

УДК 629.7.08

DOI 10.51955/2312-1327_2025_2_43

КОНЦЕПЦИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ РЛС ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ

*Василий Николаевич Ратушняк,
orcid.org/0000-0002-6365-5165,
кандидат технических наук, доцент
Сибирский федеральный университет,
пр. Свободный, 79
Красноярск, 660041, Россия
oborona-81@yandex.ru*

*Евгений Николаевич Гарин,
orcid.org/0009-0003-5381-0285,
доктор технических наук, профессор
Сибирский федеральный университет,
пр. Свободный, 79
Красноярск, 660041, Россия
egarín@sfu-kras.ru*

*Артём Михайлович Мекаев,
orcid.org/0009-0003-3511-9319,
аспирант
Сибирский федеральный университет,
пр. Свободный, 79
Красноярск, 660041, Россия
AMekaev@sfu-kras.ru*

*Андрей Вячеславович Лыхо,
orcid.org/0009-0001-6263-432X,
аспирант
Сибирский федеральный университет,
пр. Свободный, 79
Красноярск, 660041, Россия
alykho@sfu-kras.ru*

Аннотация. В связи со значительным возрастанием плотности транспортных потоков, особенно воздушных, в наземные радиотехнические системы управления транспортом все активнее внедряются технологии высокоточного пространственного определения воздушных объектов. В статье приводится синтез требуемой диаграммы направленности антенной решетки малой апертуры радиолокационной станции вертикального зондирования (РЛС ВЗ). Задача повышения точности измерения угловых координат воздушных объектов и реализации сверхразрешения в РЛС ВЗ с малоэлементной антенной решеткой требует решения серьезных проблем, связанных, прежде всего, с формированием амплитудно-фазового распределения зондирующего сигнала на физических элементах малоэлементной антенной решетки в сопряжении с виртуальными антенными элементами при условии достаточного энергетического потенциала и отношения сигнал/шум на выходе приемника в условиях малой апертуры антенны и

импульсной мощности зондирующего сигнала. Применение данных РЛС ВЗ в составе обзорных РЛС обеспечит перекрытие слепой зоны мертвой воронки обзорной РЛС и таким образом сформирует сплошное радиолокационное поле в верхней полусфере пространства.

Ключевые слова: обзорная радиолокационная станция, малоэлементные антенные решетки, угловое сверхразрешение, методы обработки сигналов, эффективность применения РЛС.

VIRTUAL ANTENNA ARRAY VERTICAL SOUNDING RADAR CONCEPT FOR SOLVING SUPER-RESOLUTION PROBLEMS

*Vasiliy N. Ratushniak,
orcid.org/0000-0002-6365-5165,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Siberian Federal University,
79, Svobodny Avenue
Krasnoyarsk, 660041, Russia
oborona-81@yandex.ru*

*Evgeniy N. Garin,
orcid.org/0009-0003-5381-0285,
Doctor of Technical Sciences, Professor
Siberian Federal University,
79, Svobodny Avenue
Krasnoyarsk, 660041, Russia
egarin@sfu-kras.ru*

*Artem M. Mekaev,
orcid.org/0009-0003-3511-9319,
Graduate student
Siberian Federal University,
79, Svobodny Avenue
Krasnoyarsk, 660041, Russia
AMekaev@sfu-kras.ru*

*Andrey V. Lykho,
orcid.org/0009-0001-6263-432X,
Graduate student
Siberian Federal University,
79, Svobodny Avenue
Krasnoyarsk, 660041, Russia
alykho@sfu-kras.ru*

Abstract. Due to the significant increase in the density of traffic flows, especially air ones, technologies of high-precision spatial determination of air objects are increasingly being introduced into ground-based radio engineering transport control systems. The article presents the synthesis and formation of the required directivity diagram of a small aperture antenna array of a vertical sounding radar (VS radar). The task of increasing the accuracy of measuring the angular coordinates of air objects and implementing super-resolution in a VS radar with a small-element antenna array requires solving serious problems associated, first of all, with the formation of the amplitude-phase distribution of the probing signal on the physical elements of the small-element antenna array in conjunction with virtual antenna elements, provided that the energy potential and signal-to-noise ratio at the receiver output are sufficient under conditions of a small antenna aperture and pulse power of the probing signal. The use of VS radar data as part of surveillance radars will ensure the overlap of the blind zone of the dead funnel of the surveillance radar, and thus form a continuous radar field in the upper hemisphere of space.

Key words: surveillance radar station, low-element antenna arrays, angular super-resolution, signal processing methods, radar application efficiency.

Введение

В настоящее время антенные решетки (АР) находят широкое применение в радиолокации, поскольку использование данных решеток позволяет выделить в пространстве многочастотные, сложные зондирующие сигналы и одновременно подавлять мешающие сигналы, приходящие с различных направлений¹ [Дмитриев и др., 2021; Ратынский, 2003; Сафонова, 2016]. Вместе с этим сканирование пространства и изменение главного максимума диаграммы направленности АР по определенному закону осуществляются электронным способом путем управления значений комплексных весовых коэффициентов на антенных элементах АР, т. е. значениями амплитуд и фаз зондирующих сигналов АР [Гершман и др., 1988; Монзинго и др., 1986; Пистолькорс и др., 1991]. Данные преимущества АР можно использовать в качестве дополнения в обзорных РЛС для формирования сплошной зоны обзора. Существующие обзорные РЛС с косекансной диаграммой направленности в вертикальной плоскости имеют мертвую зону в виде воронки, радиус которой зависит от конструктивных возможностей радиолокатора (максимального угла подъема раскрыва антенны в вертикальной плоскости), а также от высоты полета цели (рис. 1). С одной стороны, необходимо выбрать минимальный угол места (ε_{\min}) как можно более близким к нулю, с другой – необходимо оторвать диаграмму направленности (ДН) антенны от земли, так как облучение земной поверхности в сантиметровом диапазоне волн приводит к сильной изрезанности зоны обнаружения (ЗО) на малых углах места вследствие интерференции прямого и отраженного от неровной поверхности лучей. В метровом и нижней части дециметрового диапазона волн ЗО формируется с учетом влияния земли и значения ε_{\min} для ровного участка. Максимальный угол места ε_{\max} ЗО для исключения «мертвой воронки» желательно было бы выбирать равным 90° или близким к нему. Однако это привело бы к значительному усложнению конструкции антенной системы. В настоящее время считается целесообразным выбор значений ε_{\max} порядка $30...50^\circ$. Организационно «мертвые воронки» устраняются из радиолокационного поля путем соседних РЛС, позиции которых находятся на достаточном удалении, при котором зона обнаружения другого радиолокатора перекрывала собой мертвую воронку и слепую зону соседнего.

Дискуссия

Одним из технических вариантов решения данной проблемы является внедрение в состав РЛС мобильной и малогабаритной радиолокационной станции вертикального зондирования (РЛС ВЗ) с малоэлементной АР, которая своей ДН перекрывает слепые зоны мертвых воронок основных РЛС (рис. 1)

¹ Тяпкин В. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск : учебник. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2011. 536 с.

и в сопряжении с ними формирует сплошную диаграмму направленности в верхней полусфере [Ратушняк и др., 2025].

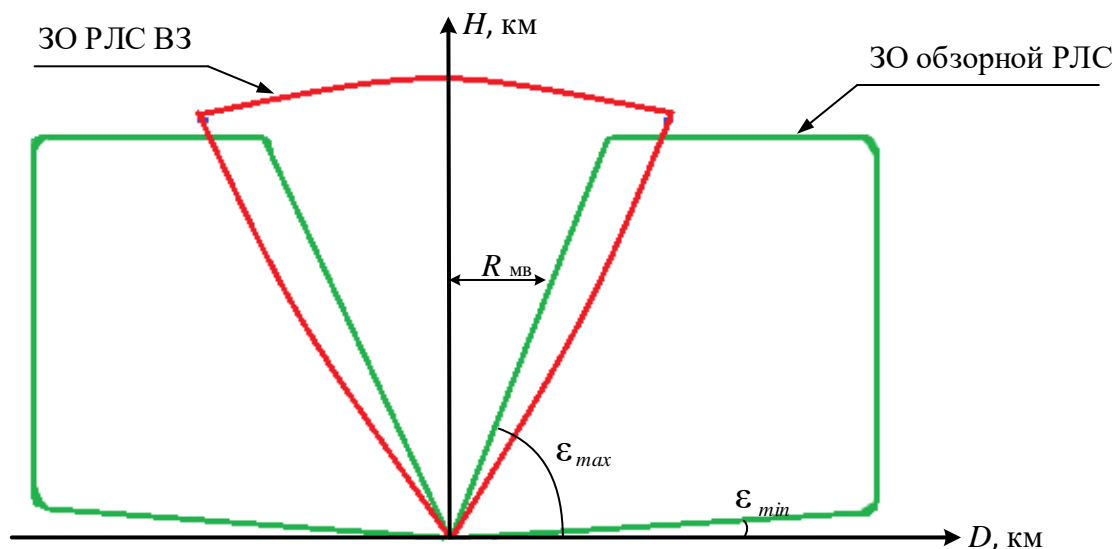


Рисунок 1 – Зона обнаружения обзорной РЛС с учетом зоны обнаружения РЛС ВЗ

Временная задержка отраженного сигнала в РЛС ВЗ, угол наклона диаграммы направленности от вертикальной оси и сдвиг по частоте, обусловленный эффектом Доплера, дают точную радиолокационную информацию о наклонной дальности, высоте и скорости перемещения воздушных объектов, которая поступает на систему отображения обзорной РЛС [Экспериментальные..., 2022]. Однако применение малоэлементной антенной решетки требует решения серьезных проблем, связанных, прежде всего, с учетом минимального числа антенн и малой апертуры антенны – электронное сканирование малоэффективно по причине очень пологой пеленгационной характеристики, определяемой шириной ДН. Поэтому дальнейшему рассмотрению подлежит концепция виртуальной приёмной антенной решетки с виртуальными антенными элементами, при этом их положение выбирается таким образом, чтобы виртуальная приёмная антенная решетка имела существенно большую апертуру по сравнению с реальной для точного оценивания углов прихода и различения сигналов с плоским волновым фронтом, отраженных от воздушных объектов, находящихся в дальней зоне (зоне Фраунгофера). Данная концепция виртуальной антенной решетки применима, когда амплитудно-фазовое распределение зондирующих сигналов, принятых этой решеткой, можно разложить в том же базисе, что и принятых реальной решеткой, и позволяет применять традиционные методы оценки угловых координат целей, в том числе методы сверхразрешения [Ермолаев и др., 2019; Ермолаев и др., 2020]. Данные методы электронного управления и измерения угловых координат воздушных объектов с использованием неподвижной малоэлементной антенной решетки обеспечивают погрешность измерения азимута и угла места цели с

погрешностью менее $1,5^\circ$, при этом позволяют реализовать компактные РЛС ВЗ с высокой мобильностью и малым энергопотреблением.

Материалы и методы

Для формирования узконаправленной ДН в направлении воздушного объекта в азимутальной и угломестной плоскостях и обеспечения возможностей управления лучом в пределах 360° в азимутальной плоскости и в заданном угломестном секторе необходимо использовать двумерную (поверхностную) решетку направленных вверх излучателей. Помимо этого, на передачу и излучение зондирующих сигналов используются реальная АР, а при приеме и цифровой обработке сигналов как реальная, так и виртуальная АР. АР представляет собой перестраиваемый пространственный фильтр, амплитудно-угловая характеристика которого, т.е. ДН, меняется в соответствии с условиями функционирования – пространственно-временными характеристиками источников принимаемых сигналов. Управление и формирование ДН АР осуществляется за счет изменения амплитудно-фазового распределения, а именно значений весовых коэффициентов каналов диаграммообразующей схемы (ДОС). Изменяя комплексные весовые коэффициенты ДОС $\vec{w}_1, \vec{w}_2, \dots, \vec{w}_k$, с которыми перемножаются зондирующие сигналы, можно добиться формирования специальной ДН и электронного сканирования атмосферы в заданных пределах [Пистолькорс и др., 1991; Ратушняк и др., 2025].

Радиолокационная станция вертикального зондирования с малоэлементной АР имеет следующие особенности построения:

- использование небольшого числа реальных элементов антенной решетки с целью уменьшения аппаратных затрат;
- наличие цифровой ДОС электронного управления главным лучом антенной системы на передачу и прием зондирующих сигналов;
- применение антенн с круговой поляризацией;
- использование твердотельных усилителей и, как следствие, распределение суммарной мощности по всему полю фазированной антенной решетки;
- для повышения энергетических характеристик при приеме использование в приемниках цифровых методов когерентного, первичной и пост обработки сложных сигналов в том числе и от виртуальной приёмной антенны решетки [Дмитриев и др., 2021; Особенности..., 2019; Пистолькорс и др., 1991; Ратушняк и др., 2025].

В АР можно сравнительно просто реализовать специальные виды амплитудно-фазового распределения в раскрыве и применять различные методы обработки сигналов, принятых отдельными излучателями антенны [Сергеев и др., 2022]. Это позволяет получать низкие уровни боковых лепестков диаграммы направленности, извлекать больше информации из принятых сигналов, использовать адаптивные алгоритмы оптимальной пространственно-временной фильтрации сигналов на фоне помех, что в целом улучшает характеристики приемной аппаратуры. Для создания желаемых

форм диаграммы направленности и слежения за источниками полезных сигналов необходимо постоянно синтезировать амплитудно-фазовое распределение на элементах ФАР, что вызывает необходимость создания специального программного обеспечения управления лучом, средств диагностики характеристик антенных элементов и приемо-передающих модулей. Помимо этого, для формирования узкого главного луча и уменьшения уровня боковых лепестков ДН рекомендуется использовать заполненные ($d/\lambda < 1$) антенные решетки, применять специальные размеры каждого антенного элемента в ААР и в некоторых случаях реализовать неэквидистантный шаг антенной решетки. В случае применения разряженной ($d/\lambda > 1$) антенной решетки возникает большое количество побочных интерференционных максимумов и минимумов ДН [Дмитриев и др., 2021; Пистолькорс и др., 1991; Ратушняк и др., 2025].

Концепция виртуальной АР для оценки углового положения воздушных объектов предполагает, что принятый ею сигнал имеет такие же свойства, как и у принятого реальной решеткой, а вектор принятых виртуальной решеткой сигналов можно разложить в том же базисе фазирующих векторов, что и вектор сигналов, принятых реальной решеткой [Шмонин, 2022]. Таким образом, сигналы виртуальной и реальной АР представляются в виде суперпозиции одних и тех же волновых фронтов отраженного эхо-сигнала. Элементы виртуальной АР конфигурируют симметрично вокруг реальной АР и фазового центра антенной решетки. Сама конфигурация подбирается таким образом, чтобы обеспечить круговое сканирование по азимуту и секторное по углу места, а количество виртуальных элементов выбирают из требований по наращиванию размеров апертуры и повышения разрешающей способности по угловым координатам.

Анализ ширины главного лепестка функции даёт определённое представление о возможной погрешности оценки угловых координат. Однако количественные характеристики погрешности могут быть получены только в результате анализа дисперсий оценок на основе границы Крамера-Рао, определяющей минимальную возможную дисперсию оценки в зависимости от числа приёмных элементов, конфигурации АР, отношения сигнал/помеха и др. [Болховская и др., 2023; Ермолаев и др., 2019]. Важно отметить, что при обычной пеленгации пеленгационный рельеф определяется зависимостью мощности отраженного зондирующего сигнала на выходе антенной решетки от угловых координат азимута и угла места при сканировании пространства. При достаточном уровне отношения сигнал/шум обнаружения воздушных объектов, дисперсия максимально правдоподобных оценок стремятся к границе Крамера-Рао и погрешность оценки угловых координат определяется в общем виде:

$$\sigma_{\sin(\beta, \varepsilon)}^2 \geq \frac{K}{(2\pi d/\lambda)^2} \frac{1}{q}, \quad (1)$$

где, $\sigma_{\sin(\beta, \varepsilon)}$ – стандартное отклонение точности оценки синуса угла прихода сигнала по азимуту, углу места, q – отношение сигнал-шум на выходе

согласованного фильтра одного из элементов АР, K – коэффициент, учитывающий количество антенных элементов, взаимное расположение и конфигурацию антенной решетки, d – расстояние между элементами решетки, λ – длина волны зондирующего сигнала.

Для формирования максимума ДН, в направлении неоднородности или участка атмосферы необходимо сформировать сдвиги фаз между соседними элементами в строке и столбце согласно выражениям (2) и (3).

$$\Delta\psi_x = kd_x \sin\beta \cos\varepsilon \quad (2)$$

$$\Delta\psi_y = kd_y \sin\beta \sin\varepsilon, \quad (3)$$

где: $\Delta\psi_x, \Delta\psi_y$ – необходимые сдвиги фаз между соседними элементами в строке и столбце, β – азимут главного луча ДН, ε – угол места главного луча ДН.

Однако в плоской прямоугольной решетке происходит расширение главного луча ДН при отклонении луча от нормали к плоскости решетки и при сканировании по азимуту. Этому недостатка лишены кольцевые антенные решетки, которые по сравнению с плоскими решетками обладают целым рядом преимуществ: сохранение формы главного луча ДН при электронном сканировании в круговом секторе пространства атмосферы, снижение уровня боковых лепестков. Направление зондирующего сигнала можно задать единичным вектором из выбранного антенного элемента или фазового центра решетки к источнику согласно выражению [Дмитриев и др., 2021; Пистолькорс и др., 1991]:

$$L(\beta, \varepsilon) = (\cos(\beta) \cos(\varepsilon) \cdot \sin(\beta) \cos(\varepsilon) \cdot \sin(\beta))^T \quad (4)$$

Тогда вектор амплитудно-фазового распределения по элементам решетки, задающий направление главного луча, будет определяться выражением:

$$\mathbf{H}(\beta, \varepsilon) = \left(F_1(\beta, \varepsilon) \cdot \exp\{-2\pi j \cdot (R\mathbf{A}^{<1>}, L(\beta, \varepsilon))\} \dots F_n(\beta, \varepsilon) \cdot \exp\{-2\pi j \cdot (R\mathbf{A}^{<n>}, L(\beta, \varepsilon))\} \right), \quad (5)$$

где $F_1(\beta, \varepsilon)$ – амплитудно-фазовая ДН k -го элемента решетки; $(R\mathbf{A}^{<1>}, L(\beta, \varepsilon))$ – скалярное произведение.

В этом случае сформировать луч ДН можно с помощью диаграммообразующей схемы, представляющей собой весовой сумматор сигналов, где амплитуды сигналов на отдельных элементах антенной решетки складываются по правилу сложения векторов. Тогда для фокусировки луча ДН АР в определенном направлении нужно скомпенсировать разность хода зондирующего сигнала между элементами антенн путем заданного амплитудно-фазового распределения. В узле формирования комплексного сигнала с помощью преобразования Гильберта, реализованном на основе цифрового фильтра, формируется комплексный сигнал согласно выражению:

$$Sr_{k,n} = \sum_{m=0}^M Qr_{k,n-m} h_{k,n}, \quad (6)$$

где $Sr_{k,n}$ – выходной сигнал комплексной огибающей; $Qr_{k,n}$ – действительный сигнал с выхода АЦП; h – импульсная характеристика ПГ; m

– длина импульсной характеристики ПГ; κ – число приемных каналов равное $1 \dots N$.

Далее эти сигналы используются в ДОС для формирования требуемой ДН по приему согласно выражению:

$$Xr_{k,n} = \sum_{K=0}^K \overline{W_{k,n}} S r_{k,n}, \quad (7)$$

где $Xr_{k,n}$ – выходной комплексный сигнал сформированного луча; $Sr_{k,n}$ – сигнал комплексной огибающей; $W_{k,n}$ – комплексный вектор весовых коэффициентов формирования ДН; κ – число приемных каналов, равное $1 \dots N$.

Результаты

Рассмотрим управление диаграммой направленности для двух конфигураций антенных решеток, представленных на рис. 2, на котором голубым цветом обозначены реальные элементы АР, а зеленым – виртуальные элементы. Моделирование производилось в среде Matlab, созданная модель позволяет формировать АР произвольной конфигурации с расположением антенных элементов на плоскости или произвольной объемной поверхности. В программе не учитываются эффекты взаимного влияния элементов ААР, различие АЧХ и ФЧХ АР и приемных трактов. Алгоритм сканирования АР предусматривает подстройку комплексных весовых элементов АР с целью позиционирования главного максимума ДН АР в заданном направлении в рамках ограничений, накладываемых конкретной конфигурацией АР. Рассмотрим синтез ДН АР при помощи моделирования для конфигураций АР (синий цвет – реальные элементы, зелёный цвет – виртуальные), изображенных на рис. 2.

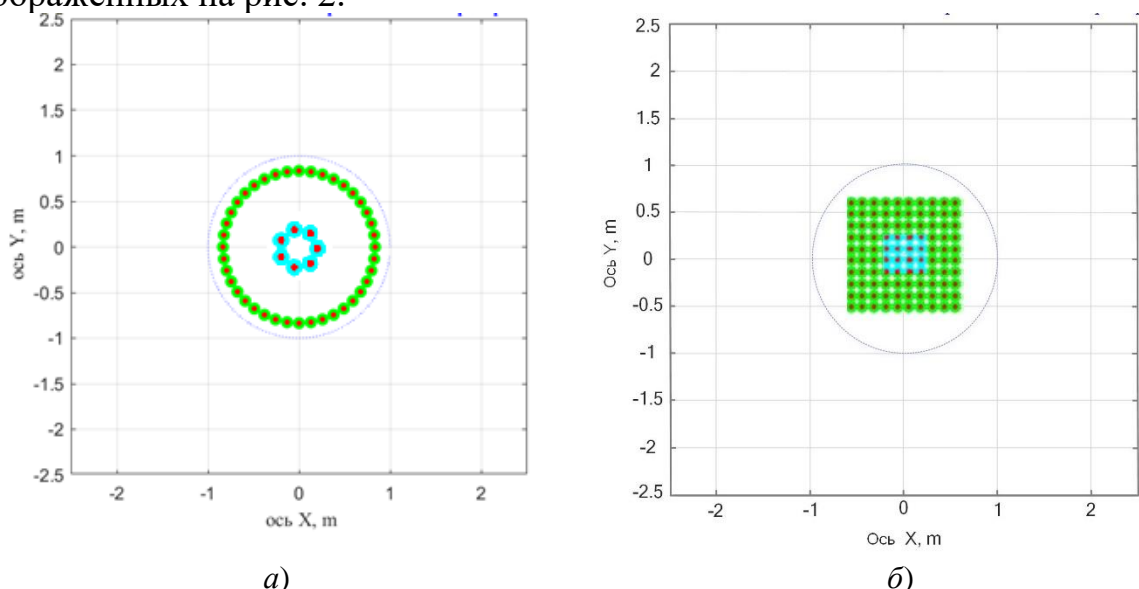


Рисунок 2 – Конфигурации АР: *а* – конфигурация № 1 – кольцевая АР с 7-элементными физическими антенными элементами с 40-элементными виртуальными антенными элементами. Расстояние между элементами равно $\lambda/2$ м. *б* – конфигурация № 2 – прямоугольная плоская АР с 16 физическими антенными элементами с 84-элементными виртуальными антенными элементами. Расстояние между элементами равно $\lambda/2$ м

На рис. 3а представлен внешний вид проектируемого двухчастотного антенного элемента реальной АР с круговой поляризацией для РЛС ВЗ, а на рис. 3б ее ДН.

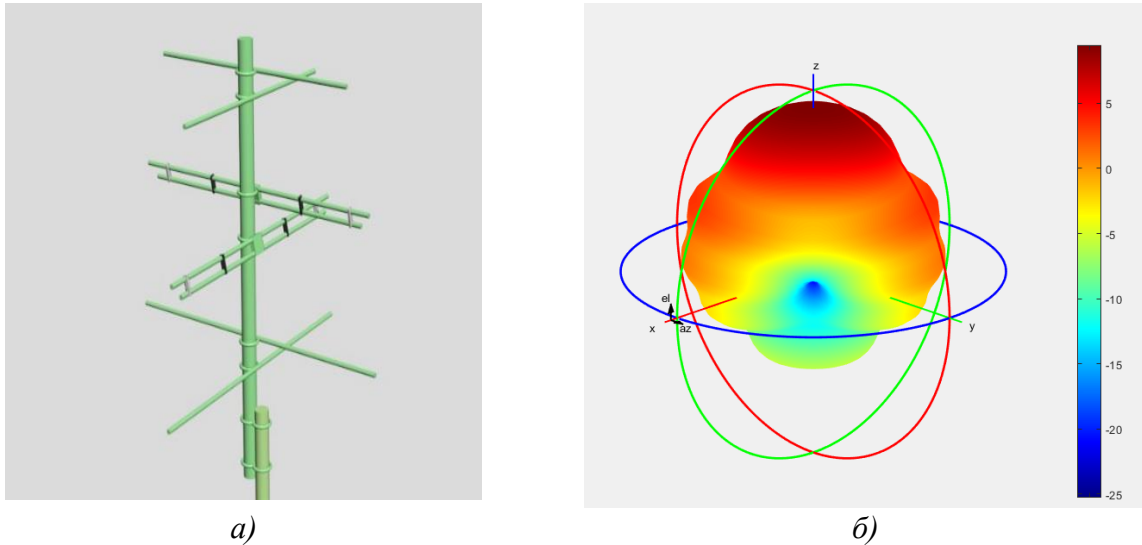
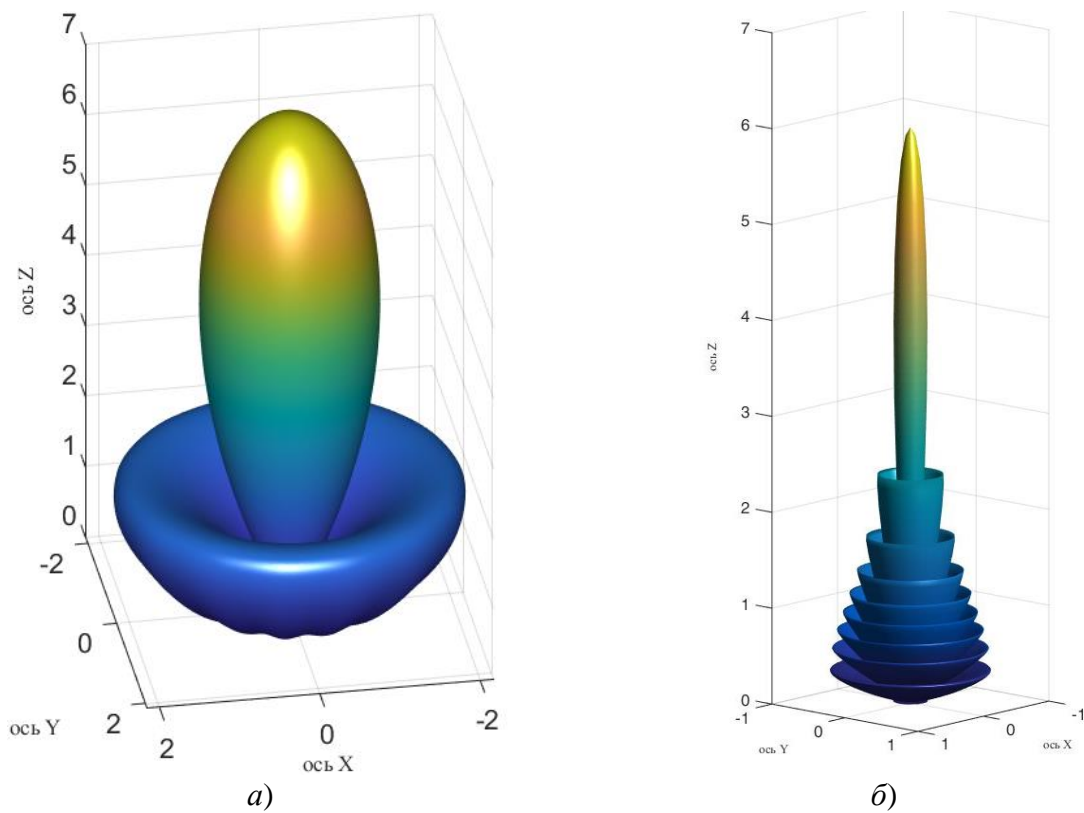
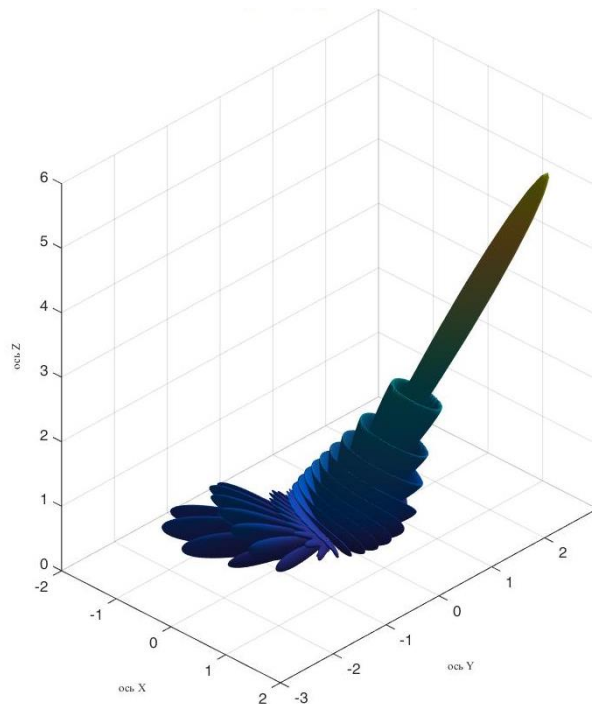
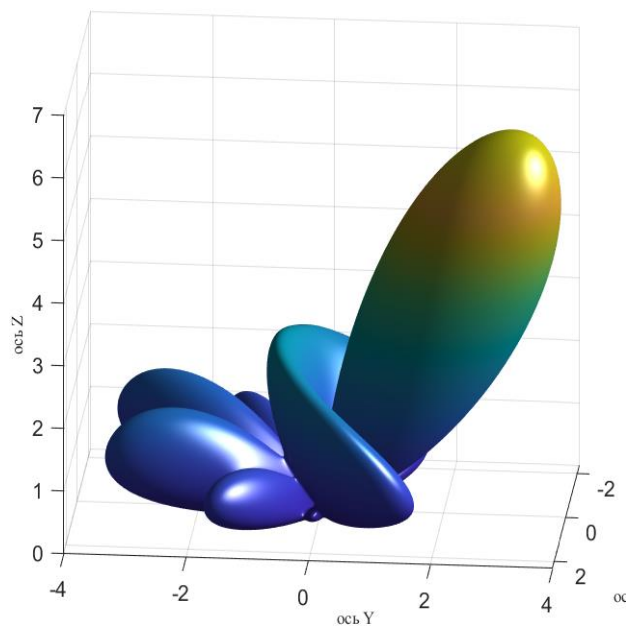


Рисунок 3 – Внешний вид и ДН антенного элемента реальной АР

При моделировании амплитудно-фазовое распределение на элементах АР вычислялось таким образом, чтобы обеспечить спиральный обзор сканирования пространства.

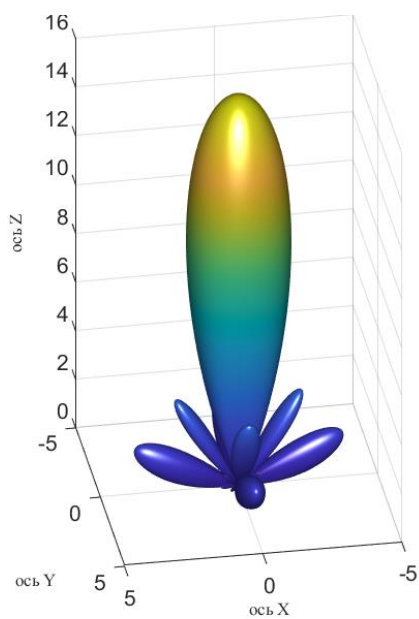




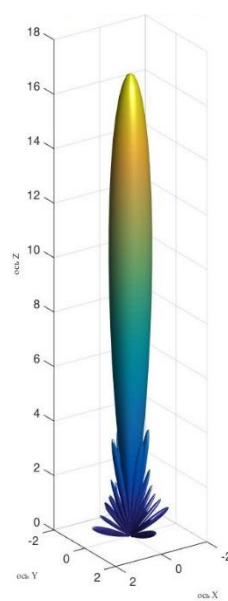
в)

г)

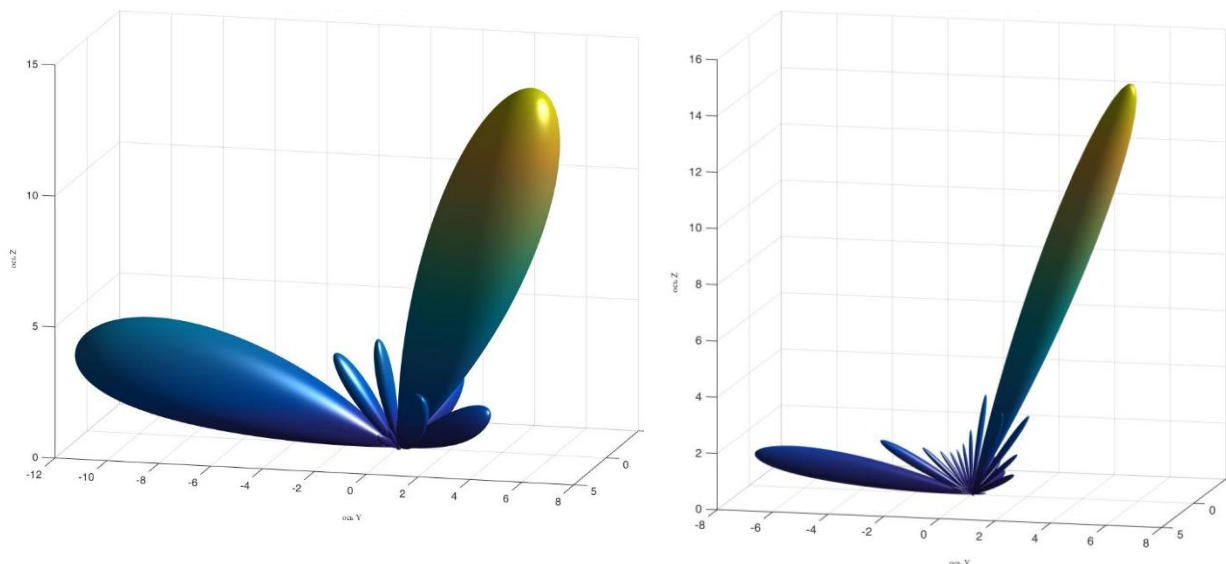
Рисунок 4 – ДН 7-элементной кольцевой АР: а) $\beta = 0^\circ$, $\varepsilon = 90^\circ$; в) $\beta = 90^\circ$, $\varepsilon = 60^\circ$; ДН кольцевой АР совместно с виртуальной (47-элементная) б) $\beta = 0^\circ$, $\varepsilon = 90^\circ$; г) $\beta = 90^\circ$, $\varepsilon = 60^\circ$



а)



б)



в)

г)

Рисунок 5 – ДН прямоугольной АР (4x4): а) $\beta = 0^\circ$, $\varepsilon = 90^\circ$; в) $\beta = 90^\circ$, $\varepsilon = 60^\circ$; ДН прямоугольной АР совместно с виртуальной (10x10) б) $\beta = 0^\circ$, $\varepsilon = 90^\circ$; г) $\beta = 90^\circ$, $\varepsilon = 60^\circ$

Из анализа результатов моделирования видно значительное сужение главного лепестка приемной ДН при использовании реальных элементов антенной решетки совместно с виртуальными по сравнению с ДН, полученной одними реальными элементами (рис. 4 а–б, 5 а–б). Важно отметить, что такой способ улучшения измерения угловых координат воздушных целей возможен при достаточном уровне отношения сигнал/шум отраженных зондирующих сигналов. При сравнении ДН прямоугольной и кольцевой АР видно, что в кольцевой АР ДН боковых лепестков по сравнению с прямоугольной имеет круговой характер в сечении плоскости, перпендикулярной к вертикали. При отклонении главного луча от нормали (более 40°) и изменении азимута сканирования в прямоугольной АР ширина главного луча ДН увеличивается и резко повышается уровень боковых лепестков по сравнению с кольцевой, у которой при изменении азимута сканирования лучше сохраняется форма главного луча ДН.

Заключение

В зависимости от выбора типа каждого антенного элемента АР, его одиночной ДН, геометрической конфигурации АР, которая определяет ее апертуру, межэлементное расстояние, количество антенных элементов, возможно сформировать необходимую ДН АР, удовлетворяющую требованиям обнаружения и погрешности измерений угловых координат воздушных объектов и уровню боковых лепестков, которые оказывают влияние на уровень многолучевого приема зондирующих сигналов. Необходимо отметить, что изменение амплитудно-фазового распределения токов или полей возбуждения на антенных элементах АР РЛС ВЗ формирует главное направление приема отраженных зондирующих сигналов, форму соответствующей диаграммы направленности и позволяет применять

сверхразрешение воздушных объектов при помощи цифровых виртуальных антенных элементов за счет расширения апертуры антенны относительно фазового центра АР реальных элементов. Данный способ улучшения пространственного разрешения угловых координат воздушных объектов в малоэлементных АР возможен при достаточно высоком отношении сигнал/шум на выходе приемных каналов. Используя в постобработке виртуальной решетки ту же базу фазирующих векторов, что и вектор сигналов, принятых реальной решеткой в ДОС, можно осуществлять более высокоточное сканирование воздушного пространства над обзорной РЛС, прибегая к различным методам (круговое, секторное, спиральное, коническое, растровое, линейное и т. д.).

Библиографический список

- Болховская О. В.* Обнаружение и определение положения источника сигнала в ближней зоне круговой антенной решетки / О. В. Болховская, В. А. Сергеев, А. А. Мальцев // Антенны. 2023. № 5(285). С. 23-37. DOI 10.18127/j03209601-202305-03. EDN KYXMIW.
- Гершман А.* Адаптивное разрешение некоррелированных источников по угловой координате / А. Б. Гершман, В. Т. Ермолаев, А. Г. Флакман // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 8. С. 941-946.
- Дмитриев Д. Д.* Электронное управление диаграммой направленности антенной решетки вертикальной радиолокационной станции зондирования атмосферы / Д. Д. Дмитриев, В. Н. Ратушняк, А. Б. Гладышев // Серия конференций ИОР. Администрация города Красноярск по науке и технологиям. 2021. Конференция, сер. 1889, 032020.
- Ермолаев В.* Ограничения конфигурации антенны для ММО-радаров, обусловленные отражением от земли / В. Ермолаев, А. Флакман, О. Шмонин // Международная конференция по технике и телекоммуникациям 2019. 2019. С. 1-5.
- Ермолаев В. Т.* Применение концепции виртуальной антенной решетки в ММО-радаре при наличии отражений от земной поверхности / В. Т. Ермолаев, А. Г. Флакман, О. А. Шмонин // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 3. С. 240-249. EDN IEIPBF.
- Монзинго Р. А.* Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
- Особенности сканирования атмосферы и построения радиолокационных станций вертикального зондирования с малоэлементной антенной решеткой / В. М. Владимиров, В. Н. Ратушняк, В. А. Вяхирев, И. В. Тяпкин // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3, № 4(30). С. 237-242. DOI 10.26732/2618-7957-2019-4-237-242. EDN ILEQQA.
- Пистолькорс А. А.* Введение в теорию адаптивных антенн / А. А. Пистолькорс, О. С. Литвинов. М.: Федеральное государственное унитарное предприятие "Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр "Наука", 1991. 200 с. EDN XXJMPR.
- Ратушняк В. Н.* К вопросу об обнаружении малоразмерных и малозаметных беспилотных летательных аппаратов обзорными радиолокационными станциями / В. Н. Ратушняк, Д. Д. Дмитриев, А. М. Мекаев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 18. № 2. С. 258-270.
- Ратынский М. В.* Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2003. 200 с. EDN QMMMLV.
- Сафонова А. В.* Эффективные алгоритмы оценивания угловых координат источников радиоизлучения : специальность 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сафонова Анастасия Владимировна. Рязань, 2016. 22 с. EDN ZQGZYN.

Сергеев В. А. Проверка гипотезы о плоском волновом фронте сигнала, принимаемого многоэлементной антенной решеткой / В. А. Сергеев, О. В. Болховская, А. А. Мальцев // Волновая электроника и ее применение в информационных и телекоммуникационных системах (WECONF). 2022.

Шмонин О. А. Разработка методов двумерного углового разрешения источников излучения в адаптивных антенных системах : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Шмонин Олег Андреевич, 2022. 141 с. EDN GXAUCE.

Экспериментальные исследования макета радиолокационной станции вертикального зондирования / В. М. Владимиров, Д. Д. Дмитриев, В. Н. Ратушняк, А. Ю. Колупаев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 15. № 7. С. 874–884. DOI 10.17516/1999-494X-0442. EDN ZFMJGV.

References

Bolkhovskaya O. V., Sergeev V. A., Maltsev A. A. (2023). Detection and determination of the position of the signal source in the near zone of the circular antenna array. *Antennas*. 5(285): 23-37.

Dmitriev D. D., Ratushnyak V. N., Gladyshev A. B. (2021). Electronic control of the antenna array pattern of a vertical atmospheric sounding radar. *IOP Conference Series. Krasnoyarsk City Administration for Science and Technology*. 2021. Conference, ser. 1889, 032020.

Ermolaev V. T., Flaksman A. G., Shmonin O. A. (2020). Application of the virtual antenna array concept in MIMO radar in the presence of reflections from the earth's surface. *News of universities. Radiophysics*. LXIII(3): 240–249.

Ermolaev V., Flaksman A., Shmonin O. (2019). Limitations of the antenna configuration for MIMO radar due to reflection from the ground. *International Conference on Engineering and Telecommunications 2019*. 1-5.

Gershman A. B., Ermolaev V. T., Flaksman A. G. (1988). Adaptive resolution of uncorrelated sources by angular coordinate. *News of universities. Radiophysics*. 31(8): 941–946

Monzingo R. A., Miller T. W. (1986). Adaptive Antenna Arrays: Introduction to Theory. Moscow: *Radio and Communications*, 1986. 448 p.

Pistolkors A. A., Litvinov O. S. (1991). Introduction to the Theory of Adaptive Antennas. Moscow: *Federal State Unitary Enterprise "Academic Scientific Publishing, Production, Printing and Book Distribution Center "Nauka"*, 1991. 200 p. EDN XXJMPR.

Ratushnyak V. N., Dmitriev D. D., Mekaev A. M. (2025). On the issue of detecting small-sized and low-visibility unmanned aerial vehicles by surveillance radar stations. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology*. 18(2): 258–270.

Ratynsky M. V. Adaptation and superresolution in antenna arrays. Moscow: *Radio and Communications*, 2003. 200 p. EDN QMMMVL.

Safonova A. V. (2016). Effective algorithms for estimating the angular coordinates of radio sources : specialty 05.12.14 "Radar and radio navigation" : abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Safonova Anastasia Vladimirovna. Ryazan, 2016. 22 p.

Sergeev V. A., Bolkhovskaya O. V., Maltsev A. A. (2022). Testing the hypothesis about a flat wave front of a signal received by a multi-element antenna array. *Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF)*. 2022.

Shmonin O. A. (2022). Development of methods for two-dimensional angular resolution of radiation sources in adaptive antenna systems : dissertation for the degree of Candidate of Physico-mathematical Sciences / Oleg Andreevich Shmonin, 2022. 141 p.

Vladimirov V. M., Dmitriev D. D., Ratushnyak V. N., Kolupaev A. Yu. (2022). Experimental studies of the vertical sounding radar station model. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology*. 15(7): 874–884.

Vladimirov V., Ratushnyak V., Vyakhirev V., Tyapkin I. (2019). Features of Atmosphere Scanning and Construction of Vertical Sounding Radar Stations with a Low-Element Antenna Array. *Spacecraft and Technologies*. 3-4(30): 237-242.