

Исследование возможности получения четырёхмерного радиоизображения с помощью квазиоптического матричного радиолокатора

А.В. Зайцев, С.А. Королёв

Институт физики микроструктур РАН

Аннотация: Исследована возможность получения четырёхмерного радиоизображения с помощью квазиоптического матричного радиолокатора. В рамках используемого подхода определение угловых координат объекта осуществляется с помощью квазиоптического объектива и расположенного в его фокальной плоскости матричного приёмника. Дальность и радиальная скорость объекта определяются путём применения метода радиолокации непрерывным излучением с частотной модуляцией. Для проведения эксперимента использован ранее разработанный макет матричного радиолокатора диапазона 94 ГГц.

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

1. Введение

Использование радиолокаторов миллиметрового диапазона позволяет сочетать высокое разрешение с хорошей проникающей способностью. Однако существующие системы обычно измеряют не более трёх параметров объекта (дальность, одна угловая координата и скорость) [1]. Увеличение числа измеряемых характеристик повышает информативность и надёжность радиолокационных данных, что делает задачу получения четырёхмерных радиоизображений актуальной.

Современные радиолокаторы миллиметрового диапазона, позволяющие получать четырёхмерные радиоизображения, основаны на использовании метода множественных входов и множественных выходов (multiple input multiple output, МИМО) [2]. Такие системы могут работать в диапазоне расстояний до ~300 м (автомобильные радары) [2] и до 1 м (распознавание жестов) [3]. Метод МИМО позволяет сократить число физических приёмо-передающих элементов при сохранении относительно большого количества виртуальных, что упрощает технологию изготовления и снижает стоимость прибора по сравнению с радиолокаторами на основе фазированных антенных решёток. Тем не менее, такие радиолокаторы всё ещё недостаточно экономически эффективны для широкого внедрения.

В данной работе предлагается альтернативный подход — использование квазиоптического объектива для аналогового формирования радиоизображения по угловым координатам [4]. Распределение мощности в фокальной плоскости квазиоптического объектива соответствует распределению отражателей на сцене. Дальность и скорость измеряются методом непрерывного излучения с частотной модуляцией для каждого элемента матричного приёмника. Главное отличие от метода МИМО состоит в том, что фазовые соотношения принимаемого с разных направлений излучения учитываются аналоговым образом при прохождении через квазиоптический объектив, а не за счёт схемотехнических и программных методов. Это упрощает как аппаратную реализацию прибора, так и алгоритмы обработки сигналов.

2. Проведение эксперимента и обсуждение результатов

Метод получения трёхмерных радиоизображений (дальность и угловые координаты) с помощью квазиоптического объектива подробно описан в [5]. Генератор создает частотно-модулированный сигнал, который делится на зондирующий и опорный. Зондирующий сигнал отражается от объектов, фокусируется объективом на матричный приемник и смешивается с опорным. Из-за наличия частотной модуляции возникает сигнал разностной частоты: распределение его амплитуды по матрице дает угловые координаты объектов, а значения частот спектральных составляющих позволяет вычислить расстояние до них. При анализе сигнала на нескольких периодах модуляции возможно выделить доплеровский сдвиг частоты, и тем самым определить радиальную скорость объекта.

Таким образом, исходными данными для получения четырёхмерного 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 отсчёта. Методом двумерного быстрого преобразования Фурье (2D-FFT) по переменным m и n [6] мы получаем распределение амплитуды сигнала разностной частоты по радиальной координате R и скорости V : $U_l(R, V)$. Затем, пользуясь законами геометрической оптики, каждому элементу матрицы сопоставляются угловые координаты (азимут φ и угол места ε), что дает итоговое распределение $U(\varphi, \varepsilon, R, V)$. Для получения проекции четырёхмерного радиоизображения на требуемую координатную плоскость производится суммирование квадратов амплитуд по другим двум координатам с последующим извлечением квадратного корня.

В ходе эксперимента исследовалась область пространства с двумя объектами, взаимное расположение которых показано на рис. 1. В качестве подвижного объекта использовался сферический отражатель с эффективной площадью рассеяния 1 м^2 (объект 1); в качестве статичного 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 одинаковый угол места, но разный азимутальный угол. Четырёхмерные радиоизображения в проекции на различные плоскости представлены на рис. 2 (а) – (е). По полученным радиоизображениям можно выделить два объекта на всех изображениях, кроме рис. 2(б) (угол места – расстояние), на котором нельзя различить два объекта, поскольку объекты имеют одинаковый угол места и расстояние. При этом на рис. 2 (г) (расстояние – скорость) и 2 (д) (угол места – скорость) два объекта могут быть выделены исключительно из-за измерения скорости.



Рисунок 1. Фотография сферического отражателя (объект 1) и резьбовой шпильки (объект 2).

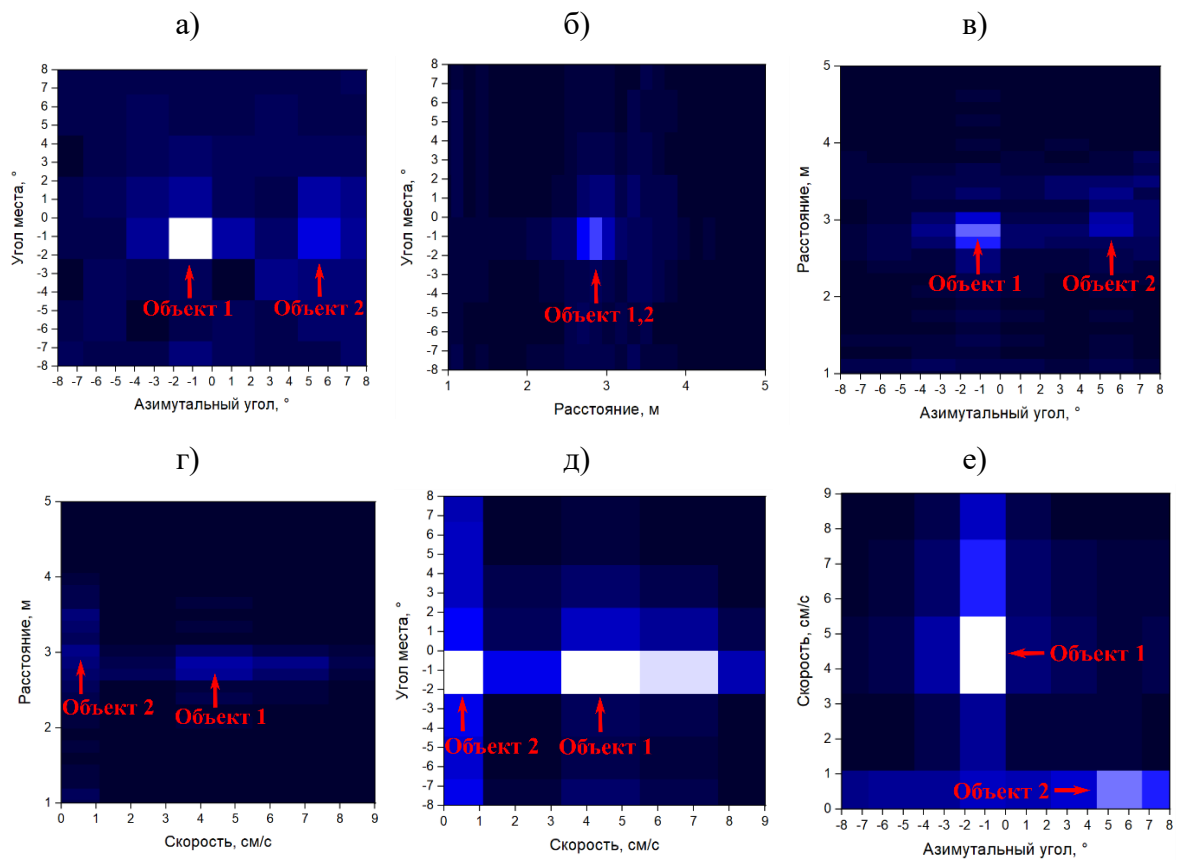


Рисунок 2. (а) – (е) Радиоизображения сферического отражателя (объект 1) и резьбовой шпильки (объект 2) в проекции на различные плоскости.

3. Заключение

Продемонстрирована возможность получения четырёхмерных радиоизображений с помощью квазиоптического матричного радиолокатора. Данная возможность расширяет функционал матричной радиолокации, позволяя получать более полную информацию о зондируемом пространстве, а также увеличивая вероятность обнаружения объектов.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-10029-П, <https://rscf.ru/project/22-79-10029-П/>. В работе использовано оборудование ЦКП ИФМ РАН "Физика и технология микро- и наноструктур".

Список литературы

1. Kim J.-C. et al. Simultaneous target classification and moving direction estimation in millimeter-wave radar system // *Sensors*. – 2021. – V. 21. – P. 5228.
2. Shi W. et al. Moving-least-squares-enhanced 3D object detection for 4D millimeter-wave radar // *Remote Sensing*. – 2025. – V. 17. – С. 1465.
3. Li Y. et al. 4-D gesture sensing using reconfigurable virtual array based on a 60-GHz FMCW MIMO radar sensor // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2022. – Т. 70. – №. 7. – P. 3652-3665.
4. Волков П. В. и др. Асферический однолинзовый объектив для систем радиовидения миллиметрового диапазона длин волн. – 2014. – Т. 84. – №. 4. – С. 120-125.
5. Korolyov S. et al. Millimeter-wave imaging system based on direct-conversion focal-plane array receiver // *Sensors*. – 2022. – V. 22. – P. 7132.
6. Winkler V. Range Doppler detection for automotive FMCW radars // *European Radar Conference*. – 2007. – P. 166-169.