

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи

Нелин Игорь Владимирович

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЕРЕОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ
ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ОБНАРУЖЕНИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Специальность 05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре «Аналоговые и цифровые радиоэлектронные системы» факультета Радиовтуз Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Куприянов Александр Ильич

Официальные оппоненты:

Горбунов Юрий Николаевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Институт радиотехники и электроники имени В.А.
Котельникова Российской академии наук, ведущий
научный сотрудник

Скосырев Вадим Николаевич, доктор технических наук, профессор, НИИ
"Радиоэлектронная техника" МГТУ им. Н.Э. Баумана,
главный научный сотрудник

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский научно-
исследовательский институт
радиотехники» (ВНИИРТ)

Защита диссертации состоится «24» декабря 2013г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан «__» ноября 2013 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.125.03, д.т.н., доцент

_____ М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние годы во всем мире наблюдается интерес к такому направлению радиотехники, как радиолокация биологических объектов. Это направление в настоящее время начинает применяться в различных отраслях жизнедеятельности человека и интенсивно развивается. Задача обнаружения движения человека за непрозрачными преградами стоит перед спецслужбами и армией. Обнаружение людей под обломками разрушенных зданий является одной из основных задач спасательных операций после терактов и разрушений, вызванных землетрясениями.

Решать задачу обнаружения движения человека за оптически непрозрачными препятствиями часто требуется внутри помещений, обычно не очень больших размеров. Это приводит к тому, что цель (совершающий движение человек) может находиться на фоне мешающих отражающих поверхностей, в том числе с характеристиками отражения большими, чем у человека. В итоге слабый полезный сигнал от человека может быть потерян на фоне отражений от местных предметов (МП). Применение селекции движущихся целей позволяет в общем случае разделить подвижные и неподвижные объекты, но так как отражения от МП интенсивные, то возможен случай, когда переотраженные целью или МП сигналы будут по своей интенсивности и характеру соответствовать реальной цели, так как получат дополнительную модуляцию движением цели. Что приведет к ложному решению об обнаружении еще одной, «ложной» цели (рис. 1).

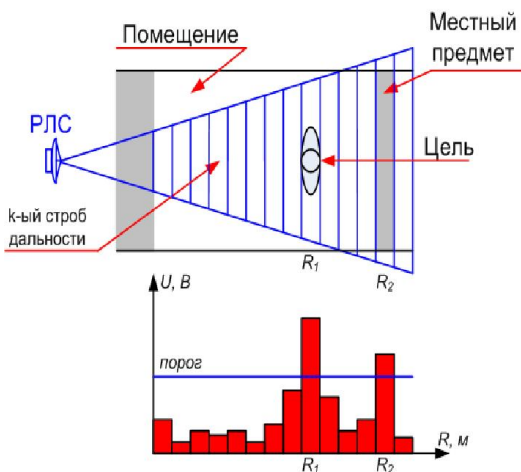


Рисунок 1 – Появление ложной цели в результате модуляции сигнала, отраженного от МП

Дополнительной проблемой при радиолокационном обнаружении целей за оптически непрозрачными преградами является случай, когда в зоне обзора могут находиться несколько подвижных людей, что усложняет задачу обнаружения и определения истинного количества реальных подвижных целей.

Для решения поставленных задач наиболее широко применяются методы

частотной модуляции и фазового детектирования. Использование широкополосных (ШП) и сверхширокополосных (СШП) импульсов позволяет осуществлять пространственную селекцию, что увеличивает точность и чувствительность используемых методов. Исследования в этой области ведутся и в России, и за рубежом и направлены на создание новой аппаратуры и новых теоретических моделей. Рассмотрение процессов распространения электромагнитной волны дает возможность построения математических моделей радиоустройств. Создание таких моделей позволит разрабатывать оптимальные алгоритмы обработки, даст возможность извлечения большей информации из сигналов, классифицировать и анализировать состояния целей, поможет сформулировать требования к аппаратным средствам радиолокаторов и определить наиболее перспективные направления развития рассматриваемой технологии.

Разработка методов разделения сигналов реальных целей и переотраженных сигналов от МП при сложном движении цели позволит синтезировать более эффективные схемы селекции движущейся цели, а также алгоритмы идентификации типа объекта.

Таким образом, задача разработки алгоритмов устранения ложных целей при обнаружении целей, совершающих сложное движение, является актуальной.

Цель работы

Разработка алгоритма идентификации переотраженных от МП сигналов при наличии в зоне обзора подвижной цели для их исключения из результатов обработки, что позволит устранить при радиолокационном наблюдении ложные цели.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи

1. Анализ существующих алгоритмов селекции движущихся целей на фоне отражений от МП применительно к целям, совершающим сложные движения, с целью устранения ложных целей.

2. Построение математических моделей наблюдения импульсного сверхширокополосного радиосигнала, отраженного от объекта, совершающего сложные движения, с целью анализа и выявления особенностей при наблюдении такой цели.

3. Синтез алгоритма принятия решения о наличии ложной цели при обнаружении подвижного объекта, совершающего сложные движения, при

использовании метода построения траектории подвижного объекта по двум квадратурам фазового приемника.

4. Создание программной модели и математическое моделирование разработанных методов в условиях наличия шумов и сигналов, отраженных от МП, с целью проверки их работоспособности.

5. Проведение экспериментов с использованием сверхширокополосных радиолокационных устройств для апробации предложенных алгоритмов в реальных условиях.

Предмет исследования

Предметом исследования является алгоритм обработки импульсных сигналов сверхширокополосных радиолокаторов с фазовым приемником, обеспечивающий идентификацию переотраженных от МП сигналов и устранение ложных целей при обнаружении подвижного человека.

Объект исследования

Объектом исследования является алгоритм принятия решения о наличии ложной цели при обнаружении подвижного человека при использовании метода построения траектории подвижного объекта по двум квадратурам фазового приемника с коррекцией нелинейных искажений.

Методы исследования

Решение поставленных задач осуществляется с использованием методов статистической радиотехники и математического анализа, аналитического и имитационного стохастического моделирования, экспериментальными исследованиями.

Научная новизна

Радиолокационные методы обнаружения человека являются дистанционными и не требуют визуального контакта с целью, что обуславливает их неоспоримые преимущества перед традиционными контактными и визуальными средствами наблюдения. Радиолокационное обнаружение подвижного и, особенно, малоподвижного человека открывает новые возможности и ставит новые задачи. К ним относятся задачи обработки сигналов, отраженных от подвижного человека и

переотраженных МП, сигналов, отраженных от МП и переотраженных подвижным человеком.

Разработаны новые алгоритмы идентификации переотраженных от МП сигналов и алгоритмы устранения ложных целей при обнаружении подвижного человека при использовании метода построения траектории движения человека по двум квадратурам фазового приемника.

Созданы программные модули для сверхширокополосного радиолокатора, реализующие предложенные алгоритмы. Программные модули сочетают в себе возможности обработки данных, полученных как от реального радиолокатора, так и сгенерированных при помощи программы.

Получены качественные и количественные результаты, подтверждающие работоспособность предложенных алгоритмов и эффективность их использования.

Приведены новые экспериментальные результаты, полученные с использованием предложенных алгоритмов.

Практическая ценность и значимость

Предложены алгоритмы, позволяющие эффективно решить задачу принятия решения о наличии ложной цели по восстановленной траектории движения при радиолокационном обнаружении биологического объекта.

Исследование предложенных алгоритмов с помощью математического и имитационного моделирования позволяет сравнить их эффективность в различных ситуациях.

Реализованные в программе моделирования алгоритмы обработки сигнала позволяют оценить вычислительные затраты на обработку сигнала. Это имеет большое значение при выборе алгоритма с учетом вычислительных ресурсов системы обработки сверхширокополосного радиолокатора и при реализации потокового (в реальном времени) процесса обработки сигнала.

Достоверность

Обоснованность научных положений и выводов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждается использованием апробированных методов статистического анализа и высокой степенью совпадения результатов математического и имитационного моделирования, а также проверка предложенных алгоритмов на реальных данных в ходе проведенных экспериментов.

Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность использования предложенного алгоритма в сверхширокополосных радиолокаторах для решения задач обнаружения биологических объектов на фоне переотражений от МП с устранением возникающих ложных целей.

Использование результатов работы

Предложенные методы и результаты математического и имитационного моделирования использовались в следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, выполненных в Московском авиационном институте:

1. СЧ ОКР «Создание аппаратно-программного комплекса, реализующего импульсное электромагнитное воздействие на технические средства и измерение характеристик отраженных от них сигналов», шифр «Воланд-М», контракт № 40460-14440/018/Ю-2010 от «10» июня 2010 года – заказчик ЗАО «Группа Защиты-ЮТТА».

2. СЧ НИР «Исследование возможности определения местоположения персонала, работающего на объекте с повышенной опасностью» Государственный контракт от 01 февраля 2008 года № 1649-03/35580-14440 СЧ НИР «Мокасин», шифр «Мокасин-МАИ», заказчик - Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт «Квант».

3. Грант Российского фонда фундаментальных исследований «Обнаружение и измерение параметров живых малоподвижных и неподвижных объектов с использованием сверхширокополосных радиолокационных систем малой дальности». Шифр «09-02-13581-офи_ц».

4. Грант Российского фонда фундаментальных исследований «Исследование особенностей работы и методов построения сверхширокополосных радиосистем с большими антеннами с учетом деформации структуры сигналов и диаграмм направленности, возникающей в процессе излучения и приема». Шифр «11-07-00732-а».

5. ОКР «Создание ряда высокоточных аппаратно-программных комплексов для дистанционного обнаружения и наблюдения живых объектов в интересах медицины, охраны и безопасности», шифр «2011-2.4-524-043-001», государственный контракт № 07.524.11.4011 от «3» ноября 2011 года – заказчик Министерство образования и науки Российской Федерации.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Международная конференция «Ultra wideband and Ultra short Impulse Signals». Ukraine, Sevastopol, 15-19 September, 2008.
2. 3-я международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». Россия, Суздаль, 22-24 сентября, 2009.
3. Международная научно-техническая конференция «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности». Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 28 января, 2013.

Публикации

По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано пять печатных работ, из них три научные статьи в журналах, находящихся в перечне ВАК, и тезисы двух докладов.

Положения, выносимые на защиту

1. Совмещение пространственной селекции и корреляционной обработки позволяет на основе предложенного алгоритма эффективно устранить ложную цель, возникающую из-за переотражений от местных предметов при радиолокационном обнаружении биологических объектов.
2. Для увеличения эффективности идентификации ложных целей адаптированы алгоритмы системы обработки к свойствам биологических объектов.
3. Разработанные математическая и имитационная модели систем обработки сигналов, принятых от квадратурного приемника, позволяют провести сравнительный анализ предложенных и известных алгоритмов при различных параметрах сигнала.
4. Разработаны программные модули для сверхширокополосного радиолокатора, реализующие идентификацию ложных целей по предложенному алгоритму.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 140 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, включающего 50 источников.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе проведен обзор наиболее известных приборов отечественных и зарубежных организаций, предназначенных для обнаружения и наблюдения за живыми объектами, алгоритмов обработки данных и анализ их применения. У рассмотренных радиолокационных приборов, предназначенных для наблюдения за людьми, можно выделить три основных назначения:

1. Обнаружение людей за оптически непрозрачными преградами;
2. Обнаружение людей под завалами;
3. Медицинское обследование людей.

Рассмотрены основные методы построения радиолокаторов, предназначенных для обнаружения людей на фоне отражений от МП. Выполнен обзор литературы по радиолокационному наблюдению живых объектов.

Большинство современных радиолокационных методов селекции движущейся цели (СДЦ) на фоне пассивных неподвижных или малоподвижных МП основан на различии скоростей цели и МП, которое позволяет разделить принятые эхосигналы по различию доплеровского сдвига несущей частоты.

Выделение доплеровских частот сигналов, принятых от движущихся целей, производится в схеме обнаружителя, пример которой приведен на рис. 2. Так как начальная фаза эхосигнала случайна, возможен случай отсутствия сигнала на выходе коррелятора, при наличии его на входе. Поэтому в приемнике используются два квадратурных канала. Опорные сигналы квадратурных каналов сдвинуты друг относительно друга на $\pi/2$. На выходе корреляторов фильтры высоких частот (ФВЧ) выделяют сигнал доплеровской частоты. Далее происходит объединение квадратурных компонент. Результат объединения поступает на пороговое устройство (ПУ).

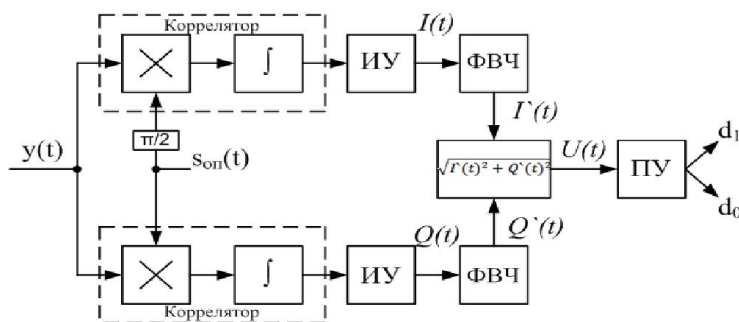


Рисунок 2 – Структура обнаружителя движущейся цели с квадратурными каналами.

Применение фазового детектирования позволяет зафиксировать перемещение наблюдаемого объекта на малые расстояния (десятые доли длины волны излучаемого

сигнала). Интегрирующий усилитель (ИУ) предназначен для выделения огибающей последовательности импульсов, в которой заключена информация о движении цели, на выходе коррелятора. ФВЧ предназначен для подавления составляющих принятого сигнала, вызванных отражениями от МП. Система обнаружителя подвижной цели, схема которой показана на рис. 2, эффективно обнаруживает движущиеся цели, имеющие радиальную составляющую скорости относительно радиолокатора на фоне неподвижных МП и не изменяющие за период наблюдения своих динамических характеристик, что позволяет накопить хотя бы несколько периодов доплеровской частоты в выходных ФВЧ.

Для обнаружения слабого полезного сигнала на фоне мощных пассивных помех необходимо использовать пространственную селекцию. Помимо снижения динамического диапазона это позволит локализовать положение целей и обеспечить их разрешение. Так как движение цели сравнительно медленное, можно организовать сканирование без потери качества доплеровского сигнала для каждого строба.

Но при таком обнаружении подвижный объект модулирует сигнал, отраженный от МП, что приводит к появлению ложных целей (рис. 3).

Сигнал, принятый с расстояния, где расположен только МП, имеет переменную составляющую, которая появляется в результате модуляции сигнала подвижным объектом, находящимся на пути распространения сигнала. Эта переменная составляющая проходит через фильтры высоких частот и попадает на пороговое устройство, что идентифицируется системой как еще одна цель.

Для борьбы с ложными целями могут применяться следующие методы:

1. Бланкирование отраженных сигналов, пришедших после первого.
2. Метод частотной селекции - сравнение частот сигналов Доплера первой цели и помехи.

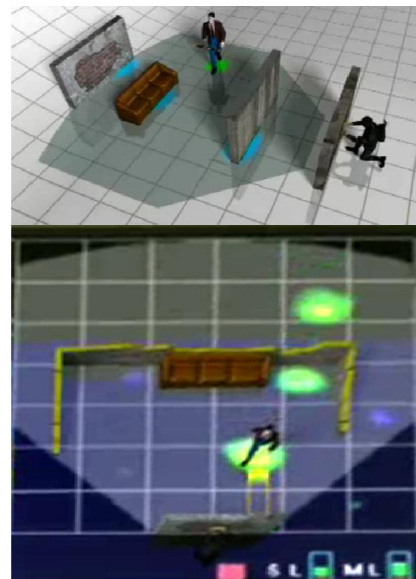


Рисунок 3 – Пример отображения ложных целей на экране радиолокатора в результате модуляции сигнала, отраженного от МП

3. Корреляция сигналов радиолокатора, являющимися отражениями от цели и от помехи.

У рассмотренных методов наблюдается ряд ограничений для их применения.

Бланкирование отраженных сигналов, пришедших после первого, не может быть применено в общем случае, когда происходит обнаружение более одной цели одновременно.

Метод частотной селекции сигналов цели и МП применим только для целей, совершающих линейное радиальное движение, и не работает в более общем случае, когда цель может совершать сложное движение из-за усложняющегося спектра отраженного сигнала. При этом сигнал, отраженный от МП и модулированный биологическим объектом, будет обладать спектром, схожим с отражением от самой цели, что не позволяет их разделить по частоте.

Если же использовать корреляцию сигналов радиолокатора, являющимися отражениями от цели и от МП, то эффективная работа критерия возможно только при амплитудах движения цели значительно меньшей длины волны излучаемого сигнала.

Основным выводом первой главы является то, что в существующих схемах селекции движущихся целей наблюдается появление ложных целей, вызванное переотражением модулированных сигналов от МП.

Во второй главе разработан алгоритм идентификации переотраженных от МП сигналов биологического объекта, совершающего сложное (колебательное) движение, с совместным использованием обеих квадратур фазового приемника для восстановления траектории движения цели.

Оценена применимость предложенного метода для идентификации переотраженного от МП сигнала на примере цели, совершающей возвратно-поступательное движение.

Излучаемый сигнал является последовательностью радиоимпульсов с высокочастотным заполнением амплитудой E_0 и частотой ω_0 :

$$U_0(t) = E_0 \sum_k \exp\left(-\frac{\pi(t - kT_n)^2}{\tau^2}\right) \sin(\omega_0(t - kT_n)) \quad (1)$$

В случае если сигнал отразился от неподвижного предмета, сигнал на входе коррелятора $U_{\text{вх}}(t)$ имеет вид:

$$U_{\text{вх}}(t) = E_i \sum_k \exp\left(-\frac{\pi\left(t - kT_n - \frac{2R_i}{c}\right)^2}{\tau^2}\right) \sin\left(\omega_0\left(t - kT_n - \frac{2R_i}{c}\right) + \varphi_i\right) \quad (2)$$

где: k – число импульсов последовательности;

E_i – амплитуда сигнала отраженного от i -го предмета;

R_i – расстояние до i -го предмета;

φ_i – случайная фаза отражения от i -го предмета.

В соответствии с алгоритмом обнаружения (рис.2) принятый сигнал в корреляторе перемножается с опорным (излученным) сигналом. Тогда на выходе коррелятора получаем энергию взаимодействия опорного и отраженных от МП сигналов:

$$U_{\text{корр}}(t) = \frac{E_0 T}{2} \sum_i E_i \sum_k \exp\left(-\frac{2\pi\left(t - kT_n - \frac{2R_i}{c}\right)^2}{\tau^2}\right) \cos(\Delta\varphi_i) \quad (3)$$

где $\Delta\varphi = \frac{4\pi R_i}{\lambda_0} - \varphi_i$ – разность фаз между колебаниями излученного и отраженного от произвольного i -го МП сигналов.

Для сигнала, отраженного от одной подвижной точечной цели, справедлив такой же интеграл, как в (3), но расстояние зависит от времени:

$$U_{\text{корр}}(t) = E_0 \int_t^{t+\tau} \sum_i E_i \sum_k \exp\left(-\frac{2\pi\left(t - kT_n - \frac{2R_m}{c} - \frac{2R(t)}{c}\right)^2}{\tau^2}\right) \sin(\omega_0(t - kT_n)) \sin(\omega_0(t - kT_n - \frac{2R_m}{c} - \frac{2R(t)}{c}) + \varphi_m) dt \quad (4)$$

где: E_m – амплитуда сигнала, отраженного от подвижной точечной цели;

R_m – расстояние до подвижной точечной цели;

φ_m – случайная фаза отражения от подвижной точечной цели.

Рассматривается случай, когда в зоне наблюдения радиолокатора находится цель, совершающая возвратно-поступательное движение, а за целью (дальше от радиолокатора) находится МП с большой отражающей способностью.

Расстояние от радиолокатора до цели медленно меняется по квазипериодическому закону, имеющему участки с нулевыми скоростями. В качестве модели такого движения используем гармонический закон, который также обладает участками с нулевыми скоростями и вызовет пересечение спектров полезного сигнала и сигнала, отраженного от МП:

$$R(t) = \Delta R \cdot \sin(\Omega t + \theta) \quad (5)$$

где ΔR – амплитуда движения объекта;

$\Omega = 2\pi F$ – круговая частота движения объекта, F – частота движения объекта;

θ – начальная фаза движения объекта.

Сигналы на выходах корреляторов определяются следующим выражением:

$$U_I(t) = \frac{E_0 E_m}{2} T \cos \left[2\omega_0 \frac{R(t)}{c} + \Delta\varphi_m \right] + P_I \quad (6) \quad U_Q(t) = \frac{E_0 E_m}{2} T \sin \left[2\omega_0 \frac{R(t)}{c} + \Delta\varphi_m \right] + P_Q \quad (7)$$

где: E_0 – амплитуда излученного сигнала; E_m – амплитуда принятого сигнала;

T – время интегрирования интегратора; ω_0 – несущая частота излучаемого сигнала; $R(t)$ – траектория движения цели; $\Delta\varphi_m$ – разность фаз опорного и принятого сигналов; P_I, P_Q – постоянные напряжения вызванные отражением от МП.

Предложено для идентификации переотраженного от МП сигнала использовать коэффициент корреляции K :

$$K = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} [(U_{1i} - \bar{U}_1) \cdot (U_{2i} - \bar{U}_2)]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} [(U_{1i} - \bar{U}_1)^2] \cdot \sum_{i=0}^{n-1} [(U_{2i} - \bar{U}_2)^2]}} \quad (8)$$

где \bar{U}_1, \bar{U}_2 – средние значения сигналов с выхода коррелятора из 1 и 2 стробов дальности; U_{1i}, U_{2i} – отсчеты сигналов с выхода коррелятора из 1 и 2 стробов дальности; $\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} [(U_{1i} - \bar{U}_1)^2]}$, $\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} [(U_{2i} - \bar{U}_2)^2]}$ – СКО отсчетов; n – число отсчетов в сигналах из стробов дальности 1 и 2.

Рассмотрено применение коэффициента корреляции для определения взаимосвязи напряжений в одноименных квадратурных каналах из стробов дальности с целью и МП (рис 4).

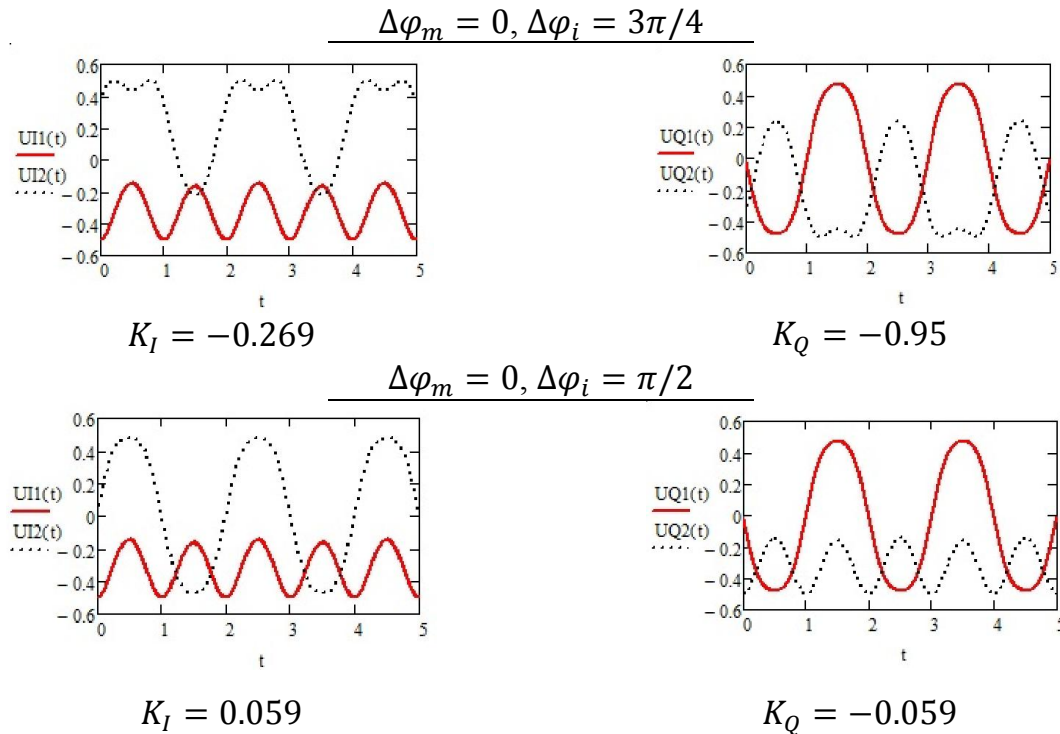


Рисунок 4 – Напряжение в квадратурных каналах для стробов дальности с целью и МП для различных значений параметра $\Delta\varphi$.

Показано, что для одноименных квадратур присутствует корреляция доплеровских сигналов, при этом коэффициент корреляции изменяется от значения «-1» при разности фаз $\Delta\varphi=\pi$ до значения «1» при нулевой разности фаз. Исключением является разность фаз, близкая к $\Delta\varphi=\pi/2$, при которой корреляция исчезает. А так в рассматриваемой радиолокационной системе используются сигналы с длиной волны в единицы и доли сантиметров, то значения разностей фаз близких к $\Delta\varphi=\pi/2$ могут появляться на выходе фазового детектора достаточно часто, что существенно ограничивает использование метода.

Еще одним из факторов, влияющих на изменение формы сигнала на выходе фазового детектора, является амплитуда изменения расстояния до цели (ΔR в формуле (5)). Рассмотрим возможность использования коэффициента корреляции (8) для идентификации помехи, предположив, что сигналы от цели и от МП имеют различные величины фазовых отклонений, вызванных различной амплитудой колебаний расстояния ΔR (рис. 5). Показано, что при различии амплитуды изменения расстояния у отразившегося от цели и переотразившегося от МП сигналов более чем в 6 раз, значение модуля коэффициента корреляции доплеровских сигналов одноименных квадратур не превышает значения 0.5.

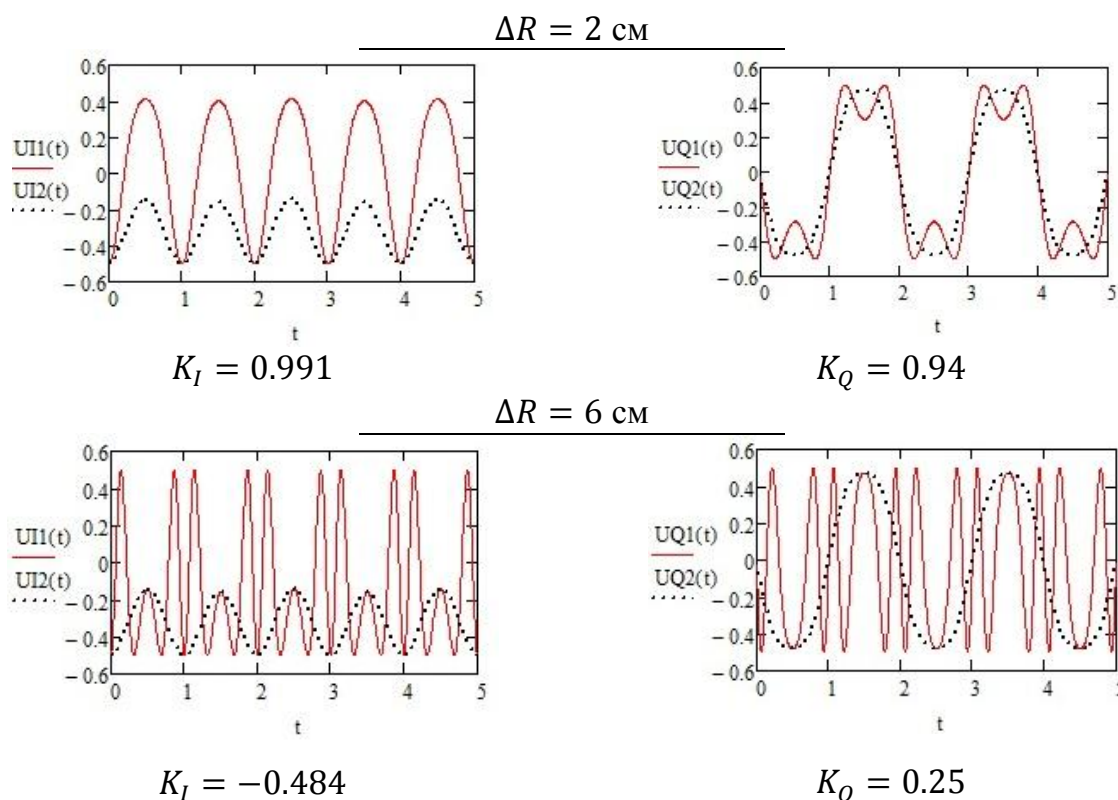


Рисунок 5 – Напряжение в квадратурных каналах для стробов дальности с целью и МП для различных значений параметра ΔR .

Сделан вывод, что при использовании информации одной квадратуры метод корреляционного анализа имеет ограничения по применению, вызванные деформацией сигналов при прохождении фазового детектора, как при изменении разности фаз отраженных сигналов, так и при изменении амплитуды колебаний расстояния до цели или МП.

Предложено использовать метод восстановления значений фазы по информации двух квадратурных каналов. Так как выходы первой и второй квадратур являются функциями синуса и косинуса от фазы принятого сигнала, то зависимость изменения фазы при изменении расстояния до цели можно определить по формуле:

$$\varphi(t) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin \varphi(t)}{\cos \varphi(t)} \right), \quad (9)$$

где $\sin \varphi(t)$ и $\cos \varphi(t)$ - выходы первой и второй квадратуры соответственно.

Использование обеих квадратур позволяет преодолеть чувствительность методов обнаружения к положению цели в пространстве. Однако при наличии МП выходные напряжения квадратур несут в себе большую постоянную составляющую, наличие которой не дает возможности напрямую использовать эту формулу. Предложено использовать метод разделения постоянной составляющей и переменного сигнала с информацией о движении для уменьшения динамического диапазона предварительных усилителей и АЦП без потери полезных данных.

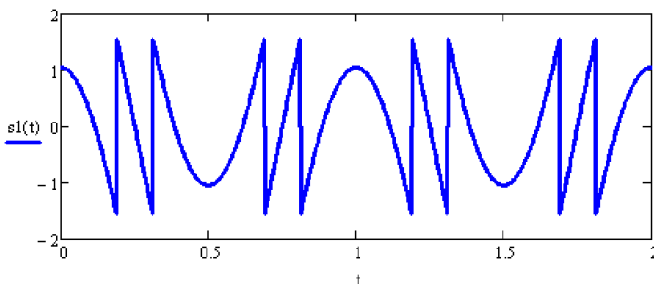


Рисунок 6 – Результат объединения двух квадратур.

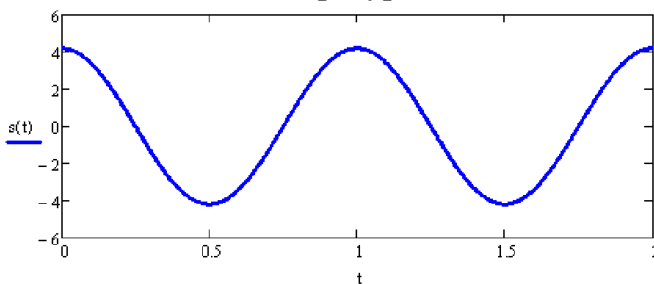


Рисунок 7 - Результат объединения квадратур с последующей коррекцией скачков.

Показано, что при использовании арктангенс-демодуляции выходных сигналов фазового детектора появляются периодические изломы фазы, происходящие из-за того, что в момент взятия частного от двух производных, функция перестает быть непрерывной, не позволяют восстановить траекторию движения цели (рис. 6). В тех точках, где знаменатель переходит через нуль, выходная функция делает скачек на $(+\pi)$ или $(-\pi)$. Для устранения этого недостатка предложено использовать

программную обработку, которая осуществляет коррекцию скачков функции (рис. 7).

Предложен алгоритм идентификации переотражения от МП (рис. 8), учитывающий особенности решаемой проблемы и предназначенный для применения в сверхширокополосном радиолокаторе.

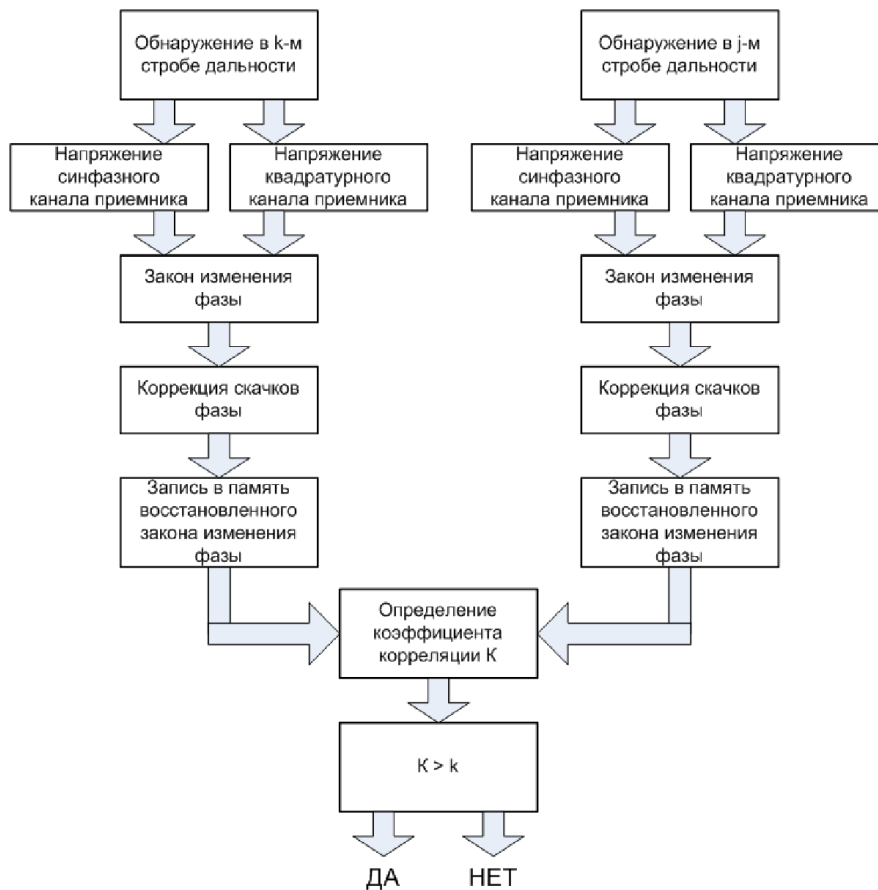


Рисунок 8 – Алгоритм идентификации переотраженных от МП сигналов.

Показано, что применение такой обработки позволяет вернуться к определению коэффициента корреляции (8) сигналов, отраженных от реальной цели и переотраженных МП, но уже по восстановленной при объединении информации обоих квадратур траектории движения цели (рис. 9).

Подтверждено, что применение предложенного метода позволяет идентифицировать переотраженный сигнал по значению коэффициента корреляции сигналов из двух стробов дальности, в которых находятся реальная цель и МП.

В выводах по второй главе отмечено, что при переотражении от МП сигналы приобретают другую начальную фазу и изменяют амплитуду модуляций, что приводит к значительным изменениям сигналов при прохождении через нелинейный элемент приемного тракта – фазовый детектор, что приводит к отсутствию корреляции доплеровских сигналов, отраженных от подвижного объекта и переотраженных от МП. Показано, что разработанный метод идентификации

переотраженных сигналов с совместным использованием обеих квадратур фазового приемника не зависит от положения цели и МП в пространстве. На основе разработанного метода синтезирован алгоритм цифровой обработки сигналов системы идентификации ложных целей.

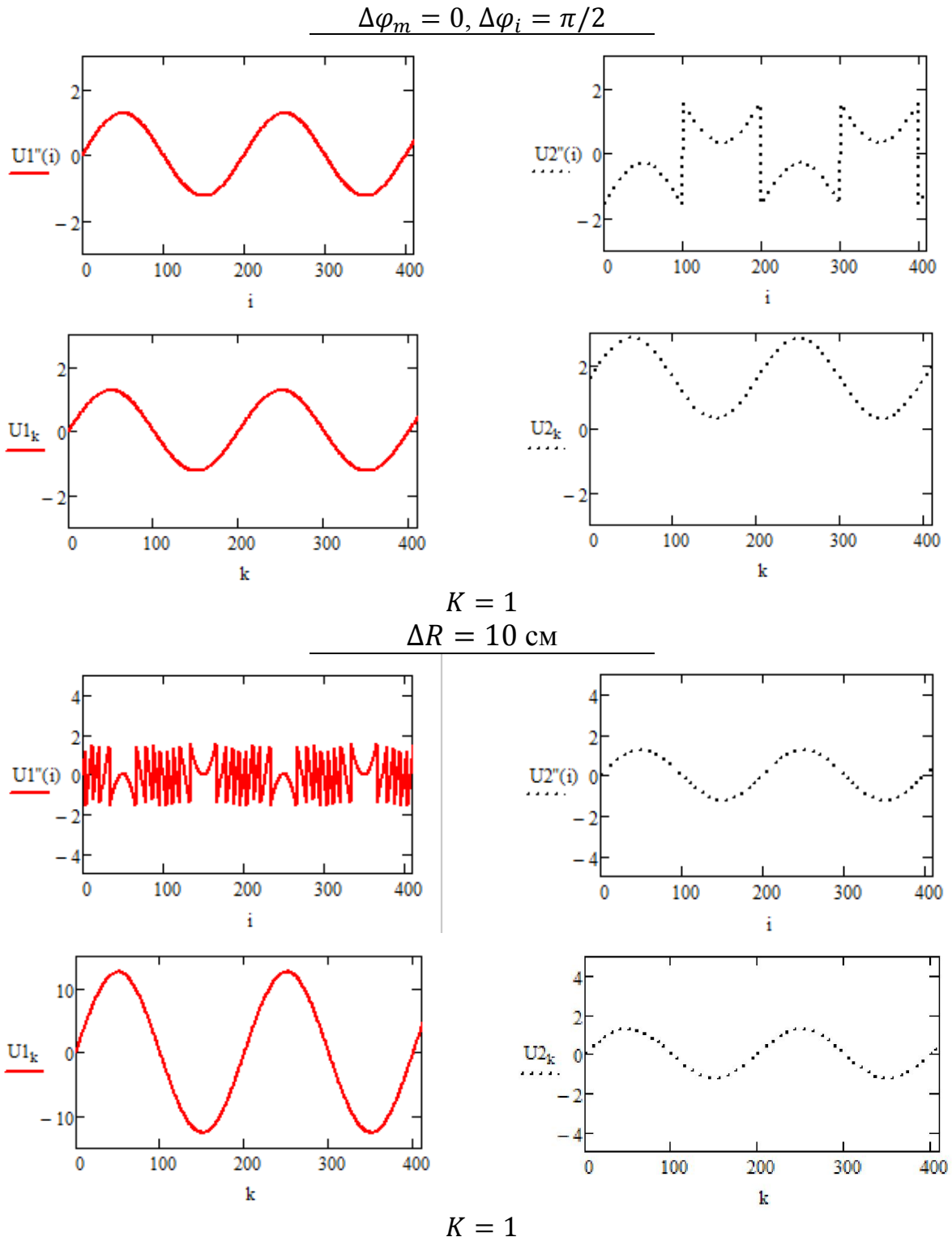


Рисунок 9 – Результаты объединения и коррекции скачков фазы сигналов квадратур при цифровой обработке напряжений в квадратурных каналах для стробов дальности с целью и МП.

В третьей главе представлено математическое и имитационное моделирование процессов системы СДЦ.

Имитационная модель включает в себя блоки: модель входных воздействий (источник сигнала), блок обработки сигналов, блок анализа результатов обработки.

Модель входных воздействий (блок источника сигнала) позволяет:

- моделировать сигналы с заданными параметрами движения объекта, переотраженных от МП сигналов, а также с заданными параметрами шума;
- считывать данные по СОМ порту с радиолокатора и передавать на обработку;
- записывать и сохранять в файл данные, полученные от радиолокатора, для последующего считывания;
- считывать записанные данные для передачи на дальнейшую обработку.

Для считывания данных по СОМ порту был разработан протокол общения с радиолокатором. Протокол позволяет передавать оцифрованные значения напряжения обеих квадратур, запускать и останавливать процесс измерения, устанавливать значения линии задержки, устанавливать режимы сканирования, передавать запросы контроля состояния радиолокации.

Разработан формат хранения данных, в соответствии с которым помимо самих данных, принятых от радиолокатора, хранятся технические параметры, а также описание условий, при которых происходит запись данных.

Блок обработки сигнала представлен реальным алгоритмом идентификации сигналов, переотраженных от МП, причем благодаря модульной структуре имитационной модели возможно подключение как существующих, так и предложенных методов.

В модели реализованы возможности:

- обработка полученных сигналов с помощью частотной системы СДЦ;
- обработка сигналов с помощью предложенной схемы.

В блоке анализа результатов обработки реализованы следующие возможности:

- формирование текстовых файлов с результатами обработки для последующего анализа в математических пакетах MathCAD, MatLab, StatAssist;
- самостоятельная обработка результатов и отображение в текстовом и графическом виде.

При сохранении результатов моделирования есть возможность выбора, на каком шаге обработки произвести выборку данных, представления графического

отображения состояния сигнала на каждом шаге и возможность выбора временного интервала для сохранения в файл различных форматов: txt, xcl, csv.

Имитационная модель реализована в программе, пользовательский интерфейс которой приведен на рис. 10.

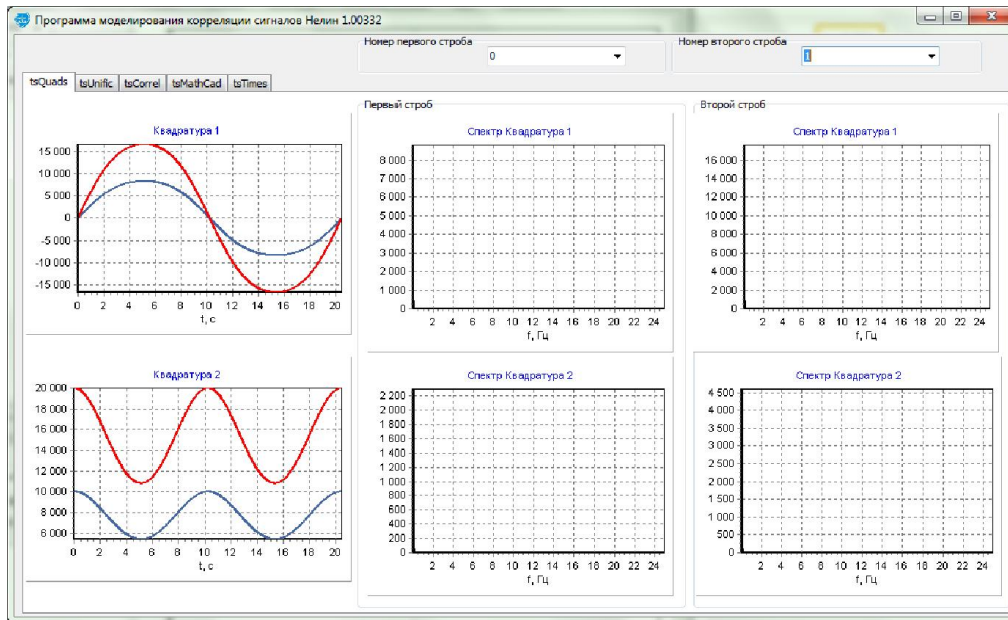


Рисунок 10 – Экранная форма программы моделирования.

Проведено сравнение коэффициента корреляции, рассчитанного для восстановленных траекторий движения, в серии экспериментов.

В выводах по главе отмечено, что с помощью рассмотренной имитационной модели были рассмотрены зависимости коэффициента корреляции от начальной фазы сигнала, отраженного от объекта и МП, амплитуды движения наблюдаемого объекта, от отношения сигнал-шум в квадратурных каналах для предложенного метода идентификации помеховых сигналов. Моделирование показало, что при использовании предложенного метода идентификация происходит одинаково хорошо для всех значений амплитуд и начальных фаз. Коэффициент корреляции превышает значение 0.5 для отношения сигнал-шум более 2 раз.

По результатам моделирования были построены характеристики идентификации (рис. 11), по которым видно, что для обеспечения вероятности правильной идентификации 0.9 при вероятности ложной идентификации 10^{-5} требуется значение коэффициента корреляции, равное 0.37. Учитывая это, для обеспечения работы при отношении сигнал/шум 6 дБ было задано пороговое значение коэффициента корреляции 0.4.

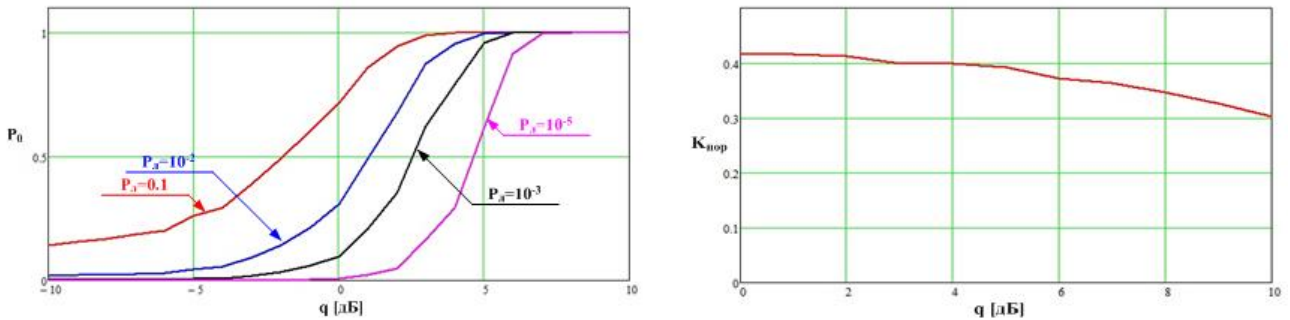


Рисунок 11 – Характеристики идентификации для выбора порогового значения коэффициента корреляции

Траектория движения цели, восстановленная по двум квадратурам фазового приемника, благодаря полным данным имеет коэффициент корреляции более 0.4 с траекторией помехи, что позволяет в большем количестве случаев правильно идентифицировать помеху, в отличие от существующих методов.

Четвертая глава посвящена описанию экспериментов с использованием макета радиолокатора для обнаружения людей за стенами (рис. 12).



Характеристики радиолокатора:

- центральная частота спектра 3.5 ГГц;
- ширина полосы частот 500 МГц;
- длительность импульса 2 нс;
- частота повторения импульсов 5 МГц;
- импульсная излучаемая мощность 0,5 Вт;
- средняя излучаемая мощность 5 мВт;
- динамический диапазон приемника 70 дБ;
- ширина луча антенны $60^{\circ} \times 30^{\circ}$.

Рисунок 12 – Внешний вид макета радиолокатора для обнаружения людей за стенами

Проведены эксперименты по исследованию работы предложенных алгоритмов селекции переотраженных от МП сигналов, в том числе при наблюдении имитатора грудной клетки человека, наблюдении грудной клетки дышащего человека, наблюдении идущего человека.

Целью проведения натуральных экспериментов с использованием реального радиолокатора была проверка работоспособности предложенного алгоритма обработки. Предложенный алгоритм позволил получить выигрыш в количестве

ложных целей при радиолокационном наблюдении движущегося человека на фоне МП. В качестве целей при всех видах экспериментов с движущимися людьми использовалась группа людей разного пола, возраста и комплекции.

При проведении экспериментов для обработки сигналов, полученных от радиолокатора, использовалась программа моделирования, в которой в качестве источника данных использовались не моделируемые данные, а оцифрованные данные макета радиолокатора, получаемые по СОМ-порту.

В первой серии экспериментов происходило сравнение сигналов из двух стробов дальности: с дышащим человеком и с МП.

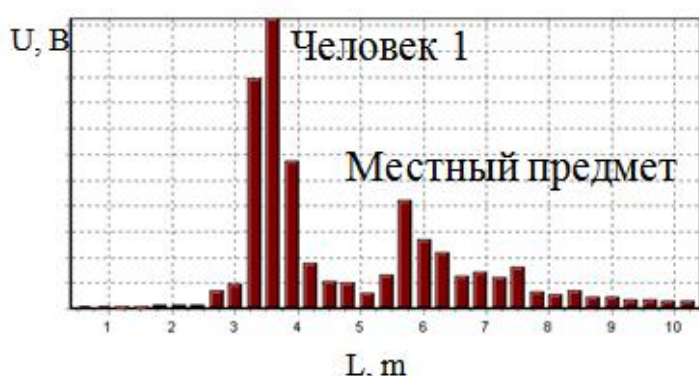


Рисунок 13 – Амплитуды доплеровских сигналов для каждого строба дальности при наблюдении подвижного человека на фоне МП

На рисунке 13 приведена гистограмма амплитуд доплеровских сигналов для каждого строба дальности при наблюдении подвижного человека на фоне МП.

На рисунке 14 представлены напряжения из строба с человеком (пунктирная линия) и строба с МП (сплошная линия) в первом квадратурном (а) и втором квадратурном (б) каналах. На рисунке 15 представлена восстановленная траектория движения для строба с человеком (а) и строба с МП (б).

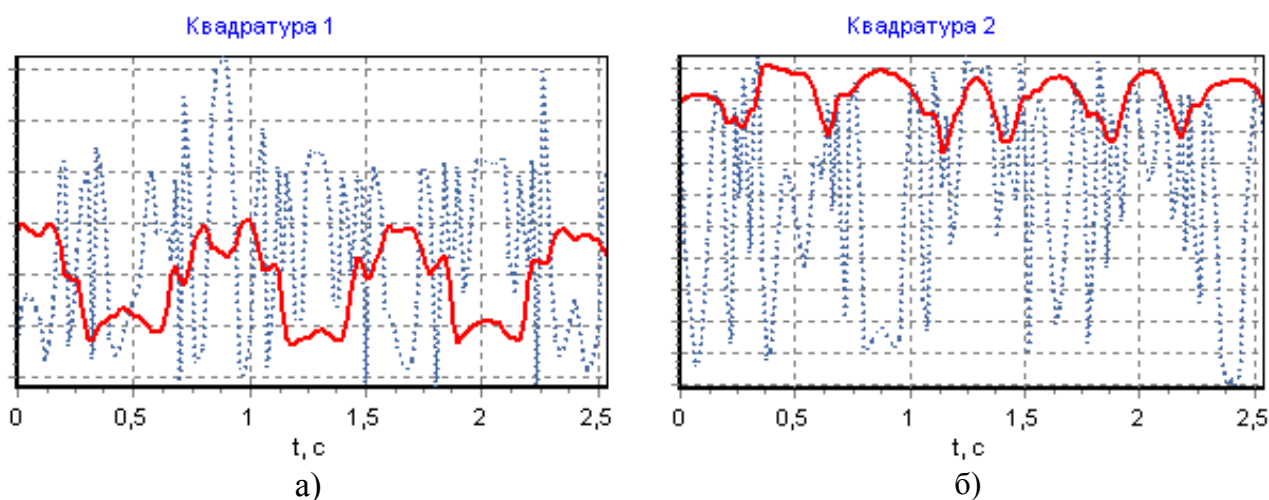


Рисунок 14 – Напряжение в 1-ом (а) и 2-ом (б) квадратурных каналах для стробов с человеком и МП

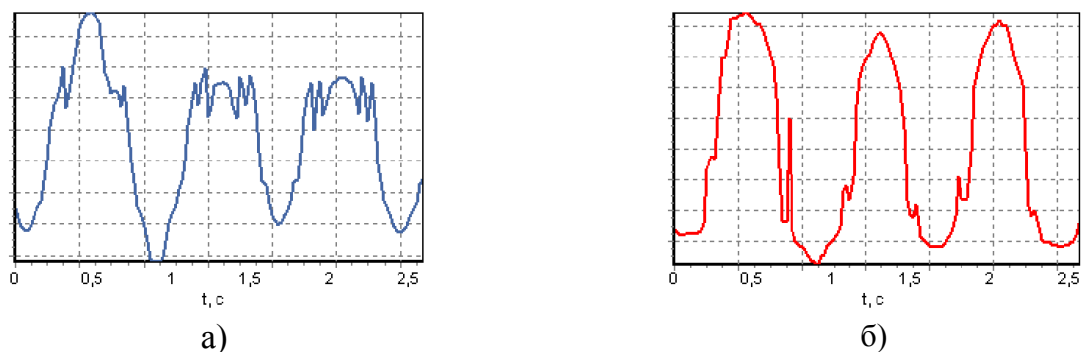


Рисунок 15 – Восстановленная траектория движения для строба с человеком (а) и МП (б)

Коэффициент корреляции между восстановленными траекториями движения из стробов с человеком и МП равен $K = 0.87$.

Видно, что восстановленные траектории движения из стробов с человеком и МП имеют высокую степень корреляции.

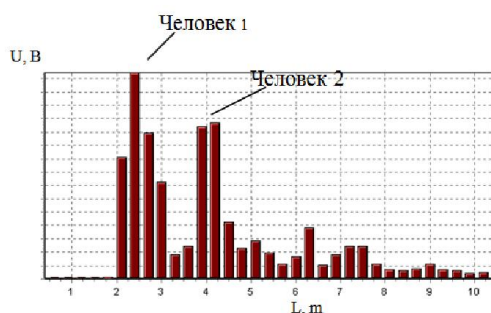


Рисунок 16 – Амплитуды доплеровских сигналов для каждого строба дальности при наблюдении подвижного человека на фоне МП

Во второй серии экспериментов происходило сравнение сигналов из двух стробов дальности, в которых находилось два человека.

На рисунке 16 приведена гистограмма амплитуд доплеровских сигналов для каждого строба дальности при наблюдении двух дышащих человек.

На рисунке 17 представлены напряжения из строба с первым человеком (пунктирная линия) и строба со вторым человеком (сплошная линия) в первом квадратурном (а) и втором квадратурном (б) каналах. На рисунке 18 представлена восстановленная траектория движения для строба с первым человеком (а) и строба со вторым человеком (б).

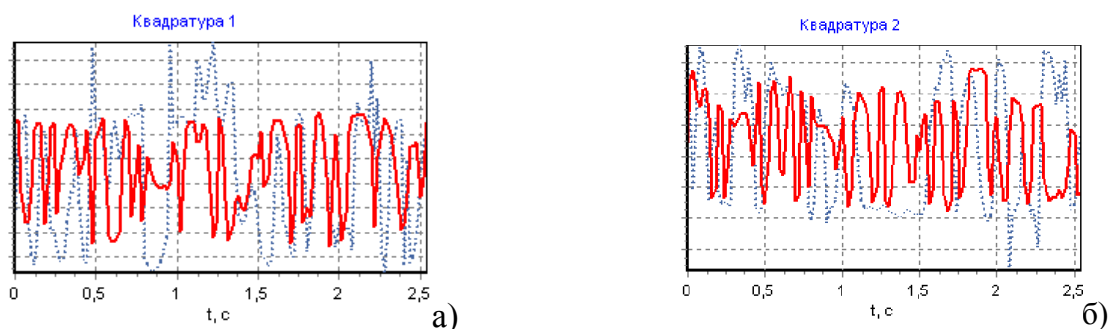


Рисунок 17 – Напряжение в 1-ом (а) и 2-ом (б) квадратурных каналах для стробов с 1-м человеком и 2-м человеком

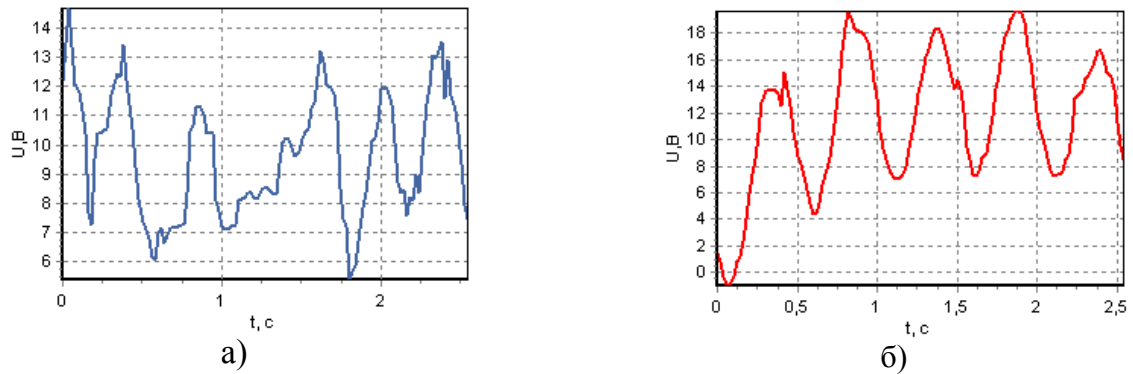


Рисунок 18 – Восстановленная траектория движения для строба с 1-м человеком (а) и 2-м человеком (б)

Коэффициент корреляции между восстановленными траекториями движения из стробов с человеком и МП равен $K = 0.02$.

Показано, что восстановленные траектории движения из стробов с 1-м человеком и 2-м человеком имеют модуль коэффициента корреляции меньше 0.4, тогда как в первой серии экспериментов модуль коэффициента корреляции превышал значение 0.4.

В результате экспериментов по обнаружению подвижного человека отмечено, что коэффициент корреляции восстановленной траектории движения объекта и переотражения от МП превышает значение 0.4, а в случае обнаружения двух подвижных людей коэффициент корреляции траекторий движения ниже значения 0.4, что позволяет производить идентификацию ложных целей и распознавать, когда в поле наблюдения присутствуют две различные реальные цели.

В заключении приведены основные выводы по работе.

К основным научным и практическим результатам, полученным в ходе теоретических и экспериментальных исследований, относятся:

1. Проведен анализ существующих методов идентификации помеховых переотражений применительно к селекции целей, совершающих сложное движение, выявлены параметры движения цели, при которых существующие методы малоэффективны.

2. Разработан метод идентификации переотражений при радиолокационном обнаружении живых объектов, который позволяет идентифицировать переотражение независимо от положения цели и амплитуды ее движения.

3. Созданная программа математического моделирования позволила сравнить существующие методы идентификации помеховых переотражений при обнаружении живых объектов и разработанный метод по значению коэффициента корреляции.

4. Проведен ряд экспериментов, подтверждающих эффективность предложенного метода идентификации ложных переотражений при обнаружении живых объектов.

Публикации по теме диссертации

1. Нелин И.В. Возможности частотного и импульсного методов для измерения дальности в сверхширокополосных радарах // Сборник докладов 3й международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». Россия, Суздаль, 22-24 сентября, 2009. Материалы конференции. – Москва: «Международный центр научной и технической информации». Стр. 65 – 68.
2. Герасимов П.Н., Корнев Я.И., Нелин И.В., Охотников Д.А. «Обработка радиолокационных сигналов, отраженных от грудной клетки человека». Научно-технический вестник Поволжья. №5 2012. - Казань. Стр. 139 – 139.
3. Иммореев И.Я., Нелин И.В., Охотников Д.А. «Радиолокационное обнаружение живых объектов на фоне отражений от местных предметов». Научно-технический вестник Поволжья. №5 2012. - Казань. Стр. 194 – 197.
4. Нелин И.В., Охотников Д.А. «Метод разделения сигналов реальных и ложных целей при наблюдении подвижного человека на фоне переотражений от местных предметов»// Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности». 28 января 2013 г.
5. Дудецкая Е.М., Кузнецов В.В., Нелин И.В. «Радиолокационная система оценки состояния пилота, проходящего тренировки на авиатренажере». Научно-технический вестник Поволжья. №5 2013. - Казань. Стр. 155 – 158.