УДК: 537.87 DOI: 10.26907/rwp29.2025.258-261

ОЦЕНКА КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ, ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ УГЛОВ ПРИХОДА РАССЕЯННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В КВ-ДИАПАЗОНЕ

В.Ю. Нестеров, Г.Г. Вертоградов

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону;
E-mail: vadnesterov@sfedu.ru; vertogradovgg@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты обнаружения и оценки координат объектов, движущихся в атмосфере Земли, полученные с помощью предлагаемого алгоритма обработки результатов измерений КВ-радиопеленгатора. Предложен алгоритм первичной обработки данных, алгоритм автоматического выделения рассеянных следов и простейшая, работающая в реальном времени имитационная модель для оценки пространственного положения объекта, его скорости и ускорения. Приводятся экспериментальные оценки дальности до объекта, подтвержденные методом триангуляции с использованием двух пространственно-разнесенных пеленгаторов.

Ключевые слова: пассивная когерентная радиолокация, оценка координат, углы прихода, доплеровское смещение

ESTIMATION OF MOVING OBJECTS COORDINATES IN THE EARTH'S ATMOSPHERE BASED ON THE MEASURED ANGLES OF ARRIVAL OF SCATTERED RADIATION IN THE HF-BAND

V.Y. Nesterov, G.G. Vertogradov

Abstract. The results of detection and estimation of coordinates of objects moving in the Earth's atmosphere, obtained using the proposed algorithm for processing the results of HF radio direction finder measurements are presented. An algorithm for initial data processing, an algorithm for identifying scattered traces, and a simple, primarily working simulation model for measuring the spatial position of an object, its speed, and acceleration are described. Experimental estimates of the distance to the object are given and verified with triangulation method using two spatially separated direction finders.

Keywords: passive coherent location, coordinates of assessment, angles of arrival, doppler shift

Введение

Системы полуактивной (пассивно-когерентной) радиолокации используют для обнаружения объектов, рассеивающих сигналы сторонних источников электромагнитного излучения. Отсутствие передатчиков в составе системы позволяет достичь высокой скрытности и низкой стоимости. Эти достоинства поддерживают актуальность пассивно-когерентных радиолокационных станций (ПКРЛС) на протяжении последних десятилетий [1].

Использование указанных систем в КВ-диапазоне позволяет решать задачу пассивной когерентной локации за счёт распространения многоскачковых ионосферных волн и их дифракции над морской поверхностью [2-4]. Другой причиной интереса исследователей к проблеме построения ПКРЛС в этом диапазоне является широкий выбор широковещательных станций (ШВС), которые могут быть использованы для подсвета объектов. Принимая во внимание, что многие из них работают с неподавленной несущей частотой, можно предложить варианты построения сравнительно небольших и недорогих программно-аппаратных комплексов (ПАК) с низкими вычислительными затратами.

Так, например, задачу обнаружения движущихся в тропосфере объектов можно решить по результатам однопозиционных измерений доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) одноканальным многочастотным стендом и совместного имитационного моделирования [5]. Результаты такой оценки координат будут лишены неоднозначности либо при одновременном наличии двух и более сигналов подсвета, либо при одновременном измерении углов прихода и ДСЧ рассеянного излучения. В последнем случае надёжность ПКРЛС повышается. Программно-аппаратный комплекс, позволяющий обнаруживать рассеянный сигнал при помощи одновременного измерения углов прихода и ДСЧ, был создан в Южном федеральном университете [6].

Целью данной работы является разработка способа обнаружения и оценки координат движущихся объектов на основе результатов измерений углов прихода и доплеровского смещения частоты рассеянного излучения.

Описание программно-аппаратной части

В ходе экспериментов использовались радиопеленгаторы КВ-диапазона [7–9], расположенные в точках с координатами 47.239°С, 39.642°В ($ПАК_1$) и 47.107°С, 39.808°В ($ПАК_2$). Наличие двух радиопеленгаторов на удалении около 19.3 км друг от друга позволило определять истинную дальность до объектов наблюдения методом триангуляции.

В состав одного радиопеленгатора [6] входила антенная решётка из 8 пассивных штыревых антенн высотой 9 м, развёрнутая на площадке 40 на 40 метров, 8-канальный приёмник прямого усиления и ЭВМ. Принимаемый каждой антенной сигнал подвергался аналогово-цифровому преобразованию в полосе 4 МГц, фильтрации и децимации к частоте дискретизации 1 кГц для получения выборок порядка 17 с. Такая длительность выборки обеспечивала спектральное разрешение до 0.06 Гц. Принятые выборки обрабатывались в ЭВМ. Реализованный в ЭВМ алгоритм первичной обработки [7–9] включал в себя Фурье-преобразование выборок, оценку СПМ сигналов и шума, объединение сигналов, коррелированных в частотной и пространственной областях. Далее выполнялась оценка углов прихода методом MUSIC [10], оценка ДСЧ и амплитуд сигналов. В результате применения алгоритма на внешнем запоминающем устройстве сохранялись измеренные значения азимута α_m, угла места ε_m, амплитуды E_m и ДСЧ δf_m зарегистрированных сигналов.

После первичной обработки и сохранения данных на запоминающем устройстве выполнялась автоматическая селекция временных треков [5]. Для этого в каждый момент времени измерения t с шагом, равным длительности выборки, рассматривались расстояния между соседними точками многомерного пространства ДСЧ-азимут-угол места $\{\delta f^t, \alpha^t, \varepsilon^t\}$. В случае, если расстояние не превышало заданного порога, точки считались принадлежащими одному треку. По величине амплитуды и ДСЧ принималось решение, принадлежит трек сигналу, рассеянному от объекта, или прямому сигналу станции подсвета.

Для определения координат объектов по временным зависимостям характеристик рассеянного излучения использовалась простейшая модель многоскачкового ионосферного распространения. Ионосфера представлялась в виде идеального сферического отражателя, отдалённого от сферической Земной поверхности на расстоянии действующей высоты, которая вычислялась на основе результатов зондирования ионосферы или модели IRI и корректировалась по измеренным значениям углов прихода волны подсвета [11]. Путём последовательного отражения всех участков лучевой траектории производился переход к координатам мнимого источника. При заданной геометрии модели варьировались эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта, его начальные координаты, модуль и направление начальной скорости и начального ускорения. Для каждого пробного набора входных параметров записывались уравнения движения и вычислялись зависимости от времени характеристик рассеиваемого объектом излучения – углов прихода $\hat{\alpha}^t{}_m$ и $\hat{\varepsilon}^t_m$, ДСЧ $\delta\hat{f}^t{}_m$ и амплитуды $\hat{E}^t{}_m$. На основе проведённых вычислений оценивалась и минимизировалась методом наименьших квадратов величина невязки между измеренными и моделируемыми зависимостями. При достижении минимального значения L, на запоминающем устройстве сохранялись значения входных параметров, соответствующие составленным уравнениям движения.

Результаты моделирования и измерений

В качестве станции подсвета в проведённых экспериментах использовалась ШВС с частотой вещания 17650 кГц China Radio International Kashi-Saibagh, расположенная в точке с координатами 39.215°С, 75.426°В. Дальность и азимут передатчика ШВС от приёмного пункта составили 3017.5 км и 93.5°, соответственно.

Рассмотрим результаты применения алгоритма на примере двух радиолокационных сеансов от 09.09.2019: в 11:39 UT (сеанс 1) и в 11:44 UT (сеанс 2).

На рис. 1. представлены измеренные и смоделированные зависимости ДСЧ для указанных сеансов. Абсолютная разница значений измеряемого и моделируемого параметра составляет не более 2 Гц и 0.6 Гц для сеанса 1 и 2, соответственно.

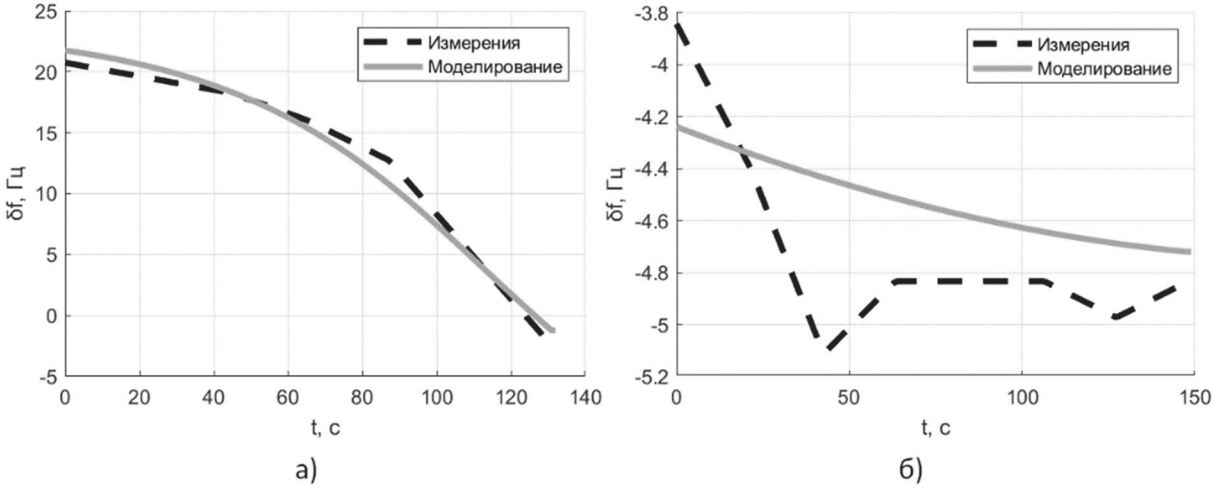

Рис. 1. Зависимость ДСЧ от времени, а) сеанс 1, б) сеанс 2

На рис. 2. показаны зависимости азимута и угла места от времени по результатам измерений и моделирования. В сеансе 1 азимут изменяется от 256.9° до 314.1°, что соответствует движению объекта, находящего к северо-западу от РПУ, на северо-восток. Угол места варьируется в пределах от 21.2° до 41.7°. В сеансе 2 азимут изменяется от 51.8° до 50°, что соответствует движению объекта, находящего к северо-востоку от РПУ, на север. Угол места варьируется в пределах от 10.8° до 11.9°.

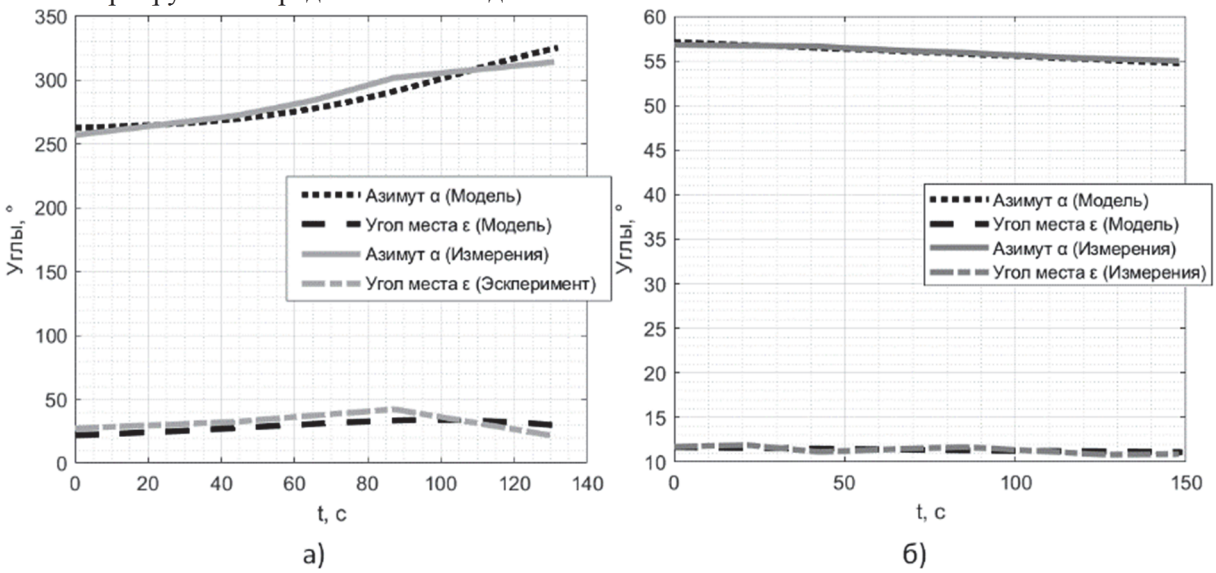

Рис. 2. Зависимость углов прихода от времени, а) сеанс 1, б) сеанс 2

На рис. 3 представлены зависимости радиальной дальности до объекта из точки приёма от времени, полученные предложенным способом и методом триангуляции, при обработке совместных измерений углов прихода ПАК$_1$ и ПАК$_2$.

За длительность радиолокационного сеанса 2 дальность изменилась с 384.5 до 389.4 км. Результаты расчёта дальности методом триангуляции в сеансе 2 имеют большую дисперсию, вследствие большой удалённости объекта от линии базы. Тем не менее, можно сказать, что отличие между результатами расчётов двумя методами составляет не более 15%. Отличие между результатами оценки дальности в сеансе 1 двумя методами составляет не более 13%.

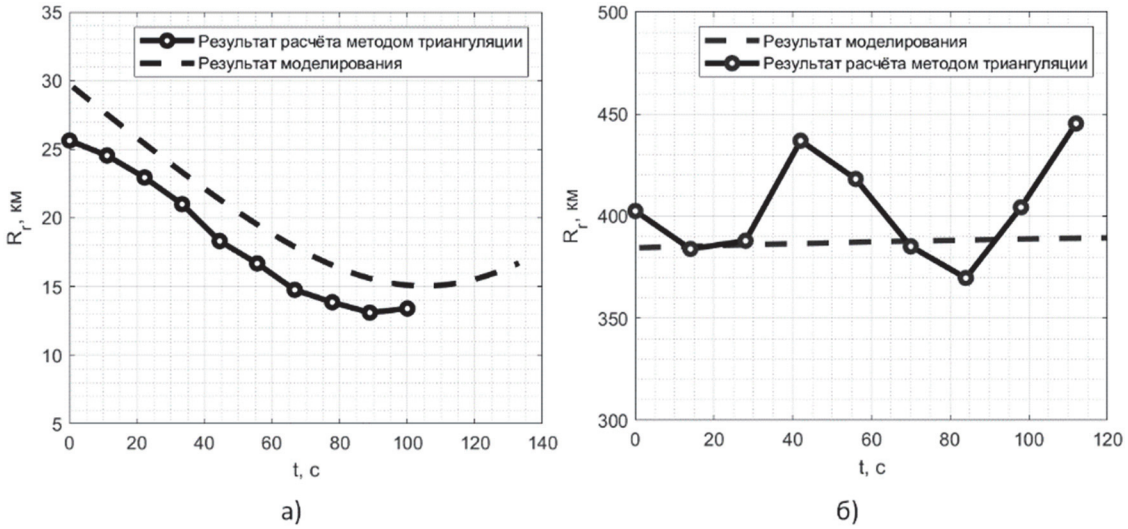

Рис. 3. Зависимость радиальной дальности от времени, а) сеанс 1, б) сеанс 2

Заключение

Разработанный способ, основанный на результатах измерений углов прихода и доплеровского смещения частоты рассеянного излучения, показал возможность обнаружения и оценки координат объектов, находящихся на удалении порядка 380 км. Для обнаружения объектов и определения их пространственного положения, скорости и ускорения использовался предложенный алгоритм автоматического выделения рассеянных следов из результатов измерений и простейшая имитационная модель многоскачкового распространения ионосферных волн с минимизацией невязки между измеренными и моделируемыми характеристиками. Наличие двух пеленгаторов позволило подтвердить методом триангуляции оценки дальности, полученные предложенным способом.

Список литературы

1. Пассивная когерентная радиолокация / Бархатов А.В., Веремьев В.И. Воробьев Е.Н. и др. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 163 с.
2. Бархатов А.В., Веремьев В.И., Родионов В.А., Куприянов С.В. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2015. – Т. 8. – № 4. – С. 50–54.
3. Ткачев Г.Н., Готовчиц И.В., Крылов Б.Н. // 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.
4. Ткачев Г.Н., Готовчиц И.В., Крылов Б.Н. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2011. – № 4. – С. 34–41.
5. Вертоградов Г.Г., Нестеров В.Ю. // Техника радиосвязи. – 2022. – № 4 (55). – С. 7–15.
6. Пархоменко Н.Г., Вертоградов Г.Г., Яровой И.А., Шевченко В.Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2011. – Т. 16. – № 5. – С. 73–76.
7. Пат. №2190236 РФ 7G01S 5/0, заявл. 13.09.2000, опубл. 27.09.2002. Способ обнаружения и определения двухмерного пеленга и частоты источников радиоизлучения / Шевченко В.Н., Емельянов Г.С., Вертоградов Г.Г.
8. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Чайка Е.Г., и др. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2017. – Т. 60. – № 12. – С. 1072–1092.
9. Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Чайка Е.Г. // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. – 2019. – Т. 5. – С. 116–133.
10. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
11. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973. – 504 с.