

11

Метод квазиоптической матричной радиолокации для получения четырехмерных радиоизображений

© А.В. Зайцев, С.А. Королёв

Институт физики микроструктур РАН, Афонино, Нижегородская обл., Россия
E-mail: zaytsev@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 25 декабря 2025 г.

В окончательной редакции 14 апреля 2026 г.

Принято к публикации 16 апреля 2026 г.

Разработан метод квазиоптической матричной радиолокации для получения четырехмерных радиоизображений. В представленном методе угловые координаты объекта определяются за счет использования квазиоптического объектива, в фокальной плоскости которого располагается матричный приемник, а расстояние до объекта и его радиальная скорость определяются методом радиолокации непрерывным излучением с частотной модуляцией. Действие предложенного метода продемонстрировано с помощью изготовленного макета радиолокатора диапазона 94 GHz. Преимуществом разработанного метода перед аналогами является более простой способ определения угловых координат объекта и, как следствие, менее сложная конструкция и более доступная технология изготовления.

Ключевые слова: матричная радиолокация, квазиоптическая система, непрерывное излучение с частотной модуляцией, четырехмерное радиоизображение, миллиметровые волны.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.14.63306.20611

В радиолокации использование миллиметровых волн обусловлено возможностью получения высокого разрешения при сохранении высокой проникающей способности зондирующего сигнала. Радиолокаторы миллиметрового диапазона в большинстве своем обеспечивают измерение не более трех характеристик детектируемого объекта: например, радиальной координаты, одной из угловых координат и радиальной скорости [1]. При этом измерение каждой дополнительной характеристики объекта не только позволяет получить о нем более полное представление, но и повышает вероятность различить данный объект на фоне других объектов или шума [2]. В связи с этим актуальной задачей является увеличение числа характеристик, измеряемых радиолокатором.

Все известные современные радиолокаторы миллиметрового диапазона для получения четырехмерных радиоизображений используют метод множественных входов и множественных выходов (multiple input and multiple output, MIMO) [3]. Данные радиолокаторы способны получать четырехмерные радиоизображения на расстоянии до ~ 300 м [2,4,5], что используется в системах помощи водителям транспортных средств. Также данные системы востребованы на коротких расстояниях (до 1 м), где они используются для распознавания жестов [6]. Привлекательной стороной метода MIMO является возможность создания приемопередающих матриц с большим числом виртуальных элементов при использовании существенно меньшего числа физических элементов. Это снижает стоимость радиолокатора и делает его более предпочтительным по сравнению с другими решениями (например, по сравнению с радиолокаторами на основе фазированных антенных решеток). Тем не менее радиолокаторы с функцией получения

четырёхмерных изображений пока не находят широкого применения, поскольку они не удовлетворяют прежде всего требованию экономической целесообразности.

В настоящей работе исследуется альтернативный подход к созданию матричного радиолокатора миллиметрового диапазона для получения четырехмерных радиоизображений, в основе которого лежит аналоговый метод формирования изображения вдоль угловых координат. В описываемой системе формирование изображения вдоль угловых координат осуществляется за счет использования квазиоптического объектива [7]: распределение мощности сигнала в фокальной плоскости объектива соответствует распределению отражателей по сцене. Определение расстояния до объектов и их скорости осуществляется методом радиолокации непрерывным излучением с частотной модуляцией. Использование квазиоптического метода формирования изображения является главным отличием предлагаемого подхода от метода MIMO. В методе MIMO для получения изображения вдоль угловых координат необходимо измерять разницу фаз принимаемого сигнала между элементами матрицы, при этом делать это нужно для множества различных передаваемых сигналов [8]. В предлагаемом методе фазовое распределение принимаемого сигнала учитывается при прохождении через квазиоптический объектив, что упрощает как техническую реализацию, так и алгоритмы обработки сигнала.

Разработанный метод получения четырехмерных радиоизображений иллюстрируется рис. 1. Генератор миллиметровых волн формирует непрерывный частотно-модулированный сигнал, мощность которого делится на две части. Первая часть направляется в исследуемое пространство, а вторая часть поступает непосредствен-

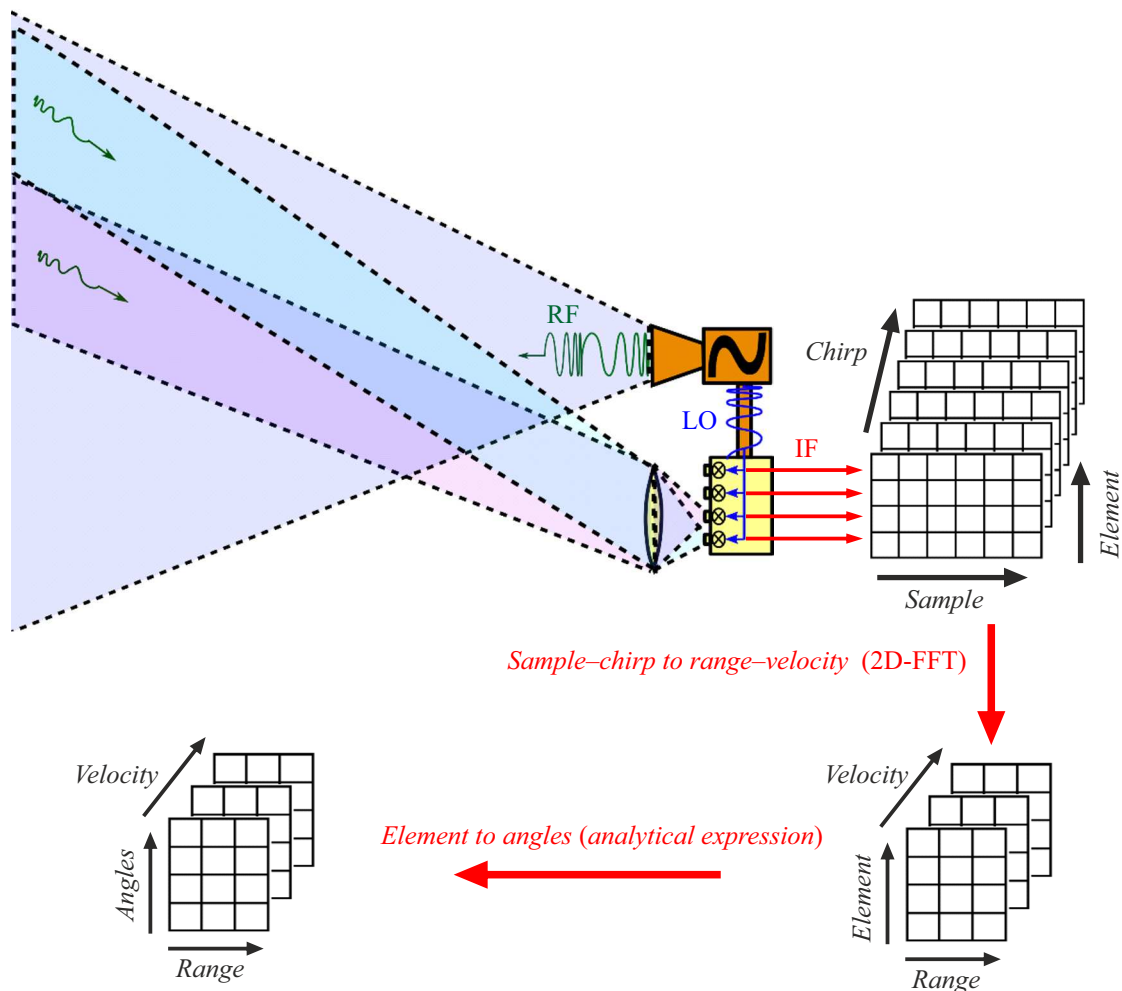


Рис. 1. Иллюстрация предложенного метода получения четырехмерных радиоизображений.

но на матричный приемник (опорный сигнал). Объект (или объекты) в зондируемом пространстве отражают падающую энергию в разных направлениях. Часть энергии отражается к квазиоптическому объективу, который фокусирует ее в фокальной плоскости. Каждая точка фокальной плоскости соответствует направлению, из которого исходит отраженная энергия. Отраженный сигнал смешивается с опорным сигналом в каждом чувствительном элементе.

Частотная модуляция сигнала, а также сдвиг частоты, связанный с эффектом Доплера, приводят к тому, что частота отраженного сигнала отличается от частоты опорного сигнала, вследствие чего на выходе смесительного элемента возникает сигнал разностной частоты. Распределение амплитуды сигнала разностной частоты между элементами матрицы соответствует распределению объектов по угловым координатам исследуемого пространства. Информация о радиальной координате и скорости определяется путем анализа фазы сигнала разностной частоты в соответствии с методом радиолокации непрерывным излучением [9].

Исходными данными для получения четырехмерного радиоизображения служат отрезки сигнала разностной частоты на временном интервале, включающем в себя несколько периодов модуляции зондирующего сигнала, для каждого элемента матрицы: $U_{l,m,n}$, где $l = 0, \dots, L - 1$ — номер элемента матрицы, $m = 0, \dots, M - 1$ — номер периода модуляции, $n = 0, \dots, N - 1$ — номер отсчета. Далее производится двумерное быстрое преобразование Фурье (2D-FFT) по переменным m и n [10], в результате которого мы получаем распределение амплитуды сигнала разностной частоты по радиальной координате R и скорости V : $U_l(R, V)$. Далее при помощи аналитических выражений в соответствии с правилами геометрической оптики каждому элементу матрицы l ставится в соответствие азимутальный угол φ и угол места ε . В итоге мы находим $U(\varphi, \varepsilon, R, V)$. Для получения проекции четырехмерного радиоизображения на требуемую координатную плоскость производится суммирование квадратов амплитуд по другим двум координатам.

Для демонстрации предложенного метода использовался ранее разработанный макет радиолокатора диапа-

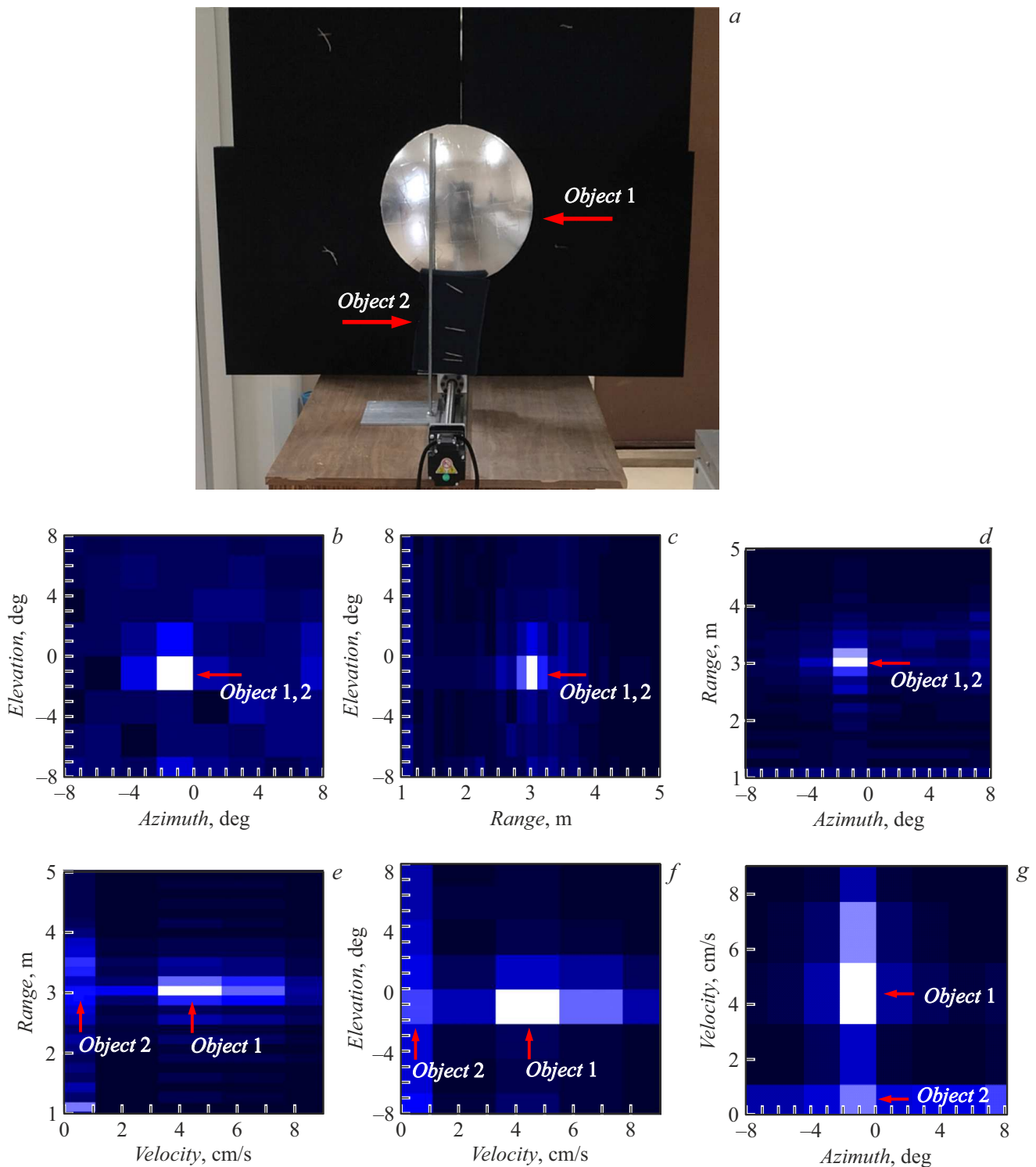


Рис. 2. *a* — фотография сферического отражателя (объект 1) и резьбовой шпильки (объект 2); *b–g* — радиоизображения сферического отражателя и резьбовой шпильки в проекции на различные плоскости.

зона 94 GHz с матричным приемником размером 8×8 элементов [11]. Смесительный элемент матричного приемника основан на использовании низкочастотного диода Шоттки, смонтированного в щелевую антенну в форме галстука-бабочки. Угловая разрешающая способность

радиолокатора, определяемая параметрами объектива, составляет 3 deg. Использовались следующие параметры частотной модуляции: размах 443 MHz, период 9 ms. Для получения радиоизображения проводился анализ сигнала длиной 10 периодов модуляции (90 ms), частота

дискретизации составляла 250 kHz. При указанных параметрах зондирующего сигнала разрешающая способность по дальности составила 17 см, по скорости — 1.8 см/с.

В ходе эксперимента зондировалась область пространства с двумя объектами, взаимное расположение которых показано на рис. 2, *a*. В качестве подвижного объекта использовался сферический отражатель с эффективной площадью рассеяния 1 м² (объект 1); в качестве неподвижного объекта использовалась металлическая шпилька с резьбой М6 (объект 2). Сферический отражатель был установлен на модуль линейного перемещения, на котором он двигался с заданной скоростью 4.3 см/с в прямую и обратную сторону с размахом 10 см. Объекты находились на одном расстоянии от радиолокатора (с точностью до диапазона перемещения сферического отражателя) и имели одинаковые угловые координаты. Четырехмерные радиоизображения в проекции на различные плоскости представлены на рис. 2, *b–g*. Как можно видеть из рис. 2, *b–d*, без определения скорости объекты неразличимы. Для того чтобы распознать, что перед нами находятся два объекта, а не один, необходимо использовать информацию об их скорости (рис. 2, *e–g*).

Таким образом, использование метода получения четырехмерных радиоизображений расширяет возможности квазиоптической матричной радиолокации миллиметрового диапазона. При этом предложенный метод не только повышает вероятность различения объектов на фоне других объектов, но и может помочь решить проблему выделения полезного сигнала на фоне низкочастотного шума, включающего в себя шум, связанный с детектированием мощности опорного сигнала. Это дает возможность повысить чувствительность матричного приемника и, как следствие, увеличить энергетический потенциал радиолокатора.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 22-79-10029-П, <https://rscf.ru/project/22-79-10029-П/>. Использовано оборудование ЦКП ИФМ РАН „Физика и технология микро-инаноструктур“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.-C. Kim, H.-G. Jeong, S. Lee, *Sensors*, **21**, 5228 (2021). DOI: 10.3390/s21155228
- [2] W. Shi, P. Tong, X. Bi, *Remote Sens.*, **17**, 1465 (2025). DOI: 10.3390/rs17081465
- [3] M. Steinhauer, H.-O. Ruoss, H. Irion, W. Menzel, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **56** (2), 261 (2008). DOI: 10.1109/TMTT.2007.914635
- [4] Y. Cai, J. Bai, H.-L. Shen, L. Huang, B. Rao, H. Wang, *Sensors*, **25**, 4640 (2025). DOI: 10.3390/s25154640
- [5] X. Zhang, L. Wang, J. Chen, C. Fang, G. Yang, Y. Wang, L. Yang, Z. Song, L. Liu, X. Zhang, B. Xu, Z. Li, Q. Yang, J. Li, Z. Zhang, W. Wang, *S.S. Ge, Sci. Data*, **12** (1), 439 (2025). DOI: 10.1038/s41597-025-04698-2
- [6] Y. Li, C. Gu, J. Mao, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **70** (7), 3652 (2022). DOI: 10.1109/TMTT.2022.3174075
- [7] П.В. Волков, Ю.И. Белов, А.В. Горюнов, И.А. Илларионов, А.Г. Серкин, В.И. Шашкин, *ЖТФ*, **84** (4), 120 (2014). [P.V. Volkov, Yu.I. Belov, A.V. Goryunov, I.A. Illarionov, A.G. Serkin, V.I. Shashkin, *Tech. Phys.*, **59** (4), 588 (2014). DOI: 10.1134/S1063784214040264].
- [8] D. Cohen, D. Cohen, Y.C. Eldar, A.M. Haimovich, *IEEE Trans. Signal Process.*, **66** (16), 4315 (2018). DOI: 10.1109/TSP.2018.2838541
- [9] A.G. Stove, *IEE Proc. F*, **139** (5), 343 (1992). DOI: 10.1049/ipf2.1992.0048
- [10] V. Winkler, *2007 Eur. Radar Conf.* (IEEE, 2007), p. 166–169. DOI: 10.1109/EURAD.2007.4404963
- [11] S. Korolyov, A. Goryunov, I. Illarionov, V. Parshin, P. Zemlyanukha, *Sensors*, **22**, 7132 (2022). DOI: 10.3390/s22197132