

СИСТЕМА БЛИЖНЕГО ПАССИВНОГО РАДИОВИДЕНИЯ 3-мм ДИАПАЗОНА

**В. В. Гладун, А. В. Котов, В. И. Криворучко, Р. А. Павлов,
Ю. А. Пирогов, Д. А. Тищенко**

**Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Центр магнитной
томографии и спектроскопии**

Получена 30 июня 2010 года

Аннотация. Разработана система пассивного радиовидения 3-мм диапазона, предназначенная для обнаружения скрытых под одеждой потенциально опасных предметов. Система позволяет с разрешением 5 мм при температурной чувствительности 0.5 К в реальном времени обнаруживать изделия из металла, керамики и в виде заполненных жидкостью емкостей. Описаны элементы системы и методики измерения их электродинамических характеристик, определены перспективы и пути дальнейшего развития систем пассивного радиовидения.

Ключевые слова: радиовидение, приёмники миллиметровых волн, сверхразрешение.

Введение

В настоящее время особенно актуальной становится антитеррористическая деятельность, направленная на выявление лиц, пытающихся пронести в места скопления людей (на митинги, собрания, на борт самолета, в вагон поезда) предметы, спрятанные под одеждой, – огнестрельное или холодное оружие, взрывчатку, взрывные устройства и т.п. Для предотвращения этого разрабатываются системы радиовидения, способные различить под радиопрозрачными покровами спрятанные предметы и визуализировать их форму. Возможны два направления решения этой проблемы: активное и пассивное радиовидение. Первая методика позволяет обеспечить высокий

радиояркий контраст и как следствие высокое температурное и пространственное разрешение предметов, но является, в принципе, экологически небезопасной и легко обнаруживаемой при необходимости соблюдать условия скрытности наблюдения. Пассивный же метод, основанный на регистрации и анализе собственных тепловых излучений наблюдаемого объекта, напротив, скрытен тотально и полностью безопасен. Однако пассивные системы обладают и недостатками, которые следует преодолеть, создавая решающее поставленную задачу устройство. Из таких недостатков главным является недостаточное быстродействие, связанное с необходимостью для увеличения отношения сигнал/шум осуществлять интегрирование выходного сигнала, что приводит к значительным временам наблюдения. Другой недостаток – невысокое пространственное разрешение, определяемое рэлеевским волновым пределом. Первый недостаток компенсируется применением многоканального приема с помощью решеток сенсоров, а второй – возможно большим укорочением длины волны регистрируемых изображений. Выбор длины волны определяется степенью прозрачности камуфляжа, под которым находится предмет обнаружения. Наиболее короткими волнами, пригодными для решения поставленных задач, являются субмиллиметровые (или терагерцовые) волны, которые, впрочем, почти полностью поглощаются влажной или весьма плотной одеждой. Поэтому оптимальными для удовлетворения условий прозрачности и приемлемого пространственного разрешения являются волны миллиметрового диапазона. Самым подходящим в таком смысле является 3-мм диапазон, вполне освоенный технологически как по элементной базе (генераторные и смесительные диоды, транзисторы, детекторы, переключатели и др.), так и по электродинамическим устройствам (волноводы, интегральные схемы, микрополосковые линии передачи, антенные системы, матрицы сенсоров) [1-3].

Имеющиеся в настоящее время устройства ближнего пассивного радиовидения, созданные в России [2-3] или за рубежом, не вполне удовлетворяют поставленной задаче. Из зарубежных систем стоит отметить

следующие: система TADAR ирландской фирмы Farran Technologies [4], быстродействующая камера миллиметрового диапазона QinetiQ MERIT с конусным сканированием фирмы QinetiQ Ltd (United Kingdom) [5], сканер Safe Scout (Provision) фирмы L3 Communication [6] и некоторые другие. Они либо неприемлемо инерционны (прототип фирмы NEC Corp.), либо обладают невысоким значением пространственного (камера QinetiQ MERIT) или температурного (SafeScout Provision) разрешения. Кроме того, созданные системы практически недееспособны в условиях закрытых помещений, где естественный температурный фон не позволяет обеспечить требуемый контраст получаемых радиоизображений.

Представленная в данном сообщении система пассивного радиовидения свободна от указанных недостатков и позволяет обнаруживать скрытые под одеждой металлические и немаetalлические предметы в режиме реального времени. Блок-схема системы показана на рисунке 1. Система состоит из радиооптического (антенного) блока 1, приёмной матрицы сенсоров 2, многоканального блока обработки видеосигналов 3, АЦП 4, системы сканирования 5, устройства термостабилизации 6 и управляющего блока обработки и визуализации радиоизображений 7. Блок управления и визуализации содержит персональный компьютер, который выводит на монитор радиотепловое изображение сканируемой зоны.

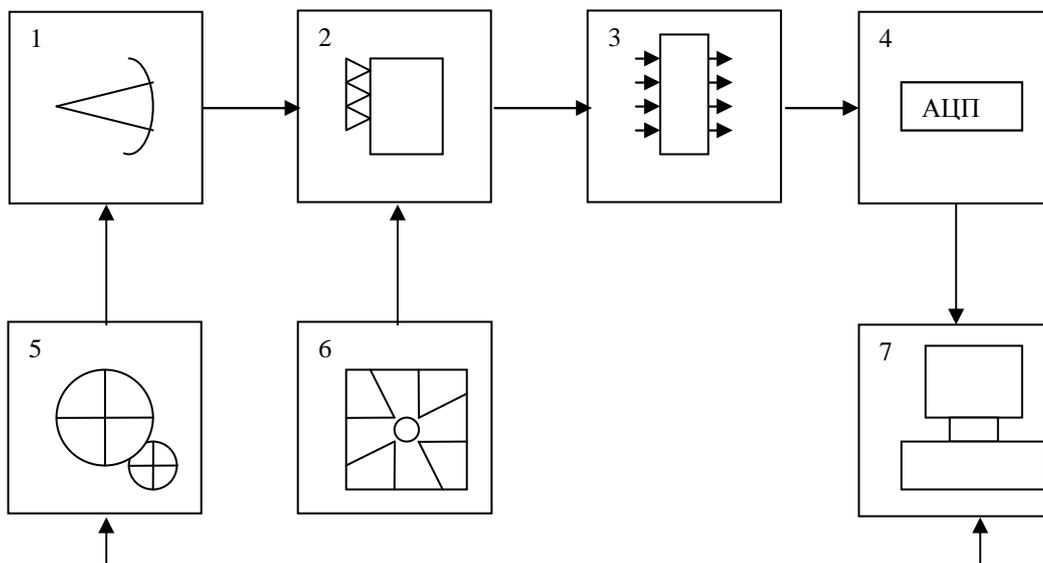


Рисунок 1. Блок-схема системы радиовидения.

Антенна прибора (рисунок 2) выполнена из эллиптического зеркала 1 диаметром 52 см, в ближнем фокусе которого F_1 располагается линейка сенсоров 2 (рисунок 3). Наблюдаемый объект находится в дальнем фокусе антенны на расстоянии F_2 от зеркала. Сигналы с линейки сенсоров поступают на блок преобразования, где происходит компьютерная обработка и построение изображения на экране монитора.

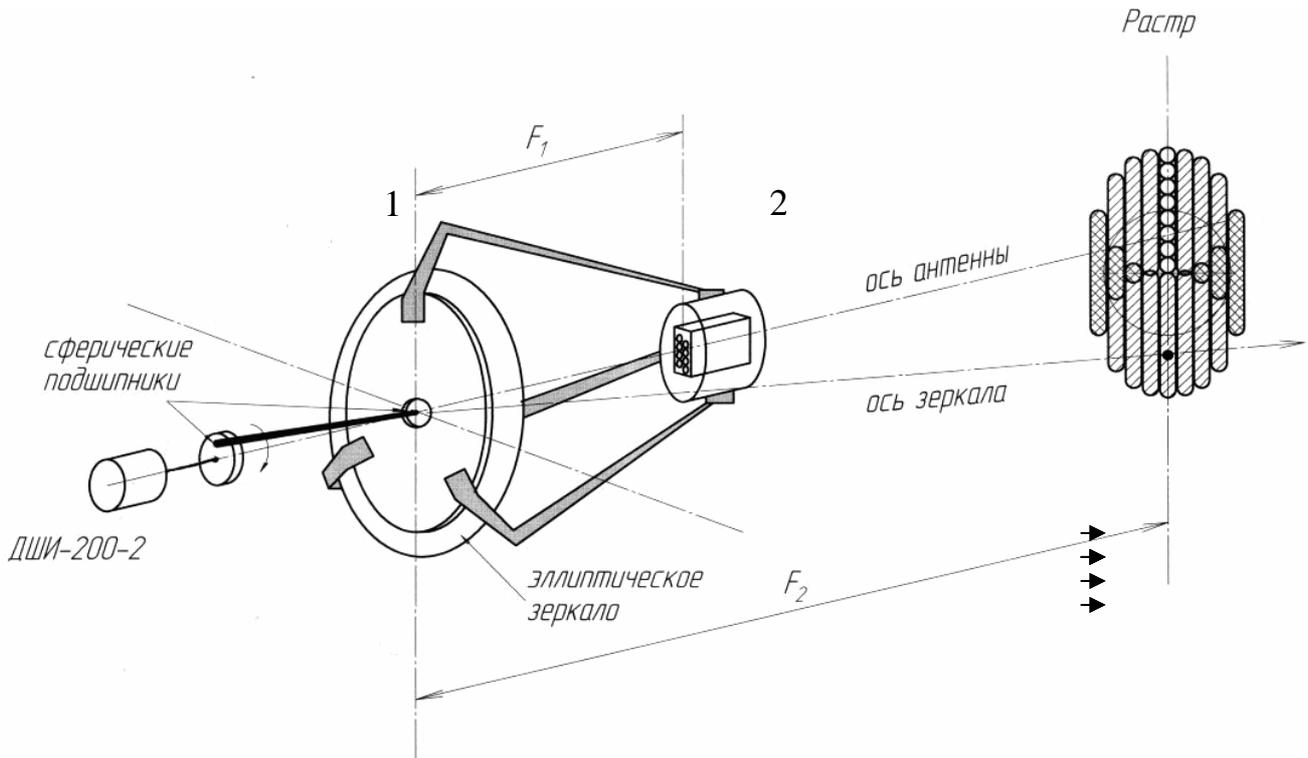


Рисунок 2. Антенная система с коническим сканированием

Для обеспечения максимального быстродействия была выбрана оригинальная схема конического сканирования эллиптическим зеркалом. В качестве приёмного СВЧ блока миллиметрового диапазона использована восьмиэлементная матрица приёмных элементов с шахматным расположением каналов (рисунок 3).

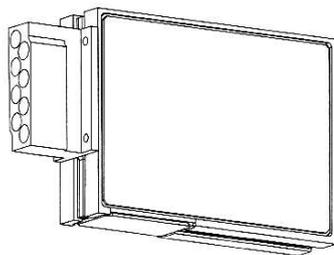


Рисунок 3. Восьмиканальная линейка сенсоров. Внешний вид.

При этом тепловое излучение исследуемого объекта фокусируется на приёмный СВЧ модуль. Каждый элемент СВЧ модуля представляет собой приёмник гетеродинного типа, сигнал с выхода которого поступает на блок обработки и проходит оцифровку в блоке АЦП. Цифровой сигнал обрабатывается на ЭВМ по заданным алгоритмам и выводится на монитор. Преобразование конического раstra в прямоугольный (для естественного отображения наблюдаемой сцены на экране монитора) осуществляется с помощью специально разработанной компьютерной программы. Антенная система позиционируется блоком электродвигателей, управляемых ЭВМ.

Для обеспечения конического сканирования антенна крепится к неподвижному основанию карданным механизмом, осуществляющим движение оптической оси антенны по боковой поверхности конуса, ось которого совпадает с осью антенной системы в целом, т.е. направлением визирования. Матрица сенсоров расположена в фокальной плоскости с некоторым смещением относительно оси установки [7]. Такое положение приводит к смещению лучей во втором фокусе относительно оси антенны. Синхронизация сканирования осуществляется качанием зеркала шаговым двигателем, при этом оптическая ось антенны отклонена от оси установки на угол $2,4^\circ$ (рисунок 2). Сканирование осуществляется с высокой скоростью (до 600 об/мин), достаточной для съёмки неподвижных и перемещающихся со скоростью (0,1-1 м/с) объектов [8].

Траектории лучей в сканируемой зоне образуют растр, показанный на рисунке 4. Окружностями обозначены 25 отсчётов для каждого канала. Одним из достоинств такого метода сканирования является частое пересечение разных лучей в одних и тех же областях по краям раstra, что позволяет применить алгоритм сверхразрешения и решить проблему автоматической калибровки радиометрических каналов по контрасту и яркости [9,10].

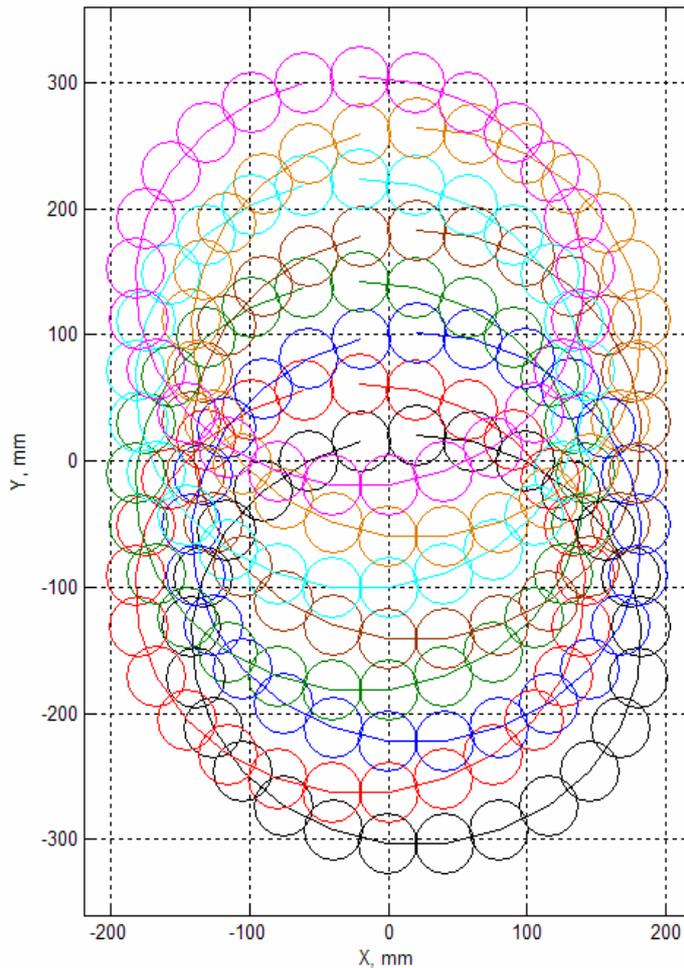


Рисунок 4. Расположение точек сканирования на прямоугольном растре.

Приемный СВЧ модуль

Основу приемного СВЧ модуля образует восьмиканальная линейка сенсоров (рисунок 3).

Радиометрические каналы в составе линейки сенсоров представляет собой модуляционные радиометры, построенные по гетеродинной схеме. Гетеродин на диоде Ганна один для всех каналов приема с равномерным распределением мощности сигнала по каналам. Чувствительность применяемых радиометров составляет 0,5 К при скорости обзора сцены до 10 кадров в секунду и 1К при скорости обзора сцены до 25 кадров в секунду, что обеспечивало уверенный контроль неподвижных и перемещающихся объектов при площади наблюдаемой сцены 30×40 см.

Высокие характеристики созданной системы радиовидения получены, в первую очередь, благодаря применению нового радиометрического СВЧ блока

– восьмиканального широкополосного приемного модуля. Его главными особенностями являются повышенная чувствительность, расширенный динамический диапазон, а также малые масса и габариты, соизмеримые с таковыми в одноканальных радиометрических модулях [11,12]. Основное внимание при разработке приёмного модуля было уделено «параметрообразующим» узлам - балансному смесителю со смещением, малозумящему широкополосному усилительному тракту ПЧ, квадратичному детектору с УНЧ, волноводно-щелевому делителю мощности для СВЧ блока гетеродинного типа, гермоокнам и шовной клеевой герметизации.

В отличие от различных вариантов компоновки систем радиовидения предложенный вариант практически свободен от недостатков, присущих его аналогам. Единственным механическим движением является качание антенны с весьма малой амплитудой, достаточной для конического обзора наблюдаемой сцены. Применение именно качания, а не вращения, позволяет практически избавиться от потерь на инерционные явления в процессе сканирования и в несколько раз уменьшить нагрузку на шаговые двигатели позиционирования антенны [13]. За один поворот оси двигателя антенная система сканирует зону размерами 30×40 см. Реально измеренная чувствительность, имела величину порядка 1К, а пространственное разрешение 0,5-1см, на дальности 2м. Максимальная скорость сканирования при этом составляла 10 кадров в секунду. Такие характеристики позволяют получать в реальном времени изображения как неподвижных, так и движущихся предметов.

Компоновка системы радиовидения

Конструктивно система радиовидения состоит из корпуса, эллиптической антенны, штанг держателей, которые располагают линейку датчиков в первом фокусе антенны с закреплёнными на ней рубашками системы термостабилизации (рис. 5).



Рисунок 5. Внешний вид системы радиовидения

В корпусе находится контроллер шагового двигателя, а так же блоки синхронных детекторов, системы термостабилизации, синхронизации установки с компьютером, оптодатчики и вентиляторы охлаждения.

Система термостабилизации замкнутого типа с принудительной циркуляцией жидкости переносит тепло от рубашек охлаждения линейки датчиков к радиатору охлаждения жидкости, а затем через элемент Пельтье к радиатору, охлаждаемому вентилятором.

Полученные радиоизображения

При наблюдении радиотепловых сцен в помещении для создания заметного радиояркого контраста (около 200 К) использовалась подсветка образцов поглотителем, помещённым в жидкий азот, рисунок 6.

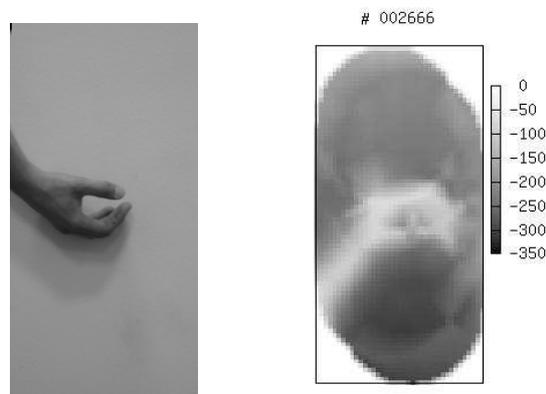


Рисунок 6. Рука человека.

Оптическое и радиоизображение (перевёрнутое).

При дальности до объекта съёмки 2 м разрешение получаемых изображений составляло 9 пикселей на 40 мм, что соответствует линейному разрешению 4.5 мм. Была обнаружена нечувствительность системы к точной установке объекта по дальности – большая глубина резкости изображаемого пространства является важным положительным качеством системы в целом: фокальное пятно во втором фокусе эллиптического зеркала имело вид каустической трубки почти не меняющегося диаметра на расстоянии около 60 см. Таким образом, при расчётном дальнем фокусе в 2 м изображение без заметной потери качества получалось в интервале дальностей 1,8-2,4 м, что говорит о большой глубине резко изображаемого пространства.

В натуральных экспериментах фоновая засветка создавалась вспомогательным зеркалом антенной системы, которое отражало излучение открытого неба (с температурой 35-80°K) [14] и направляло его на объект. Были проведены эксперименты по обнаружению предметов, изготовленных из различных материалов, в том числе, на фоне тела человека и под одеждой.

На рисунке 7 представлены оптическое и радиоизображение компьютерного компакт-диска. Отверстие в центре диска хорошо различается на радиоизображении. Его диаметр (по краям фольгированной поверхности) составляет 40 мм. Пластиковая коробка (футляр) оптически непрозрачна и визуально определить наличие в ней диска невозможно, тогда как радиоизображение остаётся практически таким же, как и без коробки.

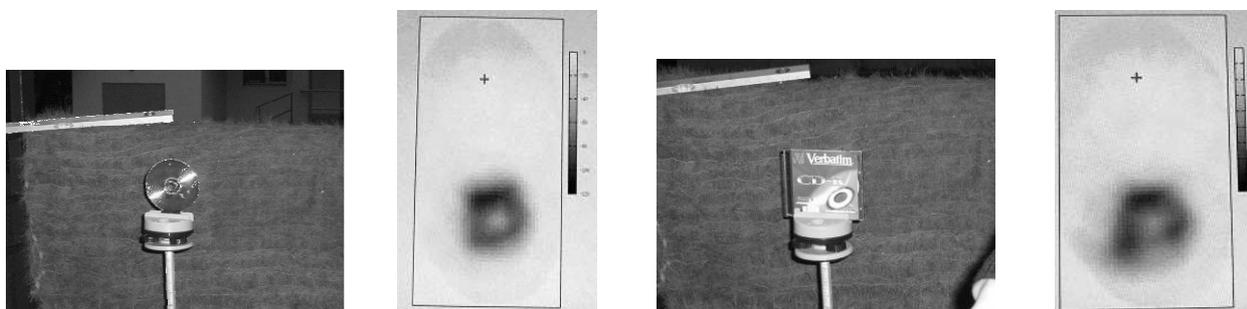


Рисунок 7. Компакт-диск. Оптическое и радиоизображение.

В этом эксперименте контраст радиоизображения составляет 120К для открытого диска и 90К для диска в футляре. Изображение макета пистолета на теле человека над и под одеждой представлено на рисунках 8 и 9. Из-за

затухания в одежде миллиметрового излучения радиоизображение пистолета под одеждой имеет пониженный контраст: затухание приводит к уменьшению контраста примерно на 5К.

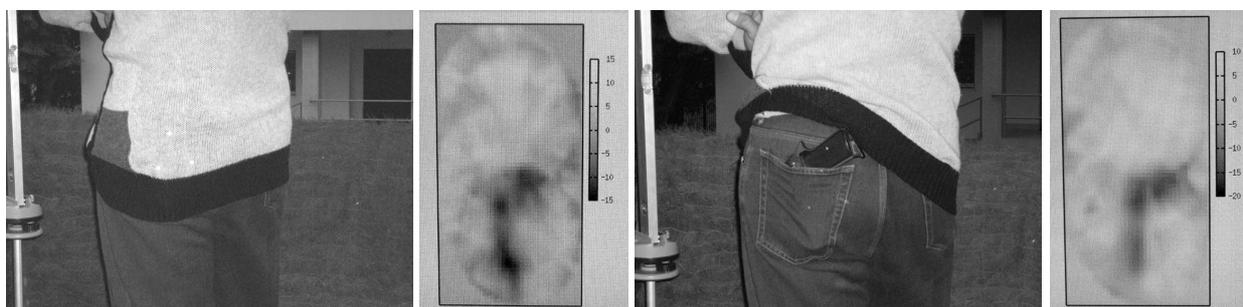


Рисунок 8. Макет пистолета под одеждой. Оптическое и радиоизображение.

Радиоизображение пистолета, представленное на рисунке 9, по разрешению сравнимо с оптическим: помимо общих контуров объекта заметно лучше по сравнению с предыдущими снимками разрешаются детали и элементы объекта. Созданная система обеспечивает линейное разрешение до 15 мм без обработки радиоизображений и 4-5 мм при обработке выходных сигналов посредством специально разработанных алгоритмов сверхразрешения.

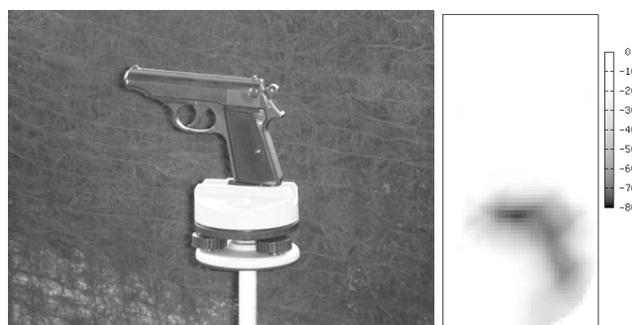


Рисунок 9. Открытый макет пистолета. Оптическое и радиоизображение.

Предметы с малыми (меньше одного пиксела) линейными размерами также обнаруживаются, но их размеры не определяются, так как они отображаются одним пикселом изображения. При уменьшении размера наблюдаемого объекта до одного пиксела (примерно 2×2 см) происходит уменьшение только интенсивности сигнала (радиояростного контраста), а не линейных размеров объекта на изображении [11]. Минимально измеряемые линейные размеры обнаруживаемых объектов составляли 5×5 мм.

Вывод

Выжным достоинством реализованной системы является ее быстродействие – радиоизображение наблюдаемого участка сцены размером 30x40 см формируется в течение 100 мс, что позволяет уверенно работать в реальном времени. При этом различаемый тепловой контраст (температурное разрешение) имеет величину не хуже 0.5 К. Такой режим работы обеспечивается за счет совокупности следующих факторов:

1. Применения высокочувствительных радиометрических приемников ($\Delta T \approx 0.05$ К), объединенных в 8-элементную линейку сенсоров.
2. Быстрого сканирования сцены путем конического качания диаграммы направленности эллиптического зеркала антенны.
3. Применения специально разработанных быстрых алгоритмов управления системой и обработки радиоизображений.

Система компактна и размещается на подвижном стенде. Установка работает практически бесшумно, может располагаться за радиопрозрачной стенкой, позволяя осуществлять скрытное наблюдение.

Таким образом, разработанный комплекс по совокупности характеристик (действие в реальном времени, надежность, мобильность, компактность, скрытность наблюдения, высокое пространственное и температурное разрешение, широкий спектр объектов обнаружения, невысокая стоимость) является наиболее технически совершенной, среди современных отечественных и зарубежных образцов, системой ближнего пассивного радиовидения.

Работа выполнена при поддержке грантов Роснауки №№ НШ-4593-2008.2, 02.522.11.2010.

ЛИТЕРАТУРА

1. Есепкина Е.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры.- М.: Наука, 1973.

2. Пирогов Ю.А. Пассивное радиовидение в миллиметровом диапазоне длин волн, Известия ВУЗов. Радиофизика, 2003, т.46, №8-9, с.660-670.
3. Пирогов Ю.А., Гладун В.В., Тищенко Д.А., Тимановский А.Л., Шлемин И.В, Джен С.Ф. Сверхразрешение в системах радиовидения миллиметрового диапазона, Журнал радиоэлектроники (<http://jre.cplire.ru>). - 2004. - №3.
4. Richard Bayliss. Smiths strengthens detection activities with acquisition of Farran Technology, Smlths Detection 2005.
5. www.qinetiq.com
6. www.l-3com.com
7. Пирогов Ю.А., Тимановский А.Л., Гладун В.В. Получение и обработка изображений в системах пассивного радиовидения // Известия ВУЗов. Радиофизика. - 2006. - Том XLIX; №8. - С.664-672.
8. Пирогов Ю.А., Тимановский А.Л., Гладун В.В. Получение и обработка изображений в системах пассивного радиовидения // Известия ВУЗов. Радиофизика, т. 49, № 8, 2006, с.11-12.
9. Пирогов Ю.А., Гладун В.В., Тимановский А.Л., Тищенко Д.А. Получение и обработка изображений в системах пассивного радиовидения миллиметрового диапазона// Труды Всероссийского семинара по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона.- Н. Новгород: ИПФ РАН 2005, с.13-15.
- 10.Пирогов Ю.А., Гладун В.В., Тищенко Д.А., Шлемин И.В. Математическая модель многолучевой линзовой антенной системы// Труды VIII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» (Волны-2001). –М: физический ф-т. МГУ,
- 11.Гладун В.В., Пирогов Ю.А. Цифровой метод регистрации данных в радиометрических системах радиовидения миллиметрового диапазона с непрерывным сканированием// Материалы школы-семинара «Физика и применение микроволн». - Звенигород, 2005.
- 12.Пирогов Ю.А., Тимановский А.Л. Влияние боковых лепестков диаграммы направленности приемной антенны на сверхразрешение в системах

пассивного радиовидения //Вестник МГУ. Сер. 3. Физ. Астрон. №1, 2006, с. 26-29.

13.Розанов Б.А. Радиотелескопу МГТУ 35 лет. Вестник МГТУ. Приборостроение, 1998, вып.4, с. 66-72.

14.Тимановский А.Л. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения // Дисс. к.ф. – м.н. – М.: физич. ф-т и ЦМТС МГУ, 2007, с. 7-10.