

Обнаружение потенциально-опасных предметов с помощью системы пассивного радиовидения миллиметрового диапазона

Д. П. Солдатов*

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физической электроники.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

В. В. Гладун† Ю. А. Пирогов‡

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

Р. А. Павлов§

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей физики.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

Д. А. Тищенко¶

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
факультет фундаментальной медицины, лаборатория магнитной томографии и спектроскопии.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 73.
(Статья поступила 9.05.2012; Подписана в печать 31.07.2012)*

В микроволновой лаборатории МГУ разработана и построена система пассивного радиовидения 3-мм диапазона, предназначенная для определения наличия, местоположения и пространственной ориентации скрытых под одеждой потенциально опасных предметов. Характерные особенности миллиметровых волн позволили создать пассивную систему, способную формировать радиоизображения предметов без подсветки внешним излучением в реальном масштабе времени.

PACS: 07.57.Kp.

УДК: 537.872.

Ключевые слова: миллиметровые волны, ближнее пассивное радиовидение, обнаружение потенциально-опасных предметов.

ВВЕДЕНИЕ

Возросшая в последнее время угроза проведения террористических актов потребовала разработки различных устройств, предназначенных для выявления лиц, пытающихся пронести огнестрельное и холодное оружие, взрывчатые вещества и другие потенциально-опасные предметы в места скопления людей (аэропорты, вокзалы, митинги и т. п.). К таким устройствам относятся металлодетекторы, рентгеновские сканеры, системы обнаружения взрывчатых веществ на основе газоаналитических или ядерно-физических методов, активные и пассивные системы радиовидения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

В настоящей статье описана система радиовидения миллиметрового диапазона с наклонно-коническим

сканированием, разработанная и построенная в микроволновой лаборатории МГУ с целью обнаружения потенциально-опасных предметов на фоне тела человека.

В основе пассивного радиовидения лежит принцип регистрации собственного электромагнитного излучения физических объектов и построения их изображений в диапазоне микроволн. В отличие от активных систем, в которых контраст изображения определяется только разницей в коэффициентах отражения элементов наблюдаемой сцены [1, 3, 4], в пассивных системах играют роль следующие факторы: степень нагретости тела, его излучательные свойства и температура фона, на котором объект наблюдается [2–6]. В закрытых помещениях, где температура фона близка к температуре исследуемого объекта, чувствительность пассивной методики обнаружения меньше, чем в условиях уличного наблюдения, где предметы находятся на фоне излучения очень холодного неба и создают мощный тепловой контраст. Радиояркость температуры неба зависит от погодных условий и вблизи частоты излучения, равной 94 ГГц, изменяется от 20–50 К в отсутствии облаков и тумана до 200–250 К при дожде [7]. Изображения, получаемые в активных системах, независимы от состояния окружающей сре-

*E-mail: dm.soldatov@yandex.ru

†E-mail: gladun@cmts.cmm.msu.ru

‡E-mail: yupi937@gmail.com

§E-mail: jawa@land.ru

¶E-mail: tischenko@cmts.cmm.msu.ru

ды, так как для подсвета исследуемого объекта используются широкополосные или когерентные источники миллиметрового излучения. Однако при использовании когерентных источников подсвета становится неизбежным появление различных артефактов, дифракционных пятен и бликов, с которыми приходится бороться [8]. Несомненным достоинством пассивного радиовидения является отсутствие внешнего облучения объекта — сигналом здесь является его собственное электромагнитное излучение. Следовательно, данный метод является абсолютно невозмущающим и скрытым.

1. ОСОБЕННОСТИ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Миллиметровые волны, а, следовательно, и приемники данного диапазона, обладают привлекательными характеристиками для применения в системах досмотра. Во-первых, в связи с тем, что приемники миллиметровых волн являются широкополосными по сравнению с приемниками микроволн и волн более низких частот, они обладают более высокой чувствительностью. Во-вторых, в области миллиметровых длин волн стало возможным создавать относительно малогабаритные радиометры за счет появления эффективных полупроводниковых приборов — малощумящих усилителей данного диапазона на базе полевых транзисторов с высокой подвижностью (high electron mobility transistors — НЕМТ).

Основным же преимуществом радиовидения миллиметрового диапазона является то, что оно может применяться там, где недоступны оптические, инфракрасные и терагерцевые методы наблюдения. Миллиметровые волны являются самыми короткими из радиоволн, свободно пропускаемых атмосферой, обеспечивая максимальное разрешение среди устройств всепогодного радиовидения. Эти радиоволны практически без потерь проходят сквозь неметаллические покровы, гидрометеоры и аэрозоли — дымку, туман, снег, дождь, дымовые завесы и т.п., чем допускают создание бортовых систем, позволяющих совершать слепую посадку самолетов, осуществлять навигацию кораблей, видеть объекты, скрытые непрозрачным для оптического излучения камуфляжем, обнаруживать потенциально опасные предметы, спрятанные под одеждой. Тем не менее, пространственное разрешение видеоустройств миллиметрового диапазона остается малым по сравнению с оптическими системами. Для его улучшения необходимо преодолеть принципиальный предел, обусловленный дифракцией, — релеевский порог разрешения

$$s = R \frac{1.22\lambda}{D}. \quad (1)$$

Разрешение радиометра прямо пропорционально используемой длине волны и обратно пропорционально

апертуре антенны. Соответственно, при увеличении апертуры антенны и уменьшении длины волны разрешение системы возрастает. Но апертуру нельзя увеличивать бесконечно, кроме того, она непосредственно влияет на габариты установки в целом. А уменьшение длины волны приводит к возрастанию частоты и потере всепогодных свойств миллиметрового радиовидения (малого затухания в гидрометеорах) [2, 9].

В 3-мм диапазоне при апертуре 0.5 м и на расстоянии четырех метров предельное пространственное разрешение составит порядка 0.03 м. При фиксированных значениях длины волны и размеров антенны повышение разрешения может быть достигнуто только математической обработкой полученных радиоизображений, т.е. с использованием режима сверхрелеевского разрешения, так называемого «сверхразрешения» [10, 11].

Визуальное изображение наблюдаемой сцены в системе пассивного радиовидения соответствует распределению радиояркостной температуры по поверхности исследуемого объекта или сцены. Принцип работы системы основан на использовании контраста теплового радиоизлучения объектов. Тепловое излучение носит шумовой характер и в области радиоволн имеет весьма низкую интенсивность. Спектральная плотность потока излучения абсолютно черного тела дается формулой Планка

$$f = \frac{2\pi f^2}{c^2} \cdot \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1}. \quad (2)$$

В области радиоволн, где $hf \ll kT$, формула Планка переходит в формулу Релея–Джинса

$$f = \frac{2\pi f^2}{c^2} kT. \quad (3)$$

Таким образом, интенсивность микроволнового излучения и, следовательно, сигнал на выходе квадратичного детектора, прямо пропорциональны физической температуре абсолютно черного тела, что ведет к заметному упрощению методов радиометрии и интерпретации данных. Для исследуемых объектов вводят понятие радиояркостной температуры, которая по определению равна физической температуре такого абсолютно черного тела, которое создавало бы излучение такой же интенсивности в исследуемом частотном диапазоне, что и исследуемый объект.

Контраст получаемого изображения образуется из различных физических свойств и температур наблюдаемых предметов. Излучение каждого объекта складывается из отраженного, собственного и прошедшего сквозь объект теплового излучения. Если для простоты пренебречь поглощением сигнала в атмосфере, то выражение для радиояркостной температуры, фиксируемой датчиком, определяется выражением

$$T_r = rT_1 + tT_2 + \varepsilon T_3, \quad (4)$$

где T_r — наблюдаемая радиояркость температура; T_1 — температура стороннего излучения, падающего на объект и отражающегося от него; T_2 — температура стороннего излучения, падающего на объект и проходящего через него; T_3 — температура самого объекта. Коэффициенты отражения r , пропускания t и поглощения ε в силу закона сохранения энергии связаны соотношением

$$r + t + \varepsilon = 1. \quad (5)$$

Характерны следующие значения коэффициента поглощения (излучения) для данного диапазона длин волн: для растительности $\varepsilon \approx 0.95$; для асфальта $\varepsilon \approx 0.91$; для воды $\varepsilon \approx 0.6$; для кожи человека $\varepsilon \approx 0.6$; для металлов $\varepsilon \approx 0$. Если объект состоит из хорошо поглощающего материала, то есть его коэффициент поглощения $\varepsilon \approx 1$, то его наблюдаемая радиояркость температура близка к термодинамической температуре. Если же объект хорошо отражает, то его видимая радиояркость температура будет соответствовать радиояркости температуре отражаемого излучения, например, неба.

В атмосфере происходит поглощение миллиметрового излучения. Однако вблизи некоторых частот, а именно 36, 95, 140 ГГц, существуют «окна прозрачности» атмосферы, где затухание радиоволн минимально [12]. Таким образом, в этих диапазонах обеспечивается наибольший контраст между отражающими и излучающими объектами. Так, на частоте 36 ГГц поглощение составляет 0.15 дБ/км; на частоте 95 ГГц — 0.4 дБ/км; на частоте 140 ГГц — 1.5 дБ/км.

2. СИСТЕМА РАДИОВИДЕНИЯ С НАКЛОННО-КОНИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ

Основным отличием разработанной системы радиовидения с наклонно-коническим сканированием от описанной ранее системы с коническим сканированием [13] является относительно сложный характер движения антенной системы — наклонно-конический, представляющий собой перемещение дальнего фокуса антенны по окружности с одновременным вертикальным смещением. Такое сочетание позволило расширить зону обзора до необходимых при просмотре человека размеров 60x160 см.

Система радиовидения состоит из корпуса, в котором расположены радиооптическая система, приемная матрица сенсоров, многоканальный блок обработки видеосигналов, АЦП, многоканальный блок обработки видеосигналов, блок обработки и визуализации радиоизображений, системы сканирования, устройство термостабилизации.

Радиооптическая система представляет собой эллиптическую антенну, в ближнем фокусе которой расположена приемная матрица сенсоров. Системы сканирования перемещают дальний фокус антенны по ис-

следуемой зоне. Расстояние от сканирующего зеркала до объекта исследования составляет 4 метра. Сигнал, появляющийся на выходе приемной матрицы, поступает в блок обработки видеосигналов, затем через АЦП в блок обработки и визуализации для построения по заданным алгоритмам радиоизображения и вывода его на монитор оператора.

В качестве приемной матрицы сенсоров в системе используется восьмиканальный широкополосный приемный модуль 3-мм диапазона. Его главными особенностями являются повышенная чувствительность, расширенный динамический диапазон, малые масса и габариты. Радиометрические каналы в составе матрицы представляют собой модуляционные радиометры, построенные по гетеродинной схеме. Чувствительность радиометров составляет 0.5 К при скорости обзора до 10 кадров в секунду зоны размером 30x40 см в режиме конического сканирования. В режиме наклонно-конического сканирования наблюдаемой сцены время получения радиоизображения размером 60x160 см составляет 6 секунд.

Стабильность и высокая чувствительность показаний радиометрических сенсоров обеспечиваются системой термостабилизации замкнутого типа с принудительной циркуляцией охлаждаемой жидкости, отводящей через набор элементов Пельтье тепло от матрицы микроволновых приемников.

На разработанной установке были получены радиоизображения предметов, изготовленных из металла, керамики, пластика и других материалов. На рис. 1 показаны фотографии и радиоизображения металлического предмета, скрытого под одеждой из разных материалов. Снижение контраста из-за влияния одежды практически не влияет на качество получаемых изображений. Коэффициенты затухания миллиметровых волн в различных образцах представлены в табл. 1. Спрятанные под одеждой предметы из дерева, керамики, пластика и других материалов создают меньший температурный контраст, но, тем не менее, обнаруживаемы на фоне тела человека.

На рис. 2 представлено радиоизображение человека с макетом пистолета, находящимся под одеждой. На радиоизображении обнаруженный предмет виден на фоне контура тела человека, что облегчает процедуру досмотра, позволяя идентифицировать место расположения предмета под одеждой. Для определения формы предмета можно более детально просканировать подозрительную зону в режиме с повышенным пространственным разрешением. Принцип детализации изображения основан на увеличении времени накопления сигнала за счет уменьшения зоны сканирования до размеров 30x40 см посредством только конической развертки. Наилучшее пространственное разрешение, достигаемое с помощью данной системы, составляет 1 см.

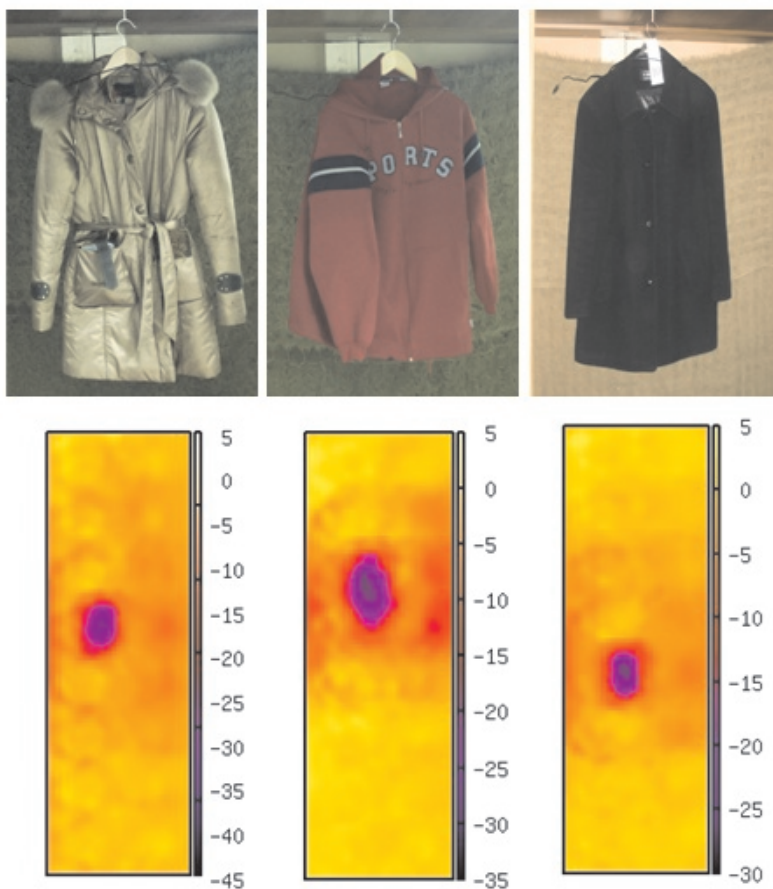


Рис. 1: Фотографии и радиоизображения металлического предмета, скрытого под одеждой из различных материалов

Таблица 1: Затухание электромагнитных волн в различных образцах (материалах)

Образец (материал)	Затухание	
	dB	[dB/мм]
Майка х/б	0.3	
Куртка спортивная утепленная	1.1	
Пальто драповое	1.8	
Куртка (полиэфир)	2.2	
Куртка (87% полиэстер 13% полиамид)	2.7	
Свитер(70% шерсть 30%полиэстер)	2.7	
Куртка строительная	2.7	
Куртка джинсовая	3.1	
Журнал глянецвый (50 стр.)	14.3	
Пластик (до 5мм)		практически отсутствует
Пенопласт		0.002
Доска сосновая сухая		0.3
Фанера		1.1
ДСП		1.1
Керамика		1.3
ДВП		1.7

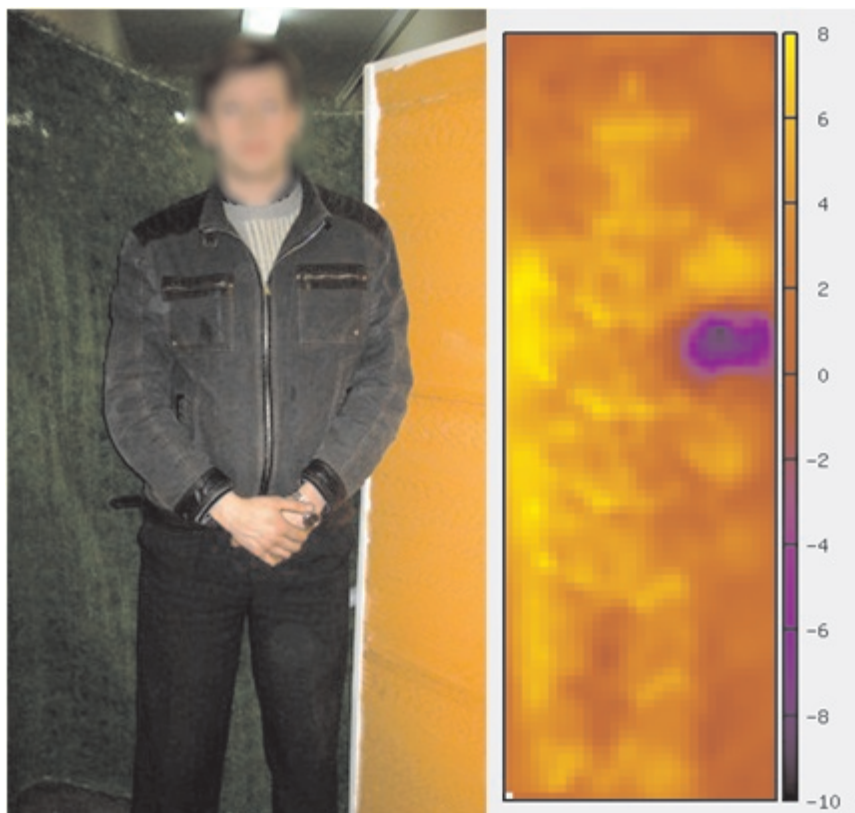


Рис. 2: Фотография и радиоизображение скрытого под одеждой макета пистолета

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными особенностями разработанной системы радиовидения являются: быстродействие, наклонно-коническое сканирование тепловых сцен, возможность селективного обзора подозрительной зоны с повышенным разрешением, формирование радиотепловой картины всего тела человека для упрощения процедуры досмотра.

Таким образом, разработанный комплекс по совокупности характеристик (действие в реальном време-

ни, высокое пространственное и температурное разрешение, широкий спектр объектов обнаружения и др.) является наиболее технически совершенным среди современных устройств ближнего пассивного радиовидения в миллиметровом диапазоне длин волн.

Работа выполнена при поддержке грантом Президента РФ N ИШ-4593.2008.2 ведущей научной школы «Системы радиовидения» и госконтрактом N 02.740.11.0230 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

-
- [1] Sheen D.M., McMakin D.L., Hall T.E., Severtsen R.H. Active millimeter-wave standoff and portal imaging techniques for personnel screening. IEEE Conference on Technologies for Homeland Security. P. 440. (2009)
- [2] Пирогов Ю.А. Изв. ВУЗов. Радиофизика. **46**, N 8-9. С. 660. (2003).
- [3] Lyons B., Entchev E., Doyle R., Curtin P., McNaboe J., Noonan M., Vazquez J., Widera A., Walshe J., Moynihan C., et al. Passive and active mm-wave people screening systems. IET Seminar on MMWave Products and Technologies. P. 45. (2006).
- [4] Petkie D. T., De Lucia F. C., Casto C., Helming P., Jacob E. L., Moyer S. K., Murrill S., Halford C., Griffin S., Franck C. Proc. SPIE. **5989**. P. 359. (2005).
- [5] Lettington A. H., Dunn D., Attia M., Blankson I. M. J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **5**. P. 103. (2003).
- [6] Appleby R., Anderton R. N. Proc. IEEE. **95**. P. 1683. (2007).
- [7] Sato M., Mizuno K. Microwave and Millimeter Wave Technologies: from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications. (In-Tech. ed. Minin I., 2012). Ch. 15.
- [8] Appleby R., Wallace H.B. IEEE transactions on antennas and propagation. **55**, N11. P. 2944. (2007).
- [9] Jaeger I., Stiens J., Koers G., Poesen G., Vounckx R. Microwave and optical technology letters. **48**, N9. (2006).
- [10] Пирогов Ю. А., Гладун В. В., Тимановский А. Л., Тущенко Д. А. Получение и обработка изображений в

системах пассивного радиовидения миллиметрового диапазона. Тр. Всероссийского семинара по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. (Н. Новгород: ИПФ РАН, 2005).

[11] Пирогов Ю. А., Гладун В. В., Тищенко Д. А., Тимановский А. Л., Шлемин И. В., Дженсен С. Ф. Журнал радиоэлектроники. N 3. (2004).

[12] Marcus M., Patten B. IEEE microwave magazine. 6. P. 54. (2005).

[13] Гладун В. В., Котов А. В., Криворучко В. И., Павлов Р. А., Пирогов Ю. А., Тищенко Д. А. Журнал радиоэлектроники. № 7. (2010).

The passive millimeter wave imaging system for detection of concealed threats

D. P. Soldatov^{1,a}, V. V. Gladun^{2,b}, R. A. Pavlov^{3,c}, Yu. A. Pirogov^{2,d}, D. A. Tischenko^{4,e}

¹Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

²Department of Photonics and Microwave Physics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

³Department of General Physics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

⁴Laboratory for Magnetic Tomography and Spectroscopy, Faculty of Basic Medicine, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^a dm.soldatov@yandex.ru, ^b gladun@cmts.cmm.msu.ru, ^c jawa@land.ru, ^d yupi937@gmail.com, ^e tischenko@cmts.cmm.msu.ru.

The 3-millimeter wave passive imaging system was developed in the microwave laboratory of MSU to detect and locate threats. Millimeter wave properties enable to design the passive system which can image objects in radiofrequency in real-time without illumination.

PACS: 07.57.Kp.

Keywords: millimeter waves, passive imaging, threats detection.

Received 9 May 2012.

Сведения об авторах

1. Солдатов Дмитрий Петрович — аспирант, тел.: (926) 227-53-42, e-mail: dm.soldatov@yandex.ru.
 2. Гладун Валерий Викторович — ведущий инженер; тел.: (495) 939-48-82, e-mail: valgladun@gmail.com.
 3. Павлов Роман Александрович — научный сотрудник; тел.: (495) 939-48-82, e-mail: jawa@land.ru.
 4. Пирогов Юрий Андреевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-48-82, e-mail: yupi937@gmail.com.
 5. Тищенко Дмитрий Александрович — программист, тел.: (926) 227-53-42, e-mail: tischenko@cmts.cmm.msu.ru.
-