

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ ЦИФРОВЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

И. В. Пешков¹, В. А. Жигулин², Н. А. Фортунова³

^{1,2,3} Елецкий государственный университет имени И. А. Бунина, Елец, Липецкая обл., Россия
¹ ilvpeshkov@gmail.com, ² obi4n@yandex.ru, ³ fortunova.nata@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Эффект взаимного влияния антенных элементов способен оказывать существенное воздействие на характеристики сложных, чувствительных систем. Данный эффект изменяет форму диаграмм направленности антенных элементов, меняет их активное сопротивление, что усложняет согласование импедансов антенных решеток. В областях со строгими требованиями взаимодействие может оказать очень существенное влияние на результаты работы системы. В частности, они способны влиять на результаты работы цифровых алгоритмов оценки угловых координат источников радиоизлучения со сверхразрешением. Была поставлена следующая цель: разработать модель цифрового радиопеленгатора с учетом фактора взаимного влияния антенных элементов. *Материалы и методы.* Проведен анализ алгоритмов оценки угловых координат источников радиоизлучения со сверхразрешением в составе антенных решеток, состоящих из микрополосковых антенных элементов, с учетом их искаженных диаграмм направленности и фактических матриц рассеяния при действии взаимного влияния антенных элементов в диапазоне УКВ. *Результаты.* Описаны принципы работы радиопеленгатора на основе цифровых алгоритмов оценки угловых координат. Рассмотрен эффект взаимного влияния элементов антенной решетки, дана оценка его влияния на результаты пеленгации. Разработан ряд моделей алгоритмов оценки угловых координат для различных видов антенных решеток, проведено их сравнение. Лучший результат показывает метод MUSIC: разница в разрешающей способности по сравнению с другими алгоритмами составила порядка 10 дБ при использовании микрополосковых антенных элементов. Также были разработаны модели антенных решеток с разными видами элементов. Наилучшие результаты показали линейные решетки с элементами – полосковыми антеннами с воздушным диэлектриком. Разница в значениях отклонений и минимально различимых углах составила 1–2 дБ и 8–12° соответственно. *Выводы.* По результатам экспериментов было проведено сравнение нескольких антенных решеток с разными видами антенных элементов. Установлено, что наилучшей конфигурацией является использование метода MUSIC после обработки сигналов с выходов полосковых антенн с воздушным диэлектриком. Полученные данные планируется использовать в дальнейшем исследовании для установления наиболее выгодной конфигурации АР с цифровой пространственной фильтрацией для дальней тропосферной связи.

Ключевые слова: цифровые алгоритмы пеленгации, взаимное влияние антенных элементов, антенные решетки, алгоритм Барлетта, алгоритм Кейпона, алгоритм MUSIC, псевдоспектр

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00125, <https://rscf.ru/project/23-21-00125>

Для цитирования: Пешков И. В., Жигулин В. А., Фортунова Н. А. Моделирование процесса радиопеленгации цифровыми антенными решетками с учетом эффекта взаимного влияния антенных элементов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 40–52. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-4

MODELING OF THE RADIO DIRECTION FINDING PROCESS BY DIGITAL ANTENNA ARRAYS TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF MUTUAL COUPLING OF ANTENNA ELEMENTS

I.V. Peshkov¹, V.A. Zhigulin², N.A. Fortunova³

^{1,2,3} Bunin Yelets State University, Yelets, Lipetsk region, Russia
¹ ilvpeshkov@gmail.com, ² obi4n@yandex.ru, ³ fortunova.nata@mail.ru

Abstract. *Background.* The effect of mutual coupling of antenna elements can have a significant impact on the characteristics of complex, sensitive systems. This effect changes the shape of the directional patterns of antenna elements, changes their active resistance, which complicates the matching of the antenna arrays' impedances. In areas with

strict requirements, mutual coupling can have a very significant impact on the results of the system. In particular, they are able to influence the results of digital algorithms for estimating the angular coordinates of radio sources with super-resolution. The purpose of this work: to develop a digital model and to simulate the operation of the digital direction finding algorithm. The model should take into account the factor of mutual coupling between the antenna elements. *Materials and methods.* The work of algorithms for estimating the angular coordinates of radio sources with super-resolution as part of antenna arrays consisting of microstrip antenna elements has been studied, taking into account their distorted radiation patterns, as well as the actual scattering matrices of antenna arrays under the action of mutual coupling in the VHF range. *Results.* The principles of operation of the radio direction finder based on digital algorithms for estimating angular coordinates are described. The effect of mutual coupling of the elements of the antenna array is considered, and its influence on the direction finding results is estimated. A number of models of algorithms for estimating angular coordinates for various types of antenna arrays have been developed, and their comparison has been carried out. The best result is shown by the MUSIC method: the difference in resolution compared to other algorithms was about 10 dB when using microstrip antenna elements. Models of antenna arrays with different types of elements were also developed. The best results were shown by linear arrays with elements – strip antennas with an air dielectric. The difference in the values of deviations and minimally distinguishable angles was 1-2 dB and 8-12 °, respectively. *Conclusions.* According to the results of the experiments, several antenna arrays with different types of antenna elements were compared. It is established that the best configuration is to use the MUSIC method after processing signals from the outputs of strip antennas with an air dielectric. The obtained data is planned to be used in the future in a full-scale experiment. The obtained real graphs of the dependence of the received signal power on the angle are planned to be compared with the simulation results presented in this article.

Keywords: direction-of-arrival estimation, mutual coupling, antenna arrays, Bartlett algorithm, Capon algorithm, MUSIC, pseudospectrum

Financing: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-21-00125, <https://rscf.ru/project/23-21-00125>

For citation: Peshkov I.V., Zhigulin V.A., Fortunova N.A. Modeling of the radio direction finding process by digital antenna arrays taking into account the effect of mutual coupling of antenna elements. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):40–52. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-4

Введение

Большая часть работ в области изучения цифровых антенных решеток выполнена с использованием классической теории. Фундаментальным для этого подхода является предположение, что взаимное влияние (ВВ) между антенными элементами (АЭ) пренебрежимо мало. Во многих случаях это предположение оправдано. С другой стороны, в соответствии со строгими требованиями в определенных областях проектирование высокочувствительных антенн, например, для спутниковой связи, дистанционного зондирования, радиоастрономии, медицинской техники, должно осуществляться с учетом ВВ [1].

Основными причинами возникновения ВВ являются недостаточная изоляция, снижение эффективности антенны, уменьшение коэффициента усиления антенны, высокая корреляция между излучателями [2]. Изучению эффекта взаимного влияния посвящен ряд работ [3–5]. Рассмотрим воздействие данного эффекта на фазированные антенные решетки [6]. Эффекты взаимного влияния, будь то положительные или отрицательные, могут оказать существенное влияние на характеристики системы. ВВ может быть выражено приблизительно с использованием аналитических формулировок или строго с использованием численного моделирования. Второй способ предпочтительнее для решеток с небольшим числом элементов (от десятков до сотен), где аппроксимации бесконечной антенной решетки с использованием элементарных ячеек недостаточно точны.

Цель данного исследования: разработка модели и моделирование радиопеленгатора, основанного на цифровых алгоритмах оценки угловых координат, с учетом фактора ВВ антенных элементов.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- моделирование антенных решеток с разными видами антенных элементов;
- моделирование алгоритмов для антенных решеток с разными видами антенных элементов: диполями и полосковыми антеннами;
- моделирование алгоритмов с учетом матриц рассеяния и искаженных диаграмм направленности элементов.

Принцип работы цифровых алгоритмов пеленгации

Существует большое количество алгоритмов оценки угловых координат радиосигналов для цифровых антенных решеток. Они применяются для определения мощности сигнала на выходе АР в зависимости от угла прихода сигнала. По максимумам этой функции, называемой псевдоспектром,

можно оценить, с какого направления поступает радиосигнал. Достаточно широко известны алгоритмы Барлетта, Кейпона, MUSIC и др.

Описание модели радиопеленгатора и цифровой антенной решетки

На рис. 1 представлена обобщенная схема процесса радиопеленгации цифровой антенной решетки. Ее можно разделить на две части: аналоговую и цифровую. В аналоговой части происходит прием сигналов антенной решеткой. В цифровой части происходит расчет сначала корреляционной матрицы, а затем и псевдоспектра.

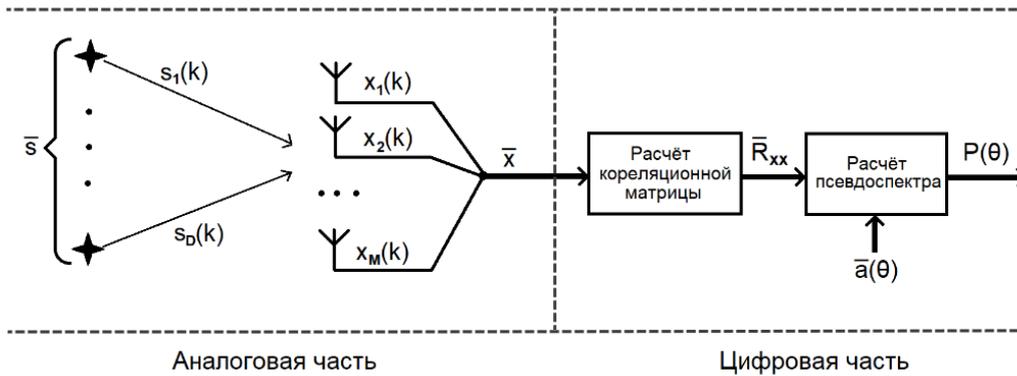


Рис. 1. Общая схема системы цифрового радиопеленгатора

Рассмотрим модель работы алгоритмов пеленгации в соответствии с данной схемой. Пусть имеется линейная антенная решетка, состоящая из M антенных элементов. Она принимает D независимых сигналов из D разных направлений с углами θ_D , как показано на рис. 1. Здесь $S_D(k)$ – падающий сигнал; $x_M(k)$ – принятый сигнал с M -го антенного элемента; $y(k)$ – итоговый выходной сигнал. В итоге формула для матрицы выходного сигнала решетки имеет следующий вид:

$$\bar{x} = \bar{A} \cdot \bar{s} + \bar{n}, \tag{1}$$

где \bar{n} – матрица шума; \bar{A} – матрица сканирующих векторов, рассчитываемая по следующей формуле:

$$\bar{A} = [\bar{q}(\theta_1) \quad \bar{q}(\theta_2) \quad \dots \quad \bar{q}(\theta_D)], \tag{2}$$

где $\bar{q}(\theta_D)$ – это сканирующий вектор из M элементов для направления θ :

$$\bar{q}(\theta) = [1 \quad e^{j\pi \sin \theta} \quad \dots \quad e^{j(M-1)\pi \sin \theta}]. \tag{3}$$

Здесь представлена формула для линейной решетки. Учитывается сдвиг фаз в антенных элементах, вызванный их расположением (с расстоянием между элементами в $0,5\lambda$).

Корреляционная матрица определяется по следующей формуле:

$$\bar{R}_{xx} = \begin{bmatrix} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_1(k) \cdot x_1(k)^* & \dots & \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_1(k) \cdot x_M(k)^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_M(k) \cdot x_1(k)^* & \dots & \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_M(k) \cdot x_M(k)^* \end{bmatrix}, \tag{4}$$

где N – число отсчетов цифрового сигнала; $x_M(k)^*$ – эрмитово-сопряженная матрица.

Далее на основе корреляционной матрицы рассчитывается псевдоспектр. Ниже представлены формулы для методов Барлетта [7], Кейпона [8, 9] и MUSIC [10] соответственно:

$$P_B(\theta) = \bar{a}(\theta)^H \bar{R}_{xx} \bar{a}(\theta), \tag{5}$$

$$P_C(\theta) = \frac{1}{\bar{a}(\theta)^H \bar{R}_{xx}^{-1} \bar{a}(\theta)}, \quad (6)$$

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{\left| \bar{a}^H(\theta) \bar{E}_N \bar{E}_N^H \bar{a}(\theta) \right|}, \quad (7)$$

где $\bar{a}(\theta)$ – матрица сканирующих векторов для всего диапазона пеленгации; \bar{E}_N – собственный вектор шумов. Выражение (5) соответствует методу Барлетта, формула (6) – методу Кейпона. Метод MUSIC (7) несколько отличается от представленных выражений. В его формуле используется не корреляционная матрица (4), а вычисляемый на ее основе собственный вектор шумов \bar{E}_N . Подробные математические преобразования рассмотрены в работах [11, 12 с. 169–202].

Взаимное влияние и метод встроенных элементов (*embedded elements*)

В антенных решетках диаграммы направленности (ДН) всех антенных элементов не идентичны. На рис. 2,а представлен пример ДН изолированного элемента. Однако взаимное влияние искажает ДН отдельных элементов (рис. 2,б). Как следствие, общая ДН решетки больше не является просто произведением коэффициента решетки и ДН изолированного элемента.

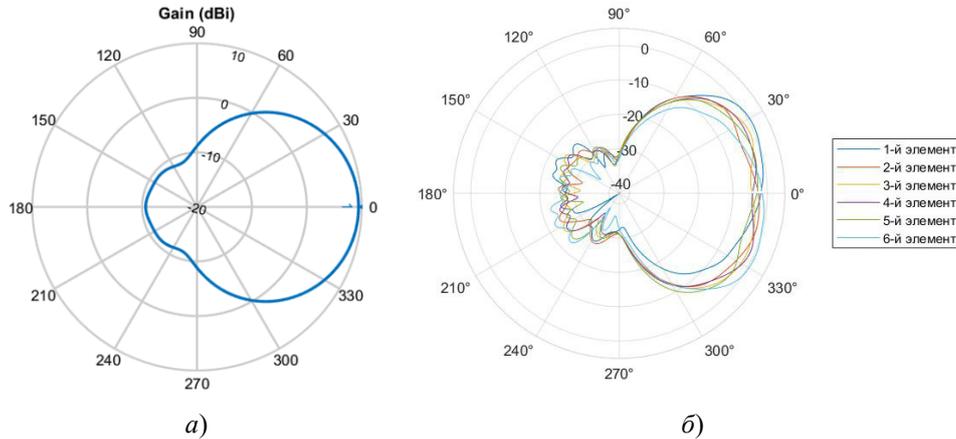


Рис. 2. Диаграммы направленности полосковой антенны:
а – изолированного антенного элемента; б – с учетом взаимного влияния

Для проведения более приближенных к реальности расчетов требуется вычисление ДН для каждого отдельного элемента антенной решетки. Диаграмма направленности отдельного элемента с учетом взаимного влияния представляет собой ДН антенной решетки, в которой исследуемый элемент считается активным, а все остальные элементы являются пассивными с отключенными выходами. Такой подход принято называть вычислением по методу встроенного элемента (*embedded element*). Ключевым моментом является то, что вычисленная таким образом ДН отдельно АЭ – это диаграмма направленности, учитывающая всю антенную решетку, включая рассеяние вблизи активного элемента.

Учет взаимного влияния в модели цифровой антенной решетки

В представленных выше формулах (1)–(7) учитывается сдвиг фаз в антенных элементах, вызванный формой антенной решетки. Однако при этом не учитывается взаимное влияние этих элементов. В связи с этим было решено скорректировать модели работы алгоритмов таким образом, чтобы в них учитывался фактор взаимного влияния АЭ, а именно диаграммы направленности каждого элемента. Для этого была дополнена формула для нахождения матрицы сканирующих векторов:

$$\bar{A}_{ДН} = [\bar{q}_{ДН}(\theta_1) \bar{q}_{ДН}(\theta_2) \dots \bar{q}_{ДН}(\theta_D)], \quad (8)$$

$$\bar{q}_{ДН}(\theta) = [f_1(\theta) \quad f_2(\theta) \cdot e^{j\pi \sin \theta} \dots f_M(\theta) \cdot e^{j(M-1)\pi \sin \theta}], \quad (9)$$

где $f_M(\theta)$ – это значение диаграммы направленности M -го антенного элемента в направлении угла θ .

Моделирование антенных решеток

Моделирование проводилось в цифровом виде. На первом этапе рассчитывается матрица случайных падающих сигналов заданной мощности. Далее на основе заранее рассчитанных антенных элементов инициализируется модель антенной решетки и вычисляются диаграммы направленности. На завершающем этапе согласно вышеуказанным формулам происходит вычисление матрицы принятых сигналов, а затем корреляционной матрицы и псевдоспектра. И, наконец, исходя из параметров выходного сигнала, рассчитывается корреляционная матрица.

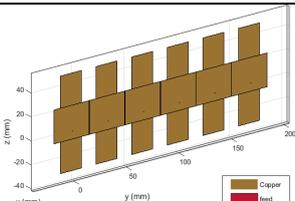
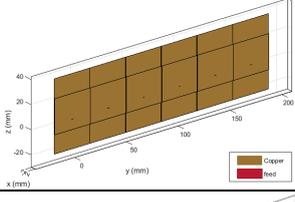
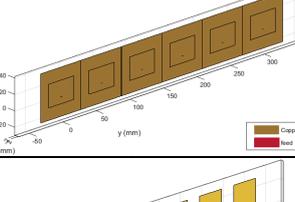
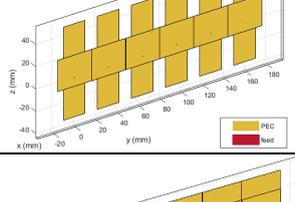
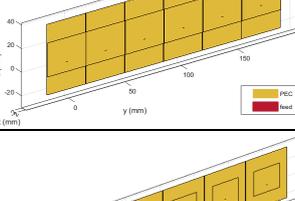
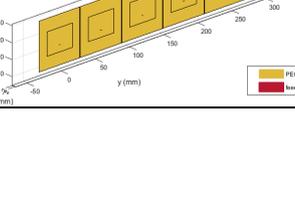
Для расчета диаграмм направленности было проведено моделирование антенных решеток согласно методу моментов по методу встроенного элемента (рис. 2,б). После расчета каждого типа антенны выполнялась оптимизация для того, чтобы максимизировать коэффициент усиления (КУ) и минимизировать параметр S_{11} при импедансе равном 50 Ом. Моделирование проводилось согласно следующим параметрам:

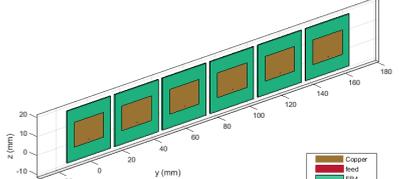
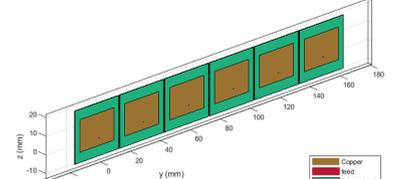
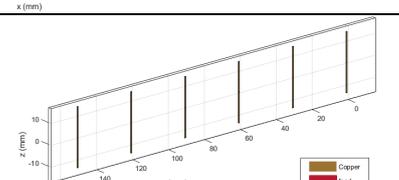
- количество элементов решетки $M = 6$;
- частота принимаемого сигнала – 5 ГГц.

Ниже представлены полученные модели и их характеристики (табл. 1).

Таблица 1

Параметры моделей антенных решеток

Номер модели	Внешний вид	Описание	Материал антенн	Материал диэлектрика
1	2	3	4	5
1		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 8,38 дБ, $S_{11} = -26$ дБ на $f = 5$ ГГц	Медь	Воздух
2		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 8,56 дБ, $S_{11} = -21$ дБ на $f = 5$ ГГц	Медь	Воздух
3		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 9,48 дБ, $S_{11} = -28$ дБ на $f = 5$ ГГц	Медь	Воздух
4		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 8,7 дБ, $S_{11} = -22$ дБ на $f = 5$ ГГц	Идеальный проводник	Воздух
5		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 9 дБ, $S_{11} = -21$ дБ на $f = 5$ ГГц	Идеальный проводник	Воздух
6		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 10 дБ, $S_{11} = -21$ дБ на $f = 5$ ГГц	Идеальный проводник	Воздух

1	2	3	4	5
7		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 1,8 дБ, $S_{11} = -11$ дБ на $f = 5$ ГГц	Медь	FR4
8		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 4,8 дБ, $S_{11} = -17$ дБ на $f = 5$ ГГц	Медь	RO4730JXR
9		ЛАР, элементы – диполи, элементы оптимизированы на $f = 5$ ГГц	Медь	–

Сравнение методов Барлетта, Кейпона и MUSIC

После задания моделей антенных решеток было проведено сравнение трех алгоритмов пеленгации – Барлетта, Кейпона и MUSIC. Для этого были приняты следующие условия:

- пеленгация осуществляется по азимуту в пределах от -90° до 90° ;
- на антенную решетку поступает два несвязанных между собой сигнала с углами места 0° и азимутами $+20^\circ$ и -20° соответственно;
- значение ОСШ для обоих сигналов равно 10 дБ.

При проведении расчетов были использованы две антенные решетки с разными типами элементов: решетка 2 с элементами – полосковыми антеннами и решетка 9 с элементами – диполями (см. табл. 1). Исследование выполнялось только при искаженных ДН элементов. При этом считалось, что каналы ЦАР согласованы по фазе и амплитуде.

После проведения всех расчетов были получены графики зависимости мощности сигнала на выходе антенной решетки от угла азимута. Данные графики представлены на рис. 3.

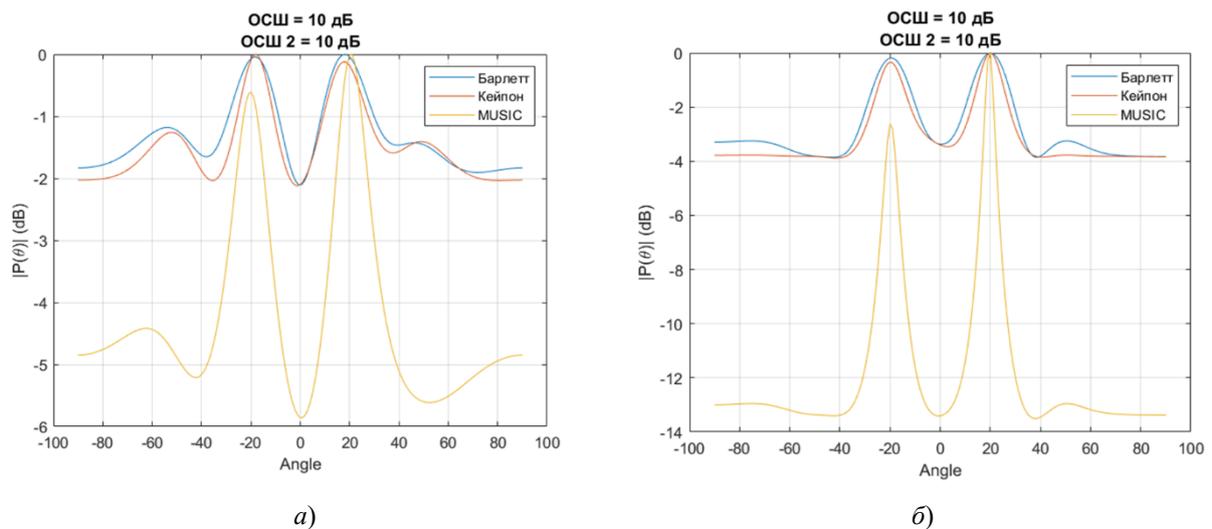


Рис. 3. Графики псевдоспектров:
 а – элементы – диполи; б – элементы – полосковые антенны

Рассмотрим полученные данные. Каждому из двух поступающих сигналов на графиках соответствуют два максимума с мощностью 0 дБ. На обоих рисунках четко прослеживается разница в

разрешающей способности разных методов. Лучший результат показывает метод MUSIC. Методы Барлетта и Кейпона похожи, однако пики на графиках по методу Кейпона более острые, что позволяет точнее определить направление на источник сигнала.

Кроме того, из графиков следует, что антенная решетка с элементами – полосковыми антеннами показывает лучшую разрешающую способность, чем решетка с элементами – диполями. Глубина «впадины» между пиками на графике рис. 3,б в 2–1,5 раза больше, чем на графике рис. 3,а, причем для всех трех методов.

Влияние матрицы рассеяния. Моделирование с учетом разных факторов

Кроме изменений в диаграммах направленности, взаимное влияние элементов антенной решетки также можно выразить в матрицах рассеяния S [13]. Различные типы СВЧ-устройств можно описать с помощью падающих и отраженных волн, которые распространяются в подключенных к ним линиях (портах). Связь между этими волнами описывается волновой матрицей рассеяния или матрицей S -параметров. Например, для шестиэлементной антенной решетки матрица взаимного влияния будет представлять собой массив размерностью 6×6 :

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix}, \tag{10}$$

где S_{11} представляет собой коэффициент отражения для порта (элемента) 1, S_{12} представляет коэффициент передачи от элемента 2 на элемент 1 и т.д. В общем, S_{NM} представляет собой коэффициент передачи от порта M к порту N в многопортовой сети.

Было принято решение провести сравнительное исследование того, какое влияние окажет учет в модели матрицы рассеяния (амплитудное и фазовое рассогласование каналов ЦАР) исследуемых антенных решеток и искаженных диаграмм направленности АЭ на итоговый пространственный спектр. Была осуществлена сравнительная оценка результатов моделирования для разных антенных решеток, представленных в табл. 1. Были приняты следующие начальные условия:

- пеленгация осуществляется по азимуту в пределах от 0° до 180° , при значении угла места равном 90° ;
- на антенную решетку поступает два независимых между собой сигнала с координатами по углу места, равными 90° и азимутами – 80° и 100° соответственно;
- алгоритм пеленгации со сверхразрешением – MUSIC.

На первом этапе было проведено моделирование без учета взаимного влияния антенных элементов, т.е. учитываются только идеальные диаграммы направленности отдельного элемента без учета искажений, вносимых взаимным влиянием, а также отсутствует амплитудно-фазовое рассогласование. На рис. 4 представлены результаты моделирования.

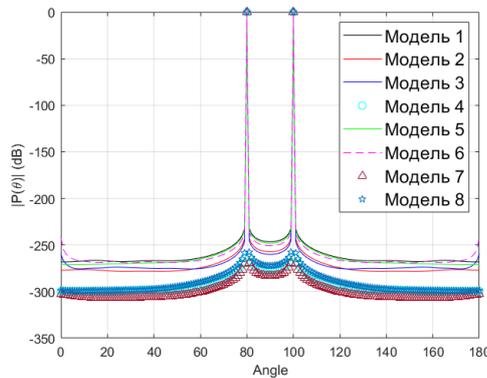


Рис. 4. Результаты моделирования без учета взаимного влияния антенных элементов

Далее было последовательно проведено три моделирования: с учетом только диаграмм направленности, с учетом только матрицы рассеяния и с учетом их обоих. Сделано это было с целью определить, что вносит больший вклад в искажение пространственного псевдоспектра. Результаты представлены на рис. 5–7.

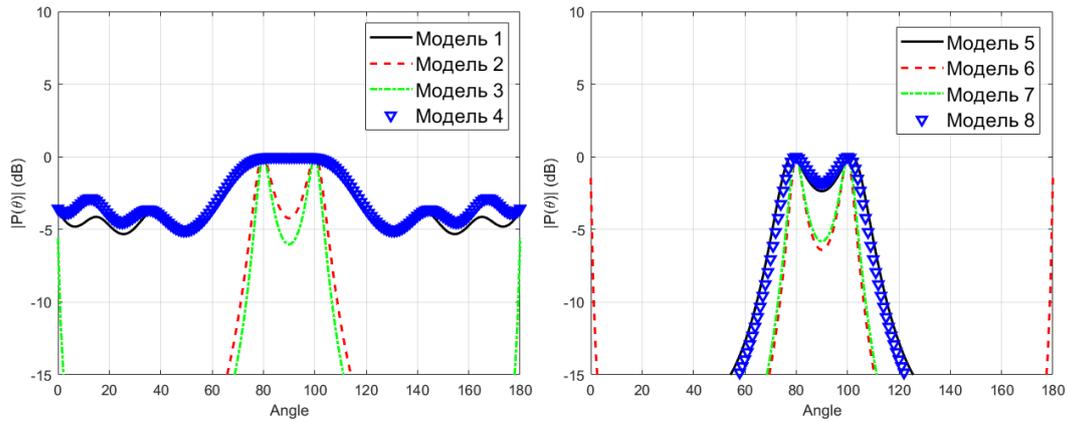


Рис. 5. Результаты моделирования с учетом только диаграмм направленности

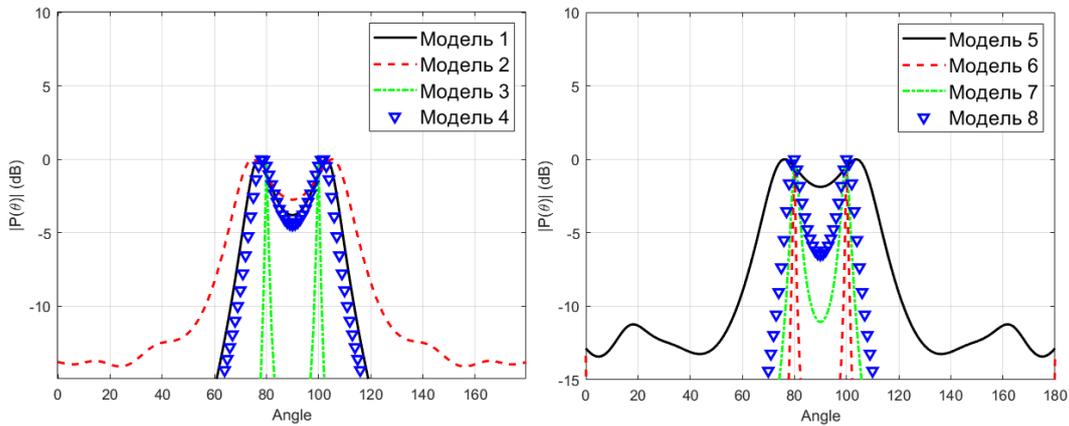


Рис. 6. Результаты моделирования с учетом только матрицы рассеяния

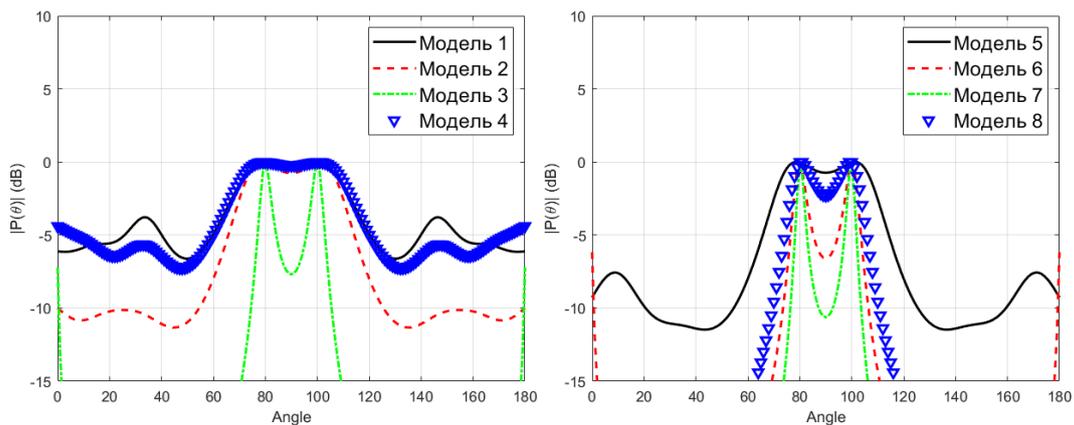


Рис. 7. Результаты моделирования с учетом и диаграмм направленности, и матрицы рассеяния

Рассмотрим полученные графики. Во-первых, учет взаимного влияния продемонстрировал многократное падение разрешающей способности алгоритма. Во-вторых, наибольший вклад в искажения вносит фактор диаграмм направленности. Однако учет матрицы рассеяния показал частичную компенсацию искажения.

Зависимость отклонений от ОСШ

На представленных выше рисунках можно увидеть, что максимумы графиков не совсем совпадают с заданными углами прихода сигналов. На рис. 8 изображены графики для одной и той же антенной решетки при трех разных значениях ОСШ. При повышении мощности полезного сигнала отклонения уменьшаются.

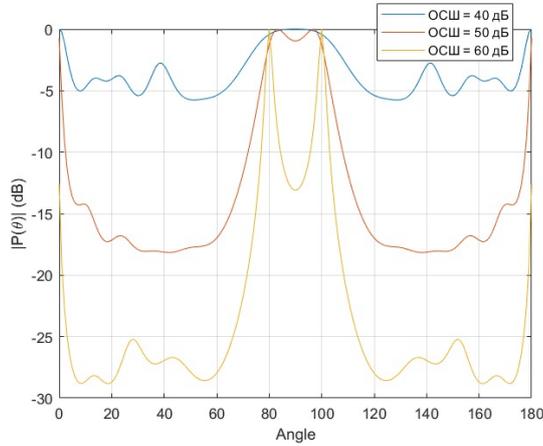


Рис. 8. Отклонения при разных значениях ОСШ

В связи с этим было решено провести сравнительное исследование величины отклонений в результатах пеленгации в зависимости от значения ОСШ. Были приняты следующие условия:

- сканирование осуществляется в азимутальной плоскости в пределах от -90° до 90° ;
- на антенную решетку поступает два независимых между собой сигнала с координатами по углу места, равному 0° и азимуту $+20^\circ$ и -20° соответственно;
- в качестве алгоритма пеленгации используется MUSIC.

Для оценки искажений принят следующий подход: мощность падающих сигналов постепенно уменьшается. После каждого шага уменьшения с помощью функции поиска максимумов проводится определение координат пиков пространственного псевдоспектра. Полученные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Отклонения в пеленгации

Номер модели антенны	Мощность, при которой появляются отклонения	Углы прихода с отклонениями	
		-20°	$+20^\circ$
1	4 дБ	$-18 (+2^\circ)$	$19 (-1^\circ)$
2	4 дБ	$-22 (-2^\circ)$	$24 (+4^\circ)$
3	40 дБ	$-20 (+0^\circ)$	$21 (+1^\circ)$
4	4 дБ	$-19 (+1^\circ)$	$24 (+4^\circ)$
5	4 дБ	$-15 (+2^\circ)$	$25 (+5^\circ)$
6	40 дБ	$-21 (-1^\circ)$	$14 (-6^\circ)$
7	5 дБ	$-11 (+9^\circ)$	$12 (-8^\circ)$
	20 дБ	$-20 (+0^\circ)$	$21 (+1^\circ)$
8	5 дБ	$-13 (+7^\circ)$	$12 (-8^\circ)$
	10 дБ	$-17 (+3^\circ)$	$15 (-5^\circ)$

Как видно, отклонения появляются при определенных значениях ОСШ, и они различны для каждого вида антенных элементов. Наименьшая мощность появления отклонений получена у антенных решеток под номерами 1, 2, 4 и 5. Все эти решетки имеют в качестве диэлектрика воздух и отличаются между собой формой элементов. Более низкие результаты показали антенны с твердыми диэлектриками – номера 7 и 8, у них наименьшие коэффициенты усиления. Самый низкий результат продемонстрировали решетки 3 и 6, где АЭ расположены плотно друг к другу и, следовательно, имеют наибольшее взаимное влияние. Они имеют одинаковую форму антенных элементов и отличаются только материалом изготовления.

Определение минимального угла между источниками (разрешающая способность)

Следующим шагом работы стало определение минимально различимого угла между источниками сигнала, т.е. разрешающая способность. На рис. 9 показан пример двух пространственных спектров для двух вариантов расположения источников сигналов.

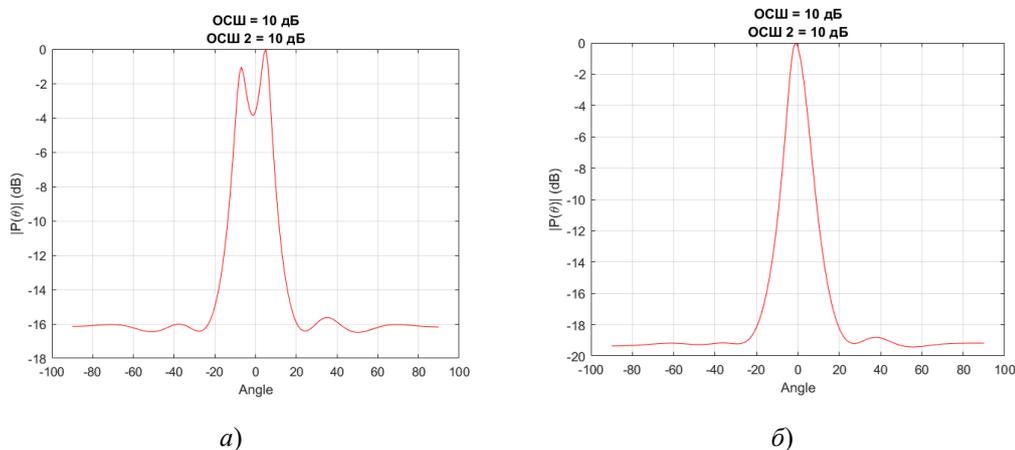


Рис. 9. Определение минимального угла между источниками сигнала.
График псевдоспектра при значении углов падения: *a* – $\pm 7^\circ$; *б* – $\pm 6^\circ$

Как видно из рис. 9, при уменьшении угла между источниками сигнала начинает уменьшаться различимость пиков на графике пространственного псевдоспектра. Они начинают своего рода сливаться в один пик, и при определенном значении угла становятся совсем неразличимы.

Были приняты следующие условия моделирования:

- пеленгация осуществляется по азимуту в пределах от -90° до 90° ;
- мощность сигналов постоянна;
- в качестве алгоритма радиопеленгации используется MUSIC.

Для оценки минимально различимых пространственных координат сигналов использовался следующий подход: на каждую АР подается два сигнала с азимутальными координатами $+20^\circ$ и -20° (угол между источниками сигнала 40°). Постепенно угол между источниками уменьшается. После каждого уменьшения с помощью функции поиска максимумов проводится оценка координат пиков псевдоспектра. Значение ОСШ для всех антенных решеток одинаково.

Таблица 3

Определение минимально различимых углов

Номер АР	Значение ОСШ	Минимально различимые углы между сигналами
1	10 дБ	$\pm 6^\circ$ (12°) есть отклонение
2	10 дБ	$\pm 6^\circ$ (12°) есть отклонение
4	10 дБ	$\pm 7^\circ$ (14°)
5	10 дБ	$\pm 5^\circ$ (10°) есть сильное отклонение
7	10 дБ	$\pm 19^\circ$ (38°)
8	10 дБ	$\pm 10^\circ$ (20°)

Как видно, значения минимальных углов между источниками сигналов близки для антенн с воздушным диэлектриком. Эти же антенны показали лучший результат по наименьшему значению угла. Также при проведении измерений выяснилось, что при уменьшении угла усиливаются отклонения при поиске максимумов псевдоспектра.

Результаты и обсуждение

По результатам проведенных экспериментов было проведено сравнение нескольких антенных решеток с различными видами антенных элементов. Наилучшие результаты в значениях отклонений и минимально различимых углах показали линейные антенные решетки с элементами – полосковыми антеннами с воздушным диэлектриком (№ 1, 2, 4 и 5; табл. 1). Разница в значениях составила 1–2 дБ

и 8–12° соответственно. Данный вид АЭ обладает самыми высокими значениями коэффициента усиления, а также меньшими габаритами. Данная особенность позволяет расположить излучатели таким образом, что взаимное влияние минимально в сравнении с АЭ, у которых в качестве диэлектрика используется материал FR-4 и RO4730JXR. Полученные данные планируется использовать в дальнейшем исследовании для установления наиболее выгодной конфигурации АР с цифровой пространственной фильтрацией для дальней тропосферной связи.

Заключение

В данной работе было проведено исследование и моделирование алгоритмов оценки угловых координат радиосигналов цифровыми антенными решетками на основе электродинамических моделей элементов, таких как микрополосковые антенны, а также полуволновые диполи на частоте 5 ГГц. Были изучены принципы работы алгоритмов пеленгации, рассмотрены формулы для нахождения псевдоспектра по методам Барлетта, Кейпона и MUSIC.

В работе был описан эффект взаимного влияния между элементами цифровой антенной решетки на частоте 5 ГГц. Он заключается в изменении диаграммы направленности, а также элементов матрицы рассеяния АЭ в составе решетки под действием других ее элементов. Для более приближенного к реальности моделирования цифровой радиопеленгации необходимо, чтобы в них учитывались особенности реальных антенных решеток, а именно взаимное влияние антенных элементов. Расчет данного эффекта осуществлялся согласно методу моментов, а также методу встроенного элемента (embedded element). В таком случае ДН каждого АЭ рассчитывается при его возбуждении, при этом остальные элементы запитаны на заданный импеданс.

В работе были представлены результаты проведения ряда численных экспериментов с полученными моделями АР и алгоритмами оценки угловых координат. Было проведено сравнение методов Барлетта, Кейпона и MUSIC для двух антенных решеток с разными видами антенных элементов: диполями и полосковыми антеннами. Эксперимент продемонстрировал разницу в разрешающей способности алгоритмов. Лучший результат показывает метод MUSIC, далее идут методы Кейпона и Барлетта.

Был проведен эксперимент с целью определить, какое влияние на итоговый график псевдоспектра окажет учет в модели матрицы рассеяния и диаграмм направленности. Для этого было проведено четыре моделирования: без учета взаимного влияния, с учетом диаграмм направленности, с учетом матриц рассеяния, с учетом и диаграмм направленности, и матриц рассеяния.

Также были проведены эксперименты по оценке зависимости отклонений на графиках псевдоспектров от значений ОСШ и по определению минимального различимого угла между источниками сигнала. Для данных опытов были разработаны несколько линейных антенных решеток с разными видами антенных элементов.

Установлено, что предпочтительным способом является использование метода MUSIC после обработки сигналов с выходов полосковых антенн с воздушным диэлектриком [14–17].

Список литературы

1. Warnick K. F., Maaskant R., Ivashina M. V. [et al.]. *Phased Arrays for Radio Astronomy, Remote Sensing, and Satellite Communications*. Cambridge : Cambridge University Press, 2018. 470 с.
2. Kumar A., Ansari A. Q., Kanauji B. K. [et al.]. A Review on Different Techniques of Mutual Coupling Reduction Between Elements of Any MIMO Antenna. Part 1: DGSs and Parasitic Structures // *Radio Science*. 2021. № 56. P. 1–25.
3. Паршин Ю. Н., Гусев С. И., Фролов И. И. [и др.]. Влияние взаимных импедансов элементов антенной решетки на эффективность пространственной обработки сигналов // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2017. № 60. С. 17–26.
4. Иншаков Ю. М., Осадченко А. Ю. Виртуальная адаптивная антенная решетка с учетом взаимного влияния ее элементов на основе LMS-алгоритма // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2015. № 6. С. 34–40.
5. Паршин Ю. Н., Комиссаров А. В. Пропускная способность MIMO телекоммуникационной системы в условиях изменяющейся пространственной структуры радиотракта с искусственной многолучевостью // *Цифровая обработка сигналов*. 2012. № 1. С. 50–55.
6. Davidson D. B., Warnick K. F. *Contemporary Array Analysis Using Embedded Element Patterns* // *Antenna and Array Technologies for Future Wireless Ecosystems* / ed. by Y. Jay Guo, R. W. Ziolkowski. Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2018. P. 285–303.

7. Bartlett M. *An Introduction to Stochastic Processes with Special References to Methods and Applications*. New York : Cambridge University Press, 1961.
8. Capon J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis // *Proceedings of the IEEE*. 1969. Vol. 57, № 8. P. 1408–1418.
9. Van Trees H. *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*. New York : Wiley Interscience, 2002.
10. Schmidt R. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation // *IEEE Transactions on Antenna. Propagation*. 1986. Vol. AP-34, № 2. P. 276–280.
11. Нечаев Ю. Б., Пешков И. В., Аальмуттар Атхер Ю. О., Аль Хафаджи Сармад К. Д. Оценка вероятности появления ложных пиков кольцевых и концентрических антенных решеток при радиопеленгации со сверхразрешением // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Системный анализ и информационные технологии*. 2016. № 2. С. 16–23.
12. Frank B. G. *Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB*. New York : McGraw-Hill Professional, 2005. 288 с.
13. Сазонов Д. М. *Антенны и устройства СВЧ : учеб. для радиотехнических специальностей вузов*. М : Высш. шк., 1988. 432 с.
14. Пешков И. В., Жигулин В. А. Оценка качества результатов моделирования алгоритмов цифровой пеленгации для кольцевой антенной решетки // *Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы Всерос. науч.-техн. конф. (г. Самара, 25–28 апреля 2023 г.)*. Самара : ООО «Артель», 2023. С. 41–44.
15. Жигулин В. А., Нечаев Ю. Б. Моделирование алгоритмов цифровой пеленгации с учетом взаимного влияния элементов антенных решеток сантиметрового диапазона // *Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию кафедры радиофизики ВГУ (г. Воронеж, 18–20 апреля 2023 г.)*. Воронеж : Изд. дом ВГУ, 2023. С. 150–157.
16. Serdar O. A., Cevdet I. High-Resolution Direction-of-Arrival Estimation via Concentric Circular Arrays // *ISRN Signal Processing*. 2013. Vol. 2013, Article ID 859590.
17. Godara L. C. Applications of antenna arrays to mobile communications. Part I : performance improvement, feasibility, and system considerations // *Proceedings of the IEEE*. 1997. Vol. 85, № 8. P. 1195–1245.

References

1. Warnick K.F., Maaskant R., Ivashina M.V. et al. *Phased Arrays for Radio Astronomy, Remote Sensing, and Satellite Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018:470.
2. Kumar A., Ansari A.Q., Kanauji B.K. et al. A Review on Different Techniques of Mutual Coupling Reduction Between Elements of Any MIMO Antenna. Part 1: DGSs and Parasitic Structures. *Radio Science*. 2021;(56):1–25.
3. Parshin Yu.N., Gusev S.I., Frolov I.I. et al. The influence of mutual impedances of antenna array elements on the effectiveness of spatial signal processing. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. 2017;(60):17–26. (In Russ.)
4. Inshakov Yu.M., Osadchenko A.Yu. A virtual adaptive antenna array taking into account the mutual influence of its elements based on films-algorithm. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika = Izvestiya higher educational institutions of Russia. Radio electronics*. 2015;(6):34–40. (In Russ.)
5. Parshin Yu.N., Komissarov A.V. The bandwidth of the MIMO technology of a telecommunications system in the conditions of a changing spatial structure of a radio path with artificial multipath. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital signal processing*. 2012;(1):50–55. (In Russ.)
6. Davidson D.B., Warnick K.F. Contemporary Array Analysis Using Embedded Element Patterns. *Antenna and Array Technologies for Future Wireless Ecosystems*. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2018:285–303.
7. Bartlett M. *An Introduction to Stochastic Processes with Special References to Methods and Applications*. New York: Cambridge University Press, 1961.
8. Capon J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. *Proceedings of the IEEE*. 1969;57(8):1408–1418.
9. Van Trees H. *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*. New York: Wiley Interscience, 2002.
10. Schmidt R. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. *IEEE Transactions on Antenna. Propagation*. 1986;AP-34(2):276–280.
11. Nechaev Yu.B., Peshkov I.V., Aal'muttar Atkheer Yu.O., Al' Khafadzhi Sarmad K.D. Estimation of the probability of false peaks of ring and concentric antenna arrays in radio direction finding with superresolution. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Sistemyy analiz i informatsionnye tekhnologii = Bulletin of the Voronezh State University. Ser.: System analysis and information technologies*. 2016;(2):16–23. (In Russ.)
12. Frank B.G. *Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB*. New York: McGraw-Hill Professional, 2005:288.

13. Sazonov D.M. *Antenny i ustroystva SVCh: ucheb. dlya radiotekhnicheskikh spetsial'nostey vuzov = Antennas and microwave devices : textbook for radio engineering specialties of universities*. Moscow: Vyssh. shk., 1988:432. (In Russ.)
14. Peshkov I.V., Zhigulin V.A. Evaluation of the quality of the results of modeling algorithms of digital pelen-gation for a ring antenna array. *Aktual'nye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy: materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. (g. Samara, 25–28 aprelya 2023 g.) = Actual problems of radio electronics and telecommunications : materials of the All-Russian scientific and technical conf. (Samara, April 25–28, 2023)*. Samara: OOO «Artel», 2023:41–44. (In Russ.)
15. Zhigulin V.A., Nechaev Yu.B. Modeling of digital direction finding algorithms taking into account the mutual influence of antenna array elements in the centimeter range. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': sb. tr. XXIX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 70-letiyu kafedry radiofiziki VGU (g. Voronezh, 18–20 aprelya 2023 g.) = Radar, navigation, communications : collection of tr. XXIX International Scientific and Technical. conf., dedicated. to the 70th anniversary of the Department of Radiophysics of VSU (Voronezh, April 18–20, 2023)*. Voronezh: Izd. dom VGU, 2023:150–157. (In Russ.)
16. Serdar O.A., Cevdet I. High-Resolution Direction-of-Arrival Estimation via Concentric Circular Arrays. *ISRN Signal Processing*. 2013;2013, Article ID 859590.
17. Godara L.C. Applications of antenna arrays to mobile communications. Part I: performance improvement, feasibility, and system considerations. *Proceedings of the IEEE*. 1997;85(8):1195–1245.

Информация об авторах / Information about the authors

Илья Владимирович Пешков

кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры физики, радиотехники
и электроники,
Елецкий государственный
университет имени И. А. Бунина
(Россия, Липецкая обл., г. Елец, ул. Коммунаров, 28)
E-mail: ilvpeshkov@gmail.com

Владимир Александрович Жигулин

магистрант,
Елецкий государственный
университет имени И. А. Бунина
(Россия, Липецкая обл., г. Елец, ул. Коммунаров, 28)
E-mail: obi4n@yandex.ru

Наталья Александровна Фортунова

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой физики,
радиотехники и электроники,
Елецкий государственный
университет имени И. А. Бунина
(Россия, Липецкая обл., г. Елец, ул. Коммунаров, 28)
E-mail: fortunova.nata@mail.ru

Ilya V. Peshkov

Candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of physics,
radio engineering and electronics,
Bunin Yelets State University
(28 Kommunarov street, Yelets, Lipetsk region, Russia)

Vladimir A. Zhigulin

Master degree student,
Bunin Yelets State University
(28 Kommunarov street, Yelets, Lipetsk region, Russia)

Natalia A. Fortunova

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of physics,
radio engineering and electronics,
Bunin Yelets State University
(28 Kommunarov street, Yelets, Lipetsk region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 19.10.2023

Принята к публикации/Accepted 20.11.2023