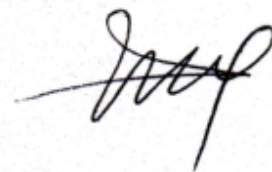


На правах рукописи



**Фом Хуан Тиеп**

**ПОЛУАКТИВНАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ DVB-T2**

Специальность: 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация  
(технические науки)

**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,  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ).

Официальные оппоненты:

Рассветалов Леонид Александрович  
Доктор технических наук, профессор кафедры радиосистем Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого.

Коротков Александр Николаевич  
кандидат технических наук,  
заместитель начальника отдела разработки базовых модулей Санкт-Петербургского филиала закрытого акционерного общества «Конструкторское бюро навигационных систем».

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Защита состоится «09» декабря 2015г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета на сайте СПб ГЭТУ [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru)

Автореферат разослан «08» октября 2015 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 212.238.03  
к.т.н., доцент

 Шевченко М.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Традиционные радиолокационные средства, используемые для мониторинга объектов на водной поверхности и в нижних слоях атмосферы, являются активными, т.е. обнаружение и оценка параметров объекта осуществляется по результатам обработки отраженного от него зондирующего сигнала. Такой подход сам по себе не может рассматриваться как экологически безопасный, поскольку связан с излучением в пространство значительной электромагнитной энергии. Кроме того, активные радиолокационные системы (РЛС), имеющие в своем составе передающие устройства, являются дорогими, их эксплуатация требует разрешения на использование радиочастоты, размещение на местности должно осуществляться с учетом обеспечения электромагнитной совместимости. В этой связи представляется особо актуальной разработка и построение РЛС, использующих неизлучающие, т.е. пассивные технологии дистанционного мониторинга. В качестве одного из перспективных направлений пассивной радиолокации в настоящее время следует рассматривать полуактивные радиолокационные системы (ПАРЛС), где в качестве подсвета, зондирующего сигнала, применяются сигналы сторонних источников излучения, в частности, коммерческих радио- и телевизионных передатчиков, особенно использующих цифровые стандарты передачи данных.

Использование в качестве сигналов подсвета сторонних источников позволяет добиться снижения стоимости системы за счет отказа от передатчика как наиболее дорогостоящей ее части. Кроме того, применение пассивной неизлучающей технологии будет способствовать улучшению как электромагнитной, так и экологической обстановки в зоне размещения системы. Отсутствие необходимости получения разрешения на использование частотного диапазона и уменьшение массогабаритных параметров системы не только снизит ее цену, но и упростит ее размещение и эксплуатацию.

Указанные выше замечания служат мотивацией для исследования путей построения систем мониторинга целей на водной поверхности и нижних слоях атмосферы, использующих сигналы подсвета передатчиков цифрового эфирного телевидения (ЦЭТВ) стандарта DVB-T2.

**Целью диссертационной работы** является разработка структуры и алгоритмов обработки сигналов ПАРЛС, включая вопросы выбора расположения приемной позиции (ПП) для обнаружения надводных и воздушных объектов и измерения параметров их движения. Создание действующего макета ПАРЛС при использовании радиоизлучения передатчиков ЦЭТВ для проверки эффективности работы предложенных алгоритмов и технических решений в реальных условиях.

**Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи**

1. Анализ принципов построения и архитектуры существующих и перспективных ПАРЛС.

2. Анализ и выбор источников сигнала подсвета, схемы построения и местоположения ПАРЛС.

3. Разработка и исследование алгоритмов обработки сигналов в ПАРЛС.

4. Оценка технических характеристик ПАРЛС при использовании радиоизлучений ЦЭТВ DVB-T2 методом компьютерного моделирования.

5. Экспериментальные исследования макета ПАРЛС при использовании радиоизлучений ЦЭТВ DVB-T2 в Санкт-Петербурге для обнаружения и измерения параметров движения различных воздушных и надводных подвижных объектов.

**Методы исследования.** Теоретические исследования осуществлялись с использованием методов системного анализа, компьютерного моделирования. Экспериментальные исследования проводились с помощью макета ПАРЛС при использовании радиоизлучений ЦЭТВ DVB-T2.

### **Научная новизна**

1. Разработан оригинальный алгоритм восстановления сигнала опорного канала для исключения влияния пиков взаимной функции неопределенности (ВФН), вызванных наличием в сигнале пилот-сигналов, а также его переотраженных копий.

2. Создана и апробирована компьютерная модель ПАРЛС, использующей сигналы подсвета передатчиков ЦЭТВ стандарта DVB-T2.

3. По данным экспериментальных исследований макета ПАРЛС при использовании радиоизлучений ЦЭТВ DVB-T2 в Санкт-Петербурге получены оценки эффективности обнаружения и измерения параметров движения целей.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Алгоритм восстановления сигнала опорного канала, основанный на стандарте DVB-T2, для исключения влияния пиков ВФН, вызванных наличием в сигнале пилот-сигналов, а также его переотраженных копий.

2. Результаты цифрового моделирования ПАРЛС при использовании радиоизлучений ЦЭТВ DVB-T2.

3. Результаты натурных экспериментов ПАРЛС при использовании радиоизлучений ЦЭТВ DVB-T2 в Санкт-Петербурге для обнаружения и измерения параметров движения кораблей в Финском заливе и самолетов на территории аэропорта Пулково.

### **Практическая ценность работы**

1. Разработанная аналитическая модель может использоваться при создании ПАРЛС для различных технических приложений, включая контроль воздушной обстановки и водной поверхности.

2. Предложенные алгоритмы восстановления сигнала опорного канала и подавления прямого сигнала и отражений от местных помех в канале приема отраженного сигнала повышают эффективность работы ПАРЛС.

**Достоверность научных и практических результатов.** Достоверность подтверждается корректным использованием методов исследований, применением современных компьютерных средств и программ расчетов, конкретными

результатами компьютерного моделирования алгоритмов обработки сигналов в ПАРЛС, не противоречащих данным экспериментальных исследований на макете ПАРЛС при использовании радиоизлучений ЦЭТВ DVB-T2 в Санкт-Петербурге.

**Реализация результатов работы.** Практическая полезность подтверждается внедрением полученных результатов в НИР, выполненных на кафедре РС, а также актом об использовании полученных результатов в учебном процессе СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

**Апробация результатов работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

научно-практическая конференция «Геополитические факторы устойчивого развития и инновационные технологии прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций», СПб, 29 ноября 2012.

XLVI научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная памяти авиаконструктора И. И. Сикорского. СПб, 18 апреля 2014 г.

68-ая научная конференция профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 2 февраля 2015 и других конференциях ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 2 статьи в журнале «Известия вузов России. Радиоэлектроника» и 3 работы в материалах всероссийских и региональных конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав с выводами, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 150 с., в том числе 148 с. основного текста, 75 рисунков, 18 таблиц, список литературы из 61 наименования и приложение на 2 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определен круг решаемых задач, дана краткая характеристика работы.

**В первой главе** рассмотрена идеология построения ПАРЛС; рассмотрены методы определения координат цели; проанализированы основные достоинства и недостатки ПАРЛС; рассмотрена зависимость доплеровского смещения частоты сигнала от геометрии ПАРЛС. Рассмотрены отношение плотностей потока энергии прямой и переотраженной волн и отношение сигнал/шум для DVB-T и всемирного цифрового радио (Digital Radio Mondiale – DRM) ПАРЛС. Проведен анализ существующих систем ПАРЛС: Silent Sentry (Lockheed-Martin), Celldar (Roke Manor), систем обнаружения маловысотных низколетящих целей (НЛЦ) Homeland Alerter 100 (Thales) и «Поле» (Алевкурп).

**Во второй главе** проведён анализ принципов построения ПАРЛС. Рассмотрен выбор источников сигнала подсвета. В качестве источников сигнала подсвета в

ПАРЛС обычно используют сигналы вещательных передатчиков, навигационных систем, мобильных телефонных сетей и т.д. Приведены типичные характеристики передатчиков и параметры ПАРЛС. По результатам анализа источников сигнала подсвета, которые можно использовать в ПАРЛС, показано, что с энергетической точки зрения более эффективными представляются сигналы аналогового ТВ- и радиовещания, однако существенные преимущества сигналов цифрового вещания (более широкая полоса, как следствие более высокое разрешение по дальности, низкий уровень боковых лепестков ФН, независимость свойств сигнала от контента) в сочетании с активным развитием сети цифрового наземного телевидения делают наиболее перспективным использование в ПАРЛС сигналов ЦЭТВ стандарта DVB-T2.

Рассмотрение схем построения ПАРЛС диктуется как решаемыми задачами, так и особенностями конструкций и размещения на местности приемных позиций. На рисунке 1 приведены два варианта построения ПАРЛС при мониторинге объекта: схема на рис. 1а предусматривает размещение приемной позиции (ПП) позади объекта наблюдения, в схеме на рис. 1б приемная позиция расположена перед ним.

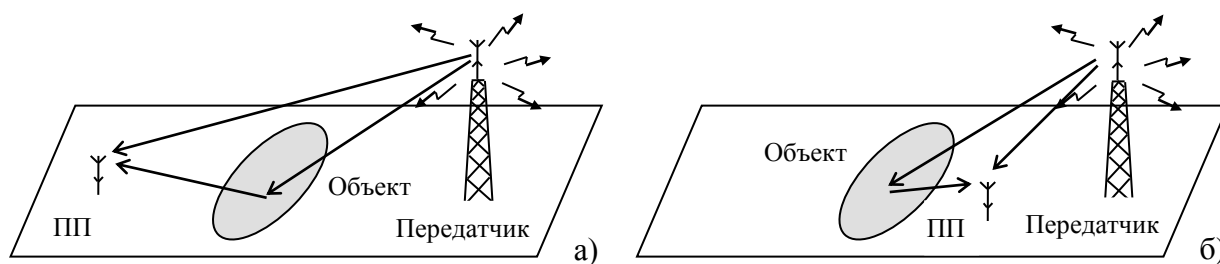


Рисунок 1 - Варианты расположения приемной позиции в ПАРЛС

В первом случае ПП фиксирует сигналы, зеркально отраженные от объекта наблюдения. Эта схема имеет два серьезных недостатка. Во-первых, поскольку точка отражения находится на линии базы, доплеровский сдвиг для отражающего объекта всегда будет нулевым, что делает невозможным выделение целей по доплеровскому контрасту и измерения полей течений. Во-вторых, в этом случае труднее предпринять организационные меры по недопущению проникновения прямого сигнала в канал полезного сигнала. Во втором случае имеет место - диффузное отражение в обратном направлении. Даже если интенсивность этого отражения будет ниже, чем прямого, эта схема построения ПАРЛС предпочтительнее, поскольку позволяет оценивать доплеровское смещение.

Рассмотрены методы выбора оптимального местоположения приемника в ПАРЛС. Можно использовать различные критерии оптимальности: максимизировать отношение сигнал/шум, отношение сигнал/помеха (под помехой в первую очередь понимается мощный прямой сигнал передатчика), разрешающую способность по дальности, зависящую от взаимного положения приемника, передатчика и цели, разрешающую способность по скорости, зависящую помимо геометрии системы еще и от направления движения цели.

В третьей главе рассмотрены алгоритмы обработки сигналов в ПАРЛС (рисунок 2).

*Этап восстановления опорного сигнала.* В качестве сигналов сторонних источников в разрабатываемой системе используются сигналы наземной сети цифрового телевидения стандарта DVB-T2. Наличие в этом сигнале регулярных элементов в виде защитных межсимвольных интервалов и пилот-сигналов, а также влияние структуры кадров сигнала приводит к появлению пиков в ВФН сигнала. Пики ВФН, возникающие в дальностно-доплеровской области нежелательны по нескольким причинам. Во-первых, они маскируют отражения сигнала от реальных объектов, что будет приводить к пропускам целей. Во-вторых, динамика перемещения возникающих неопределенностей может быть похожа на динамику движения настоящих радиолокационных целей, что будет приводить к возникновению ложных тревог. За счет того, что структура сигнала известна, можно устранить эти пики ВФН в процессе обработки. Для

этого предлагается следующая схема обработки (см. рис. 3). На первом шаге производится грубая оценка времени начала фрейма DVB-T2-сигнала. После осуществления точной временной и частотной синхронизации производится вычисление быстрого преобразования Фурье символов опорного сигнала. Оценка передаточной характеристики канала для реализации процедуры демодуляции опорного сигнала осуществляется на основе имеющейся информации о модуляции передаваемых пилот-поднесущих в каждом OFDM-символе. После выравнивания канала,

осуществляется демодуляция сигнала и обнуление поднесущих, соответствующих пилот-сигналам. Параллельно с этим происходит оценка фазового сдвига для его учета при дальнейшей ремодуляции опорного сигнала. Образец сигнала, без подавления пилот-поднесущих, используется при подавлении опорного сигнала и его задержанных копий в канале наблюдения. После проделанных операций производится вычисление взаимной функции неопределенности (ВФН) между

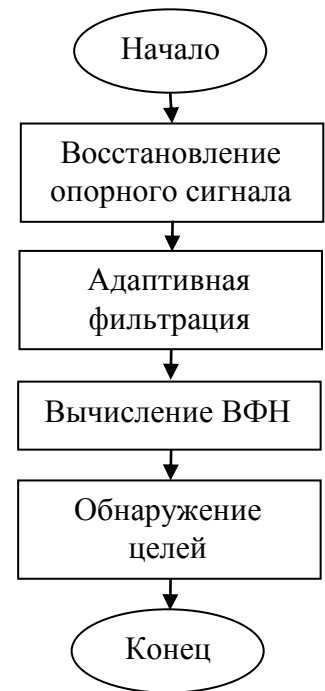


Рисунок 2 - Блок-схема программы обработки сигналов в ПАРЛС

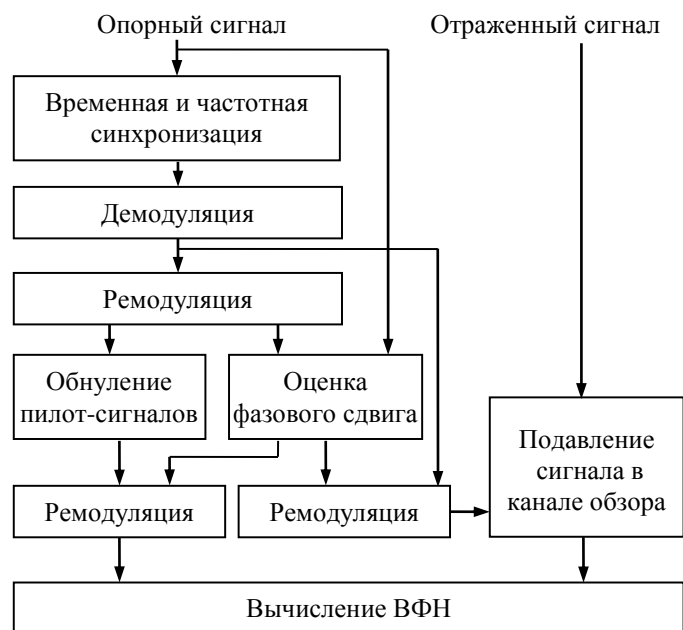


Рисунок 3

ремодулированным опорным сигналом и сигналом канала наблюдения, в котором присутствуют отраженные от целей сигналы.

*Этап адаптивной фильтрации.* Работа адаптивного фильтра основывается на использовании прямого сигнала, принимаемого опорным каналом. Идея адаптивного фильтра заключается в вычитании взвешенных копий прямого сигнала, принятого отдельной антенной, из сигнала канала наблюдения. В работе рассмотрены различные методы (алгоритмы) фильтрации прямого сигнала, а также его копий, возникающих из-за многолучевого распространения или из-за отражения от близких к ПАРЛС предметов и являющихся помехами для сигналов, отраженных от интересующих целей:

- метод наименьших квадратов (Least Mean Square – LMS);
- нормализованный метод наименьших квадратов (Normalized Least Mean Square – NLMS);
- рекурсивный метод наименьших квадратов (Recursive Least Square – RLS);
- алгоритм подавления мощных отражений (Extensive Cancellation Algorithm – ECA) и последовательный алгоритм подавления (Sequential Cancellation Algorithm);
- метод на основе решетчатого фильтра (Least Square Lattice – LSL).

Общая структура адаптивной системы показана на рисунке 4. На рисунке используются обозначения:  $x(k)$  – входной дискретный сигнал;  $y(k)$  – выходной дискретный сигнал;  $d(k)$  – образцовый сигнал;  $e(k)$  – сигнал ошибки. Алгоритм адаптации подстраивает коэффициенты фильтра, минимизируя сигнал ошибки. Формулы, описывающие алгоритмы, основываются на уравнении оптимальной фильтрации сигнала.

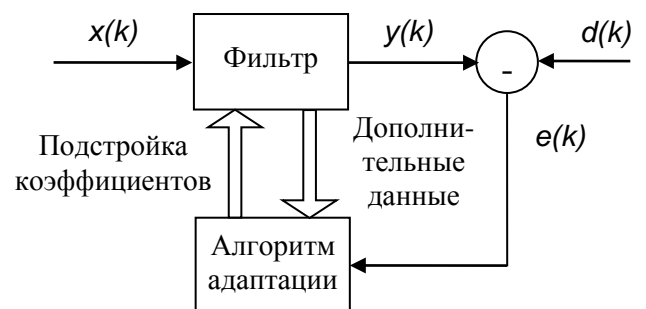


Рисунок 4 - Структура адаптивной системы

*Этап вычисления ВФН.* Следующим после адаптивной фильтрации этапом обработки ПАРЛС является вычисление ВФН сигналов отраженного  $s_e$  и опорного  $s_{ref}$

$$\chi[l, p] = \sum_{i=0}^{M-1} s_e[i] s_{ref}^*[i-l] e^{-j2\pi p i / M}, \quad (1)$$

где  $l = 0, \dots, R-1$  – номер элемента дальности (задержки);

$R$  – число элементов дальности;

$p = -P, -P+1, \dots, P-1, P$  – номер доплеровского канала;

$2P+1 = P'$  – число доплеровских каналов.

$M$  – число отсчетов сигнала



Рассмотрены различные методы вычисления ВФН: по формуле (1): линейная свертка с помощью дискретного преобразования Фурье, с циклическим сдвигом спектра и с разбиением на сегменты.

*Этап обнаружения целей.* Наиболее популярным среди адаптивных обнаружителей является класс методов, обеспечивающих постоянный уровень ложной тревоги (алгоритмы ПУЛТ, англ. Constant False Alarm Rate, CFAR). CFAR – это семейство адаптивных обнаружителей, обеспечивающих постоянный уровень ложных тревог в условиях локально изменяющегося шума неизвестной интенсивности и различающихся условиями применения.

Наиболее простым и в то же время достаточно эффективным является алгоритм ПУЛТ с усреднением ячеек (Cell-Averaging CFAR, CA-CFAR). Этот алгоритм является оптимальным при обнаружении сигнала от цели на фоне нормального шума и хорошей аппроксимацией при других распределениях. В других ситуациях предпочтительнее использовать алгоритмы: «меньшего из» (Smallest-of CFAR, SO-CFAR); «большого из» (Greatest-of CFAR, GO-CFAR) или окно двумерного алгоритма CFAR (2D-CA-CFAR).

**В четвертой главе** проведено компьютерное моделирование. На рисунке 5 показана блок-схема модели ПАРЛС при использовании радиоизлучений ЦЭТВ DVB-T2. Она состоит из трех различных частей. Генератор сигналов DVB-T2, генератор сигналов целей и обработка радиолокационных сигналов.

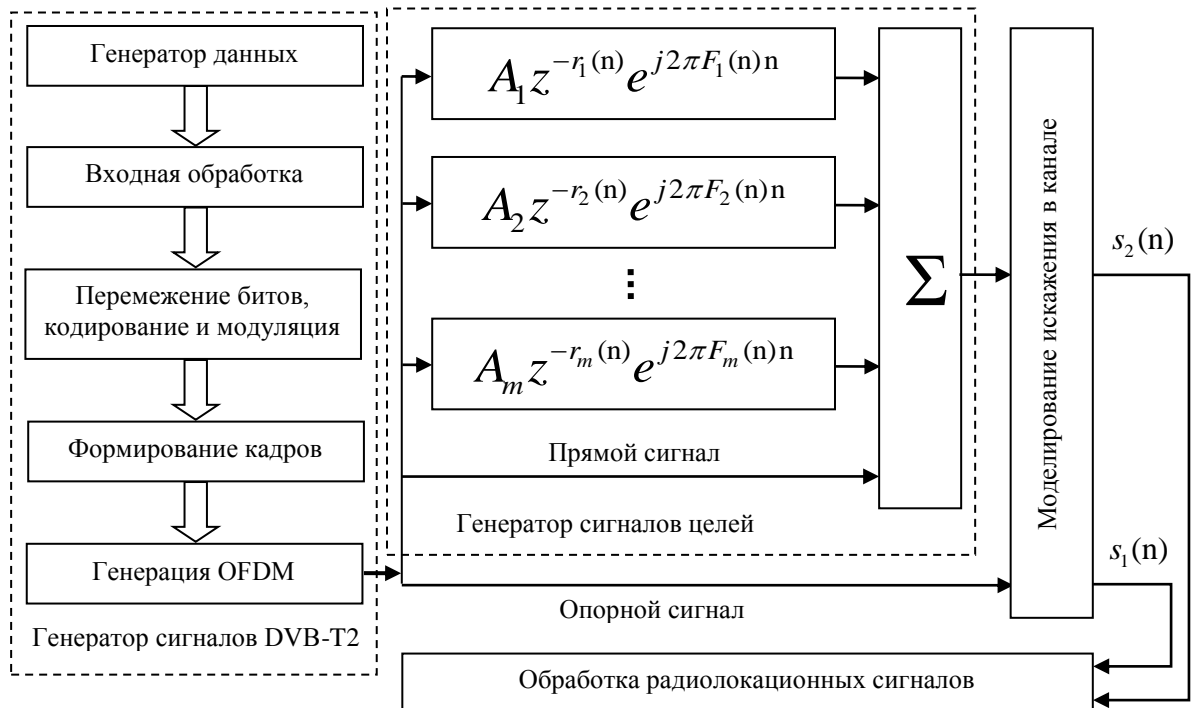


Рисунок 5 - Блок-схема компьютерного моделирования ПАРЛС

*Генератор сигналов DVB-T2.* Поток данных, используемый в генераторе сигналов DVB-T2, генерируется случайным процессом, характеристики которого соответствуют структуре ТВ данных. Параметры сигнала DVB-T2, использованного в процессе моделирования, приведены в табл. 1.

*Генератор сигналов целей.* На рисунке 5 приведен генератор сигналов целей, использующий сигналы DVB-T2. На данном рисунке  $A_m$ ,  $r_m(n)$  и  $F_m(n)$  - амплитуда, бистатическая дальность, пропорциональная задержке, и доплеровский сдвиг частоты  $m$ -го отраженного сигнала соответственно;  $n$  - номер моделируемого отсчета. В представленной модели расчеты проводились для канала связи с аддитивным гауссовским белым шумом (AWGN).

Таблица 1

Параметр	Значение
Режимы модуляции	64-QAM
Скорость кодирования	4/5
Защитный интервал	1/16
Количество несущих OFDM	32К
Полоса пропускания, МГц	8
Элементарный период T, Мкс	7/64
Шаблон пилот-сигналов	PP4
Отношение «сигнал/шум», дБ	30

*Обработка сигналов целей и результаты моделирования.* Опорный и отраженный сигналы получены с помощью генератора сигналов DVB-T2 и блока формирования радиолокационных сигналов. Перед вычислением взаимно-корреляционной функции опорный сигнал подвергается предварительной обработке, с целью уменьшения уровня пилот-сигналов. Описанная процедура обработки опорного сигнала и сигнала, отраженного от радиолокационных объектов, позволяет устранить пики ВФН, которые вызваны особенностями структуры DVB-T2 сигнала и получить очищенный от шума и переотраженных копий шаблон опорного сигнала для проведения корреляционной обработки.

Во время моделирования испытывался алгоритм подавления, основанный на методе наименьших квадратов. Алгоритм реализуется с помощью адаптивного решетчатого фильтра LSL. На рисунке 6,а приведена взаимная корреляционная функция (ВКФ) опорного и отраженного сигналов для варианта без восстановления опорного сигнала и адаптивного фильтра. На рисунке 6,б - для варианта с восстановлением опорного сигнала и адаптивным фильтром. На рисунке 6,а и 6,б показана ВКФ с медианным значением ВКФ 50 дБ и 26 дБ. Понижение уровня фона на 24 дБ позволило выделить отражения от целей (указать на рис. 6,б).

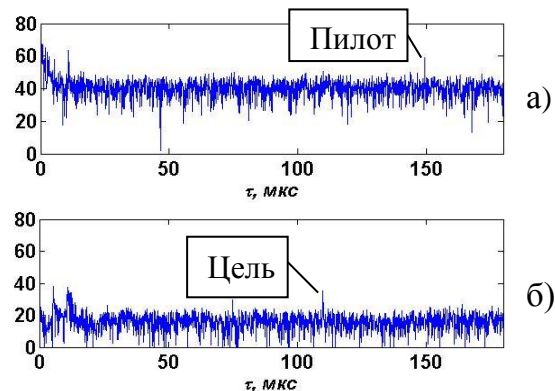


Рисунок 6

Вычисление ВФН непосредственно по формуле (1) на таких фрагментах связано со значительными вычислительными затратами ввиду больших размеров векторов оцифрованных сигналов. Для ускорения процесса вычисления ВФН был использован алгоритм с разбиением на сегменты, работу которого поясняет блок-схема, изображенная на рисунке 7. Опорный  $s_1(n)$  и отраженный  $s_2(n)$  сигналы разбиваются на  $N_{\text{бл}}$  блоков одинаковой длины.

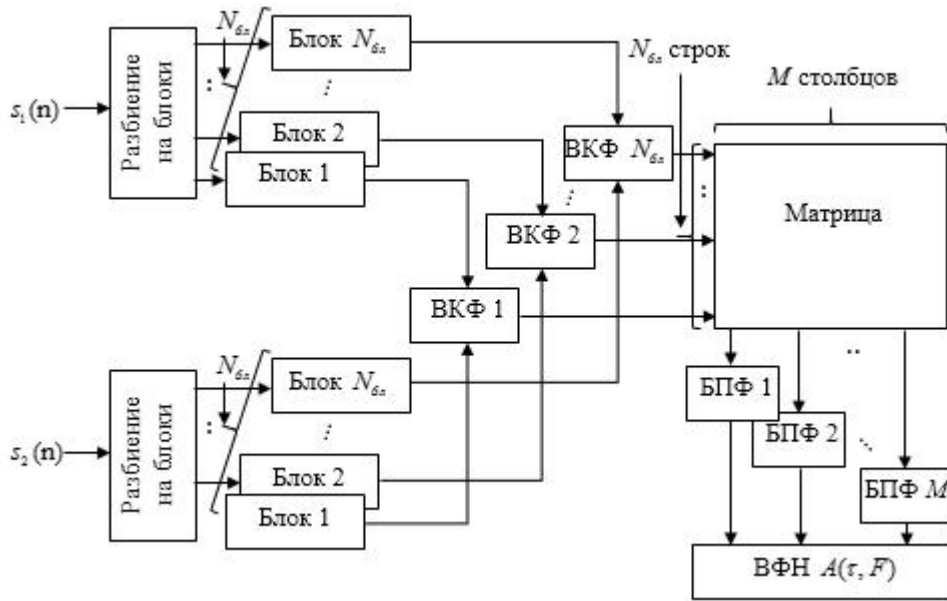


Рисунок 7 - Блок-схема процесса вычисления ВФН

На рисунке 8,а приведён пример ВФН, полученной при наличии одной цели и пиков, вызванных корреляцией между пилот-несущими в пределах символа. На рисунке 8,б приведён пример ВФН, полученной при наличии двух целей и без пиков, вызванных корреляцией между пилот-несущими в пределах символа.

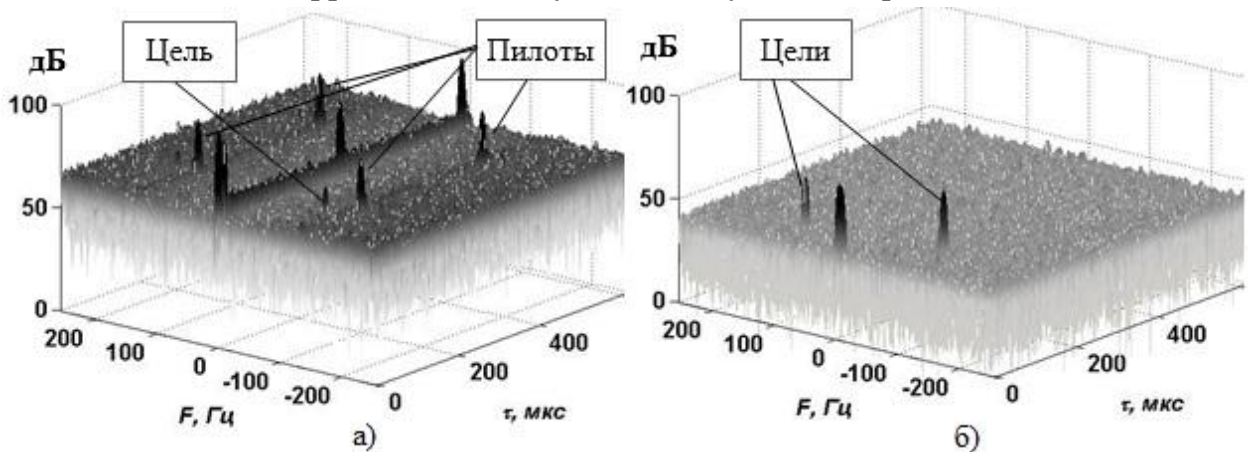


Рисунок 8 - Результаты моделирования процедуры вычисления ВФН в вариантах без применения алгоритмов восстановления опорного сигнала и адаптивного фильтра (а) и с применением (б).

После применения алгоритмов восстановления опорного сигнала и адаптивного фильтра для удаления пилотов и подавления сигналов в ячейке ВФН с параметрами (75 мкс, 100 Гц и 110 мкс, -100 Гц) наблюдаются цели. Для большей наглядности показаны доплеровские сечения трехмерной ВФН (рис. 9). На рис. 9,б показан пик ВФН,

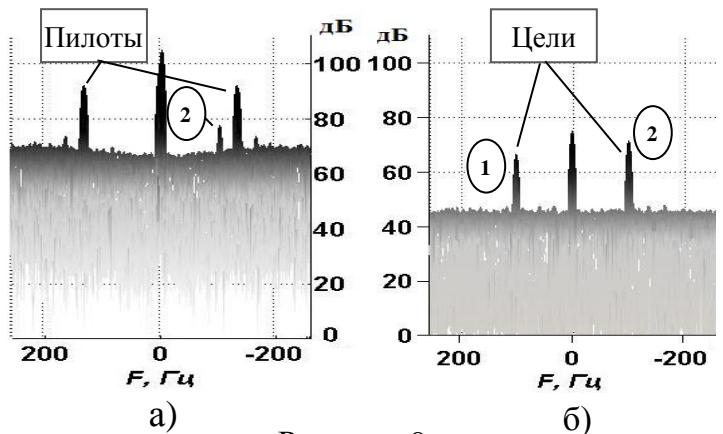


Рисунок 9

соответствующий первой подвижной цели; он имеет уровень  $\sim 67$  дБ и возвышается над фоном приблизительно на 21 дБ в варианте с применением алгоритмов восстановления опорного сигнала и адаптивного фильтра. Очевидно, что такой уровень сигнала от первой подвижной цели (67 дБ) не позволил обнаружить ее в варианте без применения алгоритмов восстановления опорного сигнала и адаптивного фильтра, когда уровень фона был около 70 дБ (см. рис. 9,а).

**В пятой главе** рассмотрены результаты натурных экспериментов. Целью экспериментальных исследований состояла в проверке положений, обсуждаемых в третьей и четвертой главах, а также демонстрация работы ПАРЛС с тем составом программно-аппаратного обеспечения, который соответствует сформулированным методам построения ПАРЛС.

Сторонним источником излучением является передающая система ЭЦТВ DVB-T2, размещенная на телебашне Ленинградского радиотелевизионного передающего центра (ЛРТПЦ).

Экспериментальные исследования проводились в октябре 2014 г. В первом эксперименте макет приемной позиции (ПП) был размещен на территории возле аэропорта Пулково. Во втором эксперименте – на берегу Финского залива. Координаты ЛРТПЦ и точек размещения макета ПП приведены в табл. 2.

Таблица 2 Макет ПАРЛС. На рисунке 10

Место	ЛРТПЦ	Пулково	Финский залив
Широта	59°58'36"	59°46'24"	59°53'54"
Долгота	30°19'15"	30°21'23"	30°12'26"



Рисунок 10 - Структурная схема экспериментального макета ПП ПАРЛС данных – преобразование аналоговых сигналов, прямого и отраженного, в цифровую форму для последующей их записи и обработки, которая осуществляется программным способом на персональном компьютере, поэтому ядром макета устройства ввода является аналогово-цифровой преобразователь.

В качестве прототипа аппаратной платформы для ПАРЛС может выступать цифрой приемо-передатчик на базе USRP (Universal Software Radio Peripheral). Во время натурных экспериментов использовалась плата USRP-B210 (рисунок 11).

Данная плата выпускается компанией Ettus Research, дочерней

показана структурная схема экспериментального макета приемной позиции (ПП) ПАРЛС. В эксперименте использовались две антенны UHF-диапазона Alcad NEO-085 производства Испании и абонентские усилители телевизионного сигнала AlcadAL-200.

*Устройство ввода данных.*

Основная задача устройства ввода сигналов, прямого и отраженного, в цифровую форму для последующей их записи и обработки, которая осуществляется программным способом на персональном компьютере, поэтому ядром макета устройства ввода является аналогово-цифровой преобразователь.

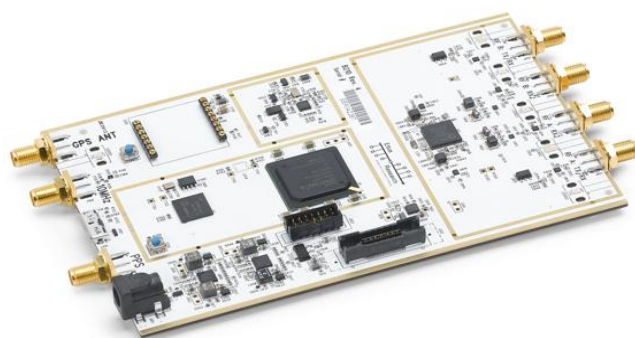


Рисунок 11 - Плата USRP-B210

компанией National Instruments. Она относится к линейке продуктов, поддерживающих технологию SDR (Software Defined Radio) – программно-определяемая радиосистема. Для ее полного функционирования необходимо наличие персонального компьютера (хост-компьютера), на котором будет установлена управляющая программа и реализована необходимая цифровая обработка сигнала, высокоскоростная цифровая карта, устанавливаемая в персональный компьютер для перекачивания данных с выхода модуля USRP на хост-компьютер и сам модуль приемо-передатчика. Такие системы находят широкое применение в научных кругах, где необходимо проверять общие теоретические концепции на практике. Одна аппаратная платформа позволяет построить множество различных цифровых радиотехнических систем путем изменения программного обеспечения, установленного на персональном компьютере. Рабочие характеристики платы USRP-B210 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметр	Значение
Число каналов	2
Частотный диапазон	от 70МГц – 6 ГГц
Шаг настройки частоты	<1кГц
Интерфейс с компьютером	USB 3.0
Коэффициент шума	<8 дБ
Точность установки частоты	2 ppb
Мгновенная полоса пропускания в реальном времени	30,72 МГц
Характеристики АЦП	12 бит, 61,44 МГц
Динамический диапазон АЦП, свободный от паразитных составляющих	78 дБ

Для оцифровки сигналов с выходов усилителей каналов прямого и отраженного сигналов используется внешний (относительно ПК) 2-канальный 12-разрядный АЦП с максимальной частотой дискретизации 30,72 МГц на плате USRP-B210, реализующей функции АЦП и фазового детектора. Хотя частота дискретизации меньше частоты несущей, дискретизацию можно

выполнять за счет эффекта так называемого преобразования частоты на АЦП. Так как при дискретизации возникают сдвинутые, периодически повторяющиеся копии спектра сигнала, сигнал с несущей 586 МГц «переносится» в АЦП на частоту 10

МГц.

Таблица 4 - Параметры сигнала DVB-T2 на 35-ом телевизионном канале в Санкт-Петербурге

Параметр	Значение
Режимы модуляции	64-QAM
Скорость кодирования	4/5
Защитный интервал	1/16
Режим использования несущих	32К расширенный
Полоса пропускания, МГц	8
Элементарный период T, Мкс	7/64
Шаблон пилот-сигналов	PP4
Количество символов данных	63
Количество символа P2	1
Передача в режиме	SISO
Частота канала, МГц	586

Устройство записи сигналов. Запись и предварительная обработка сигналов во время эксперимента осуществляется при помощи переносного персонального компьютера (ноутбука), на который через порт USB 3.0 подаются оцифрованные при помощи АЦП сигналы прямого и отраженного каналов. Оцифрованный сигнал с выхода АЦП записывался на жесткий диск персонального компьютера. Каждая выборка

длительностью 1 с – в отдельный файл объемом 40 МБ.

*Обработка записанных сигналов.* После получения записанных сигналов опорного и отраженного каналов можно проводить восстановление опорного сигнала, подавление помех, вычисление ВФН и обнаружение целей.

Восстановление опорного сигнала осуществлялось в соответствии с рис 3 и использованием параметров, приведённых в табл. 4. Образец сигнала, без подавления пилот-поднесущих, используется при подавлении опорного сигнала и его задержанных копий в канале наблюдения. Подавление прямого сигнала и местных помех в канале приема отраженного сигнала осуществлялось с помощью адаптивного решетчатого фильтра LSL (Least Square Lattice). На рисунке 12 приводится пример применения алгоритма LSL при обработке экспериментальных данных, которые были получены при размещении макета ПП на территории аэропорта Пулково. На рисунке 12,а (без применения алгоритма LSL) и 12,б (с применением алгоритма LSL) показана ВКФ с медианным значением ВКФ 50 дБ и 36 дБ. Понижение уровня фона на 14 дБ произошло после применения алгоритма LSL.

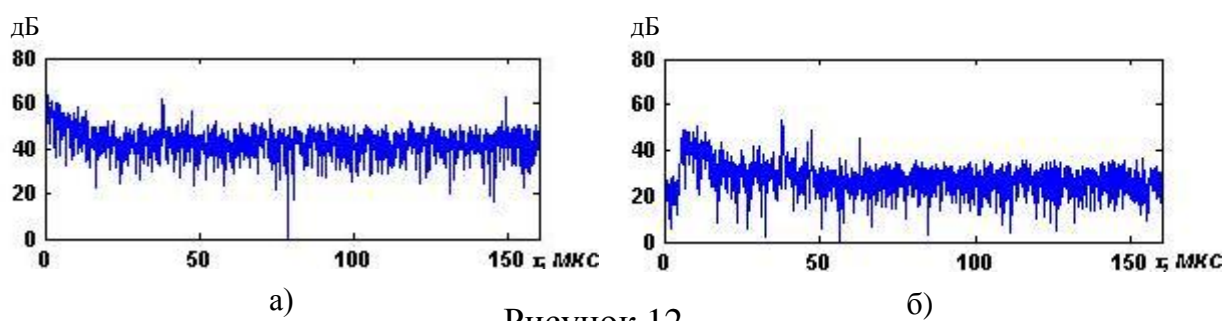


Рисунок 12

Вычисление ВФН непосредственно по (1) на таких фрагментах связано со значительными вычислительными затратами ввиду больших размеров векторов оцифрованных сигналов с использованием метода, предложенного на рисунке 6. Ниже приводятся примеры применения алгоритма вычисления ВФН при обработке экспериментальных данных, которые были получены при размещении макета ПП на территории возле аэропорта Пулково (Рисунок 13).

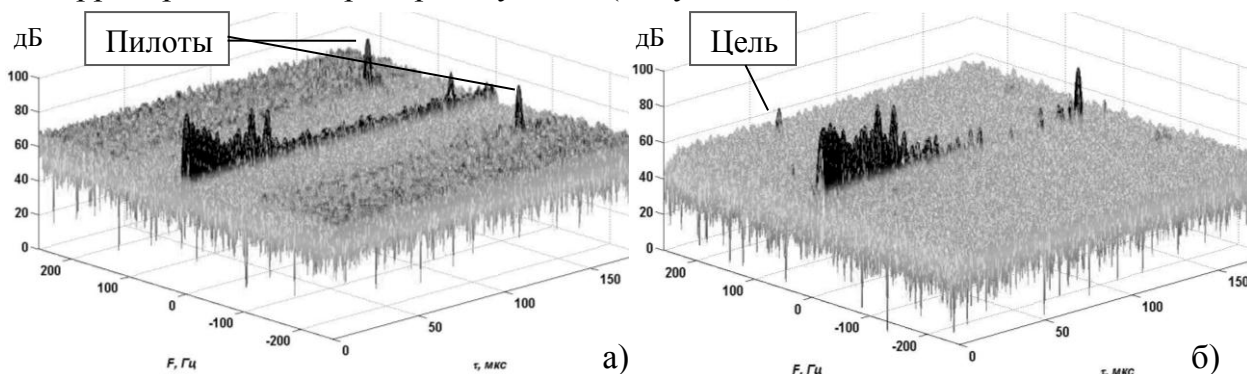


Рисунок 13 - ВФН сигналов опорного канала и канала наблюдения без использования алгоритмов восстановления сигнала опорного канала и подавления помех (а) и с использованием (б)

Попытка обнаружить цель, имеющую ненулевой доплеровский сдвиг частоты, по ВФН на рисунке 13,а не дает результата. На рис. 13,б показана ВФН сигналов опорного канала и канала наблюдения, вычисленная после подавления в канале наблюдения сигналов с задержками от 0 до 5 мкс с помощью алгоритма LSL (длина решетчатого фильтра  $N+1=47$  в ячейке ВФН с параметрами (51,08 мкс, 209.3 Гц). В результате отчётливо наблюдается цель. На рис.14 показаны доплеровские сечения трехмерной ВФН для обоих случаев. Пик ВФН, соответствующий подвижной цели, имеет уровень  $\sim 69,5$  дБ и возвышается над фоном приблизительно на 11 дБ. Очевидно, что такой уровень сигнала от подвижной цели (69,5 дБ) не позволил обнаружить ее в варианте без применения алгоритмов подавления, когда уровень фона был около 70 дБ.

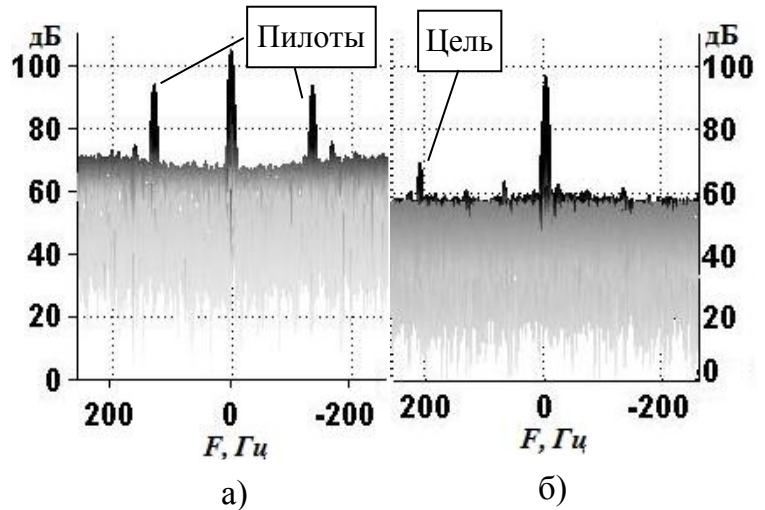


Рисунок 14

*Результаты натурных экспериментов ПАРЛС при использовании радиоизлучений ЦЭТВ DVB-T2 в Санкт-Петербурге для обнаружения и измерения параметров движения кораблей на Финском заливе и самолетов на территории возле аэропорта Пулково.*

Задачей эксперимента было подтверждения правильности выбора структуры ПАРЛС, рекомендаций по выбору ПП, эффективность работы предложенных алгоритмов и технических решений. Эксперименты проводились при следующих исходных данных:  $P_t G_t = 5$  кВт (передатчик DVB-T2 на телебашне);  $G_r = 1$ ;  $T_c = 1$  мс (соответствует размеру выборки  $10^7$  отсчетов при частоте дискретизации АЦП 10 МГц);  $k_n = 2$  (усилитель Alcad A1-200, который использовался в макете ПП).

На рисунке 15 показан результат вычисления ВФН в натурном эксперименте макета ПАРЛС с применением алгоритмов восстановления опорного сигнала и подавления помех.

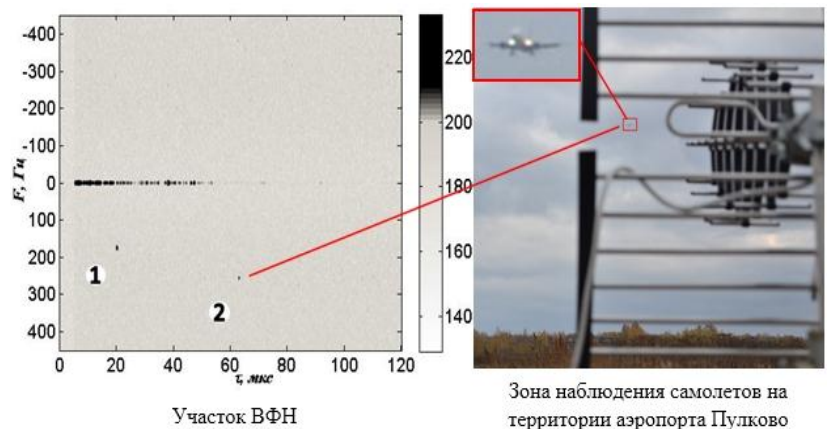


Рисунок 15

После применения алгоритмов восстановления сигнала опорного канала и подавления помех (LSL), обнаружения целей (CA-CFAR) и измерения их параметров получен результат наблюдения движения самолетов на последнем этапе посадки (рис. 16).

На рисунке 16,а показаны изолинии одинаковой бистатической задержки в прямоугольной области вокруг точки размещения макета и телебашни. Значения задержки даны в мкс. Черная линия – ближняя взлетно-посадочная полоса аэропорта Пулково (ВПП). Сравнив измеренные значения задержки с ее оценкой и учтя взаимное положение приемной антенны и ВПП, можно построить траекторию движения самолетов на последнем этапе посадки с 14:51:36 до 14:54:04.

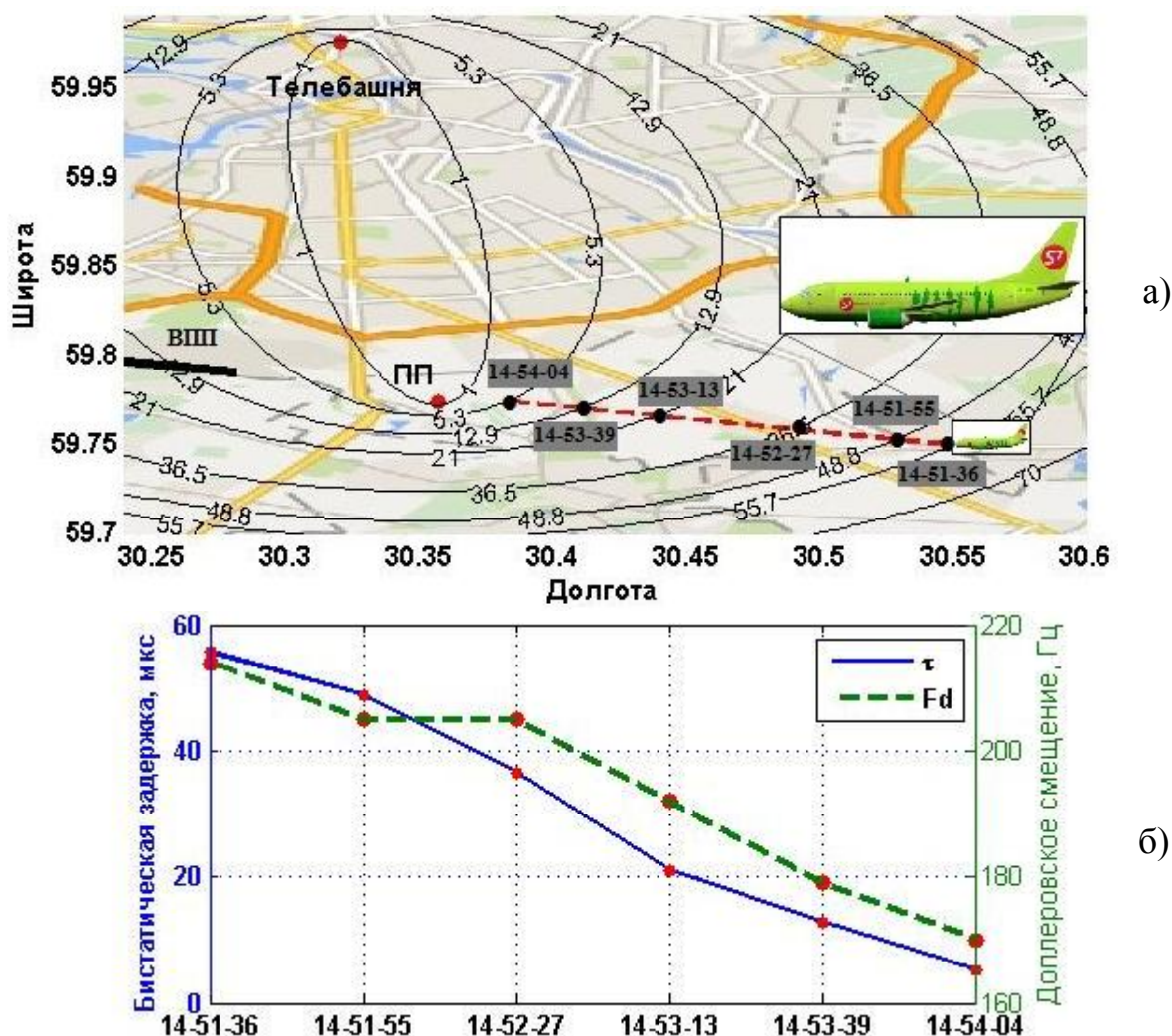
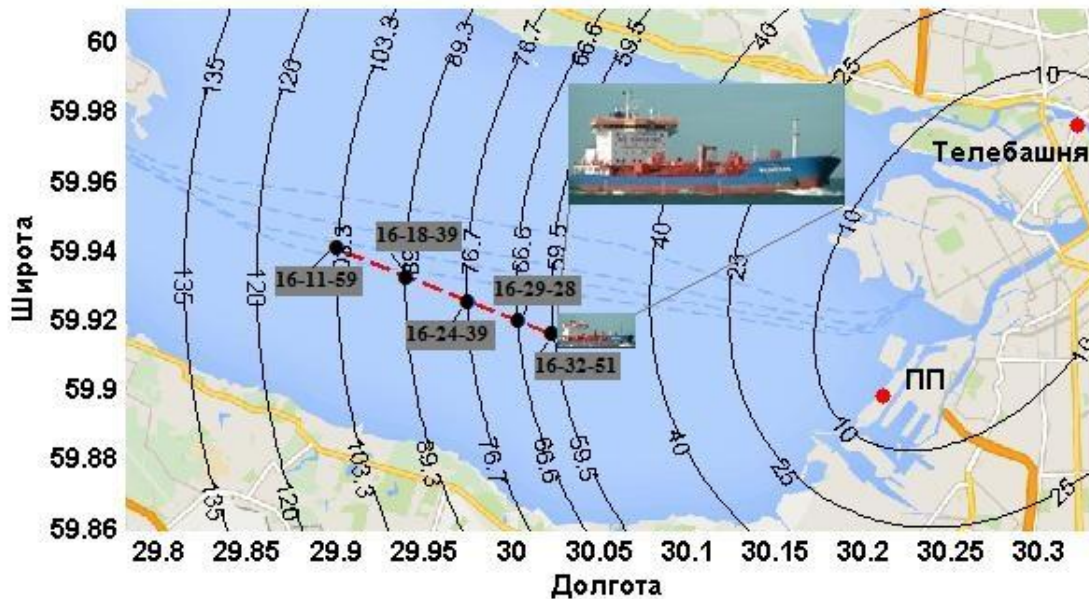


Рисунок 16

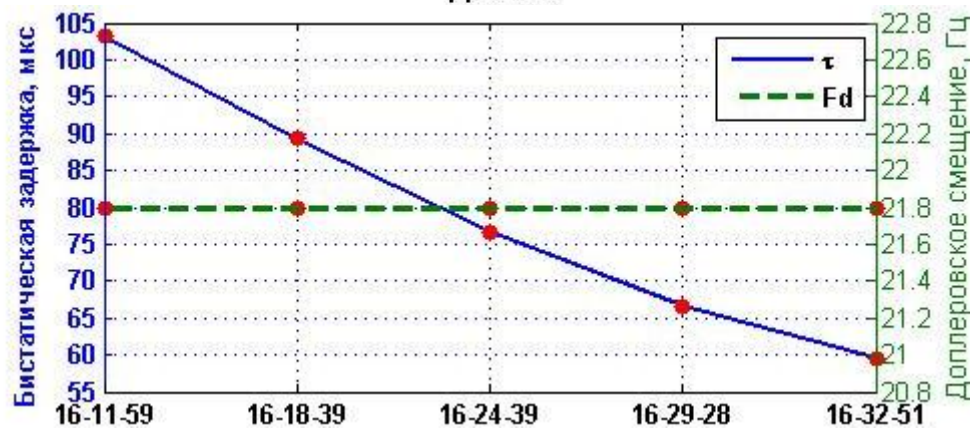
Аналогичные результаты получены в эксперименте, выполненном по кораблям при расположении ПП на берегу Финского залива. После применения алгоритмов восстановления сигнала опорного канала и подавления помех (LSL), обнаружения целей (CA-CFAR) и измерения их параметров получен результат наблюдения движения кораблей в Финском заливе. Максимальная дальность обнаружения кораблей (при ОСШ 11 дБ) составила 19 км. Сравнив измеренные значения задержки с ее оценкой и учтя взаимное положение приемной антенны и



направление движения корабля, можно построить траекторию движения в акватории корабля Финского залива с 16:11:59 до 16:32:51 (см. рис. 17).



а)



б)

Рисунок 17

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Проведён анализ принципов построения и архитектуры существующих и перспективных ПАРЛС.

2. Осуществлен выбор источников сигнала подсвета и схемы построения ПАРЛС.

3. Разработан алгоритм восстановления сигнала опорного канала, основанного на стандарте DVB-T2. Исключение влияния пиков ВФН, вызванных наличием в сигнале пилот-сигналов, а также переотраженных копий, и применение алгоритма подавления прямого сигнала и местных помех в канале приема отраженного сигнала осуществлялось с помощью адаптивного решетчатого фильтра LSL для понижения уровня фона ВФН на 24 дБ (в цифровом моделировании) или 11 дБ (в эксперименте).

4. Выполнено компьютерное моделирование ПАРЛС при использовании радиоизлучений ЦЭТВ DVB-T2.

5. Проведены экспериментальные исследования макета ПАРЛС при использовании радиоизлучений ЦЭТВ DVB-T2 в Санкт-Петербурге для обнаружения и измерения параметров движения самолетов на территории возле аэропорта Пулково и кораблей в акватории Финского залива.

**Общий вывод.** Полученные в диссертационной работе результаты исследования дают основу для построения ПАРЛС с использованием в качестве сигналов подсвета излучение передатчиков ЦЭТВ стандарта DVB-T2. Обоснована целесообразность и полезность применения алгоритмов восстановления сигнала опорного канала и подавления прямого сигнала и отражений от местных помех в канале приема отраженного сигнала.

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих трудах.

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:**

1. Фам Хуан Тиеп. Результаты моделирования алгоритма обработки сигнала в полуактивной радиолокационной системе при использовании радиоизлучений эфирного цифрового телевидения DVB-T2 // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2014. № 4. С. 29–31.

2. Фам Хуан Тиеп. Экспериментальные исследования макета полуактивной радиолокационной системы при использовании радиоизлучений цифрового эфирного телевидения DVB-T2 // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2014. № 5. С. 29–32.

#### **Публикации в сборниках трудов конференций**

3. Фам Хуан Тиеп. Восстановление сигналов DVB-T2 в полуактивной РЛС. // 68 Научная конференция профессорско-преподавательского состава университета: Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 28 января – 5 февраля 2015. Стр. 6-9.

4. Фам Хуан Тиеп. Интегрированная радиолокационная система мониторинга прибрежных акваторий / Веремьев В.И., Нгуен Чонг Хань // Материалы научно-практической конференции «Геополитические факторы устойчивого развития и инновационные технологии прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций», СПб, 29 ноября 2012. – С. 40-43.

5. Фам Хуан Тиеп. Экспериментальные исследования макета ПАРЛС. // XLVI научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная памяти авиаконструктора И. И. Сикорского. СПб, 18 апреля 2014 г.