


Двумерная разреженная антенная решетка пассивного когерентного радиолокатора с параметрическим алгоритмом обработки сигналов методом сечений

В. М. Кутузов, В. И. Веремьев, М. А. Овчинников , Г. В. Комаров

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

 mixovchinnikov@list.ru

Аннотация

Введение. Для измерения угловых координат радиолокационных целей – азимута и угла места – в РЛС необходима двумерная конфигурация приемной антенной решетки (АР). Трансформация одномерной эквидистантной АР в плоскую двумерную при фиксированном числе антенных элементов (АЭ) и неизменном размере апертуры приводит к неэквидистантному расположению АЭ в строках АР, а сама АР становится разреженной, что негативно влияет на качество трехмерной диаграммы направленности (ДН) АР. Перспективным и актуальным методом построения характеристик направленности является метод сечений на основе модифицированного параметрического алгоритма Берга, который может быть рекомендован при пространственной обработке отраженных сигналов в пассивном когерентном радиолокаторе с двумерной разреженной приемной АР.

Цель работы. Анализ азимутальных и угломестных сечений трехмерных ДН при использовании модифицированного метода Берга для пространственной обработки отраженных сигналов в пассивном когерентном радиолокаторе, элементы АР которого расположены по горизонтали и по вертикали с шагом, кратным половине длины волны λ несущего колебания используемого сигнала подсветки.

Материалы и методы. Характеристики направленности строились с помощью компьютерного моделирования в среде MatLab при воздействии на каналы приема в каждом АЭ в качестве помехи некоррелированного аддитивного комплексного нормального шума.

Результаты. Показана возможность и определены условия применения модифицированного параметрического метода Берга в задачах обнаружения одиночного сигнала и углового разрешения равномошных сигналов в пассивном когерентном радиолокаторе, в состав которого входит двумерная разреженная АР. Проведено сравнение полученных характеристик направленности метода Берга с характеристиками направленности, построенными с помощью традиционных алгоритмов на основе дискретного преобразования Фурье. Применение метода Берга позволило снизить уровень боковых лепестков ДН до уровня $-12 \dots -17$ дБ при отношении сигнал/шум 6 дБ, что является приемлемым для практики, а также существенно улучшить рэлеевское разрешение сигналов в АР.

Заключение. На основе полученных результатов делается вывод о целесообразности применения модифицированного метода Берга для обработки сигналов в двумерных разреженных АР при условии ограничений на способ размещения АЭ и размер апертуры АР. Это позволяет рекомендовать метод Берга для использования в пассивных когерентных радиолокаторах.

Ключевые слова: пассивный когерентный радиолокатор, плоская разреженная антенная решетка, параметрические методы, пространственная обработка сигналов, диаграмма направленности, спектр пространственных частот

Для цитирования: Двумерная разреженная антенная решетка пассивного когерентного радиолокатора с параметрическим алгоритмом обработки сигналов методом сечений / В. М. Кутузов, В. И. Веремьев, М. А. Овчинников, Г. В. Комаров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 2. С. 40–53. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-2-40-53

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-79-10375.

Статья поступила в редакцию 25.10.2021; принята к публикации после рецензирования 03.12.2021;
опубликована онлайн 27.04.2022

Two-dimensional Sparse Antenna Array of a Passive Coherent Radar using a Parametric Algorithm of Signal Processing via the Section Method

Vladimir M. Kutuzov, Vladimir I. Veremyev, Mihail A. Ovchinnikov ✉, Gleb V. Komarov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ mixovchinnikov@list.ru

Abstract

Introduction. A two-dimensional configuration of the receiving antenna array (AA) is used to measure the angular coordinates of radar targets – azimuth and elevation. A transformation of one-dimensional uniform AA into a flat two-dimensional AA with a fixed number of antenna elements (AEs) and constant aperture size leads to a nonuniform arrangement of AE in the AA rows. As a result, the AA becomes sparse, which negatively affects the quality of the AA three-dimensional antenna pattern (AP). The section method based on the modified parametric Burg algorithm is a promising and relevant method for constructing directional characteristics. This method can be recommended for spatial processing of reflected signals in a passive coherent radar with a two-dimensional sparse receiving AA.

Aim. To analyze the azimuthal and elevation sections of three-dimensional APs obtained using a modified Burg method for spatial processing of reflected signals in a passive coherent radar, the AEs of which are located horizontally and vertically with a step that is a multiple of the half the wavelength λ of the used illumination signal carrier oscillation.

Materials and methods. The construction of directional characteristics was implemented via computer simulation in the MATLAB environment with the effect of uncorrelated additive complex normal noise on the receiving channels in each AE as an interference.

Results. The possibility and conditions for the application of the modified parametric Burg method in the problems of single signal detecting and angular resolution of equal-power signals in a passive coherent radar, which includes a two-dimensional sparse AA, were determined. The obtained Burg method directional characteristics were compared with the directional characteristics obtained using conventional algorithms based on the discrete Fourier transform. The use of the Burg method allowed the AP side lobe level to be reduced to a practically acceptable level of $-12 \dots -17$ dB at a signal to noise ratio 6 dB. In addition, the Rayleigh resolution of signals in the AA was significantly improved.

Conclusion. The presented modified Burg method is suitable for signal processing in two-dimensional sparse AA, subject to restrictions on the AE placing method and the AA aperture size. This allows the Burg method to be recommended for use in passive coherent radars.

Keywords: passive coherent radar, flat sparse antenna array, parametric methods, spatial signal processing, antenna pattern, spatial frequency spectrum

For citation: Kutuzov V. M., Veremyev V. I., Ovchinnikov M. A., Komarov G. V. Two-dimensional Sparse Antenna Array of a Passive Coherent Radar using a Parametric Algorithm of Signal Processing via the Section Method. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 2, pp. 40–53. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-2-40-53

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

Acknowledgements. The work was supported by a grant of Russian Science Foundation no. 21-79-10375.

Submitted 25.10.2021; accepted 03.12.2021; published online 27.04.2022

Введение. В настоящее время успешно развивается новое направление скрытной радиолокации – пассивная когерентная радиолокация, основанная на использовании естественной подсветки целей сигналами передатчиков вещательных радиостанций КВ- и УКВ-диапазонов, а также сигналами цифрового телевидения стандарта DVB-T2 [1]. Характерным при-

мером является пассивный когерентный радиолокационный комплекс обнаружения и противодействия беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) "Эгида"¹, включающий в себя пассивный когерентный лоатор (ПКЛ) в виде полнофункционального модуля обнаружения и

¹ <https://nii-vektor.ru/kompleks-obnaruzheniya-i-protivodejstvija-bpla-jegida>



Рис. 1. Линейная АР ПКЛ "Охрана"
Fig. 1. Linear AA of the PCR "Ohrana"



Рис. 2. Многоканальный цифровой приемник
Fig. 2. Multichannel digital receiver

сопровождения БПЛА "Охрана" [2]. В штатном варианте ПКЛ имеет приемную антенную решетку (АР), M антенных элементов (АЭ) которой эквидистантно размещены вдоль прямой линии (рис. 1). Для реализации пространственной составляющей обработки сигналов используется M -канальный приемник с блоком цифровой обработки (рис. 2). При такой конфигурации АР ПКЛ может измерять только две координаты – дальность R и азимут θ , а отображение воздушной обстановки возможно только двумерное – в горизонтальной плоскости. Для обеспечения возможности трехмерной индикации воздушной обстановки необходимо измерение еще одной координаты – угла места ε , в связи с чем конфигурация приемной АР должна быть изменена: вместо линейной эквидистантной АР необходимо использовать двумерную плоскую АР с числом строк L , в каждой из которых будет M_l АЭ. В рамках данной рабо-

ты преобразование одномерной АР в двумерную осуществляется перемещением расположенных с шагом $d_0 = \lambda/2$ АЭ исходной линейной эквидистантной АР по вертикали вверх с таким же шагом (λ – длина волны несущего колебания используемого сигнала подсветки), при этом суммарное количество АЭ (приемных каналов) $M = \sum_{l=1}^L M_l$ и горизонтальный размер раскрыва АР $X_M = Md_0$ не меняются.

Пример трансформации одномерной АР в двумерную с учетом данных ограничений приведен на рис. 3 (количество АЭ $M = 16$, количество строк $L = 3$, значение коэффициента заполнения поля АР составит $1/3$). Рис. 3 показывает, что в результате подобной трансформации АЭ каждой строки двумерной АР располагаются неэквидистантно, что позволяет рассматривать ре-

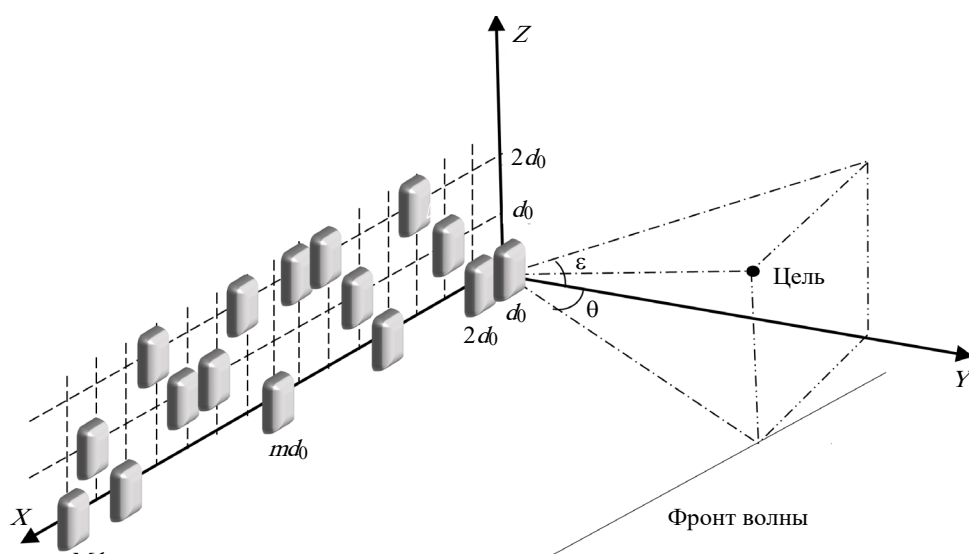


Рис. 3. Плоская разреженная АР
Fig. 3. Flat sparse AA

зультатирующую плоскую АР как сильно разреженную. При этом трехмерная диаграмма направленности (ДН) плоской разреженной АР претерпит изменения, непосредственно определяемые геометрией расположения перемещаемых АЭ, а в самой ДН разреженной АР появляются интерференционные боковые лепестки (БЛ) неприемлемо высокого уровня [3].

Формулировка задачи. При формировании ДН предполагается, что отражающие объекты расположены в дальней зоне, что позволяет в пределах апертуры АР считать фронт падающей волны плоским. Также предположим, что пространственное разрешение, обеспечиваемое шириной спектра сигнала подсветки, значительно превосходит геометрические размеры АР. Принимаемые сигналы будем считать узкополосными в пространственно-временном смысле, что позволяет независимо рассматривать и самостоятельно, в любой последовательности, реализовывать временную (дально-доплеровскую) и пространственную составляющие обработки локационных сигналов [4]. Кроме того, считаем, что когерентная обработка сигналов по дальности (задержке) и радиальной скорости (доплеровской частоте) выполнена в каждом канале приема, поэтому на вход алгоритма пространственной обработки поступают сжатые (накопленные) во временной области сигналы отдельных АЭ. Комплексный шум во всех каналах приема при компьютерном моделировании примем нормальным пространственно некоррелированным с одинаковой дисперсией независимых реальных и мнимых составляющих $\sigma_{\text{ш}}^2 = \text{const}$ и нулевым средним значением $m_{\text{ш}} = 0$.

Как показали исследования, синфазное суммирование сигналов отдельных АЭ в трехмерной ДН, построенной в координатах "азимут θ – угол места ε ", приводит к появлению интерференционных БЛ, уровень которых соизмерим с уровнем главного лепестка, что в свою очередь при пороговых значениях отношения сигнал/шум (ОСШ) негативно влияет на точность оценивания угловых координат целей [5–8]. Пример нормированной ДН в форме множителя плоской разреженной АР (без учета ДН отдельных слабонаправленных АЭ) приведен на

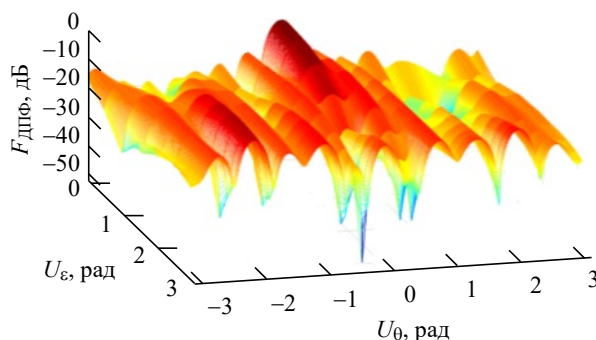


Рис. 4. ДН плоской разреженной АР

Fig. 4. AP of the flat sparse AA

рис. 4. Здесь и далее геометрия и число элементов АР соответствуют рис. 3. ОСШ на входе каждого канала приема в данном примере равно $q_{\text{вх}} = 6$ дБ. ДН построена с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ) в базисе пространственных частот по азимуту U_θ и углу места U_ε , нормированных к шагу АР $d_0 = \lambda/2$ и однозначно связанных с соответствующими угловыми координатами θ и ε соотношениями [9]:

$$U_\theta = \frac{2\pi}{\lambda} d_0 \sin \theta = \pi \sin \theta$$

при $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$; $U_\theta \in [-\pi, \pi]$; (1)

$$U_\varepsilon = \frac{2\pi}{\lambda} d_0 \sin \varepsilon = \pi \sin \varepsilon$$

при $\varepsilon \in [0^\circ, 90^\circ]$; $U_\varepsilon \in [0, \pi]$. (2)

Как показал детальный анализ сечений ДН по азимутальному углу θ , интерференционные БЛ трехмерной ДН ДПФ достигают уровня -5 дБ и выше относительно главного, что не может считаться приемлемым на практике.

Исследования, выполненные в [10], показали, что, если шаг линейной неэквидистантной АР изменяется в пределах от $d_{\min} = \lambda/2$ до $d_{\max} = 2\lambda$, то пространственную обработку сигналов в АР для получения приемлемых ДН и статистических характеристик (характеристик обнаружения и точности измерения параметров сигналов) целесообразно выполнять с помощью модифицированного параметрического метода Берга. В данной работе для диаграммоформирования в плоской разреженной

АР ПКЛ предлагается использовать следующий двухэтапный алгоритм: на первом этапе с помощью параметрического метода Берга методом сечений по азимуту θ при фиксированных и последовательно изменяемых значениях угла места $\varepsilon = \text{const}$ строится трехмерная ДН АР; на втором этапе уточняются углы места ε целей, обнаруженных на первом этапе. Таким образом, объектом исследований являются характеристики направленности плоской разреженной АР ПКЛ в азимутальной и угломестной плоскостях, полученные методом компьютерного моделирования в среде MatLab при воздействии аддитивного гауссовского шума, сопутствующего многоканальному приему сигналов АЭ.

Основные соотношения. Как известно, метод Берга описывает анализируемые сигналы с помощью моделей авторегрессии определенного порядка K , представляющих собой авторегрессионные уравнения: дифференциальные или разностные (соответственно, для непрерывных и дискретных процессов) [11]. Положим координаты первого АЭ в соответствии с рис. 3 равными $x_1 = 0$ и $y_1 = 0$. Тогда дискретные координаты последующих АЭ, соответствующие осям X и Y , обозначим как $x_m = (m-1)d_0$ и $y_l = (l-1)d_0$, где $d_0 = \lambda/2$ – полуволновой шаг плоской АР по обеим осям. Поскольку число АЭ M фиксировано и не зависит от геометрии их распределения по строкам, сохраним сквозную нумерацию АЭ и соответствующих им сигналов. Полезный сигнал, отраженный от цели с угловыми координатами θ_0 и ε_0 , в АЭ с координатами x_m и y_l запишем как

$$\begin{aligned} s(m) &= A_0 \exp \left\{ -j \frac{2\pi d_0}{\lambda} \left[(m-1) \sin \theta_0 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (l-1) \sin \varepsilon_0 \right] \right\} = \\ &= A_0 \exp \left\{ -j \left[(m-1) U_{\theta_0} + (l-1) U_{\varepsilon_0} \right] \right\}, \\ m &= 1, 2, \dots, M; l = 1, 2, \dots, L, \end{aligned} \quad (3)$$

где A_0 – неизменная по апертуре АР амплитуда пространственного сигнала, а пространственные частоты по азимуту U_{θ_0} и углу места U_{ε_0} определяются в соответствии с (1) и (2). Далее

для простоты вычислений положим $A_0 = 1$. При воздействии аддитивного не коррелированного по каналам приема шума $e(m)$ совокупный комплексный сигнал запишем как

$$\begin{aligned} V(m) &= s(m) + e(m), \\ m &= 1, 2, \dots, M, \end{aligned} \quad (4)$$

где $s(m)$ определяется в соответствии с (3). Тогда разностное уравнение авторегрессии K -го порядка для дискретного пространственного сигнала (4) запишется в виде [11]

$$\begin{aligned} V(m) &= - \sum_{k=1}^K a_k V(m-k), \\ m &= K+1, K+2, \dots, M, \end{aligned} \quad (5)$$

где a_k – комплексные коэффициенты авторегрессии, а порядок модели $K < M$. Уравнение авторегрессии (5) инвариантно к направлению и началу отсчета АЭ, поэтому может быть записано в обратном направлении [11]:

$$\begin{aligned} V(m) &= - \sum_{k=1}^K a_k^* V(m+k), \\ m &= M, M-1, \dots, M-K, \end{aligned} \quad (6)$$

где a_k^* – комплексно-сопряженные коэффициенты авторегрессии.

Метод Берга позволяет вычислять коэффициенты авторегрессии на основе имеющейся пространственной выборки сигнала $V(m)$ размером M . Критерием является условие минимизации суммарной мощности ошибки предсказания в прямом и обратном направлениях P_K при подгонке генерируемого авторегрессионной моделью сигнала вида (5) и (6) к реальной зашумленной выборке (4). Оценка энергетического спектра пространственных частот по методу Берга с точностью до P_K определяется только коэффициентами авторегрессии a_k [12]:

$$F_B(U) = \frac{P_K}{\left| 1 + \sum_{k=1}^K a_k \exp(-jkU) \right|^2}. \quad (7)$$

Выражение (7) по сути является ДН метода Берга в базисе пространственных частот вида

(1) или (2), которые однозначно связаны с соответствующими угловыми координатами θ или ε .

При построении трехмерных диаграмм методом синфазного суммирования, эквивалентом которого является двумерное ДПФ, ДН $F_{\text{ДПФ}}(U)$ вычисляется в соответствии с выражением

$$F_{\text{ДПФ}}(U) = \sum_{m=1}^M V(m) s_{\text{оп}}^*(m),$$

$$m = 1, 2, \dots, M, \quad (8)$$

где комплексно-сопряженный опорный сигнал с единичной амплитудой $s_{\text{оп}}^*(m)$ имеет вид

$$s_{\text{оп}}^*(m) = \exp\{j[(m-1)U_{\theta} + (l-1)U_{\varepsilon}]\}.$$

Заметим, что формирование ДН $F_{\text{ДПФ}}(U)$ по (8) соответствует согласованной обработке, оптимальной при приеме одиночного сигнала на фоне нормального дельта-коррелированного шума [13].

Азимутальные ДН в горизонтальной плоскости по методу Берга $F_B(U_{\theta})$ строились на основе сечений, выполненных при тех же фиксированных значениях $\varepsilon = \text{const}$, что и $F_{\text{ДПФ}}(U_{\theta})$. В уравнения авторегрессии (5) и (6) необходимо подставлять скорректированные сигналы $\tilde{V}(m)$ с коррекцией фазы в зависимости от позиции АЭ в строках и значения просматриваемого угла места ε :

$$\tilde{V}(m) = V(m) \tilde{s}_{\text{оп}}^*(m),$$

где корректирующий комплексно-сопряженный опорный сигнал с единичной амплитудой $\tilde{s}_{\text{оп}}^*(m)$ имеет вид

$$\tilde{s}_{\text{оп}}^*(m) = \exp[j(l-1)U_{\varepsilon}].$$

После вычисления коэффициентов авторегрессии a_k ($k = 1, 2, \dots, K$) строятся азимутальные сечения трехмерной ДН по методу Берга $F_B(U_{\theta})$ вида (7) при фиксированных углах места $\varepsilon = \text{const}$ и, соответственно, фиксированных угломестных частотах $U_{\varepsilon} = \text{const}$.

При построении ДН методом Берга в угломестной плоскости $F_B(U_{\varepsilon})$ необходима дуаль-

ная замена переменных, угловых параметров и, соответственно, сигналов, являющихся входными для алгоритма Берга:

$$m \rightarrow l; M \rightarrow L; \theta \leftrightarrow \varepsilon; U_{\theta} \leftrightarrow U_{\varepsilon};$$

$$\tilde{V}(m) \rightarrow \tilde{V}(l); \tilde{s}_{\text{оп}}^*(m) \rightarrow \tilde{s}_{\text{оп}}^*(l).$$

Дополнительным достоинством рекуррентного метода Берга является возможность пошагового наращивания порядка модели до необходимого значения. Отметим, что в методе Берга есть опция определения порядка модели $K = K_{\text{opt}}$ на основе минимизации ошибки аппроксимации реального сигнала уравнением авторегрессии $P_K = P_{K \min}$ [11, 14]. Для радиолокационных приложений существенным является то, что порядок модели K определяет предельное количество целей, разрешаемых по заданной координате на исследуемом элементе по дальности. Рабочие статистики для решения задач обнаружения и оценки угловых параметров приняты как в [10] и не являются объектом исследований в рамках данной работы.

Основные результаты. На рис. 5 представлены трехмерные (3D) ДН, полученные методом сечений при применении параметрического метода Берга по азимутальной пространственной частоте U_{θ} и изменении угла места ε с шагом $\Delta\varepsilon = 10^\circ$. Порядок авторегрессионной модели при построении ДН последовательно принимался равным $K = 2$ (рис. 5, а), $K = 3$ (рис. 5, б) и $K = 4$ (рис. 5, в). Все ДН построены в базисе нормированных пространственных частот, определяемых в соответствии с (1) и (2). При построении ДН, приведенных на рис. 5, азимут цели $\theta_0 = 0^\circ$, угол места цели $\varepsilon_0 = 0^\circ$, азимутальная и угломестная пространственные частоты равны соответственно $U_{\theta_0} = 0$ рад и $U_{\varepsilon_0} = 0$ рад. ОСШ на входе алгоритмов пространственной обработки ДПФ и метода Берга $q_{\text{вх}} = 6$ дБ.

Как видно из графиков, ДН метода Берга, как и ДПФ, имеют побочные выбросы, которые можно трактовать как БЛ, однако их количество определяется порядком модели и не превышает значения $(K - 1)$. Выполненные

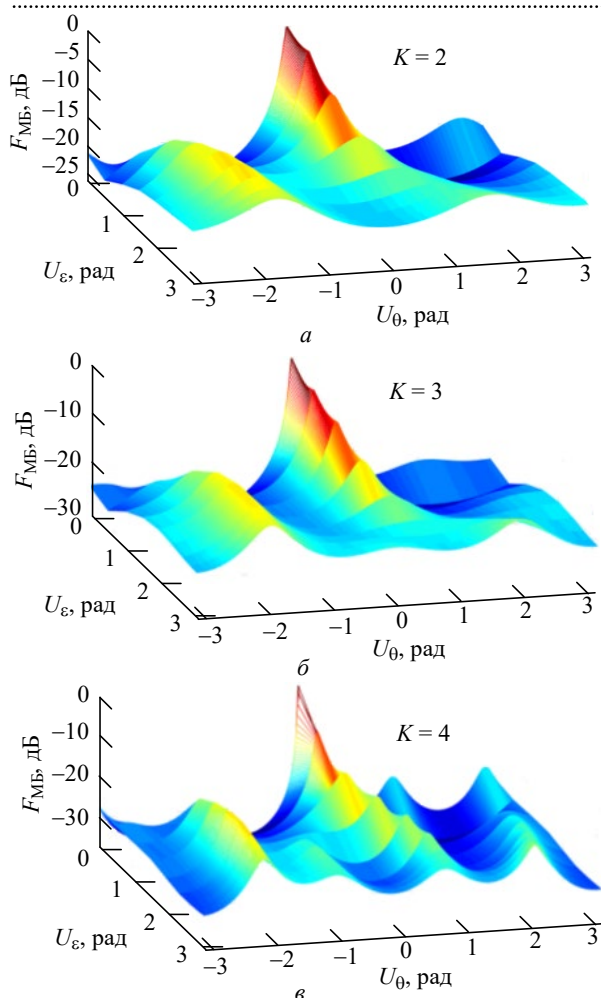


Рис. 5. ДН, полученные при применении метода Берга: а – при $K = 2$; б – при $K = 3$; в – при $K = 4$

Fig. 5. APs obtained using the Burg method: а – for $K = 2$; б – for $K = 3$; в – for $K = 4$

исследования показали, что уровень и положение БЛ на азимутально-угломестной плоскости носит случайный характер и не повторяется от реализации к реализации сопутствующего аддитивного многоканального шума. Существенным результатом является пониженный по сравнению с ДН ДПФ (см. рис. 4) уровень интерференционных БЛ: при увеличении порядка модели с $K = 2$ до $K = 4$ БЛ снижаются с -12 дБ до -17 дБ. На рис. 6 представлены отдельные сечения приведенных на рис. 5 3D-ДН, полученные методом Берга при углах места $\varepsilon = 0^\circ$ (рис. 6, а), $\varepsilon = 30^\circ$ (рис. 6, б), $\varepsilon = 60^\circ$ (рис. 6, в) и $\varepsilon = 90^\circ$ (рис. 6, г). Штрихпунктиром на всех рисунках приведены сечения ДН метода Берга при порядке модели $K = 2$, пунктирной кривой соответствует $K = 3$, а сплошной линией приведены сечения при $K = 4$. Для сравнения штриховыми кривыми на рис. 6 приведены сечения ДН, полученные с помощью пространственного ДПФ при тех же реализациях многоканального комплексного шума.

Приведенные на рис. 6 графики наглядно иллюстрируют снижение БЛ ДН метода Берга для всех углов места. Отметим, что увеличение порядка модели помогает снизить уровень БЛ, однако платой за это становится возрастание объема вычислений. В то же время, предельное количество разрешаемых по азимуту целей в

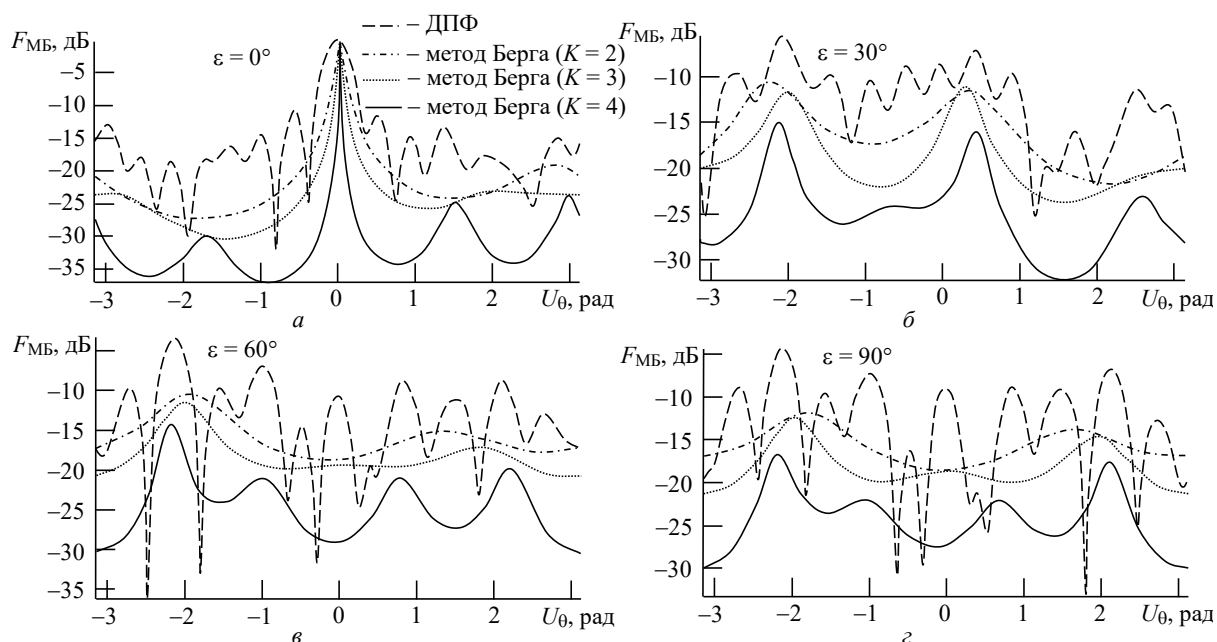


Рис. 6. Сечения ДН, полученные методом Берга, при различных углах места ε : а – 0° ; б – 30° ; в – 60° ; г – 90°

Fig. 6. AP sections obtained using the Burg method with different values of the elevation ε : а – 0° ; б – 30° ; в – 60° ; г – 90°

элементе разрешения по дальности и скорости ограничено именно порядком авторегрессионной модели K .

Параметрический метод Берга, в отличие от хрестоматийного ДПФ, относится к нетрадиционным методам оценивания частотных спектров во временной или пространственной области, поэтому представляет интерес формирование характеристик направленности (двумерных угловых спектров) при воздействии на разреженную плоскую АР двух разнесенных по угловым координатам – азимуту θ и углу места ε – сигналов.

На рис. 7 представлены результаты построения ДН метода Берга при воздействии двух равных по мощности и разнесенных по азимуту и углу места сигналов с угловыми координатами отражающих объектов $\theta_1 = 0^\circ$, $\varepsilon_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 30^\circ$, $\varepsilon_2 = 30^\circ$ соответственно. Этим угловым координатам соответствуют нормированные пространственные частоты $U_{\theta_1} = 0$ рад и $U_{\varepsilon_1} = 0$ рад для первого сигнала и $U_{\theta_2} = \pi/2$ рад и $U_{\varepsilon_2} = \pi/2$ рад для второго

сигнала. Порядок авторегрессионной модели при построении ДН метода Берга последовательно принимался равным $K = 2$ (рис. 7, а), $K = 3$ (рис. 7, б) и $K = 4$ (рис. 7, в). Для сравнения на рис. 7, г приведена ДН, полученная с помощью ДПФ. Входное ОСШ при построении ДН составляло $q_{\text{вх}} = 20$ дБ.

Рис. 7 показывает, что использование метода Берга позволяет существенно улучшить качество углового разрешения двух сигналов в разреженной плоской АР по сравнению с традиционными алгоритмами диаграммоформирования, основанными на ДПФ. Доказательством этого являются более острые максимумы как по азимуту, так и по углу места, а также значительно более низкий уровень БЛ 3D-ДН. В то же время, в случае равенства азимутальных координат $\theta_1 = \theta_2$ и малого значения угломестного разнеса отражающих объектов $\Delta\varepsilon = |\varepsilon_1 - \varepsilon_2|$ в результирующей ДН может не наблюдаться рэлеевского разрешения, которое предполагает наличие в ДН двух максимумов, уровень которых соответствует мощностям разрешаемых сигналов. На рис. 8 представлены

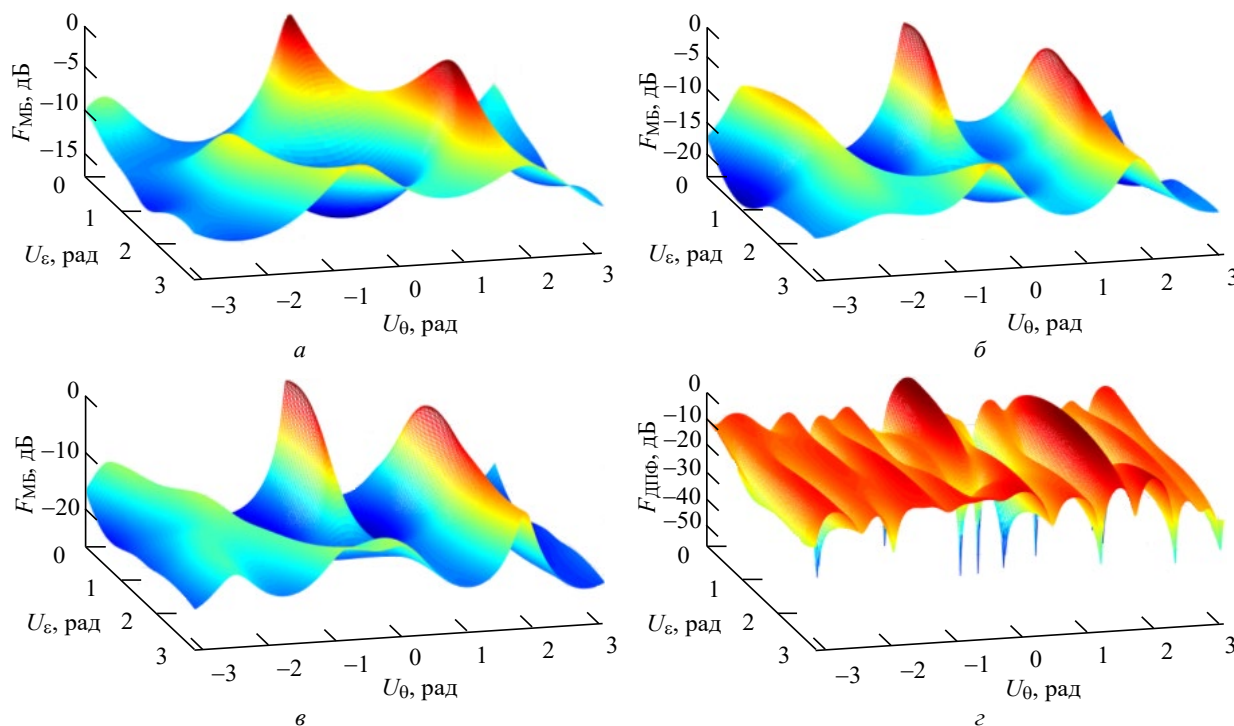


Рис. 7. Угловое разрешение двух сигналов пространственно разнесенных целей: а – метод Берга ($K = 2$); б – метод Берга ($K = 3$); в – метод Берга ($K = 4$); г – ДПФ

Fig. 7. Angular resolution of two signals from spatially separated targets: а – Burg method ($K = 2$); б – Burg method ($K = 3$); в – Burg method ($K = 4$); г – DFT

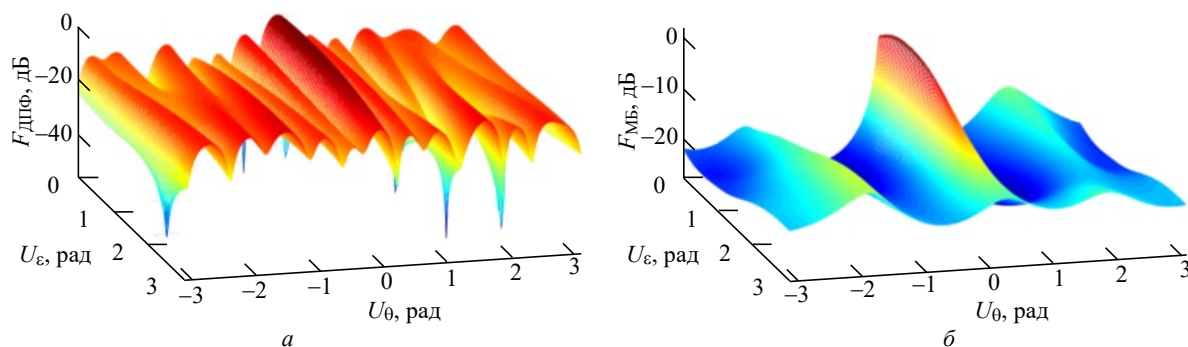


Рис. 8. Разрешение двух равномошных сигналов только по углу места: а – ДПФ; б – метод Берга ($K = 4$)

Fig. 8. Only elevation resolution of two equally powerful signals: а – DFT; б – Burg method ($K = 4$)

ДН плоской разреженной АР при $\theta_1 = 0^\circ$, $\varepsilon_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 0^\circ$, $\varepsilon_2 = 30^\circ$. При этом нормированные пространственные частоты $U_{\theta_1} = 0$ рад и $U_{\varepsilon_1} = 0$ рад для первого сигнала и $U_{\theta_2} = 0$ рад и $U_{\varepsilon_2} = \pi/2$ рад для второго сигнала. Рис. 8, а соответствует ДН ДПФ, рис. 8, б – ДН метода Берга (порядок модели $K = 4$) при ОСШ на входе $q_{\text{вх}} = 20$ дБ.

Как следует из рис. 8, разрешения двух равномошных сигналов при совпадающих азимутах не наблюдается даже при высоком ОСШ на входе обоих алгоритмов пространственной обработки.

В рассматриваемом ПКЛ "Охрана", описанном в [2], имеется возможность двухэтапной обработки сигналов, которая имеет следующую логику. На первом этапе осуществляется формирование в азимутальной плоскости 3D-ДН с обработкой сигналов методом Берга, обнаружение сигналов, отраженных от целей, а также определение азимутальных углов прихода отраженных сигналов в соответствии с рабочими статистиками, приведенными в [5, 10]. На втором этапе в фиксированных направлениях по азимуту, соответствующих обнаруженным на предыдущем этапе целям, строятся угломестные сечения ДН также с использованием метода Берга, который обладает более высоким разрешением, чем традиционный алгоритм ДПФ. Для плоской разреженной АР (см. рис. 3), содержащей 3 ряда АЭ по вертикали, возможно использование метода Берга для авторегрессионных моделей порядков $K = 1$ и $K = 2$. В первом случае ($K = 1$) обеспечивается более высокая точность и однозначность измере-

ний угла места одиночной цели $\varepsilon_{\text{ц}}$ в заданном азимутальном направлении $\theta_{\text{ц}}$. Как известно [10], асимптотический предел для дисперсии ошибки измерения пространственной частоты методом Берга $\sigma_{\text{В}}^2$ минимален при $K = M/3$, что при $M = 3$ соответствует порядку $K = 1$. При этом в сечении ДН будут отсутствовать БЛ по углу места, что гарантирует однозначность измерений даже при низких ОСШ. Во втором случае ($K = 2$) в сечении ДН может появиться один побочный максимум (БЛ), что при низких ОСШ может привести к аномальным ошибкам измерения угла места, однако второй порядок модели позволяет разрешать две цели по углу места с близкими или совпадающими азимутальными углами. Заметим, что рекуррентный характер метода Берга при расчете параметров авторегрессионной модели позволяет одновременно строить ДН для двух порядков [11], что является несомненным достоинством метода.

На рис. 9 приведены сечения ДН в угломестной плоскости при фиксированном значении азимута $\theta_{\text{ц}} = 0^\circ$. Рис. 9, а соответствует сечению ДН по углу места, выполненному с помощью метода Берга при ОСШ на входе $q_{\text{вх}} = 6$ дБ, рис. 9, б – при $q_{\text{вх}} = 20$ дБ. Штрихами на рис. 9 показаны ДН при порядке модели $K = 1$, сплошной линией – при $K = 2$. Следует отметить, что угловое положение БЛ, обусловленного шумами на входе каналов приема, может принимать и отрицательные, не существующие физически значения угла места. В этом случае они не будут наблюдаться и, следовательно, влиять на результирующую ДН. Как видно из графиков, с ростом ОСШ

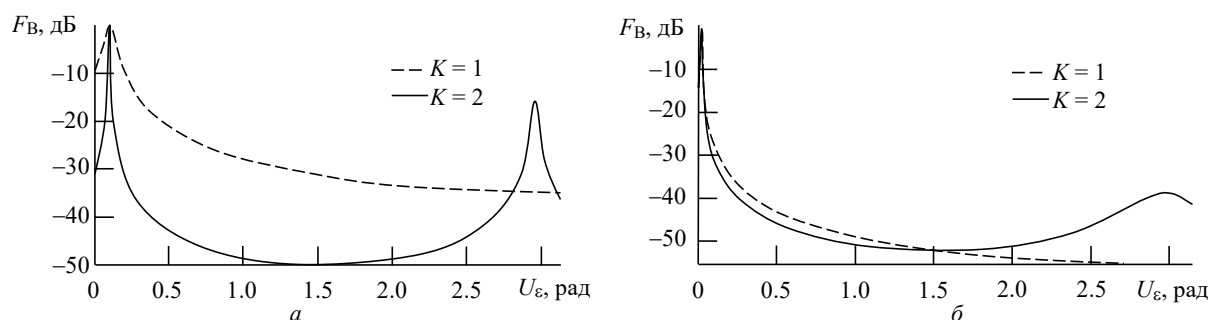


Рис. 9. Сечения ДН, полученные методом Берга, в угломестной плоскости:
а – при $q_{\text{вх}} = 6$ дБ; б – при $q_{\text{вх}} = 20$ дБ

Fig. 9. AP sections obtained using the Burg method in the elevation plane: а – for $q_{\text{вх}} = 6$ dB; б – for $q_{\text{вх}} = 20$ dB

растет точность оценки угла места и острота максимумов при обоих значениях порядка модели K , а также уменьшается уровень единственного БЛ.

На рис. 10 приведены сечения ДН по углу места в случае обнаружения двух равномошных целей с одинаковыми азимутальными углами $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$, но различными углами места $\varepsilon_1 = 0^\circ$ и $\varepsilon_2 = 30^\circ$, что соответствует угломестным пространственным частотам $U_{\varepsilon_1} = 0$ рад и $U_{\varepsilon_2} = \pi/2$ рад. Сечение, представленное на рис. 10, а сплошной линией, получено методом Берга второго порядка при ОСШ на входе $q_{\text{вх}} = 6$ дБ. Сечение на рис. 10, б получено при аналогичных условиях, но при ОСШ $q_{\text{вх}} = 20$ дБ. Для сравнения на рис. 10, а, б штрихами приведены отклики алгоритма пространственного ДПФ.

Графики на рис. 10 свидетельствуют об уверенном угломестном разрешении методом Берга, по сравнению с ДПФ-алгоритмами, двух идентичных сигналов. При этом увеличение ОСШ позволяет повысить точность измерений как по угловой частоте, так и по амплитуде

сигналов, а также рэлееское разрешение по углу места.

Для рассматриваемого метода Берга представляет интерес оценка зависимости от входного ОСШ минимального углового разнота по углу места $\Delta\varepsilon = |\varepsilon_1 - \varepsilon_2|$ двух целей с совпадающими азимутальными углами $\theta_1 = \theta_2$, но различными углами места $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$, при котором вероятность рэлееского разрешения, заключающегося в наблюдении двух отдельных максимумов ДН, будет соответствовать заданному значению $D = \text{const}$ [13]. На рис. 11, а приведена зависимость $\Delta\varepsilon$ от входного ОСШ $q_{\text{вх}}$ при $D = 0.8$. Порядок авторегрессионной модели $K = 2$, что соответствует количеству разрешаемых целей.

На рис. 11, б приведены аналогичные характеристики рэлееского разрешения по азимутальной координате $\Delta\theta = |\theta_1 - \theta_2|$, полученные для двух значений порядка модели $K = 2$ (штрихпунктир) и $K = 5$ (сплошная кривая) и при равенстве углов места $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$. Штрихами на обоих рисунках приведены характеристики разрешения при построении ДН с помощью ДПФ.

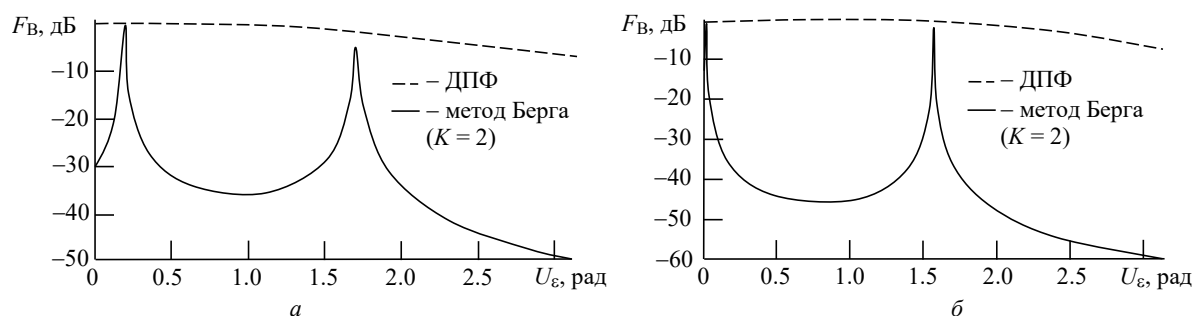


Рис. 10. Разрешение по углу места двух целей с одинаковыми азимутами: а – при $q_{\text{вх}} = 6$ дБ; б – при $q_{\text{вх}} = 20$ дБ

Fig. 10. Elevation resolution of two targets with the same azimuth: а – for $q_{\text{вх}} = 6$ dB; б – for $q_{\text{вх}} = 20$ dB

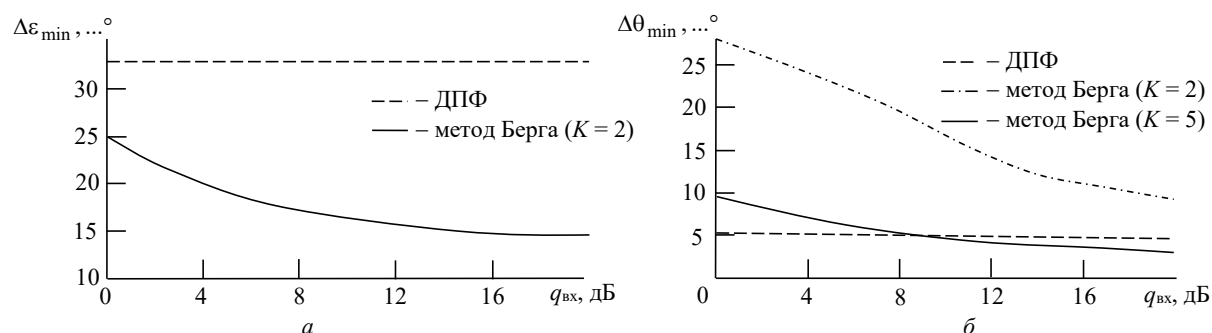


Рис. 11. Рэлееское разрешение метода Берга при фиксированной вероятности разрешения: a – зависимость $\Delta\epsilon$ от входного ОСШ $q_{\text{вх}}$ при $D=0.8$; b – характеристики рэлееского разрешения по азимутальной координате $\Delta\theta = |\theta_1 - \theta_2|$

Fig. 11. Rayleigh resolution of Burg method with a fixed resolution probability: a – dependence of $\Delta\epsilon$ on the input SNR $q_{\text{вх}}$ for $D=0.8$; b – Rayleigh resolution characteristics for the azimuth coordinate $\Delta\theta = |\theta_1 - \theta_2|$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при жестком ограничении выборки сигнала АР ($L=3$) выигрыш метода Берга в разрешающей способности по углу места по сравнению с ДПФ составляет от 1.35 раз при ОСШ $q_{\text{вх}}=0$ дБ до 2 раз при ОСШ $q_{\text{вх}}=20$ дБ. При увеличении размера выборки сигнала АР ($M=16$) выигрыш в разрешающей способности по азимутальному углу наблюдается только при порядке модели $K=5$ и более и при ОСШ $q_{\text{вх}}=10$ дБ и более. При ОСШ $q_{\text{вх}}=20$ дБ выигрыш составляет 1.5 раза.

Выводы. Двухэтапное построение 3D-ДН плоской разреженной АР с помощью параметрического метода Берга является приемлемой и конкурентоспособной альтернативой традиционному алгоритму на основе пространственного ДПФ при жестких ограничениях на размеры апертуры. Включение второго этапа пространственной обработки сигналов не требует дополнительного времени для обзора пространства, что сохраняет темп обзора неизменным.

Рассмотренная в статье процедура формирования характеристик направленности ПКЛ обеспечивает решение задач обнаружения и измерения угловых координат как одиночных, так и групповых воздушных целей с теми же вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги, а также дисперсиями ошибок измерения угловых параметров, поскольку рабочие статистики обнаружения и оценивания параметров сигналов остаются прежними и используют максимальную апертуру АР.

Дополнительным преимуществом формирования 3D-ДН методом Берга является случайное положение и нестабильный уровень БЛ на плоскости "азимут – угол места", а также ограничение их числа порядком авторегрессионной модели K . Это преимущество наглядно проявляется на этапе траекторной обработки отраженных целями сигналов, в которой объединяются результаты нескольких зондирования пространства и решается финишная задача обнаружения целей как задача обнаружения (завязки) траекторий [15].

Авторский вклад

Кутузов Владимир Михайлович – теоретическое решение.

Веремьев Владимир Иванович – разработка конфигурации антенной решетки.

Овчинников Михаил Александрович – компьютерное моделирование.

Комаров Глеб Владимирович – обработка результатов моделирования.

Author's contribution

Vladimir M. Kutuzov, theoretical description.

Vladimir I. Veremyev, development of an antenna array configuration.

Mihail A. Ovchinnikov, computer simulation.

Gleb V. Komarov, processing of simulation results.

Список литературы

1. Пассивная когерентная радиолокация / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев, А. А. Коновалов, Д. А. Ковалев, В. М. Кутузов, В. Н. Михайлов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. 163 с.
2. Проектно-ориентированная целевая подготовка кадров в партнерстве "вуз – предприятие" / В. М. Кутузов, А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев, В. Н. Малышев, О. Г. Петкау, М. С. Шмырин // XIX Всерос. науч.-практ. конф. "Планирование и обеспечение подготовки кадров для промышленно-экономического комплекса региона": сб. докл. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2020. С. 10–13.
3. Poullin D., Flecheux M., Klein M. Elevation Angle Estimation for Low-Altitude Targets Using DVB (SFN Broadcasters) // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2012. Vol. 27, № 11. P. 27–35. doi: 10.1109/MAES.2012.6380823
4. Кутузов В. М., Мазуров К. А. Многосегментный авторегрессионный алгоритм обработки сложномодулированных сигналов в задачах обнаружения скоростных целей // Радиотехника. 2012. № 7. С. 33–39.
5. Toward 3D passive radar exploiting DVB-T2 transmitters of opportunity / A. V. Barkhatov, E. N. Vorobev, V. I. Veremyev, V. M. Kutuzov // Intern. J. of Microwave and Wireless Technologies. 2019. Vol. 11, no. 7. P. 577–583. doi: 10.1017/s1759078719000746
6. Черняк В. С. О новом направлении в радиолокации: ММО РЛС // Прикладная радиоэлектроника. 2009. № 4. С. 477–489.
7. Малышкин Г. С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов: в 2 т. Т. 1: Оптимальные методы / ГНЦ ОАО "Концерн ЦНИИ «Электроприбор». СПб., 2009. 400 с.
8. Малышкин Г. С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов: в 2 т. Т. 2: Адаптивные методы / ГНЦ ОАО "Концерн ЦНИИ «Электроприбор». СПб., 2011. 374 с.
9. Кутузов В. М., Сотников А. А. Модельно-параметрические технологии обработки данных с разрывами // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2005. Вып. 2. С. 3–10.
10. Кутузов В. М., Овчинников М. А., Виноградов Е. А. Характеристики обнаружения параметрического метода обработки сигналов в неэквидистантной антенной решетке транспортируемой декаметровый радиолокационной станции // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 6. С. 43–58. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-43-58
11. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
12. Основы проектирования многопозиционных декаметровых РЛС пространственной волны / В. М. Кутузов, А. В. Бархатов, А. В. Безутлов и др.; под общ. ред. В. М. Кутузова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012. 191 с.
13. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справ. / под ред. Я. Д. Ширмана. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
14. Haykin S. O. Adaptive Filter Theory. 5th ed. Boston: Pearson, 2013. 912 p.
15. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 164 с.

Информация об авторах

Кутузов Владимир Михайлович – доктор технических наук (1997), профессор, заведующий кафедрой радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), президент университета. Автор более 270 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vmkutuzov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3438-1361>

Веремьев Владимир Иванович – кандидат технических наук (2000), профессор кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), директор НИИ "Прогноз". Автор более 90 научных работ. Сфера научных интересов – комплексный экологический мониторинг; комплексные вопросы построения радиолокационных систем; многодиапазонные многопозиционные радиолокационные комплексы для мониторинга воздушного пространства и морской поверхности.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vervladiv@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8167-6616>

Овчинников Михаил Александрович – магистр по направлению "Радиотехника" (2019), инженер НИИ "Прогноз", аспирант кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор шести научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: mixovchinnikov@list.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0814-5370>

Комаров Глеб Владимирович – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2019), инженер НИИ "Прогноз", аспирант кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – комплексные вопросы радиолокации; антенные системы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: komarov_gleb@list.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7561-278X>

References

1. Barkhatov A. V., Verem'ev V. I., Vorob'ev E. N., Konovalov A. A., Kovalev D. A., Kutuzov V. M., Mikhailov V. N. *Passivnaya kogerentnaya radiolokatsiya* [Passive Coherent Radiolocation]. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2016, 163 p. (In Russ.)
2. Kutuzov V. M., Barkhatov A. V., Verem'ev V. I., Vorob'ev E. N., Malyshev V. N., Petkau O. G., Shmyrin M. S. *Proektno-orientirovannaya tselevaya podgotovka kadrov v partnerstve "vuz – predpriyatie"* [Project-Oriented Target Training In Partnership "University – Enterprise"]. Proc. of XIX All-Russ. scientific-pract. conf. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2020, pp. 10–13. (In Russ.)
3. Poullin D., Flecheux M., Klein M. Elevation Angle Estimation for Low-Altitude Targets Using DVB (SFN Broadcasters). *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2012, vol. 27, no. 11, pp. 27–35. doi: 10.1109/MAES.2012.6380823
4. Kutuzov V. M., Mazurov K. A. Multi-Segment Auto Regression Algorithm of Processing of Complex-Modulated Signals in the High-Speed Targets Detection Tasks. *Radiotekhnika* [Radioengineering]. 2012, no. 7, pp. 33–39. (In Russ.)
5. Barkhatov A. V., Vorobev E. N., Veremyev V. I., Kutuzov V. M. Toward 3D Passive Radar Exploiting DVB-T2 Transmitters of Opportunity. *Intern. J. of Microwave and Wireless Technologies*. 2019, vol. 11, no. 7, pp. 577–583. doi: 10.1017/s1759078719000746
6. Chernyak V. S. About a New Area in Radiolocation: MIMO Radar. *Prikladnaya radioelektronika* [Applied Radio Electronics]. 2009, no. 4, pp. 477–489. (In Russ.)
7. Malyshev G. S. *Optimal'nye i adaptivnye metody obrabotki gidroakusticheskikh signalov: v 2 t. T. 1. Optimal'nye metody* [Optimal and Adaptive Methods of Hydroacoustic Signals Processing: in 2 vol. Vol. 1. Optimal Methods]. SPb., *GNTs OAO "Kontsern TsNII «Elektropribor»"*, 2009, 400 p. (In Russ.)
8. Malyshev G. S. *Optimal'nye i adaptivnye metody obrabotki gidroakusticheskikh signalov: v 2 t. T. 2. Adaptivnye metody* [Optimal and Adaptive Methods of Hydroacoustic Signals Processing: in 2 vol. Vol. 2. Adaptive Methods]. SPb., *GNTs OAO "Kontsern TsNII «Elektropribor»"*, 2011, 374 p. (In Russ.)
9. Kutuzov V. M., Sotnikov A. A. Model-Parametric Technologies of Discontinuous Data Processing. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2005, no. 2, pp. 3–10. (In Russ.)
10. Kutuzov V. M., Ovchinnikov M. A., Vinogradov E. A. Detection Characteristics of the Parametric Method of Signal Processing in a Sparse Antenna Array of a Transportable Decameter Range Radar. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2020, vol. 23, no. 6, pp. 43–58. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-43-58 (In Russ.)
11. Marple S. L. *Digital Spectral Analysis: With Applications*. N. J., Prentice-Hall, 1987, 492 p.
12. Kutuzov V. M., Barkhatov A. V., Bezuglov A. V., Verem'ev V. I., Konovalov A. A. *Osnovy proektirovaniya mnogopozicionnykh dekametrovnykh RLS prostanstvennoi volny* [Design Fundamentals for Multi-Position Decameter Skywave Radars]. SPb., *Izd-vo SPbGETU «LETI»*, 2012, 191 p. (In Russ.)
13. Shirman Ya. D. *Radioelektronnye sistemy: Osnovy postroyeniya i teoriya. Spravochnik. 2-e Izd.* [Radioelectronic Systems: Foundations of Construction and Theory. Directory. 2nd ed.]. M., *Radiotekhnika*, 2007, 512 p. (In Russ.)
14. Haykin S. O. *Adaptive Filter Theory*. 5th ed. Boston, Pearson, 2013, 912 p.
15. Konovalov A. A. *Osnovy traektornoi obrabotki radiolokatsionnoi informatsii. Chast' 1* [Fundamentals of Trajectory Processing of Radar Information. Part 1]. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2013, 164 p. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir M. Kutuzov, Dr Sci (Eng.) (1997), Professor, Head of the Department of Radio Engineering Systems, President of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 270 scientific publications. Area of expertise: radiolocation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vmkutuzov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3438-1361>

Vladimir I. Veremyev, Cand. Sci. (Eng.) (2000), Professor of the Department of Radio Engineering Systems, Director of the Research Institute "Prognoz", Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 90 scientific publications. Area of expertise: integrated environmental monitoring, complex issues of building radar systems, multi-band multi-position radar systems for airspace and sea surface monitoring.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vervladiv@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8167-6616>

Mihail A. Ovchinnikov, Master in "Radio Engineering" (2019), Engineer of the Research Institute "Prognoz", Postgraduate Student of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 6 scientific publications. Area of expertise: radiolocation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: mixovchinnikov@list.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0814-5370>

Gleb V. Komarov, Specialist of Radioelectronic systems and complexes (2019), Engineer of the Research Institute "Prognoz", Postgraduate Student of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: complex issues of radar, antenna systems.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: komarov_gleb@list.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7561-278X>
