

УДК 621.396.969

Алгоритм обнаружения и определения координат объекта с использованием двулучевого метода загоризонтной радиолокации

Алешкин А. П., Артющкин А. Б., Дуников А. С., Никифоров С. В.

Постановка задачи: потенциальная возможность загоризонтных радиолокационных станций обнаруживать объекты, находящиеся за пределами прямой видимости, на удалении сотен и тысяч километров актуализирует вопросы снижения погрешности выполняемых с их помощью измерений. Известные способы обнаружения и определения координат целей станциями загоризонтной радиолокации не позволяют оценивать вектор состояния этих объектов с точностью, достаточной для однозначного определения местоположения или построения их траекторий. **Целью работы** является повышение точности измерений, выполняемых загоризонтными радиолокационными станциями. Для этого предлагается применять алгоритм обнаружения и определения координат объекта, основанный на использовании двух лоцирующих лучей. **Используемые методы.** Решение задачи обнаружения и определения координат объекта основано на использовании вновь разработанного двулучевого метода загоризонтной радиолокации, методов геометрической оптики, а также применении адекватных моделей канала распространения радиолокационных сигналов и способов уточнения их текущих параметров. **Новизна.** Элементами новизны представленного решения являются использование для определения координат объекта двух радиолокационных лучей, а также применение оптимизационных процедур с целью уточнения параметров используемой модели канала распространения сигналов. **Результат.** На основе вновь разработанного двулучевого метода загоризонтной радиолокации был обоснован алгоритм обнаружения и определения координат одиночной цели. Использование представленного алгоритма дает возможность значительно повысить точность определения положения цели, позволяя переходить при его описании от понятия «тело ошибок» к понятию «точка пересечения кривых неопределенности», то есть – к конкретной точке в пространстве координат. **Практическая значимость.** Представленный алгоритм предлагается реализовать в виде математического обеспечения для работы вычислителей современных средств загоризонтной радиолокации.

Ключевые слова: загоризонтная радиолокация, математическая модель ионосферы, координаты объекта, тело ошибок, обнаружение сигнала.

Актуальность

Поддержание безопасности транспортных сообщений с использованием морских и воздушных судов на необходимом уровне требует постоянного контроля присутствия и характера поведения данных средств на маршруте следования. В том числе, данная задача должна решаться и в случае нахождения судна вне зоны ответственности штатных средств наблюдения, например, на значительном удалении от береговой линии. В экстренных

Библиографическая ссылка на статью:

Алешкин А. П., Артющкин А. Б., Дуников А. С., Никифоров С. В. Алгоритм обнаружения и определения координат объекта с использованием двулучевого метода загоризонтной радиолокации // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 40–48. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-01/04-Aleshkin.pdf>

Reference for citation:

Aleshkin A. P., Artjushkin A. B., Dunikov A. S., Nikiforov S. V. Algorithm of Detection and Determining Coordinates of Object for the Over-the-Horizon Radar Based on the Two-Beam Scanning Method. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 1, pp. 40–48. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-01/04-Aleshkin.pdf> (in Russian).

ситуациях не редки случаи нарушения связи с экипажами судов, что негативно сказывается на эффективности проводимых поисково-спасательных операций. Дополнительным источником информации в таких случаях могут служить станции загоризонтной радиолокации, позволяющие контролировать обширные районы на значительном (до нескольких тысяч километров) удалении.

С момента зарождения загоризонтной радиолокации (ЗГ РЛ) в 1940-х годах, развитие ее происходило крайне неравномерно. Темп процесса определялся, в основном, уровнем развития элементной базы, доступной разработчикам на тот момент, возможностями существующих образцов вычислительной техники, наличием эффективных методов и алгоритмов формирования и обработки сигналов.

В основе реализованных на сегодняшний день методов ЗГ РЛ пространственной волны лежит принцип использования единственного зондирующего луча. При этом точность определения координат объектов для таких методов невелика – погрешность может составлять несколько десятков километров. К главным причинам этого можно отнести, во-первых – высокую нестабильность ионосферного слоя, служащего основной средой распространения сигнала ЗГ РЛС, во-вторых – очень широкий телесный угол отраженного ионосферой луча, который, по сути, является эквивалентом диаграммы направленности антенны обычных РЛС, в-третьих – слабый отраженный сигнал и высокий уровень помех.

Значительно повысить точность определения вектора цели позволяет двулучевой метод ЗГ РЛ, предложенный в [1].

Как следует из названия метода, для определения текущих навигационных параметров (ТНП) лоцируемых целей предполагается использование двух сигнальных лучей.

Под сигнальным лучом понимается совокупность траекторий, занимающих некоторую полосу Δf частотных составляющих радиолокационного сигнала с центральной частотой f_{cp} , ширина которой определяется пространственно-временными характеристиками распространения данных составляющих и позволяет считать τ – групповую задержку сигнала относительно момента излучения, мерой пройденного им расстояния до цели и обратно.

Главная задача ЗГ радиолокационной станции (РЛС) состоит в обнаружении цели и определении с требуемой точностью ее траектории. Эта задача включает:

- 1) обнаружение эхо-сигнала от цели при одном положении передающего луча радиолокатора и определение по обнаруженному радиосигналу местоположения цели (отметки от цели) в некоторый момент времени t ;
- 2) организацию просмотра зоны действия ЗГ РЛС для обнаружения эхо-сигналов от всех целей, находящихся в зоне действия, и определение их местоположения;

- 3) обнаружение траектории цели путем получения не менее двух отметок от цели;
- 4) уточнение обнаруженной траектории цели в режиме захвата, т.е. получение такой точности знания траектории, которая допускает последующее регулярное наблюдение цели в режиме сопровождения.

Антенные системы (АС) ЗГ РЛС не позволяют выполнять измерения углов прихода сигналов в меридиональной плоскости с необходимой точностью. Это приводит к необходимости полагать, что угол приема эхо-сигнала может быть любым из множества углов, принадлежащих раскрыву диаграммы направленности Θ АС. При этом границы раскрыва определяются индивидуально для каждого конкретного режима работы ЗГ РЛС, исходя из значений излучаемой мощности сигналов, рабочего частотного диапазона, предполагаемых эффективных площадей рассеяния целей, чувствительности приемника.

Таким образом, для каждого значения задержки радиолокационного сигнала τ может быть найдено множество точек, принадлежащих пространству координат, привязанных к ЗГ РЛС, являющихся конечными точками предполагаемых траекторий его распространения до цели. Множество таких точек образует так называемое «тело ошибок» (на рис. 1 – выделено красным цветом).

Ясно, что чем меньше тело ошибок, тем с меньшей погрешностью могут определяться координаты цели.

С целью увеличения точности расчета траектории распространения зондирующего сигнала с помощью различных видов зондирования выполняется уточнение данных о параметрах канала, под которым понимается, прежде всего, ионосфера. В последнее время находят применение методы уточнения концентрации заряженных частиц с помощью сигналов космических навигационных сетей. Однако даже исчерпывающая информация о распределении значений параметров ионосферы приводит, в случае использования одного рабочего луча, к «стягиванию» тела ошибок не к точке, а к лежащей в меридиональной плоскости кривой.

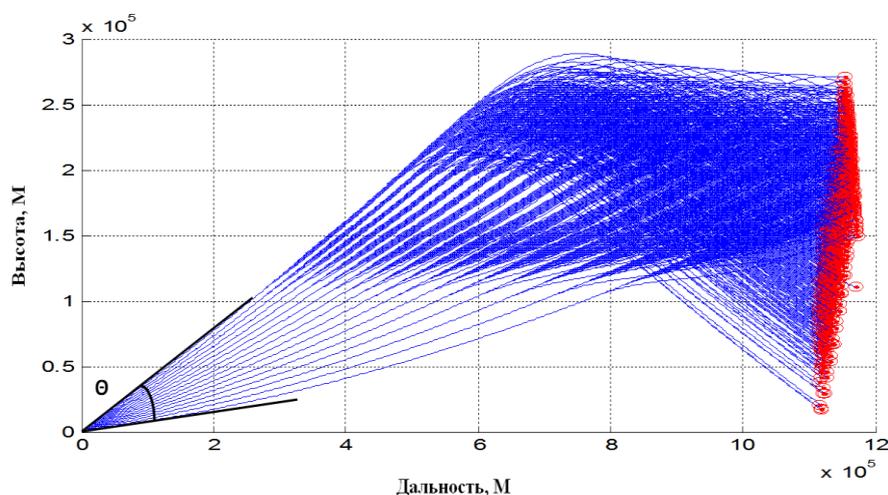


Рис. 1. Формирование «тела ошибок» в процессе определения координат цели однолучевой ЗГ РЛ

Это происходит в силу наличия высокой неопределенности углов приема эхо-сигнала. Наложение ограничений энергетического характера сужает тело ошибок, но не устраняет этой проблемы полностью. Возможности же двухлучевого метода позволяют решать радиолокационную задачу с достижением точностных характеристик, гораздо более высоких, чем характеристики, которыми обладают средства ЗГ РЛ, существующие на сегодняшний день.

Алгоритм

Рассмотрим алгоритм обнаружения и определения координат одиночной цели с использованием предложенного двухлучевого метода загоризонтной радиолокации (рис. 2).



Рис. 2. Алгоритм обнаружения и определения координат объекта с использованием двухлучевого метода загоризонтной радиолокации

Перед выполнением измерений формируется модель канала распространения сигнала: выбирается рабочая модель ионосферы $N(x, y, z, t)$, задаются границы и положение рабочей зоны ЗГ РЛС, определяются частоты сигналов. Для выбранной модели ионосферы, по доступным данным мониторинга, проводится уточнение используемых параметров.

Лоцирование целей в рабочей зоне выполняется двумя лучами с центральными частотами f_{cp1} и f_{cp2} .

Для каждого приемного канала верно следующее. Выходной величиной с приемника РЛС является значение напряжения $u(t)$.

Эхо-сигнал от цели всегда сопровождается шумами, маскирующими сигнал, т.е. напряжение $u(t)$ есть сумма напряжения сигнала и напряжения шума. Для того чтобы уменьшить число обнаружений по шуму, сигналы на выходе приемной аппаратуры ЗГ РЛС сравниваются с порогом обнаружения: если величина входного напряжения $u(t)$ превысит порог $u_{пор}$, то сигнал считается обнаруженным. При этом при известном азимутальном положении плоскости лучей α , фиксируется величина задержки сигнала τ , что в дальнейшем дает возможность определить положение цели в координатах x, y, z . Такую совокупность параметров, полученных в результате превышения порога в ячейке, называют отметкой от цели.

После фиксации двух эхо-сигналов, отраженных от одного объекта, определяются значения соответствующих им задержек τ_1 и τ_2 .

Восстановление траектории распространения сигналов выполняется с привлечением численных методов и методов геометрической оптики, при условии, что известны все начальные условия (НУ), необходимые для решения задачи.

Объем перечня НУ зависит от используемой при расчетах модели канала. В простейшем случае это центральные частоты f_{cp1} и f_{cp2} , задержки сигналов τ_1 и τ_2 , углы приема (излучения) сигналов, параметры используемой модели ионосферы.

При точно известных НУ расчет траектории распространения сигнала является несложной задачей, приводящей к однозначному решению. Однако, в большинстве случаев, они известны с разной степенью близости к своим действительным значениям, а некоторые из них могут задаваться только в виде множеств. Так, несовершенство АС ЗГ РЛС приводит к необходимости полагать, что угол приема эхо-сигнала β может быть любым из входящих в множества углов $\{\beta\}$, принадлежащих раскрытию диаграммы направленности (ДН) АС. Соответственно, результат решения задачи также будет являться множеством. Как уже говорилось, в случае если параметры модели ионосферы известны с достаточно высокой точностью, при расстоянии между элементами $\{\beta\}$ $\Delta\beta \rightarrow 0$ множество решений можно представить некоторой кривой, принадлежащей меридиональной плоскости, называемой «кривой ошибок» или «кривой неопределенности», если же используются приближенные значения параметров, то – двумерным телом ошибок.

Если параметры модели ионосферы мало отличаются от значений, при которых были измерены задержки, получают две пересекающиеся в некоторой точке кривые. В данном случае координаты точки пересечения: h – высоту над поверхностью Земли и x – расстояние от ЗГ РЛС, считают координатами цели (рис. 3).

Если же пересечения не получено, делается вывод о необходимости коррекции параметров действующей модели, влияющих на распространение радиоволн рабочего диапазона, таким образом, чтобы выполнялось условие сведения конечных точек трасс распространения сигналов, рассчитываемых в соответствии с полученными значениями τ_1 и τ_2 .

Решение задачи коррекции модели получают с помощью адаптивных оптимизационных процедур, представленных в [2]. При этом целевая функция представляет собой зависимость суммы квадратов разностей пространственных координат предполагаемых точек отражения O_1 и O_2 от параметров модели ионосферы и углов места β_1 и β_2 прихода радиолокационных сигналов.

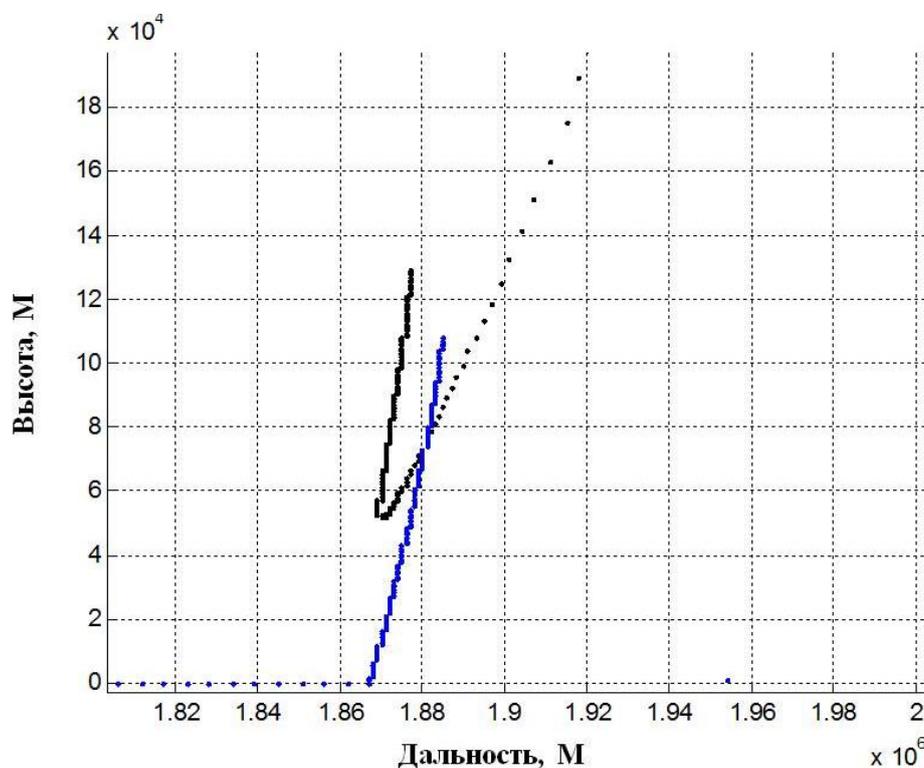


Рис. 3. Пересечение «кривых неопределенности»

В качестве оптимизируемых могут выступать параметры модели ионосферы, связанные с распределением коэффициента преломления среды в пространстве. К таким параметрам, в зависимости от выбранной модели, относят количество локальных максимумов концентрации заряженных и нейтральных частиц n , высоты максимумов h_i , значения критических частот слоев f_{ki} , значения полутолщины слоев y_{mi} , значения частоты соударений заряженных и нейтральных частиц на различной высоте ν_i .

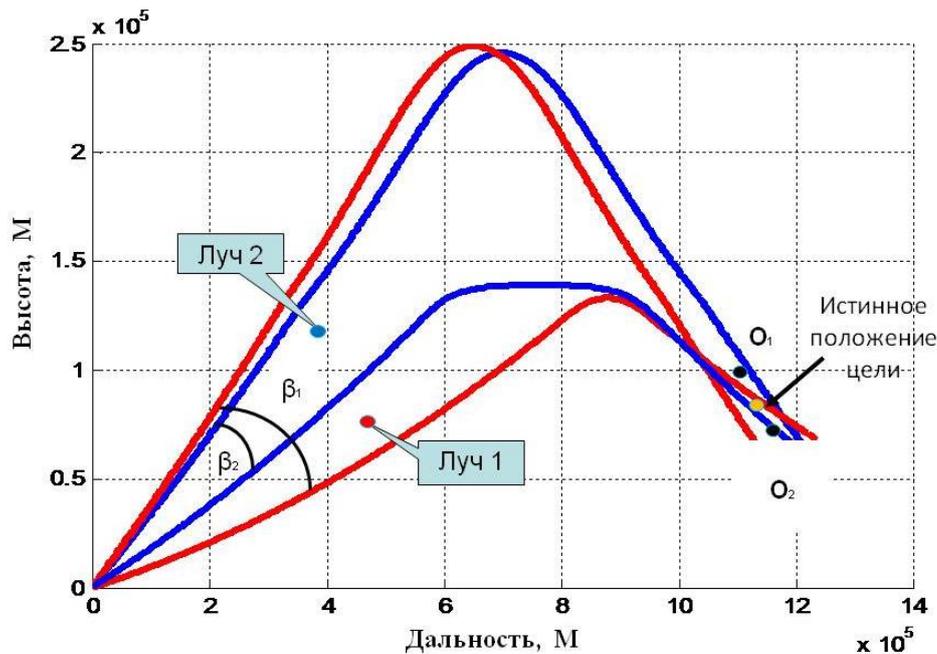


Рис. 4. Определение истинных координат цели

Выполнение процесса измерений завершается формированием вектора координат цели и вектора состояния модели канала, содержащего результаты ее коррекции, полученные в ходе решения оптимизационной задачи (рис. 4). В дальнейшем эти вектора могут использоваться для завязки траектории наблюдаемого объекта.

Выводы

Таким образом, в статье предложен алгоритм обнаружения и определения координат объекта, реализуемый на основе двулучевого метода ЗГ РЛ, отличающегося от известных подходов более высокой точностью получаемых результатов измерений. Метод позволяет определять пространственные координаты объекта как место пересечения траекторий двух рабочих лучей, лежащих в общей меридиональной плоскости, которая проходит через точку стояния РЛС и точку расположения объекта. Реализация алгоритма в ЗГ РЛ станциях позволит не только с высокой точностью определять местоположение одиночных объектов, но и послужит основой для синтеза алгоритмов селекции групповых целей и завязки их траекторий.

Литература

1. Алешкин А. П., Артюшкин А. Б., Мысливцев Т. О., Негробов В. В. Двулучевой метод загоризонтной радиолокации // Сборник трудов 17 Международной научно-технической конференции «Радио и связь». 2011. Том 3. С. 1819-1825.
2. Алешкин А. П., Артюшкин А. Б., Балашов В. М. Применение оптимизационных процедур для повышения эффективности метода двулучевой загоризонтной радиолокации // Радиопромышленность. 2015. № 2. С. 21-27.

References

1. Aleshkin A. P., Artjushkin A. B., Myslivecev T. O., Negrobov V. V. Two-beam method of over-the-horizon radar. *Proceedings of the 17 International scientific and technical conference "Radio and communication"*, 2011, vol. 3, pp. 1819-1825 (in Russian).
2. Aleshkin A. P., Artushkin A. B., Balashov V. M. Application of optimization procedures to improve the efficiency of the method of two-beam scanning radar. *Radio industry*, 2015, vol. 2, pp. 21-27 (in Russian).

Статья поступила 27 марта 2017 г.

Информация об авторах

Алешкин Андрей Петрович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств Системы единого времени. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: радиолокация, антенные системы. E-mail: a_aleshkin@mail.ru

Артюшкин Андрей Борисович – кандидат технических наук. Доцент кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: радиолокация, системы связи. E-mail: kaman95@mail.ru

Дуников Артём Сергеевич – кандидат технических наук. Начальник лаборатории кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: телеметрические системы, системы связи. E-mail: artem.sever1@yandex.ru

Никифоров Сергей Валерьевич – кандидат технических наук. Преподаватель кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств систем единого времени. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: телеметрические системы, системы связи. E-mail: Uncleserega@yandex.ru

Адрес: 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская 13.

Algorithm of Detection and Determining Coordinates of Object for the Over-the-Horizon Radar Based on the Two-Beam Scanning Method

A. P. Aleshkin, A. B. Artjushkin, A. S. Dunikov, S. V. Nikiforov

Relevance. *Over-the-horizon radars are improving so means of objects detecting large distance for radars should be also developed. However, the research in detecting and determining object coordinates has not been finished yet. Therefore, the design of algorithm for detecting and determining the object coordinates by over-the-horizon radars is a topical area of research. The aim of this paper is to develop the algorithm for detecting and determining object coordinates on the basis of the two-beam scanning method. Methods used.* The theory of geometric optics and theory of radar signals propagation and the two-beam scanning method are used as a basis for the algorithm for detecting and determining the object coordinates by over-

the-horizon radars. Novelty. The novelty of the algorithm is that it takes into account the two-beam scanning method and the optimization proceedings of determining the object coordinates. Results. The result of the research using the algorithm proves that its use makes possible to improve the accuracy of determining object position. Practical significance. The algorithm can be application to a large number of over-the-horizon radars. The algorithm presented in the paper can be applied to improve software of the operating over-the-horizon radar stations.

Key words: the over-horizon radar, mathematical model of ionosphere, object coordinates, body of errors, signal detection.

Information about Authors

Andrei Petrovich Aleshkin – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. The Professor of the Department of Acquisition and Processing Information. Mozhaysky Military Space Academy. Field of research: information monitoring; data acquisition. E-mail: a_aleshkin@mail.ru

Andrej Borisovich Artjushkin – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of telemetry systems, integrated and information processing. Mozhaysky Military Space Academy. Field of research: information monitoring; data acquisition. E-mail: kaman95@mail.ru

Artem Sergeevich Dunikov – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of telemetry systems, integrated and information processing. Mozhaysky Military Space Academy. Field of research: information monitoring; data acquisition. E-mail: artem.sever1@yandex.ru

Sergej Valerevich Nikiforov – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of telemetry systems, integrated and information processing. Mozhaysky Military Space Academy. Field of research: information monitoring; data acquisition. E-mail: Uncleserega@yandex.ru

Address: Russia, 197198, Saint Petersburg, Zhdanovskaya ulica, 13.