

Асферический однолинзовый объектив для систем радиовидения миллиметрового диапазона длин волн

© П.В. Волков,¹ Ю.И. Белов,² А.В. Горюнов,¹ И.А. Илларионов,¹ А.Г. Серкин,² В.И. Шашкин¹

¹ Институт физики микроструктур РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия

² Научно-исследовательский радиофизический институт,
Нижний Новгород, Россия
e-mail: volkov@ipmras.ru

(Поступило в Редакцию 20 июня 2013 г.)

Представлены характеристики созданной системы формирования видеоизображения объектов в диапазоне длин волн 3-мм. Описана процедура расчета и приведены характеристики разработанного и исследованного асферического однолинзового объектива для формирования изображения — функции рассеяния точки, разрешения, поля зрения. В плоскости изображения детектирование сигналов осуществлено матрицей 8×8 антенных элементов, нагруженных детекторами. Регистрация, управление, ввод–вывод электрических сигналов, формирующих изображение, осуществлены цифровым блоком обработки, параметры которого — скорость обработки и передачи данных — приведены. Проведены пробные эксперименты по получению изображений простых предметов (одной и нескольких металлических сфер разного диаметра) в активном радиолокационном режиме с использованием разработанной системы на монохроматическом сигнале.

Введение

В настоящее время наблюдается большой интерес к разработке и созданию систем получения изображения в миллиметровом (ММ) диапазоне длин волн (систем радиовидения). Причем наибольшая активность наблюдается в области решения задач, связанных с противодействием терроризму. Одной из основных причин этому является тот факт, что большое количество материалов, используемых в быту (ткань, пластик и др.), оказываются прозрачными для ММ-волн, что позволяет решить задачу обнаружения оружия и взрывчатых веществ под одеждой и в багаже в аэропортах и других общественных местах, а также обнаружения закладок и посторонних вложений в различных предметах, например, в обуви, почтовых отправлениях [1].

Поскольку в обозначенных выше задачах в первую очередь речь идет о системах непрерывного наблюдения, то скорость получения изображения становится одним из ключевых параметров. С точки зрения удобства использования, а также интегрирования ММ-систем видения в существующие системы видеонаблюдения оптимальной является конструкция с использованием рефракционной оптики (объектива), переносящей наблюдаемую сцену на плоскость изображения. Изначально такие системы строились на базе одиночного детектора, сканирующего плоскость изображения [2]. Очевидно, что такой подход сравним по своим характеристикам со сканированием пространства антенной и не позволяет получить заметный выигрыш по времени получения кадра изображения. Предпринимались попытки создать квазидвумерную приемную систему с одноэлементным приемником, в котором сканирование по пространству осуществлялось за счет набора амплитудных масок пе-

ред объективом [3,4]. Однако данные системы получаются сложными с точки зрения их технической реализации и практически не пригодными для реальных применений. Наибольшие успехи были достигнуты при использовании многоканальных приемников — линсек детекторов с одномерным сканированием. Использование линсек не позволяет полностью избавиться от механического сканирования. Тем не менее уже при таком подходе выигрыш в частоте получаемых кадров изображения составляет не менее N раз для кадра размерностью $N \times N$ точек. К тому же сканирование осуществляется только по одной координате, что значительно упрощает конструкцию сканера. Причем есть варианты конструкций как с перемещающейся линейкой, так и с поворотным зеркалом. Примеры построения систем радиовидения с линейкой детекторов и однокоординатным сканером приведены в работах [5,6]. Но наиболее перспективными на наш взгляд выглядят системы с матричными приемниками, в которых полностью отсутствует механическое сканирование [7]. Такие системы являются наиболее близкими к классическим видеокамерам в смысле идеологии их построения и потенциально позволяют получить максимальное быстродействие, ограниченное только скоростью электрической коммутации каналов и чувствительностью.

В настоящей работе приведены результаты исследований оптических характеристик созданного макета системы ММ-видения с асферической линзой — объективом, позволяющим получать безаберрационное изображение во всем рабочем поле и проводить его анализ с помощью двумерного матричного детекторного приемника размерностью 8×8 , интегрированного с высокоскоростной системой цифровой обработки сигналов.

Описание системы

Схема созданной системы приведена на рис. 1. Объектив представлял собой линзу, выполненную из полиэтилена высокой плотности с двумя асферическими поверхностями. В плоскости изображения объектива устанавливалась созданная матрица детекторов размерностью 8×8 , подключенная через малошумящие усилители к цифровому блоку сбора и обработки информации. В качестве приемных элементов в матрице использовались планарные детекторы на основе модифицированных щелевых антенн с непосредственно включенными в них низкочастотными диодами Мотта на основе структуры Al/GaAs с δ -легированным слоем вблизи контакта [8,9].

Характеристики приемных элементов матрицы, такие как NEP и диаграмма направленности, приведены в работе [10]. В ней показано, что достигнутые характеристики достаточны для построения непосредственно системы видения. При этом необходимо было разработать оптическую систему, переносящую изображение сцены на матрицу.

Для формирования изображения было принято решение создать рефракционную оптическую систему. Основным достоинством таких систем является отсутствие излома оптической оси, что сильно упрощает их конструкцию и юстировку. Поскольку межпиксельное расстояние в создаваемой матрице порядка длины волны или несколько больше, то объектив должен быть хорошо скомпенсирован на аберрации, причем для достаточно большого углового поля в пространстве изображений. В оптике видимого диапазона подобные проблемы решаются, как правило, использованием многоэлементных объективов. Однако для ММ-диапазона создание объектива, состоящего из большего количества линз, затруднительно. Во-первых, это связано с наличием заметного поглощения в материалах (как правило, полимерах) [11], применяемых для создания оптических элементов в этом диапазоне, во-вторых, с достаточно большими габаритами отдельных элементов данного диапазона длин волн.

Исходными параметрами для расчета объектива были выбраны следующие:

1. Диаметр линз не более 100 мм определялся исходя из компактности габаритов создаваемого макета.
2. Толщина линзы менее 40 мм.
3. Разрешение (линейный размер площадки, отображаемой в один пиксел) — не более 40 мм при расстоянии до объекта 1 м. Данная величина выбиралась исходя из того, что в задачах обнаружения скрытых предметов в первую очередь речь идет о терминальных приложениях с расстоянием до объекта в единицы метров. При этом для активных систем с когерентной подсветкой вид радиоизображения, как правило, не соответствует его изображению в видимом диапазоне, а основная задача заключается в определении факта наличия постороннего предмета и места его расположения в контролируемом объеме.

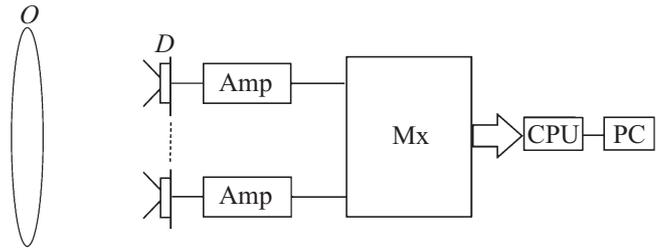


Рис. 1. Общая схема системы. O — объектив, D — матрица детекторов, Amp — малошумящие усилители, Mx — мультиплексор каналов, CPU — цифровой блок обработки, PC — персональный компьютер.

4. Поле изображения (линейные размеры матрицы) 36×36 мм.

5. Межпиксельное расстояние 4.5 мм.

6. Количество пикселей 8×8 .

7. Рабочий диапазон 90–100 GHz. Определялся как рабочая полоса приема детекторов матрицы.

Параметры 4–6 определялись конструкцией уже разработанной матрицы [10]. Фокусное расстояние объектива выбиралось, исходя из заданных выше параметров. Известно, что радиус первого темного кольца дифракционно ограниченного объектива ρ_{diff} в фокальной плоскости при бесконечно удаленном объекте составляет [12]

$$\rho_{\text{diff}} = 1.22 \frac{\lambda}{D} f, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения, D — диаметр входного зрачка объектива (для одиночной линзы — диаметр линзы), f — его фокусное расстояние. Оптимальной по критерию контраста будет ситуация, когда первое темное кольцо будет попадать на соседний с основным пиксел, т.е. $\rho_{\text{diff}} \approx 4\text{--}5$ мм. Используя (1), легко получить, что оптимальное фокусное расстояние при диаметре линзы 100 мм составляет 100–140 мм. Отсюда можно рассчитать, что при $f = 100$ мм и при расстоянии $b = 1$ м до объекта линейное увеличение $M = (b - f)/f$ составит $M \approx 9$, что соответствует линейному разрешению сцены около 40 мм. Таким образом, в качестве целевого значения фокусного расстояния была выбрана величина $f = 100$ мм.

Оценим возможность использования в предлагаемой системе ММ-видения одиночной линзы для построения изображения с точки зрения возможности компенсации аберраций до приемлемого уровня. В качестве материала будем рассматривать полиэтилен высокой плотности. Основными его достоинствами являются сравнительно небольшое поглощение, простота обработки и малая дисперсия диэлектрической проницаемости в рабочем диапазоне частот [13], что позволяет не учитывать хроматические искажения изображения. В рамках теории аберраций третьего порядка Зайделя [14] выделяются пять монохроматических аберраций: сферическая аберрация, меридиональная кома, кривизна поля изображе-

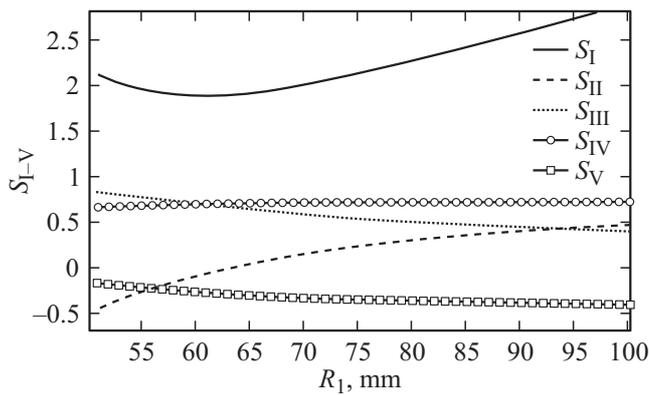


Рис. 2. Суммы Зайделя для различных значений радиуса кривизны первой поверхности при фиксированном фокусном расстоянии.

ния, астигматизм и дисторсия, которые определяются соответствующими суммами Зайделя S_{I-V} , вычисляемыми через параметры системы. Методы расчета сумм Зайделя подробно описаны (см., например, [14]). Поскольку фокусное расстояние и толщина линзы нами заданы, то радиусы кривизны поверхностей линзы $r_{1,2}$ связаны через известное выражение для толстой линзы

$$1/f = (n-1)(1/r_1 - 1/r_2) + (n-1)^2 d / (nr_1 r_2), \quad (2)$$

где n — показатель преломления материала линзы, f — ее фокусное расстояние, d — толщина. С другой стороны, если определены диаметр и толщина линзы, то существует конструктивное ограничение снизу на радиус кривизны одной поверхности. В нашем случае радиус кривизны не может быть меньше 50 мм. Поскольку увеличение системы достаточно велико, то оценку абберационных свойств удобнее всего сделать для объекта, находящегося в бесконечности. На рис. 2 приведены графики значений сумм Зайделя S_{I-V}^∞ , рассчитанных при общепринятых условиях нормировки вспомогательных лучей для бесконечно удаленного объекта [14], для различных радиусов кривизны первой поверхности в диапазоне 50–100 мм. Рассматривать большие значения радиусов кривизны первой поверхности нецелесообразно в силу быстрого роста сферической абберации.

Исходя из этих данных оценим величины аббераций третьего порядка для нашей системы. Известно, что величина дисторсии оптической системы определяется выражением [14]

$$\Delta y'_{\text{III d}} = -0.5 f S_V^\infty \text{tg}^3 \omega, \quad (3)$$

где $\Delta y'_{\text{III d}}$ — разность между реальным положением главного луча в плоскости изображения и положением, соответствующим идеальному изображению, ω — угловое поле системы, в нашем случае $\text{tg} \omega \approx 0.16$. Расчет показывает, что для заданных ранее конструктивных параметров величина S_V лежит в диапазоне -0.4 – -0.1 . В результате из (3) получаем, что для проектируемой

системы дисторсия не превышает 0.1 мм, что позволяет пренебречь ею.

Поскольку регистрация изображения осуществляется плоской матрицей, то величина астигматизма не играет большой роли, при этом принципиально неустранимой абберацией для одиночной линзы является кривизна поля изображения. Ее наличие приводит к дефокусировке изображения по мере удаления от его центра и фактически ограничивает максимальный размер используемой матрицы. Сдвиг положения фокуса для крайних точек плоскости изображения z'_{av} определяется выражением

$$z'_{\text{av}} = -0.5 f \text{tg}^2 \omega (2S_{\text{III}}^\infty + S_{\text{IV}}^\infty). \quad (4)$$

Исходя из значений сумм Зайделя и (4) можно оценить, что сдвиг фокальной точки на краю поля изображения будет меньше 2.5 мм, что примерно в 2 раза меньше длины фокальной перетяжки в гауссовом приближении. Следовательно, в нашем случае кривизну поля также можно не учитывать. Величина меридиональной комы определяется выражением

$$K_{\text{III}} = -1.5 \frac{m^2}{f} S_{\text{II}}^\infty \text{tg}^2 \omega, \quad (5)$$

где m — координата луча на входном зрачке. Отсюда легко оценить, что для края зрачка ($m = D/2 = 50$ мм) $K_{\text{III}} \approx 3$ мм, что хотя и меньше размера пиксела, но уже сравнимо с ним, и будет приводить к некоторому размытию изображения.

И наконец, оценим величину сферической абберации. Она определяется выражением

$$\Delta S'_{\text{III}}^\infty = -0.5 \frac{m^2}{f} S_{\text{I}}^\infty. \quad (6)$$

Исходя из (6) и значений S_{I} для края зрачка получим $\Delta S'_{\text{III}}^\infty > 25$ мм. Таким образом, для применения одиночной линзы в качестве объектива необходимо устранение двух аббераций — меридиональной комы и сферической. Данную проблему можно решить путем асферизации поверхностей линзы. Причем наличие двух степеней свободы — двух поверхностей — позволяет рассчитывать на успешное решение задачи. В мм-диапазоне легко преодолевается основная проблема оптической асферики — сложность и дороговизна ее изготовления, что связано с относительной простотой обработки полимерных материалов. Известно, что, согласно критерия Марешаля для дифракционно ограниченного объектива, максимальная величина волновой абберации h в выходном зрачке должна удовлетворять условию $h < \lambda/14$ [15]. Это приводит к требованию на точность изготовления поверхности линзы для однолинзового объектива $\delta < 2h/(n-1)$, где n — показатель преломления материала линзы, что в нашем случае составляет величину $\delta < 0.2$ мм.

В рамках теории аббераций третьего порядка асферизация двух поверхностей позволяет полностью компенсировать кому и сферическую абберацию. Однако в

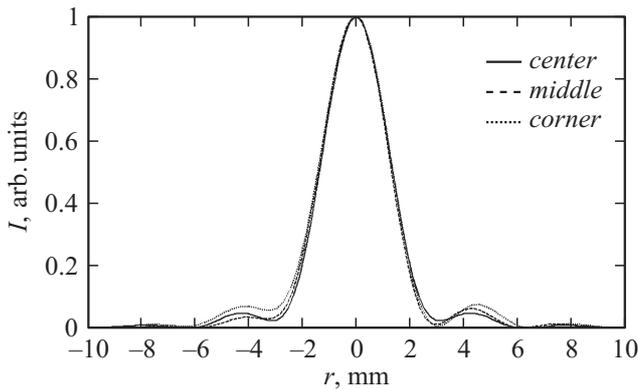


Рис. 3. Распределение мощности в фокальном пятне для различных пикселей матрицы.

нашем объективе из-за достаточно большого углового поля системы будут присутствовать aberrации высших порядков. В результате устранить aberrации полностью для всего поля системы не удастся, однако, как будет показано далее, их величину можно будет минимизировать до приемлемого уровня. Отдельно отметим, что в отличие от остальных aberrаций асферизация поверхностей линзы не влияет на кривизну поля [14]. Поэтому для построения широкоугольных систем применение двух-трехлинзовых объективов будет принципиальным.

Окончательные расчет и оптимизация линзы проводились методом трассировки лучей [16]. Минимизировался размер пятна рассеяния одновременно для двух точечных источников, один из которых находился на оси системы, а второй на краю объектного поля. Оптимизационными параметрами выступали уравнения поверхностей, которые задавались в виде поверхностей вращения второго порядка

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}, \tag{7}$$

где z — расстояние до образующей плоскости, c — кривизна поверхности, r — радиус точки, k — коническая константа.

На рис. 3 приведены расчетные графики распределения мощности в фокальном пятне для центрального, промежуточного и углового пикселей. Видно, что в угловом пикселе присутствует остаточная кома, приводящая к асимметрии пятна и небольшому падению контраста. Тем не менее поскольку при правильной настройке энергия основного максимума практически вся приходится на один пиксел, а первое кольцо размывается по нескольким, то расчетный контраст по всему полю получился не хуже 35:1.

Результаты экспериментов

Ниже приведены оптические характеристики системы, полученные экспериментально. На рис. 4 приведено

поперечное сечение функции рассеяния точки (ФРТ) объектива. При этом на рис. 4, *a* приведена ФРТ, измеренная с помощью матрицы, а на рис. 4, *b* — одиночным детектором, который перемещался в фокальной плоскости в направлении, перпендикулярном оптической оси, с шагом 0.1 mm. Видно, что ширина кривой по уровню 0.5 составляет около 3.4 mm, что обеспечивает контраст изображения точечного источника не хуже 50:1. Поскольку кривая, с одной стороны, не имеет плоской „крыши“, а с другой — имеет ширину меньше межпиксельного расстояния, то можно утверждать, что оптическая система хорошо согласована с матрицей и имеет размер пятна рассеяния немного меньше размера пиксела.

Разрешение системы при расстоянии до источника 1 m составило около 34 mm при величине поля зрения 238 × 238 mm. Для проверки хроматических искажений объектива была измерена ФРТ при различных частотах источника (рис. 5). Изменения в диаграммах являются незначительными. Отсюда можно сделать вывод, что данный объектив может быть использован при широкополосной подсветке в диапазоне 92–105 GHz.

Система регистрации и обработки сигналов матрицы состояла из блока мультиплексоров аналоговых сигналов, обеспечивающих построчную выдачу сигналов с канальных усилителей на АЦП, цифрового блока на базе 32 разрядного микроконтроллера AT32UC3C0512 фирмы Atmel и ПЭВМ, соединенной с цифровым блоком по каналу USB. Выбор данного микроконтроллера был

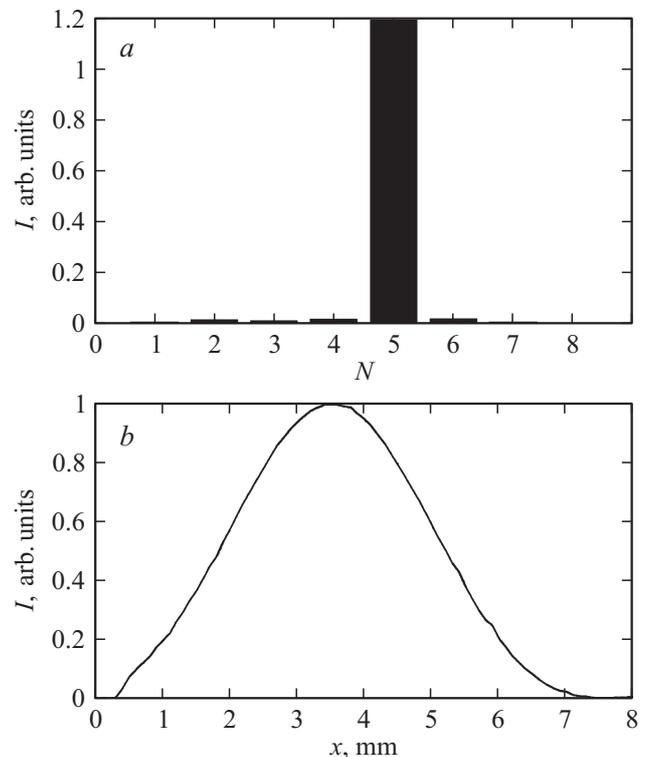


Рис. 4. Функция рассеяний точки: *a* — изображение с матрицы; *b* — снятая одиночным детектором с шагом 0.1 mm.

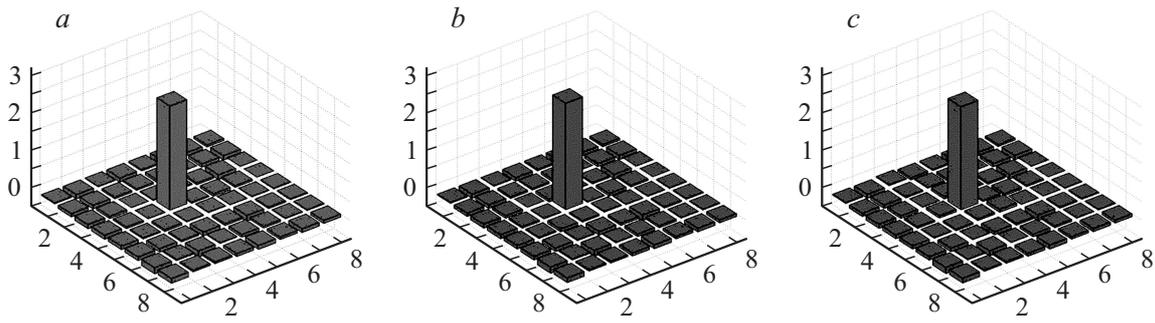


Рис. 5. ФРТ объектива для различных частот подсветки: *a* — 92.2, *b* — 98.2, *c* — 105 GHz.

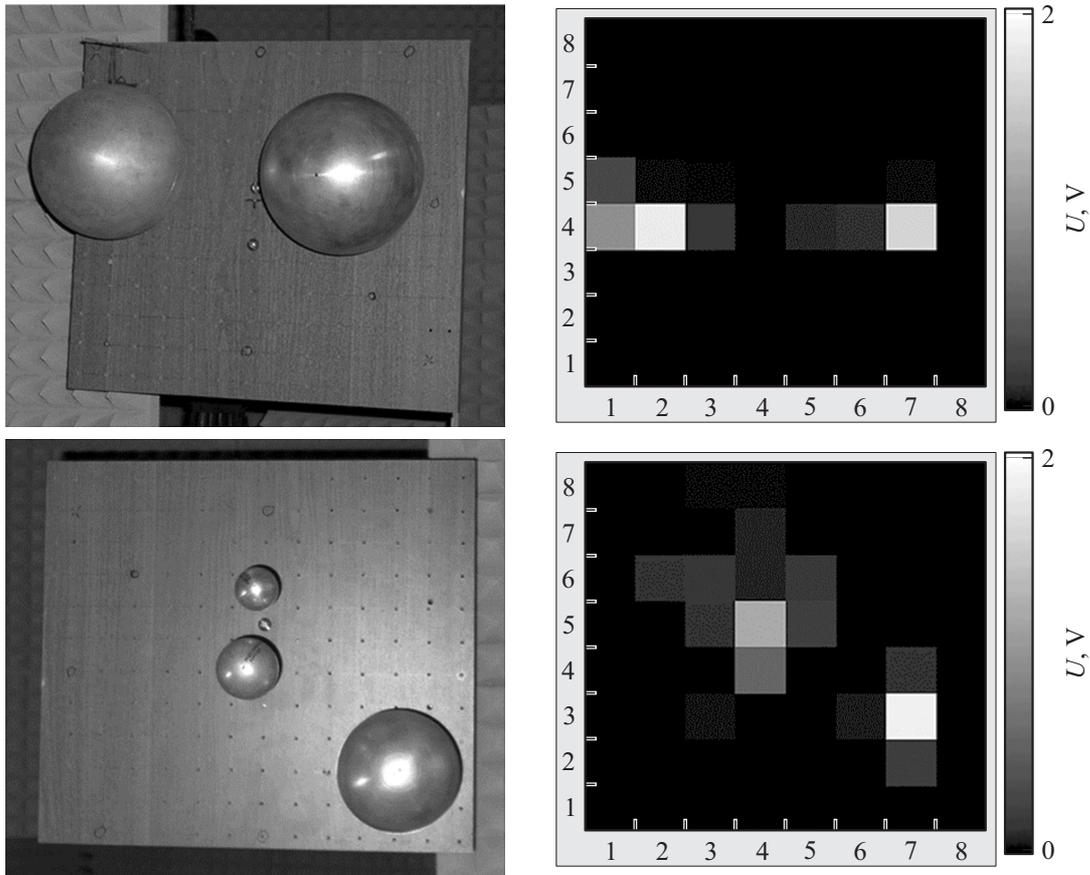


Рис. 6. Набор металлических сфер (слева) и их изображение, зарегистрированное системой (справа).

обусловлен тем, что он имеет в своем составе 12 разрядный АЦП с мультиплексором на 8 дифференциальных каналов и контроллер канала USB. Разработанное программное обеспечение микроконтроллера обеспечивало построчное считывание сигналов с детекторов матрицы с их последующей передачей в ПЭВМ для обработки и визуализации. Достигнутая скорость работы системы около 50 кадров/s при визуализации данных и около 250 кадров/s без визуализации.

С использованием разработанной системы, состоящей из линзы и матрицы детекторов, помещенной в ее фокальную плоскость, были проведены эксперименты

по получению изображений простых предметов при регистрации отраженного монохроматического сигнала. На рис. 6 приведены сигналы, зарегистрированные детекторной матрицей при облучении металлических сфер монохроматическим излучением с частотой 94.2 GHz. Видно, что отраженный сигнал регистрируется одним детектором и отображается в одном пикселе. Возможна регистрация сигнала от нескольких металлических шаров разных диаметров. При этом величина сигнала возрастает при увеличении диаметра. Заметного взаимовлияния шаров на ММ-изображение не обнаруживается.

Заключение

В настоящей работе представлена созданная система получения видеоизображения диапазона длин волн 3 мкм, состоящая из асферической линзы, обеспечивающей дифракционное качество изображения по всей регистрирующей излучение матрице 8×8 детекторов в заданном диапазоне частот 90–100 GHz, и цифрового блока регистрации и управления на базе микроконтроллера Atmel AT32UC3C0512.

С использованием разработанной системы проведены эксперименты по получению изображений простых предметов (одной и нескольких металлических сфер разного диаметра) при регистрации отраженного монохроматического сигнала.

Полученные результаты говорят о хороших перспективах построения многопиксельных систем ММ-видения реального времени с рефракционной оптикой.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 12-02-12006-офи_м.

Список литературы

- [1] Oka S., Togo H., Kukutsu N., Nagatsuma T. // Prog. in Electromagn. Res. Lett. 2008. Vol. 1. P. 197–204.
- [2] Du Bosq T.W., Lopez-Alonso J.M., Boreman G.D. // Appl. Opt. 2006. V. 45, N. 22. P. 5686–5692.
- [3] Chan W.L., Charan K., Takhar D., Kelly K.K., Baraniuk R.G., Mittleman D.M. // Conf. on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, OSA Technical Digest (CD). 2008. P. CThN1.
- [4] Ma Y., Grant J., Saha S., Cumming D. // Opt. Lett. 2012. Vol. 37. N. 9. P. 1484–1486.
- [5] Hiroyasu Sato, Kunio Sawaya et. al. // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7671. P. 76710V-1.
- [6] Grossman E.N., Dietlein C.R., Bjarnason J.E., Ramirez M., Leivo M., Penttila J.A., Helistoc P. // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6948. P. 694 806.
- [7] Rebeiz G.M. // Proc. IEEE, 1992. Vol. 80, N 11. P. 1748–1770.
- [8] Шашкин В.И., Дрягин Ю.А., Закамов В.Р., Кривов С.В., Кукин Л.М., Мурель А.В., Чеченин Ю.И. // Радиофизика. 2007. Т. 51, № 12. С. 1077–1087.
- [9] Шашкин В.И., Мурель А.В., Дроздов Ю.Н., Данильцев В.М., Хрыкин О.И. // Микроэлектроника. 1997. Т. 26. Вып. 1. С. 57–61.
- [10] Шашкин В.И., Белов Ю.И., Волков П.В., Горюнов А.В., Закамов В.Р., Илларионов И.А. // Письма ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 12. С. 44–49.
- [11] Паршин В.В., Третьяков М.Ю., Кошелев М.А., Серов Е.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 8. С. 583–594.
- [12] Борн М., Вольф Э. Основы оптики М.: Наука, 1970. 720 с.
- [13] Naftaly M., Miles R.E. // Proc. IEEE. 2007. Vol. 95. N 8. P. 1658–1665.
- [14] Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. СПб.: 2008. 448 с.
- [15] Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989. 220 с.
- [16] Smith W.J. Modern Lens Design. NY: McGraw-Hill, 1992. 485 p.