

УДК 621.396.677.71+621.382.2

О ВЛИЯНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МАТРИЦЫ АКТИВНОГО РАДИОВИДЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА СТРУКТУРУ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Ю. И. Белов¹, П. В. Волков², А. В. Горюнов², И. А. Илларионов², А. Г. Серкин¹,
В. И. Шапкин²

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт;

² Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований и электромагнитного моделирования диаграмм направленности антенных элементов двумерной матрицы радиовидения 3-миллиметрового диапазона волн в активном режиме. Изображение в плоскости матрицы с размером 8×8 элементов (36×36 мм) формируется подсветкой сцены когерентным источником радиоизлучения и проецированием её с помощью асферического объектива с диаметром 100 мм. Элементы матрицы представляют собой микрополосковые антенны на основе щелевой линии, нагруженные детекторами с планарными диодами Мотта. Сигналы матрицы усиливаются операционными усилителями и обрабатываются цифровой системой с возможностью визуализации результатов на мониторе компьютера. Приводятся оценки степени взаимодействия антенных элементов в составе матрицы, полученные как на основе электромагнитного моделирования, так и с помощью измерений диаграмм направленности. Показано, что взаимодействие элементов незначительно искажает интенсивность равномерного анализируемого поля в нижней части динамического диапазона, снижая контрастность изображения и чувствительность приёмной матрицы. Несмотря на это, сделан вывод о перспективности разработки двумерных матричных структур.

ВВЕДЕНИЕ

Системы радиовидения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в последнее время интенсивно развиваются [1] в силу специфических свойств распространения волн этих диапазонов в материальных средах [2], а также совершенствования элементной базы, применяемых материалов, технологий проектирования и изготовления систем [3]. Актуальность и целесообразность разработки систем радиовидения определяется широким кругом их применения в медицине, строительстве, противодействии терроризму и других сферах.

В активных системах получения изображений излучаются электромагнитные волны миллиметрового диапазона, освещающие анализируемый объект, а приёмная решётка регистрирует амплитуду или фазу отражённых волн, обработка которых позволяет восстановить радиоизображение объекта. Поскольку в методе используется специальный источник излучения, то отношение сигнал/шум в приёмной антенне может достигать значительных величин. Однако при использовании когерентного излучателя возникают явления типа спекл-шумов (рассеяние от шероховатых поверхностей) и «блестящих точек» (интенсивные зеркальные отражения от гладких плоских поверхностей), что усложняет интерпретацию изображений и вынуждает привлекать специальные методы обработки данных для того, чтобы сделать изображение более адекватным изображению объекта в видимом или инфракрасном диапазонах. Пассивные системы радиовидения, использующие некогерентное (тепловое) излучение объектов, имеют дело с очень слабыми сигналами и, следовательно, должны обладать высокой чувствительностью и низким уровнем собственных шумов. Но при этом в пассивной системе легче интерпретировать изображение, кроме того, в ней нет специального источника, следовательно, не требуется разрешение на его применение в

санитарных и надзорных службах, и структура системы в целом проще. В конечном итоге выбор типа системы радиовидения определяется конкретными задачами, для решения которых она применяется.

Существуют, однако, два основных фактора, ограничивающих применение любых систем радиовидения: скорость сканирования картинной плоскости, в которой находится объект изучения, и скорость обработки данных. Из работы [1] следует, что большинство созданных в период 2005–2009 годов систем радиовидения миллиметрового диапазона имели механический тип сканирования пространства сцены. Это связано с тем, что механическое сканирование универсально (в отличие от альтернативного ему использования объективов (линз) для проектирования сцены на приёмную решётку) и не зависит от рабочего частотного диапазона системы радиовидения. С другой стороны, технологии создания материалов для объективов миллиметрового диапазона постоянно совершенствуются. Например, использование полиэтилена высокой плотности позволяет создавать для систем радиовидения изображающую оптику достаточно высокого качества [4]. Объектив в системе радиовидения проецирует сцену, в которой располагается анализируемый объект, на плоскость изображения. В плоскости изображения может находиться как двумерная матрица, так и линейка приёмников, которая механически сканирует двумерное изображение по координате, перпендикулярной оси линейки.

В настоящей работе описано экспериментальное и модельное исследование двумерной матрицы приёмников электромагнитного излучения в диапазоне $90\div 100$ ГГц, представляющей собой решётку из слабонаправленных микрополосковых антенн, нагруженных на отдельные низкочастотные детекторные диоды (размер решётки 8×8). Конструкция антенных элементов и результаты их исследования для различных использованных диэлектрических подложек описаны в [5, 6]. Нагрузкой детекторов служат операционные усилители, играющие одновременно и роль низкочастотных фильтров сигнала. Сигналы операционных усилителей обрабатываются цифровым блоком на базе 32-разрядного микроконтроллера AT32UC3C0512 фирмы «Atmel» и компьютера [6].

Поскольку обрабатываются интенсивности сигналов, принятых элементами матрицы, пространственная избирательность решётки (матрицы) не используется. Тем не менее, взаимодействие элементов в двумерных антенных решётках по высокой частоте (изучению которого посвящена, например, монография [7]) проявляется при анализе результатов экспериментальных исследований диаграмм направленности элементов двумерной матрицы. Взаимодействие элементов искажает их направленные свойства в составе матрицы для различных углов расположения наблюдаемых объектов сцены. Известно [7], что наиболее сильно искажаются характеристики крайних элементов в составе решётки. Аналитическими методами можно исследовать влияние элементов в составе решётки для 2 или 4 (по углам прямоугольника) элементов, а также для модели бесконечной решётки [8]. В остальных случаях предпочтительнее численные методы анализа взаимодействия и характеристик направленности антенных решёток.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование разработанной матрицы осуществлялось в безэховой камере. Измерялись амплитудные диаграммы направленности всех антенных элементов, составляющих матрицу. Двумерная матрица, показанная на рис. 1, размещалась на опорно-поворотном устройстве (ОПУ), имеющем ось вращения по азимуту и возможность независимого перемещения матрицы в горизонтальной плоскости по двум ортогональным координатам. Источником электромагнитного излучения служила слабонаправленная коническая рупорная антенна в 3-миллиметровом диапазоне длин волн, закреплённая в сканирующем в вертикальной плоскости

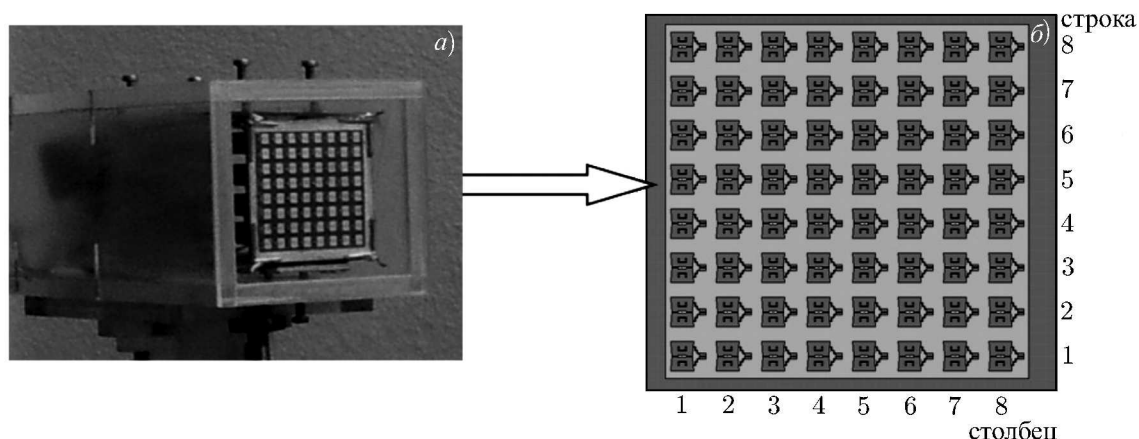


Рис. 1. Фотография матричного приёмника (а) и топология антенных элементов и их нумерация (б)

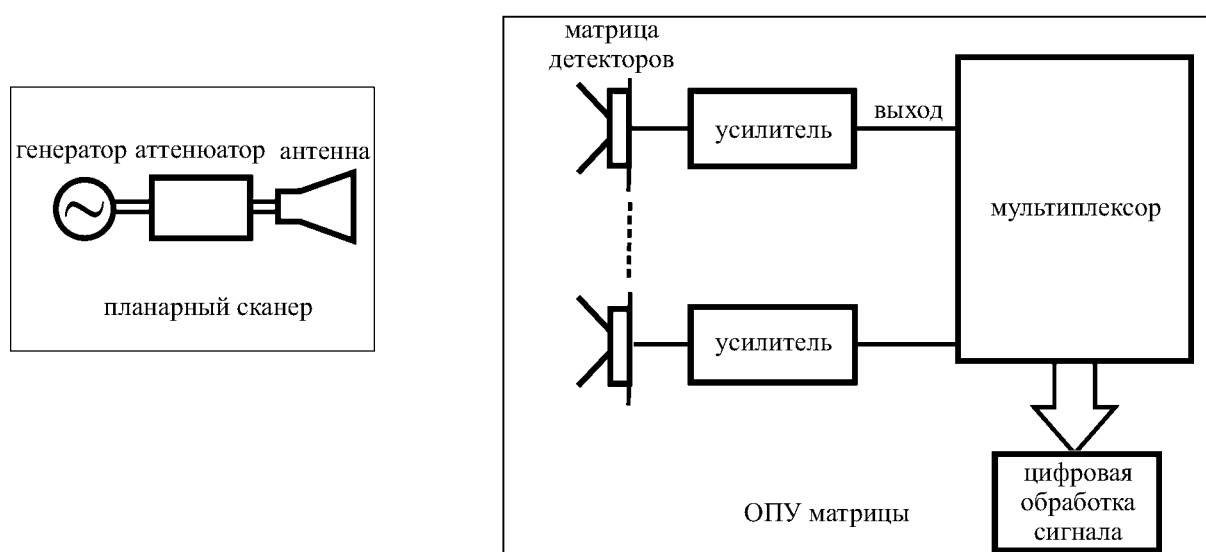


Рис. 2. Схема измерений

планарном устройстве (сканере). Рупорная антенна с помощью механизмов сканера перемещалась в плоскости, перпендикулярной её оси, с точностью позиционирования порядка 0,1 мм. С помощью юстирующего устройства матрица перемещалась в зоне её облучения рупорной антенной (рис. 2). Аналого-цифровой преобразователь обеспечивал регистрацию сигналов с элементов приёмной решётки. Сочетанием перемещений рупорной антенны в плоскости сканера и перемещений матрицы на ОПУ добивались равномерного освещения плоскости матрицы. Вертикальная ось симметрии матрицы выставлялась параллельно азимутальной оси ОПУ. При повороте ОПУ по азимутальному углу измерялись сигналы с каждого элемента матрицы в зависимости от положения ОПУ. Общие поперечные размеры матрицы примерно равны 36×36 мм, период в расположении элементов составляет около 4,5 мм (примерно $3/2$ длины волны). Расстояние от плоскости апертуры рупорной антенны до плоскости матрицы было равно 1 000 мм. Параллакс, возникающий из-за несовпадения азимутальной оси ОПУ и осей отдельных столбцов матрицы, мал, меняется от столбца к столбцу, но в данных экспериментах не учитывался, хотя может быть легко оценён.

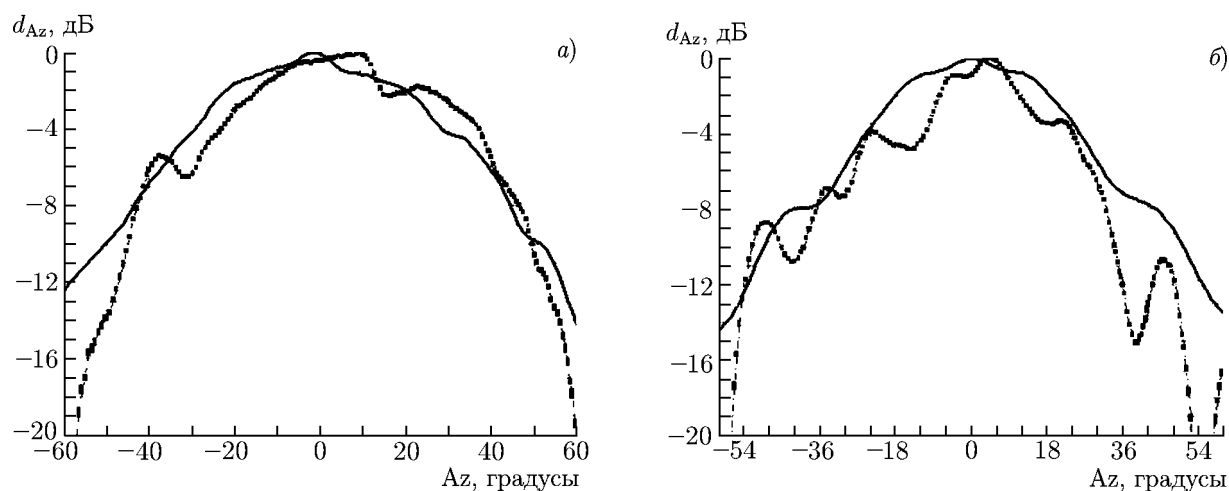


Рис. 3. Диаграмма направленности d_{Az} элемента (4,1) матрицы на частоте 94 ГГц в H -плоскости (а) и E -плоскости (б). Сплошной линией представлены результаты моделирования, точками — экспериментальные данные

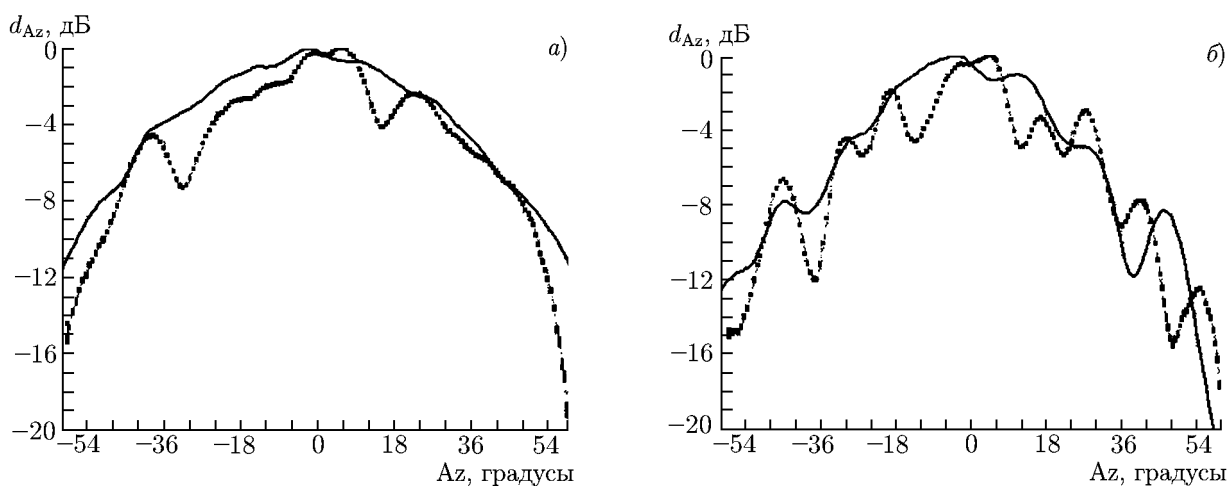


Рис. 4. Диаграмма направленности d_{Az} элемента (5,3) матрицы на частоте 94 ГГц в H -плоскости (а) и E -плоскости (б). Сплошной линией представлены результаты моделирования, точками — экспериментальные данные

Таким образом нами были получены записи 64 диаграмм направленности отдельных антенных элементов матрицы в E - и H -плоскостях (в E -плоскости лежит поле E , H -плоскость ортогональна к ней, подробнее см. [5, 6]). Для изменения плоскости поляризации принимаемого излучения матрица поворачивалась вручную с проведением всех юстировочных процедур заново. Поскольку антенный элемент матрицы представлял собой отрезок щелевой линии [6], выбор названия E - и H -сечений диаграмм направленности был привязан к положению эквивалентного магнитного тока, описывающего возбуждение антенного элемента. На рис. 3 и 4 приведены полученные экспериментально диаграммы направленности в E - и H -плоскостях центральных и крайних элементов на частоте 94 ГГц (нумерация матричного типа элементов решётки приведена на рис. 1). Также на рисунках приведены диаграммы направленности, полученные в среде трёхмерного электромагнитного моделирования CST MS, использующей метод конечных интегралов. Экспериментальные диаграммы направленности имеют более изрезанный характер по сравнению с рассчитанными, амплитуда осцилляций достигает 1,5 дБ в угловой области $(-20^\circ, 20^\circ)$ и увели-

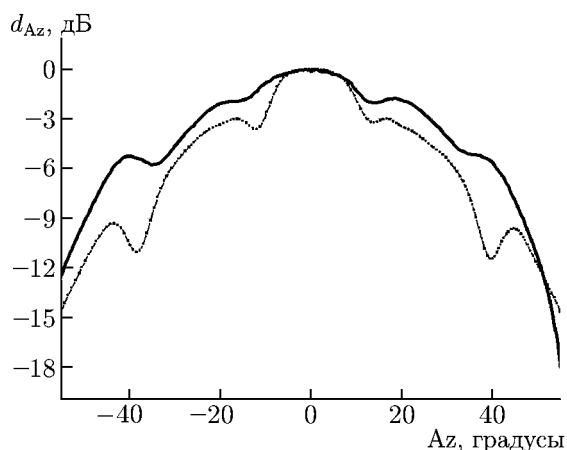


Рис. 5. Средние по всем реализациям диаграммы направленности d_{Az} в E -плоскости (линия с точками) и H -плоскости (толстая линия) на частоте 94 ГГц

в составе решёток, высказывались в работе [7] с позиции возникновения поверхностных волн, возбуждающих соседние с активным элементы антенной решётки. Качественно влияние окружения отдельно возбуждённого элемента можно также объяснить наличием условного импедансного «фланца», составляющего апертуру решётки [9]. Период осцилляций в угловой области $\Delta A_{\text{осц}}$ на рис. 3 и 4 при этом объяснении должен соответствовать размерам «фланца», равным $D_x \times D_y = 36 \times 36$ мм, исходя из оценки $\Delta A_{\text{осц}} \sim \lambda/D_{x,y}$, где λ — длина волны, D_x и D_y — размеры антенной решётки. Наличие осцилляций в угловой области приводит к заметному обужению диаграммы направленности элементов по половинному уровню мощности в составе решётки. Как показывает анализ данных моделирования излучения одиночного элемента решётки, совпадение ширины диаграммы направленности с шириной диаграммы направленности одиночного элемента наблюдается только для угловых элементов.

На рис. 5 приведены диаграммы направленности, полученные усреднением диаграмм направленности всех элементов. Средние значения ширины диаграммы направленности в H -плоскости составляют 50° , в E -плоскости — 33° .

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Известно [7], что окружение одиночного возбуждённого элемента в антенной решётке пассивными элементами сужает его диаграмму направленности и увеличивает парциальный коэффициент усиления в степени, зависящей от расстояния между элементами. Потери энергии в таком элементе определяются суммой квадратов коэффициентов взаимных связей активного элемента с пассивными [8]. В исследуемой двумерной матрице антенных элементов все элементы при их облучении нагружены детекторными приёмниками, т. е. активны с позиции рассмотрения элементов решётки как «передающих». В этом случае потери в каждом активном элементе определяются суммой комплексных амплитуд напряжений, возникающих как результат взаимодействия некоторого выделенного элемента со всеми элементами решётки. Таким образом, задача моделирования взаимодействия решётки с размером 8×8 элементов становится достаточно затратной по времени расчётов.

Исходя из сделанных выше допущений, с помощью программного обеспечения CST Microwave

чивается вне этой области. Отклонение формы диаграммы направленности от «гладкой» наблюдается и для рассчитанных диаграмм, однако в этом случае амплитуда осцилляций составляет около 0,3 дБ, что меньше примерно в 5 раз. Характерные периоды осцилляций варьируются от 10° до 40° . Подобная форма экспериментальных диаграмм направленности показывает наличие сильного взаимодействия элементов в составе решётки. Заметим, что в модельных расчётах возбуждённым являлся один элемент решётки, тогда как в эксперименте все элементы возбуждались одновременно, что объясняет существенные отличия в амплитудах осцилляций диаграмм направленности в расчётах и эксперименте.

Некоторые соображения, касающиеся измеряемых форм диаграмм направленности элементов

Studio была создана модель для расчётов коэффициентов взаимной связи S_{21} и коэффициентов отражения S_{11} отдельно возбуждённого элемента в составе матрицы антенн, нагруженных на диоды, с размерами 8×8 . Согласование диодов и импедансов антенн считалось одинаковым, как в случае изолированных антенных элементов [5].

Если размеры решётки позволяют считать её достаточно большой, то можно использовать для оценок коэффициентов взаимодействия при полном возбуждении элементов теорию бесконечной решётки. Тогда с помощью выражения для коэффициента потерь «бесконечной» решётки [8] (см. ниже) можно связать наблюдаемые в эксперименте параметры (искажения диаграммы направленности изолированного антенного элемента, т. е. находящегося вне матрицы) с характеристиками взаимодействия антенных элементов в матрице.

Для падения плоской электромагнитной волны на антенную решётку вдоль нормали к плоскости матрицы (синфазное возбуждение) относительная мощность потерь в элементе определяется (в приближении бесконечной решётки) модулем суммы комплексных коэффициентов взаимной связи $S_{21}(m, n) = C_{mn} \exp(i\Psi_{mn})$, характеризующих потери в избранном элементе решётки с номером (m, n) за счёт взаимодействия с другими элементами [8]:

$$|R_a|^2 = \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{mn} \exp(i\Psi_{mn}) \right|. \quad (1)$$

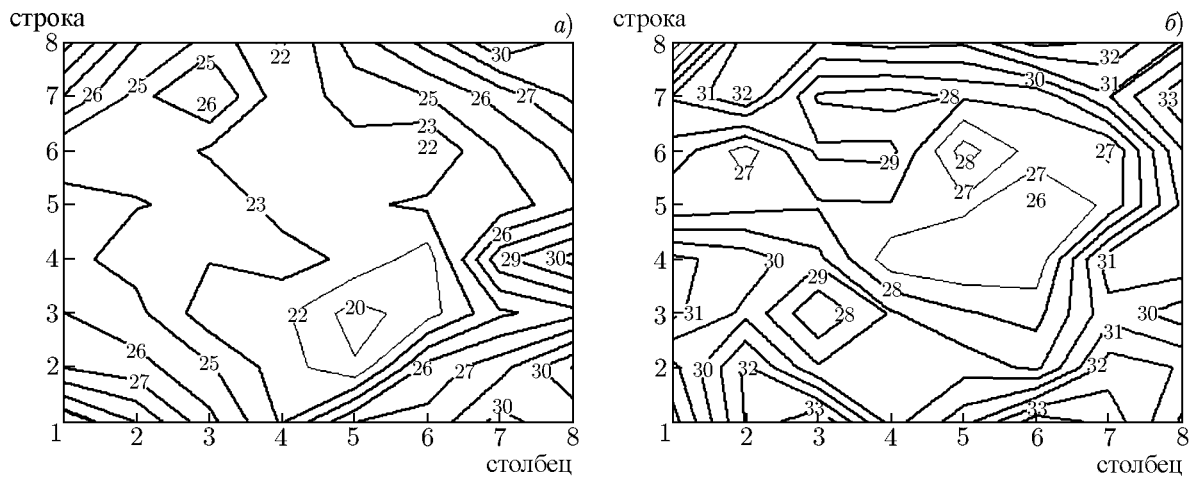
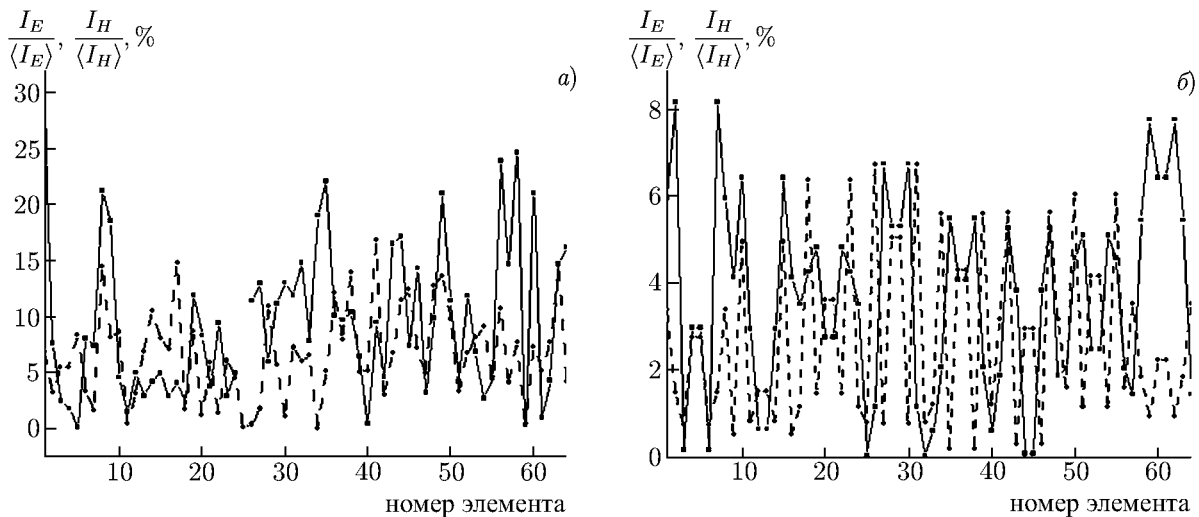
Здесь M и N — количество элементов в ряду и столбце решётки соответственно (8 и 8 в нашем эксперименте). Используя неравенство Коши—Буняковского [10] для оценки величины потерь сверху, получим, что

$$|R_a|^2 \leq MN \sum_m \sum_n C_{mn}^2 = MN |R_S|^2 \approx (MN)^2 \langle C_{mn} \rangle^2, \quad (2)$$

где $\langle C_{mn} \rangle$ — среднее значение модуля коэффициента связи для распределения значений коэффициентов связи в интервале от минимального до максимального значений. Величина $|R_S|$ в (2) характеризует потери в бесконечной решётке при возбуждении только одного элемента и согласованных остальных элементов. По результатам моделирования модуль коэффициента связи на частоте 94 ГГц не превышает величины порядка -40 дБ, а минимальное значение порядка -90 дБ.

Поскольку количество сильно взаимодействующих элементов вокруг центрального (как это принято при анализе модели бесконечно большой решётки) убывает обратно пропорционально расстоянию до взаимодействующего элемента [7], то, сформировав гистограмму распределения коэффициента связи в диапазоне его значений, можно получить среднее значение $\langle C_{mn} \rangle \approx 0,0016$. Из (2) следует, что величина $|R_a| \approx 10\%$, а величина $|R_S|$, соответственно, в 8 раз меньше: $|R_S| \approx 1,25\%$, что довольно близко к результатам моделирования связей при условии возбуждения одного элемента: $3,5\%$. Эти значения весьма приблизительны, т. к. исследуемая решётка имеет конечный размер 8×8 элементов, а гипотеза бесконечной решётки работает, согласно эмпирическому правилу, приведённому в [7], для размеров больше или порядка 20×20 элементов. Тем не менее, сделанные оценки позволяют выявить значимость электромагнитного взаимодействия элементов матрицы.

Периоды осцилляций в распределениях направленности элементов, которые наблюдаются как в экспериментальных, так и в расчетных данных, соответствуют пространственным масштабам между интенсивно взаимодействующими элементами, сравнимым с линейными размерами двумерной матрицы.

Рис. 6. Распределения величин I_E (а) и I_H (б) по элементам решёткиРис. 7. Обработка экспериментальных данных (а), обработка данных моделирования (б). Сплошная линия соответствует величине $I_E / \langle I_E \rangle$, пунктирная — $I_H / \langle I_H \rangle$

Очевидно, что из-за конечного пространственного разрешения антенн матрицы, связанного с конечным размером каждого элемента, правильнее учитывать интегральное распределение направленности элемента, определяемое его геометрической площадью $3\lambda/2 \times 3\lambda/2$. Тогда необходимо вычислить интегралы

$$I_E = \int_{-Az_{\min}}^{Az_{\max}} [DN_E(Az)]^2 dAz, \quad I_H = \int_{-Az_{\min}}^{Az_{\max}} [DN_H(Az)]^2 dAz,$$

где $DN_H(Az)$ и $DN_E(Az)$ — экспериментальные или рассчитанные диаграммы направленности элементов в E - и H -плоскостях, Az — азимутальный угол. Интервал интегрирования $Az_{\min} \div Az_{\max}$ был выбран исходя из равенства эффективной площади антенны её геометрической площади: $Az_{\min} = -20^\circ$, $Az_{\max} = 20^\circ$. Величины I_E , I_H характеризуют разброс интенсивностей, регистрируемых в элементах матрицы при их равномерном освещении. Они обратно пропорциональны

коэффициенту направленного действия (КНД) антенны относительно выделенного телесного угла (или главного лепестка) в E - и H -плоскостях в направлении главного максимума [11]:

$$\text{КНД} \propto 4\pi \left/ \left(\int_{-Az_{\min}}^{Az_{\max}} |DN_E(Az)|^2 dAz \int_{-Az_{\min}}^{Az_{\max}} |DN_H(Az)|^2 dAz \right) \right.$$

На рис. 6 представлены распределения величин I_E и I_H по элементам решётки (контурные графики), полученные путём обработки экспериментальных данных. На рис. 7 приведены относительные отклонения величин I_E и I_H от средних значений $\langle I_E \rangle$, $\langle I_H \rangle$ для экспериментальных данных и для данных моделирования. Как видно из рис. 7, характер зависимостей величин I_E , I_H от номера элемента решётки для рассчитанных и экспериментальных диаграмм направленности один и тот же. Однако отличаются максимальные отклонения величин I_E , I_H от средних значений. Размах предельных отклонений составляет примерно 30 % для экспериментальных данных при возбуждении всех элементов решётки и 8 % для данных моделирования. Важно отметить, что данные моделирования получены при условии возбуждения только одного элемента матрицы. Полученные экспериментальные предельные значения отклонений распределения направленности (диаграмм) определяют среднеквадратические отклонения (СКО) сигналов в элементах матрицы, которые ограничивают динамический диапазон интенсивностей регистрируемых изображений снизу. Поскольку отклонения потока энергии, регистрируемые в элементе, зависят не только от взаимных связей, но и от согласования нагрузки (диода) с антенным элементом, разброса характеристик диодов и т. д., то можно считать распределение отклонений близким к нормальному и полагать, что среднеквадратическое отклонение экспериментальных распределений направленности элементов составляет величину порядка 10 %.

Если сравнить теперь оценки коэффициента потерь элемента ($|R_a| \approx 10\%$), полученные из математического моделирования и гипотезы бесконечной решётки, с максимальными и среднеквадратическими отклонениями распределений направленности элементов, можно принять электродинамическое взаимодействие элементов в решётке в качестве причины искажения диаграмм направленности отдельных элементов.

Уровень связей определяется конструкцией элементов решётки, её топологией и является предметом дальнейших исследований. Взаимодействие элементов в E -плоскости сильнее, чем в H -плоскости, что связано с геометрией использованных модифицированных щелевых элементов в решётке [6].

3. РАЗМЕР МАТРИЦЫ, ВЛИЯНИЕ ОБЪЕКТИВА, ДИСКРЕТИЗАЦИЯ СИГНАЛА И ТЕМП ВЫБОРКИ СИГНАЛОВ

Очевидно, что размер матрицы 8×8 часто является недостаточным для идентификации формы обнаруженного с помощью системы радиовидения скрытого объекта в наблюдаемой сцене. Существенную роль в реализации матрицы с большим числом антенных элементов играет поперечный размер сечения элемента в плоскости анализа изображения. В частности, в работе [1] описана антенна микрополоскового типа, поперечные размеры которой составляют $3,7 \times 16$ мм. Из таких элементов была собрана приёмная матрица 10×4 , позволяющая сканировать изображение с помощью линзы с диаметром 200 мм на площадке 40×40 пикселей за достаточно длительное время 10 мин. Данная система является пассивной, содержит малошумящие усилители на входах элементов с флуктуационным порогом 1 К при усреднении за время 10 мс.

Поскольку оптическая система миллиметрового диапазона собирает изображение объекта в область с линейным размером порядка длины волны, то увеличение числа пикселей в приём-

ной матрице будет увеличивать её поперечный размер. Если при этом не изменять фокусное расстояние оптической системы, а увеличивать её апертуру, то угловое поле системы будет увеличиваться, но будут расти и абберрационные искажения. Применение полимерных материалов для изготовления оптических элементов в миллиметровом диапазоне, с одной стороны, позволяет достаточно просто создавать поверхности с асферическим профилем, но, с другой стороны, сильно усложняет производство многоэлементных систем, поскольку приходится ограничиваться одной или двумя линзами. Однако применение асферической оптики позволяет достаточно хорошо скомпенсировать сферические aberrации объектива. Поскольку для одиночной линзы, как правило, достаточно хорошо выполняется условие синусов Аббе, то и первичная кома оказывается достаточно слабой в области не очень больших углов. Определяющей aberrацией для объектива из одного или двух элементов будет кривизна поля.

Оценим максимальный размер матрицы, ограниченный кривизной поля. Известно, что радиус поверхности Петцваля r_p для одиночной линзы в области малых углов определяется выражением $r_p = nf$, где n — показатель преломления линзы, f — её фокусное расстояние [12]. Тогда максимальное расстояние от оптической оси (полуширину матрицы), при котором величина сдвига точки фокусировки от параксиальной фокальной плоскости будет равна длине фокальной перетяжки, можно оценить по формуле $h_{\max} = \sqrt{2nfz_w}$, где z_w — длина фокальной перетяжки. Воспользуемся гауссовым приближением для длины z_w : $z_w = \pi w_0^2/\lambda$, где w_0 — полуширина пучка в перетяжке, λ — длина волны. При этом можно принять, что полуширина $w_0 = d/2$, где d — линейный размер пиксела. Также предположим, что объектив имеет светосилу порядка 1 : 1, т. е. $D = f$, где D — диаметр линзы. В результате для $d = 4,5$ мм, $\lambda = 3$ мм получим $h_{\max} \approx \approx 4 \sqrt{D[\text{мм}]}$. Таким образом, для линзы с апертурой 100 мм максимальный линейный размер матрицы составит около 80 мм. Следовательно, применение линзы с таким диаметром потенциально позволяет использовать матрицу с вдвое большим линейным размером (вчетверо большей площадью). Этого уже достаточно для некоторых задач обнаружения и идентификации объектов с учётом приведённых выше замечаний, касающихся обработки изображения. При этом, поскольку технологических ограничений на изготовление линзы большего диаметра нет, то, как следует из проведённых оценок, размер матрицы также может быть увеличен.

Цифровая система обработки (см. блок-схему на рис. 1) состоит из 64 усилителей сигналов с детекторов с коэффициентами усиления около 1000, аналоговых мультиплексоров, обеспечивающих построчный вывод усиленных сигналов на аналого-цифровой преобразователь, цифрового блока на базе 32-разрядного микроконтроллера AT32UC3C0512 фирмы «Atmel» и электронной вычислительной машины, соединённой с цифровым блоком по каналу USB. Используемый микроконтроллер имеет в своем составе 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь с мультиплексором на 8 дифференциальных каналов и контроллер канала USB [13].

Программное обеспечение микроконтроллера в кадровом режиме управляет построчной выдачей сигналов двумерной матрицы на мультиплексор аналого-цифрового преобразователя, осуществляет измерение всех 64 сигналов матрицы, усреднение их по заданному числу каналов и передачу данных в ЭВМ. Программное обеспечение ЭВМ выдаёт необходимые команды на цифровой блок и визуализирует данные как в виде графиков по каждому из 64 сигналов, так и в виде 64-пиксельной матрицы с яркостной составляющей. Оно также позволяет проводить поканальную калибровку усиления и нуля детекторов, учитывать результаты калибровки при визуализации или анализе данных и получать математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение для выбранного канала. Также обеспечивается возможность установки верхнего и нижнего пределов визуализации как эквивалент регулировки яркости и контрастности изображения. Программное обеспечение микроконтроллера потенциально легко изменяется для обслуживания $9 \times 64 = 576$ каналов (т. е. 9 матриц, описанных в работе).

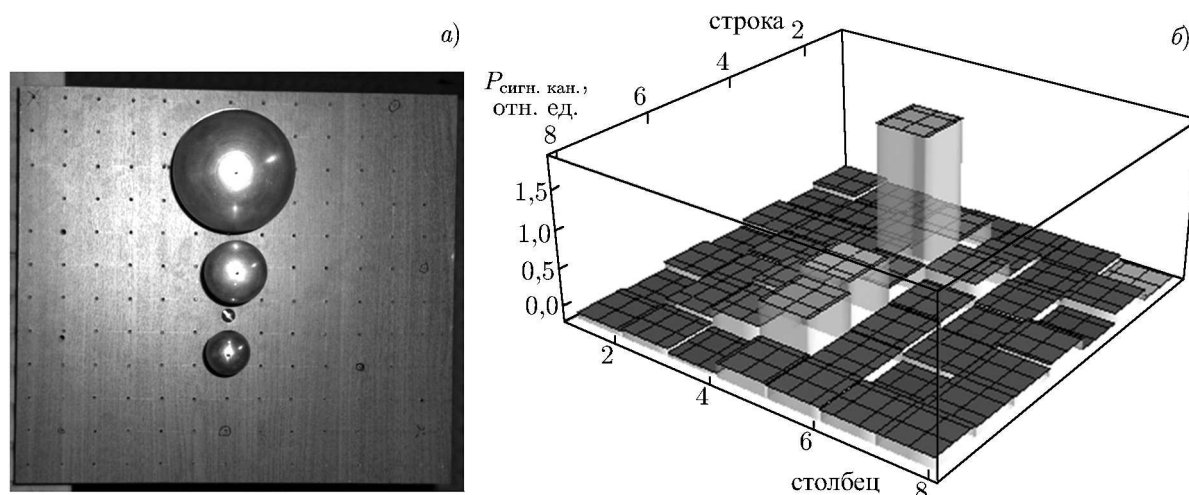


Рис. 8. Фотография сферических объектов (а) и полученное изображение (б)

Достигнутая скорость работы системы составляет около 50 кадров в секунду при визуализации данных и около 250 кадров в секунду без визуализации. Очевидно, что шум квантования сигнала по уровню $P_{\text{шум кв.}}$, создаваемый аналого-цифровым преобразователем, незначителен [14]: $P_{\text{шум кв.}} = P_{\text{сигн. кан.}} / (2^M \cdot 12)$, где $M = 12$ — число разрядов, $P_{\text{сигн. кан.}}$ — уровень сигнала в канале.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПРОВОДЯЩИМИ СФЕРАМИ

В заключение для иллюстрации возможностей системы радиовидения приведём фотографию набора сферических объектов (диаметры 100; 50 и 36 мм) и их изображения, полученные с помощью описываемой матрицы. Как видно из рис. 8, изображение сферы — это один засвеченный пиксел матрицы, т. к. идеально проводящая сфера — это изотропно рассеивающий объект, а источник, использованный в качестве подсветки, является когерентным. Наблюдаемые уровни сигналов пропорциональны разным значениям эффективной площади рассеяния используемых сфер. В гистограмме изображаемых объектов эффекты взаимодействия и расположения элементов создают незначительные ложные отклики. Следует отметить, что интенсивность ложных откликов при другой геометрии расположения сфер и изменении их диаметров может увеличиваться. В целом картина радиоизображения удовлетворительно идентифицирует объекты, наблюдаемые в видеоизображении.

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты экспериментов и моделирования влияния взаимодействия элементов в матрице активной системы радиовидения миллиметрового диапазона, которая представляет собой набор приёмных микрополосковых антенн, нагруженных на низкобарьерные диоды Мотта. Детектированные и усиленные операционными усилителями сигналы матрицы обрабатываются цифровой системой, могут быть визуализированы на экране монитора с помощью компьютера.

Установлено, что электромагнитное взаимодействие антенных элементов незначительно искажает интенсивность равномерного анализируемого поля в области низкого потока излучения, что снижает контрастность изображения и чувствительность приёмной матрицы. Изменение тополо-

гии элементов элементарных антенн или их конструкции позволит уменьшить исследованные эффекты влияния.

Размер матрицы может быть увеличен примерно в 2 раза с использованием уже созданного объектива. Разработка объектива с большим диаметром позволит существенно улучшить идентификацию радиоизображения анализируемых объектов с их оптическим или инфракрасным изображениями.

На основании этих результатов можно сделать вывод о перспективности разработки двумерных приёмных матриц радиовидения в миллиметровом диапазоне.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 12-02-12006-офи_м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sato M., Mizuno K. // Microwave and millimeter wave technologies from photonic bandgap devices to antenna and applications. InTech Europe, 2010. P. 331.
2. Appleby R. // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. 2004. V. 362. P. 379.
3. Oka S., Togo H., Kukutsu N., Nagatsuma T. // Progr. Electromagn. Res. Lett. 2008. V. 1. P. 197.
4. Lo Y. H., Leonhardt R. // Opt. Express. 2008. V. 16, No. 20. P. 15 991.
5. Шашкин В. И., Дрягин Ю. А., Закамов В. Р. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 12. С. 1077.
6. Закамов В. Р., Кукин Л. М., Кривов С. В., Шашкин В. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 10. С. 864.
7. Сканирующие антенные системы СВЧ. Т. 2. М.: Сов. радио, 1969. 496 с.
8. Амитей Н., Галиндо В., Ву Ч. Теория и анализ фазированных антенных решёток. М.: Мир, 1974. 456 с.
9. Белов Ю. И., Варенцов Е. Л., Илларионов И. А. // Антенны. 2009. Вып. 12. С. 18.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1984. 832 с.
11. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 с.
12. Шрёдер Г., Трайбер Х. Техническая оптика. М.: Техносфера, 2006. С. 81.
13. Белов Ю. И., Волков П. В., Горюнов А. В. и др. // Тез. докл. Международной научно-техн. конф. «Информационные системы и технологии (ИСТ-2013)», 19 апреля 2013 г., Нижний Новгород.
14. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. М.: Сов. радио, 1969. 752 с.

Поступила в редакцию 7 мая 2013 г.; принята в печать 30 сентября 2013 г.

ON THE IMPACT OF INTERACTION BETWEEN THE MATRIX ELEMENTS IN THE 3-MM WAVE ACTIVE RADIOVISION SYSTEM ON THE OBJECT IMAGE STRUCTURE

Yu. I. Belov, P. V. Volkov, A. V. Goryunov, I. A. Illarionov, A. G. Serkin, and V. I. Shashkin

We consider the results of experimental study and electromagnetic simulation of the radiation pattern of antenna elements of a 2D matrix in the 3-mm wave radiovision system operated in active mode. An image in the plane of a 8×8 element (36×36 mm) matrix is formed by highlighting the scene using a coherent source of radio waves and projecting it with an aspheric lens of 100 mm in diameter.

The matrix elements are printed antennas based on the microstrip slots loaded by detectors with planar Mott diodes. The matrix signals are amplified by operational amplifiers and are processed by a digital system that is able to visualize the data on a PC display. Estimates of the level of interaction between the antenna elements constituting the matrix obtained by electromagnetic simulation as well as by measuring the radiation pattern are presented. It is shown that although the interaction of the matrix elements slightly distorts the intensity of the analyzed uniform electromagnetic field in the lower part of the dynamic range, and therefore reduces the image contrast and the sensitivity of the reception matrix, a conclusion on good prospects for the 2D matrix development has been made.