

Моделирование двухэлементной гибридной антенной решетки для оценки координат сигналов с повышенной точностью

И. В. Пешков

Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина

E-mail ilvpeshkov@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается моделирование гибридных антенных решеток для оценки направления прихода с повышенной точностью. Данная технология включает в себя цифровую пространственно-спектральную оценку после предварительного аналогового формирования луча. В статье приведены примеры моделирования диаграмм направленности антенных элементов, снижающих погрешности при оценке угловых координат со сверхразрешением. Предложенная гибридная антенная решетка моделируется в соответствии с методом моментов. Получен график псевдоспектра методом MUSIC при использовании двухэлементной гибридной антенной решетки. Для предварительной аналоговой обработки были синтезированы амплитудно-фазовые распределения. Показано, что двухэлементная антенная с гибридной аналоговой и цифровой обработкой радиосигналов позволяют получить сравнимую точность при оценке угловых координат, что и трёхэлементная цифровая антенная решетка.

Ключевые слова: цифровая антенная решетка, оценка угловых координат сигналов, гибридная антенная решетка, сверхразрешение

1. ВВЕДЕНИЕ

Цифровые антенные решетки нашли широкое применение в современном мире. Основной концепцией их работы является спектральная оценка пространственных координат сигналов.

В исследовании описывается процесс создания малогабаритной антенной решетки для оценки координат источников радиоизлучения с высоким разрешением. Кроме того, в статье представлен пример построения гибридной антенной решетки для оценки пространственных координат с высоким разрешением, которая вычисляется с использованием аналитических формулировок нижней границы Крамера-Рао в замкнутой форме. Гибридная антенная решетка состоит из аналоговой схемы формирования луча, которая позволяет уменьшить количество каналов цифровой обработки без снижения точности оценки угловых координат источников радиосигналов [1]. Таким образом, цель данной работы является моделирование на основе метода моментов гибридной аналого/цифровой антенной решетки для оценки координат сигналов.

2. МЕТОД

На рис. 1 показана обобщенная схема системы оценки координат источников радиоизлучения.

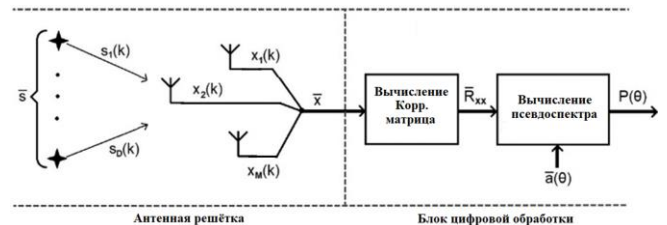


Рис. 1. Общая схема цифровой системы оценки координат источников радиоизлучения со сверхразрешением

Модель можно разделить на две части: аналоговую и цифровую. В аналоговой части с сигналов принимаются от D различных источников с добавлением аддитивного белого гауссовского шума. Прием осуществляется цифровой антенной решеткой из M антенных элементов.

Формула для матрицы выходного сигнала антенной решетки имеет следующий вид:

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^H \cdot \bar{\mathbf{s}} + \bar{\mathbf{n}} \quad (1)$$

где $\bar{\mathbf{n}}$ – вектор шума; \mathbf{A} – матрица направляющих векторов, которая вычислена с помощью следующей формулы [8]:

$$\mathbf{A} = [\bar{\mathbf{a}}(\theta_1) \quad \bar{\mathbf{a}}(\theta_2) \quad \dots \quad \bar{\mathbf{a}}(\theta_D)] \quad (2)$$

где $\bar{\mathbf{a}}(\theta_D)$ является вектором из N элементов для направления θ :

$$\mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} g(\theta) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r \cos \theta} \\ g\left(\theta - \frac{2\pi}{N}\right) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{N}\right)} \\ g\left(\theta - \frac{4\pi}{N}\right) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{N}\right)} \\ \dots \\ g\left(\theta - \frac{2(N-1)\pi}{N}\right) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r \cos\left(\theta - \frac{2(N-1)\pi}{N}\right)} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r \cos \theta}$ является множителем, учитывающим фазовый сдвиг сигнала на i -ой антенне относительно первого элемента (это формула для линейной антенной решетки с расстоянием между элементами $0,5\lambda$), r – радиус кольцевой антенной решетки, g_i – диаграммы направленности i -го антенного элемента.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №23-21-00125, <https://rscf.ru/project/23-21-00125/>.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученный сигнал \bar{x} преобразуется в цифровую форму, после чего k отсчетов сигнала поступают на вход цифрового процессора. В цифровой части пеленгационной системы корреляционная матрица \mathbf{R}_{xx} сначала вычисляется псевдоспектр, а затем оценивается $P(\theta)$.

Корреляционная матрица рассчитывается по следующей формуле [9]:

$$\mathbf{R}_{xx} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_1(k) \cdot x_1(k)^* & \cdots & \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_1(k) \cdot x_M(k)^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_N(k) \cdot x_1(k)^* & \cdots & \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_N(k) \cdot x_N(k)^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

где N – число отсчетов усреднения корреляционной матрицы, $x_M(k)^*$ является комплексно-сопряженным значением.

Далее на основе корреляционной матрицы вычисляется псевдоспектр [2]:

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{\left| \bar{\mathbf{a}}(\theta)^H \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \bar{\mathbf{a}}(\theta) \right|} \quad (5)$$

где \mathbf{E}_N – матрица шумового подпространства.

Точность выражения (5) определяется выражением для дисперсии оценок [4]:

$$\text{var}(\theta, \phi) \approx \frac{\sigma^2}{2K} \Re \left\{ \left(\sum_{ij} g_i^2 g_j^2 (a_i' - a_j')^2 + \sum_{ij} (g_i' g_j - g_j' g_i)^2 \right)^{-1} \right\} \quad (6)$$

здесь (...)’ – производная по θ или ϕ в зависимости от направления сканирования.

Как видно из выражения (6), дисперсия оценок угловых координат со сверхразрешением определяется несколькими факторами. В первую очередь, коэффициентом усиления антенных элементов, т.е. множитель $g_i^2 g_j^2$. Другим фактором является апертура антенной решётки, определяемая множителем $(a_i' - a_j')$. Вследствие этого, воздействуя на один или несколько этих параметр можно существенно снизить дисперсию оценок координат $\text{var}(\theta, \phi)$. Однако в данной работе рассматривается только повышение точности за счёт увеличения коэффициента усиления отдельных антенных элементов. Рассматриваемый подход подробно описание в [4], суть которого заключается в том, что добавочное усиление каждого антенного элемента по отдельности позволяет снизить дисперсию оценок координат $\text{var}(\theta, \phi)$. Следствием данной реакции служит достижение такой величины точности при оценке координат сигналов, как если бы применялось большее число антенных элементов в составе решётки в целом. Практическая реализация предложенного подхода на основе моделирования согласно методу моментов описана в следующем параграфе.

На следующем рис. 2а, б представлена антенная решетка, диаграмма которой однородна по азимуту от 0° до 180° и обладает высоким коэффициентом усиления. Центральная частота равна 5 ГГц. Эта антенна представляет собой единый элемент, как показано на рис. 2а.

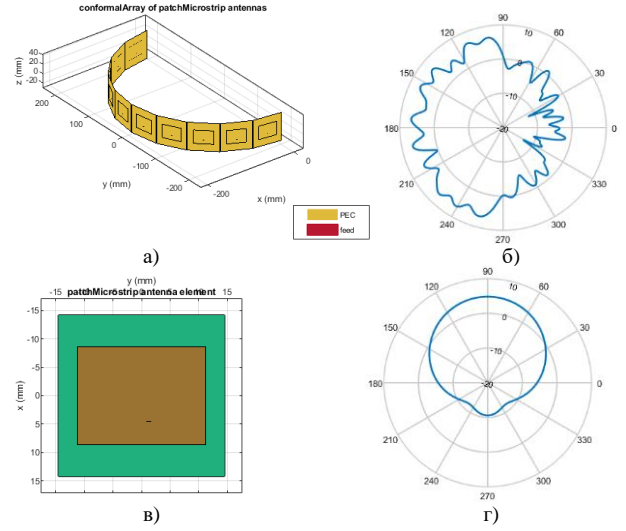


Рис. 2. Электродинамическая модель элементов антенной решетки: а) синтезированная плоская антенна и б) ее диаграмма направленности и в) прямоугольная полосковая патч-антенна на основе диэлектрика RO4730JXR и г) ее диаграмма направленности

Коэффициент усиления антенного элемента, показанного на рис. 2а, составляет прибл. 7 дБи. Коэффициент усиления сравнимого патч-элемента, изображенного на рис. 2в, г, равен 4,7 дБ. Эта микрополосковая антенна имеет медный излучатель и диэлектрик марки RO4730JXR. Таким образом, коэффициент усиления элемента из рис. 2а превышает антенну, показанную на рис. 2в. Исходя из выражения (6), дисперсия оценок при оценке угловых координат при использовании антенны, приведённой на рис. 2а, должна быть ниже, чем при использовании патч-элемента, изображенного на рис. 2в при одинаковом числе антенных каналов.

В данной работе осуществлено моделирование двух конфигураций. Первая является цифровой антенной решёткой из рис. 1, состоящая из трёх антенных элементов типа, изображенной на рис. 2в. Другая – гибридная антенная решётка, составленная из двух элементов как на рис. 2а. Такая гибридная аналого-цифровая схема работы решетки с уменьшенным количеством элементов представлена на рис. 3. Предварительная аналоговая обработка необходима для формирования диаграммы направленности в сектора шириной 180° , как показано на рис. 2б по критерию выражения (6). Затем происходит оценка угловых координат сигналов по формулам (4–5). Кроме того, данные антенные решётки являются кольцевыми с полуволновым расстоянием между центрами соседних элементов, т. е. как показано на рис. 1 и 3.

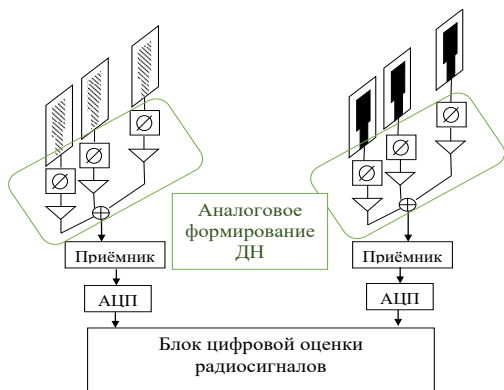


Рис. 3. Схема гибридной АР

На следующем рисунке показаны графики псевдоспектра метода MUSIC для рассматриваемых антенных решеток: двухэлементной гибридной решетки (синяя кривая), трехэлементной кольцевой цифровой антенной решетки (красная кривая) и двухэлементной кольцевой цифровой антенной решетки (желтая кривая). Координата сигнала в азимутальной плоскости составляет 75° , ОСШ = 5 дБ.

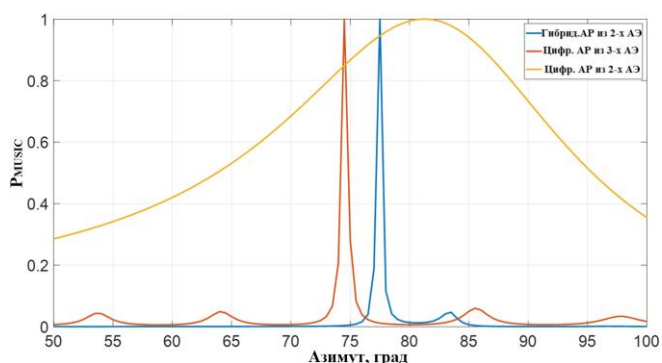


Рис. 4. Псевдоспектр MUSIC

На рис. 4 показано, что двухэлементная гибридная цифровая антенная решетка имеет аналогичную форму

псевдоспектрального графика по сравнению с трехэлементной антенной решеткой. В то же время ожидается, что двухэлементная антенная решетка, состоящая из прямоугольных патч-антенн на основе диэлектрика RO4730JXR, ухудшит качество оценки координаты источника радиоизлучения.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ

В работе показаны результаты моделирования гибридной аналого/цифровой антенной решетки на основе метода моментов для оценки угловых координат радиосигналов. Каждый из двух элементов такой решетки имеет большее усиление, чем отдельные антенны трехэлементной цифровой антенной решетки. На основе моделирования было установлено, что гибридная решетка с меньшим количеством антенных элементов не приводит к снижению точности оценок. Другими словами, она позволяет достичь того же уровня точности при оценке угловых координат радиосигналов, что цифровая антенная решетка с большим числом элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] J.A. Zhang, X. Huang, V. Dyadyuk, Y. Jay Guo, Chapter 3 - Hybrid antenna array for mmWave massive MIMO, Editor(s): Shahid Mumtaz, Jonathan Rodriguez, Linglong Dai, mmWave Massive MIMO, Academic Press, 2017, Pages 39-61, ISBN 9780128044186, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804418-6.00003-0>.
- [2] Godard L.C. Application of antenna arrays in mobile communications II: beamforming and direction of arrival. *Proceedings of IEEE*, 1997, vol. 85, no. 8, p. 1195–1245.
- [3] J. Amado and G. Fano, "Antenna coupling model in receiving mode," 2016 IEEE Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON), Mar del Plata, Argentina, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/GEMCCON.2016.7797321.
- [4] Пешков И.В. Способ построения двухэлементной цифровой антенной решетки для оценки угловых координат радиосигналов со сверхразрешением с повышенной точностью на основе нижней границы Крамер-Рао. // Журнал радиоэлектроники. 2024. №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.2.11>