

Исследование характеристик совмещенного ММО радара

В. Ю. Волков^{1,2}, Нгуен Вьет Ан¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
vl_volk@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача формирования диаграмм направленности совмещенного ММО радара. Исследуется форма и свойства боковых лепестков амплитудной диаграммы направленности в зависимости от геометрической конфигурации многоэлементной антенной системы. Исследованы линейные совмещенные и разреженные структуры с равномерным и неравномерным расположением элементов. Проведено сравнение амплитудных диаграмм направленности ММО радара и двухсторонней ФАР.

Ключевые слова: ММО радар; диаграмма направленности; уровень боковых лепестков; отношение сигнал/шум

I. ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие антенные системы с несколькими входами и несколькими выходами (ММО) привлекли значительное внимание исследователей в области систем связи, особенно для радиолокационных систем [1–11]. Использование нескольких антенн как на передачу, так и на прием позволяет улучшить разнесение, увеличить пропускную способность канала и снизить частоту ошибок в битах [2].

Было разработано множество подходов к ММО-радару, которые базируются вокруг основной идеи использования разнообразия форм сигналов. В зависимости от используемых конфигураций антенных решеток радары ММО можно разделить на два основных типа. Первый тип (*widely separated*) использует широко разнесенные (относительно длины волны) передающие/приемные антенны для анализа пространственного разнообразия ЭПР цели [3]. Второго типа – совмещенный (*co-located*) ММО-радар, где передающая и приемная антенны расположены близко друг к другу. Иногда такой радар называют когерентным ММО радаром [4]. В этом случае обычно предполагается, что цель находится в дальней зоне, и, следовательно, используется модель сигнала точечного источника. Именно такой радар и будет здесь объектом рассмотрения. Полезный эффект в данном случае, сводится к увеличению виртуальной апертуры решетки из-за того факта, что одна и та же приемная решетка принимает множество независимых форм сигнала [1, 5].

Во многих исследованиях отмечается, что данная технология позволяет улучшить угловое разрешение,

увеличить верхний предел количества обнаруживаемых целей, улучшить возможность идентификации параметров, расширить апертуру решетки с помощью виртуальных датчиков и повысить гибкость конструкции приемо-передающего луча. Однако эти преимущества достигаются ценой потери когерентности в передающей антенне, обеспечиваемой радаром с фазированной антенной решеткой. Следовательно, в радаре ММО с совместно размещенными антеннами может возникать потеря формы луча [6, 7]. Для преодоления этой слабости ММО радара в [5] предложено разбиение исходной решетки на подрешетки, которые могут частично перекрываться.

Вопросы синтеза сигналов для ММО радара широко исследуются в литературе [11]. Далее будем считать, что сигналы с каждого передающего элемента антенны являются независимыми.

Фундаментальное преимущество когерентных ММО-радаров заключается в том, что они позволяют использовать разреженные массивы антенных элементов без неблагоприятного воздействия боковых лепестков. Такие массивы позволяют улучшить оценки направлений прихода и минимальную обнаруживаемую скорость объектов [4].

II. ВИРТУАЛЬНАЯ АПЕРТУРА ММО РАДАРА

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

Пусть антенная система содержит N_T передающих и N_R приемных элементов. Передающие антенны излучают независимые комплексные сигналы, формы которых содержатся в строках матрицы S . В случае дискретного полосового сигнала матрица $N_{Rx}N_T$ наблюдений может быть представлена в виде [12–14]

$$\mathbf{Z} = \sum_{\delta} \mathbf{H}_{\delta} \mathbf{S}_{\delta} + \mathbf{N},$$

где матрица \mathbf{N} размера $N_{Rx} \times 1$ включает шум и внешние помехи. Суммирование осуществляется по значениям δ задержек сигналов. Если облучаемый сектор содержит одиночный отражатель, расположенный в дальней зоне,

то канальная матрица \mathbf{H}_δ размера $N_{RX}N_T$ содержит элементы

$$(\mathbf{H}_\delta)_{m,n} = \exp(jk_0 \mathbf{u}(\mathbf{x}_m + \mathbf{y}_n)),$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$; $k\mathbf{u}$ – волновой вектор; \mathbf{x}_m и \mathbf{y}_n есть трехмерные векторы координат антенных элементов. Аргументы под экспонентой отражают различные временные задержки между передающими и приемными фазовыми центрами для данного отражателя в направлении \mathbf{u} .

Рассмотрение канальной матрицы позволяет установить наличие виртуальных антенных элементов, расположение которых может отличаться от координат исходных элементов. К тому же, часть элементов обычно повторяется несколько раз, т. е. виртуальная решетка оказывается переопределенной [12, 8].

Представляет интерес рассмотрение различных геометрических структур, отличающихся расположением антенных элементов ММО радара. Варианты структур могут содержать как совмещенные приемо-передающие элементы, так и разреженные структуры. Исследуются свойства амплитудных диаграмм направленности (ДН) виртуальных решеток. Анализируется ширина диаграммы направленности и уровни боковых лепестков. Влияние шума и помех будет рассмотрено отдельно. В данной работе рассмотрены линейные решетки, хотя некоторые результаты можно обобщить и на нелинейные структуры.

III. АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ С СОВМЕЩЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В этом варианте геометрии расстояния между элементами приемной и передающей антенн одинаковы, и равны половине длины волны излучения. Изначально часть элементов приемной и передающей антенн совмещены. Допускается сдвиг координат элементов одной из антенн по отношению к другой, что не влияет на характеристики амплитудной диаграммы направленности. Различают также линейные решетки с равномерным расположением элементов (ULA), и неравномерным.

A. $N_T = 2, N_R = 2$; расстояние между элементами $\lambda/2$.

В случае двух передающих и двух приемных элементов в ММО структуре появляется третий виртуальный элемент [1]. На рис. 1 представлены амплитудная ДН (АД) для фазированной решетки на передачу (на прием АР точно такая же), произведение (АТР) этих двух ДН, которое эквивалентно двусторонней ФАР. При построении ДН ММО радара (АМ) было устранено переопределение антенных элементов. В этом случае виртуальная решетка состоит из трех элементов, и нули главного лепестка расположены ближе друг к другу, чем в случае двусторонней ФАР. Платой за сужение главного лепестка является помимо уменьшения коэффициента передачи появление значительных боковых лепестков.

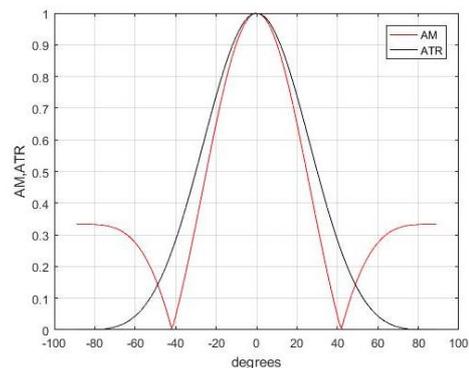


Рис. 1. Диаграммы направленности: АТР – на передачу и прием; АМ – ММО антенна

Б. $N_T = 2, N_R = 8$; равномерное расположение элементов через $\lambda/2$.

Исключая переопределенные элементы, можно получить виртуальную равномерную ММО решетку, содержащую девять элементов, расположенных через $\lambda/2$ (рис. 2).

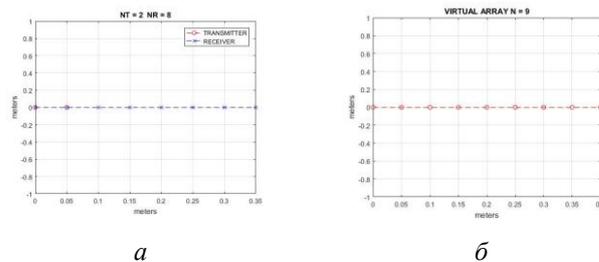


Рис. 2. Расположение элементов: а – физическая решетка; б – ММО виртуальная решетка

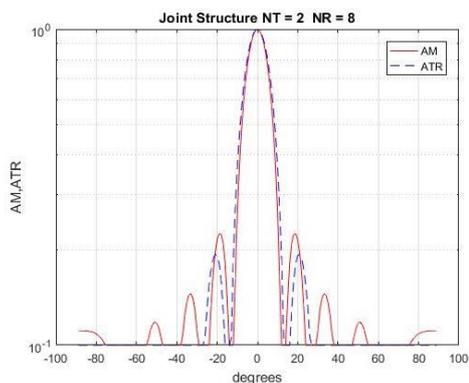


Рис. 3. Диаграммы направленности: АТР – на передачу и прием; АМ – ММО антенна

На рис. 3 заметно небольшое сужение виртуальной ДН ММО, но заметно возрастание уровней боковых лепестков.

В. $N_T = 4, N_R = 4$; равномерное расположение элементов через $\lambda/2$.

Случай четырех передающих и четырех приемных совмещенных элементов, расположенных через $\lambda/2$, представлен на рис. 2. Если исключить переопределение элементов, то виртуальная ММО структура

представляет сплошную линейную решетку из семи элементов. В результате ДН ММО решетки также имеет меньшее расстояние между нулями, чем двусторонняя ФАР (ATR).

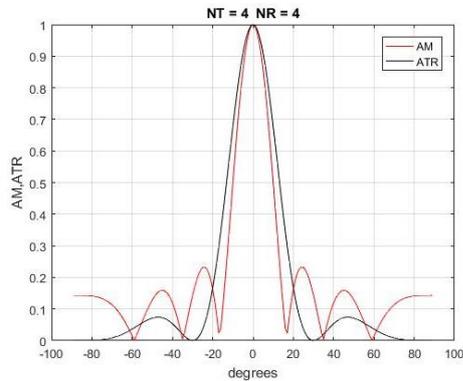


Рис. 4. Диаграммы направленности: ATR – на передачу и прием; AM – ММО антенна

Совмещенные элементы позволяют создать более узкие ДН за счет увеличения виртуальной апертуры. Однако уровни боковых лепестков существенно возрастают. Попытки использования оконных функций (Хэмминга, Ханна и др.) приводят к их уменьшению, однако при этом ширина ДН увеличивается, нивелируя достигнутое сужение.

Г. $N_T = 4, N_R = 4$; *неравномерное расположение элементов* [9]: $\lambda, 3\lambda/2, 2\lambda$.

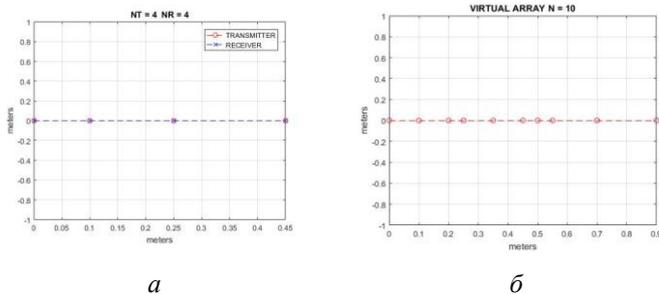


Рис. 5. Расположение элементов: а – физическая решетка; б – ММО виртуальная решетка

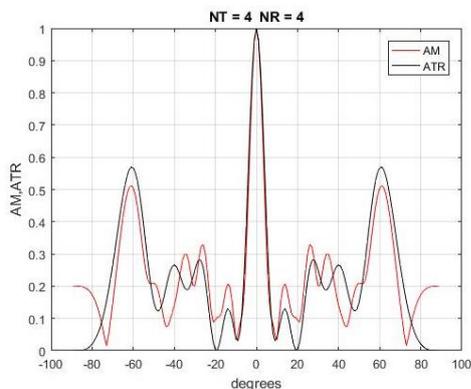


Рис. 6. Диаграммы направленности решеток с неравномерным расположением элементов: ATR – на передачу и прием; AM – ММО антенна

Виртуальная ММО решетка содержит 10 элементов. Она слегка проигрывает в усилении, но уровни максимальных боковых лепестков у нее несколько ниже.

IV. АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ С РАЗРЕЖЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Как правило, в этих конфигурациях используются несовмещенные передающие и приемные антенные элементы.

А. $N_T = 2, N_R = 2$; *sparse T-R-R-T*, Расстояние между приемными элементами $d = \lambda/2$, между передающими элементами $3\lambda/2$.

Виртуальная ММО решетка в этом случае содержит четыре элемента с разнесениями $\lambda/2; \lambda; \lambda/2$. Если сравнить ее со сплошной (filled) решеткой, у которой все разнесения равны $\lambda/2$, то ММО антенна обеспечивает некоторое сужение главного лепестка ценою увеличения уровня боковых лепестков.

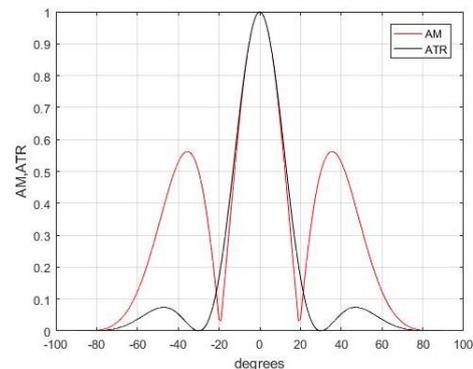


Рис. 7. Диаграммы направленности для структуры T-R-R-T: ATR – сплошная антенна на передачу и прием; AM – ММО антенна

Б. $N_T = 2, N_R = 2$; *sparse R-T-T-R*, Расстояние между приемными элементами $3\lambda/2$, между передающими $d = \lambda/2$.

Данная структура имеет более широкую ДН на передачу, чем предыдущая, но виртуальная ММО решетки полностью совпадает с изображенной на рис. 7.

В. $N_T = 2, N_R = 8$; *sparse*, расстояние между передающими элементами $d = 7\lambda/2$, между приемными элементами $\lambda/2$.

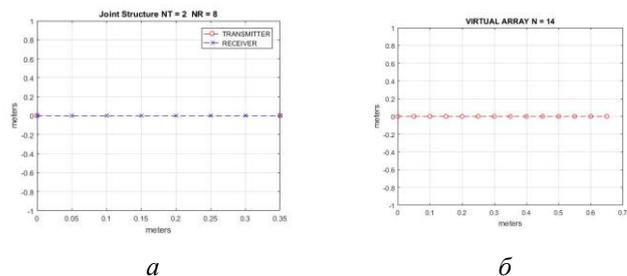


Рис. 8. Расположение элементов: а – физическая решетка; б – ММО виртуальная решетка

В данном случае виртуальная решетка содержит 14 элементов. Диаграмма направленности имеет такой же

главный лепесток, как и двусторонняя ФАР, однако боковые лепестки располагаются иначе.

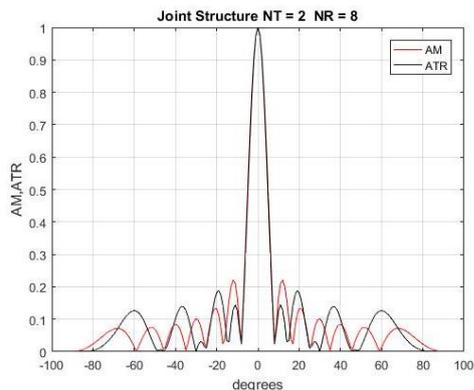


Рис. 9. Диаграммы направленности: ATR – на передачу и прием; AM – MIMO антенна

Г. $NT = 2, NR = 8$; sparse, расстояние между передающими элементами $d = \lambda/2$, между приемными элементами λ .

Такая конфигурация приведена в [1, 6] и названа interleaved (чередование). Виртуальная решетка, как и ранее, содержит 14 элементов (рис. 10).

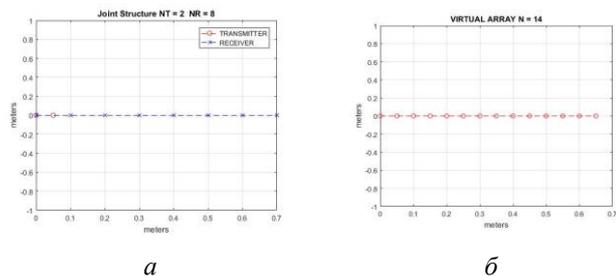


Рис. 10. Расположение элементов: а – физическая решетка; б – MIMO виртуальная решетка

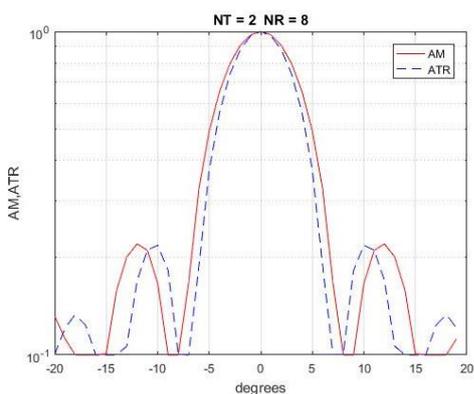


Рис. 11. Диаграммы направленности: ATR – на передачу и прием; AM – MIMO антенна

Можно заметить некоторое увеличение ширины главного лепестка по отношению к двусторонней ФАР (ATR).

Д. $NT = 2, NR = 8$; sparse, расстояние между приемными элементами $d = \lambda/2$, между передающими элементами 4λ .

В [1, 6] эта конфигурация называется stacked (вложение). Виртуальная решетка содержит 16 элементов. В силу большего числа виртуальных элементов главный лепесток ДН уже, чем для предыдущей конфигурации (рис. 13).

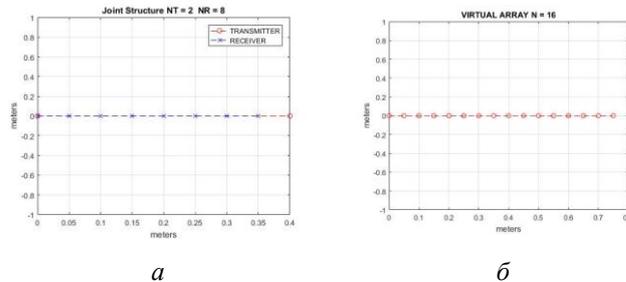


Рис. 12. Расположение элементов: а – физическая решетка; б – MIMO виртуальная решетка

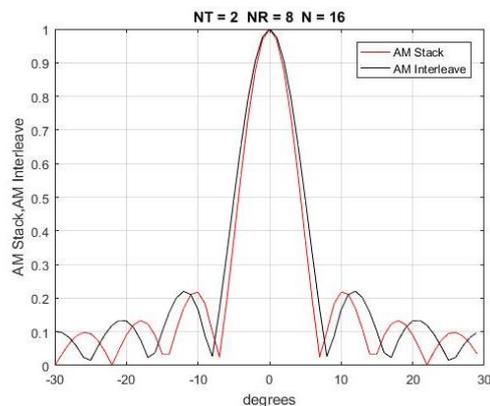


Рис. 13. Диаграммы направленности MIMO решеток 2x8 для конфигураций Stacked и Interleaved

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены амплитудные диаграммы направленности антенных решеток совмещенного MIMO радара. Исследованы линейные совмещенные и разреженные структуры с равномерным и неравномерным расположением элементов. Для анализа диаграмм направленности выбраны структуры с малым числом антенных элементов. Рассмотренные конфигурации имеют практическое значение для построения автомобильных MIMO радаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Modern Radar for Automotive Applications. Edited by Zhengyu Peng, Changzhi Li and Faruk Uysal. The Institution of Engineering and Technology, London, 2022.
- [2] 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.

- [3] A.M. Haimovich, R.S. Bluma, L. Cimini, "MIMO radar with widely separated antennas," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 25 (1), pp. 116–129, 2008.
- [4] D.W. Bliss, et al. "GMTI MIMO radar." 2009 International Waveform Diversity and Design Conference, pp. 118-122. <http://dx.doi.org/10.1109/WDDC.2009.4800327>
- [5] A. Hassanien, S.A. Vorobyov, "Phased-MIMO radar: a tradeoff between phased-array and mimo radars," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58 (6), pp. 3137–3151, 2010.
- [6] J. Li, P. Stoica, "MIMO radar with colocated antennas," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 24, pp. 106–114, Sept. 2007.
- [7] I. Bekkerman, J. Tabrikian, "Target detection and localization using MIMO radars and sonars," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 54, pp. 3873–3883, Oct. 2006.
- [8] J. Li and P. Stoica, *MIMO Radar Signal Processing*, JohnWiley& Sons, New York, NY, USA, 2009.
- [9] Wen-Qin Wang. "Virtual Antenna Array Analysis for MIMO Synthetic Aperture Radars," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2012, Article ID 587276, doi:10.1155/2012/587276.
- [10] B. Friedlander, "On the Relationship Between MIMO and SIMO Radars," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 57(1), pp. 394–398, Jan. 2009.
- [11] E. Raei, M. Alae-Kerahroodi, M.R. Bhavani Shankar, "Spatial- and Range- ISLR Trade-off in MIMO Radar via Waveform Correlation Optimization," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 69, pp. 3283–3298, 2021.
- [12] D.W. Bliss, et al. "GMTI MIMO radar." *Waveform Diversity and Design Conference, 2009 International*. pp. 118-122.
- [13] *MIMO Radar. Theory and Application* to Jamie Bergin, Joseph R. Guerci (Eds.). Artech house, Boston, London, 2018.
- [14] Sun S., Petropulu A.P., Poor H.V. "MIMO radar for advanced driver-assistance systems and autonomous driving: advantages and challenges." *IEEE Signal Processing Magazine*. vol. 37(4), pp. 98–117, 2020.