ) и согласованной фильтрации с помощью операции ОДПФ.

Показано, что в случае использования антенн с частотно-зависимой характеристикой, необходима фазовая коррекция принимаемого сигнала, которая позволяет получить сигнал, имеющий спектр с равномерной АЧХ и линейной ФЧХ. Для уменьшения уровня боковых лепестков (УБЛ) используется весовое окно Блэкмана-Хариса. Полученные результаты нашли подтверждение при натурных испытаниях макета радиолокатора. В результате описанной обработки при использовании в качестве зондирующего СЧМ сигнала с шириной спектра в 2400 МГц в макете радиолокатора удалось получить разрешение по дальности порядка $0,08 \text{ м}$.

Разработанный макет радиолокатора позволяет менять ширину спектра зондирующего СЧМ сигнала в пределах 0,4...3 ГГц.

В случае использования в качестве приемной антенны линейной антенной решетки (ЛАР) становится возможен отдельный прием сигналов, приходящих с различных азимутальных направлений. Описана методика обработки сигналов при многоканальном по азимуту приеме сигналов в РЗЧС.

Показано, что влиянием погрешностей определения дальности и азимута в РЗЧС можно пренебречь. Так, при зондировании стен толщиной 0,1...0,5 м линейные значения этих погрешностей находятся примерно в таких же пределах или менее, в зависимости от значения азимута наблюдения цели и материала изготовления стены – бетон, кирпич и др.

Разработаны модели сигналов, предназначенные для формирования двумерного радиолокационного изображения помещения, зондируемого через стену, в координатах «дальность-азимут». Предложенные модели разработаны на основе анализа сигналов, полученных при проведении натуральных экспериментов с макетом радиолокатора, использующего в качестве зондирующего сигнал со ступенчатой частотной модуляцией с шириной полосы частот 1 ГГц (разрешение по дальности 15 см).

В качестве целей рассматриваются живые люди, находящиеся в подвижном или неподвижном состоянии. Результаты однократного зондирования помещения – кадры, сохраняются в виде двумерных матриц, элементы которых представляют собой отсчеты комплексной огибающей принимаемых сигналов.

Предложенные модели отраженных сигналов учитывают интерференцию радиоволн в помещениях, а также пространственную (межэлементную) и временную (межкадровую) корреляцию сигналов и соответствуют случаям наличия и отсутствия целей в контролируемом помещении.

Проведена верификация предложенных моделей путем сравнения статистических характеристик реальных и модельных сигналов при вычислении оценок вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения на основе пороговой обработки сигналов последовательности кадров.

Разработанные модели имеют не только «визуальное» сходство формируемых на их основе кадров с реальными данными, но также и близость статистических характеристик. Эти модели позволяют формировать множества двумерных матриц цифровых отсчетов (кадров), с помощью которых могут быть получены оценки статистических характеристик эффективности алгоритмов обработки сигналов при различных сценариях зондирования помещения.

Модель полезного сигнала соответствует функции отклика типовой цели и может быть использована для формирования импульсной характеристики согласованного фильтра при обработке сигналов быстрого времени. Показано, что применение предложенной фильтрации имеет эффект сглаживания данных и приводит к существенному сокращению шума, сохраняя при этом помеховые сигналы, возникающие вследствие переотражений полезных сигналов от местных предметов помещения – стен, пола, мебели и др.

Описан метод обработки СЧМ-сигнала, который включает нормировку комплексных отсчетов по собственным абсолютным значениям. При этом сохраняются все операции формирования и преобразования отсчетов СЧМ-сигнала, включающие квадратурное детектирование, весовую обработку и сжатие по дальности с помощью обратного ДПФ.

Предложенный метод обработки сигналов предназначен для использования в РЗЧС, в которых в силу сверхширокополосности зондирующих СЧМ-сигналов в наибольшей степени сказывается влияние интерференционных помех и неравномерностей амплитудно-частотных характеристик передающего и приемного трактов, приводящих к появлению паразитной амплитудной модуляции отсчетов СЧМ-сигнала.

В результате нормировки отсчетов СЧМ-сигналов или их межпериодных разностей удастся исключить паразитную амплитудную модуляцию и, таким образом, улучшить значение отношения сигнал-шум (ОСШ) по сравнению с обработкой СЧМ-сигнала без использования нормировки.

Результаты компьютерного моделирования, проведенные для анализа сигнала одиночной точечной цели, показывают, что при использовании метода нормировки разностей отсчетов (НРО) СЧМ-сигнала выигрыш в значении ОСШ по сравнению с методами череспериодного вычитания (ЧПВ) и локальной дисперсии (ЛД) составляет 1...5 дБ и зависит от входного значения ОСШ. Величина выигрыша увеличивается с ростом значения ОСШ.

Приведены результаты натурных экспериментов, проведенных с помощью макета РЗЧС при обнаружении подвижных и неподвижных людей через кирпичную стену толщиной 0,5 м. При ширине полосы СЧМ-сигнала в 1,5 ГГц и начальной частоте 1 ГГц выигрыш в значении ОСШ находится в пределах 2...4 дБ. Приведены изображения двумерных матриц абсолютных значений сигналов в виде градаций яркостей серого цвета для трех алгоритмов обработки – ЧПВ, ЛД и НРО. Для предложенного алгоритма НРО яркость полезных сигналов значительно выше, чем у первых двух алгоритмов, лучше также и контраст изображения.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности практического использования алгоритма НРО как при визуальном оценивании ситуации (т.е. оператором), так и при автоматизированной обработке сигналов для решения задач обнаружения людей и измерения их координат.

Подробно рассмотрены все последующие этапы обработки сигналов в РЗЧС, включающие формирование первичных отметок и построение траекторий целей. Эти этапы состоят из следующих видов обработки сигналов:

1. Формирование первичных отметок целей на основе пороговой обработки сигналов.
2. Кластеризация двумерных областей целей.
3. Обнаружение целей и передача их на сопровождение.
4. Построение траекторий перемещения целей.

Формирование первичных отметок целей выполняется на основе пороговой обработки сигналов. При этом для вычисления порога возможны два подхода – формирование единого порога для сигнальных отсчетов всего кадра (фиксированный порог), и формирование адаптивного порога, принимающего различные значения на двумерной матрице отсчетов кадра.

При вычислении фиксированного порога используется усреднение абсолютных значений отсчетов всего кадра с последующим умножением на постоянный коэффициент, который определяется допустимым числом ложных отметок.

Адаптивный порог формируется на основе методов вычисления локального среднего значения интенсивностей помех в области тестируемой ячейки – методы ПУЛТ-обнаружения (в англоязычной литературе CFAR обнаружители). В диссертационной работе используется метод CA-CFAR обнаружения, при котором формирование адаптивного порога выполняется

на основе вычисления среднего значения абсолютных значений отсчетов в прямоугольной области, в центре которой расположена тестируемая ячейка.

Описана процедура формирования адаптивного CA-CFAR порога, которая выполняется путем двумерной свертки абсолютных значений отсчетов матрицы одного кадра и импульсной характеристики КИХ-фильтра, имеющей вид прямоугольной области с нулевыми и единичными значениями. Формирование адаптивного порога может быть выполнено либо в пространственной области (путем свертки), либо в частотной области (с помощью операции двумерного БПФ).

Предложен метод простой кластеризации с уточнением центра кластера согласно алгоритму K -внутригрупповых средних.

Подробно описаны четыре этапа кластеризации, поясняющие принципы формирования локальной области выделения кластера, вычисления признака кластера, обнаружения кластера и определения его центра, характеризующего координаты обнаруженной цели.

В качестве алгоритма обнаружения траектории цели (захват цели) используется известный алгоритм « k из n », согласно которому цель считается обнаруженной, если в течение n последовательных кадров было сформировано k отметок в локальной области наблюдения.

Подробно рассмотрена процедура формирования траекторий целей, которая позволяет на основе последовательности измеренных в течение нескольких кадров значений координат цели строить траекторию ее перемещения на основе линейной аппроксимации, использующей ограниченный временной интервал. Длительность этого временного интервала должна быть небольшой (считается, что это интервал линейного перемещения цели), он должен включать число кадров, не превышающее десяти (соответствует длительности интервала не более одной секунды).

Описана методика разработки алгоритма формирования сглаженной траектории цели, в котором вместо использования среднеарифметических усредненных значений координат целей в соседних кадрах предложено использовать медианное значение.

Путем статистического моделирования показано, что в случае наличия интерференционных помех, приводящих к появлению аномальных ошибок измерения координат целей, предложенный метод позволяет существенно – более чем в 2 раза, снизить значение среднеквадратической ошибки координат цели.

Проведенные эксперименты показали, что характеристики обнаружения сильно зависят от ситуации: от количества людей, скорости их перемещения, а также от обстановки помещения. Поэтому нельзя сделать однозначный вывод о качестве работы разработанного алгоритма и каждую ситуацию необходимо рассматривать отдельно.

В помещении без людей алгоритм продемонстрировал работу, близкую к идеальной – ложные отметки целей не наблюдаются в течение времени не менее 1 минуты.

В помещении с одним неподвижным человеком наблюдается уверенное обнаружение цели с задержкой порядка 10 секунд и точным определением ее местоположения.

При зондировании помещения с ходящим человеком уверенное сопровождение начинается спустя примерно 5 с после начала зондирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах перечня ВАК министерства науки и высшего образования РФ:

1. Козлов Р.Ю., Гаврилов К.Ю. Метод обработки сигналов со ступенчатой частотной модуляцией при обнаружении людей в радарх зондирования помещений через стену // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 3. С. 103–127.

2. Козлов Р.Ю., Гаврилов К.Ю. Разработка модели принимаемых сигналов и алгоритмов их обработки при радиолокационном обнаружении людей в помещениях через стену. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2024. Т. 22. № 3. С. 61-74.

3. Гаврилов К.Ю., Козлов Р.Ю. Построение траекторий перемещения людей при радиолокационном зондировании через стену. // Труды МАИ. 2024. № 136.

Тезисы докладов:

4. Козлов Р.Ю., Гаврилов К.Ю. Восстановление траекторий перемещения людей при радиолокационном зондировании через стену // 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2018». Тезисы. С. 258

5. Козлов Р.Ю., Гаврилов К.Ю., Игонина Ю.В. Обнаружение и сопровождение людей при радиолокационном зондировании через стену // XII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. – Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. – 26-28 ноября 2018 г. – 308 с.: ил. С. 157

6. Козлов Р.Ю. Алгоритм обнаружения неподвижных людей // «Гагаринские чтения – 2020». Сборник тезисов докладов. С. 628

7. Козлов Р.Ю. Повышение отношения сигнал-шум при обработке радиолокационных сигналов со ступенчатой частотной модуляцией // 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», 2022. Тезисов докладов. С. 311

8. Козлов Р.Ю., Гаврилов К.Ю., Трофимова Т.А. Обработка радиолокационных широкополосных сигналов со ступенчатой частотной модуляцией // 23-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение» («ЦОС-2022»). Доклады. С. 84