

Измерение угла места наблюдаемого воздушного объекта на основе применения фазового метода пеленгации в многокольцевой антенной решетке

А. П. Алёшкин¹, В. В. Владимиров^{1✉}, А. В. Честных²

¹Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

²Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, Москва, Россия

✉ v.vladimirov87@mail.ru

Аннотация

Введение. Радиолокационные станции наблюдения воздушных объектов, функционирующих в коротковолновом диапазоне, имеют ряд ограниченных технических характеристик, одной из которых является сектор обзора по азимуту. Ввиду использования в качестве приемной линейной антенной решетки (АР) угол обзора ограничивался 60° . При модернизации станции указанное ограничение снято переходом к АР с кольцевой структурой (в настоящее время используется многокольцевая АР). На практике после выполнения ряда алгоритмов пространственной обработки оператору становятся доступны азимут, дальность и скорость наблюдаемого объекта, однако из-за особенностей распространения коротковолнового сигнала точность измерения этих параметров не обеспечивает устойчивого сопровождения воздушных объектов. Кроме того, с переходом на использование многокольцевых решеток появилась возможность дополнительно измерять угол места с последующим расчетом высоты объекта.

Цель работы. Анализ фазового распределения падающей волны на раскрыве многокольцевой АР, а также выполнение пространственной обработки принятого сигнала с использованием фазового метода пеленгации для повышения точности измерения угла места.

Материалы и методы. При формировании фазовых распределений на элементах многокольцевой АР, вычислении угла места фазовым методом и формировании портретов наблюдаемого объекта использовалось компьютерное моделирование в среде MATLAB. Указанная среда успешно применяется для решения широкого спектра научных задач разной сложности в промышленности и научно-исследовательских организациях.

Результаты. Показана возможность использования фазового метода пеленгации источника излучения для повышения точности измерения угла места. Выполнено моделирование. Проведен анализ полученных результатов на примере наблюдения коротковолновой станцией воздушного объекта.

Заключение. Полученные результаты доказали актуальность применения фазового метода при выполнении пространственной обработки сигналов в коротковолновой станции. Предложенный метод позволил устранить неоднозначность при измерении угла места и повысить точность его определения, что является новым результатом применительно к рассматриваемым системам.

Ключевые слова: коротковолновая станция, источник излучения, фронт волны, ионосферное распространение, определение угла места, фазовый метод, база

Для цитирования: Алёшкин А. П., Владимиров В. В., Честных А. В. Измерение угла места наблюдаемого воздушного объекта на основе применения фазового метода пеленгации в многокольцевой антенной решетке // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 2. С. 49–57. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-2-49-57

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.11.2023; принята к публикации после рецензирования 19.12.2023; опубликована онлайн 29.04.2024



Measuring the Elevation Angle of an Airborne Object by Phase Direction Finding in a Multi-Ring Antenna Array

Andrey P. Aleshkin¹, Vladislav V. Vladimirov^{1✉}, Alexander V. Chestnykh²

¹Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, Russia

²Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications,
Moscow, Russia

✉ v.vladimirov87@mail.ru

Abstract

Introduction. Radar stations for surveillance of airborne objects operating in the shortwave range are characterized by a number of limited technical characteristics, one of which is the azimuth viewing sector. The use of a linear antenna array (AR) as a receiving array provides the viewing angle of only up to 60°. When modernizing the station, this limitation was removed by applying an AR with a ring structure (currently a multi-ring AR is used). In practice, after performing a number of spatial processing algorithms, the operator obtains the azimuth, range, and speed of the observed object. However, due to the peculiarities of shortwave signal propagation, the accuracy of measuring these parameters does not ensure stable tracking of airborne objects. The use of multi-ring ARs also allows the elevation angle to be measured with a subsequent calculation of the height of the object.

Aim. Analysis of the phase distribution of the incident wave at the aperture of a multi-ring AR, as well as spatial processing of the received signal using the phase direction finding method to improve the accuracy of elevation angle measurements.

Materials and methods. Computer simulation in the MATLAB environment was carried out to form phase distributions on the elements of a multi-ring array, to calculate the elevation angle using the phase method, and to form portraits of the surveyed object. This environment has been successfully used to solve a wide range of problems of varying complexity in both industry and research fields.

Results. The possibility of using the phase method of direction finding of a radiation source to improve the accuracy of elevation angle measurement is demonstrated based on the conducted computer simulation. The obtained results were verified on the example of surveying an airborne object by a shortwave radar station.

Conclusion. The results obtained proved the relevance of using the phase method when performing spatial signal processing by a shortwave radar station. The proposed method made it possible to eliminate the ambiguity in measuring the elevation angle and to increase the accuracy of its determination, which is a new result in relation to the systems under consideration.

Keywords: shortwave station, radiation source, wave front, ionospheric propagation, elevation angle determination, phase method, base

For citation: Aleshkin A. P., Vladimirov V. V., Chestnykh A. V. Measuring the Elevation Angle of an Airborne Object by Phase Direction Finding in a Multi-Ring Antenna Array. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 2, pp. 49–57. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-2-49-57

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 16.11.2023; accepted 19.12.2023; published online 29.04.2024

Введение. Современные радиолокационные средства наблюдения за воздушной обстановкой решают широкий круг задач, главными из которых являются обнаружение и устойчивое сопровождение воздушных объектов [1].

В зависимости от назначения радиолокационной станции к качеству решения этих задач предъявляется ряд жестких требований, сформулированных в техническом задании на перво-

начальном этапе ее проектирования. С течением времени предъявленные требования теряют свою актуальность. В качестве примера можно привести следующий факт: в последнее время скорость полета воздушных объектов увеличивается вплоть до гиперзвуковой [2, 3]. Радиолокатор, функционирующий в метровом диапазоне волн, из-за ограниченного времени наблюдения, обнаружив высокоскоростную цель,

не успевают перейти в режим сопровождения и спрогнозировать ее дальнейшую траекторию.

Проблема ограниченного времени наблюдения успешно решается радиолокационной станцией, функционирующей в коротковолновом диапазоне [4]. Особенность ионосферного распространения радиоволн позволяет сформировать область обзора, в которой объект наблюдается за линией горизонта на дальности более 2500 км от приемной позиции. На отечественной станции, как и на большинстве зарубежных аналогов, в качестве приемной системы используется эквидистантная линейная антенная решетка, перехватывающая фронт падающей волны в ограниченном секторе 60° , что недостаточно для решения задач превентивного обнаружения объектов [4, 5]. В результате модернизации функционирующей станции с установкой дополнительных секций приемных антенн удалось увеличить область сканирования по азимуту только до 180° [6].

На перспективных станциях, планируемых к созданию до 2030 г., вместо линейной будет использоваться многокольцевая антенная решетка (МКАР) [5]. Изменение конструкции позволит сформировать управляемую диаграмму направленности для приема сигналов, приходящих с любого азимутального направления, а многокольцевая структура – уменьшить уровень боковых лепестков. Результирующее поле, создаваемое такой решеткой, формируется объединением полей каждого кольца [7, 8].

Рассмотрим прием и обработку сигнала от точечного источника излучения возможным вариантом эквиугольной МКАР, состоящей из M кольцевых решеток с радиусами R_m , $m \in [1, M]$, содержащих N_m изотропных излучателей (рис. 1).

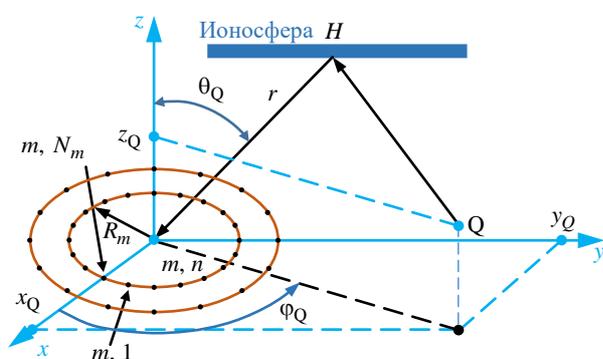


Рис. 1. Схема распространения сигнала

Fig. 1. Signal propagation diagram

Приемные элементы МКАР располагаются эквиугольно на каждом кольце. Тогда угол между ними определяется как

$$\alpha_m = 2\pi/N_m.$$

Элементы МКАР располагаются в горизонтальной плоскости на поверхности Земли. Координаты их расположения определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{i,m} &= R_m \cos(\alpha_m) N_{i,m}; \\ y_{i,m} &= R_m \sin(\alpha_m) N_{i,m}, \end{aligned} \quad i \in [1, N_m],$$

где $N_{i,m}$ – номер излучателя в m -м кольце.

Номера излучателей отсчитываются последовательно против часовой стрелки. Последний элемент лежит на оси абсцисс x . Координата на оси аппликат z определяется высотой используемых изотропных элементов.

Расположение приемных элементов в картинной плоскости координат xOy моделируемой МКАР представлено на рис. 2. Высоту изотропных излучателей (координата z) для упрощения примем равной 0 ($z=0$), так как в коротковолновом диапазоне она почти не влияет на изменение фазы падающей волны. Рабочая длина волны 10...100 м, а в качестве излучателей используются вибраторы длиной до 3.5 м.

Предположим, что от источника излучения (наблюдаемой цели) Q после облучения передающей позицией на МКАР падает волна сигнала, фронт которой $s(t)$ представляется сум-

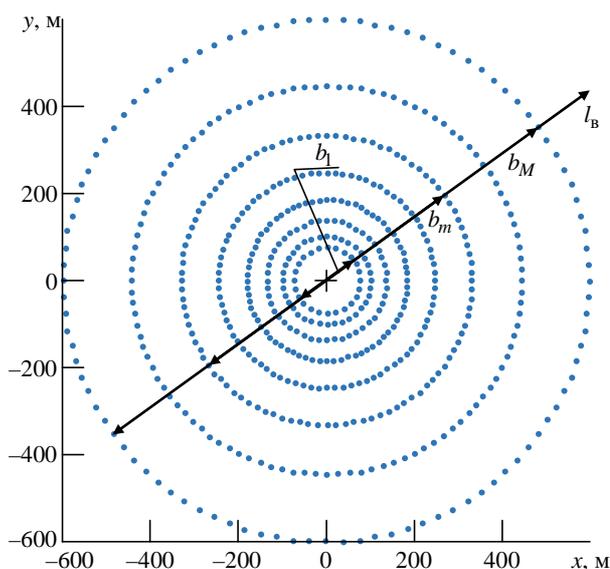


Рис. 2. Расположение приемных элементов МКАР

Fig. 2. Location of MCAR receiving elements

мой информационной $s_r(t)$ и шумовой $n(t)$ составляющих [9, 10]:

$$s(t) = s_r(t) + n(t). \quad (1)$$

Информационная составляющая сигнала имеет вид

$$s_r(t) = A_r(t - t_3) \cos[2\pi f_{tr_c}(t - t_3)],$$

где A_r – огибающая сигнала; t_3 – задержка распространения сигнала от радиолокационной станции до наблюдаемого объекта и обратно; f_{tr_c} – частота зондирующего сигнала.

МКАР имеет обзор по азимуту φ от 0 до 360° и по углу места θ от 0 до 90° . Направление падения фронта волны характеризуется азимутом φ_Q и углом места θ_Q .

При согласованном приеме фазовое распределение на элементах апертуры каждого кольца МКАР определяется выражением [11]

$$\Phi_{n,m} = k(x_{n,m} \cos \varphi \sin \theta + y_{n,m} \sin \varphi \sin \theta - x_{n,m} \cos \varphi_Q \sin \theta_Q + y_{n,m} \sin \varphi_Q \sin \theta_Q), \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства (λ – длина рабочей волны).

Фазовое распределение на раскрыве МКАР, полученное с использованием (2), представлено на рис. 3. Из него следует, что вследствие вносимых радиоканалом искажений, а также шумовой составляющей приемного устройства пространственное распределение фазы на раскрыве МКАР имеет отклонения от линейности.

В рассматриваемой станции используется приемное устройство квадратурного типа. В результате приема рассеянного точечным объектом сигнала (1) на выходе приемных элементов формируется комплексный сигнал [12]

$$S(\theta, \varphi)_{n,m} = A_{n,m} \exp j(-\Phi_{n,m});$$

$$n \in [1, N_m]; m \in [1, M].$$

В устройстве обработки этот сигнал фиксируется в матрице с размерами 360 на 90° по измеряемым угловым координатам с шагом 1° , определяемым возможностью электронного формирования луча диаграммы направленности [13]:

$$S_{n,m}(\theta, \varphi) =$$

$$= \begin{bmatrix} S_{n,m}(0, 0) & S_{n,m}(0, 1) & \dots & S_{n,m}(0, \varphi) \\ S_{n,m}(1, 0) & S_{n,m}(1, 1) & \dots & S_{n,m}(1, \varphi) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n,m}(\theta, 0) & S_{n,m}(\theta, 1) & \dots & S_{n,m}(\theta, \varphi) \end{bmatrix}.$$

Результатом обработки является распределение сигнала наблюдаемого источника излучения (портрета). Его можно представить как в азимутальной плоскости, так и по углу места, в зависимости от выбранного режима работы. Для этого необходимо выполнить дискретное преобразование Фурье в выбранной плоскости.

В азимутальной плоскости результат преобразования определяется как

$$f(\varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S_{n,m}(\theta_Q, \varphi), \quad (3)$$

а в угломестной – как

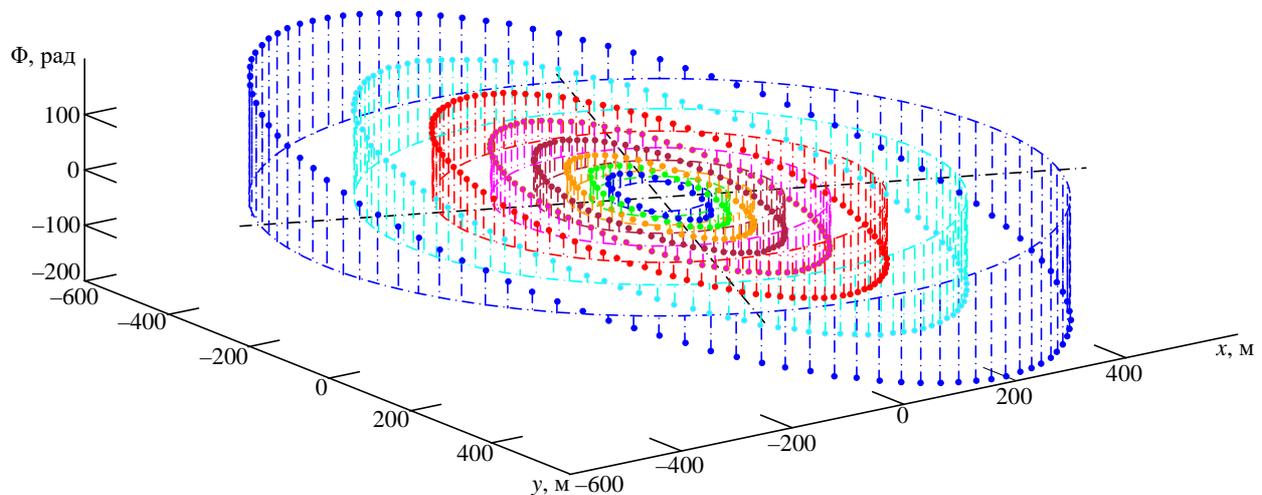


Рис. 3. Фазовое распределение на элементах МКАР

Fig. 3. Phase distribution on MCAR elements

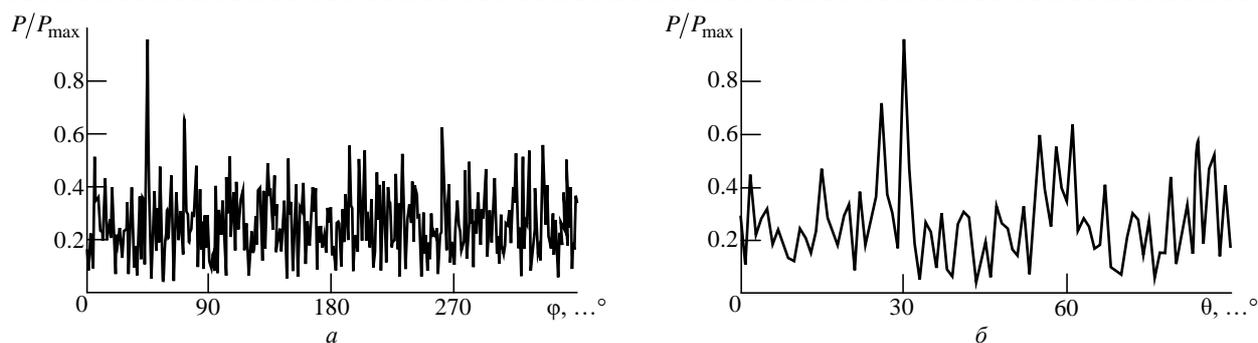


Рис. 4. Азимутальный (а) и угломестный (б) портреты

Fig. 4. Azimuth (a) and elevation (b) portraits

$$f(\theta) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S_{n,m}(\theta, \varphi_Q). \quad (4)$$

На рис. 4, а, б представлены типичные результаты после использования выражений (3) и (4) соответственно.

Из результатов моделирования видно, что на азимутальном портрете (рис. 4, а) имеется отчетливый максимум с отметкой, соответствующей направлению на точечный объект по азимуту, чего нельзя сказать про угломестный портрет (рис. 4, б). На нем, помимо основного максимума, есть еще всплески выше уровня 0.707, которые вносят неоднозначность в определение угла места.

Точность определения координат зависит от характеристик МКАР. В азимутальной плоскости размер элемента разрешения определяется по формуле

$$\Delta\varphi = \lambda / (2R_M),$$

а по углу места – выражением

$$\Delta\theta = \lambda / (2R_M \sin \theta). \quad (5)$$

Как следует из (5), размер элемента разрешения по углу места существенно зависит не только от размера апертуры, но и от ракурса наблюдения. Минимальный размер (что определяет наибольшую точность результата преобразования) достигается при наблюдении источника излучения под углом $\theta = 90^\circ$. На практике это невозможно из-за особенностей распространения радиоволн декаметрового диапазона: существует максимальное значение критического угла зондирования $\theta_{кр} \leq 40^\circ$ от линии горизонта [5]. Излучение, распространяющееся под большим уг-

лом, не отражается от ионосферного слоя, а пронизывает его насквозь. При $\theta < \theta_{кр}$ энергия удерживается ионосферой и далее распространяется в направлении приемной позиции. Критический угол места определяется в зависимости от параметров ионосферы и рабочей частоты радиолокационной станции по формуле [14]

$$\theta_{кр} \approx \arccos \sqrt{1 - (1 + z_m/a)^2 (f_{кр}/f_{trc})^2},$$

где z_m – высота максимума концентрации слоя F ионосферы; a – радиус Земли; $f_{кр}$ – критическая частота вертикального зондирования ионосферы.

Информация о направлении прихода на приемную позицию отраженной от объекта волны содержится в положении ее фазового фронта: нормаль к фазовому фронту в однородной среде распространения радиоволн совпадает с направлением на объект. Для уточнения угла места предлагается применять фазовый метод пеленгации, согласно которому координаты определяются на основе измерений значений разности фаз сигналов, принятых на разнесенные в пространстве антенны (элементы антенной решетки) [15].

Фазовый пеленгатор имеет две одинаковые антенны, разнесенные в пространстве на известное расстояние b , называемое базой или фазометрической шкалой. Указанный метод не налагает каких-либо ограничений на диаграммы направленности применяемых антенн, поэтому может быть применен к излучателям исследуемой МКАР.

В качестве двух одинаковых антенн используются 2 излучателя одного кольца, противоположных относительно центра МКАР, расстояние между которыми (база) равно диа-

метру кольца (см. рис. 2), разнесенные на минимальное и максимальное расстояния от наблюдаемого источника.

Известно, что с ростом базы антенной решетки повышается точность измерения угла места наблюдаемого объекта [16]. Однако на практике для определения этого параметра необходимо использовать все кольца МКАР, благодаря чему удается устранить неоднозначность регистрации значения фазы (для чего необходимо, чтобы размер базы превышал длину волны). Также необходимо учитывать, что в силу дискретности расположения приемных элементов МКАР не все они размещены точно на линии визирования (азимуте) наблюдаемого объекта.

Из результатов моделирования, представленных на рис. 4, а, следует, что в заданных условиях приема станция определяет азимут цели однозначно. После его определения необходимо выполнить стробирование, выделив зарегистрированные фазовые значения с ближнего и дальнего элементов МКАР относительно наблюдаемого точечного объекта.

После стробирования по азимуту и определения позиций необходимых излучателей зарегистрированы фазовые значения с противоположных по линии визирования (азимуту) цели l_B (см. рис. 2) элементов каждого кольца (рис. 5).

В условиях локации источник излучения находится на расстоянии, существенно превышающем размеры баз b_m . Тогда падающую на МКАР волну можно считать плоской. Временной сдвиг сигнала, принимаемого дальним от цели элементом МКАР, относительно сигнала ближнего к цели элемента определяется как

$$\tau_{3m} = b_m \sin \theta_Q / c,$$

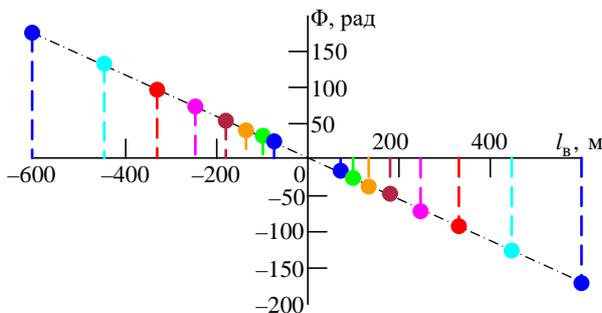


Рис. 5. Значения фаз на элементах баз МКАР
 Fig. 5. Phase values on the elements of MCAR bases

где c – скорость распространения радиоволн.

Фазовый сдвиг принятых сигналов, соответствующий задержкам τ_3 , определяется выражением

$$\Delta\Phi_m = 2\pi(b_m/\lambda)\sin\theta_Q. \quad (6)$$

Угол между нормалью к базе и направлением падающей волны равен углу места θ_Q (рис. 6), а база будет равна $b_m = 2R_m$.

Так как исследуемая МКАР имеет кольцевую структуру, для расчета сдвига фаз необходимо использовать формулу

$$\Delta\Phi_m = |\Phi_{n_m}| + |\Phi_{N_m/2}|.$$

Из (6) следует, что

$$\theta_Q = \arcsin[(\Delta\Phi_m/b_m)k]. \quad (7)$$

Формула (7) является основной для определения угла места θ_Q по результатам измерения разности фаз сигналов $\Delta\Phi_m$.

На рис. 7 представлен результат расчета угла места наблюдаемого излучающего объекта фазовым методом с использованием (7) (скриншот из программы MATLAB).

Из рис. 7 следует, что во всех кольцах МКАР определено одно и то же направление по углу места, среднее значение которого равно 30° , что соответствует моделируемой сцене. Незначительные отклонения, полученные на базах разного размера, обусловлены не только ошибкой измерения фазы приходящего сигнала, но и расположением приемных элементов МКАР: не на всех базах имелись излучатели, расположенные точно по линии визирования цели.

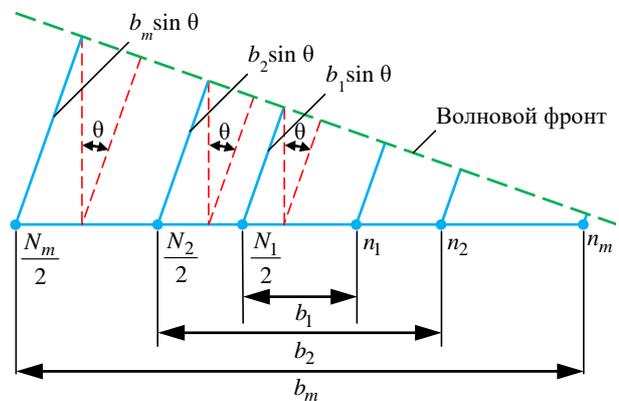
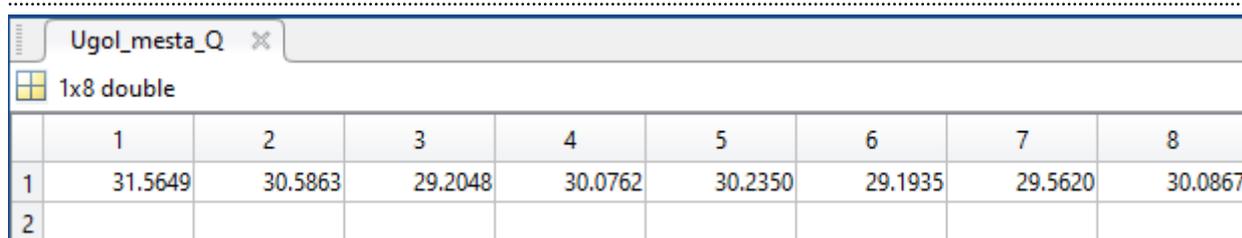


Рис. 6. Измерение угла фазовым методом
 Fig. 6. Angle measurement using the phase method



	1	2	3	4	5	6	7	8
1	31.5649	30.5863	29.2048	30.0762	30.2350	29.1935	29.5620	30.0867
2								

Рис. 7. Рассчитанные значения угла места

Fig. 7. Calculated elevation angle values

Выводы. Реализация предложенного метода определения угла места цели требует минимальных аппаратных и вычислительных затрат, поскольку регистрация фазовых значений принимаемого сигнала осуществляется при штатном функционировании рассмотренной коротковолновой станции.

Применение предложенного в статье метода позволит повысить точность определения угла

места за счет измерений на самой протяженной базе и устранить неоднозначность определения направления на цель, используя для измерений соседние элементы решетки. Показано, что в результате вычислений получаются значения угла места, близкие к реальному значению расположения воздушного объекта в моделируемой сцене и более точные, чем при использовании амплитудного метода измерения угловых координат.

Список литературы

1. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 2 / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. под ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2015. 680 с.
2. Li G.-H, Zhang H.-B., Tang G.-J. Typical Trajectory Characteristics of Hypersonic Gliding Vehicle // J. of Astronautics. 2015. Vol. 36, iss. 4. P. 397–403.
3. Анцупов О. И., Ишук П. Л., Косяк И. В. Гиперзвуковые летательные аппараты: реальна ли опасность // Воздушно-космическая сфера. 2016. № 2. С. 96–105.
4. Фабрицио Д. А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение / пер. с англ. М.: Техносфера, 2018. 936 с.
5. Акимов В. Ф., Калинин Ю. К. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / под ред. С. Ф. Боева. М.: Техносфера, 2017. 491 с.
6. Ильин Д. Защита от гиперзвука. Зачем в России модернизируют загоризонтную РЛС "Контейнер"? // Наука и техника. 2021. URL: <https://naukatehnika.com/zashhita-ot-giperzvuka.-zachem-v-rossii-moderniziruyut-zagorizontnyuyu-rls-%C2%ABkontejner%C2%BB.html> (дата обращения 15.02.2024)
7. Modern Antenna Handbook / ed. by C. A. Balanis. N. Y.: John Wiley & Sons, 2016. 1073 p.
8. Саломатов Ю. П., Панько В. С., Сугак М. И. Кольцевые излучатели и антенные решетки / под ред. Ю. П. Саломатова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 120 с.
9. HUSIR Signal Processing / J. V. Eshbaugh, R. L. Morrison Jr., E. W. Hoen, T. C. Hiett, G. R. Benitz // Lincoln Laboratory J. 2014. Vol. 21, № 1. P. 115–134.
10. Владимиров В. В. Увеличение разрешающей способности по азимуту путем экстраполяции

- функции раскрыва антенной решетки оценением линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 1. С. 28–35. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-28-35
11. Sen B., Cansiz G., Boran H. L Band Multi-Channel Transmit/Receive Module for Circular Phased Array Radar // Proc. of IEEE Intern. Radar Conf., Arlington VA, USA, 10–15 May 2015. 4 p. doi: 10.1109/RADAR.2015.7130960
12. Алёшкин А. П., Алёшкин Н. А., Владимиров В. В. Способ увеличения разрешающей способности по дальности радиолокационных станций декаметрового диапазона на основе экстраполяции комплексной частотной характеристики рассеяния наблюдаемых объектов // Тр. НПЦАП. 2022. № 3. С. 51–60.
13. Нечаев Ю. Б., Пешков И. В., Аальмуттар Атхеер Ю. О. Алгоритм и результаты моделирования цилиндрической антенной решетки с направленными излучателями // Вестн. ВГУ. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 1. С. 50–55.
14. Вопросы вертикального и наклонного зондирования ионосферы / Ю. К. Калинин, В. В. Алпатов, А. Ю. Репин, А. В. Щелкалин // Гелиогеофизические исследования. 2018. Вып. 20. С. 87–123.
15. Радиолокация для всех / В. С. Верба, К. Ю. Гаврилов, А. Р. Ильчук, Б. Г. Татарский, А. А. Филатов; под ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2020. 504 с.
16. Проскурин В. И., Ягольников С. В., Шевчук В. И. Радиолокационное наблюдение. Методы, модели, алгоритмы. М.: Техносфера, 2017. 368 с.

Информация об авторах

Алешкин Андрей Петрович – заслуженный деятель науки РФ (2020), доктор технических наук (2002), профессор (2004), профессор 31-й кафедры Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. Автор более 100 научных публикаций и 10 патентов на изобретения. Сфера интересов – теория адаптивного смещенного оценивания в условиях плохой наблюдаемости параметров; антенно-фидерные устройства; радиолокация; радионавигация; пространственно-временная обработка сигналов.

Адрес: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия

E-mail: a_aleshkin@mail.ru

orcid.org/0000-0002-0532-1378

Владимиров Владислав Владимирович – кандидат технических наук (2022), начальник лаборатории (научно-исследовательской) военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. Автор более 35 научных работ. Сфера научных интересов – пространственно-временная обработка радиолокационных сигналов, антенно-фидерные устройства, радиолокация.

Адрес: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 42-й отдел (научно-исследовательский), ул. Генерала Хрулева, д. 16, Санкт-Петербург, 197348, Россия

E-mail: v.vladimirov87@mail.ru

orcid.org/0000-0003-2984-9692

Честных Александр Владимирович – начальник научно-тематического центра-3 Научно-исследовательского института дальней радиосвязи. Автор более 15 научных работ. Сфера научных интересов – пространственно-временная обработка радиолокационных сигналов.

Адрес: Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 1, Москва, 127083, Россия

E-mail: achestnyh@niidar.ru

References

1. Skolnik M. I. Radar Handbook. 3rd Ed. New York, McGraw-Hill, 2008, 1352 p.
2. Li G.-H, Zhang H.-B., Tang G.-J. Typical Trajectory Characteristics of Hypersonic Gliding Vehicle. *J. of Astronautics*. 2015, vol. 36, iss. 4, pp. 397–403.
3. Ancupov O. I., Ishhuk P. L., Kosjak I. V. Hyper-sonic Aircraft: is the Danger Real. *Vozdushno-kosmicheskaja sfera* [Aerospace]. 2016, no. 2, pp. 96–105. (In Russ.)
4. Fabricio D. A. High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications. McGraw Hill, 2013, 944 p.
5. Akimov V. F., Kalinin Ju. K. *Vvedenie v proektirovanie ionosfernyh zagorizontnyh radiolokatorov* [Introduction to Design of Ionospheric Over-the-Horizon Radars] Moscow, *Tehnosfera*, 2017, 492 p. (In Russ.)
6. Il'in D. *Zashchita ot giperzvuka. Zachem v Rossii moderniziruyut zagorizontnyu RLS "Kontejner"*. *Nauka i tekhnika* [Protection Against Hyper Sound. Why is Russia Upgrading the Container Over-the-Horizon Radar? Science and Technology]. Available at: <https://naukatehnika.com/zashchita-ot-giperzvuka-zachem-v-rossii-moderniziruyut-zagorizontnyu-rls-%C2%ABkontejner-%C2%BB.html> (accessed 15.02.2024)
7. Balanis C. A. Modern Antenna Handbook. New York, John Wiley & Sons, Inc, 2016, 1073 p.
8. Salomatov Iu. P., Panko V. S., Sugak M. I. *Koltsevye izluchateli i antennye reshetki* [Ring Radiators and Antenna Arrays] St Petersburg, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2014, 120 p. (In Russ.)
9. Eshbaugh J. V., Morrison Jr. R. L., Hoen E. W., Hielt T. C., Benitz G. R., HUSIR Signal Processing. *Lincoln Laboratory J.* 2014, vol. 21, no. 1, pp. 115–134.
10. Vladimirov V. V. Increased Azimuth Resolution by Extrapolating the Antenna Array Aperture Function by Least Squares Linear Prediction Estimation Using Autoregressive Model Coefficients. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2022, vol. 25, no. 1, pp. 28–35. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-28-35 (In Russ.)
11. Sen B., Cansız G., Boran H. L Band Multi-Channel Transmit/Receive Module for Circular Phased Array Radar. *Proc. of IEEE Intern. Radar Conf.*, Arlington VA, USA, 10–15 May 2015. 4 p. doi: 10.1109/RADAR.2015.7130960
12. Aleshkin A. P., Aleshkin N. A., Vladimirov V. V. A Method For Increasing The Range Resolution of Decameter Range Radar Stations Based on Extrapolation of the Complex Frequency Scattering Characteristics of Observed Objects. *Trudy NPTSAP*. 2022, no. 3, pp. 51–60. (In Russ.)
13. Nechaev Iu. B., Peshkov I. V., Aalmuttar Atkheer Iu. O. Algorithm and Results of Modeling a Cylindrical Antenna Array with Directional Emitters. *Vestnik VGU, seriya Sistemyi analiz i informatsionnye tekhnologii*. 2018, no. 1, pp. 55–50. (In Russ.)
14. Kalinin Iu. K., Alpatov V. V., Repin A. Iu., Shchelkalin A. V. Issues of Vertical and Oblique Sounding of the Ionosphere. *Heliogeophysical research*. 2018, no. 20, pp. 87–123. (In Russ.)
15. Verba V. S., Gavrilov K. Iu., Ilchuk A. R., Tatarskii B. G., Filatov A. A. *Radiolokatsiya dlia vsekh* [Radar for Everyone]. Moscow, *Tehnosfera*, 2020, 504 p. (In Russ.)

16. Proskurin V. I., Yagolnikov S. V., Shevchuk V. I. *ritmy* [Radar Surveillance. Methods, Models, Algorithms]. Moscow, *Tehnosfera*, 2017, 368 p. (In Russ.)
Radiolokatsionnoe nabliudeniye Metody modeli algo-

Information about the authors

Andrey P. Aleshkin, Honored Scientist of the Russian Federation (2020), Dr Sci. (Eng.) (2002), Professor (2004), Professor of the Department of the Military Aerospace Academy, St Petersburg. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: the theory of adaptive biased estimation in conditions of poor observability of parameters; antenna-feeder devices; radar; radio navigation; spatio-temporal signal processing.

Address: Military Aerospace Academy, 31 Department, 13, Zhdanovskaya St., St Petersburg 197198, Russia

E-mail: a_aleshkin@mail.ru

orcid.org/0000-0002-0532-1378

Vladislav V. Vladimirov, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Head of the laboratory (research) of the Military Institute (Research) of the Military Aerospace Academy, St Petersburg. The author of more than 35 scientific publications. Area of expertise: spatio-temporal processing of radar signals; antenna-feeder devices; radar.

Address: Military Aerospace Academy, 42 Department (research), 16, Generala Khruleva St., St Petersburg 197348, Russia

E-mail: v.vladimirov87@mail.ru

orcid.org/0000-0003-2984-9692

Alexander V. Chestnykh, Head of the Scientific and Thematic Center-3 of the Research Institute of Long-Range Radio Communications. The author of more than 15 scientific publications. Area of expertise: spatio-temporal processing of radar signals.

Address: Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications, 10, March 8 St., build. 1, Moscow 127083, Russia

E-mail: achestnyh@niidar.ru
