

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2026

Работа выполнена на кафедре радиофизики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Вертоградов Геннадий Георгиевич

Официальные оппоненты: Таран Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры "Связь на железнодорожном транспорте",
Шокова Юлия Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», доцент кафедры "Радиоэлектроника"

Защита состоится «20» ноября 2026 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ЮФУ801.01.19 в Южном федеральном университете по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д.5, Южный федеральный университет, физический факультет, ауд 318.

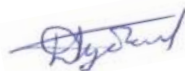
С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21 Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1356684>

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Отзыв (с указанием ФИО (полностью), ученой степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail, даты) с заверенной подписью рецензента и печатью учреждения просим направлять в 2 экз. ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.01.19 по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д.5, физический факультет ЮФУ, а также в формате pdf – на e-mail: ds@sfedu.ru

Ученый секретарь

диссертационного совета ЮФУ801.01.19



Д.С. Губский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационного исследования. Развитие современных активных и пассивных радиолокационных систем направлено на повышение дальности, помехоустойчивости, надёжности, скрытности, снижение стоимости и улучшение других характеристик. Особенный интерес представляют станции полуактивной или пассивно-когерентной радиолокации, которые обладают высокой скрытностью и сниженной стоимостью вследствие отсутствия собственного передатчика. К недостаткам полуактивных радиолокаторов можно отнести необходимость решения задачи выделения слабого эхо-сигнала объекта наблюдения на фоне мощного сигнала подсвета. В качестве станций подсвета применяются некооперативные сторонние источники радиоволн различной мощности во множестве диапазонов частот. Наиболее широко используются станции цифрового телевидения (DVB-T2), цифрового радиовещания (DAB и DRM) и аналогового радиовещания. Следует отметить, что в большинстве перечисленных сетей, особенно цифровых, ведётся передача сигналов с относительно сложной формой модуляции и широкой полосой, поэтому построение и функционирование ПКРЛС на их основе, как правило, сопряжено со значительными затратами.

В то же время, короткие волны (КВ) в диапазоне 3 - 30 МГц могут распространяться на сверхдальние расстояния благодаря механизму многоскачкового распространения при отражении от ионосферы и эффекту дифракции над морской поверхностью. Кроме того, в этом диапазоне радиоволн работает большое количество ширококвещательных станций (ШВС), в том числе с подавленной несущей частотой, программное обеспечение для приёма и обработки которой не требует значительных вычислительных ресурсов. На данный момент в Южном федеральном университете разработано несколько радиотехнических систем КВ-диапазона, позволяющих измерять различные характеристики принимаемых волн.

Результатами измерений в зависимости от конкретной системы могут являться временные зависимости амплитуды, частоты, углов прихода и/или времени задержки. В то же время методы для обнаружения движущихся в атмосфере Земли объектов и оценки их координат по результатам измерений либо не позволяют решать радиолокационные задачи в реальном времени, либо отсутствуют. По этим и ряду других причин развитие методов радиолокационного обнаружения и определения координат, подходящих для работы в КВ-диапазоне, является актуальной задачей.

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.

Для достижения цели были поставлены **задачи:**

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 станда, 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 теме диссертационного исследования. Соискателем опубликовано 12 печатных работ: 4 статьи, в которых представлены основные результаты диссертационного исследования, опубликованы в журналах, входящих в список ВАК по специальности 1.3.4. Радиофизика; 8 тезисов докладов представлены на международных и всероссийских конференциях; 2 работы автора включены в международную базу данных научных исследований Scopus.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обозначены тема, цель научного исследования и решаемые задачи; приведены выносимые на защиту положения, научная новизна и практическая значимость работы; перечислены опубликованные материалы, содержащие основные результаты исследования.

В первой главе приведено описание разработанного метода обнаружения и определения координат воздушных объектов, движущихся в Земной атмосфере, по результатам регистрации и анализа доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) и амплитуды рассеиваемых им сигналов дециметрового диапазона.

Для получения и первичной обработки информации был применён одноканальный многочастотный доплеровский стенд (ОМДС), располагавшийся в точках с географическими координатами 47.239° с. ш., 39.642° в. д. Основными элементами ОМДС являлись V-образная приёмная антенна, GPS-приемник, синтезатор тактовой частоты, высокостабильный опорный генератор, радиоприёмное устройство (РПУ), промышленная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ) для управления системой, регистрации квадратурных компонент сигналов и их первичной обработки. Алгоритм первичной обработки сигналов ОМДС состоял в фильтрации, децимации и оконном преобразовании Фурье. Результатом обработки

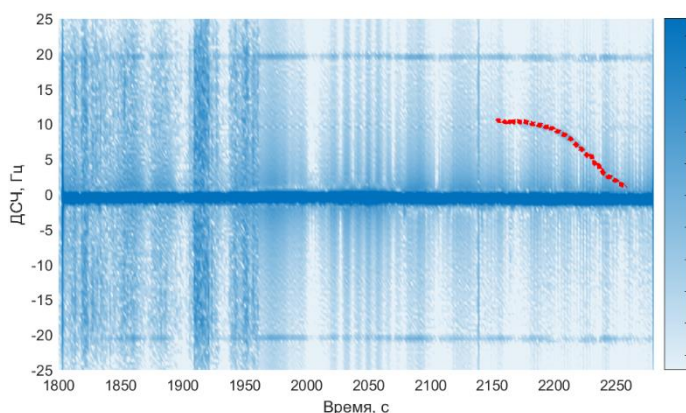


Рис.1 Пример спектрограммы ОМДС и результата автоматической селекции следов рассеяния

являлись синхронно измеряемые (до 32 одновременных измерений) зависимости амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) от времени комплексных сигналов различных станций подсвета — спектрограмм (Рис.1).

К полученным спектрограммам применялся

разработанный алгоритм автоматической селекции следов рассеяния, позволяющий на основе анализа расстояния между точками в многомерном пространстве {время – ДСЧ - амплитуда} выделить временные зависимости характеристик рассеянного сигнала, принадлежащие одному и тому же воздушному объекту. С помощью формул (1) и (2) вычислялось минимальное расстояние между точками в указанном пространстве, а для преодоления возможных разрывов в наблюдаемых следах рассеяния процедура повторялась для точек, разделённых интервалом в несколько временных отсчётов.

$$\rho_{ij} = \sum_{k=1}^K \frac{(q_{k,i} - q_{k,j})^2}{\Delta q_k}. \quad (1)$$

$$j = \operatorname{argmin}(\rho_{ij}) \wedge (q_{k,i} - q_{k,j} < q_k^0). \quad (2)$$

Далее был выполнен общий анализ характеристик ионосферных волн, позволивший на основе теорем эквивалентности получить упрощённую геометрию рассеяния и затем записать соотношения (3)-(5) для моделирования ДСЧ, мощности и энергии рассеянных сигналов при многоскачковом подсвете.

$$f_t^{(M)} = \frac{-1}{\lambda} \left(\frac{\Delta R_r}{\Delta t} + \frac{\Delta R_t}{\Delta t} \right). \quad (3)$$

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

$$E_t^{(M)} = \sqrt{P_r \cdot Z_c}. \quad (5)$$

Результаты геометрических построений, лежащих в основе упрощённой имитационной модели, позволявшие также вычислять значения углов прихода и дальности до воздушных объектов,двигающихся по пробной траектории, представлены на Рис.2.

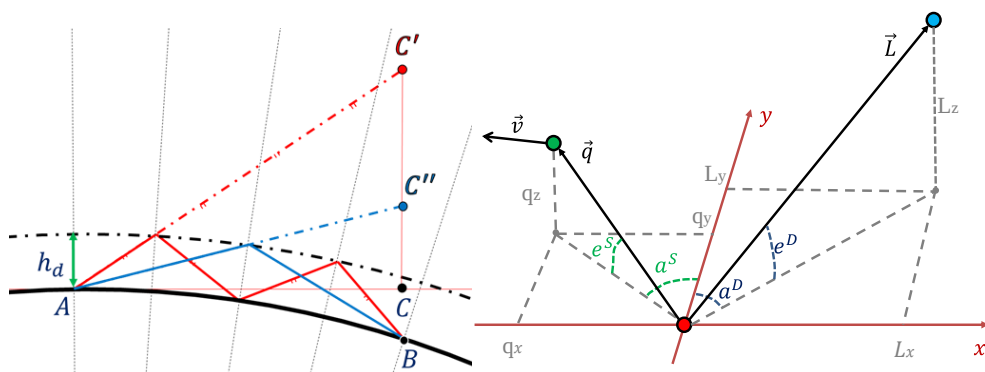


Рис.2 Геометрия упрощённой имитационной модели

Затем соотношения имитационной модели были применены для получения оценки координат движущихся объектов с помощью построения пробных траекторий и минимизации невязки χ по формуле (6) между наблюдаемыми и моделируемыми характеристиками рассеяния.

$$\chi = w_f \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (f_t^{(M)} - f_t^{(S)})^2} + w_E \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (E_t^{(M)} - E_t^{(S)})^2} \rightarrow \chi^0. \quad (6)$$

Работоспособность метода была проверена с помощью проведённого эксперимента на основе данных ОМДС от 01.12.2010 г. в период 13:00-13:08 (сеанс 1) и 13:30-13:38 (сеанс 2). В ходе первого и второго сеансов воздушные объекты были одновременно доступны для наблюдения на частотах станции «РВМ» и ШВС «Radio Exterior De Espana» в течение 80 и 190 секунд, соответственно. На Рис.3 приведены траектории воздушных объектов, полученные в результате применения разработанного метода. Объект 1 оказался доступным для наблюдения на расстоянии около 33 км к юго-востоку от местоположения ОМДС с начальной скоростью порядка 160 м/с и продолжал движение на северо-запад, сближаясь до расстояния около 21 км. Начало регистрации сигнала от объекта 2 пришлось на момент его расположения к западу от точки приёма на расстоянии 20 км. Двигаясь с начальной скоростью 250 м/с на юг, объект 2 достиг дальности около 78 км.

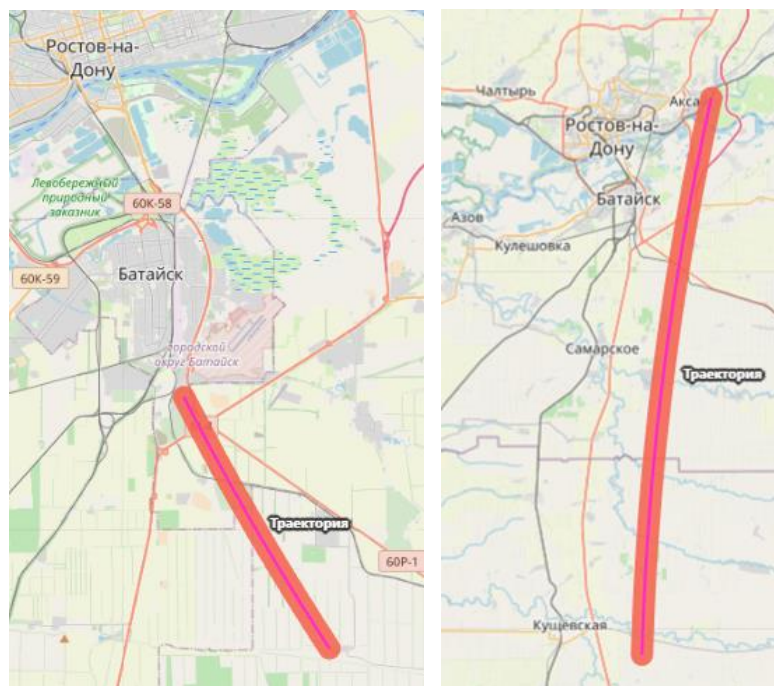


Рис.3 Траектория воздушных объектов, наблюдаемых в эксперименте 1

Во второй главе приведены результаты исследований вопроса обнаружения и определения координат движущихся объектов на основе результатов измерения углов прихода и ДСЧ рассеиваемых ими сигналов. Такой набор характеристик достигался при помощи многоканального радиопеленгатора, отличие которого от ОМДС состояло в наличии антенной решётки и многоканального РПУ, в результате чего становилось возможным определять углы прихода принятых сигналов с помощью метода MUSIC. Результатом обработки являлись измеренные зависимости углов прихода, доплеровского сдвига частоты и амплитуды прямого и рассеянного излучения выбранной станции подсвета.

На первом шаге первичной обработки обеспечивалось получение состоятельной оценки спектральной плотности мощности (СПМ) путём усреднения по числу антенных элементов: $\bar{s}_k = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} |s_{n,k}|^2}{N}$. Затем, после определения СПМ шума и номера отсчёта сигнала, соответствующего глобальному максимуму, выполнялась процедура обнаружения всех сигналов,

коррелирующих с ним в частотной и пространственных областях с помощью соотношений (8) и (9).

$$|R_k| = \frac{\left| \sum_{n=0}^{N-1} S_{n,m} S_{n,k}^* \right|}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} |S_{n,m}|^2 \sum_{n=0}^{N-1} |S_{n,k}|^2}}, \quad (7)$$

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H, \quad R_{m_1 m_2} = \frac{\left| \sum_{i,j=0}^{N-1} S_{m_1 ij} S_{m_2 ij}^* \right|}{\sqrt{\sum_{i,j=0}^{N-1} S_{m_1 ij} S_{m_1 ij}^* \sum_{i,j=0}^{N-1} S_{m_2 ij} S_{m_2 ij}^*}}. \quad (8)$$

После выполненного таким образом уточнения количества обнаруживаемых сигналов выполнялась оценка углов прихода с помощью метода MUSIC. Для этого выполнялось разложение ковариационных матриц на собственные векторы $\mathbf{W}_n$, а затем с помощью вектора наведения (9) вычислялся минимум величины цифровой ДН (10), который и соответствовал требуемой оценке угловых координат.

$$\mathbf{V}(\alpha, \Delta) = \left\{ \exp(i 2 \pi \bar{F}_m r_n \cos \varepsilon \cos(\alpha_n - \alpha) / c) \right\}^T, \quad (9)$$

$$D(\alpha, \varepsilon) = \frac{\sum_{n=0}^{N-N_{\min}-1} \left| (\mathbf{W}_n^H \mathbf{V}) \right|^2}{\left((N - N_{\min}) |\mathbf{V}|^2 \sum_{n=0}^{N-N_{\min}-1} |\mathbf{W}_n|^2 \right)}. \quad (10)$$

Затем с помощью выражений (11) выполнялась оценка ДСЧ и амплитуды обнаруженных сигналов.

$$\delta f_m = F_0 - \bar{F}_m, \quad E_m = \left| \mathbf{V}^T(\alpha_m, \Delta_m) \cdot \mathbf{S}_m \right|. \quad (11)$$

К обнаруженным сигналам применялся алгоритм автоматического выделения из них рассеянных следов, который был специальным образом модифицирован для учёта углов прихода, в результате чего расстояние вычислялось по формуле (12).

$$\rho_{ij} = \frac{|\delta f_i^{t_m} - \delta f_j^{t_n}|}{\Delta f} + \frac{|\alpha_i^{t_m} - \alpha_j^{t_n}|}{\Delta \alpha} + \frac{|\varepsilon_i^{t_m} - \varepsilon_j^{t_n}|}{\Delta \varepsilon}, \quad (12)$$

Наконец, выполнялась минимизация невязки (13) между измеренными характеристиками, и полученными с помощью упрощённой имитационной модели.

$$\begin{aligned} \chi = & w_f \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (f_t^{(M)} - f_t^{(S)})^2} + w_E \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (E_t^{(M)} - E_t^{(S)})^2} + \\ & + w_\alpha \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\alpha_t^{(M)} - \alpha_t^{(S)})^2} + w_\varepsilon \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\varepsilon_t^{(M)} - \varepsilon_t^{(S)})^2} \rightarrow \chi^0. \end{aligned} \quad (13)$$

Далее представлены результаты серии проведённых экспериментов.

Эксперимент проводился с данными от 20.12.2022 в 08:16 UT многоканального радиопеленгатора, настроенного на частоту ШВС «China Radio International Kashi-Saibagh». Результаты применения разработанных методов изображены на Рис.4 и показывают, что в момент начала наблюдения воздушный объект двигался со скоростью 220 м/с на запад (курс 267°) на расстоянии ~57 км к северо-востоку от радиопеленгатора, на высоте 8 км.

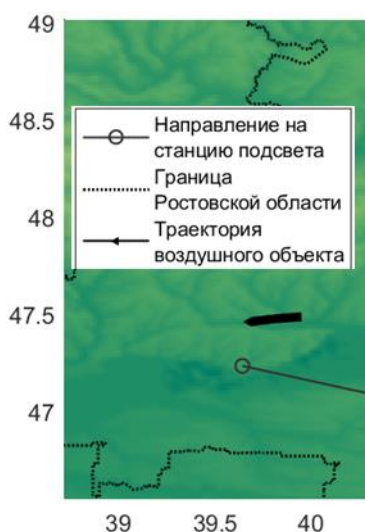


Рис.4 Результаты пространственного позиционирования объекта

Целью следующего эксперимента являлась верификация разработанного метода на основе траекторных оценок, полученных методом триангуляции. Для этого использовались данные синхронных измерений двух идентичных многоканальных радиопеленгаторов от 09.09.2019 в 11:39 UT (сеанс 1) и от 09.09.2019 в 11:44 UT (сеанс 2). Полученные оценки значений начальной высоты полёта, модуля скорости и модуля ускорения для сеанса 1 соответственно равны 11.8 км, 200.8 м/с и 0.49 м/с², что сопоставимо с параметрами пассажирских воздушных судов. В то же время для

сеанса 2 оценки тех же значений, полученные с помощью имитационной модели, выглядят нереалистичными: высота полёта 79.1 км, модуль скорости 112.3 м/с, модуль ускорения 0.07 м/с². Это явление может быть связано со снижением точности определения угловых координат при большом удалении

объекта (около 400 км) относительно длины базы радиопеленгаторов (менее 20 км). Тем не менее, можно сказать, что отличие между результатами расчётов двумя методами составляет не более 15%.

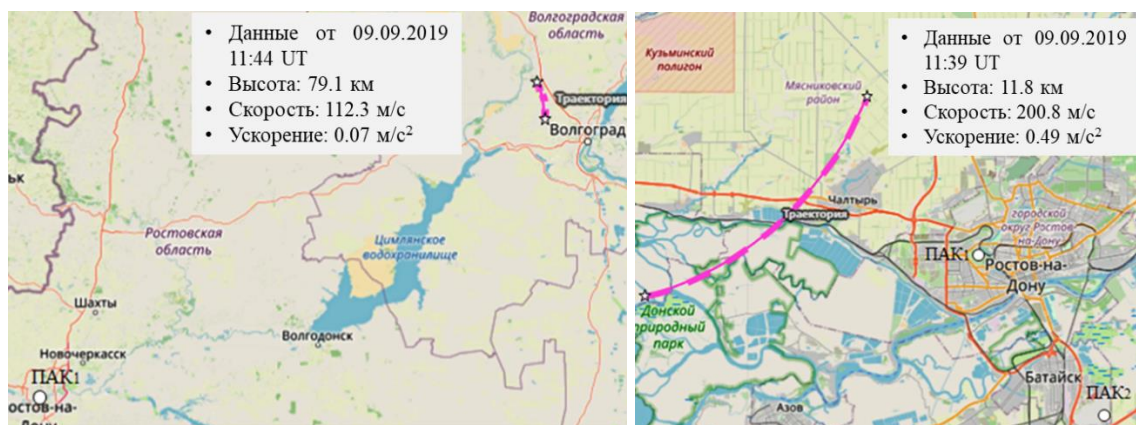


Рис.5 Результаты эксперимента для сеансов 1 и 2

Следующий эксперимент проводился с данными от 14:30 01.12.2010 г. с целью получения независимых оценок двумя разработанными методами и их сравнительного анализа, для чего проводились синхронные измерения при помощи ОМДС и радиопеленгатора. ОМДС работал на частотах $f_1 = 9996$ кГц и $f_2 = 21610$ кГц, радиопеленгатор – на частоте f_2 . Проведенные совместные измерения позволили выполнить обнаружение и оценку траектории объекта, движущегося на юго-восток до 45 км от пункта приёма. Сравнение полученных результатов для разработанных методов показывает разницу до 5° по угловым координатам и до 6 км по дальности.

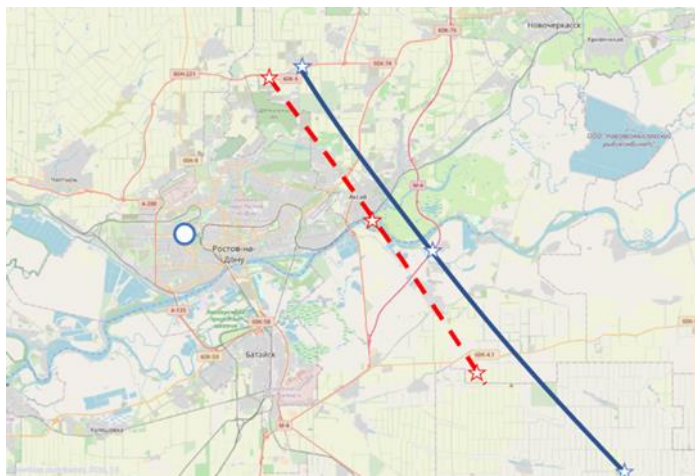


Рис.6 Оценки траекторий движущегося объекта, полученные двумя различными методами

В третьей главе представлены результаты разработки метода обнаружения и оценки координат, основанные на применении ЛЧМ-ионозонда, отличающегося от

описанного выше пеленгатора наличием блоков цифровой обработки, реализующих когерентный приём сигналов некооперативного передатчика загоризонтного радиолокатора «Плутон-2» на о. Кипр. В основу алгоритма первичной обработки было положено свойство разностного сигнала, в соответствии с которым амплитуда в максимумах его спектральной плотности мощности (СПМ) пропорциональна амплитуде парциальных лучей интерференционного поля в пункте приёма. Благодаря оптимальной фильтрации обеспечивалась более высокая чувствительность, по сравнению с описанными выше комплексами, и возможность разделения интерференционного поля на парциальные лучи по групповой задержке. Результатом первичной обработки являются ионограммы наклонного зондирования в виде временных зависимостей углов прихода, амплитуды и групповой задержки прямых и рассеянных ЛЧМ-сигналов. Далее к ионограммам применялся описанный выше алгоритм автоматического выделения рассеянных следов и выполняется моделирование траектории объекта с помощью упрощённой модели или с помощью динамической адаптивной структурно-физической модели (ДАСФ). Применение ДАСФ-модели являлось возможным благодаря прямому измерению задержки прямого и рассеянного сигнала.

Исходные положения ДАСФ модели состояли в том, что суммарное поле в точке приёма определяется полем конечного набора лучей, количество и параметры которых определяются глобальными и среднемасштабными характеристиками ионосферы; для мелкомасштабных неоднородностей могут быть применены статистические методы; перемещения среднемасштабных возмущений и глобальной неоднородности соответствуют нестационарной среде, определяют динамику интерференционного поля и представляются гармоническими волновыми цугами; мат-моделью среды может являться мультипликативная модель пространственного распределения ионизации. Интерференционное поле ищется на основе дисперсионного соотношения

(14), включающего показатель преломления Эплтона для учёта нестационарности и неоднородности ионосферы.

$$f(t, \omega, \mathbf{x}, \mathbf{k}) = \kappa^2 - \kappa_0^2 n^2(t, \omega, \mathbf{x}, \mathbf{k}, \mathbf{H}) \quad (14)$$

На основе дисперсионного соотношения записываются характеристические уравнения в канонической форме:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}}{d\tau} &= \mathbf{k} - \frac{\kappa_0^2}{2} \frac{dn^2}{d\mathbf{k}}; \\ \frac{d\mathbf{k}}{d\tau} &= \frac{\kappa_0^2}{2} \frac{dn^2}{d\mathbf{x}}; \\ \frac{d\omega}{d\tau} &= -\frac{\kappa_0^2}{2} \frac{dn^2}{dt}; \\ \frac{dt}{d\tau} &= \frac{1}{2c^2} \frac{d(\omega^2 n^2)}{d\omega}, \end{aligned} \quad (15)$$

После ряда преобразований затем получают систему уравнений, где для учёта геомагнитного поля Земли используется аналитическое представление компонент Н-вектора, полученное через модель IRI путём аппроксимации эмпирических данных.

Решение задачи определения координат воздушного объекта может быть кратко записано в виде следующих действий:

- задание распределения электронной концентрации (IRI);
- решение граничной задачи через ДАСФ-модель;
- вычисление максимальной применимой частоты прямой волны;
- моделирование лучевых траекторий для всех слоёв ионосферы;
- корректировка критических частот и высот слоёв;
- решение граничной задачи на частоте рассеянного сигнала;
- определение координат воздушного объекта по измеренным углам прихода и пробным дальности и высоте;
- решение двух граничных задач на трассах передатчик-объект, объект-приёмник;
- вычисление углов излучения, углов прихода и суммарных задержек;
- вычисление относительных задержек;

- сравнение измеренных и моделируемых задержек;
- принятие решения о завершении вычислений или изменения пробной высоты и дальности до объекта.

Применение ДАСФ модели к массиву экспериментальных данных за 2011-2019 гг. позволило выработать априорные знания о характере подсвета объекта на основе знака разности между задержкой рассеянной и прямой волны. Как показали результаты решения уравнений характеристик, во всех сеансах группы 1 (с положительным знаком разности) 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 (с отрицательным знаком разности) 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 результаты обработки данных ЛЧМ-ионозонда от 08:35 UT 04.06.2020 г., содержащие след рассеянного излучения воздушного объекта. Групповая задержка рассеянного излучения на всём интервале измерения была меньше групповой задержки прямой волны и составляла

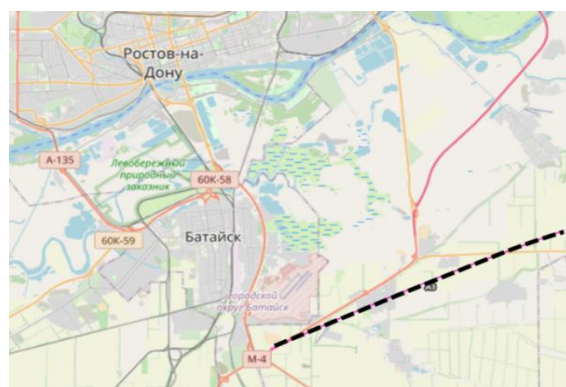


Рис.7 Результаты эксперимента с ЛЧМ-ионозондом

около 4.75 мс. Азимут изменялся в пределах $120^\circ - 160^\circ$, а угол места в среднем составлял около 30° . Результаты применения УИ модели показали, что радиальная дальность изменялась в пределах 21 – 25 км, начальная скорость составляла 227.5 м/с. По зависимости азимута от времени можно заключить, что объект двигался на запад, и на момент начала наблюдения находился на юго-востоке от расположения ионозонда. Всё сказанное иллюстрируется нанесённой на карту штриховой линией на Рис.7.

Цель следующего эксперимента состояла в сравнительном анализе результатов оценки траектории, полученных с применением ДАСФ и УИ моделей. Для анализа был выбран сеанс от 06:30 06.08.2017, поскольку в нём наблюдались рассеянные сигналы как с отрицательной (1), так и с положительной (2) задержкой относительно прямого сигнала подсвета моды Es. Результаты оценок с помощью УИ модели, изображены на Рис.8 в виде сплошных линий, ДАСФ модели – в виде штриховых. Чёрным и серым цветам соответствуют оценки траекторий объектов 1 и 2.

Объект 1 обладал отрицательной относительной групповой задержкой и двигался на юго-запад. Согласно оценкам на основе УИМ, его начальная



Рис.8 Результат эксперимента по сравнению ДАСФ и упрощённой моделей

скорость и высота полёта составляли 185 м/с и 8.5 км. Оценки на основе ДАСФ-модели дают траекторию, располагавшуюся ближе к приёмному пункту, вследствие чего оценочные значения скорости и высоты оказались меньше (159 м/с и 6 км). Объект 2 обладал положительной задержкой относительно волны подсвета и двигался на северо-восток. Оценки скорости и высоты полёта, полученные с применением различных моделей соответственно равны 2098 м/с и 88.4 км для УИМ и 2193 м/с и 105 км для ДАСФ. Из представленных численных значений оценок можно заключить, что характер смоделированных траекторий близок к доступным результатам измерений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Предложены модели распространения коротких волн в ионосферном канале: упрощённая имитационная модель, основанная на теоремах эквивалентности и позволяющая в масштабе реального времени получать

значения характеристик рассеянного излучения в месте расположения приёмного пункта, и ДАСФ модель, учитывающая нестационарность и неоднородность ионосферы, включая влияние геомагнитного поля.

Разработаны и реализованы алгоритмы автоматического выделения рассеянных следов движущихся объектов по результатам измерений различных программно-аппаратных комплексов КВ-диапазона. В основу алгоритмов положен анализ минимального расстояния между точками в многомерном пространстве измеряемых характеристик. Предложенный способ позволяет объединять в один трек временные зависимости характеристик рассеянного излучения при наличии разрывов в наблюдаемых данных.

Разработаны методы обнаружения и определения координат движущихся в тропосфере воздушных целей по результатам измерений временных зависимостей характеристик радиоизлучения. Методы основаны на применении разработанных моделей к данным различных измерительных комплексов: ОМДС, КВ-радиопеленгатора и ЛЧМ-ионозонда

Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие работоспособность разработанных методов и достоверность полученных результатов. В ходе экспериментов зарегистрированы рассеянные сигналы от воздушных объектов в декаметровом диапазоне на дальностях от 20 до 380 км со скоростями от 150 м/с до более 2000 м/с. Достоверность подтверждена тремя способами: сходимостью оценок при использовании различных моделей (упрощённой имитационной и ДАСФ), синхронными измерениями различными комплексами (ОМДС и радиопеленгатор), а также привлечением независимых методов (триангуляция).

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

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 YXONXS.
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).
5. 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, 5-7 октября 2022 г. – Омск: ОНИИП, 2022. – С. 49-51. – EDN TPIRVB.

6. Vertogradov, G. G. Moving Objects Parameters Estimation Based on Direction Finding of Broadcasting HF Radio Stations Scattered Radiation / Vertogradov G. G., Nesterov V. Y. // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russian Federation, 26-30 June 2023. – IEEE, 2023. – P. 256-259. – DOI 10.1109/RSEMW58451.2023.10202028.

7. Вертоградов, Г. Г. Оценка параметров движущихся объектов по результатам пеленгования рассеянного излучения широковещательных 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 (г. Воронеж, 18-20 апреля 2023 г.) : в 5 томах. Т. 4 / Министерство науки и высшего образования РФ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет", Физический факультет, АО "Концерн "Созвездие"". – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2023. – С. 202-208. – EDN SLFZAM.

8. 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.

9. 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 (г. Воронеж, 15–17 апреля 2025 г.) : в 6 т. Т. 3 4 / Министерство науки и высшего образования РФ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет", Физический факультет, АО "Концерн "Созвездие"". – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025. – С. 132-136. – EDN WJWEZL.

10. 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 г. – Казань : Издательство Казанского университета, 2025. – С. 258-261. – DOI 10.26907/rwp29.2025.258-261. – EDN JRFTRO.

11. Нестеров, В. Ю. Пассивная когерентная радиолокация объектов по результатам измерений задержки и углов прихода рассеянного радиоизлучения декаметрового диапазона / В. Ю. Нестеров, Г. Г. Вертоградов // Распространение радиоволн : труды XXIX Всероссийской открытой научной конференции, Казань, 30 июня – 4 июля 2025 года. – Казань : Издательство Казанского университета, 2025. – С. 262-265. – DOI 10.26907/rwp29.2025.262-265. – EDN RRBWFG.

12. Нестеров, В. Ю. О возможности оценки координат воздушных объектов на основе имитационных моделей распространения рассеянных волн декаметрового диапазона / В. Ю. Нестеров, Г. Г. Вертоградов // Всероссийская научная конференция «2025 Излучение и рассеяние электромагнитных волн» : ИРЭМВ-2025, 23-27 июня 2025 г., с. Дивноморское, Краснодарский край, Россия : сборник докладов. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2025. – С. 298-303.