

Исследование характеристик разреженной линейной антенной решетки

В. Ю. Волков, Нгуен Вьет Ан

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
vl_volk@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача формирования диаграммы направленности радара с разреженной линейной антенной решеткой. Представлен обзор методов формирования виртуальных структур. На конкретном примере исследуется форма и свойства боковых лепестков амплитудной диаграммы направленности для *coprime* структуры. Проведено сравнение амплитудных диаграмм направленности полученной разреженной решетки и обычной антенны с фазированной антенной решеткой (ФАР).

Ключевые слова: разреженные антенные решетки; решетки с минимальным резервированием; вложенные и взаимно простые структуры *coprime* и *nested*; диаграмма направленности; уровень боковых лепестков

I. ВВЕДЕНИЕ

Применение многоэлементных антенных решеток является фундаментальной технологией, используемой в различных приложениях, таких как радар, гидролокатор, навигация, беспроводная связь, электронное наблюдение и радиоастрономия [1, 2]. Их ключевые преимущества включают пространственную избирательность и возможность уменьшения помех и улучшения качества приема сигнала. Наиболее часто используются обычные однородные линейные решетки (ULA – uniform linear array), где расстояние между элементами является постоянным и составляет не более половины длины волны, чтобы избежать пространственного наложения. Линейные решетки с M эквидистантными элементами могут обеспечить эффективное оценивание и разрешение не более чем $M-1$ излучателей. Они также страдают от серьезных эффектов взаимной связи между датчиками.

В последнее время неоднородные или неэквидистантные (non-uniform) разреженные антенные решетки, включая взаимно простые массивы (*co-prime array*) и вложенные массивы (*nested array*), привлекли заметное внимание благодаря их более высокой производительности по сравнению с ULA [3–6].

За последнее десятилетие антенные системы с несколькими входами и несколькими выходами (MIMO) привлекли значительное внимание исследователей в области систем связи, особенно для радиолокационных систем [7]. Использование нескольких антенн как на передачу, так и на прием позволяет улучшить разнесение, увеличить пропускную способность канала и снизить частоту ошибок в битах [8]. Ключевая особенность MIMO заключается в том, что система позволяет передавать совершенно разные формы сигнала (набор форм сигнала) по каждому из M каналов передачи [9,10]. Использование разреженных (*sparse*) антенных

решеток создает дополнительные возможности для реализации пространственного разнообразия форм сигнала.

Концепция MIMO-радар, позволяющая передавать множество ортогональных сигналов от разных антенн, обычно называется разнесением сигналов. В отличие от этой концепции частотное разнесение (FDA – frequency diversity array) сочетает в себе частотное и пространственное разнесение, поэтому отличается от любых схем разнесения формы сигнала конфигурацией с одной антенной, FDA также отличается от решетки фазированного сканирования, решетки частотного сканирования и совместно расположенных (*co-located*) передающих антенн в радаре MIMO. Совместно расположенные передающие антенны в радаре MIMO имеют больше свободы в проектировании сигналов, чем FDA, поскольку сигналы в совместно расположенных радаре MIMO могут отличаться по частоте, фазе, длительности и т. д.; в то время как сигналы в FDA должны иметь одинаковую длительность, линейно увеличивающиеся/уменьшающиеся частоты и особые требования к начальной фазе [11]. Однако для систем FDA не обязательно требование ортогональности передаваемых сигналов, что расширяет их возможности по сравнению с радаром MIMO.

Концепция FDA была предложена Полом Антонином и др. на конференции IEEE Radar 2006 года [9, 11]. В линейном FDA частота формы волны, излучаемой каждым элементом, увеличивалась на небольшую величину (Δf) от элемента к элементу. Использование многочастотных антенных решеток связано с их гибкими возможностями формирования и эффективного управления лучом по сравнению с фазовращателями и коммутацией диаграмм [10]. FDA предоставляет новую свободу проектирования в диапазонах дальностей, углов и времени, а также новые способы управления диаграммой направленности антенны, позволяет получить диаграммы направленности антенн, которые являются периодическими по времени и сканируются под углом без необходимости в фазовращателях или механическом управлении [12]. Использование частотного разнесения в разреженных антенных решетках требует усложнения обработки, но открывает дополнительные возможности увеличения числа степеней свободы радара.

II. РАЗРЕЖЕННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ

Разреженные антенные решетки могут обеспечить существенно большую апертуру, чем однородные при том же числе излучателей или датчиков. Это позволяет получить большую точность оценивания и повысить разрешающую способность. Помимо этого, ослабляется

взаимное влияние датчиков вследствие большего разнесения [5, 6].

Линейные решетки с минимальным резервированием (MRA – minimum redundancy array) – это специальные линейные решетки, которые обеспечивают максимально узкий основной лепесток в диаграмме направленности, возможный для заданного количества антенн. Однако решение оптимизационной задачи в общем виде и поиск идеальных линеек наталкиваются на значительные сложности [12, 13].

Вложенные решетки (nested array) получают путем объединения двух или более ULA с увеличенным межэлементным расстоянием. Но из-за плотно упакованного ULA в физической решетке он остается чувствительным к эффектам взаимной связи между элементами. Ослабление этого недостатка требует специальных решений, например, супервложения с определенным местоположением датчиков [5].

Взаимно простые (co-prime) решетки содержат линейные однородные подрешетки, из которых формируется конечная разреженная структура [3, 4, 6]. Число элементов в подрешетках и расстояния между элементами в каждой из них связаны соотношениями, обеспечивающими малое число повторяющихся позиций в результирующей решетке: количества элементов в каждой из подрешеток должны быть взаимно-простыми числами, т.е. их наибольший общий делитель равен единице. Прототип решетки co-prime состоит из двух ULA [4], где один ULA имеет M_1 датчиков с межэлементным расстоянием $M_2\lambda/2$, в то время как другой ULA имеет M_2 датчиков с межэлементным расстоянием $M_1\lambda/2$, где M_1 и M_2 – пара взаимно простых целых чисел, а λ – длина волны сигнала. По сравнению с вложенной массивом, решетка co-prime может дополнительно уменьшить эффекты взаимной связи между элементами

Решетка co-prime может обеспечить разрешение до $O(M_1M_2)$ источников только с $M_1 + M_2 - 1$ физических датчиков. Руководствуясь этими преимуществами, был предпринят ряд попыток использовать матрицу соргит для оценки направлений на излучатели, адаптивного формирования луча и определения спектра [3].

Задачей обработки сигналов радара является оценивание и интерпретация радиолокационного канала, который расположен между передающими и приемными элементами, и содержит движущиеся цели и помехи.

Представляет интерес анализ потенциальных возможностей антенных систем с использованием временного, частотного и пространственного разнесения сигналов. В статье анализируется влияние пространственного разнесения конфигурации антенной системы, в частности, разреженных антенных решеток. Рассматривается антенная система, работающая только для передачи или приема, что не исключает обобщения на случай двусторонней антенны. Объясняется формирование виртуальной антенной решетки в разреженной антенной системе, полученной из двух смежных подрешеток. Исследованы амплитудные диаграммы направленности виртуальных антенных решеток в сравнении с обычными фазированными антенными решетками, имеющими такое же количество физических элементов.

III. ОБРАЗОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ В РАЗРЕЖЕННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ

Рассмотрим получение виртуальной антенной системы на основе соргит разреженной линейной антенной решетки. Эта структура может использоваться как для передачи сигналов, так и на прием. Общая теория такой системы изложена в работах [3, 4, 6, 12].

Пусть число элементов в паре однородных линейных подрешеток $M_1 = 2$ и $M_2 = 3$ соответственно. Таким образом, имеем два элемента первой подрешетки, разнесенных на $3d$, где $d = \lambda/2$, и три элемента второй подрешетки, разнесенных на $2d$. Полагая позиции первых элементов каждой подрешетки нулевыми, остальные позиции определяются двумя массивами: $X1 = [0 \ 3]$ и $X2 = [0 \ 2 \ 4]$. Результирующий массив позиций элементов $X = [X1 \ X2]$ определяет разреженную структуру, представленную на рис. 1. Хотя общее число элементов равнялось пяти, но вследствие совпадения положения первых элементов решетка содержит $M = M_1 + M_2 - 1 = 4$ элемента.

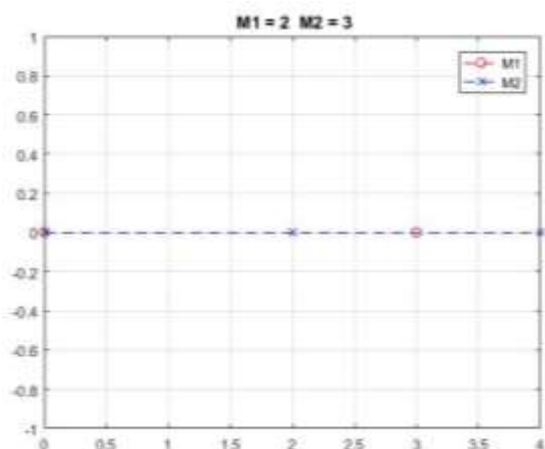


Рис. 1. Расположение физических датчиков разреженной решетки

Для образования виртуальной решетки следует получить разностную матрицу позиций элементов размером $M_2 \times M_1$. Она рассчитывается по формуле [3,15-17]

$$P = \{\pm(M_2 n - M_1 m)\},$$

где n изменяется от единицы до M_1 , а m изменяется от единицы до M_2 .

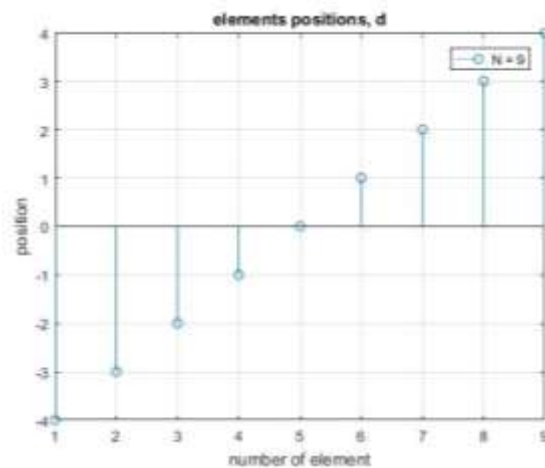


Рис. 2. Значения позиций элементов в количестве полуволновых расстояний d для виртуальной решетки

После отбрасывания повторяющихся позиций имеем матрицу виртуальных позиций из 9 элементов, которая представлена графически на рис. 2. Сама сетка виртуальных элементов показана на рис. 3. В данном случае виртуальная сетка получилась плотной. Следующий пример приводит к разреженному виртуальному массиву.

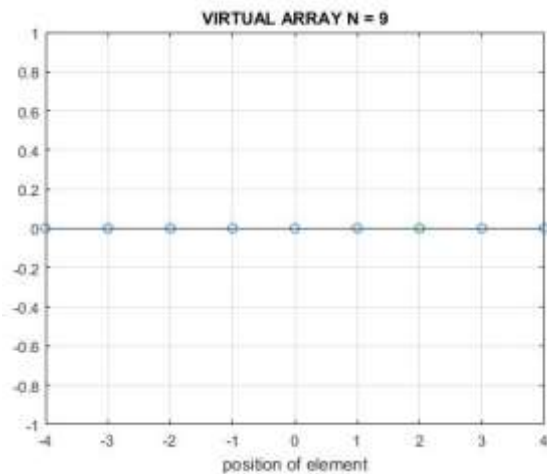


Рис. 3. Виртуальная решетка, содержащая 9 элементов

Пусть число элементов в паре однородных линейных подрешеток $M_1 = 3$ и $M_2 = 5$ соответственно. Таким образом, имеем три элемента первой подрешетки, разнесенных на $5d$, где $d = \lambda/2$, и пять элементов второй подрешетки, разнесенных на $3d$. Полагая позиции первых элементов каждой подрешетки нулевыми, остальные позиции определяются двумя массивами: $X1 = [0 \ 5 \ 10]$ и $X2 = [0 \ 3 \ 6 \ 9 \ 12]$. Результирующий массив позиций элементов $X = [X1 \ X2]$ определяет разреженную структуру, представленную на рис. 4. Хотя общее число элементов равнялось восьми, но вследствие совпадения положения первых элементов решетка содержит $M = 7$ физических элементов.

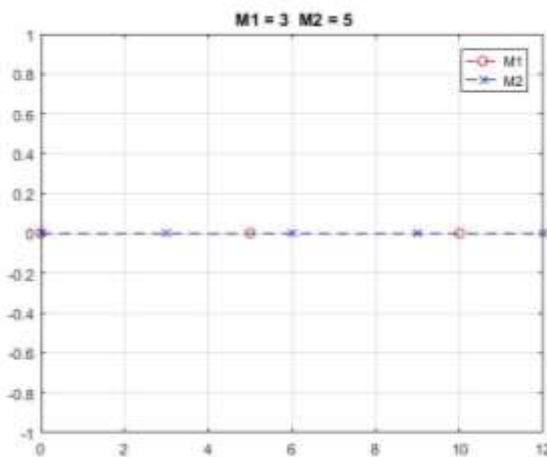


Рис. 4. Расположение физических датчиков разреженной решетки.

Разностная матрица позиций содержит набор из 21 различных элементов, который графически представлен на рис. 5. Сама решетка, содержащая 21 виртуальный элемент, изображена на рис. 6.

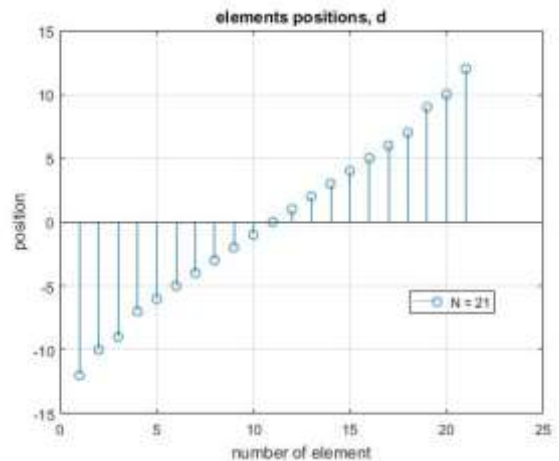


Рис. 5. Значения позиций элементов в количестве полуволновых расстояний d для виртуальной решетки

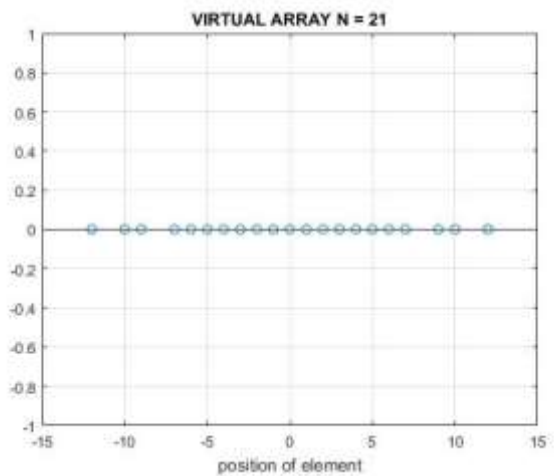


Рис. 6. Виртуальная решетка, содержащая 21 элемент

На решетке заметны два пустых пространства (дырки) между элементами сетки, которые, как правило, нежелательны. Существует два способа получения сплошной структуры: первый сводится к использованию только центральной части решетки, при этом качество приема несколько снижается. Второй метод включает интерполяцию элементов, что дает дополнительный выигрыш в характеристиках, но требует более сложной обработки [3].

IV. АМПЛИТУДНЫЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РЕШЕТОК

Для расчета диаграммы направленности виртуальной решетки требуется сформировать корреляционную матрицу сигналов, которые приходят на элементы этой решетки. Поскольку известна матрица позиций P этих элементов, то из нее получается матрица относительных фазовых сдвигов соответствующих сигналов для каждого выбранного направления. Считая амплитуды сигналов одинаковыми, нетрудно получить матрицу синусных и косинусных составляющих этих сигналов. Далее суммированием получают две квадратуры, из которых формируется модуль, дающий амплитудную характеристику для выбранного направления прихода волны. Таким образом, получены диаграммы направленности для виртуальных решеток.

Амплитудная диаграмма направленности виртуальной решетки (AV) показана на рис. 7 для $M_1 = 2$; $M = 3$. Нетрудно получить амплитудную диаграмму направленности физической антенной решеткой, когда она обычно используется в радарх с фазированной антенной решеткой. В этом случае антенна содержит семь физических элементов. Амплитудная диаграмма направленности обычной решетки (AC) также показана на рис. 7.

Для структуры из двух подрешеток с числом элементов $M_1 = 3$; $M_2 = 5$ соответствующая амплитудная диаграмма направленности показана на рис. 8. Эта структура имеет существенно меньшее количество боковых лепестков, к тому же они имеют несколько меньшие амплитуды.

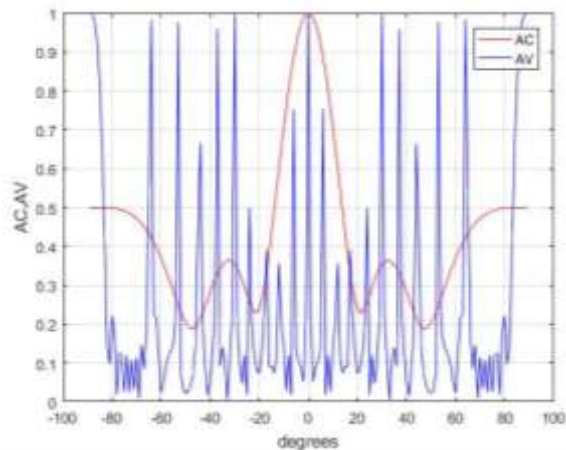


Рис. 7. Амплитудные диаграммы направленности виртуальной решетки (AV) с числом элементов $N = 7$, и обычной ФАР (AC), которая содержит семь физических элементов

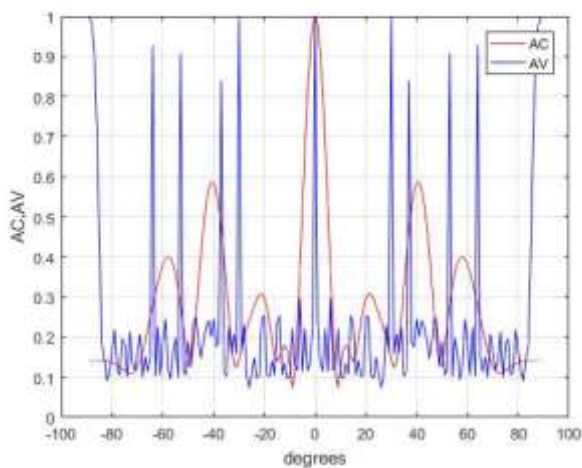


Рис. 8. Амплитудные диаграммы направленности виртуальной решетки (AV) с числом элементов $N = 21$, и обычной ФАР (AC) с тем же числом элементов

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовалась задача пространственного разнообразия конфигурации антенной решетки при построении радара. Рассмотрены амплитудные диаграммы направленности разреженных антенных решеток при реализации со-prime структур. Проведено сравнение с ФАР, содержащими то же число физических элементов. Рассмотренные конфигурации имеют практическое значение, например, для построения автомобильных радаров, мобильных систем навигации и связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] H. L. Van Trees, *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part IV: Optimum Array Processing*. New York: Wiley, 2002.
- [2] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 34, no. 3, pp. 276–280, Mar. 1986.
- [3] C. Zhou, Y. Gu, X. Fan, Z. Shi, G. Mao, Y. D. Zhang, "Direction-of-arrival estimation for coprime array via virtual array interpolation," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, no. 22, pp. 5956–5971, Nov. 2018.
- [4] P. P. Vaidyanathan, P. Pal, "Sparse sensing with co-prime samplers and arrays," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 2, pp. 573–586, Feb. 2011.
- [5] Zhi Zheng, Wen-Qin Wang, Yangyang Kong, Yimin D. Zhang, "MISC Array: A New Sparse Array Design. Achieving Increased Degrees of Freedom and Reduced Mutual Coupling Effect," *IEEE Transactions on Signal Processing*, February 2019, pp. (99):1-1.
- [6] Y. D. Zhang, M. G. Amin, and B. Himed, "Sparsity-based DOA estimation using co-prime arrays," in *Proc. IEEE ICASSP*, Vancouver, Canada, May 2013, pp. 3967–3971.
- [7] *Modern Radar for Automotive Applications*. Edited by Zhengyu Peng, Changzhi Li and Faruk Uysal. The Institution of Engineering and Technology, London, 2022.
- [8] R. Vahdani, H. K. Bizaki, M. F. Joshaghani, "Additional degree of freedom in phased-MIMO radar signal design using space-time codes," *Etri Journal*, vol. 43(4), pp. 640-649, 2021. DOI: 10.4218/etrij.2020-0031
- [9] P. Antonik, *An Investigation of a Frequency Diverse Array*. PhD thesis. University College London. 2009.
- [10] Wen-Qin Wang. "Overview of frequency diverse array in radar and navigation applications," *IET Radar Sonar Navig.*, 2016, vol. 10, Iss. 6, pp. 1001–1012. DOI: 10.1049/iet-rsn.2015.0464.
- [11] J. Huang. *Frequency Diversity Array: Theory and Design*. PhD thesis. University College London. 2009.
- [12] Yan-kui Zhang, Hai-yun Xu, Da-ming Wang, Bin Ba, Si-yao Li. "A Novel Designed Sparse Array for Noncircular Sources with High Degree of Freedom," *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*. V. 2019, Article ID 1264715, <https://doi.org/10.1155/2019/1264715>.
- [13] F. Schwartau, Y. Schroeder, L. Wolf, J. Schoebel, "Large Minimum Redundancy Linear Arrays: Systematic Search of Perfect and Optimal Rulers Exploiting Parallel Processing," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*. December 2020, pp. (99):1-1.
- [14] P. P. Vaidyanathan and P. Pal, "Sparse sensing with co-prime samplers and arrays," *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 59, no. 2, pp. 573–586, Feb. 2011.
- [15] D. W. Bliss, et al. "GMTI MIMO radar." *Waveform Diversity and Design Conference*, 2009 International. pp. 118–122.
- [16] *MIMO Radar. Theory and Application* Jamie Bergin, Joseph R. Guerci (Eds.). Artech house, Boston, London, 2018.
- [17] S. Sun S., A. P. Petropulu, H. V. Poor "MIMO radar for advanced driver-assistance systems and autonomous driving: advantages and challenges," *IEEE Signal Processing Magazine*. vol. 37(4), pp. 98–117, 2020.