

УДК 621.396.663

И.А. Сухов, В.П. Акимов

**ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ «СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ»
К РАДИОПЕЛЕНГАТОРНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ
ИЗ НАПРАВЛЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

I.A. Sukhov, V.P. Akimov

**SUPER RESOLUTION TECHNIQUES FOR DIRECTION-FINDER
ANTENNA ARRAY WITH DIRECTIONAL ELEMENTS**

Проведена экспериментальная оценка точности пеленгации и разрешающей способности кольцевой антенной решетки из шунтовых вибраторов с применением алгоритмов «сверхразрешения». Показана возможность повышения разрешающей способности в результате применения алгоритма цифрового формирования лучей.

КЛАССИФИКАЦИЯ МНОЖЕСТВА СИГНАЛОВ. КОЛЬЦЕВАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА. РАДИОПЕЛЕНГАЦИЯ. АЛГОРИТМ ПЕЛЕНГАЦИИ. ФОРМИРОВАНИЕ ЛУЧЕЙ.

Super resolution technique is applied to the circular antenna array of shunt dipoles. Direction-finding accuracy and resolution ability are estimated experimentally. Method of the MUSIC algorithm improvement for the direction-finder is suggested.

MULTIPLE SIGNAL CLASSIFICATION. CIRCULAR ANTENNA ARRAY. DIRECTION-FINDING. DIRECTION-FINDING ALGORITHM. BEAMFORMING.

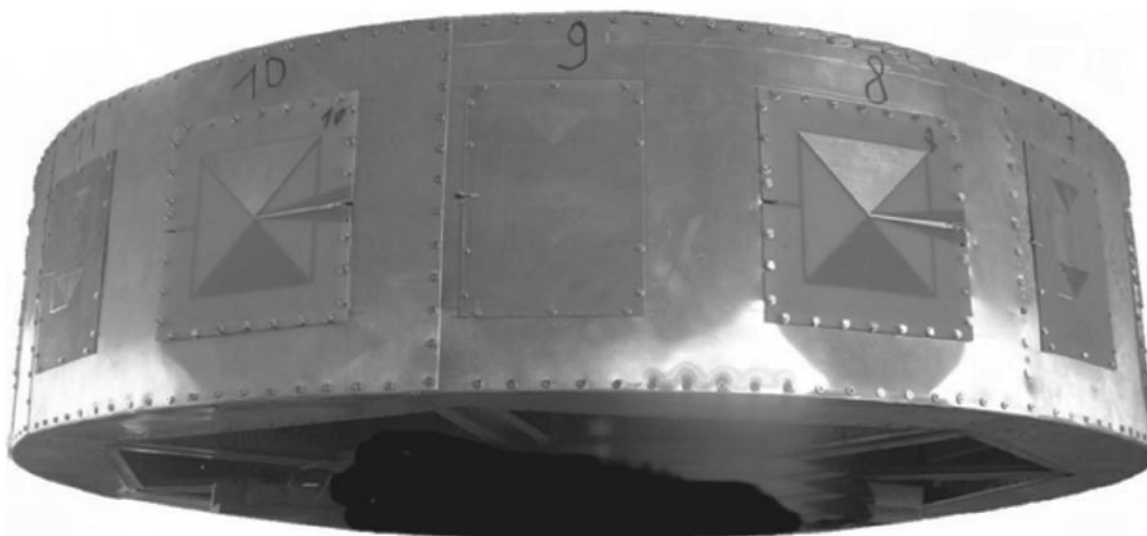
Задачи радиопеленгации осложняются наличием большого количества радиосредств, работающих в одной полосе частот, при этом источники радиоизлучения могут быть разнесены на малое расстояние по азимуту. Традиционные методы пеленгации оказываются не в состоянии разрешить близкорасположенные сигналы. В сложной электромагнитной обстановке предпочтительно использование методов сверхразрешения, т. к. они обеспечивают высокую точность оценки угла прихода одного сигнала и возможность определения пеленгов нескольких близкорасположенных сигналов на одной частоте.

В рамках данной статьи рассматривается вопрос применения сверхразрешающего алгоритма пеленгации MUSIC [1] к коль-

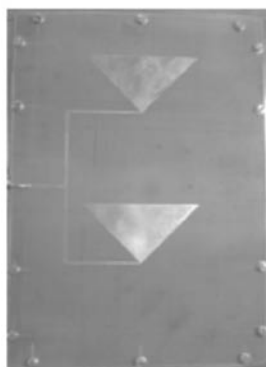
цевой антенной решетке из направленных элементов с использованием амплитуд и фаз сигналов, измеряемых на выходах элементов антенной решетки. Предлагается метод повышения разрешающей способности пеленгатора, обеспечивающий устойчивую работу радиопеленгатора, в случае воздействия нескольких сигналов на кольцевую антенную решетку.

Рассмотрим восьмиэлементную радиопеленгаторную антенную решетку диаметром 1,5 м (рис. 1 *a*). В данной антенной решетке расположены антенные элементы двух диапазонов частот, по восемь элементов на каждый диапазон. В настоящей статье рассматриваются антенные элементы верхнего диапазона частот. В качестве элементов антенной решетки верхнего диа-

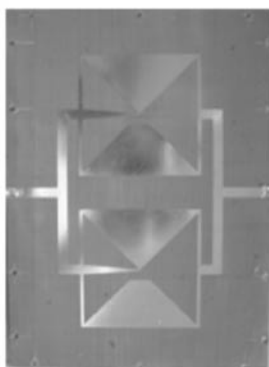
а)



б)



в)



г)

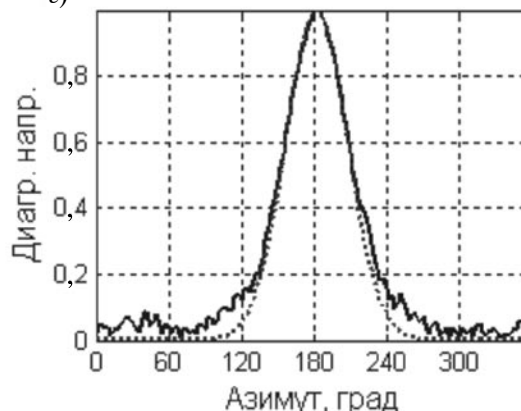


Рис. 1. Антенная решетка (а), шунтовой вибратор (б, в) и диаграмма направленности шунтового вибратора на частоте 1918 МГц (г)

пазона частот используются шунтовые печатные вибраторы, расположенные в резонаторах. Внешний вид антенных элементов представлен на рис. 1 б, вид антенного элемента без резонатора с обратной стороны – на рис. 1 в. Размер резонатора шунтовых вибраторов $200 \times 145 \times 45$ мм³. Резонатор предназначен для улучшения характеристик излучения шунтового вибратора. Вибраторные антенны выполнены на диэлектрике ФАФ-4Д толщиной 1 мм.

Проведено измерение комплексных диаграмм направленности антенных элементов во всем диапазоне углов в азимутальной плоскости для вертикальной поляризации с шагом $2,5^\circ$, с помощью прибора ZVL фирмы R&S. В качестве облучающей антенны

использована рупорная антенна П6-23М. На рис. 1 г представлена нормированная амплитудная диаграмма направленности шунтового вибратора по напряжению на частоте 1918 МГц. Ширина амплитудной диаграммы направленности по уровню 0,707 составляет 43° . Пунктирной линией представлена теоретическая диаграмма направленности, описываемая функцией $F_{\text{app}}(\varphi)$, аппроксимирующей измеренную диаграмму направленности. Выбранная для аппроксимации функция $F_{\text{app}}(\varphi)$ выглядит следующим образом:

$$F_{\text{app}}(\varphi) = \exp \left[- \left(\frac{3\pi}{8} \cdot \frac{\varphi}{\theta_{DN}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где θ_{DN} – ширина амплитудной диаграммы направленности в радианах.

Ширина диаграммы направленности θ_{DN} для функции $F_{\text{app}}(\varphi)$ выбирается в соответствии с шириной аппроксимируемой амплитудной диаграммы направленности, полученной в результате измерений. Теоретическая фазовая диаграмма рассчитывается исходя из предположения, что фазовый центр шунтового вибратора находится в центре антенного элемента. Теоретические диаграммы направленности вводятся для реализации программной модели радиопеленгатора. В процессе работы проводится проверка адекватности разрабатываемой программной модели радиопеленгатора.

На рассматриваемой частоте в случае прихода сигнала с направления, совпадающего с направлением максимума одной из диаграмм направленности антенной решетки, расстояние между соседними антенными элементами составляет порядка 0,7 длины волны, что потенциально может приводить к появлению неоднозначностей при определении пеленга.

Проведен натурный эксперимент для оценки точности пеленгации кольцевой антенной решеткой из шунтовых вибраторов с применением алгоритма пеленгации MUSIC (Multiple Signal Classification), использующего амплитуды и фазы сигналов (комплексные отсчеты) с выходов антенных элементов.

Алгоритм оценки пеленга MUSIC [1] включает в себя несколько этапов. На первом этапе измеряются амплитуды и фазы на выходах всех антенных элементов K раз и формируется матрица измеренных данных $\mathbf{X} = [x_1(t_k), x_2(t_k), \dots, x_N(t_k)]^T, k = 1, \dots, K$, размером $N \times K$, где N – количество антенных элементов. Рассчитывается корреляционная матрица $\mathbf{R} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^H$ и производится ее разложение по собственным векторам и собственным числам. По критерию Акайке [2] оценивается количество сигналов, воздействующих на антенную решетку M . Из собственных векторов-столбцов, соответствующих M наименьшим собственным числам, составляется шумовая матрица \mathbf{Q}_N , размером $N \times (N - M)$. На втором этапе строится пеленгационная характеристика

$P_{\text{MUSIC}}(\varphi)$ для всех возможных углов прихода сигнала φ в соответствии с формулой:

$$P_{\text{MUSIC}}(\varphi) = \frac{1}{\mathbf{a}(\varphi)^H \cdot \mathbf{Q}_N \cdot \mathbf{Q}_N^H \cdot \mathbf{a}(\varphi)}, \quad (2)$$

где $\mathbf{a}(\varphi)$ – матрица-столбец, определяющая амплитуды и фазы на всех антенных элементах в случае прихода сигнала с направления φ .

В данной работе матрица-столбец $\mathbf{a}(\varphi)$ измерена экспериментально при проведении калибровки антенной системы.

На третьем этапе необходимо найти M наибольших максимумов пеленгационной характеристики. Азимуты φ , на которых расположены найденные максимумы, соответствуют углам прихода сигнала.

При проведении эксперимента соотношение сигнал/шум определялось относительно уровня сигнала, принимаемого в направлении максимума диаграммы направленности антенного элемента. Для оценки пеленга использовалось $K = 10$ временных выборок значений амплитуд и фаз на всех антенных элементах. Максимумы амплитудных диаграмм направленности расположены на азимутах $0^\circ, 45^\circ, \dots, 315^\circ$. Источник сигнала последовательно располагался на азимутах от 0° до 45° с шагом 5° относительно антенной решетки. В результате проведения эксперимента получены графики зависимости среднеквадратического отклонения пеленга (СКО) от положения источника сигнала при разных соотношениях сигнал/шум (рис. 2).

Наибольшая точность пеленгации достигается в случае прихода сигналов в диапазоне углов между максимумами диаграмм направленности антенных элементов. Значения среднеквадратического отклонения пеленга малы, что связано с большой базой антенной решетки.

Теоретические зависимости построены на основе моделирования процесса пеленгации с использованием данных аппроксимации измеренных амплитудных и фазовых диаграмм. Наибольшее отличие теоретических и экспериментальных зависимостей среднеквадратического отклонения пеленга от азимута прихода сигнала наблюдается в области максимумов диаграмм направлен-

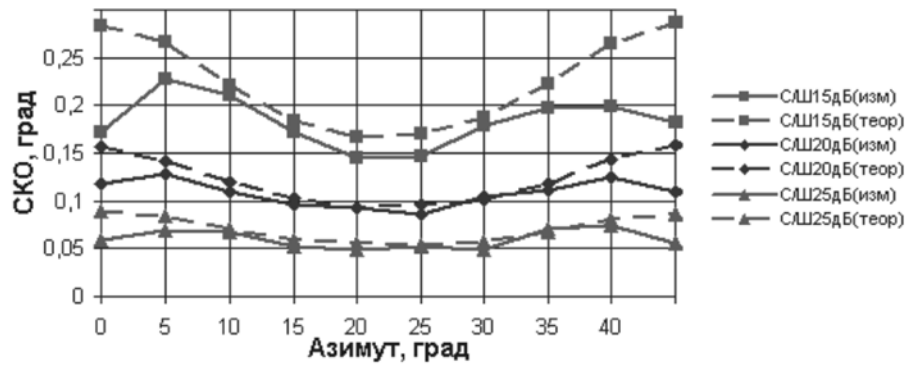


Рис. 2. График зависимости СКО от азимута прихода сигнала (—) экспериментальные данные; (- - -) теоретические данные

ности антенных элементов. Это связано с отличием теоретических и измеренных амплитудных диаграмм направленности. Наибольшее отличие диаграмм направленности наблюдается в области боковых лепестков.

Проведен натурный эксперимент для определения разрешающей способности пеленгатора с использованием рассматриваемой антенной решетки и применением алгоритма пеленгации MUSIC. При проведении эксперимента на антенную решетку воздействовало два сигнала с одинаковой мощностью на частоте 1918 МГц. Соотношение сигнал/шум 20 дБ относительно уровня сигнала в максимуме диаграммы направленности антенного элемента. Количество временных выборок для оценки пеленга 10, азимут одного из сигналов 70° , азимут второго сигнала изменялся от 64° до 69° . В результате проведения эксперимента получен график зависимости вероятности разрешения двух сигналов от расстояния между ними (рис. 3 а).

Два сигнала считаются разрешенными, если пеленгационная характеристика имеет два максимума в направлениях, близких к истинным пеленгам воздействующих сигналов.

Теоретическая зависимость вероятности разрешения сигналов в зависимости от расстояния между сигналами получена в результате использования данных аппроксимации измеренных амплитуд и фаз.

Из графика видно, что вероятность разрешения двух сигналов равна единице при расстоянии между ними в 6° и при сближе-

нии сигналов вероятность оценки быстро уменьшается до нуля. Теоретическая и экспериментальная зависимости практически совпадают, что говорит об адекватности разработанной модели для оценки точностных характеристик реальных пеленгаторов.

Для повышения разрешающей способности предлагается совместить алгоритм цифрового формирования лучей (Digital Beam Forming) и алгоритм пеленгации MUSIC. Полученный алгоритм DBF-MUSIC основан на последовательном применении к измеренным данным алгоритма DBF и алгоритма MUSIC. На первом этапе предлагаемого алгоритма необходимо провести предварительную приближительную оценку направлений прихода сигналов любым алгоритмом пеленгации. Для этих целей целесообразно использовать алгоритм, не требующий значительных вычислительных затрат (например, неадаптивный формирователь луча [3]). Применение алгоритма цифрового диаграммообразования перед применением алгоритма пеленгации MUSIC позволяет ввести дополнительную пространственную фильтрацию сигналов, позволяющую выделить диапазон углов, требующий более высокой разрешающей способности. В качестве алгоритма цифрового диаграммообразования в рамках данной работы выбран классический алгоритм формирования луча [3]. Алгоритм DBF-MUSIC предполагает цифровое формирование диаграмм направленности с максимумами в направлениях $\Theta \in \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_B\}$ (B – количество формируемых диаграмм

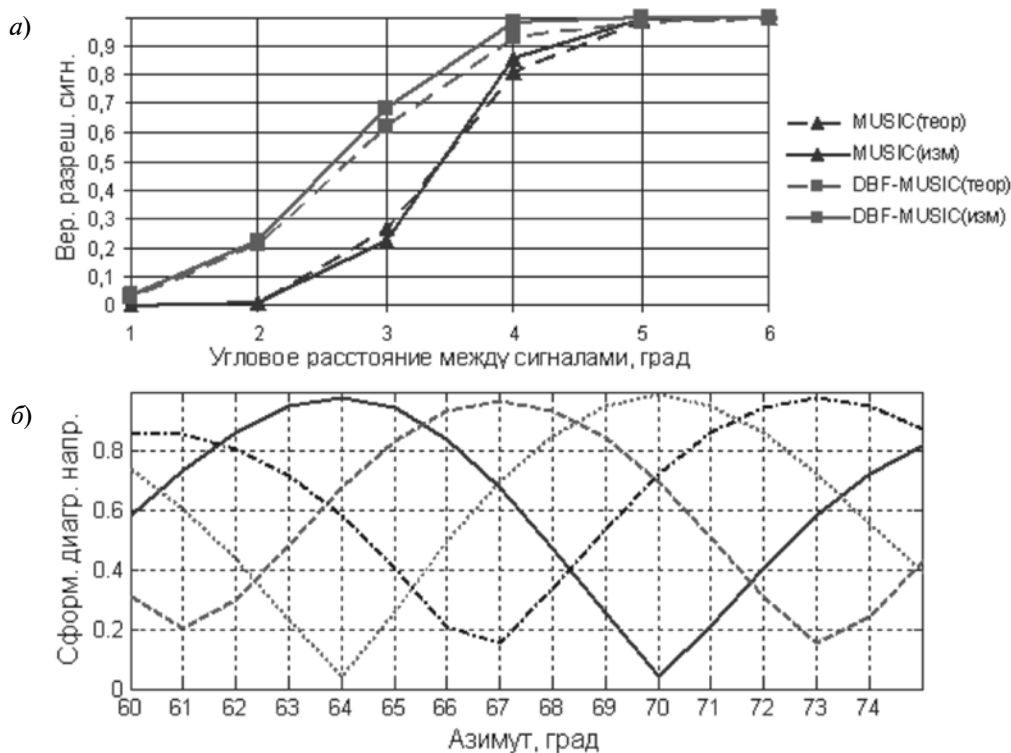


Рис. 3. График зависимости вероятности разрешения двух сигналов от расстояния между ними алгоритмом MUSIC и алгоритмом DBF-MUSIC (а); вид диаграмм направленности, сформированных по алгоритму DBF-MUSIC (б)

направленности), близких к предполагаемым направлениям прихода близкорасположенных сигналов. Для этого все отсчеты амплитуд и фаз сигналов, измеренные на выходах антенных элементов, умножаются на матрицу-столбец $\mathbf{a}(\theta_i), i = 1, \dots, B$ с получением выходных данных $y_i, i = 1, \dots, B$ по формуле:

$$y_i(t_k) = \mathbf{a}(\theta_i)^H \cdot \mathbf{X}, i = 1, \dots, B. \quad (3)$$

Данные, полученные в результате предварительной обработки, удобно записать в виде матрицы $\mathbf{Y} = [y_1(t_k), y_2(t_k), \dots, y_B(t_k)]^T, k = 1, \dots, K$, размером $B \times K$. На следующем этапе рассчитывается корреляционная матрица $\mathbf{R}_B = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^H$, определяется количество воздействующих сигналов M по критерию Акайке. Из M собственных векторов-столбцов корреляционной матрицы \mathbf{R}_B , относящихся к наименьшим собственным числам, составляется матрица \mathbf{Q}_{NB} . Строится пеленгационная характеристика $P_{\text{DBF-MUSIC}}(\varphi)$ для диапазона углов, в направлении которых сформированы диа-

граммы направленности. Пеленгационная характеристика алгоритма DBF-MUSIC выглядит следующим образом:

$$P_{\text{DBF-MUSIC}}(\varphi) = \frac{1}{\mathbf{a}_S(\varphi)^H \cdot \mathbf{Q}_{NB} \cdot \mathbf{Q}_{NB}^H \cdot \mathbf{a}_S(\varphi)}, \quad (4)$$

где $\mathbf{a}_S(\varphi) = (\mathbf{a}(\theta_1)^H \cdot \mathbf{a}(\varphi) \quad \mathbf{a}(\theta_2)^H \cdot \mathbf{a}(\varphi) \quad \dots \quad \mathbf{a}(\theta_B)^H \cdot \mathbf{a}(\varphi))^T$; \mathbf{H} – символ транспонирования и комплексного сопряжения; \mathbf{T} – символ транспонирования.

Данные, полученные в результате воздействия двух сигналов на кольцевую антенную решетку из шунтовых вибраторов, обработаны согласно алгоритму DBF-MUSIC. В соответствии с предлагаемым алгоритмом сформированы четыре диаграммы направленности с максимумами в направлениях 64°, 67°, 70° и 73°. Вид сформированных диаграмм направленности представлен на рис. 3 б.

В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости вероятности разрешения двух сигналов от расстояния между ними (рис. 3 а). Из графика видно, что предложенный алгоритм DBF-

MUSIC позволяет увеличить разрешающую способность пеленгатора по сравнению с классическим алгоритмом пеленгации MUSIC. Аналогично предлагаемый алгоритм применен для обработки теоретических амплитудных и фазовых диаграмм. На рис. 3 а представлена теоретическая зависимость вероятности разрешения двух сигналов от расстояния между ними, практически совпадающая с зависимостью, полученной экспериментально, что говорит об адекватности разработанной программной модели радиопеленгатора.

Проведено экспериментальное исследование применения алгоритма пеленга-

ции MUSIC и предложенного алгоритма повышения разрешающей способности DBF-MUSIC на примере антенной решетки из шунтовых вибраторов. Оценены точностные характеристики радиопеленгатора в случае пеленгации одного сигнала и разрешающая способность в случае воздействия двух сигналов на одной частоте. Показана возможность повышения разрешающей способности с помощью предложенного алгоритма DBF-MUSIC по сравнению с алгоритмом MUSIC. Разработана программная модель радиопеленгатора, позволяющая оценивать точностные характеристики и разрешающую способность пеленгатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schmidt, R. Multiple emitter location and signal parameter estimation [Text] / R. Schmidt // Proc. RADC Spectrum Estimation Workshop. – 1979. – P. 243–258.
2. Akaike, H. A new look at statistical model identification [Text] / H. Akaike // IEEE Trans.

Automat. Control. – 1974. – № 19. – P. 716–723.

3. Krim, H. Two decades of array signal processing research: the parametric approach [Text] / H. Krim, M. Viberg // IEEE Signal Process. Mag. – 1999. – № 13 (4). – P. 67–94.

REFERENCES

1. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation / Proc. RADC Spectrum Estimation Workshop. – 1979. – P. 243–258.
2. Akaike H. A new look at statistical model identification / IEEE Trans. Automat. Control.

– 1974. – № 19. – P. 716–723.

3. Krim H., Viberg M. Two decades of array signal processing research: the parametric approach. / IEEE Signal Process. Mag. – 1999. – № 13 (4). – P. 67–94.

СУХОВ Игорь Александрович – аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: sia23@mail.ru

SUKHOV, Igor A. – St. Petersburg State Polytechnical University.
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: sia23@mail.ru

АКИМОВ Валерий Петрович – профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: valeri_akimov@mail.ru

AKIMOV, Valerij P. – St. Petersburg State Polytechnical University.
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: valeri_akimov@mail.ru