

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.3>

УДК: 621.396.967

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА МНОГОМЕРНЫХ ИОНОГРАММ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В.Ю. Нестеров, Г.Г. Вертоградов

Южный федеральный университет,
344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42

Статья поступила в редакцию 10 октября 2025 г.

Аннотация. Представлен метод пассивной когерентной радиолокации для обнаружения и определения координат воздушных объектов на основе анализа многомерных ионограмм наклонного зондирования в КВ-диапазоне. Описан алгоритм автоматической селекции рассеянных сигналов, основанный на оценке минимального расстояния между точками в пространстве параметров: задержка, угол места, азимут, амплитуда. Представлены использованные для оценки траекторий источников рассеянного излучения имитационные модели: динамическая адаптивная структурно-физическая и упрощённая имитационная. Проверка работоспособности метода, выполненная на данных измерений, показала хорошие результаты для объектов, подсвеченных различными модами распространения волн (1Es и 2Es). Разработанный метод относится к классу track-before-detect и потенциально может быть использован в системах раннего обнаружения и сопровождения воздушных целей, включая объекты со сверхзвуковыми скоростями.

Ключевые слова: пассивная когерентная радиолокация, наклонное зондирование, КВ-диапазон, имитационная модель, сопровождение перед обнаружением.

Автор для переписки: Нестеров Вадим Юрьевич, vadnesterov@sfedu.ru

Введение

Современные радиолокационные технологии сталкиваются с рядом трудностей, связанных с необходимостью обнаружения движущихся объектов с низкой моностатической эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР) в условиях активных помех. По этой причине методы пассивной когерентной радиолокации (ПКР) приобретают особую актуальность за счёт использования сторонних источников радиоизлучения (вещательные станции, цифровые радиосети и др.). В результате, благодаря отсутствию передающей части обеспечивается высокая скрытность и сравнительно низкая стоимость системы [1,2]. В КВ-диапазоне, несмотря на ограничения, связанные с нестационарностью ионосферы, возможно обеспечить дальнейшее обнаружение воздушных объектов за счёт многоскачкового распространения радиоволн [3,4]. Одной из наиболее острых технических проблем, которые требуется решать при проектировании программно-аппаратных комплексов ПКР, является обнаружение слабого рассеянного сигнала на фоне мощного прямого сигнала подсвета [1]. Следует также отметить, что вследствие нестационарности ионосферного канала и наличия в ионосфере нескольких максимумов электронной концентрации, при работе в КВ-диапазоне прямой сигнал может иметь несколько изменяющихся со временем направлений прихода. Кроме того, поскольку в любой радиолокационной станции (не обязательно пассивной когерентной) амплитуда рассеянного сигнала может быть близкой к уровню тепловых шумов антенны, применение пороговых методов обнаружения связано с необходимостью компромисса между вероятностью ложного обнаружения и вероятностью пропуска цели. По этим причинам внимание многих исследователей направлено на радиолокационные методы класса «сопровождение-перед-обнаружением» (TBD, track-before-detect – англ.), когда в первую очередь решается задача оценки траектории, а затем принимается гипотеза о характере источника рассеянного излучения [5,6]. При регистрации ионограмм наклонного зондирования с синхронным обнаружением и оценкой

координат воздушных объектов применение TBD также представляется наиболее эффективным.

Целью данной работы является обнаружение и оценка координат движущихся в атмосфере Земли объектов. Решаемые задачи – разработка и проверка работоспособности метода обнаружения и сопровождения воздушных объектов по результатам регистрации и синхронного анализа многомерных ионограмм наклонного зондирования в КВ-диапазоне.

1. Описание программно-аппаратной части

Для построения ионограмм используется специализированный программно-аппаратный комплекс [7,8] – ионозонд-радиопеленгатор с линейной частотной модуляцией (ИРЛЧМ), блок-схема которого изображена на рис. 1. Комплекс состоит из антенной системы, многоканального когерентного радиоприёмного устройства (РПУ), блоков цифровой обработки сигнала (ЦОС), промышленной электронно-вычислительной машины (ПЭВМ), GPS-приёмника, синтезатора и разветвителя тактовой частоты, рубидиевого стандарта частоты и калибровочного генератора широкополосного шума.

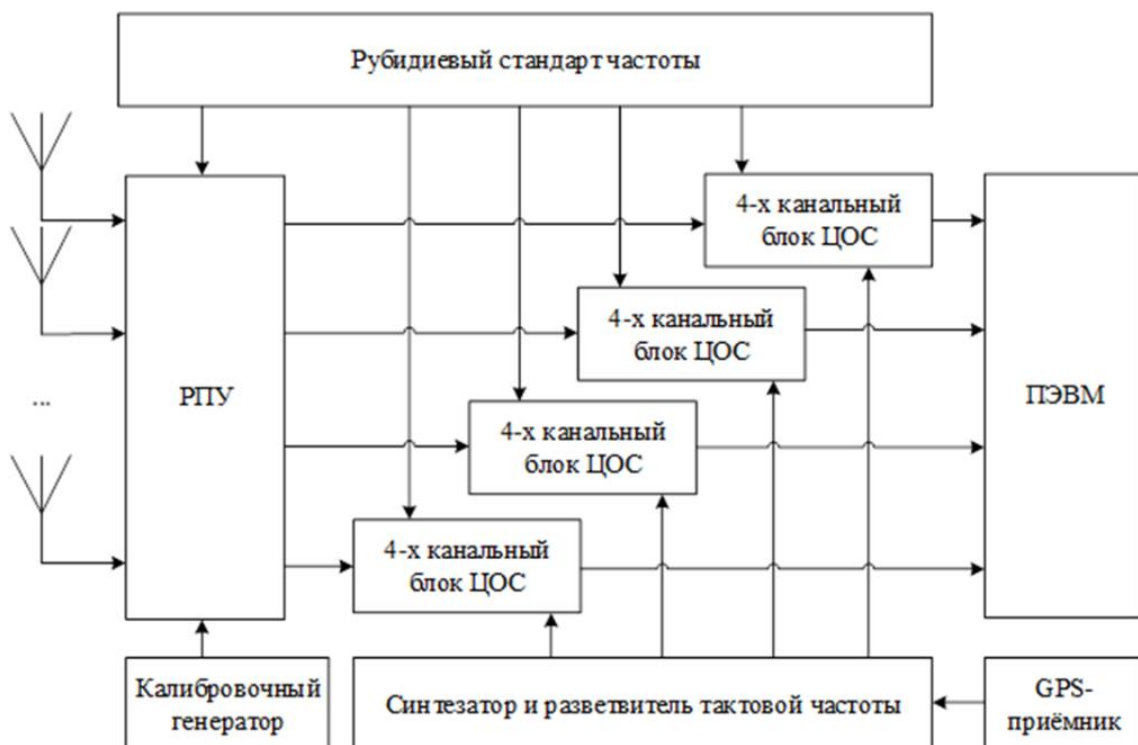


Рис. 1. Блок-схема ИРЛЧМ.

Принцип работы и подробное описание входящих в ИРЛЧМ устройств представлено в [8,9], поэтому здесь приведём лишь детали, необходимые для дальнейшего понимания. Антенная система ИРЛЧМ представляет собой решётку из 16 элементов, которая позволяет выполнять оценку углов прихода сигналов КВ-диапазона в двух плоскостях. Блоки ЦОС совместно с РПУ обеспечивают когерентный приём и формирование квадратурных компонент разностного сигнала. В ПЭВМ выполняется Фурье-преобразование принятого массива данных, оценка спектральной плотности мощности шума и сигнала. Там же выполняется объединение сигналов, коррелированных в частотной и пространственной областях, и оценка их углов прихода [9]. Таким образом, происходит формирование многомерных ионограмм на соответствующей трассе наклонного зондирования ионосферы, которые представляют собой амплитудно-частотную (АЧХ), дистанционно-частотную (ДЧХ) и двухмерные угло-частотную (УЧХ) характеристики.

В качестве источника излучения используется некооперативная загоризонтная радиолокационная станция КВ-диапазона «Плутон-2», расположенная на о. Кипр (35.167° С, 33.383° В). Станция расположена на удалении около 1500 км и по азимуту 203.2° от местоположения ИРЛЧМ в г. Ростове-на-Дону (47.239° С, 39.642° В). Передатчик «Плутона-2» работает круглосуточно и непрерывно в следующем режиме: начальная частота излучения – 8 МГц, период излучения – 5 мин, скорость перестройки частоты 100 кГц/с.

Пример ионограммы, соответствующей данной трассе, представлен на рис. 2, где на интервале частот 23-27 МГц можно наблюдать группу точек с близкими значениями углов прихода в вертикальной плоскости и групповой задержки, азимут которых отличается от направления на станцию подсвета. Поскольку азимут изменяется в зависимости от частоты (времени), можно заключить, что эти точки представляют собой рассеянный сигнал движущегося объекта. Для оценки его траектории требуется выполнить выделение в ручном режиме с помощью соответствующего программного обеспечения, либо при

помощи алгоритма автоматической селекции рассеянных сигналов. Результат ручного выделения представлен на рис. 2 в виде прямоугольников, обрамляющих группу точек.

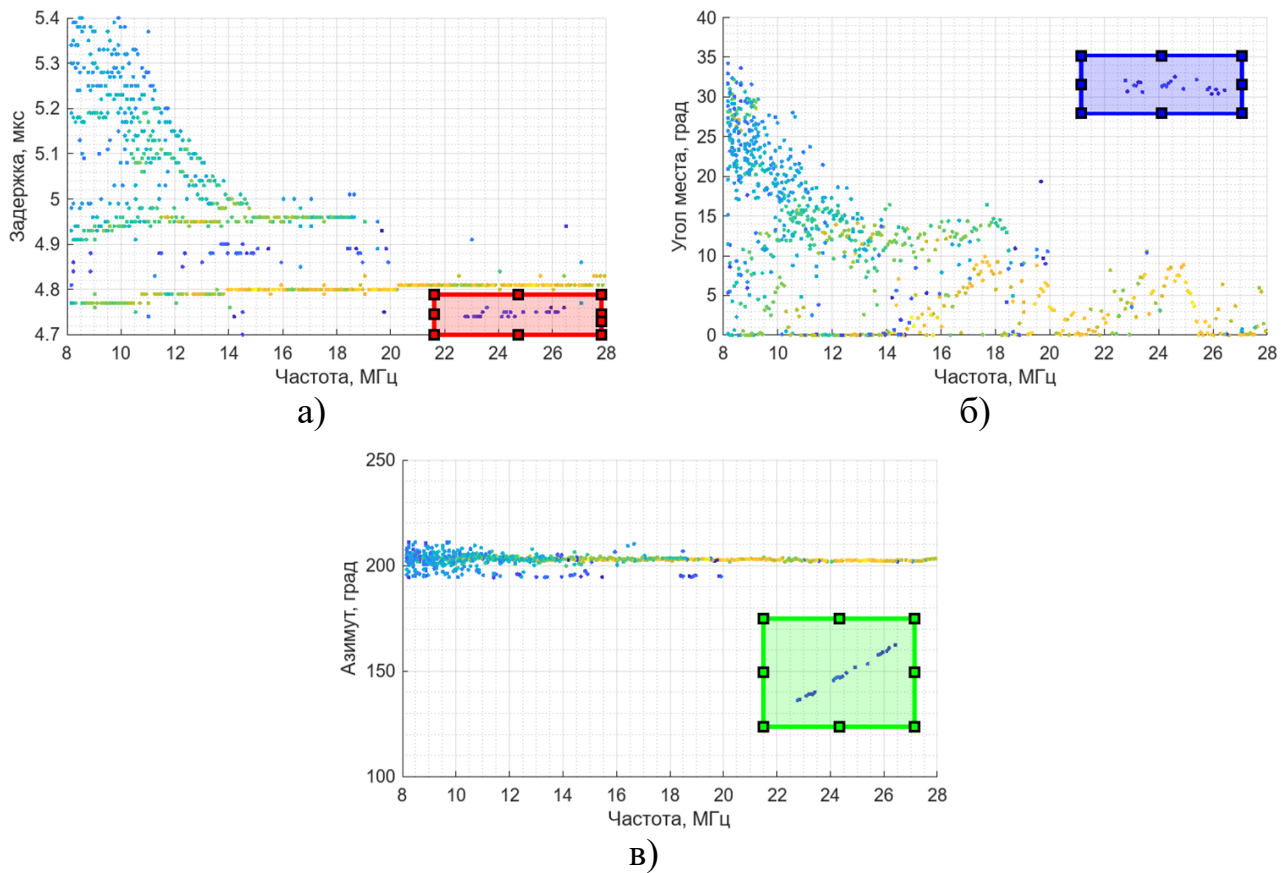


Рис. 2. Пример многомерной ионограммы наклонного зондирования:

- а) дистанционно-частотная характеристика,
б) и в) угло-частотные характеристики.

Наибольший интерес для синхронной оценки координат объектов представляет автоматическая селекция, алгоритм реализации которой состоит из следующих шагов:

– Выполняется предварительная подготовка в виде установки масштабирующих коэффициентов групповой задержки, угла места, азимута и амплитуды: $\Delta\tau$, $\Delta\varepsilon$, $\Delta\alpha$ и ΔE соответственно. На этом же шаге устанавливаются значения порогов соответствующих величин: τ^0 , ε^0 , α^0 и E^0 . Все указанные величины подбираются эмпирически на основе данных завершённых экспериментов.

– Совместно с началом регистрации ионограмм инициируется процедура ввода данных в виде точек i многомерного пространства {групповая задержка – угол места – азимут – амплитуда} в момент дискретного времени $t = 0$. В момент начала измерений все указанные точки принимаются за начало новых временных треков s_i .

– При следующем вводе набора точек j в момент дискретного времени $t = 1$ вычисляются безразмерные расстояния ρ_{ij} между каждой i и j точкой по формуле:

$$\rho_{ij} = \frac{(\tau_i - \tau_j)^2}{\Delta\tau} + \frac{(\alpha_i - \alpha_j)^2}{\Delta\alpha} + \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_j)^2}{\Delta\varepsilon} + \frac{(E_i - E_j)^2}{\Delta E}. \quad (1)$$

– Точка j принимается принадлежащей треку s_i в том случае, если выполняются следующие условия:

$$j = \operatorname{argmin}(\rho_{ij}) \wedge \begin{cases} \tau_i - \tau_j < \tau^0 \\ \alpha_i - \alpha_j < \alpha^0 \\ \varepsilon_i - \varepsilon_j < \varepsilon^0 \\ E_i - E_j < E^0 \end{cases}. \quad (2)$$

В противном случае, точка j считается началом нового трека.

– Для устранения разрывов во временных треках при вводе данных в момент времени $t = N$ вычисления расстояний ρ_{ij} повторяются для точек, принадлежащих не только $t = N - 1$, но и для $t = N - 2$ и $N - 3$.

– Наконец, выполняется фильтрация полученных треков. На этом шаге отбрасываются те из них, которые содержат малое число точек, слабо изменяются по координатам (τ , ε и α).

В результате применения алгоритма синхронно с проводимыми измерениями формируется временная зависимость угла места, азимута, амплитуды и задержки рассеянного сигнала.

2. Описание используемых моделей

Для оценки пространственной траектории движущихся объектов по результатам селекции рассеянных сигналов используется одна из двух моделей распространения ионосферной волны. Первая – динамическая адаптивная структурно-физическая (ДАСФ) модель, основанная на геометрикооптическом приближении [10], которая в силу вычислительной трудоёмкости не может работать в реальном масштабе времени. Вторая – упрощённая имитационная (УИ) модель, основанная на теоремах эквивалентности и предназначенная для реализации синхронного с измерением ионограмм обнаружения и оценки координат в реальном масштабе времени.

В основе ДАСФ-модели лежат исходные положения, согласно которым поле в месте расположения приёмной станции определяется интерференцией малого множества дискретных лучей, их число и параметры определяются глобальной регулярной неоднородностью ионосферы и среднемасштабными возмущениями электронной концентрации, перемещения которых описывают динамику интерференционного поля в нестационарной среде. Мелкомасштабные неоднородности в модели задаются с помощью статистических методов. В качестве математической модели среды используется динамически адаптирующаяся мультипликативная модель пространственного распределения ионизации, основанная на эмпирических моделях IRI [10,11]. Для траекторных и энергетических расчётов параметров коротких волн методом характеристик [12] решается уравнение Гамильтона-Якоби для эйконала f в виде дисперсионного соотношения, связывающего комплексный показатель преломления Эпплтона n , волновой вектор k :

$$f(t, \omega, x, k) = k^2 - k_0^2 n^2(t, \omega, x, k, H), \quad (3)$$

где x и t – пространственные и временная координаты, ω – круговая частота, H – вектор магнитного поля Земли.

Результат решений представленного уравнения для массива данных измерений, проводившихся с 2011 года, позволяет сделать определённые заключения об априорных свойствах распространения ионосферных волн на трассе Кипр – Ростов-на-Дону, благодаря которым становится возможным применять упрощённую модель. Как оказывается, во-первых, рассеянные сигналы движущихся объектов наблюдаются только при наличии спорадического слоя Es. Во-вторых, все проводившиеся радиолокационные сеансы можно классифицировать по числу скачков рассеянной волны на основе величины соответствующей задержки. В зависимости от знака разности между задержками рассеянной и прямой ионосферных волн можно с уверенностью говорить о распространении 1Es или 2Es моды.

Геометрия УИ-модели, таким образом, может быть схематично изображена на рис. 3 Приёмный пункт располагается в точке А, некооперативный источник излучения находится в точке В, ионосфера моделируется идеальным сферическим отражателем на высоте h_d . Действующая высота определяется на основе значений угла места прямой волны E_s слоя на ионограмме и теорем эквивалентности [3]. Переход в декартову систему координат сопровождается переносом точки В в точку С, расположенную таким образом, что длина отрезка АС равна длине дуги АВ. Далее, путём геометрических построений могут быть определены точки расположения мнимого источника $1E_s$ или $2E_s$ – С' и С'', соответственно.

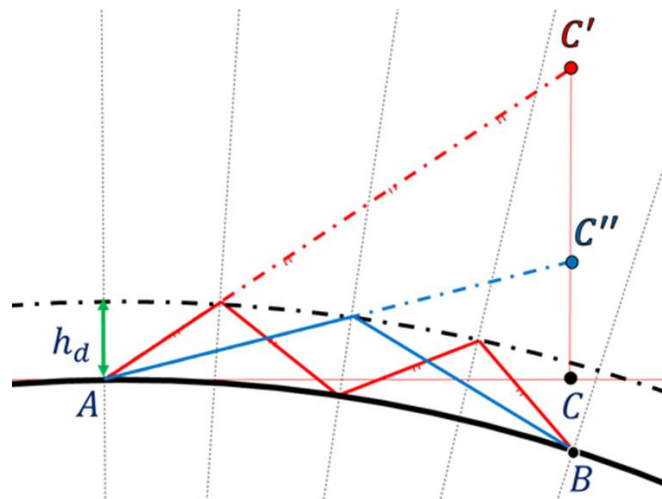


Рис. 3. Геометрия упрощённой имитационной модели.

Поместим теперь пробный источник рассеянного излучения в виде движущегося воздушного объекта с постоянной и изотропной ЭПР в некоторую точку пространства. Углы прихода и групповой путь рассеянного излучения определяются из геометрических построений на рис. 3. Задержка рассеянной волны теперь может быть получена как отношение группового пути к скорости распространения, которая в данном случае принимается равной скорости света в вакууме. Невязка χ между измеренными (индекс M) и моделируемыми (индекс S) временными зависимостями характеристик рассеянной волны за время наблюдения T , как функция вектора начальных координат, скорости, ускорения и средней за период наблюдения ЭПР, теперь может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \chi = & w_{\tau} \sqrt{\sum_{t=0}^T (\tau_M(t) - \tau_S(t))^2} + w_{\varepsilon} \sqrt{\sum_{t=0}^T (\varepsilon_M(t) - \varepsilon_S(t))^2} + \\ & + w_E \sqrt{\sum_{t=0}^T (E_M(t) - E_S(t))^2} + w_{\alpha} \sqrt{\sum_{t=0}^T (\alpha_M(t) - \alpha_S(t))^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где w_{τ} , w_{ε} , w_E и w_{α} – масштабирующие коэффициенты.

Оценка векторов начальных координат, скоростей и ускорения движущегося объекта есть результат минимизации невязки χ методом наименьших квадратов. Временная зависимость координат вычисляется на основе векторных уравнений движения. Следует также отметить, что длины T векторов в выражении (4) изменяются синхронно с вводом новых данных ионограммы.

3. Проверка работоспособности метода

Проверка работоспособности метода выполнена путём сравнения оценок временных зависимостей координат, полученных с применением более точной ДАСФ-модели и УИ-модели реального времени. Для сравнения была выбрана многомерная ионограмма, зарегистрированная в 06:30 06.08.2017 г. Выбор обусловлен наличием на ионограмме двух типичных временных зависимостей

рассеянных волн, отличающихся друг от друга значением групповой задержки относительно прямой волны. Относительная задержка, полученная по результатам измерений, изображена сплошной чёрной линией на рис. 4 (а) для объекта 1 и на рис. 4 (б) для объекта 2. Временные зависимости угловых координат, соответствующих рассеянным указанными объектами волнам приведены на рис. 4 (в) и рис. 4 (г), соответственно, азимут показан штриховой серой линией, угол места – штриховой чёрной.

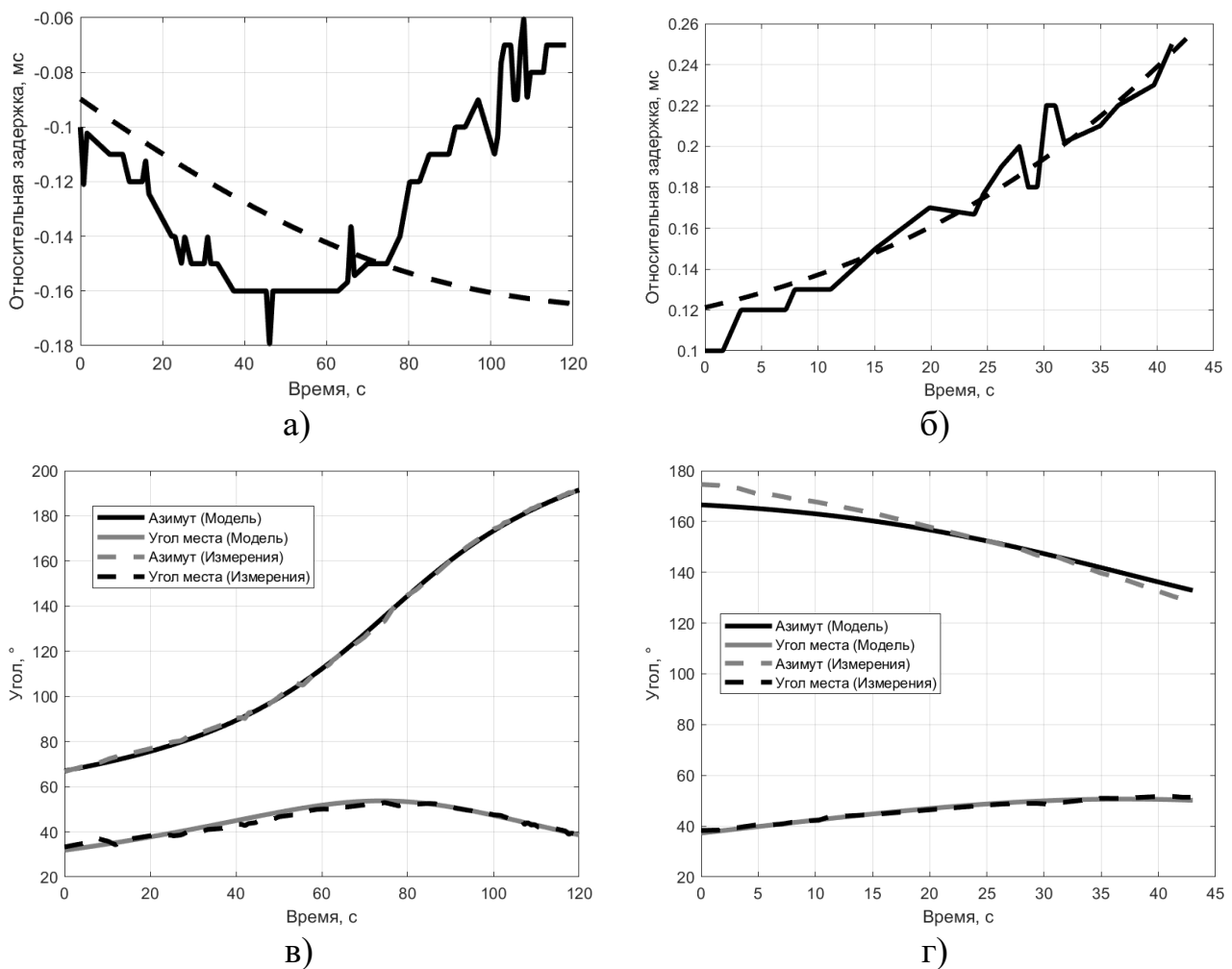


Рис. 4. Зависимость относительной задержки и углов прихода рассеянного излучения от времени.

Проанализируем вначале зависимости азимута от времени. Объект 1 стал доступен для наблюдения в тот момент, когда он находился на северо-востоке от пункта приёма, двигался на юго-запад и вышел из зоны видимости спустя 120 секунд. Объект 2 вначале находился в южной стороне, и спустя 40 секунд перестал наблюдаться, двигаясь на северо-восток. По характеру

угломестной зависимости можно сделать вывод, что объект 1 находился на минимальном удалении от приёмного пункта приблизительно через 80 секунд после начала формирования временного трека. Объект 2 двигался таким образом, что расстояние до него от пункта приёма монотонно уменьшалось в течение всего времени наблюдения.

Перейдём теперь к результатам, полученным в результате применения разработанного метода. В первую очередь, на основе знака относительной задержки примем предположение, что подсвет объекта 1 происходил модой $2E_s$, а объекта 2 – $1E_s$. Далее, по формулам (1-2) получим оценки значений начальных координат, скоростей и ускорений для обоих объектов. Согласно оценкам на основе УИ-модели, скорость и высота полёта объекта 1 составили 185 м/с и 8.5 км. Оценки на основе ДАСФ-модели получаются меньше и соответственно равны 159 м/с и 6 км. Оценки скорости и высоты полёта объекта 2, полученные с применением различных моделей соответственно равны 2098 м/с и 88.4 км для УИ и 2193 м/с и 105 км для ДАСФ. Здесь следует отметить, что воздушные объекты, подобные объекту 2, крайне редко встречаются в имеющихся ионограммах, тем не менее, имеется ряд случаев регистрации движения со сверхзвуковыми скоростями. Временные зависимости относительных задержек, полученных с помощью УИ-модели, для двух объектов, соответственно, показаны на рис. 4 (а) и (б) штриховыми линиями. Зависимости угловых координат от времени обозначены на рис. 4 (в) и (г) в соответствии с легендой, нанесённой на график.

Для полученных оценок начальных координат, скоростей и модуля ускорений изобразим на географической карте соответствующие им траектории на рис. 5 Чёрным и серым цветам соответствуют оценки траекторий объектов 1 и 2, сплошными линиями показаны результаты применения УИ-модели, штриховой – ДАСФ. Из представленных численных значений оценок можно заключить, что для объекта 2 УИ-модель показывает более точные в смысле совпадения с ДАСФ-моделью результаты, чем для объекта 1, однако в целом имеет место удовлетворительное соответствие эталонным траекториям.



Рис. 5. Результаты оценки траекторий объектов, нанесённые на географическую карту.

Заключение

Разработанный метод позволяет решать задачу обнаружения движущихся в атмосфере Земли объектов и оценки их координат на основе анализа многомерных ионограмм наклонного зондирования в КВ-диапазоне и может быть отнесён к классу радиолокационных методов «track-before-detect». Для регистрации многомерных ионограмм использован программно-аппаратный комплекс – ионозонд-радиопеленгатор КВ-диапазона, состоящий из антенной системы, многоканального радиоприёмного устройства и блоков цифровой обработки сигналов. Ионозонд обеспечивает когерентный приём сигналов некооперативной загоризонтной радиолокационной станции, расположенной в 1500 км от пункта приёма.

Подробно описан алгоритм автоматического выделения рассеянных следов из ионограмм, основанный на оценке минимального расстояния между точки многомерного пространства и последующей фильтрацией выделенных треков. Приведены исходные положения для построения динамической адаптивной структурно физической модели распространения ионосферных волн, использованной для получения эталонных оценок траекторий движущихся объектов, и упрощённой имитационной модели для реализации метода синхронно с измерением ионограмм.

Проверка работоспособности разработанного метода показывает удовлетворительные результаты оценки координат движущихся объектов двух типов, отличающихся знаком относительной задержки между рассеянной и прямой волной и, соответственно, модой подсвечивающей волны, распространяющейся на трассе Кипр – Ростов-на-Дону.

Литература

1. Бархатов А. В., Веремьев В. И. Воробьев Е. Н., Коновалов А. А., Ковалев Д. А., Кутузов В. М., Михайлов В. Н. Пассивная когерентная радиолокация. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. – 163 с.
2. Willis N. J. Bistatic radar. – Artech House, 1995. – 329 p.
3. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир. 1973. – 504 с.
4. 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.) М. : ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2010. С. 264–268.
5. Костромицкий, С. М. Оценка энергетического выигрыша при обнаружении малоразмерных целей методом "сопровождение до обнаружения" / С. М. Костромицкий, Д. С. Нефедов // Вестник Концерна ВКО "Алмаз – Антей". – 2022. – № 3. – С. 67-78.

6. Yan, B. A track-before-detect algorithm for UWB radar sensor networks / B. Yan, A. Giorgetti, E. Paolini // *Signal Processing*. – 2021. – Vol. 189. – P. 108257. – <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108257>. – EDN MMVUJB.
7. Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г., Нестеров В. Ю. // Применение ЛЧМ-радиопеленгатора декаметрового диапазона волн для оценки параметров объектов, движущихся в атмосфере Земли / *Радиотехника*. – 2023. – Т. 87, № 12. – С. 32-40.
8. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Скляревский М. С., Валов В. А. // Наклонное зондирование ионосферы с помощью ионозонда-радиопеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала / *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. – 2016. – Т. 59, № 11. – С. 991-1003. – EDN XHASLZ.
9. Uryadov, V.P., Vertogradov, G.G., Vertogradova, E.G., Vertogradov, V.G. A New Tool for Investigating Complex Ionospheric Structures: Over-the-horizon high-frequency sounding of ionospheric irregularities with a chirp ionosonde-direction finder // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2017. V.59, N.6. P.62-76. <https://doi.org/10.1109/map.2017.2752687>.
10. Барабашов Б.Г., Вертоградов Г.Г. Динамическая адаптивная структурно-физическая модель ионосферного радиоканала // *Математическое моделирование*. 1996. Т. 8. № 2. С. 3-18.
11. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L., Reinisch B. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration, *J. Space Weather Space Clim.* 4 A07 (2014), <https://doi.org/10.1051/swsc/2014004>.
12. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю. А. Кравцов, Ю. И. Орлов. – М.: Наука, 1980. – 304 с.: ил + Библиогр.: с. 280-300.

Для цитирования:

Нестеров В.Ю., Вертоградов Г.Г. Метод обнаружения и определения координат воздушных объектов по результатам анализа многомерных ионограмм наклонного зондирования. // *Журнал радиоэлектроники*. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.3>