

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Физический факультет

На правах рукописи

НЕСТЕРОВ ВАДИМ ЮРЬЕВИЧ

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОДНОПОЗИЦИОННОГО
МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ПАССИВНОЙ КОГЕРЕНТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ОБЪЕКТОВ,
ДВИЖУЩИХСЯ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

1.3.4. Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Профессор кафедры радиофизики физического факультета ЮФУ,
доктор физико-математических наук
Вертоградов Геннадий Георгиевич

Ростов-на-Дону – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА ПО ВРЕМЕННЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ АМПЛИТУДЫ И ЧАСТОТЫ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	14
1.1 Постановка задачи.....	14
1.2 Описание многочастотного доплеровского стенда и алгоритма первичной обработки	14
1.3 Алгоритм автоматической селекции сигналов по доплеровскому сдвигу частоты и амплитуде	17
1.4 Общие характеристики ионосферных волн.....	20
1.5 Описание упрощённой имитационной модели	26
1.6 Результаты измерений и моделирования.....	34
1.7 Выводы	41
2 МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА ПО ВРЕМЕННЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ ДСЧ И УГЛОВ ПРИХОДА РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	43
2.1 Постановка задачи.....	43
2.2 Описание КВ-радиопеленгатора и алгоритма первичной обработки данных	44
2.3 Алгоритм автоматической селекции сигналов и оценки траектории по доплеровскому сдвигу частоты и углам прихода рассеянного излучения	50
2.4 Результаты измерений и моделирования.....	52
2.5 Результаты совместных измерений двумя различными КВ-радиопеленгаторами	56

2.6	Результаты совместных измерений КВ-радиопеленгатором и одноканальным многочастотным доплеровским стендом.....	62
2.7	Выводы	67
3	МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА ПО ВРЕМЕННЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ ЗАДЕРЖКИ И УГЛОВ ПРИХОДА РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	69
3.1	Постановка задачи.....	69
3.2	Описание ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора и алгоритма первичной обработки данных	70
3.3	Динамическая адаптивная структурно-физическая модель распространения ионосферных волн	77
3.4	Результаты обработки экспериментальных данных посредством динамической адаптивной структурно-физической модели.....	81
3.5	Описание упрощённой имитационной модели и результатов её применения	86
3.6	Сравнение результатов обработки экспериментальных данных различными моделями	93
3.7	Выводы	96
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	103

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

DDC – Digital downconverter

DSB – Dual side band

DSB-FC – Dual side band full-carrier

IRI – International reference ionosphere

MUSIC – Multiple signal classification

SDR – Software defined radio

SSB – Single side band

АРУ – Автоматическая регулировка усиления

АФР – Амплитудно-фазовое распределение

АЦП – Аналогово-цифровое преобразование

АЧХ – Амплитудно-частотная характеристика

БПФ – Быстрое преобразование Фурье

ДН – Диаграмма направленности

ДСЧ – Доплеровский сдвиг частоты

ДЧХ – Дистанционно-частотная характеристика

ЗГРЛС – Загоризонтная радиолокационная станция

ИР – Ионозонд-радиопеленгатор

ЛЧМ – Линейная частотная модуляция

МНК – Метод наименьших квадратов

МНЧ – Максимальная наблюдаемая частота

МПЧ – Максимальная применимая частота

НЗ – Наклонное зондирование

ОМДС – Одноканальный многочастотный доплеровский стенд

ПАК – Программно-аппаратный комплекс

ПКРЛС – Пассивная когерентная радиолокационная станция

ППЭ – Плотность потока энергии

ПЭВМ – Промышленная электронно-вычислительная машина

РПУ – Радиоприёмное устройство

СКО – Среднеквадратическое отклонение

СПМ – Спектральная плотность мощности

УИМ – Упрощённая имитационная модель

УЧХ – Угло-частотная характеристика

ЦОС – Цифровая обработка сигналов

ЦРПУ – Цифровое радиоприёмное устройство

ШВС – Широковещательная станция

ЭПА – Эффективная площадь антенны

ЭПР – Эффективная поверхность рассеяния

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы и состояние вопроса.

Теоретический и экспериментальный фундамент для обнаружения различных объектов посредством отражения и рассеяния радиоволн был заложен ещё Г. Р. Герцем на заре развития радиотехники. Первые радиотехнические системы, позволяющие решать задачи раннего обнаружения стали появляться в 30-ые годы XX-го века. В дальнейшем основной тенденцией в радиолокации стало развитие технических средств (приёмников, передатчиков, антенных систем), переход к импульсным сигналам, уменьшение длины и повышение мощности зондирующей радиоволны. Облик современной радиолокации был сформирован благодаря появлению и непрекращающемуся совершенствованию полупроводниковых приборов, фазированных антенных решёток с электронным сканированием, а также цифровых методов обработки сигналов.

К настоящему времени разработано огромное количество методов и технических средств, позволяющих решать различные радиолокационные задачи в разных частотных диапазонах. Развитие современных методов направлено на повышение дальности, помехоустойчивости, надёжности, скрытности, снижение стоимости и улучшение других характеристик активных и пассивных радиолокационных станций. Особенный интерес представляют пассивные когерентные (полуактивные) радиолокационные системы (ПКРЛС) [1], к преимуществам которых можно отнести высокую скрытность и низкую стоимость вследствие отсутствия собственного передатчика. Использование ПКРЛС при этом сопряжено с технической проблемой выделения слабого эхосигнала объекта наблюдения на фоне мощного сигнала подсвета.

В качестве станций подсвета для ПКРЛС применяются некооперативные сторонние передатчики различного назначения и диапазонов частот. Классическим подходом в настоящее время является использование в указанных целях передатчиков сетей цифрового телевизионного вещания DVB-T/DVB-T2 [2-7]. Без внимания исследователей не остаются так же и источники

цифрового и аналогового радиовещания, например, DAB (DAB+) и DRM (DRM+) [8,9,10]. Можно сказать, что исследователи рассматривают любые доступные источники сигналов – например, сети сотовой связи [11,12] и глобальные навигационные спутниковые системы [13]. Следует отметить, что в большинстве перечисленных сетей сигналы имеют достаточно сложную структуру, поэтому построение и функционирование ПКРЛС на их основе, как правило, сопряжено со значительными вычислительными и материальными затратами.

Большое значение среди ПКРЛС имеют системы КВ-диапазона [14,15,16], благодаря особенностям распространения коротких волн. Известно, что вследствие отражений от ионосферы и эффекта дифракции над морской поверхностью эти волны могут распространяться на сверхдальние расстояния, что позволяет реализовывать радиолокационные станции загоризонтного обзора (ЗГРЛС). Другой причиной интереса к КВ-диапазону является разнообразие широковещательных станций (ШВС) с типичной мощностью около 500 кВт. Использование таких станций для подсвета позволяет осуществлять радиолокационное обнаружение движущихся воздушных целей, удалённых на сотни километров от местоположения приёмника [14,15,16], который в свою очередь имеет значительное удаление от передатчика. Кроме того, несмотря на общую тенденцию к подавлению несущей частоты (DSB) и одной из боковых полос (SSB) при амплитудной модуляции для эффективного распределения энергии, в сигналах ШВС КВ-диапазона зачастую не подавляют несущую частоту (DSB-FC) для облегчения демодуляции и реализации автоматической регулировки усиления (АРУ). Соответственно, аппаратное или программное обеспечение для осуществления демодуляции может быть существенно упрощено.

На данный момент в Южном федеральном университете разработано несколько программно-аппаратных комплексов КВ-диапазона [18,33,39]. Результатами измерений являются временные зависимости амплитуды и

частоты [18], либо амплитуды, частоты и углов прихода [33], либо амплитуды, углов прихода и времени задержки [39]. В то же время методы обнаружения и определения координат воздушных объектов, применимые к результатам измерений этих комплексов, либо не позволяют решать радиолокационные задачи в реальном масштабе времени, либо отсутствуют. Анализ литературы показывает, что для оценки координат, как правило, используют результаты измерений углов прихода и дальности, полученные путём обработки сигналов сложной формы [2-7].

Таким образом, в настоящее время актуальной задачей является разработка быстродействующих методов обнаружения и оценки координат воздушных объектов на основе результатов обработки измерений программно-аппаратных комплексов КВ-диапазона.

Целью диссертационной работы является исследование свойств сигналов, рассеиваемых движущимися воздушными объектами и излучаемых некооперативными передатчиками КВ-диапазона, разработка моделей распространения прямых и рассеиваемых декаметровых волн в ионосферном канале, а также решение на основе этих моделей задачи радиолокационного обнаружения и оценки координат воздушных целей.

Задачи исследования:

1. Разработать алгоритмы автоматического выделения рассеянных следов движущихся объектов по результатам измерений различными программно-аппаратными комплексами КВ-диапазона.

2. Разработать программы для определения координат движущихся объектов на основе моделей распространения коротких волн путём поиска минимальной невязки между измеряемыми и моделируемыми параметрами траектории.

3. Провести экспериментальные исследования, направленные на регистрацию рассеянного излучения в декаметровом диапазоне волн и анализ характеристик этого излучения.

4. Выполнить обнаружение воздушных объектов с последующей оценкой координат с применением разработанных методов, а также предложить способы проверки работоспособности.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней:

1. Предложена упрощённая имитационная модель распространения ионосферных радиоволн с учётом многоскачкового отражения, позволяющая в масштабе реального времени получать оценки характеристик рассеянного излучения в виде амплитуды, доплеровского сдвига частоты, задержки и углов прихода в двух плоскостях в месте расположения приёмного пункта.

2. Предложено применение упрощённой имитационной и динамической адаптивной структурно-физической моделей распространения ионосферных радиоволн декаметрового диапазона для однопозиционного местоопределения движущихся воздушных объектов в Земной атмосфере, в том числе с гиперзвуковыми скоростями.

Практическая ценность результатов, полученных в диссертации, состоит в том, что в ней:

1. Разработан и подробно описан алгоритм автоматического выделения рассеянных движущимся объектом сигналов путём определения минимального расстояния между точками многомерного пространства, по осям которого отмечены измеряемые характеристики.

2. Разработаны работающие в реальном масштабе времени методы обнаружения объектов, движущихся в Земной атмосфере, основанные на минимизации невязки между результатами имитационного моделирования и

экспериментальных измерений характеристик рассеиваемого ими излучения в декаметровом диапазоне.

3. Проанализированы характеристики рассеянных следов, полученные в результате распространения волн декаметрового диапазона в ионосферном канале при расположении передатчика на о. Кипр и приёмника в г. Ростов-на-Дону, позволяющие существенно ускорить решение задачи пространственного позиционирования объекта.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается выполненными экспериментами, направленными на измерение характеристик рассеянных воздушными объектами волн декаметрового диапазона, в различных гелиофизических условиях различными программно-аппаратными комплексами, а также применением к результатам проведенных экспериментов разработанных моделей для оценки местоположения этих объектов. Полученные результаты подтверждены сходимостью найденных оценок при использовании различных разработанных моделей, при проведении синхронных измерений различными программно-аппаратными комплексами, либо при привлечении иных методов, в частности, определения местоположения путём триангуляции.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. **Способ автоматического обнаружения и выделения следов рассеиваемого излучения**, основанный на анализе расстояния между точками в многомерном пространстве измеряемых характеристик, позволяющий выделить временные зависимости излучения при наличии разрывов в наблюдаемых данных.

2. **Динамическая адаптивная структурно-физическая модель распространения ионосферных волн и её упрощённая версия,**

позволяющие выполнять расчёт пробных траекторий воздушных объектов и характеристик рассеиваемого ими излучения для дальнейшей минимизации невязки между наблюдаемыми и моделируемыми характеристиками

3. Методы обнаружения и определения координат движущихся в тропосфере воздушных целей по результатам измерений временных зависимостей характеристик радиоизлучения, основанные на применении разработанных моделей к данным одноканального-многочастотного доплеровского стенда, КВ-радиопеленгатора и ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора.

4. Результаты пассивно-когерентных радиолокационных экспериментов, подтверждающие работоспособность разработанных алгоритмов и методов обнаружения по одновременно измеряемым характеристикам рассеянных сигналов – ДСЧ и амплитуде, ДСЧ и углам прихода, углам прихода и задержке.

Личный вклад: Автором лично были разработаны алгоритмы и программы, реализующие автоматическое выделение рассеянных сигналов из результатов измерений различных программно-аппаратных комплексов, среди которых одноканальный многочастотный доплеровский стенд, КВ-радиопеленгатор и ЛЧМ ионозонд-радиопеленгатор. Помимо этого, автором предложена упрощённая имитационная модель, позволяющая путём минимизации невязки между результатами измерений и моделирования решать задачи пассивной когерентной радиолокации в реальном масштабе времени. Также была проведена обработка экспериментальных измерений, накопленных в течение нескольких лет, для выполнения обнаружения и оценки местоположения воздушных объектов посредством разработанных алгоритмов и методов.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на конференциях из следующего списка:

- Всероссийская научная конференция «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества», г. Омск, 2022 год.
- Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2023 год.
- Международная научно-техническая конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн», п. Дивноморское, 2023 год.
- Всероссийская молодёжная научная школа-конференция «Распространение радиоволн», г. Йошкар-Ола, 2024 г.
- Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», г. Казань, 2025 год.
- Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2025 год.
- Всероссийская научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн», п. Дивноморское, 2025 год.

Публикации. По материалам работы опубликовано 12 работ. Из них 4 – статьи в журналах из перечня рецензируемых изданий:

1. Вертоградов, Г. Г. Решение задачи пассивной когерентной радиолокации по результатам одноканальных измерений характеристик рассеянного КВ-излучения / Г. Г. Вертоградов, В. Ю. Нестеров // Техника радиосвязи. – 2022. – № 4(55). – С. 7-15. – EDN YXONXC.
2. Вертоградов, Г. Г. Применение ЛЧМ-радиопеленгатора декаметрового диапазона волн для оценки параметров объектов, движущихся в атмосфере Земли / Г. Г. Вертоградов, В. Г. Вертоградов, В. Ю. Нестеров // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 12. – С. 32-40. – DOI 10.18127/j00338486-202312-04. – EDN UESQZU.
3. Nesterov, V. Y. Solution to the Problem of Passive Coherent Radar Based on the Results of Measurements by a Single-Position HF Radio Direction Finder / V. Y. Nesterov, G. G. Vertogradov // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2026. –

DOI 10.1007/s11141-026-10476-w. [Русскоязычная версия: Нестеров, В. Ю. Решение задач пассивной когерентной радиолокации по результатам измерений с помощью однопозиционного коротковолнового радиопеленгатора / В. Ю. Нестеров, Г. Г. Вертоградов // Известия вузов. Радиофизика. – 2025. – Т. 68, № 7. – С. 572-586. – DOI 10.52452/00213462_2025_68_07_572. – EDN APWAAZ]

4. Нестеров, В. Ю. Метод обнаружения и определения координат воздушных объектов по результатам анализа многомерных ионограмм наклонного зондирования / В. Ю. Нестеров, Г. Г. Вертоградов // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 11. – С. 1-14. – DOI 10.30898/1684-1719.2025.11.3. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov25/3/text.pdf> (дата обращения 25.06.2026).

В трудах международных конференций и иностранных журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science – 1 публикация:

1. G.G. Vertogradov and V.Y. Nesterov, "Moving Objects Parameters Estimation Based on Direction Finding of Broadcasting HF Radio Stations Scattered Radiation," 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russian Federation, 2023, pp. 256-259, doi: 10.1109/RSEMW58451.2023.10202028.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх разделов основного текста и заключения. Работа содержит 110 страниц машинописного текста, в том числе 97 страниц основного текста, 46 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 58 наименований на 8 страницах.

1 МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА ПО ВРЕМЕННЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ АМПЛИТУДЫ И ЧАСТОТЫ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1.1 Постановка задачи

Сформулируем задачу следующим образом.

Пусть имеется ПАК, позволяющий одновременно регистрировать рассеиваемые движущимися объектами сигналы нескольких некооперативных станций подсвета КВ-диапазона и обеспечивающий их программную обработку. Результатом обработки являются спектрограммы комплексного низкочастотного сигнала, подлежащие дальнейшему исследованию.

В первую очередь, в получаемых спектрограммах следует обеспечить автоматическое выделение рассеянного и прямого сигнала, для чего требуется разработать соответствующий алгоритм. Результатом применения алгоритма к спектрограммам будут являться треки спектральных максимумов, соответствующих сигналам воздушных целей и станции подсвета.

Далее, следует предложить метод, позволяющий оценивать параметры движения объекта на основе полученного трека. Для этого требуется разработать имитационную модель временных зависимостей частоты и амплитуды рассеиваемых сигналов, а также алгоритм совместного анализа данных наблюдения и моделирования и минимизацией невязок между ними.

1.2 Описание многочастотного доплеровского стенда и алгоритма первичной обработки

В качестве ПАК для одновременной регистрации и обработки рассеянных сигналов нескольких некооперативных станций используется одноканальный многочастотный доплеровский стенд (ОМДС), расположенный в точке с географическими координатами 47.239° С, 39.642° В [18].

Блок-схема ОМДС приведена на Рис.1.1. Основными функциональными узлами стенда являются приёмная антенна, GPS-приемник, синтезатор

тактовой частоты, высокостабильный опорный генератор, радиоприёмное устройство (РПУ) и промышленная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ).

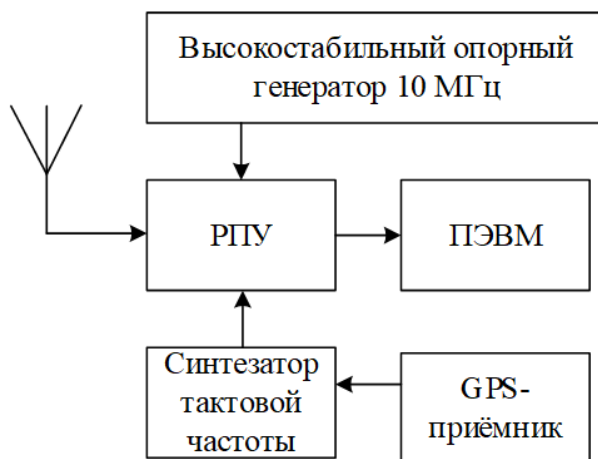


Рис.1.1 Блок-схема ОМДС.

Приёмная антенна из состава ОМДС представляет собой V-образное расположение двух длиннопроводных антенн длиной около 100 метров в горизонтальной плоскости на высоте около 12 метров. Ориентация главного луча диаграммы направленности совпадает с направлением биссектрисы угла раскрыва. Оптимальная по усилению величина угла раскрыва убывает с ростом длины плеч и для антенны в составе ОМДС выбрана равной 40° . Антенна направлена на нагревную станцию «Сура» [19], расположенную возле г. Васильсурска (56.144° С 46.099° В).

В качестве РПУ может использоваться как многоканальный супергетеродинный приёмник типа «Катран-Р» с многоканальным АЦП на выходе, так и одноканальное цифровое радиоприёмное устройство (ЦРПУ). В первом случае одна и та же многодиапазонная антенна подключается через делитель мощности к разным каналам приёмника. Будем рассматривать вариант построения ОМДС с ЦРПУ, который представляет собой приёмник прямого усиления [26,27] со встроенным АЦП. Следует отметить, что в настоящее время для

обозначения ЦРПУ более часто используется обозначение software defined radio digital downconverter (DDC SDR). Особенностью ЦРПУ или DDC SDR-приёмника, как это следует из названия, является то, что сигнал с антенны оцифровывается в полной (первичной) полосе частот, затем в цифровом виде выполняется выделение узкополосных (вторичных) каналов, фильтрация и запись квадратурных компонент. Поскольку частота дискретизации должна удовлетворять теореме Котельникова, а полная полоса частот декаметрового диапазона ограничена частотой 32 МГц, в состав ЦРПУ включён 16-битный АЦП 100 МГц. Используемый в ОМДС приёмник позволяет одновременно выделять до 32-х вторичных каналов, соответствующих частоте конкретной станции подсвета. После выделения вторичных каналов частота дискретизации АЦП оказывается избыточной, поэтому выполняется процедура децимации, в результате чего ширина полосы сигнала, принимаемого от одной станции подсвета, составляет 20 кГц (период дискретизации 50 мкс). Сигналы всех вторичных каналов затем сохраняются на жёстком диске или передаются в режиме онлайн на ПЭВМ в виде квадратурных компонент для дальнейшей обработки.

Как видно из Рис.1.1, в состав ОМДС входит GPS-приёмник, позволяющий обеспечивать временную синхронизацию оборудования с точностью не более 10 мкс. В результате, отсчёты принимаемого сигнала имеют строгую привязку ко времени UT.

Следует также отметить, что до начала работы ОМДС выполняется процедура калибровки антенн с применением эталонного оборудования, в результате чего появляется возможность определять абсолютное значение напряжённости поля прямых и рассеянных сигналов.

Процедура обработки сигналов в ПЭВМ в ходе экспериментов представляет собой последовательность действий по фильтрации, децимации и спектральной обработке. В частности, частота дискретизации сигнала одного или нескольких из 32-х выделенных каналов понижается до 50 Гц. Спектральная обработка состоит в применении быстрого преобразования Фурье (БПФ)

для временных отрезков заданной длительности с перекрытием по времени. Результатом обработки являлась спектрограмма сигнала – зависимость спектральной плотности от времени. Длительность выборки БПФ составляла около 10 секунд, а смещение временного окна около 1 секунды. Нетрудно видеть, что в результате обеспечивается спектральное разрешение порядка 0.1 Гц. Далее выполняется ручное или автоматическое выделение рассеянных следов на спектрограмме. Разумеется, для задач контроля воздушного пространства больший интерес представляет выделение рассеянных следов в автоматическом режиме, для чего был разработан соответствующий алгоритм, речь о котором пойдёт в следующем разделе.

Добавим, что выбор конкретных радиостанций для подсвета объектов наблюдения осуществляется в соответствии с их расписанием радиовещания, обновляемым два раза в год [25]. В качестве некооперативных источников подсвечивающего излучения в ходе проведённых экспериментов наиболее часто использовались следующие станции:

- Станция аналогового радиовещания «China Radio International», расположенная в округе Кашгар Китайской народной республики (39.2152°С, 75.4258°В), имеющая частоту вещания 17650 кГц;

- Станция радиовещания «Radio Exterior De Espana» (21610 кГц), располагавшаяся в Испании (39.959°С, -3.433°В);

- Станция эталонного сигнала времени RWM в Подмосковье (47.239°С, 39.642° В). Монохроматический сигнал излучается на частотах 4996 и 9996 кГц мощностью 5 кВт и частоте 14996 кГц мощностью 8 кВт в интервале с 0 по 8 минуту каждые полчаса.

1.3 Алгоритм автоматической селекции сигналов по доплеровскому сдвигу частоты и амплитуде

Алгоритм автоматической селекции может быть применён к набору данных в виде спектрограммы, процесс получения которой с помощью ПАК

ОМДС описан выше. В процессе работы алгоритма непрерывно обновляется набор кривых в многомерном пространстве «время – доплеровский сдвиг частоты - амплитуда», соответствующих следам рассеяния одной из воздушных целей в секторе наблюдения [20,21]. Кратко приведём принцип работы алгоритма, для чего введём время t с шагом, совпадающим со временем обновления спектрограммы. Срез спектрограммы в момент времени t является мгновенным спектром с глобальным максимумом на нулевой частоте и некоторым набором локальных максимумов. Глобальный максимум соответствует прямому сигналу и не представляет интереса, локальные же максимумы ранжируются по убыванию амплитуды. Далее первые 32 из них представляются точками в пространстве $\{\delta f^{(t)}, E^{(t)}\}$, координатами которых являются значения ДСЧ и амплитуды. Оценка ширины каждого спектрального максимума позволяет уже на этом этапе обеспечить фильтрацию узкополосных рассеянных сигналов. Введём величину ρ_{ij} , которая является мерой расстояния в указанном пространстве:

$$\rho_{ij} = \frac{|\delta f_i^{(t_m)} - \delta f_j^{(t_n)}|}{\Delta f} + \frac{|E_i^{(t_m)} - E_j^{(t_n)}|}{\Delta E}, \quad (1.1)$$

где $\delta f_i^{(t_m)}, \delta f_j^{(t_n)}$ – ДСЧ i и j спектральных максимумов в моменты времени t_m и t_n , $E_i^{(t_m)}, E_j^{(t_n)}$ – значения амплитуды в тех же точках, $\Delta f, \Delta E$ – нормировочные множители, подбираемые эмпирически.

По представленной выше формуле вычисляются расстояния между каждой парой спектральных максимумов в соседние временные отсчёты. По минимальному значению величины ρ_{ij} определяются пары спектральных максимумов, потенциально соответствующих сигналу одного и того же источника. Подтверждение или опровержение этой гипотезы выполняется путём

сравнения значения ρ_{ij} с заранее определённым порогом. Если порог превышен – точки считаются соответствующими различным источникам.

По различным причинам, таким как, например, флуктуации ЭПР наблюдаемого объекта, спектральный максимум может исчезать на несколько временных отсчётов, а затем появляться вновь. В этом случае, результатом применения алгоритма будут являться несколько кривых, в сущности, соответствующих одному и тому же источнику рассеяния. По этой причине процедура нахождения минимального расстояния и сравнения его с порогом циклически повторяется также для точек, удалённых на 2 и более отсчётов по времени.

В результате выполнения алгоритма в многомерном пространстве $\{\delta f^{(t)}, E^{(t)}\}$ формируются треки спектральных максимумов. Те из них, которые содержат небольшое количество точек, считаются шумовыми и отбрасываются. Те, которые имеют постоянную частоту, считаются не относящимися к рассеянными сигналам и также отбрасываются. Тот трек, который обладает наибольшей амплитудой, соответствует главному спектральному максимуму, т.е. прямому сигналу станции подсвета. Прочие треки с достаточной длительностью и изменяющимся ДСЧ сохраняются и подлежат последующему анализу.

Пример результатов обработки спектрограммы при помощи описанного алгоритма изображён на Рис.1.2. Измерения проводились 12.01.2010 г. с 15:00 по 20:00. Во временном промежутке с 15:30 по 15:38 был автоматически выделен эхо-сигнал движущегося объекта. Цветными точками изображены локальные максимумы исходной спектрограммы, по оси абсцисс отложены значения дискретного времени в секундах, отсчитываемого от начала измерений. По оси ординат отложено ДСЧ в герцах. Амплитуда спектральных максимумов обозначена цветом, в соответствии со шкалой. Красной линией показан

автоматически выделенный трек, соответствующий рассеянному сигналу движущегося объекта.

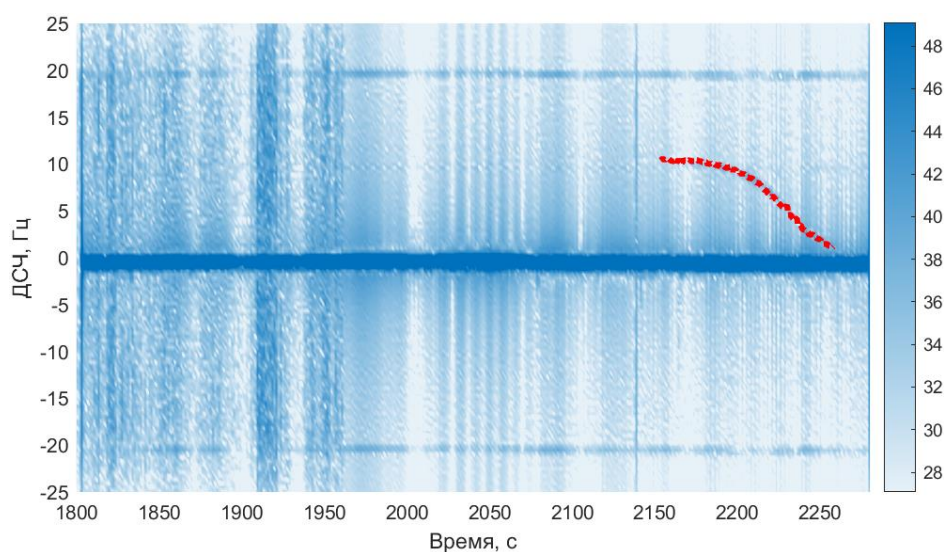


Рис.1.2 Результат автоматического выделения рассеянного следа

Дальнейший анализ выделенных временных треков подразумевает оценку координат и скорости воздушного объекта. В предложенных методах для этого используются имитационные модели ионосферного радиоканала.

1.4 Общие характеристики ионосферных волн

Прежде чем переходить к описанию предлагаемой имитационной модели приведём краткую сводку характеристик ионосферных волн. Ионизированная область атмосферы располагается на высотах, превышающих 60 км. Ионизация атмосферных газов происходит по различным причинам, например, при фотоионизации она обусловлена воздействием излучения с частотой выше ионизирующей частоты, при ударной ионизации причиной вырывания электрона из сферы притяжения ядра является попадание в молекулу или атом частицы с большой кинетической энергией. Основным источником ионизации является Солнце, спектр излучения которого является непрерывным в

широком диапазоне частот, а интенсивность изменяется в соответствии с 11-летним периодом активности [22,23].

Существование свободных зарядов, возникающих в результате ионизации, ограничено во времени вследствие рекомбинации свободных электронов с положительными ионами. В зависимости от соотношения между числом вновь образующихся и исчезающих зарядов, может наступать состояние динамического равновесия или, после внезапного прекращения действия ионизирующего излучения (например, при заходе Солнца), полное исчезновение свободных зарядов. В более плотных слоях атмосферы с большим количеством нейтральных молекул может происходить ступенчатая рекомбинация, когда свободные электроны из-за теплового движения оседают на нейтральных молекулах, образуя отрицательные ионы, которые впоследствии соединяются с положительными. Число свободных электронов в единице объёма n_e носит название электронной концентрации или электронной плотности. Важным параметром также является средняя частота соударений, испытываемых электроном – ν .

В идеализированной модели однородной атмосферы с постоянной температурой и давлением под воздействием монохроматического излучения возникает ионизированная область с одним максимумом, которую называют слоем Чэпмена. В реальной атмосфере процесс ионизации существенно отличается вследствие неоднородности и непостоянства температуры. Можно говорить только об одном явно выраженном (F_2) и трёх других слабо выраженных (D , E , F_1) максимумах электронной концентрации. В ночное время суток два из них (D и F_1) исчезают. Ориентировочное распределение концентрации по высоте h показано на Рис. 1.3. Область D располагается на высоте 60-90 км, E – 95-120 км, F_1 – 180-240 км, F_2 – 230-400 км. Молекулярная плотность, как и число столкновений, с высотой уменьшается. На непродолжительное время (до нескольких часов) на высоте области E может образовываться

спорадический слой E_s , обладающий большей в несколько раз электронной концентрацией.

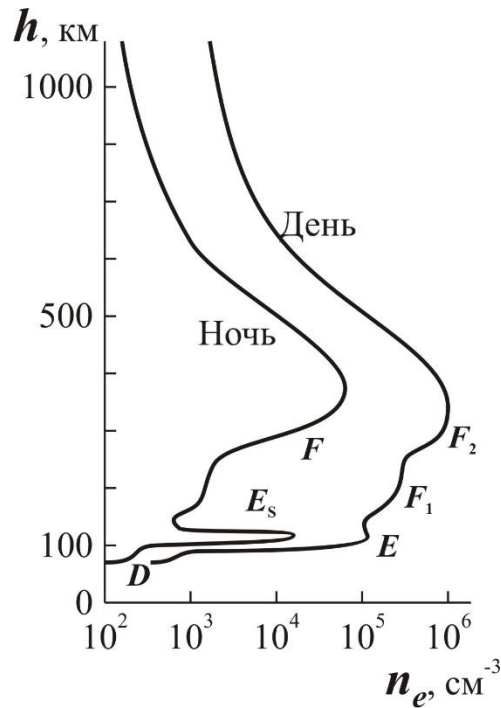


Рис. 1.3 Примерное распределение электронной концентрации в ионосфере

Электронная концентрация связана с критической частотой $f_{кр}$ соотношением (1.2), в котором $f_{кр}$ имеет размерность МГц, а n_e — ед/см³.

$$n_e = 1,24 \cdot 10^4 \cdot f_{кр}^2. \quad (1.2)$$

Рассматривая распространение радиоволны с частотой ω в ионосфере как в однородном ионизированном газе, получим электрофизические параметры среды с полупроводящими свойствами: диэлектрическую проницаемость ϵ_u и удельную проводимость σ_u :

$$\epsilon_u = \epsilon_0 - \frac{n_e e^2}{m(\omega^2 + \nu^2)}, \quad (1.3)$$

$$\sigma_u = \frac{\nu n_e e^2}{m(\omega^2 + \nu^2)}. \quad (1.4)$$

В формулах (1.3) и (1.4) m и e – масса и заряд электрона соответственно. Как видно из формул, диэлектрическая проницаемость зависит от частоты, что означает наличие дисперсии в среде, в связи с чем требуется вводить понятие о групповой скорости волны.

Реальная ионосфера находится в магнитном поле Земли, вызывающем анизотропию среды распространения радиоволн. Под действием постоянного магнитного поля напряжённостью H_0 траектории движущихся в электрическом поле частиц усложняются. Пусть вектор напряжённости магнитного поля находится под углом θ к вектору распространения плоской радиоволны с частотой ω . Обозначим через ω_p плазменную частоту ионизированного газа:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m \varepsilon_0}}. \quad (1.5)$$

Явление вращения электронов в постоянном магнитном поле получило название гиромагнитного резонанса, а частота этого вращения, или гироскопическая частота, выражается формулой:

$$\omega_g = \frac{e \mu_0 H_0}{m}. \quad (1.6)$$

Можно показать [23], что выражение для показателя преломления будет иметь следующий вид:

$$n_{1,2}^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_L^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \sqrt{\left(\frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \right)^2 + Y_L^2}} \quad (1.7)$$

Величины X , Y_L , Y_T и Z введены для удобства записи и выражаются следующим образом:

$$X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}; \quad Y_L = -\frac{\omega_g}{\omega} \cos\theta; \quad Y_T = -\frac{\omega_g}{\omega} \sin\theta; \quad Z = \frac{\nu}{\omega}.$$

Индексы L и T соответствуют продольной и поперечной составляющим магнитного поля. Выражение (1.7) носит название уравнения Эпплтона–Хартри. При распространении в продольном магнитном поле радиоволна сохраняет линейную поляризацию, однако плоскость поляризации начинает вращаться. Это явление носит название «Фарадеево вращение». При распространении в поперечном магнитном поле показатели преломления n_1 и n_2 характеризуют условия распространения двух ортогонально поляризованных волн. Для одной из них вектор напряжённости электрического поля перпендикулярен силовым линиям внешнего магнитного поля, для другой – параллелен им. Первый называют необыкновенным лучом (x), а второй – обыкновенным (o), в соответствии с принятой в оптике терминологией при явлении двойного лучепреломления.

Таким образом, плоская радиоволна, распространяющаяся в ионосфере в продольном магнитном поле, расщепляется на два линейно поляризованных луча, обыкновенный луч распространяется без влияния магнитного поля Земли, в то время как скорость распространения необыкновенного луча изменяется. В общем случае угол θ будет произвольным, и радиоволна расщепится на два эллиптически поляризованных луча [22,23].

В приведённых выше выражениях ионосфера рассматривалась как однородная анизотропная среда. В реальной ионосфере нарушается свойство однородности, в связи с чем распространение радиоволн происходит по криволинейным траекториям. В приближении слоисто-неоднородной среды

траектории распространения имеют кривизну R , зависящую от градиента показателя преломления. Условие поворота волны в вершине траектории (отражение от ионосферы) можно выразить через соотношение между зенитным углом φ , частотой наклонного луча f и плазменной частотой f_p :

$$f = f_p \sec(\varphi). \quad (1.8)$$

Выражение (1.8) носит название закона секанса. Записывая его через значение электронной концентрации в области максимума, можно убедиться, что чем больше частота волны, тем большая концентрация требуется, чтобы обеспечить условие поворота [23]. Наибольшая частота, при которой радиоволны отражаются от данного слоя при вертикально направленном луче, называется критической частотой.

При решении задач радиолокации и радиосвязи в ионосферном канале требуется знать параметры отражающего слоя. Их можно получить с помощью измерительных ионосферных станций вертикального, наклонного (НЗ) и возвратно-наклонного зондирования [24].

Через время запаздывания τ , измеряемое станцией, может быть получена действующая высота h_o , которая соответствует высоте отражения волны в пустом пространстве. Обозначим через h нижнюю границу ионосферы, а через z_0 и z_o действительную и действующую высоты, отсчитываемые от h . При распространении в ионосфере, как в диспергирующей среде, время группового запаздывания запишется как:

$$\tau = \frac{2h_o}{c} = \frac{2h}{c} + 2 \int_0^{z_o} \frac{dz}{v_{gp}}. \quad (1.9)$$

Зная действующую высоту, можно обратиться к теоремам эквивалентности, которые упрощают расчёт траекторий распространения волн. К теоремам эквивалентности относят теоремы Брейта-Тьюва и теорему Мартина, которые проиллюстрированы на Рис. 1.4.

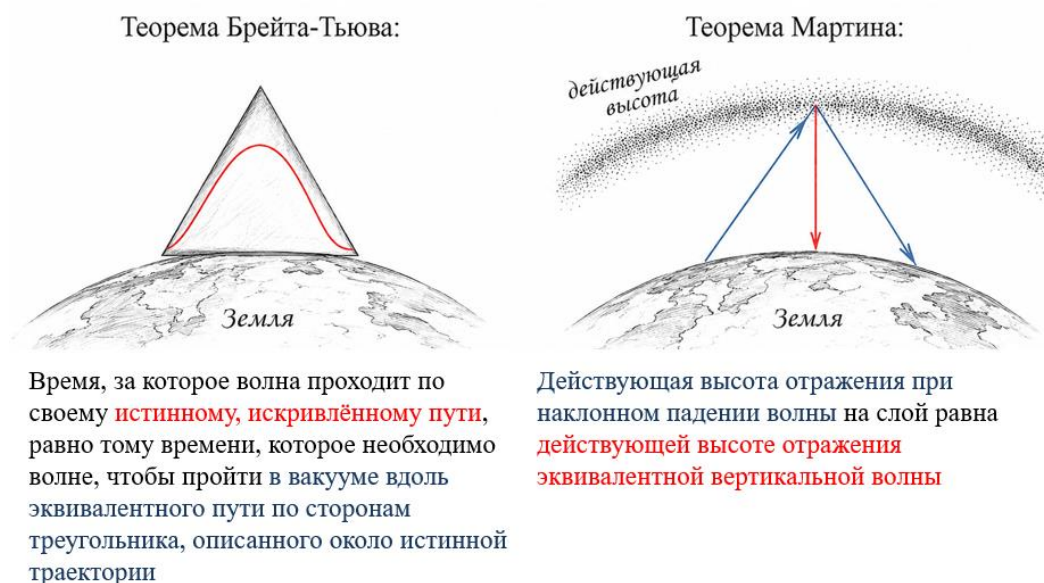


Рис. 1.4 Теоремы эквивалентности

Используя приведенные выше теоремы, можно рассматривать не криволинейный путь волны в ионосфере, а эквивалентный треугольный путь, что существенно упрощает расчеты. Это упрощение лежит в основе предлагаемой имитационной модели.

1.5 Описание упрощённой имитационной модели

Для оценки параметров траектории объектов наблюдения на основе автоматически выделяемых треков предложена упрощённая имитационная модель (УИМ).

Целью моделирования является определение траектории путём подбора начальных координат, курса, скорости, ускорения и ЭПР воздушного

объекта таким образом, чтобы расчётные параметры рассеиваемых им сигналов совпадали с параметрами, полученными экспериментально.

В общем случае на момент начала моделирования имеется T полученных экспериментально оценок значений следующих величин в соответствующие моменты времени в формате UTC с длительностью сеанса ξ :

$f_t^{(D)}$ – ДСЧ, $E_t^{(D)}$ – амплитуда сигнала подсвета (здесь и далее индекс D соответствует обозначению «*direct wave*» - прямая волна);

$f_t^{(S)}$ – ДСЧ, $E_t^{(S)}$ – амплитуда сигнала объекта (здесь и далее индекс S соответствует обозначению «*scattered wave*» - рассеянная волна).

Следует отметить, что вследствие возможности смещения опорной частоты приёмника среднее значение $f_t^{(D)}$ может и не быть равным нулю, вследствие чего к величине $f_t^{(S)}$ требуется внести поправку. Поправка может быть оценена путём усреднения наблюдаемого ДСЧ прямой волны ($M[f_t^{(D)}]$). При помощи вычитания $M[f_t^{(D)}]$ из $f_t^{(S)}$ может быть определён истинный ДСЧ рассеянной волны. В дальнейших вычислениях под $f_t^{(S)}$ будет пониматься разность измеренного значения и $M[f_t^{(D)}]$.

Заранее заданными постоянными параметрами модели являются географические координаты (широта φ и долгота λ) источника подсвета и координаты пункта приёма. Для удобства предлагается перейти в систему декартовых координат с началом отсчёта в точке приёма, осью x , направленной на восток, y – на север, z – на зенит. Геометрия задачи представлена на Рис.1.5, вектор L направлен на источник, обозначенный голубым кружком, а вектор $\mathbf{r}$ есть радиус-вектор объекта наблюдения, движущегося со скоростью V .

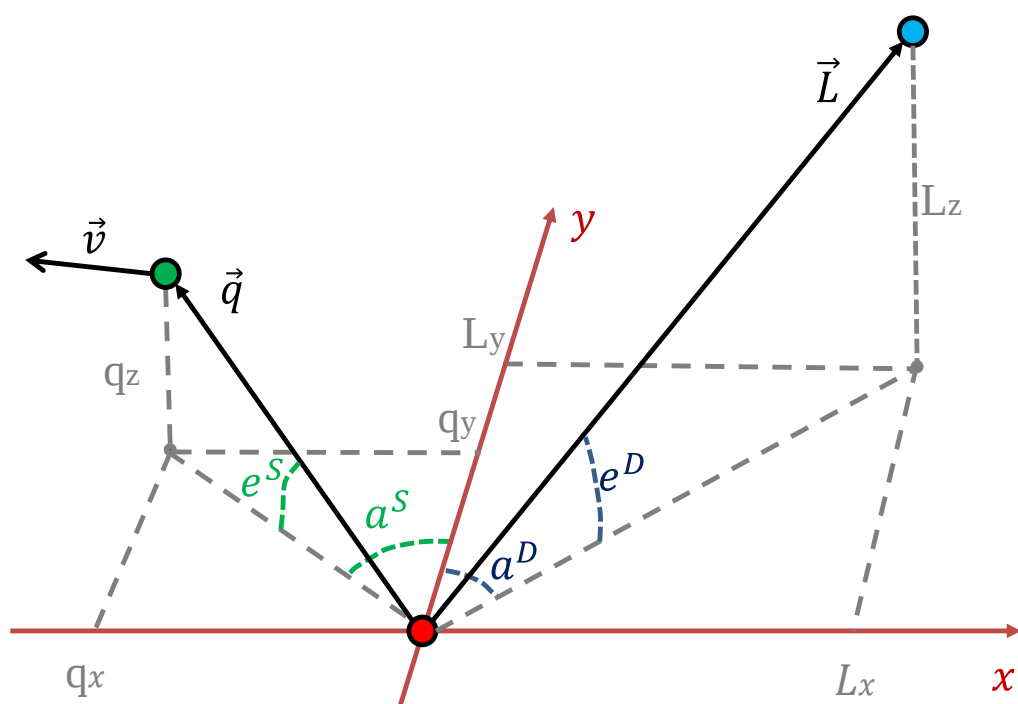


Рис.1.5 Геометрия УИМ

Если не требуется учитывать сферичность Земной поверхности, и рассматривается случай свободно распространяющихся (прямых) волн, тогда вектор координат источника подсвечивающего излучения L получается автоматически. При распространении ионосферных волн потребуется ввести мнимый источник на высоте L_z .

На Рис.1.6 представлены геометрические построения для определения координат мнимого источника сигнала подсвета на примере распространения двухскачковой ионосферной волны. Этот способ может быть обобщён на произвольное число скачков. Скачки, в соответствии с приведёнными выше теоремами эквивалентности, представляются в виде треугольных лучевых траекторий с вершинами на высоте, равной действующей высоте ионосферы h_d . Поверхность Земли задаётся сферой радиуса R_e . Символом h_d обозначена действующая высота ионосферы. Поскольку в данном подходе не измеряются углы прихода прямого сигнала, h_d задаётся на основе модели IRI [49,50].

Полный путь распространения волны складывается из четырёх равных отрезков A_1A_2 , A_2B_1 , B_1B_2 , B_2C_1 . Волна, излучённая источником C_1 падает на земную поверхность в точке приёма под углом $e^{(D)}$ к касательной l . Отложим на прямой, которой принадлежит отрезок A_1A_2 , четыре равных ему по длине отрезка и получим расположение мнимого источника C_1' . Опустив из точки C_1' высоту на касательную l , получим интересующий нас треугольник $A_1C_1'D$ в декартовой системе координат. Следует отметить, что при такой геометрии модели с увеличением дальности до объекта ошибка в определении высоты будет расти, поэтому после окончания моделирования должна быть введена поправка на сферичность поверхности.

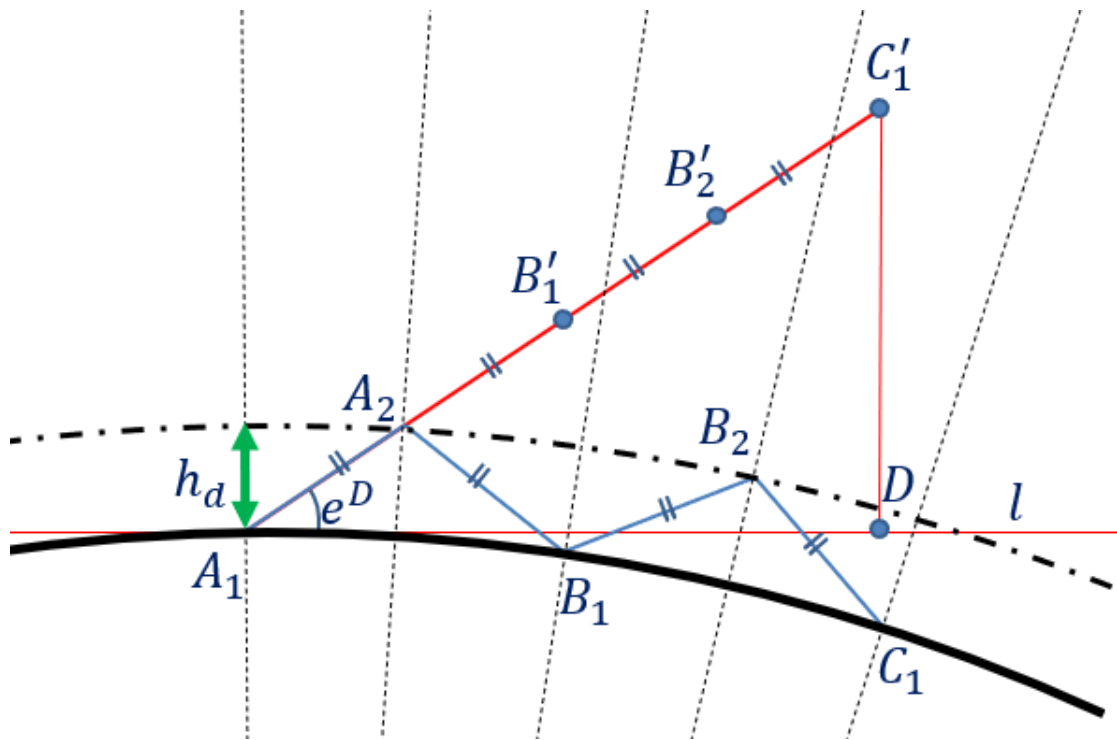


Рис.1.6 Геометрическое построение для определения координат мнимого источника

Далее требуется подобрать значения следующих входных параметров модели и на их основе рассчитать саму траекторию на интервале времени

$t = [0, \xi]$ с шагом, равным периоду дискретизации Δt : $\mathbf{q}_0$ – вектор начальных координат, $|v|$ – модуль скорости, θ – тангаж, (угол между продольной осью воздушного объекта и горизонтом), ψ – курс, (угол между продольной осью воздушного объекта и направлением на север), $|a|$ – модуль ускорения, θ' – вертикальная и ψ' – горизонтальные компоненты ускорения, σ – ЭПР.

Поскольку измеренные значения $f_t^{(S)}$ и $E_t^{(S)}$ в отдельные моменты дискретного времени могут быть недоступны, выполняется сплайн-интерполяция [28] на всех разрывах во временном интервале t .

По формулам (1.10) и (1.11) вычисляются векторы начальной скорости $\mathbf{v}$, ускорения $\mathbf{a}$ и зависимость вектора координат $\mathbf{q}$ от времени:

$$\mathbf{v} = |v| \cdot \begin{bmatrix} \sin \psi \cos \theta \\ \cos \psi \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a} = |a| \cdot \begin{bmatrix} \sin \psi' \cos \theta' \\ \cos \psi' \cos \theta' \\ \sin \theta' \end{bmatrix}, \quad (1.10)$$

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{q}_0 + \mathbf{v} \cdot t + \frac{\mathbf{a}}{2} \cdot t^2. \quad (1.11)$$

На основе полученного уравнения движения далее требуется получить расчётные значения зависимостей параметров рассеянной волны от времени t :

$f_t^{(M)}$ – ДСЧ, $E_t^{(M)}$ – амплитуда (здесь и далее индекс M обозначает, что значения получены по результатам моделирования).

Запишем соотношение для ДСЧ с помощью геометрии ПКРЛС с одним передатчиком, представленной на Рис.1.7. На рисунке приведены обозначения бистатического угла β , угла между вектором скорости воздушного объекта и биссектрисой бистатического угла φ , дальности объект-ПРМ R_r и дальности объект-ПРД R_t .

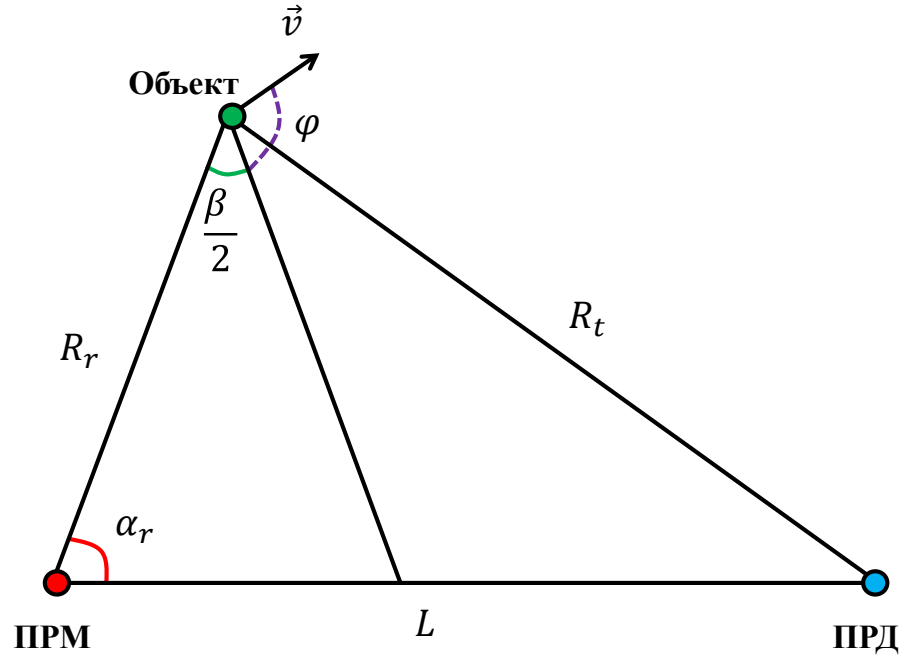


Рис.1.7 Геометрия ПКРЛС с одним передатчиком

С учётом введенных обозначений ДСЧ, согласно [17], связано с длиной волны несущей λ и радиальными скоростями в направлении приёмника и передатчика соотношением (1.12). При этом ДСЧ возникает не только при движении самого объекта, но и при вращении его пропеллеров и винтов, что может привести к формированию ложных треков [7].

$$f_d = \frac{-1}{\lambda} \left(\frac{dR_r}{dt} + \frac{dR_t}{dt} \right) = \frac{v}{\lambda} \left(\cos \left(\varphi + \frac{\beta}{2} \right) - \cos \left(\varphi - \frac{\beta}{2} \right) \right) = \frac{v}{\lambda} \cos \varphi \cos \frac{\beta}{2}. \quad (1.12)$$

При анализе с помощью имитационной модели имеем дело с дискретным временем, поэтому в формуле (1.12) следует перейти от производных к конечным разностям:

$$f_t^{(M)} = \frac{-1}{\lambda} \left(\frac{\Delta R_r}{\Delta t} + \frac{\Delta R_t}{\Delta t} \right). \quad (1.13)$$

Возможные зависимости ДСЧ от местоположения объекта и направления его скорости проиллюстрированы на Рис.1.8. Красной точкой обозначен пункт приёма, синей точкой обозначена станция подсвета. Система координат ориентирована таким образом, что объект, приёмник и передатчик находятся в одной плоскости.

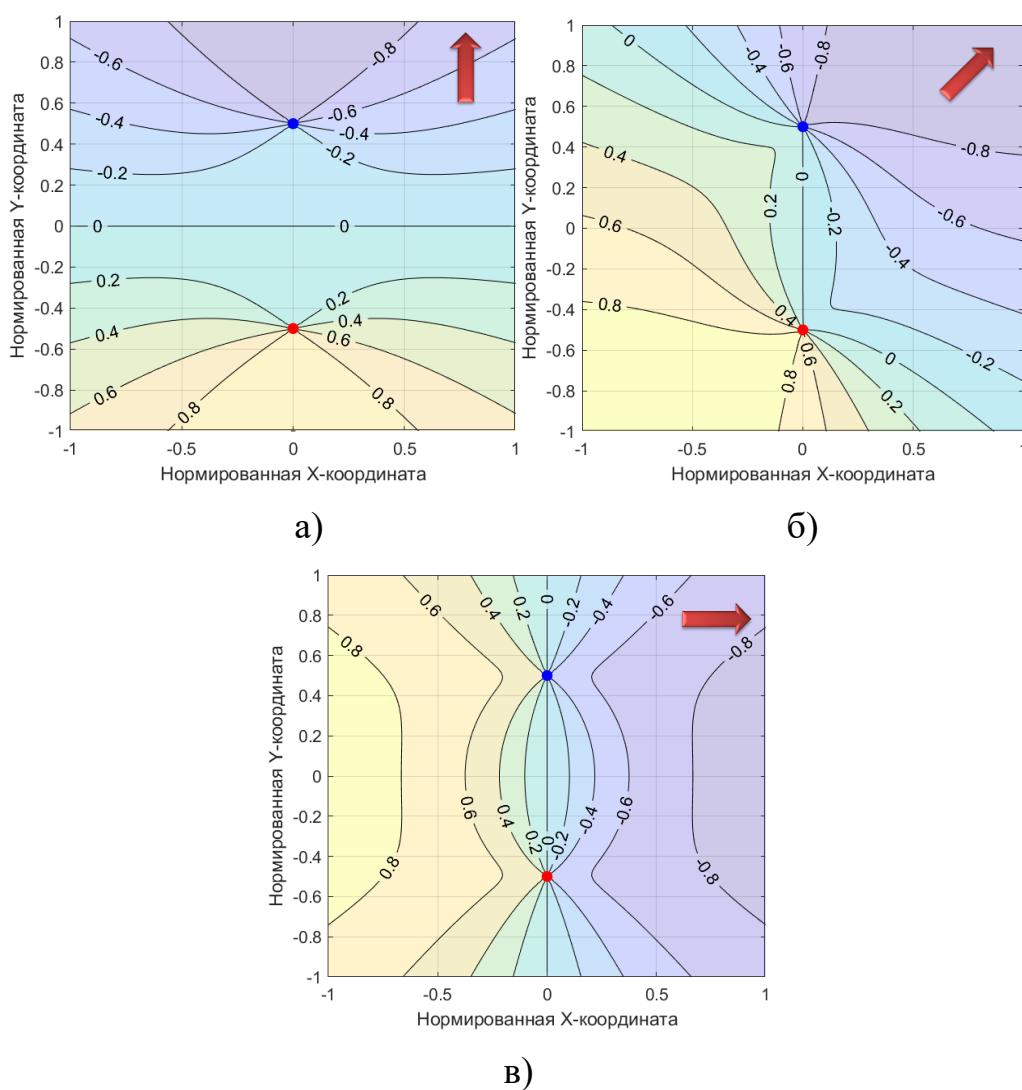


Рис.1.8 Зависимость нормированного ДСЧ от нормированных координат и направления вектора скорости объекта: а) вектор скорости направлен на север, б) на северо-восток, в) на восток. Красной точкой обозначен пункт приёма, синей точкой обозначена станция подсвета.

Мощность принимаемого эхо-сигнала P_r определяется по формуле (1.14) как произведение плотности потока энергии (ППЭ) электромагнитной волны в точке местоположения объекта, ППЭ рассеянной объектом волны в пункте приёма и эффективной площади приёмной антенны (ЭПА). ППЭ в точке местоположения объекта наблюдения определяется произведением мощности передатчика P_t и коэффициентом усиления G_t , отнесённым к квадрату расстояния до передатчика с множителем 4π . ППЭ рассеянной объектом волны определяется величиной бистатической эффективной поверхности рассеяния наблюдаемого объекта, отнесённой к квадрату расстояния до приёмника с множителем 4π . Наконец, ЭПА может быть выражена через длину несущей волны и коэффициент усиления приёмной антенны G_r . Таким образом, пренебрегая потерями в системе и потерями на поглощение в среде, получим соотношение для мощности принимаемого эхо-сигнала:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R_t^2} \frac{\sigma_b}{4\pi R_r^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}. \quad (1.14)$$

Мощность P_r и амплитуда $E_t^{(M)}$ эхо-сигнала связаны через входное сопротивление антенны Z_c соотношением:

$$E_t^{(M)} = \sqrt{P_r \cdot Z_c}. \quad (1.15)$$

После расчёта параметров сигнала вычисляется взвешенная сумма невязок подбираемых величин χ , которые представляют собой среднеквадратические ошибки между моделируемыми и измеряемыми параметрами.

$$\chi = w_f \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (f_t^{(M)} - f_t^{(S)})^2} + w_E \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (E_t^{(M)} - E_t^{(S)})^2} \rightarrow \chi^0. \quad (1.16)$$

В выражении выше χ^0 – есть малая величина, к которой устремляют взвешенную сумму невязок, и с помощью которой можно задать критерий остановки оптимизационной задачи. Само решение задачи минимизации в рамках проведённых экспериментов выполнялось с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [29]. Нормировочные множители w_f, w_E должны быть выбраны таким образом, чтобы СКО каждого параметра были величинами одного порядка. При достижении величины ошибки χ^0 , набор входных параметров $q_0, |v|, \theta, \psi, |a|, \theta', \psi'$ и σ считается подобранным верно. Взяв модуль вектора $q(t)$, соответствующего χ^0 , автоматически получают зависимость от времени радиальной дальности R до объекта.

Таким образом, с помощью УИМ могут быть подобраны основные параметры траектории объекта, движущегося в тропосфере Земли, по результатам измерения различных параметров рассеянного им излучения некооперативных передатчиков.

1.6 Результаты измерений и моделирования

Рассмотрим результаты измерений, применения алгоритма автоматического выделения рассеянных следов и оценивания координат воздушных объектов на основе УИМ к радиолокационным данным, полученным 01.12.2010 г. в период 13:00-13:08 (сеанс 1) и 13:30-13:38 (сеанс 2).

В течение обоих сеансов рассеянные следы движущихся объектов удалось зарегистрировать одновременно на двух частотах – 9996 кГц (станция подсвета 1) и 21610 кГц (станция 2). На Рис.1.9 и Рис.1.10 приведены спектрограммы сеанса 1 и сеанса 2, соответственно. По оси абсцисс отложено дискретное время в секундах, отсчитываемое от 12:00. По оси ординат отложен ДСЧ в герцах.

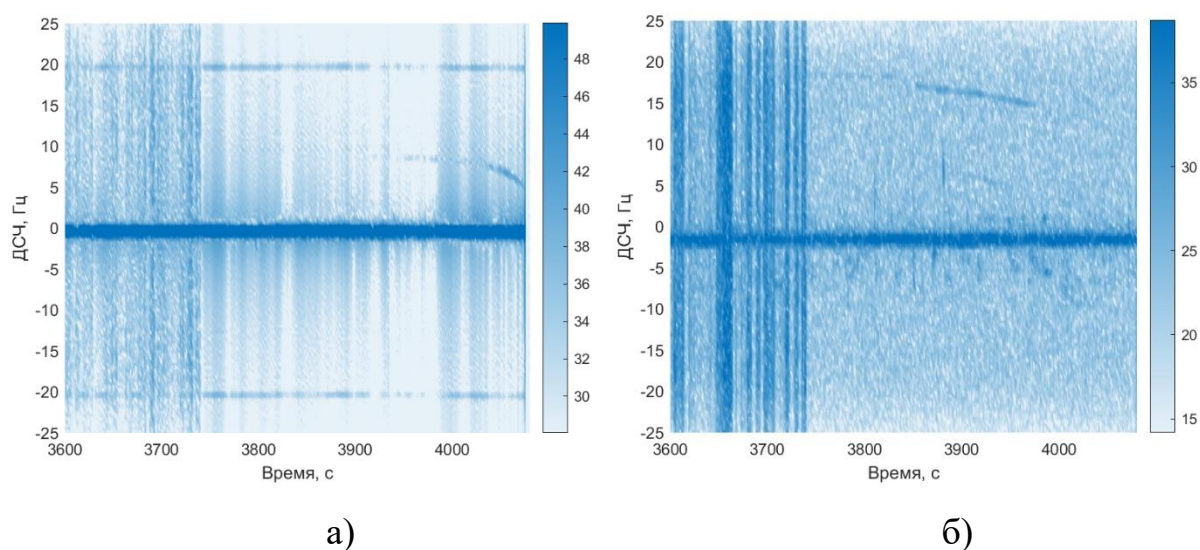


Рис.1.9 Спектрограмма первого сеанса, а) станция 1, б) станция 2

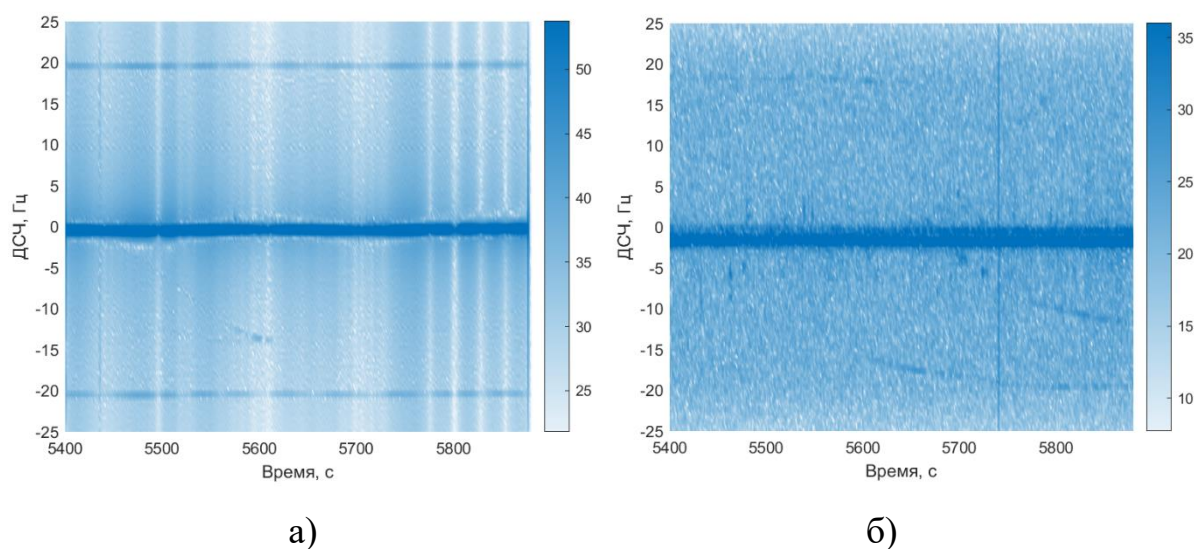
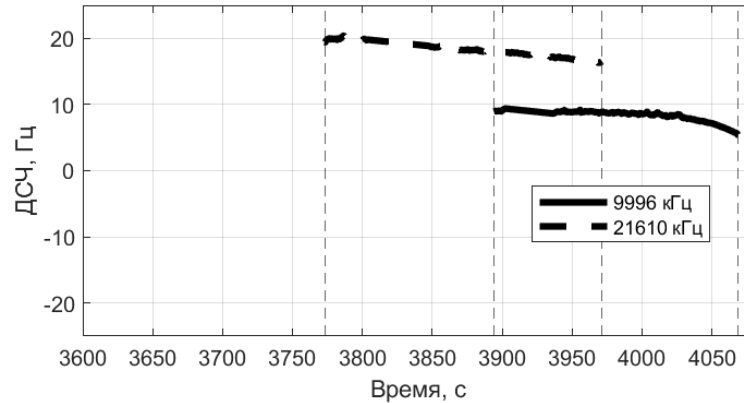


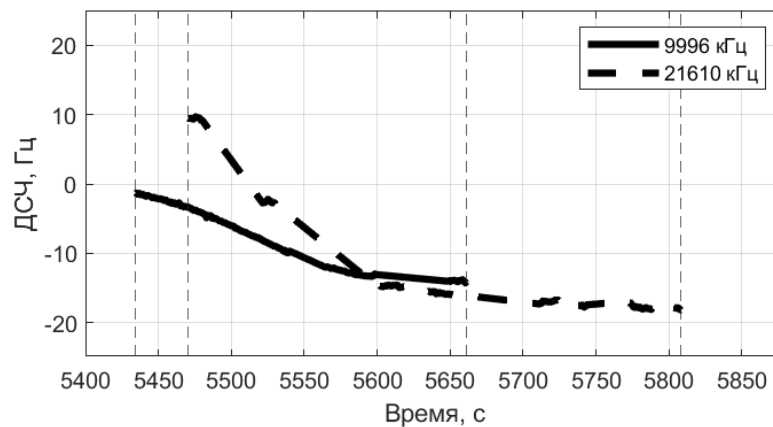
Рис.1.10 Спектрограмма второго сеанса, а) станция 1, б) станция 2

Результаты выделения рассеянных следов для обоих источников показаны на Рис.1.11. Рассмотрение начнём с сеанса 1, в котором сигнал источника рассеянного излучения на частоте 21610 кГц был доступен во временном интервале 3770 – 3970 с. На другой частоте сигнал того же источника удавалось принимать в течение временного интервала 3890 – 4075 с. Во время сеанса 2 сигнал объекта наблюдения на частоте 9996 кГц был доступен во временном

интервале 5440 – 5660 с, а на частоте 21610 кГц в интервале 5470 – 5810 с. Таким образом, одновременная регистрация сигналов на двух частотах в сеансах 1 и 2 выполнялась в течение 80 и 190 секунд, соответственно.



а)



б)

Рис.1.11 Результаты автоматического выделения рассеянных следов:

а) сеанса 1 и б) сеанса 2

Выделенные временные зависимости ДСЧ и амплитуды для сигналов на обеих частотах использовались в качестве эталонов для подбора начального положения и скорости воздушного объекта и одновременной минимизации невязки между эталонами и моделируемыми зависимостями по формулам (1.13)-(1.16). В этом случае минимизировалась сумма значений ε_1 и ε_2 , соответствующих двум частотам. Время при этом отсчитывалось от начала двухчастотной

регистрации сигнала объекта наблюдения. Для обоих сеансов были получены оценки вектора координат q_0 , модуля скорости $|v|$, ускорения $|a|$, тангажа θ , курса ψ и угловых компонент вектора ускорения θ' , ψ' представленные в таблице ниже. Как видно из значений тангажа, высоты и модуля скорости в таблице, во время сеанса 1 воздушный объект двигался на северо-запад, набирая высоту, а во время сеанса 2 воздушный объект, наоборот, снижался, двигаясь на юг.

Таблица. 1. Результаты подбора начальных координат методом подбора по временным зависимостям амплитуды и ДСЧ

Параметр	Сеанс 1	Сеанс 2
$\psi, ^\circ$	323.7	192.4
$\psi', ^\circ/\text{с}$	0.04	-0.02
$\theta, ^\circ$	4.19	-4.79
$\theta', ^\circ/\text{с}$	0	0
x_0	15.28	19.91
$q_0 = y_0, \text{ км}$	-27.12	3.88
z_0	5.74	7.94
$ v , \text{ м/с}$	159.93	249.57
$ a , \text{ м/с}^2$	0.01	0

Результаты выделения рассеянных следов из спектрограмм и расчёта с применением имитационной модели для временных зависимостей амплитуды и ДСЧ в сеансе 1 приведены на Рис.1.12 и Рис.1.13.

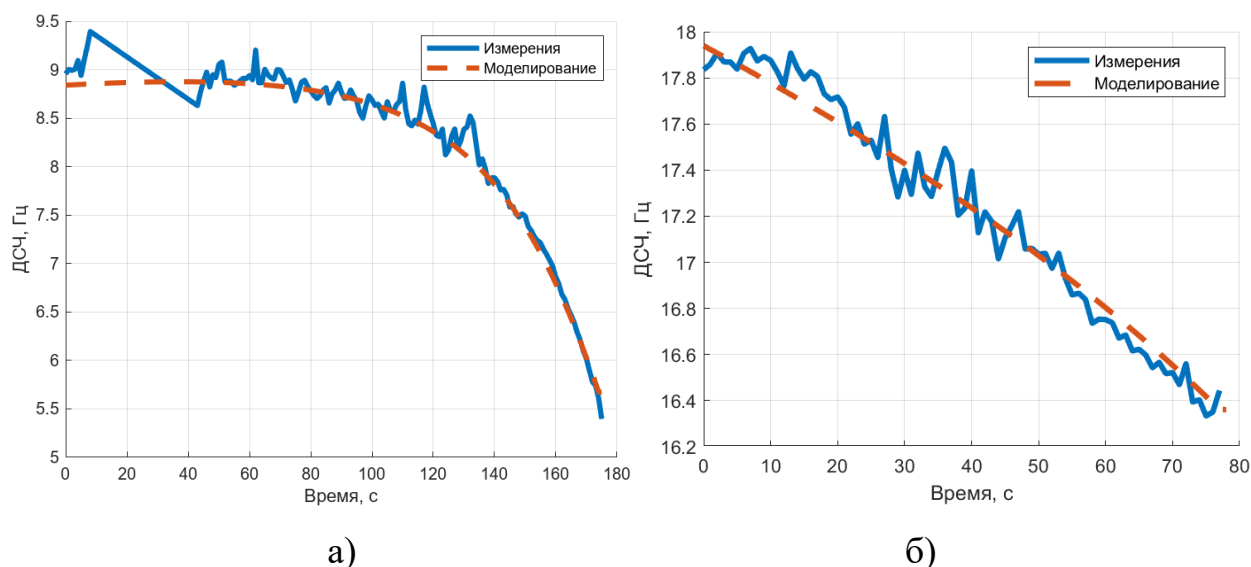


Рис.1.12 ДСЧ в первом сеансе, а) станция 1, б) станция 2

Согласно Рис.1.12, максимальное отклонение составляет не более 0.7 Гц. Мгновенные значения амплитуды на Рис.1.13 могут различаться более чем на 15 дБ из-за флуктуации ЭПР воздушного объекта и прочих факторов, однако можно говорить о совпадении тренда измеренной временной зависимости со значениями моделируемой зависимости.

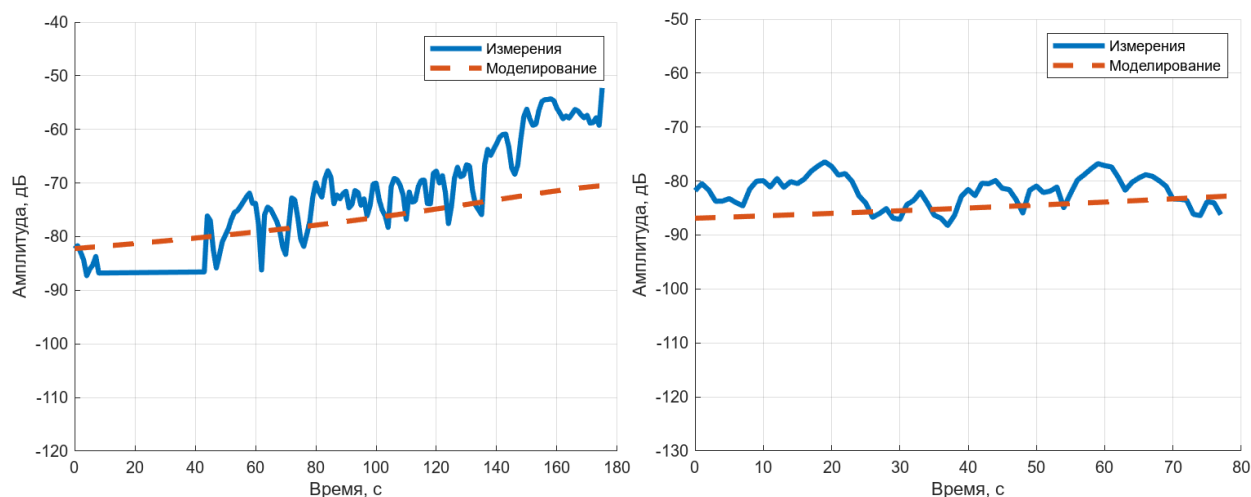


Рис.1.13 Зависимость амплитуды от времени сеанса 1 для двух частот

Теперь рассмотрим поведение воздушного объекта из второго сеанса. Аналогичные графики для него приведены на Рис.1.14 и Рис.1.15. Для сигнала

на частоте 9996 кГц величина доплеровского сдвига лежит в диапазоне частот от -3.8 Гц до -14 Гц, в то время как ДСЧ сигнала на частоте 21610 кГц варьируется в пределах от 10 до -18 Гц.

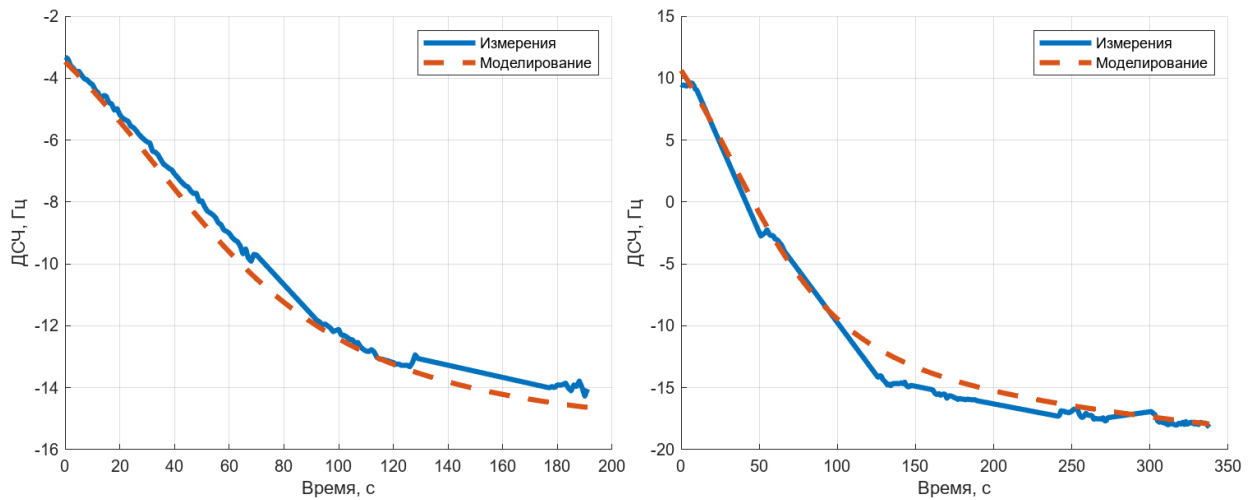


Рис.1.14 Зависимость ДСЧ от времени сеанса 2 на двух частотах

Таким образом, для воздушного объекта, наблюдаемого во втором сеансе, максимальное отклонение смоделированных значений ДСЧ и амплитуды от измеренных временных зависимостей составило 2.5 Гц и 20 дБ, соответственно.

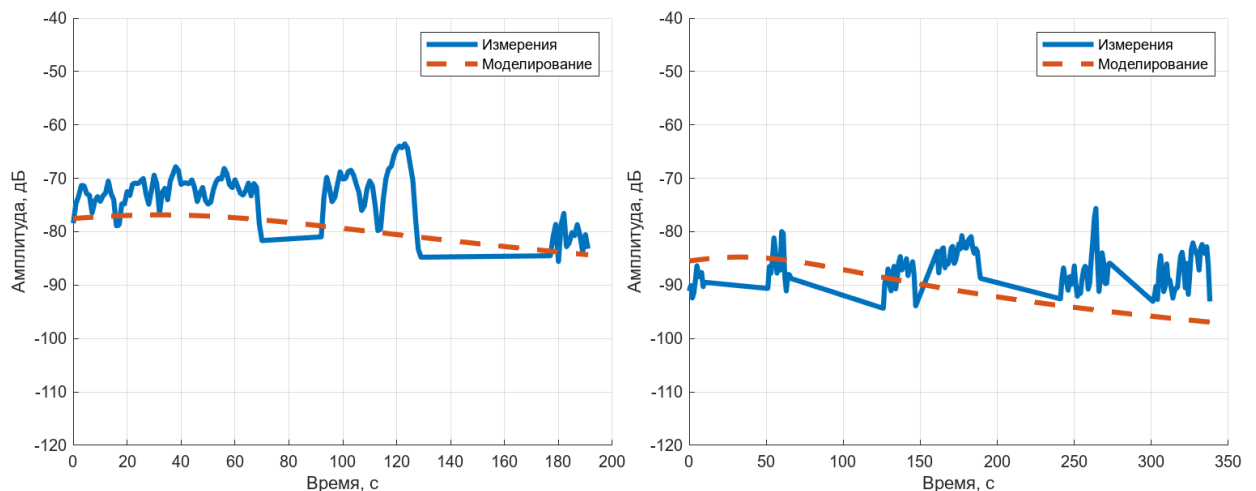


Рис.1.15 Зависимость амплитуды от времени сеанса 2 на двух частотах

На Рис.1.16 приведена траектория воздушного объекта, полученная в результате применения метода обнаружения и определения координат к данным сеанса 1. Объект становится доступным для наблюдения на расстоянии

порядка 33 км на юго-восток и движется на северо-запад. Предельное сближение составляет приблизительно 21 км. Траектория нанесена на карту из открытого источника [30].

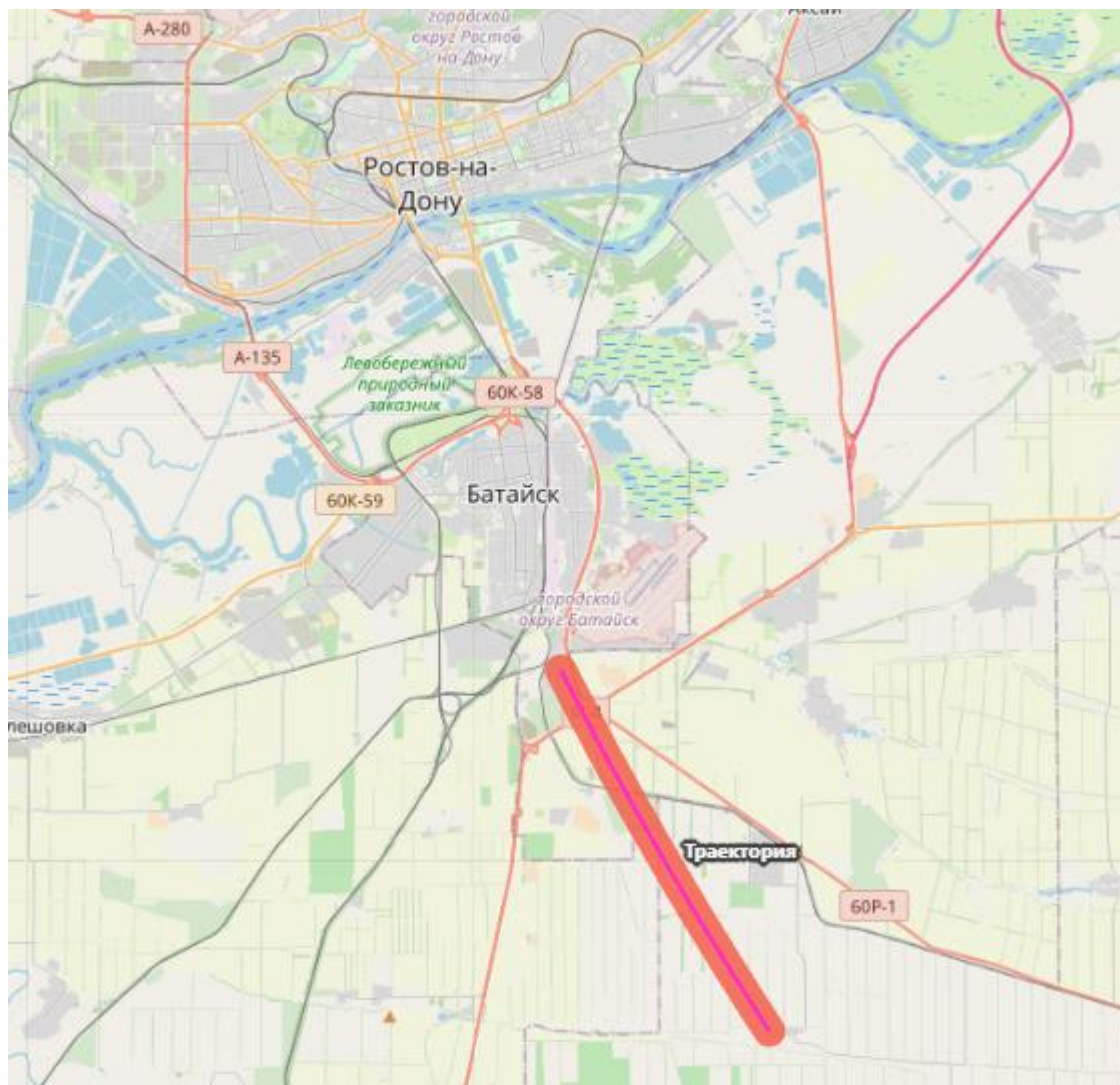


Рис.1.16 Траектория воздушного объекта, наблюдаемого в сеансе 1

По результатам обработки данных сеанса 2 была получена траектория, приведённая на Рис.1.17. Начало регистрации сигнала от воздушного объекта приходится на момент его расположения к западу от точки приёма на расстоянии 20 км. Двигаясь на юг, объект достигает дальности около 78 км.

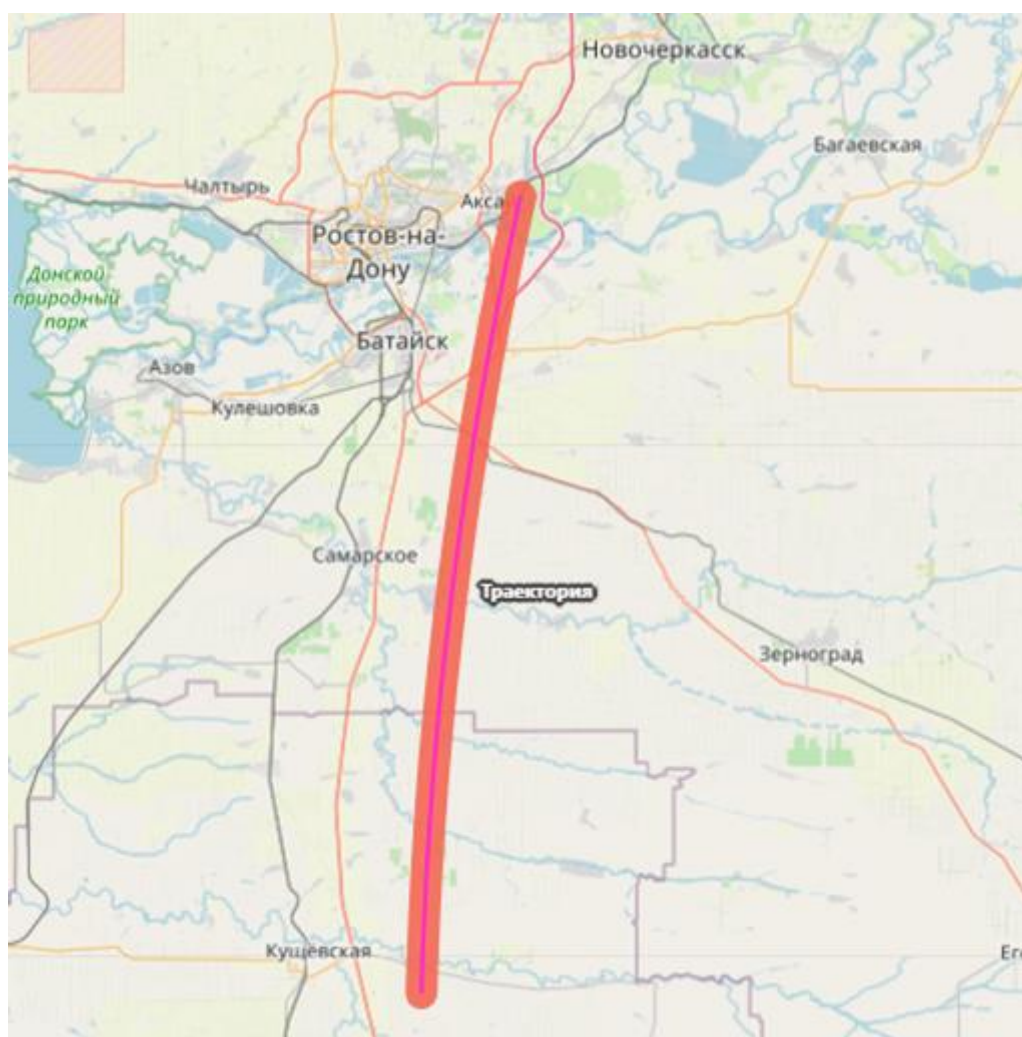


Рис.1.17 Траектория воздушного объекта, наблюдаемого в сеансе 2

1.7 Выводы

Описан одноканальный многочастотный доплеровский стенд, включающий в себя V-образную антенну, цифровое радиоприёмное устройство прямого усиления и промышленную ЭВМ. В ходе экспериментов ОМДС использован для синхронной регистрации квадратурных компонент прямых и рассеянных сигналов различных некооперативных станций подсвета. В результате первичной обработки данных доплеровского стенда на внешнем запоминающем устройстве были записаны спектрограммы, соответствовавшие сигналам различных передатчиков и подлежавшие дальнейшей обработке.

Предложен алгоритм автоматической селекции по частоте и амплитуде, который позволил выполнить выделение прямых и рассеянных сигналов некооперативных станций подсвета из записанных спектрограмм посредством анализа расстояний между точками в многомерном пространстве {время – ДСЧ – амплитуда}. Прямой сигнал станции подсвета идентифицировался при этом как мощный сигнал с малым постоянным ДСЧ. Рассеянный сигнал идентифицировался по минимальному расстоянию между соседними точками в указанном выше пространстве, при условии медленного изменения ДСЧ.

Разработана упрощённая имитационная модель распространения радиоволн, которая позволяет на основе входных данных в виде географических координат приёмника и передатчика, начальных координат объекта, а также модуля и направления его скорости и ускорения вычислять частоту и амплитуду рассеянного излучения некооперативной станции подсвета и минимизировать невязку между измеренными и моделируемыми временными зависимостями методом наименьших квадратов.

Приведены примеры обработки данных различных радиолокационных сеансов, с помощью которых показана принципиальная возможность применения разработанного метода обнаружения и определения координат воздушных объектов на удалении порядка 80 км по временным зависимостям амплитуды и частоты рассеянного излучения.

2 МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА ПО ВРЕМЕННЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ ДСЧ И УГЛОВ ПРИХОДА РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

2.1 Постановка задачи

По результатам однопозиционных измерений ДСЧ одноканальным многочастотным доплеровским стендом и совместного имитационного моделирования однозначность определения координат движущихся воздушных объектов может быть обеспечена только при наличии доступных одновременно сигналов нескольких некооперативных источников. Если же удаётся зарегистрировать рассеиваемый сигнал только от одной станции, необходимо совместно с ДСЧ измерять другие параметры, например, углы прихода. Наличие измеренных совместно значений углов прихода и ДСЧ позволяет также обеспечить повышение точности автоматического выделения рассеянного сигнала. Обозначенный набор измеряемых величин может быть получен с помощью прибора для измерения углов прихода радиоизлучения, в частности, разработанного ранее КВ-радиопеленгатора [32,33,34].

В связи с вышесказанным, решаемая в этой главе задача может быть сформулирована следующим образом.

Пусть ПАК, обеспечивающий регистрацию и программную обработку сигналов по крайней мере одной некооперативной станции подсвета, формирует отсчёты в многомерном пространстве {время – частота – амплитуда – азимут – угол места}.

В получаемых наборах точек необходимо обеспечить автоматическое выделение рассеянного и прямого сигнала. Результатом применения алгоритма автоматического выделения к исходным данным будут являться временные зависимости углов прихода, частоты и амплитуды сигналов, соответствующих движущимся воздушным объектам и станции подсвета.

Затем должен быть предложен метод, позволяющий оценивать параметры траектории объекта на основе полученных зависимостей. Для этого

требуется расширить имитационную модель и внести соответствующие дополнения в процедуру минимизации невязок между измеренными и моделируемыми характеристиками.

Следующим шагом является проверка работоспособности предложенного метода. Для решения этой задачи могут быть использованы результаты одновременных измерений двумя аналогичными ПАК, расположенными на расстоянии друг от друга, а также результаты одновременных однопозиционных измерений при помощи ОМДС и КВ-радиопеленгатора и обработки данных двумя различными методами.

2.2 Описание КВ-радиопеленгатора и алгоритма первичной обработки данных

Измерительное оборудование, использованное для реализации предложенного метода, представляет собой радиопеленгатор КВ-диапазона, расположенный в точке с теми же географическими координатами, что и ОМДС (47.239°С, 39.642°В). Основные элементы этого ПАК [33] представлены на Рис.2.1 в виде блок-схемы. Во время проведенных экспериментов использовались различные варианты построения ПАК, однако эти различия не существенны для дальнейшего рассмотрения.



Рис.2.1 Блок-схема КВ-радиопеленгатора

Антенная система ПАК является чисто приёмной и состоит из N девятиметровых штыревых пассивных антенн или полутораметровых активных антенн. На практике в различных экспериментах использовалось 8 и 16 антенных элементов. Антенная решётка занимает пространство размером 40×40 м. Расположение антенных элементов может быть произвольным в том смысле, что не требуется обеспечивать круговую пространственную конфигурацию, однако их координаты в трёхмерном пространстве относительно выбранной системы отсчёта должны быть предварительно измерены с высокой точностью.

Каждой антенне соответствует один из входов многоканального когерентного супергетеродинного приёмного устройства с шириной полосы приёма в 1 МГц, динамическим диапазоном 100 дБ и ПЧ 70 МГц.

В состав ПАК кроме того входит многоканальный 16-битный АЦП с частотой сэмплирования 70 МГц. Внутри этого устройства имеется встроенный процессор цифровой обработки. В результате работы АЦП сигналы с шириной полосы 1 МГц после переноса на ПЧ преобразуются в цифровые I/Q компоненты длительностью 17 секунд. После фильтрации и децимации во

встроенном процессоре частота дискретизации сигналов составляет 1 кГц. Не-
трудно видеть, что спектральное разрешение цифрового комплексного сиг-
нала составляет в результате сотые доли герца.

Многоканальный калибровочный генератор предназначен для калиб-
ровки приёмных каналов по амплитуде и вырабатывает широкополосный шу-
моподобный сигнал на всех своих синфазных выходах во всей полосе работы
радиопеленгатора. Приёмник GPS предназначен для временной синхрониза-
ции ПАК.

Схема обработки данных КВ-радиопеленгатора проиллюстрирована на
Рис.2.2. Внутри ПЭВМ реализован алгоритм первичной обработки для обна-
ружения рассеянных сигналов и оценки их параметров. Операции, реализован-
ные внутри ПЭВМ, выделены на схеме сплошным контуром. Под оцениваем-
ыми параметрами здесь понимаются углы прихода (азимут α и угол места
 ε), ДСЧ δf и амплитуда E [32]. Полная схема включает в себя также вто-
ричную обработку (селекцию следов рассеяния) и оценку координат при по-
мощи упрощённой имитационной модели.

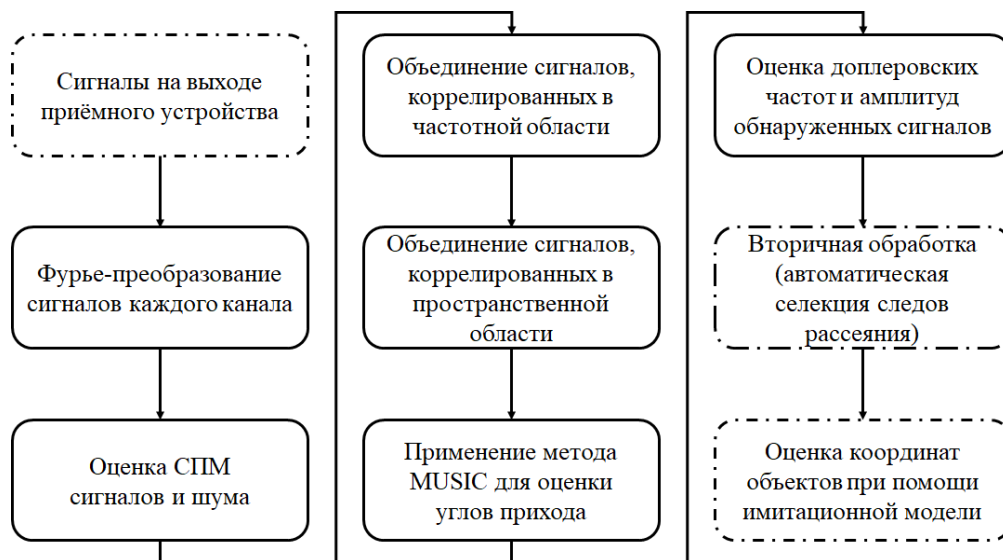


Рис.2.2 Схема обработки данных в КВ-радиопеленгаторе

Для описания алгоритма первичной обработки данных введём следующие обозначения: N – число элементов антенной решётки из состава ПАК, F_d – частота дискретизации принимаемых сигналов, K – число отсчётов комплексного сигнала после дискретизации. На первом шаге обработки к сигналу каждого канала применяется БПФ для получения спектральной плотности мощности (СПМ) в полосе частот. Полученные оценки СПМ могут быть объединены в матрицу $\{s_{n,k}\}$ размера $N \times K$, которая при усреднении по индексу n позволяет получить состоятельную оценку:

$$\bar{s}_k = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} |s_{n,k}|^2}{N}. \quad (2.1)$$

По полученной состоятельной оценке определяют СПМ шума s_N , а также номер отсчёта $k_m^{\max}$, соответствующего глобальному максимуму. Элементы матрицы $s_{n,k_m^{\max}}$ представляют собой вектор-столбец $\mathbf{s}_m = \{s_{n,k_m^{\max}}\}^T$. Внешнее произведение $\mathbf{s}_m$ на себя дает невзвешенную оценку матрицы автокорреляции $\mathbf{S}_m = \mathbf{s}_m \mathbf{s}_m^H$ парциального сигнала с индексом $m=0$ в пространственной области, так как $\mathbf{s}_m$ есть амплитудно-фазовое распределение (АФР) токов по апертуре антенной решётки при его приёме.

Следует отметить, что парциальные сигналы могут коррелировать в частотной области, находясь на разных спектральных отсчётах, поэтому их количество должно быть уточнено. Для этой цели вычислим дискретную функцию корреляции вектора $\mathbf{s}_m$ и векторов, соответствующих другим k . Модуль этой функции после усреднения по индексу n обозначим как $|R_k|$:

$$|R_k| = \left| \frac{\sum_{n=0}^{N-1} s_{n,m} s_{n,k}^*}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} |s_{n,m}|^2 \sum_{n=0}^{N-1} |s_{n,k}|^2}} \right|, \quad (2.2)$$

где $k = k_m^{\max} \pm 1, k_m^{\max} \pm 2, \dots$. Модуль функции корреляции принимает значения от 0 до 1 и может быть использован для принятия решения о принадлежности спектральных составляющих сигнала с индексом k сигналу с индексом m на основе превышения порога. Величина порога выбирается эмпирически и при работе ПАК была выбрана равной 0.4. В случае превышения порога к матрице $\mathbf{S}_m$ прибавляется матрица автокорреляции $\mathbf{S}_k = \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H$, соответствующая сигналу $\mathbf{s}_k = \{s_{n,k}\}^T$. Поскольку шумы не коррелируют, при сложении ранг матрицы $\mathbf{S}_m$ увеличивается на единицу. Приведённая процедура повторяется для оставшихся $m = 1, 2, 3, \dots$ локальных максимумов состоятельной оценки СПМ (2.1), однако из рассмотрения исключаются, во-первых, спектральные отсчёты уже обработанных сигналов, во-вторых, те отсчёты, средняя СПМ которых ниже уровня шума. Таким образом, на этом шаге формируется M эрмитовых автокорреляционных матриц $\mathbf{S}_m$ размером $N \times N$, усреднённых по полосе частот, занимаемой парциальным сигналом с индексом m .

Далее выполняются аналогичные действия по уточнению количества сигналов, но уже в пространственной области. На этом шаге по формуле (2.3) вычисляются функции взаимной корреляции для всех $\mathbf{S}_m$, и их модули сравниваются с порогом. При превышении порога матрицы $\mathbf{S}_{m_1}, \mathbf{S}_{m_2}$ складываются, и количество обнаруженных сигналов уменьшается на 1. Процедура повторяется, пока все модули функций корреляции не окажутся меньше порога, из чего будет следовать, что коррелированных матриц в выборке не осталось.

$$R_{m_1 m_2} = \frac{\left| \sum_{i,j=0}^{N-1} S_{m_1 ij} S_{m_2 ij}^* \right|}{\sqrt{\sum_{i,j=0}^{N-1} S_{m_1 ij} S_{m_1 ij}^* \sum_{i,j=0}^{N-1} S_{m_2 ij} S_{m_2 ij}^*}}. \quad (2.3)$$

Следующим шагом алгоритма является оценка углов прихода рассеянного и прямого радиоизлучения по полученным корреляционным матрицам $\mathbf{S}_m$. Для этой цели предлагается использовать метод Multiple Signal Classification (MUSIC) [31], основанный на разложении $\mathbf{S}_m$ на собственные векторы. Пусть, в соответствии с общепринятым обозначением, λ_n и $\mathbf{W}_n$ есть собственные числа и собственные векторы (СВ) $\mathbf{S}_m$. Тогда $\mathbf{S}_m \mathbf{W}_n = \lambda_n \mathbf{W}_n$ и, при ранжировании по величине λ_n , $N_{\min}$ СВ будут соответствовать сигналам, остальные – шуму. При этом $N_{\min}$ определяется по критерию $\lambda_{N_{\min}} / \lambda_{N-1} < 0.1$.

После нахождения СВ введём систему полярных координат с центром в точке расположения одного из антенных элементов. Остальные элементы решётки будут иметь координаты r_n , α_n . Пусть m -ый сигнал имеет средневзвешенную частоту $\bar{F}_m$. Выберем произвольное пробное направление прихода излучения с угловыми координатами α и ε , для которого можно вычислить комплексный вектор наведения (2.4):

$$\mathbf{V}(\alpha, \varepsilon) = \left\{ \exp(i 2 \pi \bar{F}_m r_n \cos \varepsilon \cos(\alpha_n - \alpha) / c) \right\}^T, \quad (2.4)$$

После этого с помощью собственных векторов корреляционных матриц и вектор-столбца наведения углы прихода (α_m и ε_m) соответствующего сигнала могут быть вычислены как минимум величины цифровой ДН по формуле (2.5).

$$D(\alpha, \varepsilon) = \frac{\sum_{n=0}^{N-N_{\min}-1} |(\mathbf{w}_n^H \mathbf{v})|^2}{\left((N - N_{\min}) |\mathbf{v}|^2 \sum_{n=0}^{N-N_{\min}-1} |\mathbf{w}_n|^2 \right)}. \quad (2.5)$$

Далее, требуется выполнить оценку ДСЧ δf_m и амплитуды E_m m -го сигнала. При несущей частоте сигнала подсвета с амплитудной модуляцией равной F_0 , будут справедливы следующие соотношения:

$$\delta f_m = F_0 - \bar{F}_m, \quad E_m = |\mathbf{v}^T (\alpha_m, \Delta_m) \cdot \mathbf{s}_m|. \quad (2.6)$$

Полученные оценки α_m , ε_m , E_m и δf_m используются для автоматической селекции рассеянных сигналов и оценки траектории.

2.3 Алгоритм автоматической селекции сигналов и оценки траектории по доплеровскому сдвигу частоты и углам прихода рассеянного излучения

Разработанный алгоритм является обобщением приведённого в разделе 1.3. В обобщённой версии для анализа используются точки в пространстве $\{\delta f^t, \alpha^t, \varepsilon^t\}$. Аналогично, между двумя точками i и j дискретного времени t_m и t_n вычисляется расстояние ρ_{ij} :

$$\rho_{ij} = \frac{|\delta f_i^{t_m} - \delta f_j^{t_n}|}{\Delta f} + \frac{|\alpha_i^{t_m} - \alpha_j^{t_n}|}{\Delta \alpha} + \frac{|\varepsilon_i^{t_m} - \varepsilon_j^{t_n}|}{\Delta \varepsilon}, \quad (2.7)$$

где $\delta f_i^{t_m}, \delta f_j^{t_n}$ – значения ДСЧ, $\alpha_i^{t_m}, \alpha_j^{t_n}, \varepsilon_i^{t_m}, \varepsilon_j^{t_n}$ – значения азимута и угла места в моменты времени t_m и t_n , $\Delta f, \Delta \alpha, \Delta \varepsilon$ – нормировочные масштабирующие коэффициенты.

Далее вычисляются минимальные значения ρ_{ij} для каждой пары индексов, они же сравниваются с пороговым значением, и считаются принадлежащими одному треку, если не превышают порог. Процедура преодоления разрывов в трассе полностью аналогична описанной ранее в разделе 1.3.

Результатом выполнения алгоритма являются временные зависимости углов прихода, ДСЧ и амплитуды сигналов, подлежащие дальнейшей фильтрации и оценке координат с помощью УИМ. Фильтрация, аналогично разделу 1.3, проводится по длительности, диапазону изменения частоты и амплитуде. Дополнительным критерием селекции является анализ зависимости азимута от времени – для прямых сигналов он остаётся неизменным, в то время как для рассеянных изменяется плавно.

С целью оценки пространственной траектории воздушных объектов требуется адаптировать процедуру минимизации невязки для учёта углов прихода рассеянного радиоизлучения. Имитационная модель, используемая для обработки данных КВ-радиопеленгатора остаётся той же самой, что описана в разделе 1.5, и основывается на построении эквивалентной лучевой треугольной траектории, однако теперь, благодаря измеренным углам прихода прямой волны, действующая высота ионосферы может уточняться по итогам наклонного зондирования [24].

Введём соответствующие обозначения: $f_t^{(s)}$ – ДСЧ, $E_t^{(s)}$ – амплитуда, $\alpha_t^{(s)}$ – азимут, $\varepsilon_t^{(s)}$ – угол места сигнала в момент времени t , рассеянного воздушным объектом и зарегистрированного с помощью ПАК. Аналогичные обозначения с верхним индексом (M) введём для величин, соответствующих результатам моделирования. Модификация заключается в добавлении к

взвешенной сумме невязок подбираемых величин χ (2.8) двух слагаемых, соответствующих углам прихода рассеянного сигнала. Каждое слагаемое по-прежнему взвешивается масштабирующим коэффициентом $w_f, w_E, w_\alpha, w_\varepsilon$.

$$\begin{aligned} \chi = & w_f \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(f_t^{(M)} - f_t^{(S)} \right)^2} + w_E \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(E_t^{(M)} - E_t^{(S)} \right)^2} + \\ & + w_\alpha \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\alpha_t^{(M)} - \alpha_t^{(S)} \right)^2} + w_\varepsilon \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\varepsilon_t^{(M)} - \varepsilon_t^{(S)} \right)^2} \rightarrow \chi^0. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Величина χ так же минимизируется при помощи МНК и при достижении минимального значения χ^0 процесс оптимизации прекращается. Соответствующие χ^0 входные параметры (векторы начальных координат, скорости и ускорения) используются для расчёта траектории воздушного объекта, и после этого задача считается решённой. Рассмотрим полученные результаты.

2.4 Результаты измерений и моделирования

В этом разделе представлен пример обработки прямых и рассеянных сигналов ШВС в Кашгаре (17650 кГц) от 20 декабря 2022 в 08:16 UT радиопеленгатором с 8-элементной решёткой [35,36]. Дальность вдоль Земной поверхности и азимут источника равны 3017.5 км и 93.5° соответственно. Используя алгоритм автоматической селекции, удаётся выделить трек длительностью около 90 с.

На Рис.2.3 показаны результаты измерения угла прихода рассеянного излучения в азимутальной плоскости после линейной интерполяции в виде штриховой линии чёрного цвета. Базовые точки показаны звёздами. Видно, что угол изменяется в пределах от 42.5° до 5.8° , на основании чего можно констатировать движение с северо-востока на северо-запад. На этом же графике серой сплошной линией показан результат оценки. Серыми точками показаны

маркеры, соответствующие отсчётам временной сетки моделирования. Модуль разницы между изображёнными на графиках зависимостями составляет не более 5° .

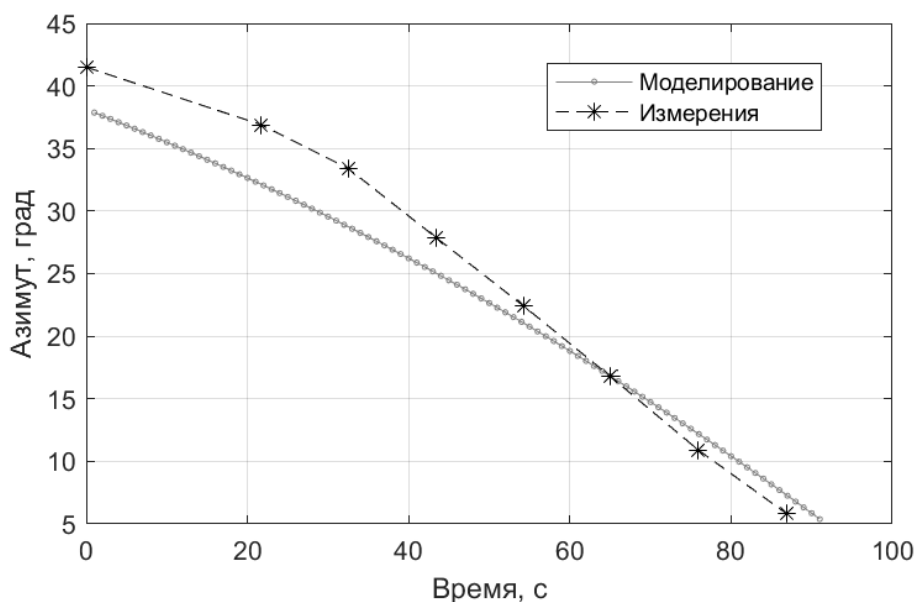


Рис.2.3 Временная зависимость угла прихода рассеянного сигнала в азимутальной плоскости

Перейдём к рассмотрению характеристик ДСЧ, приведённых на Рис.2.4. Для обозначения результатов измерений после линейной интерполяции использована штриховая линия серого цвета. Аналогично, звёздами показаны базовые точки. В процессе движения цели ДСЧ изменяется от -3.4 Гц до -7.6 Гц. Сплошной чёрной кривой с белыми круглыми маркерами показаны результаты моделирования. Модуль разницы между двумя кривыми составляет не более чем 0.2 Гц.

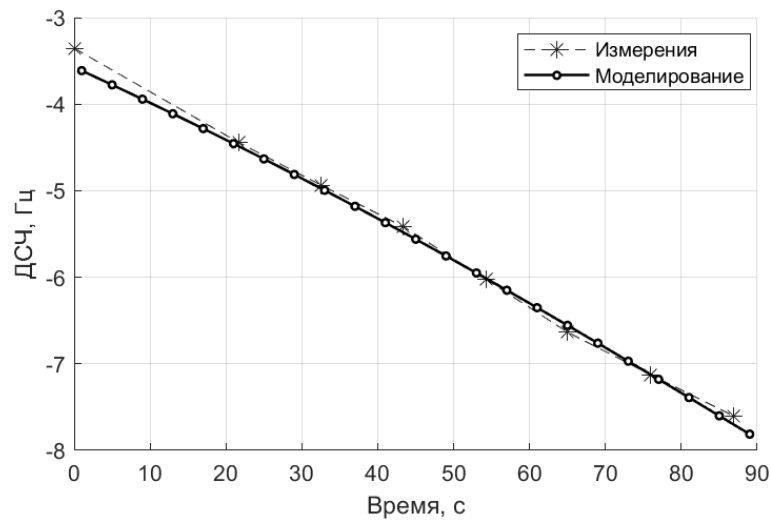


Рис.2.4 Временная зависимость доплеровского сдвига частоты

На Рис.2.5 изображены кривые, соответствующие изменению амплитуды рассеянного сигнала во времени. Для измеренных данных наблюдается характерное неоднократное изменение монотонности и изменение значений в пределах от -107 до -98 дБ. Поскольку в модели варьируется величина ЭПР постоянная во времени, кривая моделирования имеет линейный вид. В то же время, можно говорить о совпадении характера зависимости – и в том, и в другом случае амплитуда со временем возрастает.

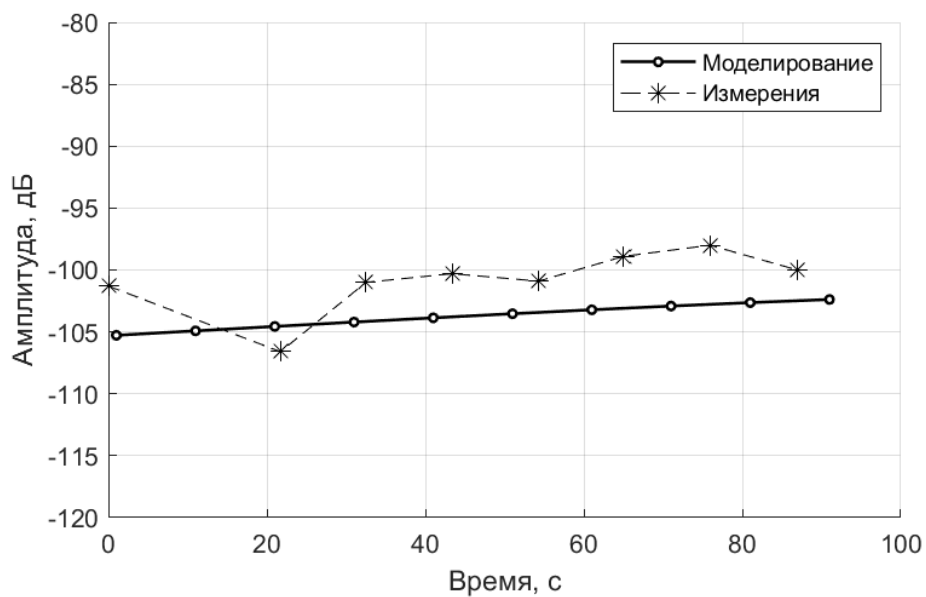


Рис.2.5 Зависимость амплитуды от времени

Нанесем на Рис.2.6 траекторию цели по результатам моделирования с помощью чёрной линии с треугольными маркерами. Полученные оценки сообщают нам, что начальная скорость цели составляла 220 м/с, направление – 267° (на запад), начальная дальность ~ 57 км и высота ~ 8 км.

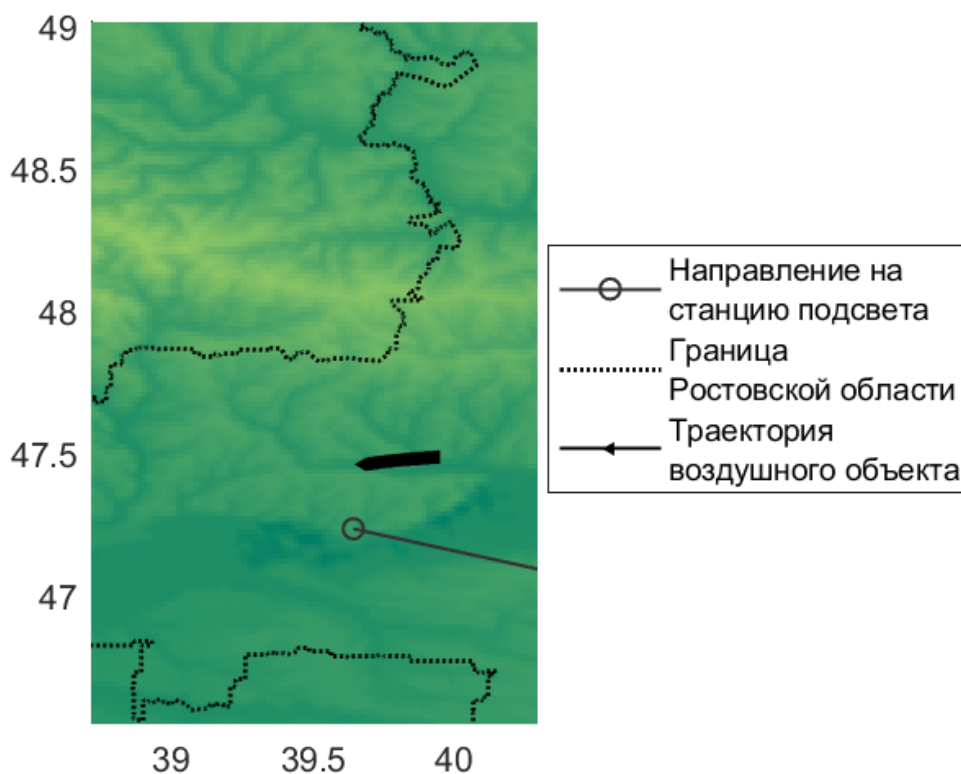


Рис.2.6 Демонстрация результатов на карте

Подведём итоги раздела. Разработанный метод позволяет получать оценки пространственного положения цели в различные моменты времени: координаты, высоту и полный вектор скорости. Проведённый эксперимент показывает возможность обнаружения и сопровождения неустановленного воздушного объекта при указанной конфигурации программно-аппаратного комплекса с 8 элементной антенной решёткой.

Для верификации результатов рассмотрим другой эксперимент, в ходе которого использовалось два аналогичных ПАК на удалении друг от друга.

2.5 Результаты совместных измерений двумя различными КВ-радиопеленгаторами

При постановке эксперимента, направленного на верификацию разработанного метода принимался во внимание тот факт, что интернет-ресурсы для выдачи информации о координатах воздушных объектов требуют знания номера рейса, располагают архивами за ограниченный период времени, не всегда предоставляют достаточно точные данные координат гражданских воздушных судов, и тем более вовсе не содержат данных о военных судах. По этой причине был предложен другой подход к оценке истинной пространственной траектории воздушных целей. Известно, что широкое применение при оценке дальности находит метод триангуляции, для реализации которого требуется два измерительных станда, позволяющих оценивать угловые координаты цели. Так, на расстоянии порядка 20 км от тестируемого КВ-радиопеленгатора (назовём его КВР-1), был развёрнут аналогичный комплекс (КВР-2). Точные координаты места его расположения есть 47.107°С , 39.808°В . После развёртывания двух комплексов с помощью обоих выполнялась непрерывная регистрация рассеянных сигналов, а затем выполнялся поиск воздушных целей, наблюдаемых одновременно с двух приёмных позиций. Полученная в результате триангуляционных измерений траектория воздушной цели считалась истинной, а смоделированная с помощью разработанного метода оценивалась по отношению к ней [37, 56].

В данных от 09.09.2019 в 11:39 UT и в 11:44 UT наблюдались следы рассеяния, которые по триангуляционной оценке соответствовали двум объектам с существенно отличающимися дальностями (обозначим их О-1 и О-2). Отметим также условия, в которых проводился эксперимент: частота излучения подсвета, как и прежде, 17650 кГц, а индекс активности ионосферы $K_p \leq 4$. Длительность временных интервалов, в течение которых объекты были в зоне видимости, составила 130 и 150 секунд, соответственно. Перейдём к

результатам эксперимента. Все результаты измерений, приведенные на рисунках в этом разделе, соответствуют данным КВР-1.

Начнём рассмотрение с представленной на Рис.2.7 зависимости ДСЧ от времени. Изображенные на рисунках а) и б) ломанные пунктирные линии черного цвета соответствуют результатам измерений. Следует сразу отметить, что графики приведены в разных масштабах, поэтому на правом рисунке зависимость кажется более изрезанной. На самом же деле, отклонения в десятые доли герца от некоторого сглаженного значения могут быть обнаружены и на левой кривой. По всей видимости, они связаны с погрешностями измерения КВР-1, либо обусловлены наличием различных конструктивных элементов (винтов, пропеллеров и проч.), вносящих искажения в состав доплеровского спектра рассеянного сигнала. Сплошной серой линией показаны результаты применения разработанного метода, носящие более гладкий характер из-за простоты геометрии задачи и описываемые соотношением (1.13). Модуль разницы значений кривых составляет не более 2 Гц и 0.6 Гц для О-1 и О-2, соответственно.

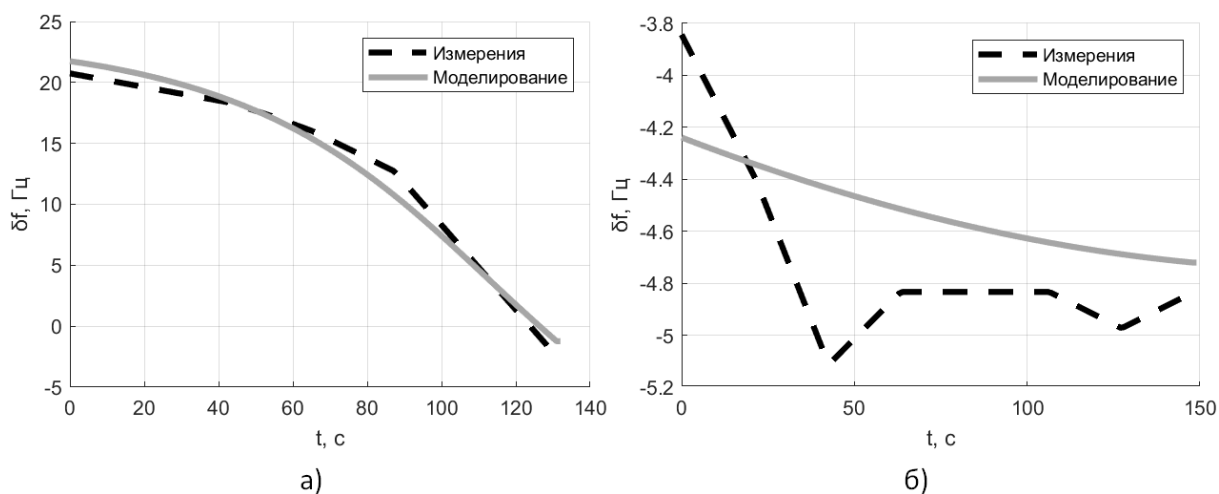


Рис.2.7 Временная зависимость доплеровского сдвига частоты рассеянного сигнала, а) О-1, б) О-2

Продолжим анализ проведённого эксперимента с помощью зависимостей амплитуды рассеянного излучения от времени, представленных на Рис.2.8. Как и во всех предыдущих экспериментах, можно говорить только о совпадении сглаженной зависимости измеренной амплитуды с результатами моделирования, поскольку в модели объекта ЭПР не флуктуирует.

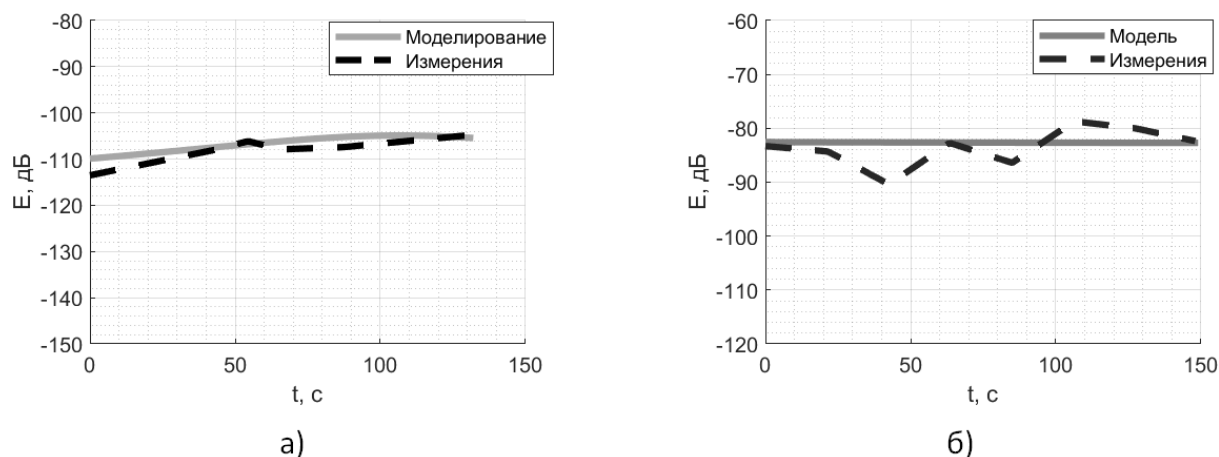


Рис.2.8 Временная зависимость наблюдаемой амплитуды рассеянного сигнала, а) О-1, б) О-2

Далее, будем рассматривать на Рис.2.9 зависимости угловых координат источников рассеянного излучения от времени. Легенда обозначения кривых представлена на каждом из графиков. В случае О-1 азимут лежит в пределах от 256° до 314° , что соответствует направлению движения цели, с северо-запада на северо-восток. Угломестная координата меняется от 21.2° до 41.7° . Для О-2 азимут изменяется от 51.8° до 50° , следовательно, движение направлено с северо-востока на север. Угол места также слабо меняется со временем: от 10.8° до 11.9° .

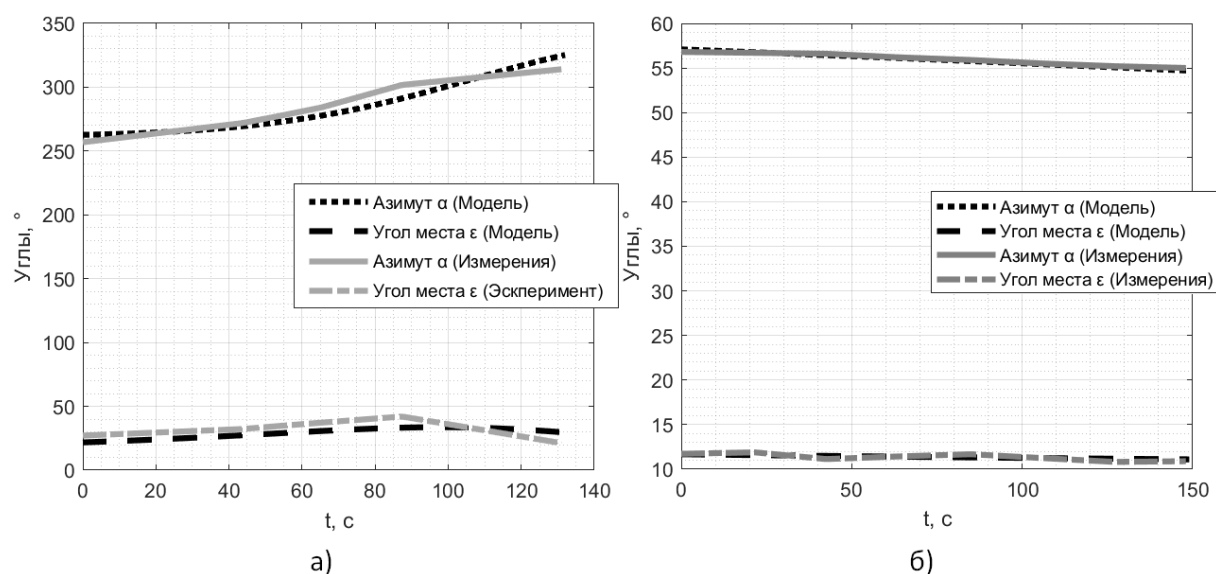


Рис.2.9 Временная зависимость угловых координат рассеянного сигнала от времени, а) О-1, б) О-2

На основании кривых, изображённых на рисунке выше, можно сказать, что модуль разницы значений измеряемых и моделируемых угловых координат составляет не более 9° для О-1 и 0.3° для О-2. Отметим особенно, что величина ошибки по углу для О-2 близка к инструментальной погрешности измерительной аппаратуры (0.2°).

Наконец, на Рис.2.10 отображены зависимости радиальной дальности до целей от времени. Наибольший интерес представляет тот факт, что радиальная дальность О-2 изменяется по результатам моделирования от 384.5 до 389.4 км. Результаты расчёта методом триангуляции обладают при этом большой дисперсией, что неудивительно при удалённости объекта в 20 раз превышающей длину линии базы между КВР-1 и КВР-2. Тем не менее, даже в этом случае, можно сказать, что отличие между результатами расчётов двумя методами составляет не более 15%. Отличие между результатами оценки дальности для О-1 составляет не более 13%.

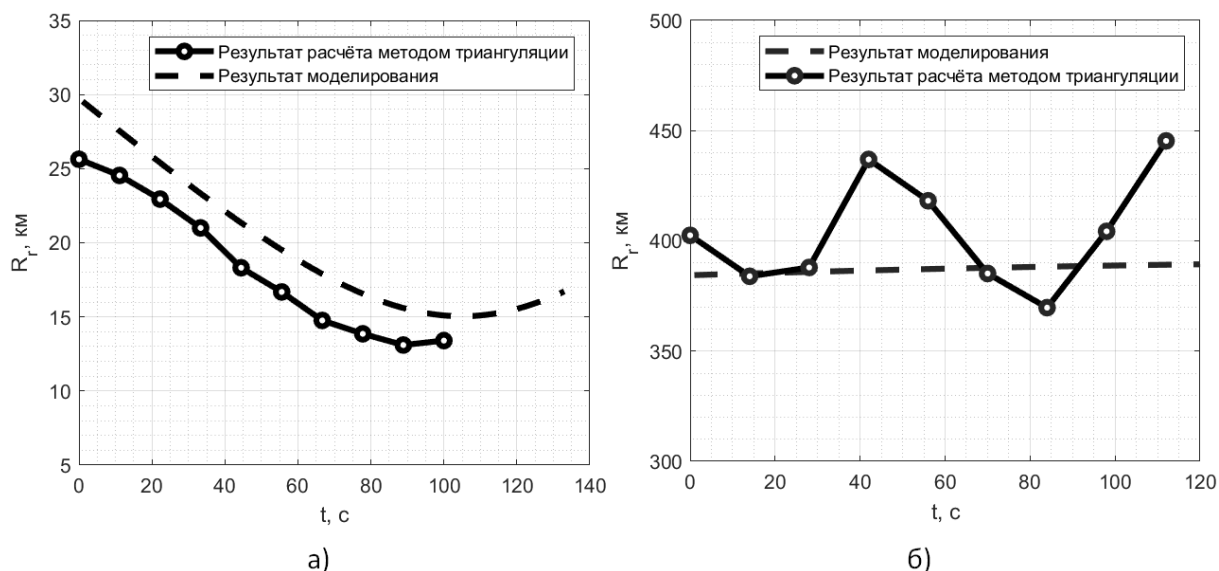
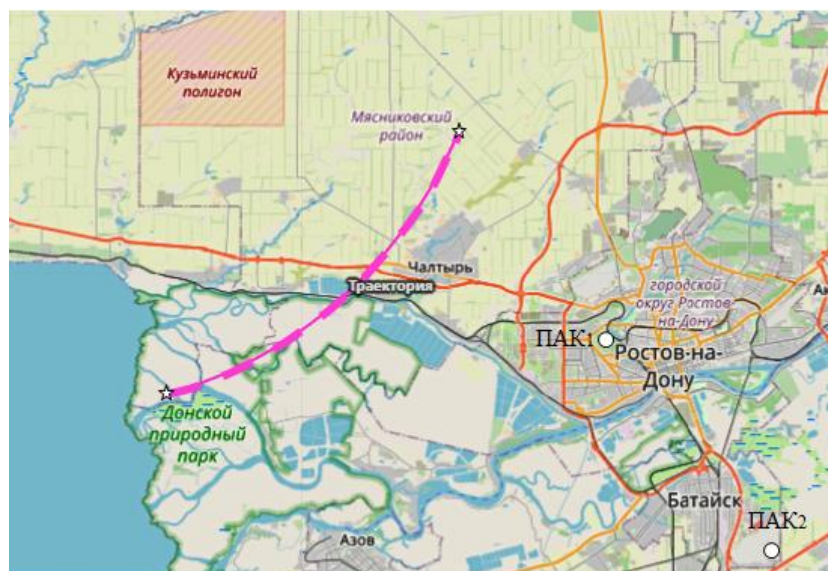


Рис.2.10 Временная зависимость радиальной дальности до наблюдаемого объекта, а) О-1, б) О-2

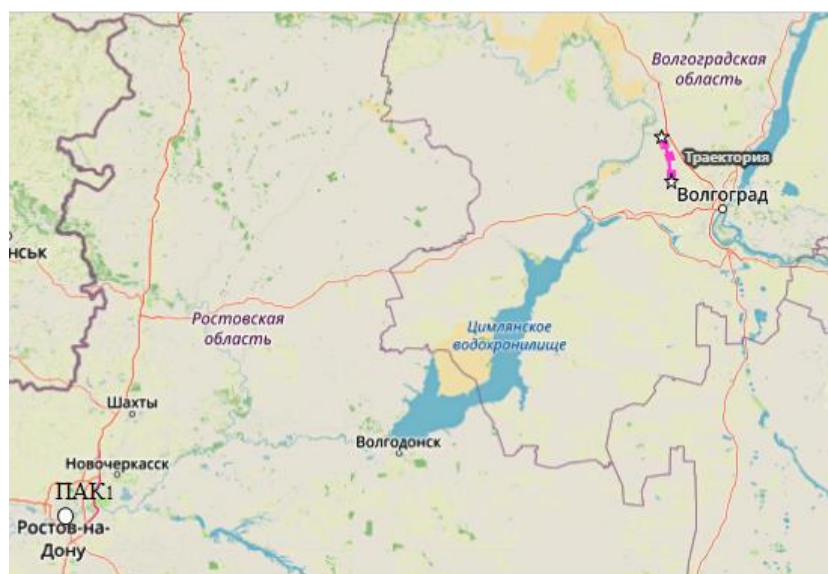
На карте на Рис.2.11 представлены результаты оценок траектории по разработанному методу на географической карте [30].

Обозначим легенду обозначений на рисунке: белые круги с надписями ПАК1 и ПАК2 соответствуют КВР-1 и КВР-2, граничные точки оцененных траекторий показаны белыми звездами. Результаты оценок для О-1 показывают начальную высоту 11.8 км, скорость 200.8 м/с и ускорение 0.49 м/с^2 . Для О-2 результаты соответствующих оценок: высота полёта 79.1 км, скорость 112.3 м/с, ускорение 0.07 м/с^2 . Несмотря на то, что задача классификации воздушной цели не ставилась, можно заметить, что полученные с помощью имитационной модели оценки для О-1 указывают на траекторию, типичную для пассажирских самолётов. Для О-2 никаких выводов сделать нельзя, поскольку движение на указанной высоте обеспечивается с помощью больших скоростей, чем даёт результат оценки. По всей видимости, противоречие обусловлено тем, что точность определения угловых координат при большом расстоянии до цели (дальность порядка 400 км) по отношению к длине базы (менее 20 км) существенно снижается. В результате малое изменение угловых

координат даёт большую ошибку определения координат, а поскольку модуль скорости определяется изменением координат во времени, снижается и точность определения скорости.



а)



б)

Рис.2.11 Оценки траектории объектов, а) О-1, б) О-2

Основным выводом проведенного эксперимента является возможность обнаружения и сопровождения целей в атмосфере однопозиционным ПАК на

дальностях до 400 км (погрешность 13-15%). При этом ПАК имеет относительно небольшие габаритные размеры применительно к КВ-диапазону.

В качестве ещё одного способа верификации приведённых в разделах 1 и 2 методов был предложен эксперимент с синхронными измерениями и обработкой данных ОМДС и КВ-радиопеленгатора.

2.6 Результаты совместных измерений КВ-радиопеленгатором и одноканальным многочастотным доплеровским стендом

В декабре 2010 г. проводились синхронные измерения и запись на внешних записывающих устройствах рассеянных сигналов при помощи ОМДС и КВ-радиопеленгатора [38].

Как было сказано ранее, для обеспечения однозначности при определении координат с помощью ОМДС необходимо использовать два независимых источника подсвета. С этой целью использовались две станции подсвета – в Подмоскowie и в Испании. Обозначим частоты излучения как $f_1 = 9996$ кГц и $f_2 = 21610$ кГц. При этом КВ-радиопеленгатор был настроен на частоту f_2 . Сказанное иллюстрируется с помощью Рис.2.12.

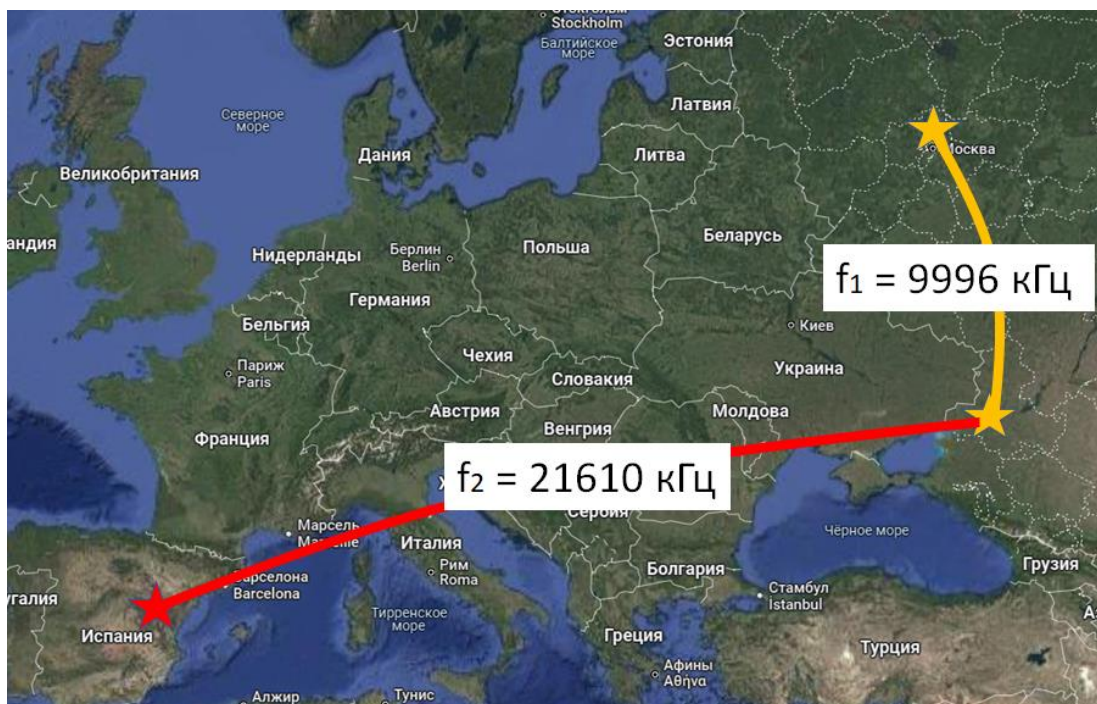


Рис.2.12 Расположение некооперативных станций подсвета и частоты излучения их передатчиков

Рассмотрим сеанс от 14:30 01.12.2010 г. На Рис.2.13 приведены результаты измерений и моделирования зависимостей ДСЧ от времени.

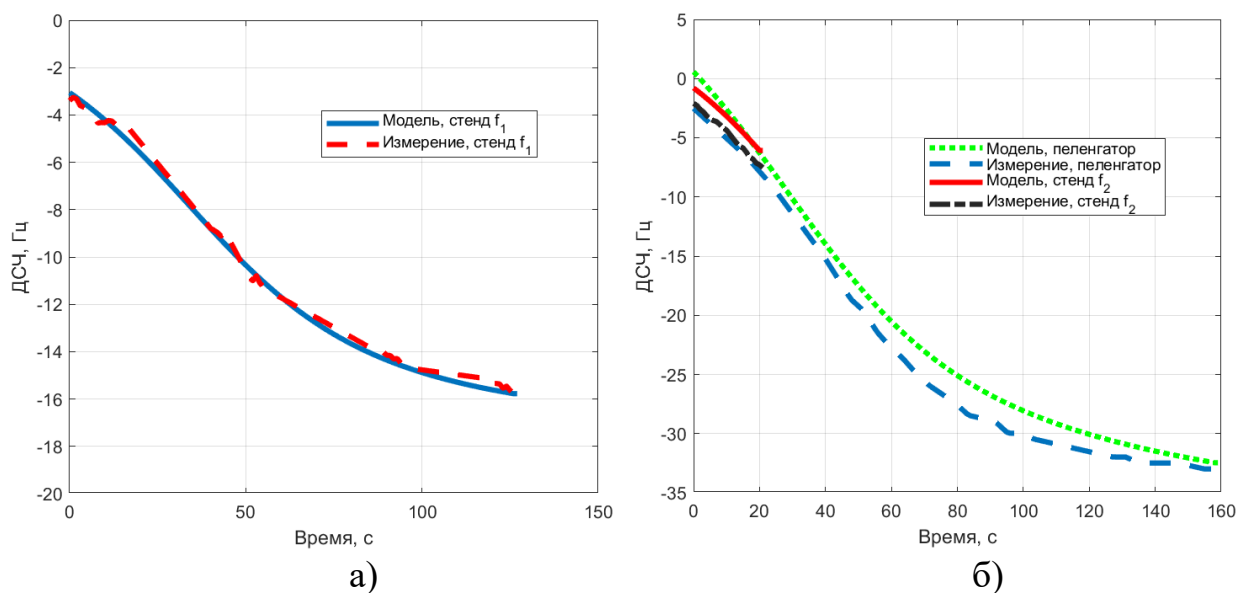


Рис.2.13 Зависимости ДСЧ рассеянных сигналов от времени в интервале наблюдения

Прокомментируем представленные зависимости. На частотах f_1 и f_2 существенно различаются длительности интервалов наблюдения с помощью ОМДС – 125 секунд против 22, тем не менее, такой длительности хватает для построения модели траектории. При этом период, в течение которого объект доступен для наблюдения с помощью КВ-радиопеленгатора, на той же частоте f_2 превышает 150 секунд. Поскольку оба ПАК располагаются в одном и том же географическом положении, предполагается, что малый интервал наблюдения обусловлен зависимостью направленности V-образной антенны ОМДС от частоты. На Рис.2.14 также представлены зависимости от времени амплитуды принимаемых сигналов на двух частотах для обоих ПАК. Согласно приведённым графикам, можно говорить о совпадении зависимостей при условии пренебрежения высокочастотными осцилляциями.

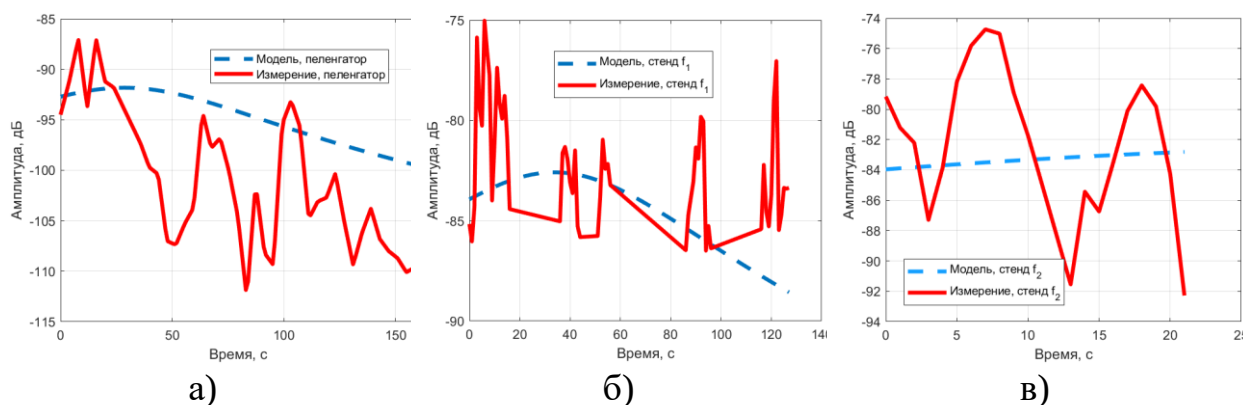


Рис.2.14 Зависимости амплитуд рассеянных сигналов от времени за период наблюдения

Перейдём теперь от характеристик излучения к характеристикам траектории объекта, а именно к показанным на Рис.2.15 зависимостям азимута (а), радиальной дальности (б) и угла места (в). Из представленных кривых можно сделать вывод, что по результатам обработки данных ОМДС дальность до объекта в этом сеансе оказывается меньшей, чем по результатам обработки данных радиопеленгатора. В то же время предельное отклонение между двумя

методами составляет не более 6 км. Что касается угловых координат, изображённых на Рис.2.15 (а) и (в), можно заключить, что для метода, основанного на измерениях радиопеленгатора, измеренные и расчётные характеристики демонстрируют совпадение по обеим координатам. Поскольку в ОМДС угловые координаты не измеряются, нельзя сделать никаких выводов, кроме того, что абсолютная разность оцениваемых двумя методами углов отличается не более чем на 5° .

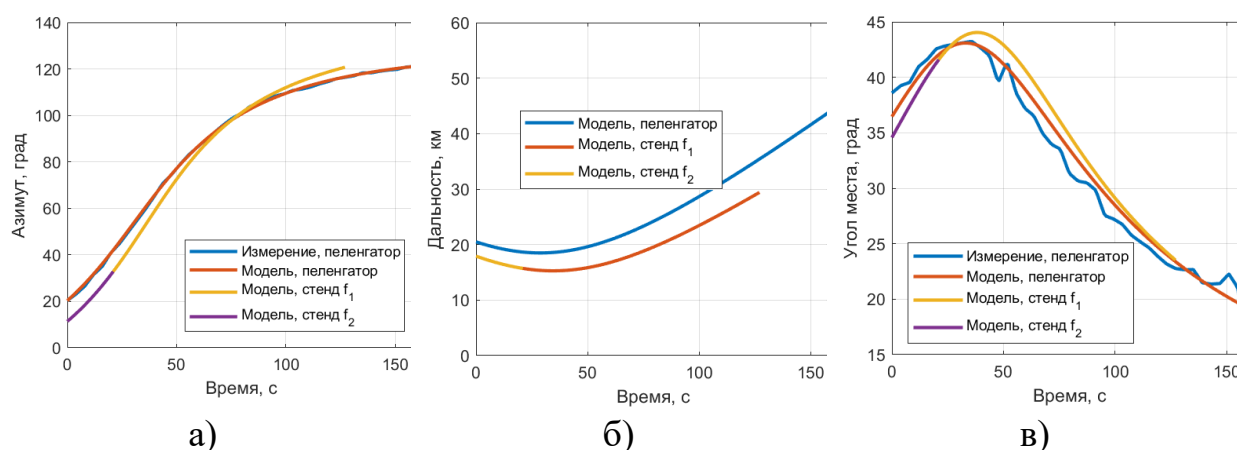


Рис.2.15 Оценки угловых координат (а, в) и дальности (б) воздушной цели

На Рис.2.16 показаны траектории объекта на карте [30], соответствующие двум предложенным радиолокационным методам, причём красной штриховой кривой нанесены результаты по ОМДС, а синей сплошной – обозначены результаты траекторного оценивания по данным КВ-радиопеленгатора. Белый круг с синим контуром показывает местоположение лаборатории, в которой находятся оба программно-аппаратных комплекса.

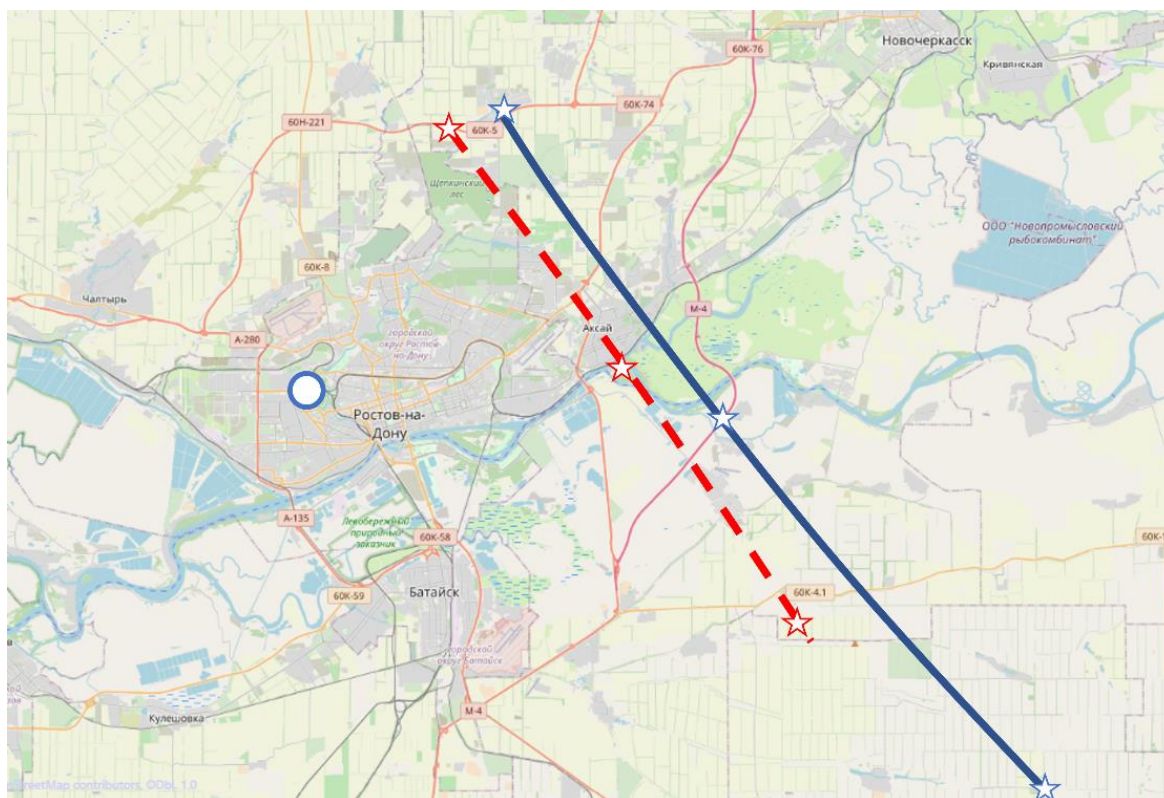


Рис.2.16 Географическая карта с результатами оценки траектории

Таким образом, выполненные синхронно эксперименты, направленные на обнаружение и оценивание траектории одной и той же воздушной цели с применением двух описанных ранее методов, основанных в одном случае на применении ОМДС и анализе спектрограмм, а в другом на применении КВ-радиопеленгатора и анализе облака точек в пространстве измеряемых характеристик, подтверждают работоспособность каждого из предложенных методов. Как показывает сравнительный анализ, применённый к данным наблюдения движущегося на юго-восток объекта на расстоянии до 45 км от местоположения приёмной станции, максимум абсолютной разности оцениваемых координат между двумя способами составляет не более 5° по угловым координатам и 6 км по дальности. Полученные результаты доказывают возможность оценки пространственной траектории на основе измерения ДСЧ на нескольких частотах или совместного измерения ДСЧ и угловых координат рассеянного излучения.

2.7 Выводы

Представлено подробное описание программно-аппаратного комплекса – радиопеленгатора КВ-диапазона, включающего в свой состав антенную решётку в режиме приёма, многоканальное радиоприёмное устройство, многоканальный АЦП и ПЭВМ для первичной обработки сигналов. Радиопеленгатор использован для регистрации прямого и рассеянного излучения некооперативных широковещательных станций и станции точного времени РВМ. Приведено описание процедуры первичной обработки регистрируемых данных, которая основана на поиске парциальных сигналов с пространственной и частотной корреляцией и оценке угловых координат путём обработки собственных векторов (MUSIC).

Предложен модифицированный алгоритм селекции рассеянных и прямых сигналов, основанный на выделении и фильтрации временных треков путём нахождения точек с минимальным расстоянием в многомерном пространстве {доплеровский сдвиг частоты – азимут – угол места}. Приведённый подход к фильтрации временных треков основывается на анализе характера временных зависимостей ДСЧ, углов прихода и амплитуды.

Адаптирован алгоритм минимизации невязок между измеренными значениями временных зависимостей и полученными в результате применения упрощённой имитационной модели с целью учёта углов прихода рассеянного излучения. Адаптация достигается путём добавления соответствующих слагаемых в минимизируемую функцию в результате чего становится возможным на основе модели получать оценки траекторий воздушных объектов.

Представлены результаты обнаружения воздушных объектов при помощи предложенного метода на примере проведённого эксперимента с 8-канальным радиопеленгатором, развёрнутым в условиях городской застройки на площадке 40х40 м. Показана принципиальная возможность обнаружения объектов на дальности порядка 60 км от пункта приёма.

Проведена серия экспериментов, позволяющая верифицировать предложенные методы обнаружения и оценки координат при помощи КВ-радиопеленгатора и одноканального многочастотного доплеровского стенда. Проверка работоспособности предложенного метода проведена на основе данных триангуляционного определения местоположения двух воздушных целей на удалении около 380 км и менее 20 км, и показала точность не хуже 15%. Для получения данных триангуляции использовался второй ПАК, аналогичный первому и удалённый на 19 км от него.

Проведенные эксперименты с синхронными измерениями одноканальным многочастотным доплеровским стендом и КВ-радиопеленгатором, в ходе которых получены близкие оценки пространственных траекторий воздушных объектов, также подтверждают работоспособность обоих предложенных методов.

3 МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА ПО ВРЕМЕННЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ ЗАДЕРЖКИ И УГЛОВ ПРИХОДА РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

3.1 Постановка задачи

Известно, что использование частотно-модулированных и фазоманипулированных сигналов в радиолокации позволяет повысить чувствительность системы благодаря оптимальной фильтрации, направленной на максимизацию отношения сигнал/шум. Следовательно, применение таких сигналов для подсвета воздушных объектов, движущихся в атмосфере Земли, позволяет увеличить дальность обнаружения по сравнению с описанными ранее методами. В Южном федеральном университете был разработан программно-аппаратный комплекс – ЛЧМ-ионозонд радиопеленгатор (ЛЧМ ИР), обеспечивающий измерение дистанционно-частотных (ДЧХ), угло-частотных (УЧХ) и амплитудно-частотных (АЧХ) характеристик парциальных волн в зоне приёма [39,40]. Для оценки пространственных координат была также разработана динамическая адаптивная структурно-физическая (ДАСФ) модель ионосферного радиоканала [51]. ДАСФ-модель подразумевает решение задачи Коши для лучевых уравнений, полученных в приближении геометрической оптики. Несмотря на то, что в результате становится возможным достоверно определять местоположение источника рассеянного излучения, этот способ обладает высокой вычислительной ёмкостью и не пригоден для реализации в режиме реального времени.

Сформулируем решаемую в этой главе задачу.

Имеется ПАК, выполняющий регистрацию и первичную обработку рассеянных движущимися объектами сигналов. Результатами первичной обработки данных комплекса являются ионограммы НЗ, представимые в виде точек многомерного пространства {время – задержка – амплитуда – азимут – угол места}.

На первом шаге, в получаемых ионограммах требуется выполнить автоматическое выделение рассеянного и прямого сигнала с помощью модифицированного алгоритма. Таким образом, будут получены временные зависимости азимута, угла места, задержки и амплитуды волн, соответствующих прямым и рассеянными сигналам.

На втором шаге с помощью соответствующего способа необходимо выполнить оценку координат движущегося воздушного объекта на основе полученных зависимостей. В связи с этим требуется скорректировать имитационную модель и алгоритм минимизации невязки с учётом относительного времени задержки между сигналами источника рассеяния и подсвечивающего передатчика.

Наконец, следует выполнить сравнение результатов, полученных при помощи разработанного подхода и полученных ранее с помощью ДАСФ-модели ионосферной волны.

3.2 Описание ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора и алгоритма первичной обработки данных

Рассмотрим принцип действия ЛЧМ ИР, используемого в качестве ПАК реализации метода обнаружения и оценки координат воздушных объектов по задержке и углам прихода рассеиваемого ими излучения. ЛЧМ ИР состоит из следующих основных функциональных узлов: приёмная антенная система, многоканальное когерентное широкополосное РПУ, когерентные модули цифровой обработки, синтезатор и разветвитель тактовой частоты, рубидиевый стандарт частоты, калибровочный генератор широкополосного шумоподобного сигнала, приёмник GPS и ПЭВМ для первичной обработки принятых сигналов. На Рис.3.1 представлена блок-схема варианта [39] построения ЛЧМ ИР. Следует отметить, что ЛЧМ ИР реализован на основе описанного выше КВ-радиопеленгатора, и в ходе проведённых экспериментов эти два ПАК фактически представляли собой единое устройство, способное

функционировать в различных режимах и располагавшееся в лаборатории «Сигнал» Южного федерального университета в точке с координатами (47.239°С, 39.642°В). Рассмотрим более подробно элементы блок-схемы.

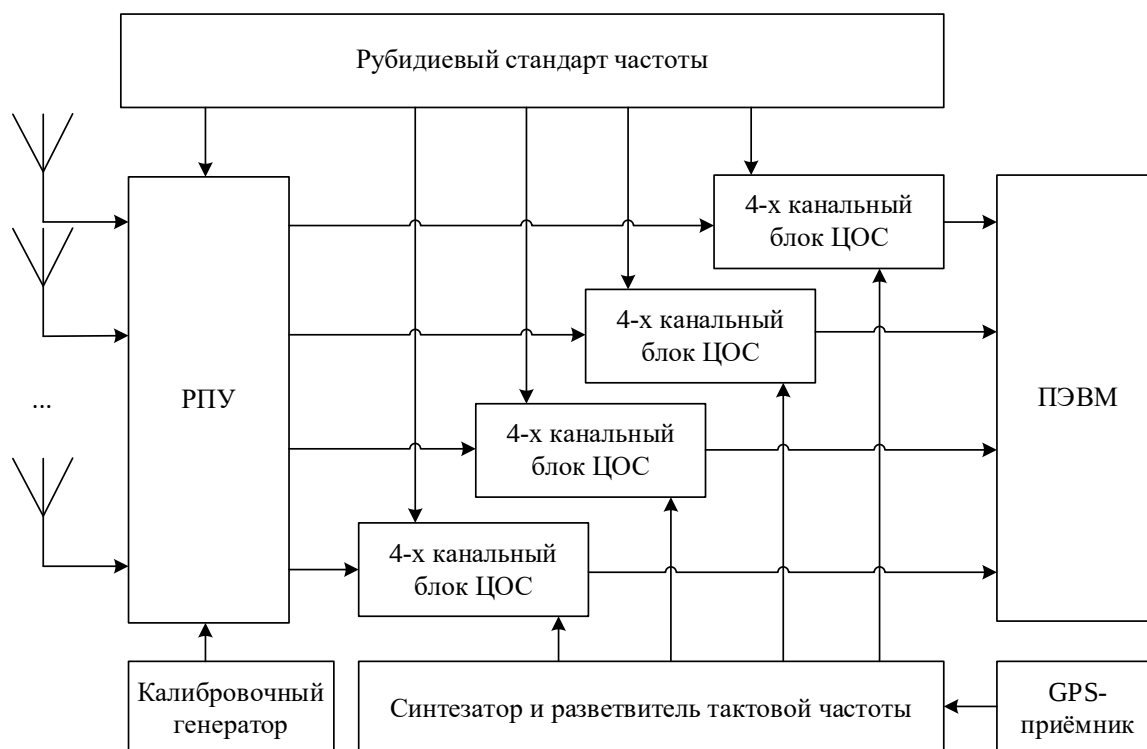


Рис.3.1 Блок-схема ЛЧМ ИР

Антенная система ЛЧМ ИР представляет собой решётку из N активных штыревых антенн высотой 2.5 м, каждая из которых подключена непосредственно к одному из каналов приёмника. Антенная решётка развёрнута на участке площадью не менее 80х80 м.

РПУ из состава ЛЧМ ИР совпадает с описанным в разделе 2.2, с той особенностью, что частота настройки приёмника изменяется синхронно с частотой излучения передатчика f_u . Так, при выходе f_u за пределы полосы приёма, происходит автоматическое скачкообразное изменение частотной полосы вверх на половину её ширины.

Ключевым отличием этого ПАК, по отношению к описанному в разделе 2.2, является наличие специализированных блоков цифровой обработки

сигналов (ЦОС). Сигнал с каждого выходного канала РПУ попадает на вход блока, в котором выполняется аналогово-цифровое преобразование с частотой 16 МГц, когерентная ЛЧМ-фильтрация с мгновенной шириной полосы 10 кГц и перестройкой частоты до 1 МГц в секунду. Выходная частота дискретизации блока для квадратурных компонент разностного сигнала составляет 20 кГц.

GPS-приёмник из состава ЛЧМ ИР предназначен для временной синхронизации ПАК по секундной метке, которая подаётся на вход синтезатора тактовой частоты. В результате, синтезатор и разветвитель тактовой частоты обеспечивает когерентность блоков цифровой обработки. Рубидиевый стандарт FS725 формирует опорную частоту 10 МГц, используемую в приёмниках и блоках цифровой обработки. Калибровочный генератор предназначен для предварительной калибровки каналов РПУ. Управление ПАК и первичная обработка сигналов для извлечения информационных параметров выполняется в ПЭВМ, представляющей собой многоядерный компьютер с установленным многопоточным программным обеспечением.

В основу ЛЧМ ИР положено свойство разностного сигнала, состоящее в том, что величина амплитуды и фазы локальных максимумов его СПМ напрямую связаны с амплитудой и фазой поля парциальных лучей, суперпозиция которых принимается антенной [41]. Обозначим как $\mathbf{r}_n$ радиус-вектор элемента антенной решётки. Расположение прочих элементов решётки будет даваться разностью $\Delta\mathbf{r}_{nk} = \mathbf{r}_n - \mathbf{r}_k$. Введём также характеристики для j -го парциального луча: $\mathbf{k}_j$ – волновой вектор и λ_j – длину волны. Углы его прихода будут равны ε_j и α_j . Будем рассматривать разностный сигнал, полученный в результате приёма n -м антенным элементом и согласованной фильтрации. Его начальная фаза Ψ_{jn} будет определяться, очевидно, местоположением антенного элемента и собственной начальной фазой Ψ_{j0} луча (3.1):

$$\begin{aligned}\Psi_{jn} &= \Psi_{j0} + \mathbf{k}_j \mathbf{r}_n, \\ \mathbf{k}_j &= \frac{2\pi}{\lambda_j} (-\cos \varepsilon_j \cdot \sin \alpha_j, -\cos \varepsilon_j \cdot \cos \alpha_j, -\sin \varepsilon_j),\end{aligned}\tag{3.1}$$

Разность фаз $\Delta\Psi_{jnk}$ сигналов двух различных антенных элементов, при этом, определяется исключительно ориентацией ранее введённого вектора их взаимного расположения:

$$\Delta\Psi_{jnk} = \Psi_{jn} - \Psi_{jk} = \mathbf{k}_j \Delta\mathbf{r}_{nk}.\tag{3.2}$$

В процессе оптимальной обработки сигналов с широкой полосой интерференционное поле разлагается на составляющие лучи по их групповой задержке [42-43]. Таким образом, можно получить массив измеренных фазовых сдвигов между парциальными лучами, которые не подвержены интерференционным погрешностям, неизбежно вызывающих ошибки в определении угловых координат источника излучения [44,45].

Пусть многоканальный АЦП оцифровывает выборку длиной M сигнала, соответствующего каждому антенному элементу, на промежуточной частоте с частотой дискретизации f_d . Период дискретизации Δt в этом случае, очевидно, равен $1/f_d$. Оценка углов прихода будет проводиться на дискретной частотной сетке f_l с равномерным шагом, где номер элемента $l = 0, \dots, L-1$ сетки соответствует частоте, которая равна $f_l = f_{\min} + \mu_0 \Delta t M l$. Здесь μ_0 - скорость перестройки частоты. Будем считать антенную решётку плоской, при этом не накладывая строгих требований к расстоянию между элементами, тогда радиус-вектор n -го антенного элемента можно записать, как $\mathbf{r}_n = (r_n \cos \alpha_n, r_n \sin \alpha_n)$, а фазу наводимого на нём ЛЧМ-сигнала для j -го луча:

$$\Psi_{jnl} = 2\pi f_l (\cos \varepsilon_j \cdot \sin \alpha_j, \cos \varepsilon_j \cdot \cos \alpha_j) \mathbf{r}_n / c. \quad (3.3)$$

Введём обозначение для измеренных разностей фаз – Φ_{jnl} . Согласно [40], алгоритм определения углов прихода j -го луча в двух плоскостях по измеренным Φ_{jnl} на частоте f_l состоит в нахождении главного максимума модуля комплексной ДН $D_{jl}(\alpha, \varepsilon)$:

$$|D_{jl}(\alpha, \varepsilon)| = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp \left\{ i \left[\Phi_{jnl} - \frac{2\pi}{c} f_l r_n \cos \varepsilon \cos(\alpha - \alpha_n) \right] \right\} \right|, \quad (3.4)$$

поскольку при значениях углов α и ε соответствующим направлению прихода j -го луча модуль достигает максимального значения $|D_{jl}(\alpha, \varepsilon)| = 1$.

Процедура регистрации, первичной и вторичной обработки рассеянного сигнала проиллюстрирована на Рис.3.2. Сплошными линиями показаны этапы, относящиеся к алгоритму первичной обработки сигнала ЛЧМ ИР, реализованному в ПЭВМ.



Рис.3.2 Алгоритм обработки данных ЛЧМ ИР

Перед началом работы ЛЧМ ИР выполняется предварительная калибровка каналов РПУ с помощью генератора шума, которая состоит из следующих шагов. Выполняется запись последовательностей цифровых отсчётов и БПФ длиной 2^m . В результате получают комплексную матрицу спектральных отсчётов $s_{n,k}, n = 0, \dots, N-1, k = 0, \dots, 2^m-1$. Один из N каналов произвольно выбирается в качестве опорного ($n=0$) и вычисляются матрицы $M_{n,k} = s_{0,k} / s_{n,k}$ для калибровки АЧХ каналов.

Затем весь КВ-диапазон разбивается на поддиапазоны шириной от 0.5 до 1 МГц. Приёмник настраивается на центральную частоту первого поддиапазона. В момент начала излучения станции подсвета GPS-приёмник выдаёт на синтезатор частоты секундную метку. Запускается процедура оцифровки всех каналов на ПЧ приёмника, синхронная с частотой передатчика перестройка ЛЧМ-фильтров и регистрация IQ компонент принимаемого сигнала. Как только частота настройки фильтра достигает края первого поддиапазона, выдаётся аппаратное прерывание блока ЦОС, приёмник и ЛЧМ-фильтр настраиваются на следующий поддиапазон. Процедура непрерывно повторяется для всех поддиапазонов – полоса частот приёмника перестраивается дискретно с шагом, равным ширине поддиапазона, а частота узкополосного фильтра изменяется непрерывно в полосе частот приёмника. В результате последовательно оцифровывается полный сигнал передатчика.

Синхронно со вводом комплексного разностного сигнала, при накоплении установленной длины выборки, для каждого канала выполняется БПФ для получения матрицы спектральных отсчётов $s_{n,k}$. Именно здесь алгоритм обращается к полученным ранее калибровочным матрицам, в результате чего $s_{n,k}$ заменяется на $\tilde{s}_{n,k} = s_{n,k} M_{n,k}$. Далее из скорректированных статистически независимых спектральных матриц получают состоятельную оценку СПМ принятых сигналов и СПМ шума, аналогично тому, как это описано в разделе 2.2.

Аналогично выполняется и следующий шаг – обнаружение парциальных сигналов, определение их АФР и объединение тех из них, которые превышают заданный порог для коэффициента корреляции в пространственной и частотной областях.

Заключительным шагом алгоритма первичной обработки данных является оценка двумерных угловых координат прихода каждого обнаруженного луча по измеренным АФР принятых парциальных сигналов посредством максимизации цифровой ДН, сформированной по правилу (3.4), и проверка критерия достоверности полученной оценки. С этой целью формулу (3.4) приводят к виду:

$$D_{jl} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(\Delta\Phi_{jnl}) + i \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin(\Delta\Phi_{jnl}) \equiv \langle \cos(\Delta\Phi_{jl}) \rangle + i \langle \sin(\Delta\Phi_{jl}) \rangle, \quad (3.5)$$

где $\Delta\Phi_{jnl}$ – отклонение измеренной разности фаз Φ_{jnl} от теоретической Ψ_{jnl} для плоской волны в точке расположения n -ого антенного элемента. В выражении выше величины $\langle \cos(\Delta\Phi_{jl}) \rangle$ и $\langle \sin(\Delta\Phi_{jl}) \rangle$ есть тригонометрические функции случайных отклонений пространственной разности фаз, усреднённые по пространственному индексу. Сформулируем, наконец, критерий оценки качества алгоритма нахождения углов прихода. Величина СКО $\Delta\Phi_{jnl}$, по статистической теории угловых измерений [46], может быть записана в следующем виде:

$$\sigma_{jl} = \sqrt{-2 \ln \sqrt{\langle \cos(\Delta\Phi_{jl}) \rangle^2 + \langle \sin(\Delta\Phi_{jl}) \rangle^2}} = \sqrt{-2 \ln |D_{jl}|} \quad (3.6)$$

Малость этой величины является необходимым условием достоверности полученных значений азимута и угла места.

В результате выполнения алгоритма первичной обработки на внешнем запоминающем устройстве сохраняются ДЧХ, УЧХ, АЧХ зарегистрированных сигналов, именуемые многомерными ионограммами. Далее выполняется автоматическая селекция рассеянного и прямого излучения аналогично тому, как это описано в разделах 1.3 и 2.3.

По автоматически выделенным рассеянными следам далее выполняется процедура восстановления пространственной траектории воздушного объекта с применением структурно-физического или упрощённого имитационного моделирования.

Эксперименты с ЛЧМ ИР проводились с 2011 по 2020 гг. на полигоне лаборатории «Сигнал» Южного федерального университета с географическими координатами 47.239° С, 39.642° В. В качестве некооперативного источника подсвечивающего ЛЧМ-излучения была использована загоризонтная радиолокационная станция (ЗГРЛС) «Плутон II». Координаты станции известны из открытых источников. Она расположена на острове Кипр в точке с координатами $(35.167^{\circ}$ С, 33.383° В). Дальность до местоположения приёмного пункта составляет 1498 км, азимут – 203° . Известен также и режим излучения: частоты – 8-32 МГц, период повторения излучения – 5 мин, скорость перестройки – 100 кГц/с. Данные, принимаемые ЛЧМ ИР, регистрировались непрерывно и круглосуточно, в результате чего в течение месяца получалось порядка 80 тыс. многомерных ионограмм.

3.3 Динамическая адаптивная структурно-физическая модель распространения ионосферных волн

Обозначим исходные положения, на основе которых была построена ДАСФ-модель [51]. Прежде всего, суммарное поле в точке приёма определяется полем конечного набора лучей, количество и параметры которых определяются глобальными и среднемасштабными характеристиками ионосферы. Для мелкомасштабных неоднородностей применяются статистические

методы. Перемещения среднemasштабных возмущений и глобальной неоднородности соответствуют нестационарной среде, определяют динамику интерференционного поля и представляются гармоническими волновыми путями. Мат-модель среды есть мультипликативная модель пространственного распределения ионизации. Интерференционное поле ищется на основе решения системы уравнений [47] класса Гамильтона-Якоби [48]. Эта система представляет собой уравнения эйконала в виде дисперсионного соотношения (3.7), с учётом вектора магнитного поля Земли $\mathbf{H}$. Приближение геометрической оптики обосновано медленным изменением среды по сравнению с параметрами сигнала. В выражении (3.7) использованы следующие обозначения: n – комплексный показатель преломления Эпплтона (1.7), $\mathbf{x}$ и t – пространственные и временная координаты, $\mathbf{k}$ – волновой вектор, ω – круговая частота.

$$f(t, \omega, \mathbf{x}, \mathbf{k}) = \kappa^2 - \kappa_0^2 n^2(t, \omega, \mathbf{x}, \mathbf{k}, \mathbf{H}) \quad (3.7)$$

Построение физической модели канала на основе обозначенных положений сопряжено с определением значения электронной концентрации как функции координат и времени, и, кроме того, с выбором способа нахождения интерференционного поля в точке приёма. Первая задача решается с применением динамически адаптирующейся модели, основанной на эмпирической модели IRI [49,50]. Для решения второй задачи требуются траекторные и энергетические параметры коротких волн, которые наиболее эффективно могут быть рассчитаны методом характеристик [51]. В канонической форме система характеристических уравнений для (3.7) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{d\mathbf{x}}{d\tau} &= \mathbf{\kappa} - \frac{\kappa_0^2}{2} \frac{dn^2}{d\mathbf{\kappa}}; \\
\frac{d\mathbf{\kappa}}{d\tau} &= \frac{\kappa_0^2}{2} \frac{dn^2}{d\mathbf{x}}; \\
\frac{d\omega}{d\tau} &= -\frac{\kappa_0^2}{2} \frac{dn^2}{dt}; \\
\frac{dt}{d\tau} &= \frac{1}{2c^2} \frac{d(\omega^2 n^2)}{d\omega},
\end{aligned} \tag{3.8}$$

где c – скорость света, а τ – растущий вдоль луча параметр. При дальнейшей работе над системой уравнений (3.8) выполняются следующие преобразования. Во-первых, вследствие слабого влияния на траекторию луча учёта столкновения в ионосферной плазме, комплексный показатель преломления n заменяют его действительной частью μ . Во-вторых, вместо времени t используют групповой путь $P' = ct$, а вместо κ – безразмерный вектор волновой нормали $\mathbf{k} = \mathbf{\kappa} / \kappa_0$. В-третьих, вследствие квазистационарности ионосферной плазмы первые шесть уравнений в (3.8) рассматриваются независимо от остальных. В-четвёртых, полагают, что геомагнитное поле постоянно. Наконец, переходят в систему криволинейных координат $\{r, \theta, \varphi\}$, в которой система характеристических уравнений с учётом анизотропии, неоднородности и нестационарности ионосферы принимает вид:

$$\begin{aligned}
\frac{dr}{d\tau} &= k_r - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_r}; \\
\frac{d\theta}{d\tau} &= \frac{1}{r} (k_\theta - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_\theta}); \\
\frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{r \sin \theta} (k_\varphi - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_\varphi}); \\
\frac{dk_r}{d\tau} &= \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial r} + k_\theta \frac{d\theta}{d\tau} + k_\varphi \sin \theta \frac{d\varphi}{d\tau}; \\
\frac{dk_\theta}{d\tau} &= \frac{1}{r} (\frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial \theta} - k_\theta \frac{dr}{d\tau} + r k_\varphi \cos \theta \frac{d\varphi}{d\tau}); \\
\frac{dk_\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{r \sin \theta} (\frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial \varphi} - k_\varphi \sin \theta \frac{dr}{d\tau} - r k_\theta \cos \theta \frac{d\varphi}{d\tau}).
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Для учёта геомагнитного поля Земли используется аналитическое представление компонент **H**-вектора, полученное через модель IRI путём аппроксимации эмпирических данных. В результате в любой пространственной точке помимо компонент вектора **H** (h_r, h_θ, h_φ) и их пространственных производных можно также вычислить гирочастоту электронов f_h , магнитное наклонение I и магнитное склонение D . Окончательно, расширенная система лучевых уравнений запишется следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{dx_i}{dP'} &= \frac{dx_i}{d\tau} / N; \\
\frac{dk_i}{dP'} &= \frac{dk_i}{d\tau} / N; \\
\frac{d}{dP'} \frac{\partial x_i}{\partial \xi} &= (\frac{d}{d\tau} \frac{\partial x_i}{\partial \xi} - \frac{dx_i}{dP'} \frac{\partial N}{\partial \xi}) / N; \\
\frac{d}{dP'} \frac{\partial k_i}{\partial \xi} &= (\frac{d}{d\tau} \frac{\partial k_i}{\partial \xi} - \frac{dk_i}{dP'} \frac{\partial N}{\partial \xi}) / N,
\end{aligned} \tag{3.10}$$

где ξ – лучевые координаты, P' – групповой путь.

Для решения системы необходимо сформулировать начальные условия – начальные значения фазовых координат луча. Для этого предполагается, что

волна испускается из точки на поверхности Земли с заданными координатами и под известными углами. При этом, поскольку волна распространяется без рефракции в области пространства от поверхности Земли до высоты входа в ионосферу, начальные условия задачи формулируются в точке входа в ионосферу. Результатом решения лучевых уравнений с учётом начальных условий в ДАСФ-модели являются лучевые траектории, соответствующие прямым и рассеянным ионосферным волнам.

Перейдём к рассмотрению практических результатов применения ДАСФ-модели [53].

3.4 Результаты обработки экспериментальных данных посредством динамической адаптивной структурно-физической модели

Прежде всего приведём на Рис.3.3 пример полученной с помощью ЛЧМ ИР многомерной ионограммы НЗ от 07:35 UT 04.06.2020 г. На угло-частотных характеристиках (ν) и (γ) из общей массы точек выделяется рассеянный след движущегося объекта. Такой вывод позволяет сделать изменение угла места с 40° до 60° и обратно, а также азимута с 80° до 200° при изменении частоты, отложенной по оси абсцисс, с 12 до 24 МГц. Очевидно, что, благодаря линейному закону изменения частоты подсвечивающего излучения, указанным частотным характеристикам в точности соответствуют временные зависимости. Именно они используются для принятия решения о наличии или отсутствии на ионограмме следов объектов, движущихся в атмосфере Земли.

Представленный на Рис.3.3 (а) пример ДЧХ является типовым в том смысле, что рассеянный сигнал обнаруживается только при наличии прямого сигнала, отражённого от E_s слоя, которому соответствует горизонтальная линия со значением задержки около 4.8 мс. Следует признать, что наличие E_s слоя, по-видимому, необходимо для работоспособности метода на указанной трассе распространения радиоволн при низкой солнечной активности.

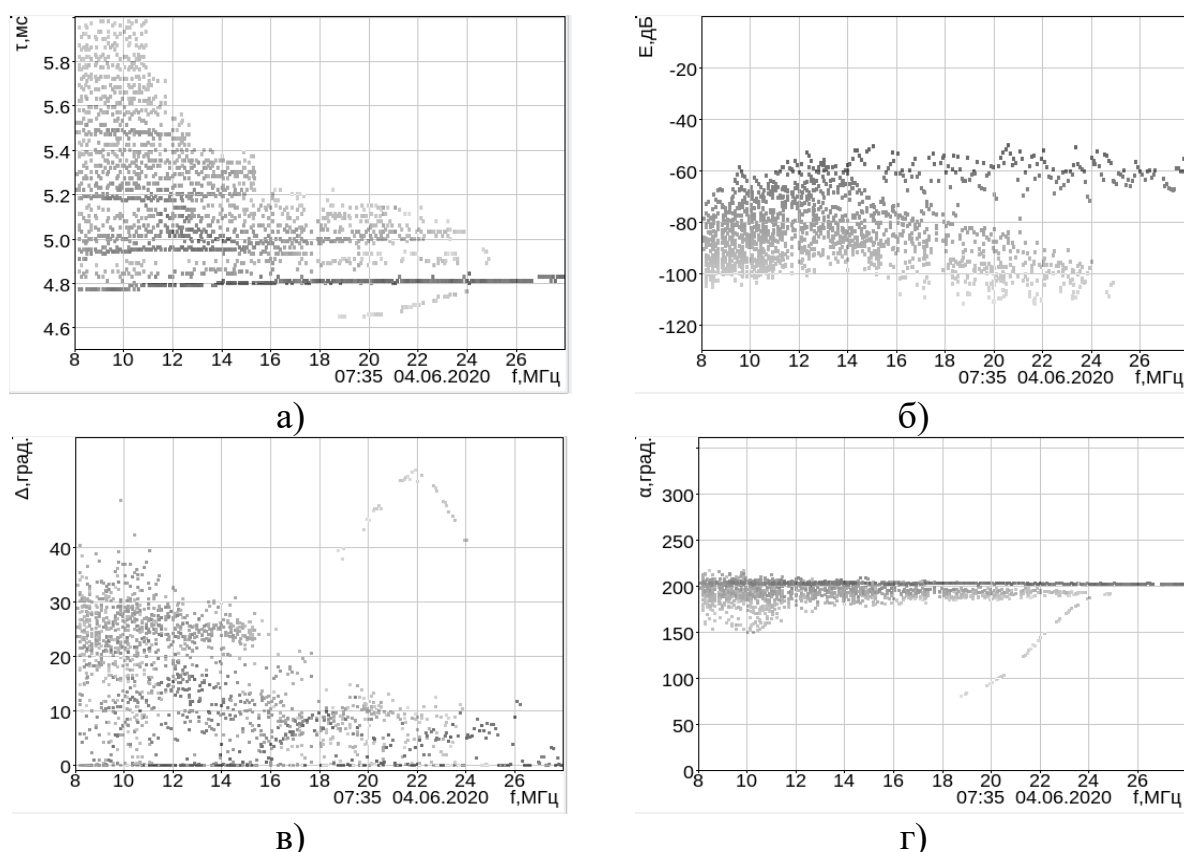


Рис.3.3. Типовая многомерная ионограмма со следами воздушного объекта:

а) ДЧХ, б) АЧХ, в) угломестная УЧХ и г) азимутальная УЧХ.

На частотах более 15 МГц, как показывает обработка большого массива имеющихся измерений (с 2011 по 2019 гг.) с помощью ДАСФ-модели, декаметровые волны при отражении от других слоёв ионосферы не достигают места расположения ПАК. Начальная частота, на которой воздушный объект становится доступен для наблюдения, не превышает 12 МГц. В связи с этим большая часть сеансов, содержащих следы рассеяния воздушных объектов, приходится на летний период года, характерный для появления E_s слоя. На Рис.3.4 представлены некоторые примеры ионограмм из упомянутого массива. Все они представляют интерес вследствие наличия на них рассеянных следов одного (а,б,г) или нескольких (в) воздушных объектов. Амплитуда рассеянных сигналов составляет от -40 до -60 дБ по отношению к прямому сигналу подсвета спорадического слоя.

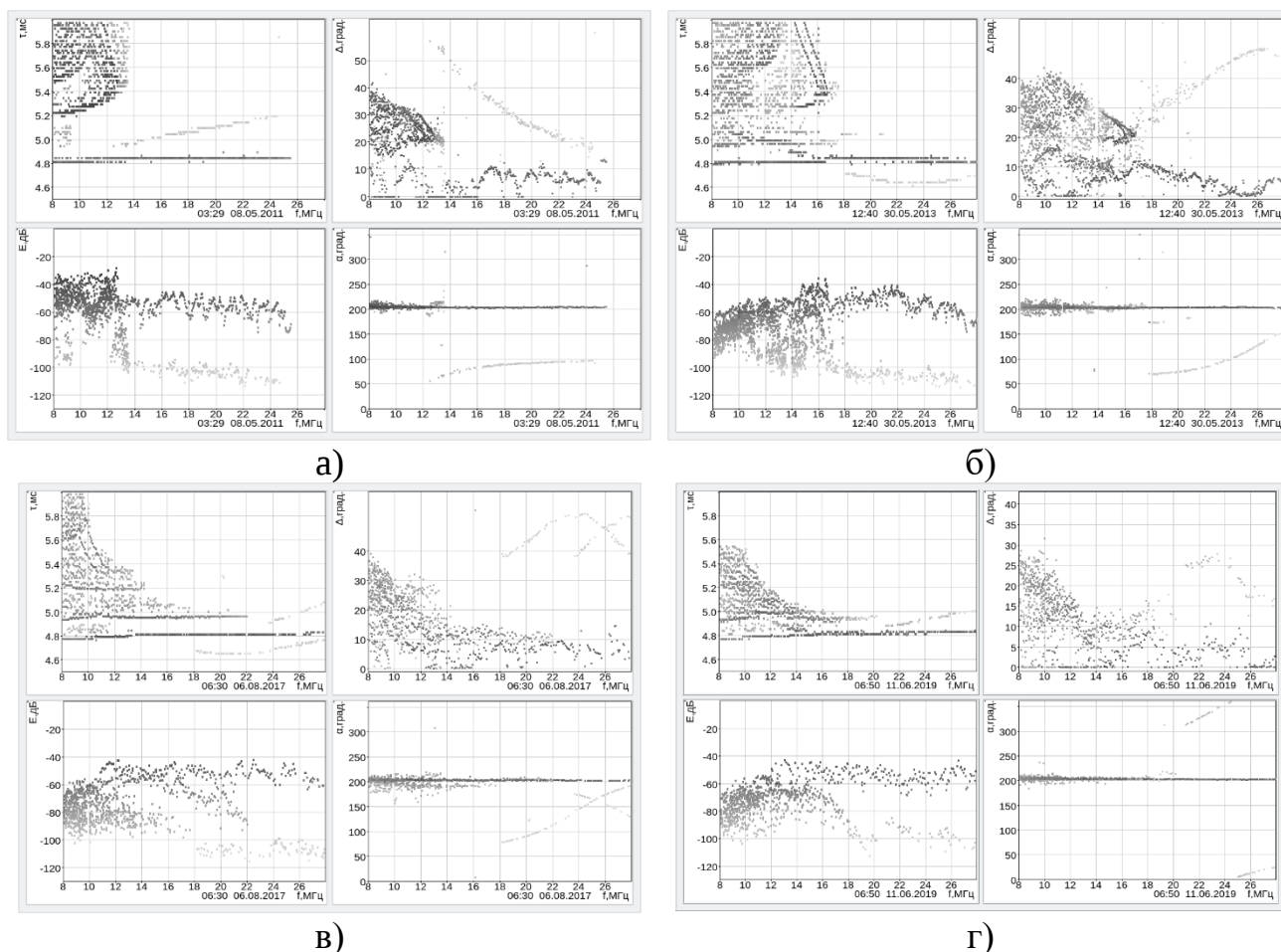


Рис.3.4. Примеры многомерных ионограмм, содержащих рассеянные следы воздушных объектов и полученных с 2011 по 2019 гг.

Наиболее важным выводом из приведенных ДЧХ для каждой ионограммы является возможность разделения всех сигналов на две группы по знаку разности групповых задержек рассеянной волны от воздушного объекта и прямой волны подсвета. Так, на рисунке выше случаям (б) и (в) соответствуют объекты первой группы с положительным знаком разности, в то время как в случаях (а), (в) и (г) наблюдаются следы второй группы – с отрицательной разностью. Для интерпретации полученных результатов было применено специально разработанное программное обеспечение [52] на основе ДАСФ-модели ионосферного канала.

Процедура моделирования представляла собой следующую последовательность действий:

1. На основе модели IRI-2016 задавалось распределение электронной концентрации в пространстве. С помощью ДАСФ-модели, в соответствии с описанием в разделе 3.3, решалась граничная задача, и вычислялись максимальные применимые частоты (МПЧ) распространения прямой ионосферной волны на трассе «Плутон II – ЛЧМ ИР». На этой же трассе на МПЧ моделировались все возможные лучевые траектории при отражении от каждого слоя ионосферы (E , E_s , F_1 , F_2). Критические частоты и высоты ионосферных слоёв затем корректировались так, чтобы минимизировать невязку между наблюдаемыми в сеансе и моделируемыми МПЧ трассы, ДЧХ и УЧХ. Таким образом, выполнялась адаптация ионосферной модели к измеренным характеристикам. С учётом адаптации далее решалась граничная задача на тех частотах, на которых в этом сеансе обнаруживался рассеянный сигнал. Основным результатом, достигаемым на этом шаге, являлся расчёт углов излучения, углов прихода и групповых задержек для каждой моды i . Обозначим их как $\eta^{(i,s)}$, $\xi^{(i,s)}$ и $\tau^{(i,s)}$, соответственно.

2. По измеренному углу места и азимуту направления прихода рассеянного излучения $\varepsilon^{(m)}$ и $\alpha^{(m)}$, а также по пробной дальности до объекта S_o вычислялись географические координаты воздушного объекта – широта φ_o и долгота λ_o . С добавлением пробной высоты h_o , взаимное расположение передатчика «Плутон II» с координатами φ_{TX} , λ_{TX} , приёмника (ЛЧМ ИР) с координатами φ_{RX} , λ_{RX} , и движущегося пробного объекта становилось однозначно определено. Для конкретного пробного расположения решались затем две граничные задачи, соответствующие распространению радиоволны от источника до объекта и от объекта до приёмника. В результате вычислялись углы излучения $\eta_{TX}^{(i,s)}$ и $\eta_o^{(i,s)}$, углы прихода $\xi_o^{(i,s)}$ и $\xi_{RX}^{(i,s)}$ и суммарные задержки $\tau_o^{(i,s)}$ для всех возможных лучевых траекторий i .

3. После решения граничных задач требовалось вычислить относительные задержки рассеянного сигнала для каждой моды. Наблюдаемые в

результатах измерений относительные задержки обозначим $\Delta\tau^{(i,m)} = \tau_o^{(m)} - \tau^{(i,m)}$, а моделируемые $\Delta\tau^{(i,s)} = \tau_o^{(i,s)} - \tau^{(i,s)}$. Далее выполнялось сравнение моделируемых величин с наблюдаемыми: задержек $\Delta\tau^{(i,s)}$ с $\Delta\tau^{(i,m)}$ и углов прихода $\xi_{RX}^{(i,s)}$ с $\varepsilon^{(m)}$. Если для какого-либо i разница углов прихода χ_ε по модулю не превышала 2° , и разница относительных задержек χ_τ по модулю не превышала 3 мкс, считалось, что задача определения координат объекта (φ_o , λ_o , h_o) решена. В противном случае процедура повторялась для других пробных дальностей и пробных высот на равномерной сетке с шагом 500 м. Если не удавалось найти такую дальность и высоту, при которой χ_ε и χ_τ не превышали бы указанные пороги, принималось решение, что для заданного мгновенного значения частоты излучения наблюдать рассеянный сигнал невозможно.

Как показали результаты решения уравнений характеристик, во всех сеансах группы 1 волна на трассе передатчик-объект распространяется двухскачковой модой. Подсвечивающее излучение направлено при этом по нисходящей траектории. В то же время, во всех сеансах группы 2 наблюдается распространение волны односкачковой модой, в результате чего воздушный объект освещается снизу по восходящей траектории. Оказывается, что в ряде случаев наблюдаемый объект движется со скоростью, кратной скорости звука. Рассмотрим пример траекторий объектов обеих групп.

Обратимся к приведённому выше Рис.3.4. (в). Он соответствует данным измерений от 06:30 06.08.2017 г. В это время было зафиксировано два движущихся объекта, различных по знаку относительной задержки. В соответствии с описанной выше процедурой было проведено моделирование траектории, результаты которого нанесены на карту [30] на Рис.3.5. Один из объектов, с меньшей задержкой относительно прямой моды 1Es, двигался со скоростью ~ 158 м/с на удалении от 10 км до 12 км – рисунок (а). Результат

моделирования траектории объекта группы 2 показывает оценку скорости ~ 2193 м/с и радиальной дальности, изменяющейся от 80 км до 130 км – рисунок (б).

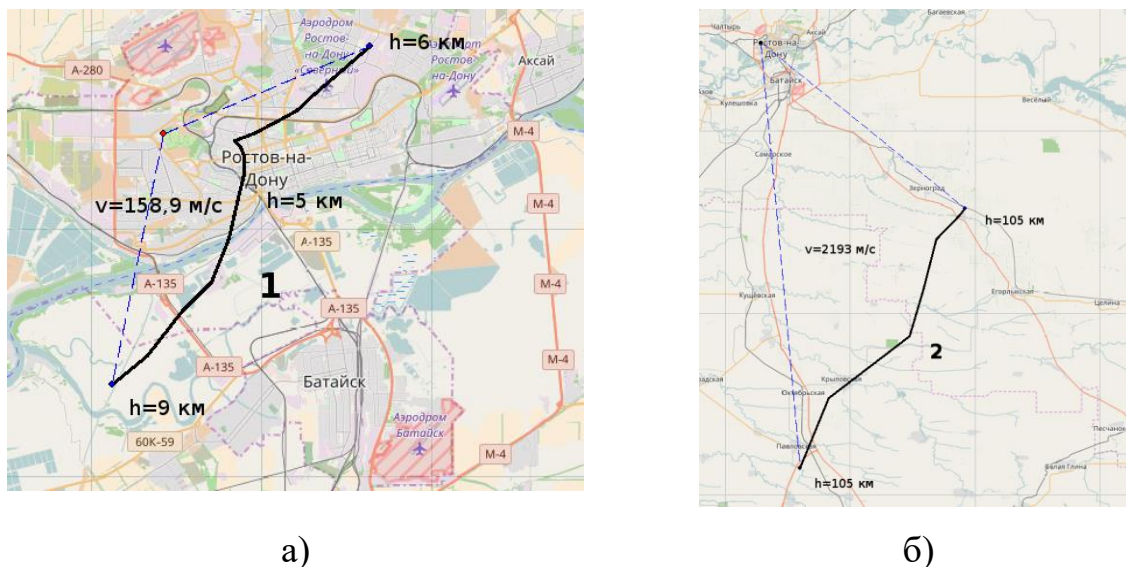


Рис.3.5. Результаты применения ДАСФ-модели к сеансу 06:30 06.08.2017 г., обозначенные на карте Ростовской области

Ключевым выводом в данном разделе является тот факт, что по знаку разности групповой задержки между рассеянным и прямым сигналом можно разбить на две группы все потенциально обнаруживаемые воздушные цели. В результате этого могут быть сформулированы априорные гипотезы, положенные в основу упрощённой имитационной модели, позволяющей выполнять пространственно-временную локализацию воздушных объектов в реальном времени.

3.5 Описание упрощённой имитационной модели и результатов её применения

Схематичное изображение траекторий распространения ионосферных волн для группы 1 и группы 2, согласно классификации, введённой в предыдущем разделе представлено на Рис.3.6. Штриховой линией обозначен Es-слой

ионосферы, красной и синей линиями – прямая и рассеянная волна, соответственно. Черным, синим и белым кружками показаны точки расположения источника излучения, воздушного объекта и приёмного пункта. Как видно из Рис.3.6, для группы 1, когда относительная задержка положительна, геометрия задачи не имеет существенных отличий от рассмотренной в предыдущих главах. Для группы 2, напротив, отличие в траектории рассеянной волны требует модификации имеющейся упрощённой модели путём введения второго мнимого источника.

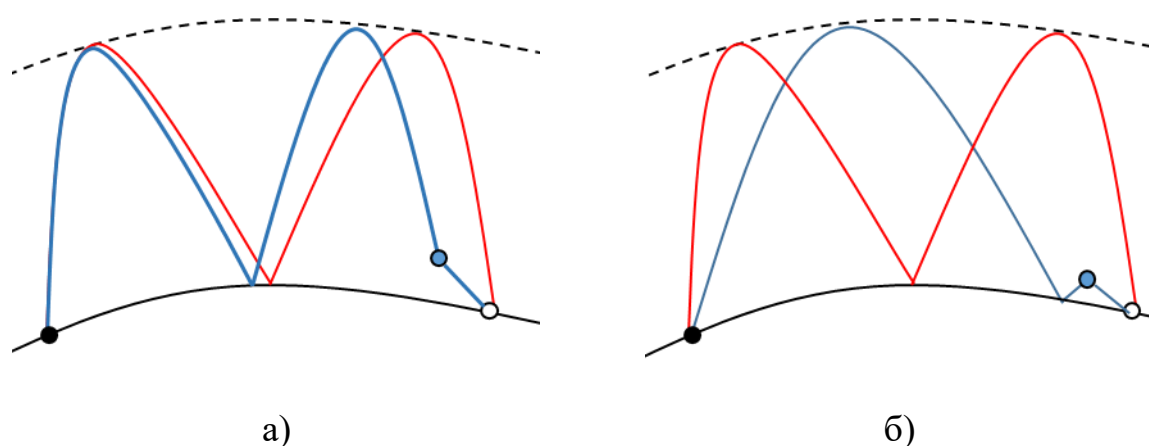


Рис.3.6. Схематичные траектории ионосферных волн, рассеянных объектами группы 1 (а) и группы 2 (б)

Координаты точки C'' расположения мнимого источника рассеянного излучения могут быть получены из элементарных геометрических построений, представленных на Рис.3.7. Точка B расположения некооперативной станции подсвета на Земной поверхности переносится в точку C , лежащую на касательной к поверхности, проведённой в точке A расположения приёмного пункта, при этом длина дуги AB равна длине отрезка AC . Путём отражения отрезков, принадлежащих траектории волны, относительно действующей высоты ионосферы h_d получают мнимые источники волн двухскачковой и односкачковой мод C' и C'' , соответственно.

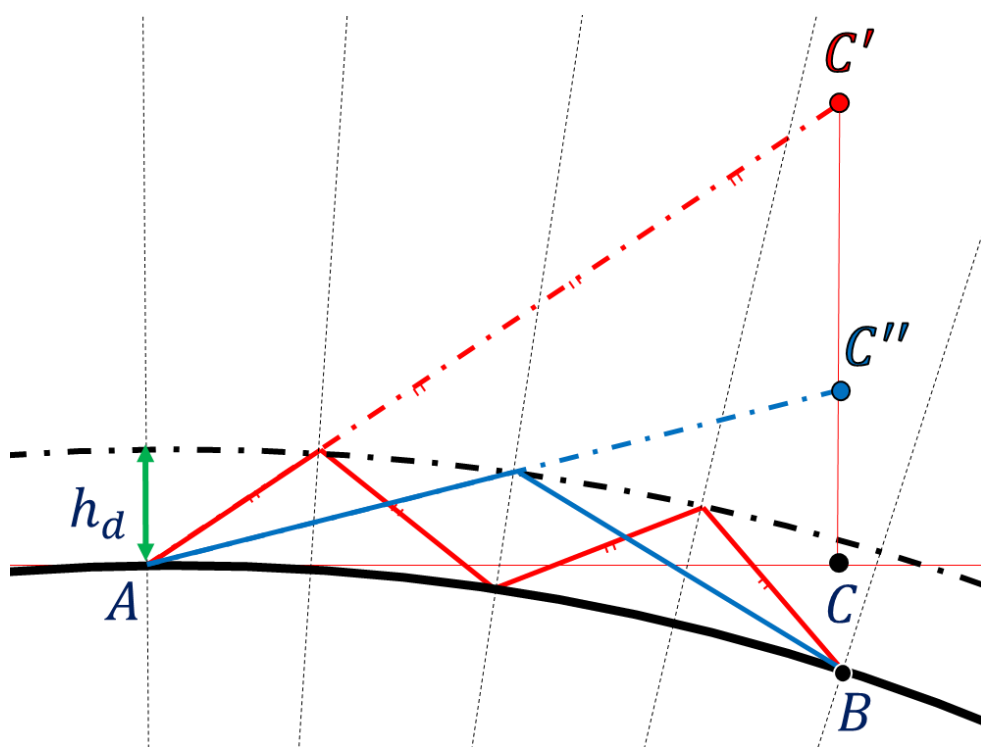


Рис.3.7. Схематичные траектории ионосферных волн, рассеянных объектами группы 1 и группы 2

После автоматического выделения рассеянных следов из ионограмм наклонного зондирования по знаку относительной задержки можно определить, следует ли рассматривать геометрию с совмещенными точками расположения мнимых источников (C') или разнесёнными (C' для прямой волны и C'' для рассеянной). В результате становятся определёнными длины всех отрезков на трассе распространения волны и можно вычислить групповую задержку.

Таким образом, метод определения координат воздушного объекта по временным зависимостям задержки и углов прихода рассеянного излучения с применением упрощённой имитационной модели может быть реализован путём выполнения следующей последовательности действий:

1. С помощью ЛЧМ ИР получают многомерные ионограммы наклонного зондирования.
2. Применяют алгоритм автоматического выделения временных зависимостей измеренных характеристик рассеянной и прямой волны: $\tau_t^{(s)}$ —

задержка, $E_t^{(S)}$ – амплитуда, $\alpha_t^{(S)}$ – азимут, $\varepsilon_t^{(S)}$ – угол места сигнала в момент времени t .

3. На основе знака относительной групповой задержки принимают решение о принадлежности воздушного объекта к группе 1 или 2.

4. В зависимости от группы принадлежности воздушного объекта строят упрощённую имитационную модель с совмещенными или разнесёнными точками расположения мнимых источников.

5. Минимизируют с помощью МНК сумму невязок χ между измеряемыми и моделируемыми временными зависимостями характеристик рассеянного излучения:

$$\begin{aligned} \chi = & w_\tau \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\tau_t^{(M)} - \tau_t^{(S)})^2} + w_E \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (E_t^{(M)} - E_t^{(S)})^2} + \\ & + w_\alpha \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\alpha_t^{(M)} - \alpha_t^{(S)})^2} + w_\varepsilon \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\varepsilon_t^{(M)} - \varepsilon_t^{(S)})^2} \rightarrow \chi^0. \end{aligned} \quad (3.11)$$

6. Соответствующие минимальному значению суммы невязок входные векторы начальных координат, скорости и ускорения используются для расчёта траектории воздушного объекта.

Рассмотрим результаты обработки данных сеанса от 08:35 UT 04.06.2020 г., содержащего след рассеянного излучения воздушного объекта. Выходные данные ЛЧМ ИР, полученные в ходе первичной обработки и очистки ионограмм представлены на Рис.3.8.

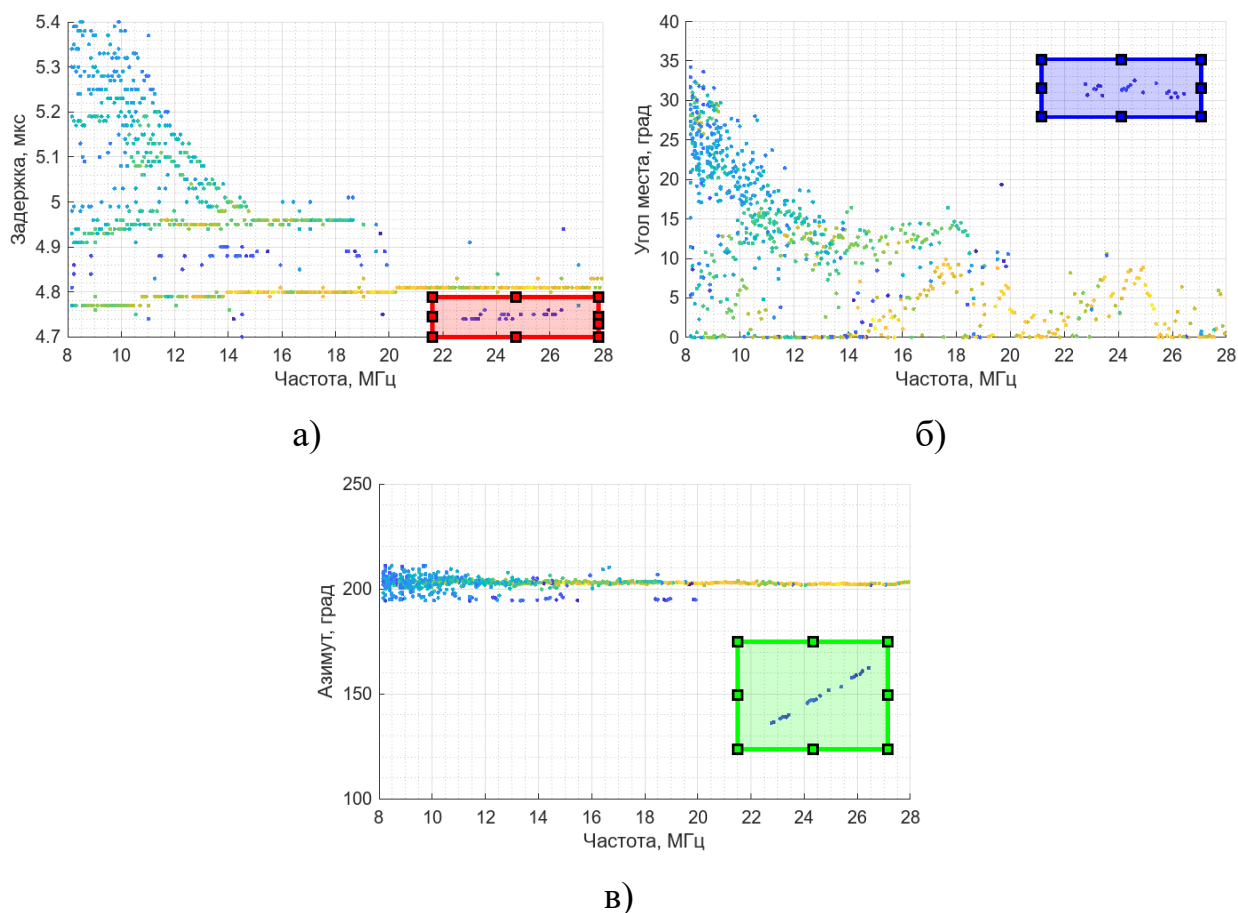


Рис.3.8. Результаты первичной обработки данных: ДЧХ (а) и УЧХ (б,в)

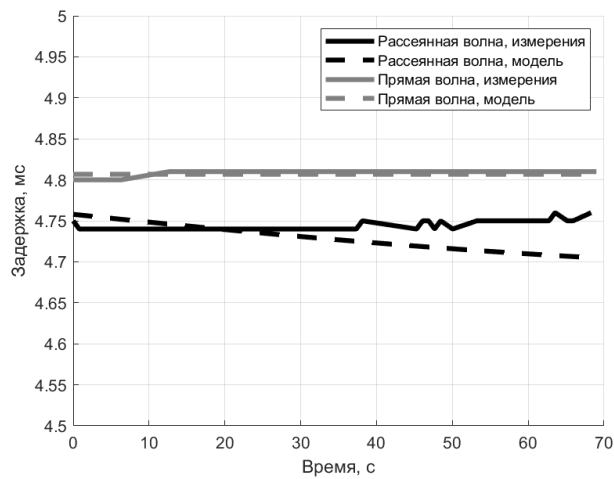
На каждой характеристике прямоугольником обрaмлены точки, автоматически выделенные как принадлежащие пространственно-временному треку рассеянного сигнала. Как видно из рисунка, групповая задержка рассеянного излучения на всём интервале измерения меньше групповой задержки прямой волны и составляет около 4.75 мс, азимут изменяется в пределах 120° - 160° , а угол места в среднем составляет около 30° .

После обработки выделенных следов рассеянного и прямого излучения с применением метода наименьших квадратов были получены оценки начальных координат. Сохраняя обозначения, введённые в разделе 1, представим результаты в виде таблицы:

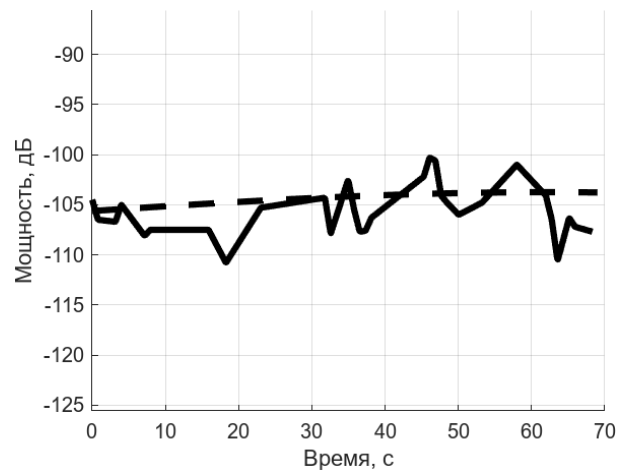
Таблица. 2. Оценки начальных координат, подобранные по временным зависимостям углов прихода и групповой задержки

Параметр	Значение
$\psi, ^\circ$	249.194
$\psi', ^\circ/\text{с}$	0.018
$\theta, ^\circ$	-4.696
$\theta', ^\circ/\text{с}$	0.044
x_0	19.919
$q_0 = y_0, \text{ км}$	-10.905
z_0	11.999
$ v , \text{ м/с}$	227.450
$ a , \text{ м/с}^2$	-0.332

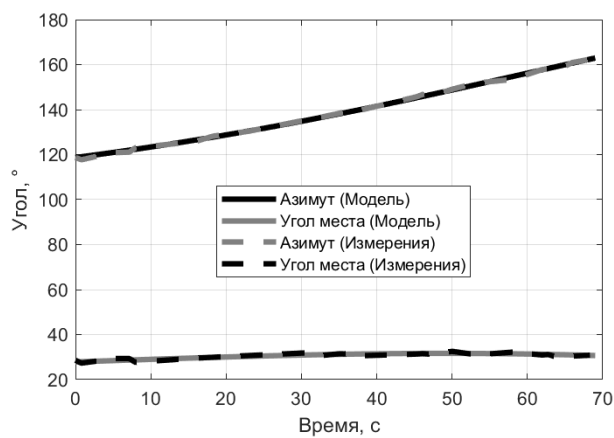
На основе начальных координат далее вычисляются временные зависимости характеристик рассеянной волны на всём периоде наблюдения за воздушным объектом в соответствии с формулами (1.10)-(1.15). Результаты вычислений отражены на Рис.3.9. Согласно Рис.3.9(а), модуль разницы между измеренной и модельной характеристикой составляет не более 50 мкс. На основе на Рис.3.9(б) можно также констатировать совпадение энергетических характеристик за исключением выбросов в измеренной зависимости мощности от времени. Направления прихода рассеянной волны находятся в полном соответствии для обеих угловых координат, что отражено на Рис.3.9(в).



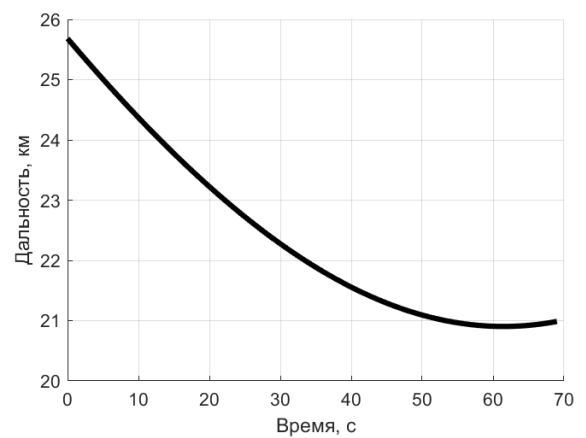
а)



б)



в)



г)

Рис.3.9. Временные зависимости измеренных и смоделированных характеристик рассеянного излучения: а) задержка, б) мощность, в) углы прихода и г) дальность до источника рассеянного излучения.

Поскольку информация о дальности по результатам измерений отсутствует, Рис.3.9(г) содержит только результаты моделирования. Видно, что дальность изменяется в пределах 21 – 25 км. По зависимости азимута от времени можно заключить, что объект двигался на запад, и на момент начала наблюдения находился на юго-востоке от расположения ЛЧМ ИР. Всё сказанное иллюстрируется нанесённой на карту [30] штриховой линией, показывающей траекторию воздушного объекта, на Рис.3.10.

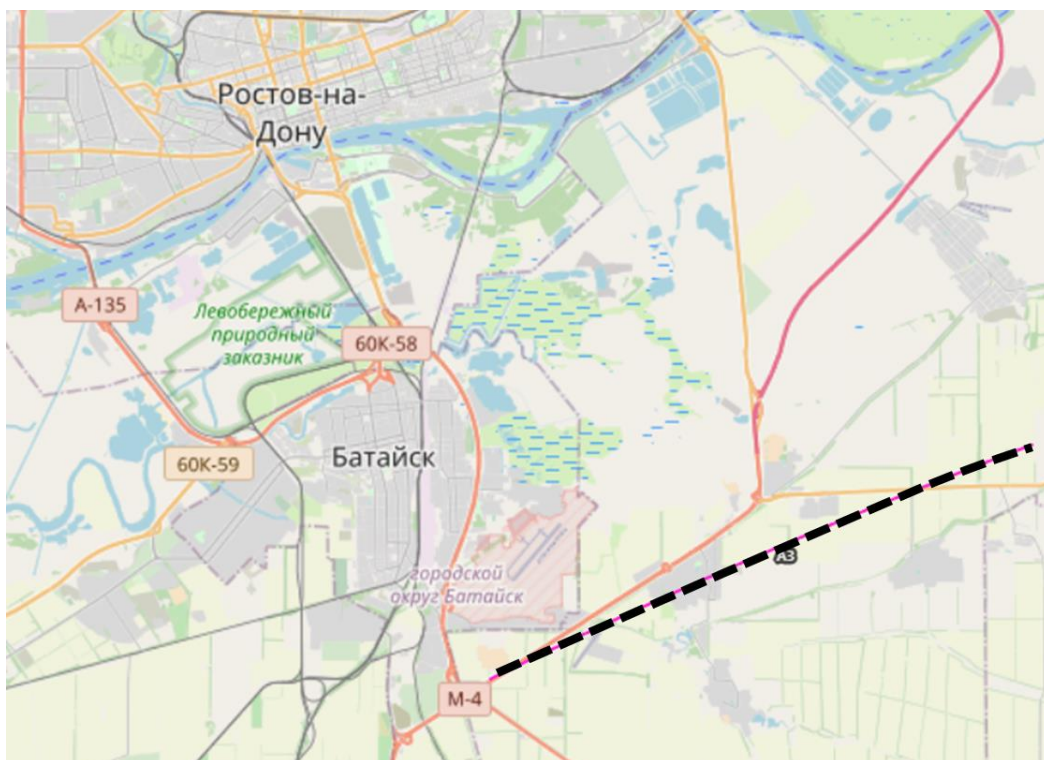


Рис.3.10. Результаты применения метода определения координат по результатам измерений углов прихода и задержки, нанесённые на карту

Преимуществом разработанного подхода по сравнению с применением ДАСФ модели является низкая вычислительная ёмкость, которая позволяет обеспечить работу в реальном масштабе времени. Очевидно, что точность получаемых в этом случае оказывается несколько ниже. Перейдём к сравнительному анализу двух различных методов.

3.6 Сравнение результатов обработки экспериментальных данных различными моделями

Воспользуемся теперь УИМ для оценки траектории воздушных целей наблюдаемых 06:30 06.08.2017 г., траектория которых была оценена с помощью ДАСФ модели ранее в разделе 3.4, и сравним результаты [54, 55, 57, 58]. Объекты с положительной и отрицательной задержкой относительно прямого сигнала подсвета моды E_s далее будем обозначать цифрами 1 и 2, соответственно. Временная зависимость относительной задержки представлена на

Рис.3.11. На графике сплошной линией показаны результаты измерений, штриховой – результаты моделирования. Глядя на Рис.3.11.а, можно заключить, что для первого объекта характер зависимости групповой задержки, полученной по итогам моделирования, отличается от измеренной. Наиболее явные отличия (около 100 мкс абсолютной разницы) проявляются ближе к концу характеристики. В то же время, для второго объекта результаты измерений и моделирования отличаются в меньшей степени (не более 20 мкс).

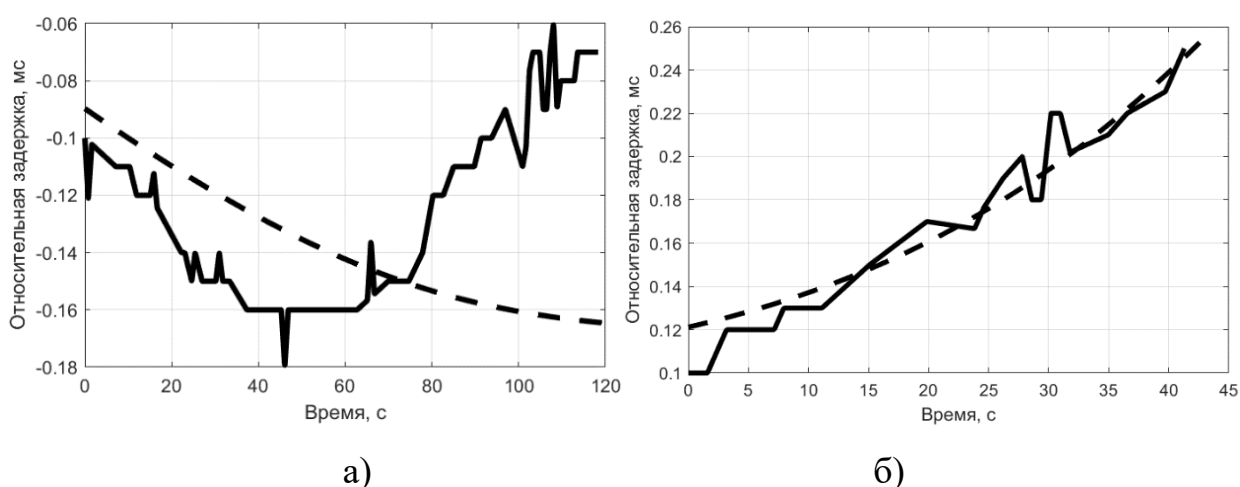


Рис.3.11. Временные зависимости задержки излучения, рассеиваемого объектом 1 (а), и объектом 2 (б)

Согласно разделу 3.2, временные зависимости измеряемых характеристик получают на основе прямой связи между мгновенной частотой передатчика (или частотой настройки узкополосного фильтра в приёмном тракте) и временем наблюдения. Модуляция мгновенной частоты приводит к тому, что за время сеанса пространственно-частотная структура канала распространения волны подсвета становится иной. В отличие от ДАСФ-модели, где эти изменения учитываются благодаря решению лучевых уравнений для каждого момента времени, в который выполняется моделирование, в УИМ не предусмотрен учёт этого процесса. Тем не менее, было сделано допущение, что минимизация совокупности невязок по другим измеряемым параметрам, к которым

относятся азимут и угол места прихода волны, позволит успешно решить задачу оценки траектории, несмотря на простоту УИМ.

На Рис.3.12 штриховыми и сплошными линиями соответственно нанесены результаты измерений и моделирования угловых координат двух источников рассеянного излучения. Модуль разности между смоделированной и измеренной зависимостью угловых координат первого и второго источников рассеянного излучения составляет соответственно не более 3° и 5.5° .

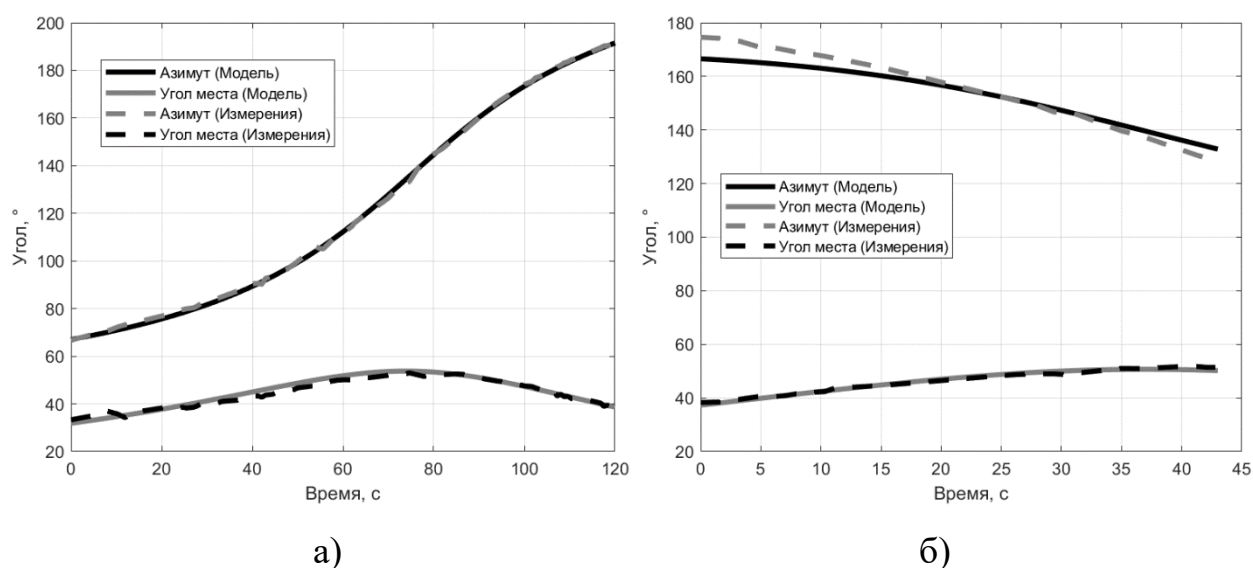


Рис.3.12. Временные зависимости азимута и угла места излучения, рассеиваемого объектом 1 (а), и объектом 2 (б)

Оценки траекторий источников рассеяния, полученные с помощью УИМ и ДАСФ-модели, нанесены на географическую карту на Рис.3.13 в виде сплошных и штриховых линий, соответственно. Первому и второму объектам соответствуют чёрный и серый цвет кривых. Первый объект с отрицательной относительной задержкой двигался на юго-запад, имел скорость и высоту полёта 185 м/с и 8.5 км по УИМ и 159 м/с и 6 км по ДАСФ-модели. Второй объект с положительной задержкой относительно волны подсвета двигался на северо-восток со скоростью и высотой 2098 м/с и 88.4 км (УИМ) и 2193 м/с и 105 км (ДАСФ). Как видно из представленных данных, УИМ позволяет

получить близкие оценки траектории, причём для второго объекта разница по скорости менее заметна, чем для первого.

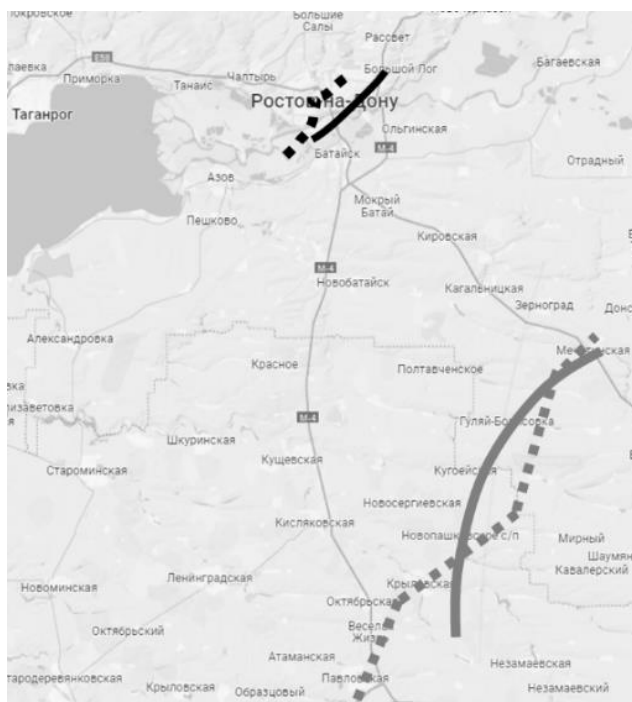


Рис.3.13. Результаты пространственного позиционирования объектов, нанесённые на карту

Таким образом, измерения с применением ЛЧМ ИР позволили выполнить оценки траекторий объектов, движущихся в Земной атмосфере на значительных дальностях от зоны приёма. Рассчитанные на основе УИМ оценки траекторий воздушных объектов сопоставимы с соответствующими оценками более точной ДАСФ-модели, основанной на численном решении уравнения Гамильтона-Якоби и более затратной в вычислительном плане.

3.7 Выводы

В данной главе подробно описан принцип работы и приведена блок-схема программно-аппаратного комплекса – ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора КВ-диапазона. В состав комплекса входят антенная решётка из 16

элементов, многоканальное РПУ и 4 четырёхканальных блока ЦОС, позволяющих реализовать когерентный приём и оптимальную обработку ЛЧМ-сигналов некооперативной ЗГРЛС. Применение ЛЧМ ИР обеспечивает непрерывное измерение многомерных ионограмм наклонного зондирования, содержащих информацию о прямом излучении станции подсвета и рассеянном на воздушном объекте излучении.

Приведены исходные положения и система характеристик лучевых уравнений в приближении геометрической оптики, на которых основана динамическая адаптивная структурно-физическая модель распространения ионосферной волны. С помощью модели могут быть рассчитаны траектории прямой и рассеянной волны с учётом анизотропии, неоднородности и нестационарности ионосферы при приемлемых вычислительных затратах.

Показаны результаты обнаружения движущихся воздушных объектов в атмосфере Земли на удалении более 100 км, основанные на анализе ионограмм НЗ, полученных с помощью ЛЧМ ИР с 2011 по 2020 гг., и ДАСФ-моделировании. Проведенный анализ показал возможность выделения среди обнаруженных объектов двух групп, соответствующих различному знаку разности групповой задержки рассеянной и прямой волны, что позволяет перейти к упрощённой имитационной модели.

Упрощённая модель, основанная на построении лучевых траекторий с применением теорем эквивалентности и минимизации невязок между измеренными и моделируемыми характеристиками, модифицирована для учёта групповой задержки и особенностей рассеяния сигналов обеих групп. Проведены дополнительные построения для определения координат мнимых источников одно- и двухскачковых мод распространяющейся ионосферной волны, которые выбираются при моделировании рассеянного и прямого излучения независимо исходя из знака разности относительной задержки. Представлен пример результатов обработки ионограмм наклонного зондирования, который

показывает возможность оценки траектории воздушного объекта описанным способом на расстоянии до 25 км.

Приведены результаты сравнения оценок траекторий движущихся объектов, полученных с применением ДАСФ-модели и УИМ. Анализ результатов сравнения показывает, что УИМ имеет сопоставимые результаты при существенно меньших затратах на вычисление, что позволяет применять разработанный метод для обнаружения и определения координат объектов в реальном масштабе времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования свойств сигналов, излучаемых некооперативными передатчиками, рассеиваемых воздушными объектами, и принимаемых программно-аппаратными комплексами различной направленности. В качестве источников сигнала подсвета использовались ШВС КВ-диапазона, расположенные в различных направлениях на удалении более тысячи километров от приёмной позиции, ЗГРЛС на острове Кипр, а также станция точного времени РВМ.

Комплексы, использованные для проведения исследований, позволяли регистрировать рассеянные сигналы и оценивать различные их характеристики. Одноканальный многочастотный доплеровский стенд, включающий в себя V-образную антенну и ЦРПУ, предназначался для измерения комплексного спектра в полосе частот вокруг несущей частоты передатчика, содержащей компоненты рассеянных сигналов. На запоминающем устройстве записывались выходные данные стенда в двоичном виде, которые в результате первичной обработки позволяли получать комплексные спектрограммы.

Радиопеленгатор КВ-диапазона, состоящий из антенной решётки, многоканального РПУ и многоканального АЦП, использовался для регистрации прямого и рассеянного излучения некооперативных станций и оценки азимута, угла места, амплитуды и доплеровского сдвига частоты. Алгоритм первичной обработки описан в подробностях и включает в себя объединение парциальных сигналов, коррелированных в частотной области, затем объединение сигналов, коррелированных в пространственной области, и, наконец, оценку углов прихода, выполняемую с помощью алгоритма MUSIC.

Для измерения азимута, угла места, амплитуды и задержки во времени применялся ЛЧМ ионозонд-радиопеленгатор. Отличие аппаратной части от КВ-радиопеленгатора состояло в применении четырёхканальных блоков ЦОС, позволяющих реализовать когерентный приём и оптимальную обработку ЛЧМ-сигналов некооперативной ЗГРЛС. Результаты работы ионозонда-

радиопеленгатора представляли собой многомерные ионограммы наклонного зондирования, сохранявшиеся на запоминающем устройстве.

Для дальнейшего исследования характеристик рассеянных сигналов решалась задача обнаружения с помощью специально разработанного алгоритма автоматической селекции следов рассеяния. Базовая версия алгоритма применялась к комплексным спектрограммам и позволяла на основе нахождения минимального расстояния между точками в многомерном пространстве {время – ДСЧ – амплитуда} принимать гипотезу о принадлежности набора точек одному и тому же временному треку. К особенностям разработанного алгоритма также можно отнести возможность преодоления разрывов во временном треке, заполнение разрывов при помощи сплайн-интерполяции, а также фильтрацию полученных треков с классификацией на прямые и рассеянные сигналы. Модифицированные версии алгоритма предназначались для работы в пространствах большей размерности, соответствующих экспериментальным данным, получаемым при работе с КВ-радиопеленгатором или ЛЧМ ИР.

Для оценки параметров траектории обнаруженных объектов методом наименьших квадратов выполнялась минимизация невязок между измеренными характеристиками рассеянного излучения и теми же характеристиками, полученными в результате имитационного моделирования. При работе с теми ПАК, которые не предполагают измерение задержки, использовалась имитационная модель, основанная на применении теорем эквивалентности при многоскачковом распространении ионосферных волн. Для определения координат воздушных объектов, обнаружение которых выполнялось на основе ионограмм наклонного зондирования ЛЧМ ИР, также применялась динамическая адаптивная структурно-физическая модель в геометрикооптическом приближении с учётом анизотропии, неоднородности и нестационарности ионосферы. При этом вычисления, требуемые для ДАСФ модели, не позволяли использовать её в масштабе реального времени. Однако проведенный анализ результатов ДАСФ моделирования для множества сеансов позволил предложить

использование упрощённой модели при условии предварительного учёта характера относительной задержки между рассеянным и прямым сигналом. В результате построение методов обнаружения и оценки координат объектов для всех рассматриваемых ПАК может быть основано на упрощённой имитационной модели и не требует высоких вычислительных затрат.

Таким образом, по соответствующему набору измеряемых характеристик, можно выделить три разработанных метода обнаружения и оценки координат воздушных объектов, отличающихся тем, что измеряют различные наборы временных зависимостей характеристик излучения некооперативных станций, выполняют автоматического выделение рассеянных и прямых следов, а затем проводят оценку траектории воздушного объекта с помощью минимизации невязки между измеренными и моделируемыми зависимостями. Проверка работоспособности предложенных методов проводилась путём сравнения с оценками, полученными достоверным способом.

Для первого метода приведены примеры обработки сеансов наблюдения, с помощью которых подтверждена возможность детектирования и определения координат воздушных целей, удалённых на расстояние до 80 км, по результатам измерений амплитуды и доплеровского сдвига частоты.

Проведенные эксперименты с синхронными измерениями одноканальным многочастотным доплеровским стендом и КВ-радиопеленгатором, в ходе которых получены близкие оценки пространственных траекторий воздушных объектов, также подтверждают работоспособность обоих предложенных методов.

На примере проведённого эксперимента с 8-канальным КВ-радиопеленгатором, развёрнутым в условиях городской застройки на площадке 40х40 м, показана принципиальная возможность обнаружения объектов на дальности порядка 60 км от пункта приёма. Кроме того, с использованием второго аналогичного КВ-радиопеленгатора, развёрнутого на удалении около 19 км от

первого, удалось триангуляционным методом подтвердить оцененные дальности до объектов, находящихся на удалении до 380 км.

С помощью метода, основанного на измерении углов прихода, амплитуды и задержки рассеянного сигнала, показаны результаты обнаружения движущихся воздушных объектов в атмосфере Земли на удалении более 100 км. Рассмотренные результаты сравнения оценок траекторий движущихся объектов, полученных с применением ДАСФ и упрощённой модели показывают, что упрощённая модель позволяет получить близкие оценки координат при существенно меньших затратах на вычисление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пассивная когерентная радиолокация / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2016. – 162 с. – ISBN 978-5-7629-1921-0. – EDN YIELQV.
2. Bok D., Galda D., Siart U. A multistatic passive coherent location system with receiver location constraints // 2017 18th International Radar Symposium (IRS). – Prague, Czech Republic, 2017. – Pp. 1–10. – DOI 10.23919/IRS.2017.8008107.
3. Pidanic J., Juryca K. Analysis of DVB-T2 signal for exploitation by Passive Coherent Location system // 2017 27th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA). – Brno, Czech Republic, 2017. – Pp. 1–4. – DOI 10.1109/RADIOELEK.2017.7937599.
4. Karpovich P., Kareneuski S., Zieliński T. P. Practical Results of Drone Detection by Passive Coherent DVB-T2 Radar // 2020 21st International Radar Symposium (IRS). – Warsaw, Poland, 2020. – Pp. 77–81. – DOI 10.23919/IRS48640.2020.9253800.
5. Płotka M., Malanowski M., Samczyński P., Kulpa K., Abratkiewicz K. Passive Bistatic Radar Based on VHF DVB-T Signal // 2020 IEEE International Radar Conference (RADAR). – Washington, DC, USA, 2020. – Pp. 596–600. – DOI 10.1109/RADAR42522.2020.9114859.
6. Coleman C. J., Watson R. A., Yardley H. Passive bistatic radar based on target illuminations by digital audio broadcasting // 2008 IEEE Radar Conference. – Rome, Italy, 2008. – Pp. 1–6. – DOI 10.1109/RADAR.2008.4721007.
7. Barkhatov A., Vorobev E., Konovalov A. Experimental results of DVB-T2 passive coherent location radar // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – St. Petersburg and Moscow, Russia, 2017. – Pp. 1229–1232.

8. Malanowski M., Kulpa K., Misiurewicz J. Acceleration estimation for Passive Coherent Location radar // 2008 IEEE Radar Conference. – Rome, Italy, 2008. – Pp. 1–5. – DOI 10.1109/RADAR.2008.4721010.
9. Malanowski M., Kulpa K. Digital beamforming for Passive Coherent Location radar // 2008 IEEE Radar Conference. – Rome, Italy, 2008. – Pp. 1–6. – DOI 10.1109/RADAR.2008.4720988.
10. Bayat S., Nayebi M. M., Norouzi Y. Target detection by passive coherent FM based bistatic radar // 2008 International Conference on Radar. – Adelaide, SA, Australia, 2008. – Pp. 412–415. – DOI 10.1109/RADAR.2008.4653957.
11. Knoedler B., Zemmari R., Koch W. On the detection of small UAV using a GSM passive coherent location system // 2016 17th International Radar Symposium (IRS). – Krakow, Poland, 2016. – Pp. 1–4. – DOI 10.1109/IRS.2016.7497350.
12. Zemmari R., Knoedler B., Nickel U. GSM passive coherent location: Improving range resolution by mismatched filtering // 2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13). – Ottawa, ON, Canada, 2013. – Pp. 1–6. – DOI 10.1109/RADAR.2013.6586014.
13. Detoma E. Exploitation of GNSS signals as illuminators of opportunity in Passive Coherent Location (PCL) systems // 2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). – Turin, Italy, 2019. – Pp. 340–348. – DOI 10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869679.
14. Бархатов А. В., Веремьев В. И., Родионов В. А., Куприянов С. В. Концепция построения коротковолновых радиолокационных станций с вынесенным приемом и использованием сигналов собственных и сторонних источников излучения для освещения морской обстановки // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 50-54.
15. Ткачев Г. Н., Готовчиц И. В., Крылов Б. Н. Результаты исследований по проблеме полуактивной радиолокации в диапазоне коротких волн // Радиолокация и радиосвязь : доклады IV Всероссийской конференции (Москва, 29

ноября – 3 декабря 2010 г.). – Москва : ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2010. – С. 264–268.

16. Ткачев Г. Н., Готовчиц И. В., Крылов Б. Н. Возможности практической реализации схемы полуактивной радиолокации с независимым источником подсвета в коротковолновом диапазоне // Успехи современной радиоэлектроники. – 2011. – № 4. – С. 34-41.

17. Willis N. J. Bistatic radar. – 2nd ed. – Boston ; London : Artech House, 1995. – 329 p.

18. Особенности рассеяния декаметровых радиоволн при пассивной радиолокации воздушных объектов с использованием постороннего подсвета / Н. Г. Пархоменко, Г. Г. Вертоградов, И. А. Яровой, В. Н. Шевченко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2011. – Т. 16, № 5. – С. 73-76. – EDN NQYGJL.

19. Гуревич, А. В. Нелинейные явления в ионосфере / А. В. Гуревич // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 11. – С. 1145-1178. – EDN IEZWPP.

20. Вертоградов, Г. Г. Решение задачи пассивной когерентной радиолокации по результатам одноканальных измерений характеристик рассеянного кв-излучения / Г. Г. Вертоградов, В. Ю. Нестеров // Техника радиосвязи. – 2022. – № 4(55). – С. 7-15. – EDN YXONXS.

21. Вертоградов, Г. Г. Решение задачи пассивной когерентной радиолокации по результатам измерений доплеровского смещения частоты, рассеянного кв-излучения / Г. Г. Вертоградов, В. Ю. Нестеров // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов II Российской научной конференции, Омск, 05–07 октября 2022 года. – Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2022. – С. 49-51. – EDN TPIRVB.

22. Распространение радиоволн : Учебник для вузов / М. П. Долуханов. – 4-е изд. – М. : Связь, 1972. – 335 с. : ил. – Библиогр.: с. 333-336.

23. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир. 1973. – 504 с.

24. Иванов В. А., Фролов В. А., Шумаев В. В. Зондирование ионосферы непрерывными ЛЧМ сигналами // Известия вузов. Сер. Радиофизика. – 1986. – Т. 26, № 2. – С. 235–237.
25. NDXC – NCDXF beacon system [Электронный ресурс]. – URL: <https://www1.s2.starcat.ne.jp/ndxc/> (дата обращения: 10.04.2025)
26. Сидоров А. А. Приёмник прямого усиления с повышенным коэффициентом передачи детектора / А. А. Сидоров, А. П. Коваленко // Ученые записки Брянского государственного университета. – 2016. – №1.
27. Экспериментальное исследование приемника пеленгования прямого усиления / Д. Е. Губарев, А. В. Андрианов, А. Н. Зикий, А. И. Пустовалов // Радиотехника. – 2020. – Т. 84, № 11(22). – С. 50-54. – DOI 10.18127//j00338486-202011(22)-09. – EDN UQWQDP
28. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы : учебное пособие для вузов. – Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 432 с.
29. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие / Г. Н. Солопченко ; М-во образования и науки Рос. Федерации, С.-Петерб. политехн. ун-т Петра Великого. - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. - 207 с. : ил. - Библиогр.: с. 207.
30. OpenStreetMap [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения: 16.06.2023).
31. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
32. Патент № 2190236 С2 Российская Федерация, МПК G01S 5/04. Способ обнаружения и определения двумерного пеленга и частоты источников радиолучения : № 2000123589/09 : заявл. 13.09.2000 : опубл. 27.09.2002 / В. Н. Шевченко, Г. С. Емельянов, Г. Г. Вертоградов ; заявитель Государственное конструкторское бюро аппаратно-программных систем «Связь» ВНИИ «Градиент». – EDN VWZGXT.

33. Однопозиционное определение местоположения источников радиоизлучения в декаметровом диапазоне с помощью широкоапертурного пеленгатора-дальномера и ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора / Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, Е. Г. Чайка [и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2017. – Т. 60, № 12. – С. 1072-1092. – EDN YTMWGI.

34. Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г., Чайка Е. Г. Экспериментальная оценка точности однопозиционного местоопределения источников радиоизлучения в КВ диапазоне // Радиолокация, навигация, связь : сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А. С. Попова. – Воронеж, 2019. – Т. 5. – С. 116–133.

35. Вертоградов, Г. Г. Оценка параметров движущихся объектов по результатам пеленгования рассеянного излучения широкоэмиттерных радиостанций в КВ диапазоне / Г. Г. Вертоградов, В. Ю. Нестеров // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ. В 5-ти томах, Воронеж, 18–20 апреля 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. – С. 202-208. – EDN SLFZAM.

36. Vertogradov G. G., Nesterov V. Y. Moving Objects Parameters Estimation Based on Direction Finding of Broadcasting HF Radio Stations Scattered Radiation // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – Divnomorskoe, Russian Federation, 2023. – Pp. 256–259. – DOI 10.1109/RSEMW58451.2023.10202028.

37. Nesterov, V. Y. Solution to the Problem of Passive Coherent Radar Based on the Results of Measurements by a Single-Position HF Radio Direction Finder / V. Y. Nesterov, G. G. Vertogradov // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2026. – DOI 10.1007/s11141-026-10476-w.

38. Нестеров, В. Ю. Оценка координат движущихся объектов по результатам синхронных измерений доплеровского сдвига частоты и углов прихода рассеянного излучения / В. Ю. Нестеров, Г. Г. Вертоградов // Распространение

радиоволн : сборник докладов I Всероссийской молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти Д. С. Лукина, Йошкар-Ола, 11–14 ноября 2024 года. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2024. – С. 53-56. – EDN BLPLKV.

39. Наклонное зондирование ионосферы с помощью ионозонда-радиопеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала / Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, М. С. Складчиков, В. А. Валов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2016. – Т. 59, № 11. – С. 991-1003. – EDN XHASLZ.

40. ЛЧМ ионозонд-радиопеленгатор и его применение в ионосферных исследованиях / В. А. Валов, Г. Г. Вертоградов, В. Г. Вертоградов [и др.] // Физические основы приборостроения. – 2012. – Т. 1, № 4(5). – С. 24-43.

41. Исследование угловых-частотных характеристик КВ-волн при наклонном ЛЧМ-зондировании ионосферы / Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, В. Г. Вертоградов, В. Н. Шевченко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12, № 5. – С. 25-32. – EDN IAKDBH.

42. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере / Н. Д. Филипп, Н. Ш. Блаунштейн, Л. М. Ерухимов [и др.]. – Кишинев : Штиинца, 1991. – 288 с.

43. Вертоградов, Г. Г. Расчёт оптимальных рабочих частот связной радиопередачи по данным наклонного зондирования ионосферы / Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, Е. Г. Вертоградова // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2008. – Т. 51, № 1. – С. 10-21. – EDN IJMTEN.

44. Gething P. J.D. Radio direction-finding and resolution of multicomponent wave-fields. London: Peter Peregrinus Ltd, 1976. 329 p.

45. Gething P. J. D. Radio direction finding and superresolution. – 2nd ed. – London : Peter Peregrinus Ltd, 1990. – 365 p.

46. Статистический анализ угловых наблюдений: пер. с англ. / К. Мардиа; пер. Э.В. Хмаладзе; под ред. Л.Н. Большев. – Москва: Наука, 1978. – 239 с.: ил. – На рус. яз.: 1.30.

47. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю. А. Кравцов, Ю. И. Орлов . – М. : Наука, 1980 . – 304 с. : ил + Библиогр.: с. 280-300. : руб. 3.30 .

48. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: Учебное пособие для вузов в 10 т. Том 1 Механика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2012. – 224 с.

49. Bilitza D., Reinisch B. W. International reference ionosphere 2007: improvements and new parameters // Advances in Space Research. – 2008. – Vol. 42. – P. 599–609. – DOI 10.1016/j.asr.2007.07.048.

50. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V. [et al.] The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2014. – Vol. 4. – Article A07. – DOI 10.1051/swsc/2014004.

51. Барабашов Б. Г., Вертоградов Г. Г. Динамическая адаптивная структурно-физическая модель ионосферного радиоканала // Математическое моделирование. – 1996. – Т. 8, № 2. – С. 3–18.

52. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2001611514 Российская Федерация. Программное обеспечение многоканального пеленгатора-дальномера КВ-диапазона / Г. Г. Вертоградов, Е. В. Кондаков, В. Н. Шевченко. – № 2001611514 ; заявл. 13.09.2001 ; зарегистр. 12.11.2001.

53. Вертоградов, Г. Г. Применение ЛЧМ-радиопеленгатора декаметрового диапазона волн для оценки параметров объектов, движущихся в атмосфере Земли / Г. Г. Вертоградов, В. Г. Вертоградов, В. Ю. Нестеров // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 12. – С. 32-40. – DOI 10.18127/j00338486-202312-04. – EDN UESQZU.

54. Нестеров, В. Ю. Однопозиционное местоопределение воздушных объектов на основе измерений задержки и углов прихода рассеянного радиоизлучения некооперативных передатчиков / В. Ю. Нестеров, Г. Г. Вертоградов // Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции. В 6-ти томах, Воронеж, 15–17 апреля 2025

года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2025. – С. 132-136. – EDN WJWEZL

55. Нестеров, В. Ю. Метод обнаружения и определения координат воздушных объектов по результатам анализа многомерных ионограмм наклонного зондирования / В.Ю. Нестеров, Г.Г. Вертоградов // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 11. – С. 1-14. – DOI 10.30898/1684-1719.2025.11.3

56. Нестеров, В. Ю. Оценка координат объектов, движущихся в атмосфере земли, по результатам измерений углов прихода рассеянного радиоизлучения в КВ-диапазоне / В. Ю. Нестеров, Г. Г. Вертоградов // Распространение радиоволн : Труды XXIX Всероссийской открытой научной конференции, Казань, 30 июня – 4 июля 2025 года. – Казань : Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2025. – С. 258–261. – DOI 10.26907/rwp29.2025.258-261. – EDN JRFTRQ.

57. Нестеров, В. Ю. Пассивная когерентная радиолокация объектов по результатам измерений задержки и углов прихода рассеянного радиоизлучения дециметрового диапазона / В. Ю. Нестеров, Г. Г. Вертоградов // Распространение радиоволн : Труды XXIX Всероссийской открытой научной конференции, Казань, 30 июня – 4 июля 2025 года. – Казань : Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2025. – С. 262–265. – DOI 10.26907/rwp29.2025.262-265. – EDN RRBWFG.

58. Нестеров, В. Ю. О возможности оценки координат воздушных объектов на основе имитационных моделей распространения рассеянных волн дециметрового диапазона / В. Ю. Нестеров, Г. Г. Вертоградов // Всероссийская научная конференция «2025 Излучение и рассеяние электромагнитных волн», Дивноморское, 23–27 июня 2025 года. – Южный федеральный университет, 2025. – С. 298–303.