

11;15

Матричный радиолокатор трехмиллиметрового диапазона с зеркальным объективом

© С.А. Королев, А.В. Зайцев

Институт физики микроструктур РАН, Афонино, Нижегородская обл., Россия
E-mail: pesh@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 24 января 2024 г.

В окончательной редакции 3 апреля 2024 г.

Принято к публикации 3 апреля 2024 г.

Исследована возможность использования зеркального объектива в радиолокационной системе на основе матричного приемника прямого преобразования. Разработан макет матричного радиолокатора диапазона 94 GHz с зеркальным объективом в виде параболической рефлекторной антенны, широко используемой в спутниковой радиосвязи. Показано, что используемый объектив имеет высокое качество фокусировки миллиметровых волн: излучение от точечного отражателя фокусируется в пятно с размером, примерно равным одному пикселю матричного приемника. Продемонстрировано, что при мощности излучаемого сигнала 4 mW, ширине луча засветки 10° и диаметре объектива 60 см система позволяет обнаружить объект с эффективной площадью рассеяния 1 m^2 на расстоянии до 50 м.

Ключевые слова: миллиметровые волны, радиолокация непрерывным излучением с частотной модуляцией, матричный приемник, квазиоптический объектив.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.14.58307.19870

В настоящее время создание матричного радиолокатора миллиметрового диапазона с удовлетворительными характеристиками упирается в ряд проблем [1]. Для реализации классического способа матричной радиолокации, основанного на использовании фазированной антенной решетки, требуется применение полупроводниковых технологий с высокой степенью интеграции (SiGe-технологий). Известные проблемы сверхвысокочастотной SiGe-микрoэлектроники, а именно низкая выходная мощность усилителей передающих модулей и высокий уровень шума приемных модулей, не позволяют добиться приемлемой чувствительности радиолокатора; дальность действия разработанных к настоящему времени приборов составляет не более 1 м [2,3].

Требование к степени интеграции микросхемы может быть ослаблено за счет использования разреженных матриц, которые применяются, например, в радиолокационных системах ММО (multiple input multiple output) [4]. В настоящее время в системах данного типа достигнуто дальность действия около 10 м [5].

Другим подходом к созданию матричных радиолокаторов миллиметрового диапазона является упрощение конструкции приемно-передающих элементов матрицы. В работах [6,7] был предложен и исследован новый подход к созданию радиолокационных систем матричного типа, основанный на использовании в качестве элементов приемной матрицы приемников прямого преобразования простой конструкции: приемный элемент состоит из модифицированной щелевой антенны, диода Шоттки с пониженной высотой барьера и маломощного усилителя низкой (до 100 kHz) частоты. Разрешение объектов по угловым координатам в данной системе осуществляется за счет формирования изображения квазиоптическим

объективом [8], определение расстояния до объектов — за счет использования метода радиолокации непрерывным излучением с частотной модуляцией [9].

В разработанном макете радиолокационной системы в качестве квазиоптического объектива использовалась диэлектрическая линза [10]. Применение диэлектрических линз позволяет перенести принцип построения объективов оптических видеокамер на миллиметровый диапазон длин волн. Другим возможным типом квазиоптического объектива является зеркальная антенна, широко используемая в современных системах радиосвязи и радиолокации. В настоящей работе продемонстрирована возможность использования зеркальной антенны в качестве объектива матричной радиолокационной системы трехмиллиметрового диапазона.

На рис. 1, а представлено схематическое изображение разработанной системы. В качестве источника миллиметрового излучения применяется генератор на основе лампы обратной волны W-диапазона. Вблизи рабочей частоты 94 GHz мощность генератора составляет 10 mW. Используется треугольная форма частотной модуляции с размахом 672 MHz. С помощью направленного ответвителя мощность генератора практически поровну разделяется на две части. С учетом потерь в ответвителе мощность на выходе первичного и вторичного волноводов составляет 4 mW. Мощность с выхода первичного волновода поступает на коническую рупорную антенну с коэффициентом усиления 25 dB (что соответствует ширине луча примерно 10°) для засветки сцены, а с выхода вторичного волновода — в антенно-фидерный тракт, обеспечивающий подачу опорного излучения на матричный приемник. Формирование изображения в плоскости расположения матрицы происходит с по-

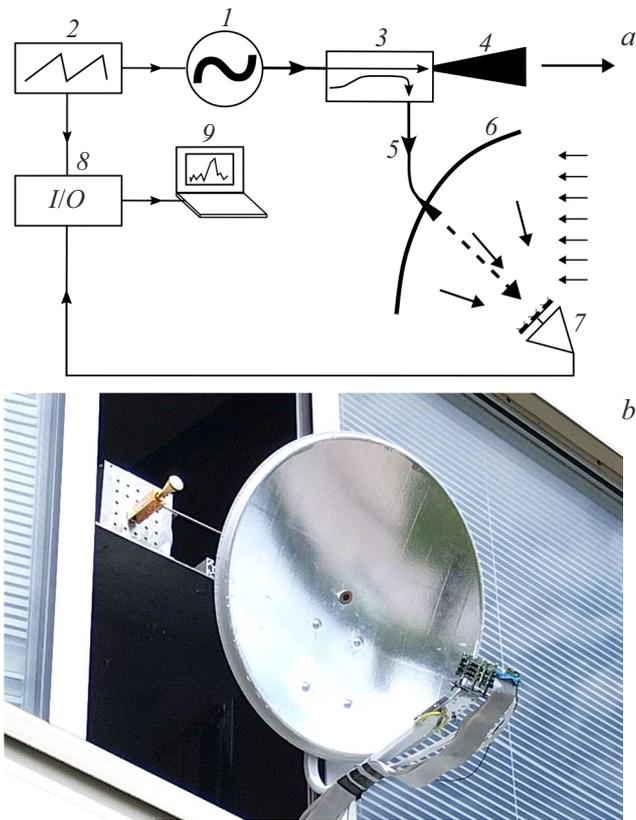


Рис. 1. *a* — схематическое изображение радиолокационной системы на основе зеркального объектива. 1 — генератор миллиметрового излучения, 2 — генератор модулирующего сигнала, 3 — направленный ответвитель, 4 — рупорная антенна для засветки сцены, 5 — антенно-фидерный тракт на основе металлического волновода и рупорной антенны для подвода к приемнику опорного сигнала, 6 — параболическая антенна, 7 — матричный приемник, 8 — система сбора данных, 9 — ноутбук. Сплошными стрелками показано зондирующее излучение, штриховой стрелкой — опорное излучение. *b* — фотография радиолокационной системы.

мощью зеркального объектива на основе параболической рефлекторной антенны, широко используемой в спутниковой радиосвязи. Диаметр апертуры объектива составляет 60 см. Для сглаживания рельефа антенны, имеющей шероховатости с характерным латеральным размером ~ 1 мм, а также для снижения потери мощности при отражении поверхность рефлекторной антенны обклеивалась клеей алюминиевой лентой. Облучение матрицы опорным сигналом осуществляется с помощью рупорной антенны, помещенной в отверстие в центре зеркального объектива. Использовался матричный приемник с разрешением 8×8 пикселей, подробное описание конструкции которого, а также его базовые характеристики можно найти в [7].

Юстировка положения матричного приемника относительно объектива проводилась в два этапа. На первом этапе использовался лазерный луч, который падал на рефлекторную антенну с центрального направления сцены.

Лазерный луч направлялся в разные точки поверхности антенны, и определялась точка (фокус квазиоптического объектива), где сходятся отраженные от поверхности рефлектора лучи. После этого матричный приемник располагался таким образом, чтобы центр матрицы совпал с фокусом. На втором этапе использовался точечный отражатель миллиметровых волн. В рабочем режиме радиолокационной системы захватывалось изображение точечного отражателя, и положение матричного приемника регулировалось таким образом, чтобы размер получаемого изображения (пятна) был минимальным. В итоге положение матричного приемника было отрегулировано таким образом, что отраженный сигнал от точечного источника фокусировался в один пиксель матрицы (размер пикселя составляет 3.8×3.8 мм). В результате расстояние от центра поверхности рефлекторной антенны до фокуса составило 44 см. При смещении матрицы к антенне или от антенны на расстояние $\gtrsim 5$ мм изображение размывалось.

Для определения дальности действия системы был проведен эксперимент по регистрации изображения тестового отражателя с эффективной площадью рассеяния 1 м^2 . Тестовый отражатель, показанный на вставке к рис. 2, *a*, представляет собой металлизированный шаровой сегмент с радиусом сферы 60 см и диаметром основания сегмента 30 см. Радиолокационная система устанавливалась у открытого окна первого этажа здания (рис. 1, *b*), а отражатель на улице перемещался по направлению от системы. Фотография зондируемой области пространства показана на рис. 2, *a*. При превышении расстояния 50 м между системой и отражателем полезный сигнал на выходе приемника становился неотличимым от шума. На рис. 2, *b* показано состояние индикаторов программы управления и отображения данных при размещении отражателя на расстоянии 50 м. В верхней части рис. 2, *b* находится изображение зондируемого участка сцены, в котором тестовый отражатель отображается в виде засвеченного пикселя. В нижней части рис. 2, *b* показан уровень принимаемого засвеченным пикселем сигнала в зависимости от расстояния до объекта; виден полезный сигнал на расстоянии 50 м.

На рис. 3 представлены зависимости спектральной амплитуды полезного сигнала (измеренное и рассчитанные значения) и шума на выходе приемного элемента от расстояния до объекта. Амплитуда шума зависит от расстояния до объекта вследствие имеющейся зависимости от частоты выходного сигнала, пропорциональной расстоянию до объекта. Расчет амплитуды полезного сигнала проводился с использованием основного уравнения радиолокации [1] и формулы преобразования сигнала в приемном элементе [7]. При расчете использовались указанные выше и в работе [7] параметры радиолокатора, а также дополнительно использовалось измеренное значение падающей на приемный элемент мощности опорного сигнала $4.2 \mu\text{W}$. Полученное расхождение между рассчитанным и измеренным значениями амплитуды полезного

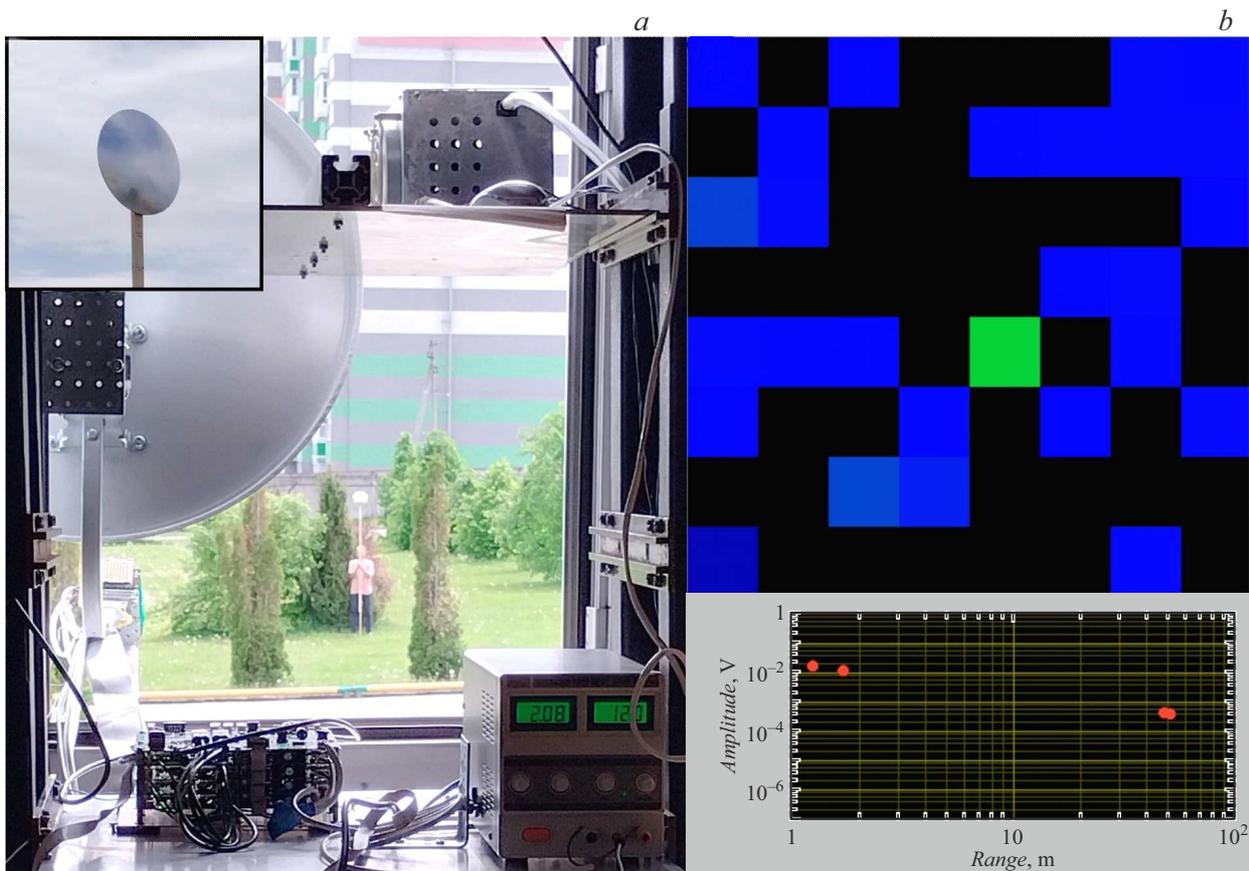


Рис. 2. *a* — фотография зондируемой области пространства при определении дальности действия радиолокационной системы. На вставке — тестовый отражатель. *b* — изображение (засвеченный пиксель) тестового отражателя, расположенного на расстоянии 50 m от радиолокационной системы (вверху), и уровень принимаемого засвеченным пикселем сигнала в зависимости от расстояния до объекта (виден полезный сигнал на расстоянии 50 m) (внизу).

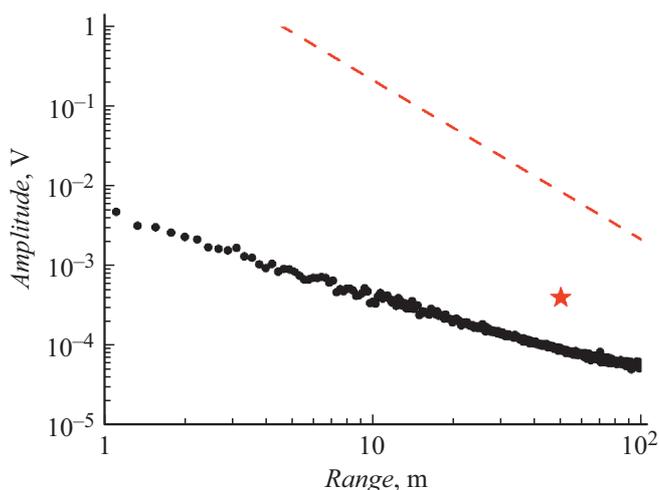


Рис. 3. Рассчитанная (штриховая линия) и измеренная (звездочка) амплитуда полезного сигнала, а также измеренная амплитуда шума (кружки) в зависимости от расстояния до объекта.

сигнала, по-видимому, обусловлено неидеальной формой зеркальной антенны, такой, что лишь малая часть площади антенны эффективно фокусирует принимаемое излучение на приемный элемент. Исходя из этого можно сделать вывод, что использование зеркального объектива с оптимизированными параметрами позволит увеличить отношение сигнал/шум более чем на порядок величины и достичь дальности действия системы более 100 m.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность использования зеркального объектива в радиолокационной системе миллиметрового диапазона с матричным приемником прямого преобразования. В качестве преимущества зеркального объектива перед линзовым можно указать наличие промышленных технологий по созданию зеркальных антенн в диапазоне сантиметровых длин волн, которые, как представляется, могут быть относительно легко адаптированы и к задачам в миллиметровом диапазоне. Тем не менее линзовые объективы могут обеспечить более компактную конфигурацию радиолокационных систем, поэтому выбор конкретного типа объектива должен определяться исходя из конкретных условий использования радиолокатора.

Благодарности

В работе использовано оборудование ЦКП ИФМ РАН „Физика и технология микро- и наноструктур“.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10029 (<https://rscf.ru/project/22-79-10029/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.I. Skolnik, *Radar handbook*, 3rd ed. (McGraw Hill, N.Y., 2008), p. 1.10–1.18.
- [2] A. Townley, P. Swirhun, D. Titz, A. Bisognin, F. Ganesello, R. Pilard, C. Luxey, A.M. Niknejad, *IEEE J. Solid-State Circuits*, **52** (5), 1245 (2017). DOI: 10.1109/JSSC.2017.2675907.
- [3] D. Del Rio, J.F. Sevillano, R. Torres, A. Irizar, P. Roux, M. Pirbazari, A. Mazzanti, J. Säily, A. Lamminen, J. de Cos, G. Freccasetti, M. Moretto, A. Pallotta, V. Ermolov, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **71** (2), 854 (2023). DOI: 10.1109/TMTT.2022.3203709
- [4] D.W. Bliss, K.W. Forsythe, in *The Thirty-Seventh Asilomar Conf. on signals, systems & computers* (IEEE, 2003), p. 54–59. DOI: 10.1109/ACSSC.2003.1291865
- [5] S. Kueppers, H. Cetinkaya, R. Herschel, N. Pohl, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **68** (6), 2124 (2020). DOI: 10.1109/TMTT.2020.2983676
- [6] С.А. Королёв, А.В. Горюнов, В.В. Паршин, *Письма в ЖТФ*, **48** (1), 47 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.01.51880.18992 [S.A. Korolyov, A.V. Goryunov, V.V. Parshin, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (1), 37 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.01.52466.18992].
- [7] S. Korolyov, A. Goryunov, I. Illarionov, V. Parshin, P. Zemlyanukha, *Sensors*, **22** (19), 7132 (2022). DOI: 10.3390/s22197132
- [8] P.F. Goldsmith, C.-T. Hsieh, G.R. Huguenin, J. Kapitzky, E.L. Moore, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **41** (10), 1664 (1993). DOI: 10.1109/22.247910
- [9] A.G. Stove, *IEE Proc. F*, **139** (5), 343 (1992). DOI: 10.1049/ip-f-2.1992.0048
- [10] 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].