

МНОГОЭЛЕМЕНТНАЯ ПРИЕМНАЯ МАТРИЧНАЯ СИСТЕМА 8 ММ ДИАПАЗОНА ДЛЯ ЗАДАЧ ПАССИВНОГО РАДИОВИДЕНИЯ

В. Б. Хайкин¹, А. А. Стороженко¹, М. К. Лебедев¹

В. Н. Радзиховский², С. Е. Кузьмин², С. В. Шлензин²

¹ Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН

² НПФ «Айсберг-НТ»

Статья получена 7 февраля 2014 г.

Аннотация. Сообщается о завершении разработки 24-элементной приемной матричной системы 8 мм диапазона для решения задач пассивного радиовидения. Особенностью приемной матричной системы является высокая флуктуационная чувствительность радиометрических модулей (не хуже $10 \text{ мК/Гц}^{1/2}$), плотная упаковка элементов и их высокая температурная стабильность, что позволяет работать в режимах модуляции и компенсации без внешней калибровки. В качестве облучателей матрицы применены волноводные излучатели с диэлектрическим стержнем, что вместе с компактной конструкцией приемных модулей позволило реализовать шаг решетки 14 мм. Приводятся особенности построения плотноупакованной приемной матрицы, результаты моделирования многолучевых диаграмм направленности системы пассивного радиовидения с 24-элементной приемной матрицей и тестовое радио изображение.

Ключевые слова: радиометрические модули, многолучевая диаграмма направленности, приемная матрица, пассивное радиовидение, радиоизображение.

Abstract. The completion of the development of the 24-element 8-mm range matrix receiving system for passive radio imaging applications is reported. The receiving matrix system features high fluctuation sensitivity of the radiometric modules (not worse than $10 \text{ mK/Hz}^{1/2}$), dense packing of the system's elements and their high temperature stability, which allows the operation in modulation and compensation

modes without external calibration. Using the transmitters with dielectric rods as the matrix feeds and the compact design of the receiving modules made possible to realize the array spacing as small as 14 mm. The peculiarities of dense packed receiver matrix design, the results of multibeam antenna pattern of the passive radio imaging system with a 24-element receiving array simulation and a test radio image are presented.

Keywords: radiometric modules, multibeam radiation pattern, receiving matrix, passive radio imaging, radio image.

Введение

Радиовидение имеет сегодня широкий диапазон применений от мониторинга состояния Земли, лесов, воды (океана) до посадки летательных аппаратов в условиях плохой видимости, биомедицины и задач безопасности. Возможные применения также включают зондирование географических особенностей поверхности, метеорологию и климатологию, дозорные системы на суше и на море.

Для решения задач пассивного радиовидения обычно применяется многоэлементная приемная матричная система, которая устанавливается в фокусе параболического или эллиптического зеркала с $f/D \geq 1$ для получения радиоизображения сцены, расположенной на далеком или близком расстоянии. Основными требованиями к приемной матрице является большое число элементов, минимальный шаг между ними, высокая чувствительность и стабильность приемных модулей. Оптимальным для радиовидения является использование матрицы $M \times N$, где M и N близки, что позволяет отказаться от сканирования и получать радиоизображения с очень высокой скоростью, но стоимость такой системы возрастает примерно в N^2 в сравнении со стоимостью одного приемного модуля. Более практично использование двухрядной матрицы $(2 \times N)$ со сканированием зеркала в плоскости, перпендикулярной плоскости развертки матрицы. В этом случае при

количестве элементов матрицы $N = 24...32$ на быстром сканере удается достичь субсекундных времен развертки кадра с приемлемым качеством радиоизображения. При диаметре длиннофокусной антенны около 1 м на волне 8 мм достижимо число пикселей в кадре более 7000 с разрешением несколько сантиметров на расстоянии 4-6 м от объекта.

В настоящей работе продолжено развитие идеологии получения радиоизображений с помощью высокочувствительных плотноупакованных приемных матриц миллиметрового диапазона, изложенной в [1–3].

1. Основные температурные соотношения задачи пассивного радиовидения

Кажущаяся или видимая радиометрическая температура поверхности состоит из собственной тепловой излучаемой поверхностью мощности T_ϵ и отраженной от окружающего фона мощности T_ρ . Излучательная способность поверхности ϵ определяется как отношение яркостной температуры этой поверхности к яркостной температуре абсолютно черного тела при той же физической температуре ($0 \leq \epsilon \leq 1$). Для объекта, который не пропускает СВЧ сигнал (т. е. его пропускание $t = 0$), $\epsilon + \rho = 1$. Эффективная радиометрическая температура объекта определяется его собственной радиояркостной температурой и переотраженной им температурой окружающего фона, $T_a = \epsilon T_{obj} + \rho T_{sur}$. Из физических экспериментов известно, что отражательная способность ρ является функцией угла падения, а также зависит от материала и длины волны. Поэтому излучательная способность и видимая радиометрическая температура поверхности также будут зависеть от угла наблюдения.

Видимая радиометрическая контрастная температура для обнаружения неразрешаемой антенной цели зависит от характеристик объекта и антенны и может быть определена как [4]:

$$T_c = \frac{A_T \eta \sigma (T_{\text{BKG}} - T_{\text{TGT}})}{\pi \tan^2(\beta / 2) R^2 10^{0.1\chi R}}, \quad (1)$$

где T_c — радиометрическая температура контраста сцена/фон, К; A_T — эффективная радиометрическая площадь цели, м²; η — эффективность луча (в реалистичном варианте $\eta \approx 0,6$); σ — коэффициент позиционирования цели ($\sigma \approx 1$); T_{BKG} — радиометрическая температура фона, К; T_{TGT} — радиометрическая температура цели, К; β — ширина луча по уровню -3 dB ($\beta \approx 70\lambda/D$ градусов; D — диаметр апертуры); R — удаленность цели, км; χ — затухание в атмосфере, дБ/км. В выражении (1) можно выделить коэффициент заполнения луча Γ :

$$\Gamma = \frac{A_T \eta \sigma}{\pi \tan^2(\beta / 2) R^2}$$

Чем больше Γ ($0 \leq \Gamma \leq 1$), тем большая контрастная температура T_c может быть достигнута. Для заданной апертуры и заданного размера цели Γ увеличивается с уменьшением длины из-за уменьшения ширины луча.

Контраст температур цель/фон ($T_{\text{BKG}} - T_{\text{TGT}}$) также является функцией частоты. Когда цель представляет собой металлический объект, она может отражать температуру холодного неба в направлении радиометра, таким образом принимая кажущуюся радиометрическую температуру T_{TGT} , приблизительно равную температуре неба, а температура неба зависит от

Таблица 1.

Метеоусловия	T_{SKY} (К)	χ (дБ/км)
Ясно	20	0.02
Облачность	50	0.05
Туман	80	0.1
Легкий дождь	110	0.25
Умеренный дождь	130	2

частоты и метеоусловий. Фактор потерь χ и температура неба в различных метеоусловиях атмосферы на частоте 35 ГГц приведены в табл. 1.

С видимой контрастной температурой цели связана чувствительность радиометра, необходимая для обнаружения имеющего место изменения контрастной температуры. В пассивном радиовидении используются два типа радиометров: модуляционный и компенсационный (полной мощности). Выражение для чувствительности такого радиометра имеет вид:

$$\Delta T_{\min} = [(CT_{\text{sys}} / \sqrt{B\tau})^2 + (T_y)^2 (\Delta G / G)^2]^{1/2}, \quad (2)$$

где ΔT_{\min} — минимальное обнаружимое изменение температуры, C — радиометрическая постоянная (1 для режима полной мощности, 2 для модуляционного режима), T_{sys} — температура системы, τ — время интегрирования после детектора, B — ширина полосы СВЧ, $\Delta G/G$ — стабильность усилителя, $T_y = T_A - T_C$ для модуляционного режима и $T_y = T_{\text{sys}}$ для режима полной мощности, T_A — температура антенны, T_C — температура нагрузки (эквивалента) в модуляционном радиометре.

2. Особенности построения 24-элементной приемной матричной системы

Основным элементом приемной матрицы является радиометрический датчик, работающий в режиме прямого детектирования частотном диапазоне 33...38 ГГц. Монолитное интегральное МШУ обеспечивает полное усиление входного сигнала около 52 дБ с коэффициентом шума $F < 2,5$ дБ. Каждый радиометрический датчик содержит волноводно-микророскопический переход, три каскада МШУ, квадратичный детектор и выходной низкочастотный усилитель. МШУ и диодные чипы включены в микророскопическую линию. В качестве материала подложки использован дюротид фирмы Rogers толщиной 0,127 мм. Микророскопическая линия с компонентами размещается в запердельном волноводном объеме, чтобы предотвратить появление высших волноводных мод. Измеренное значение температурной чувствительности

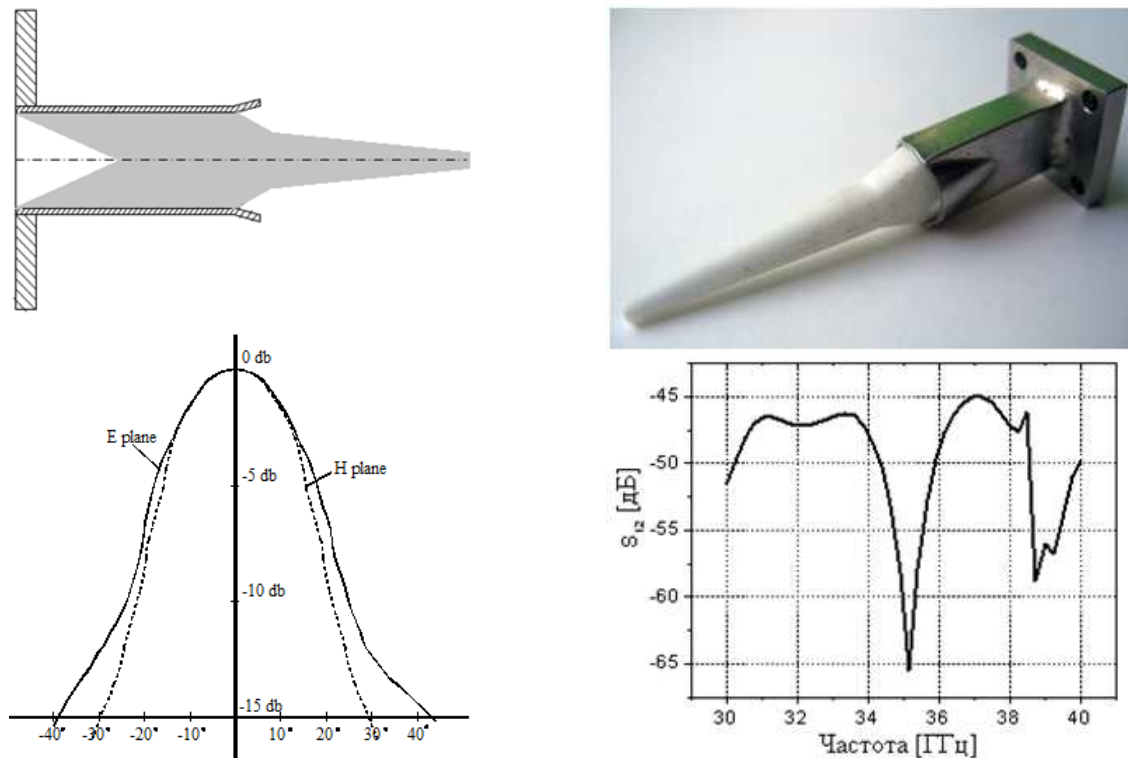


Рис. 1. Геометрия излучателя с диэлектрическим стержнем (вверху слева), измеренные диаграммы направленности в Н и Е плоскостях (внизу слева), вид излучателя (вверху справа) и измеренная взаимная связь соседних излучателей (внизу справа)

радиометрических датчиков в режиме полной мощности $10 \text{ мК/Гц}^{1/2}$. На входе датчика может быть установлен специально разработанный волноводный PIN-диодный модулятор, позволяющий реализовать модуляционный режим. Размеры радиометрических датчиков $13,8 \times 13,8 \times 65$ мм, размеры модулятора $13,8 \times 13,8 \times 19$ мм.

В качестве антенных облучателей выбраны диэлектрические стержни в круглом волноводе, имеющие меньшие размеры поперечного сечения в сравнении с рупорами и низкую взаимную связь. Это обеспечивает возможность более плотной упаковки датчиков в структуре матрицы. Конструкция и характеристики спроектированного облучателя приведены на рис. 1. Стержень выполняется из фторопласта с диэлектрической проницаемостью, равной 2,1, и закрепляется в волноводе. Облучатель видит главную антенну под углом около 48° . Уровень сигнала на краю главной

антенны составляет -7 дБ, что обеспечивает высокую эффективность антенной системы. Уровень боковых лепестков излучателя не превышает -15 дБ.

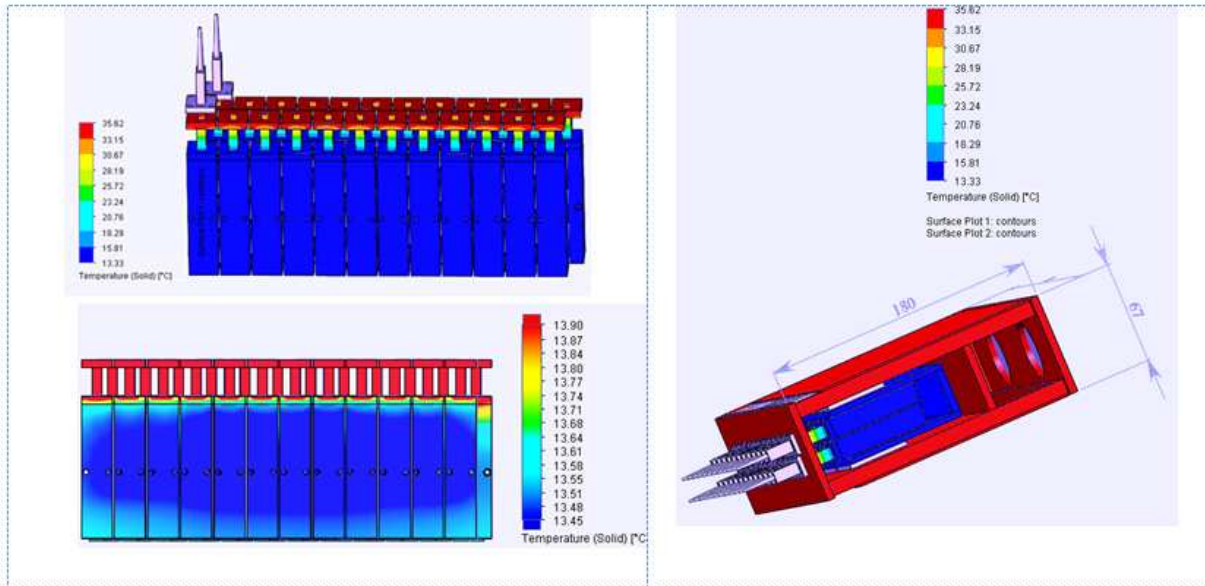


Рис. 2. Распределение температур по матрице и волноводным теплоразвязкам в режиме термостатирования

Радиометрические датчики устанавливаются в термостатируемом корпусе с помощью тонкостенных стальных волноводов с высоким тепловым сопротивлением (терморазвязок). Конструкция корпуса термостата разработана с применением тепловой модели в целях эффективного отвода тепла и реализации высокоточного реверсивного термостатирования. Высокая температурная стабильность радиометрических датчиков и равномерность поля температур по матрице позволяют работать в режимах модуляции и компенсации (в зависимости от длительности процесса получения радиоизображений) без внешней калибровки. Распределение температур по плотноупакованной матрице приемных модулей с терморазвязками приведено на рис. 2. 24-элементная матричная система 8 мм диапазона с блоком высокостабильного питания и высокоточного терморегулирования показаны на рис. 3.

Разработанная система многоканального сбора, первичной обработки и графической визуализации данных позволяет строить радиоизображение удаленной сцены со скоростью до нескольких кадров в секунду. Для сбора данных приемной матрицы используется 32-канальная плата многоканального АЦП L-card. Программа многоканальной регистрации, онлайн-обработки и графической визуализации данных написана на языке C++ для OS Linux. На рис. 3 справа приведен пример визуализации трех каналов матрицы (№1, №16, №24).



Рис. 3. Матричная приемная система с блоком питания и термостатирования (слева), пример визуализации трех каналов матрицы (№1, №16, №24) (справа)

На рис. 4 приведен результат моделирования многолучевой диаграммы направленности для основной поляризации системы пассивного радиовидения при размещении 24-элементной приемной матрицы в ближнем фокусе эллиптического зеркала диаметром 96 см с $f/D = 1,3$. Моделирование выполнено методом физической оптики с учетом измеренных диаграмм направленности излучателей с диэлектрическим стержнем.

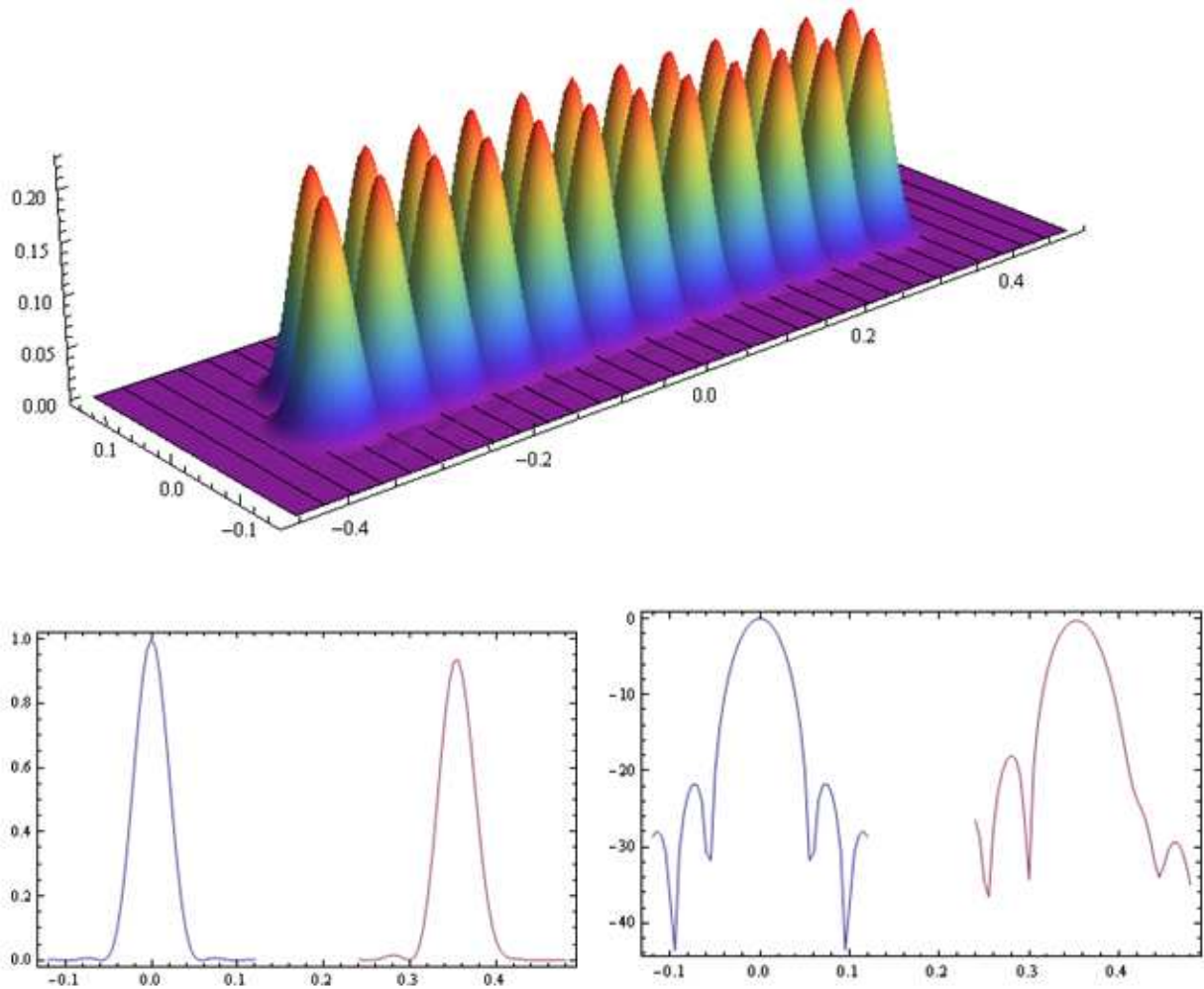


Рис. 4. Многолучевая диаграмма направленности в основной поляризации системы радиовидения с эллиптическим зеркалом диаметром 96 см и отношением $f/D=1.3$ (вверху), осевой и периферийные лучи (внизу)

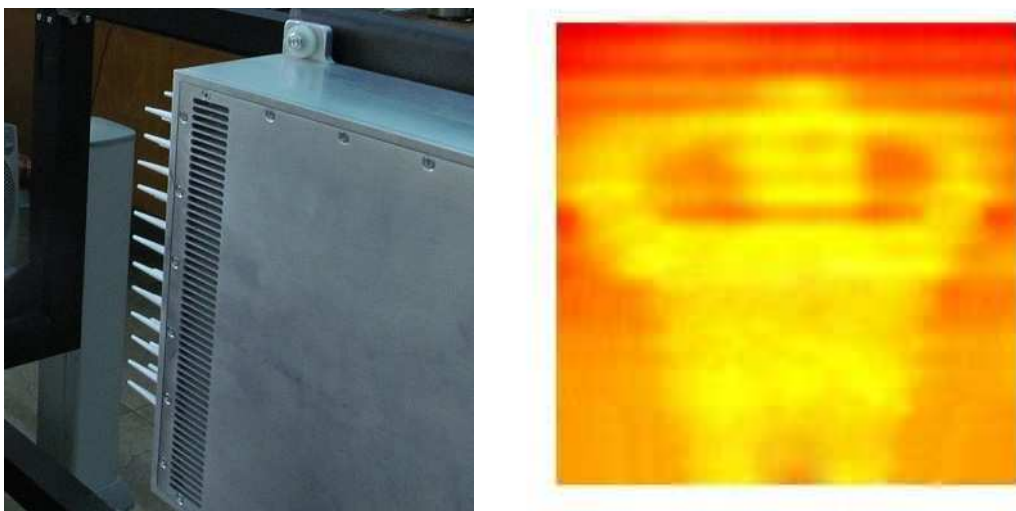


Рис. 5. Приемная матрица в рабочем положении (слева), пробное радиоизображение человека с поднятыми руками (справа)

На рис. 5. показаны приемная матрица, установленная в фокусе эллиптического зеркала, и пробное радиоизображение человека с поднятыми руками. Обработка изображения выполнялась с использованием алгоритма нелинейной фильтрации. Применение алгоритма свехррэлеевского разрешения позволяет добиться дальнейшего улучшения качества радио изображения при недостатке физического разрешения [5].

Литература

1. V. B. Khaikin, V. N. Radzikhovsky, S. E. Kuzmin, V. R. Zakamov. Wideband receiver-module for 3 mm wave focal plane imaging array / Proc. of COMCAS 2009. Tel-Aviv, Nov. 2009.
2. V. B. Khaikin, V. R. Zakamov, V. I. Shashkin, S. E. Kuzmin, V. N. Radzikhovsky. A wideband receiver-module for passive MM wave imaging array: optimization and test results / Proc. of MSMW 2010, June 21–26, 2010. Kharkov, Ukraine. June 2010.
3. R. Chernobrovkin, N. Popenko, V. Khaikin, Ch. Granet. Compact Efficient Feed-Horn at 30–38 GHz for a Multi-beam Radio Telescope // Journal of Infared, Millimeter and Teraherts waves. 2010. V. 31. N7.
4. Schuchardt J. M., Newton J. M., Morton T. P., Gagliano J. A. The Coming of MM-Wave Forward Looking Imaging Radiometers // Microwave Journal, June 1981. P. 45–62.
5. Yu. A. Pirogov, A. I. Chulichkov, V. B. Khaikin, S. S. Batova. Application of Super-Rayleigh Resolution in Radio Astronomy and Passive Radio Imaging / IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas, and Electronic Systems (COMCAS 2013), Tel Aviv, Israel.