

Научная статья

УДК 621.371

doi: 10.17223/7783494/1/7

Радиоволновая бесконтактная система досмотра пассажиров

Павел Валерьевич Смокотин¹, Сергей Эдуардович Шипилов², Раиль Наилевич Сатаров³,
Иван Юрьевич Кузьменко⁴, Тимур Рамильевич Муксунов⁵, Иван Сергеевич Федянин⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *ckpelectronics@gmail.com*

² *s.shipilov@gmail.com*

³ *satarov.rail@gmail.com*

⁴ *kuzmenko.ivan.yu@gmail.com*

⁵ *t0snake0mr@ya.ru*

⁶ *vanyaff@sibmail.com*

Аннотация. Разработан прототип радиоволновой бесконтактной системы досмотра на основе механически перемещаемой многоэлементной антенной решетки с приемопередающими модулями на частоте 24 ГГц. Данная система позволяет проводить зондирование человека менее чем за 3 с. По результатам зондирования на основе принципа синтеза апертуры рассчитывается радиоизображение человека с разрешающей способностью порядка 1 см. Полученные радиоизображения могут использоваться для обнаружения и распознавания скрытых под одеждой на теле человека предметов, изготовленных из металлов и диэлектриков.

Ключевые слова: радиоизображение, сканер, досмотр, безопасность

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Смокотин П.В., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р., Федянин И.С. Радиоволновая бесконтактная система досмотра пассажиров // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 43–51. doi: 10.17223/7783494/1/7

Original article

doi: 10.17223/7783494/1/7

Radio-wave non-contact passenger inspection system

Pavel V. Smokotin¹, Sergey E. Shipilov², Rail N. Satarov³, Ivan Yu. Kuzmenko⁴,
Timur R. Muksunov⁵, Ivan S. Fedyanin⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *ckpelectronics@gmail.com*

² *s.shipilov@gmail.com*

³ *satarov.rail@gmail.com*

⁴ *kuzmenko.ivan.yu@gmail.com*

⁵ *t0snake0mr@ya.ru*

⁶ *vanyaff@sibmail.com*

Abstract. To solve the problem of ensuring security in crowded places, a prototype of a radio wave non-contact inspection system based on a mechanically moved multi-element antenna array with transceiver modules at a frequency of 24 GHz was developed. This system allows to scan a person in less than 3 seconds. Based on the results of multi-angle probing based on the principle of aperture synthesis, a radio image of a person is calculated with a resolution of less than 1 centimeter. The resulting radio images can be used to detect and recognize objects hidden under clothing on the human body, made of metals and dielectrics.

Keywords: radio-image, scanner, inspection, security

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Smokotin, P.V., Shipilov, S.E., Satarov, R.N., Kuzmenko, I.Yu., Muksunov, T.R. & Fedyanin, I.S. (2023) Radio-wave non-contact passenger inspection system. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 43–51. doi: 10.17223/7783494/1/7 (In Russian).

Введение

Из-за угрозы террористических актов обеспечение безопасности в местах, где формируются большие потоки людей (аэропорты, вокзалы, массовые мероприятия и т.п.) является одной из актуальных проблем. В таких местах скопления людей необходимо своевременно обнаруживать пронос запрещенных предметов.

Наиболее защищенными от проноса запрещенных предметов объектами транспортной инфраструктуры являются аэропорты, где для досмотра пассажиров и грузов применяется целый комплекс разнообразных современных технических средств. Одним из самых эффективных устройств этих комплексов является рентгеновский интроскоп. При его использовании (в зависимости от мощности излучения) можно получить изображение не только объектов, расположенных под одеждой на теле человека, но и «заглянуть» внутрь человека. При этом необходимо отметить, что рентгеновское излучение, используемое в рентгеновских интроскопах, может быть небезопасно для здоровья человека при его частом и многократном воздействии. Таким образом, использование рентгеновского интроскопа является ограниченно функциональным.

При проведении массовых мероприятий основным техническим средством, используемым службами безопасности для досмотра людей, является досмотровый металлодетектор. Но такой металлодетектор не может обнаруживать предметы, выполненные из диэлектрических материалов, а именно к таким предметам можно отнести, например, взрывчатку.

Как альтернатива рентгеновским интроскопам и дополнение к металлодетекторам рассматривается радиоволновая бесконтактная система досмотра. Изображение, получаемое с ее помощью, позволяет обнаруживать скрытые под одеждой предметы, изготовленные из металла и диэлектрических материалов. В настоящее время в мире уже существуют подобные радиоволновые системы досмотра, напри-

мер, система Safescout (PROVISION) производства американской компании L-3 Communications [1], обеспечивающая многоракурсное зондирование объекта. В то же время аналогичные российские разработки пока на рынке оборудования для безопасности не представлены.

Основными преимуществами радиоволновой бесконтактной системы досмотра являются отсутствие ограничений по количеству досмотров и относительная простота транспортировки, настройки и монтажа. Целью разработки прототипа радиоволновой бесконтактной системы досмотра является экспериментальное моделирование технологии радиовидения.

Антенная решетка

В качестве элемента плоской антенной решетки благодаря доступности, небольшим размерам (можно легко объединять в решетку) и безопасности для человека (небольшая мощность излучения) был выбран доплеровский измеритель перемещений RSM2650 производства B+B Thermo-Technik GmbH (рис. 1, *a* – внешний вид). Он является миниатюрным радиолокационным модулем со следующими основными параметрами:

- опорная частота – $f_{\max}$ 24 GHz ... 24,250 GHz;
- излучаемая мощность – 16 дБм.

Конструктивно модуль RSM2650 состоит из следующих радиоэлектронных узлов (рис. 1, *b* – принципиальная схема):

- передающая антенна – TX;
- приемная антенна – RX;
- генератор опорной частоты – 1;
- фазовращатель – 2;
- смеситель – 3, 4;
- фильтр нижних частот (ФНЧ) – 5, 6.

Модуль RSM2650 обеспечивает возможность получения двух квадратурных составляющих принимаемого сигнала для измерения его фазы. Измеренная фаза принимаемого сигнала в дальнейшем используется для построения радиоизображения.

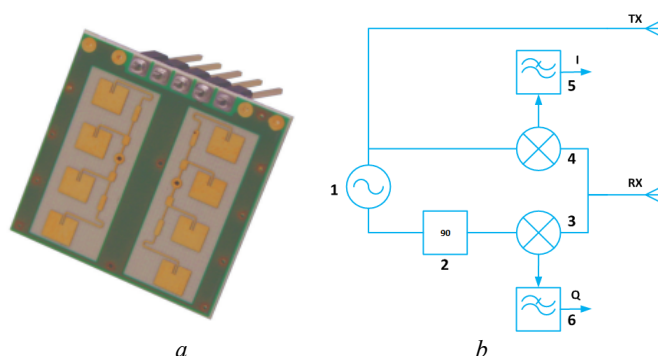


Рис. 1. Внешний вид модуля (*a*) и его принципиальная схема (*b*)

Fig. 1. Exterior view of the sensor (*a*) and its block diagram (*b*)

Для получения качественного радиоизображения необходимо наличие многоракурсных измерений исследуемого объекта. Рассчитаем необходимое количество пространственно разнесенных измерений – волновых проекций для построения радиоизображения человека. Сначала определим пространственный разнос между точками, в которых надо провести измерения с учетом теоремы Котельникова для антенной решетки. Максимальный шаг между волновыми проекциями рассчитывается по формуле

$$d = \frac{c}{2f_{\max}} = 0,006 \text{ м} = 6 \text{ мм},$$

где c – скорость света. Уменьшение шага d приводит к более высокому качеству полученного радиоизображения за счет повышения отношения сигнал/шум (ОСШ) при суммировании сигналов. Такой прием также позволяет увеличить дальность действия системы без увеличения мощности излученного сигнала. При проектировании решетки шаг d между измерениями был уменьшен с 6 до 2 мм. Тогда количество волновых проекций, необходимых для получения радиоизображения человека с рабочей зоной высотой $H = 2$ м и шириной $L = 0,8$ м, составит

$$N = \frac{HL}{d^2} = 4 \times 10^5.$$

Для увеличения пропускной способности создаваемой системы необходимо минимизировать время

измерения полного набора волновых проекций. В качестве ориентира было выбрано время, затрачиваемое при контроле человека рамкой металлодетектора на входе в аэропорт. Оно составляет около 3 с. Таким образом, необходимо реализовать 400 000 измерений отраженного сигнала за время не более чем 3 с.

Для построения системы радиовидения была выбрана схема, в которой получение полного набора волновых проекций в рабочей зоне обеспечивалось за счет совмещения механического перемещения антенной решетки по высоте рабочей зоны и ее электронного сканирования. Такой подход позволяет сократить число требуемых для зондирования модулей на 2 порядка и, как следствие, существенно снизить стоимость всей системы в целом. Антенная решетка состоит из четырех независимых подрешеток. Каждая подрешетка состоит из 12 линеек по 8 модулей, сдвинутых одна относительно другой на 2 мм по горизонтали (рис. 2). Такой сдвиг обеспечивает при вертикальном механическом перемещении решетки заданный шаг сканирования по горизонтали в 2 мм. Общая длина 4 подрешеток составляет около 80 см. Опрос модулей RSM2650 проводится последовательно. Это необходимо для исключения взаимного влияния одновременно работающих модулей RSM2650 друг на друга, т.е. одновременно в каждой подрешетке включается и опрашивается по одному модулю RSM2650.

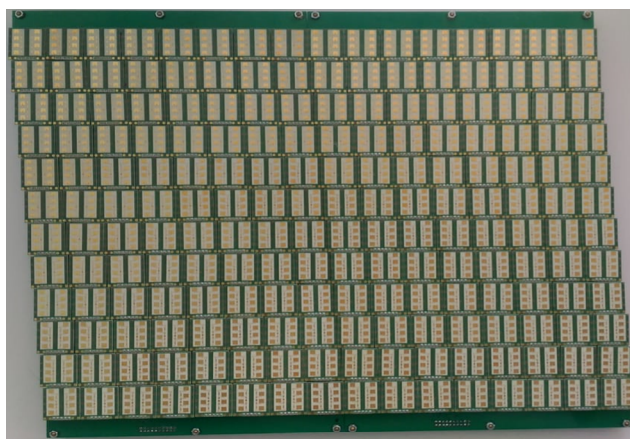


Рис. 2. Два блока антенной решетки. Каждый блок состоит из 96 модулей RSM2650

Fig. 2. Two Antenna array blocks with 96 RSM2650 sensors

Проникающая способность радиоволнового излучения

При обнаружении предметов на теле человека встает вопрос об эффективности проникновения радиоволн через одежду на опорной частоте модуля RSM2650. Эти исследования наиболее полно представлены в работах [2–10]. На рис. 3 показаны измеренные авторами значения коэффициентов однократного прохождения радиоизлучения для некото-

рых материалов, которые используются при производстве одежды и упаковочной тары или близки к ним по своим характеристикам. Здесь 1 – свободное пространство (воздух); 2 – фанера толщиной 0,5 см; 3 – ткань из микрофибры; 4 – пенопласт толщиной 2,5 см; 5 – поролон толщиной 2 см; 6 – книга толщиной 2,7 см. Так, например, книга обладает значительным поглощением и имитирует по своей проникающей способности влажное пальто из шерсти.

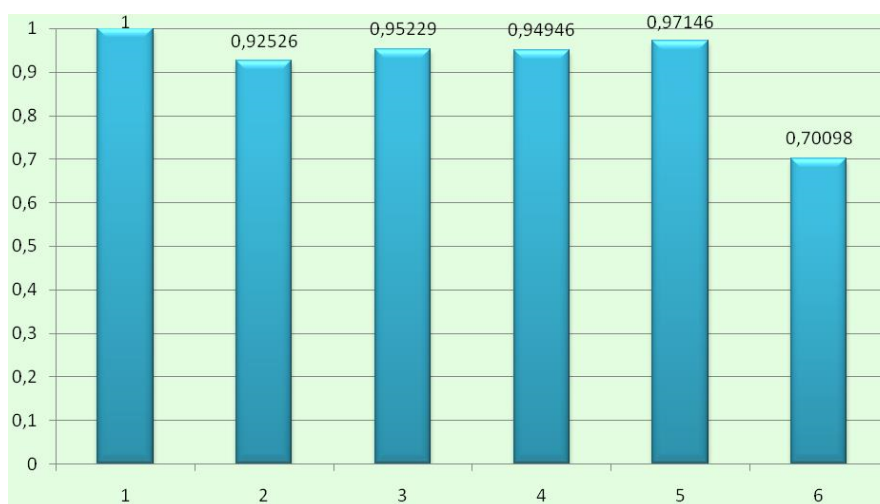


Рис. 3. Коэффициент прохождения радиоизлучения через различные препятствия

Fig. 3. Radio transmission coefficient

Из рис. 3 видно, что минимальный коэффициент прохождения (передачи) на опорной частоте модуля RSM2650 имеет значение 0,7, т.е. коэффициент прохождения на данной частоте для перечисленных материалов близок к единице. Следовательно, одежда не является серьезной преградой для частоты 24 ГГц.

Принцип построения радиоизображения

При сканировании объекта зондирования, когда матрица модулей RSM2650 перемещается в плоскости, перпендикулярной направлению на объект, принимаемый сигнал является результатом интерференции множества волн, отраженных от объекта. В роли множества интерферирующих волн выступают сигнал опорного генератора, расположенного в модуле RSM2650, и сигнал, отраженный от объекта. Полученное таким образом интерференционное радиоизображение является основой для восстановления реального распределения неоднородностей [11–14]. При этом существует возможность регулировки глубины фокусировки. В технологии радиолокации с синтезированной апертурой (РСА) для обработки радиоизображения необходимо задание аппаратной функции системы (АФС), являющейся локационным пространственно-временным откликом на точечный отражатель [15–17].

Сформулируем модель формирования АФС. Если волновые проекции регистрируются на плоскости ОХУ в точке $\mathbf{p}$, а точечный отражатель находится в точке с координатами $\mathbf{r}_0 = (\mathbf{p}_0, z_0)$, то принятый в точке наблюдения $E_0(\mathbf{p})$ сигнал без учета диаграммы направленности антенны записывается как

$$E_0(\mathbf{p}) = A_0 G^2(\mathbf{p} - \mathbf{r}_0), G(\mathbf{r}) = \exp(i k |\mathbf{r}|) / |\mathbf{r}|, k = 2\pi f_{\max} / c,$$

где G – функция Грина сферической волны, A_0 – коэффициент отражения от поверхности объекта. После применения двумерного преобразования Фурье к сигналу $E_0(\mathbf{p})$ по пространственным координатам полученный образ $E_0(\mathbf{u})$ и будет АФС.

Для восстановления радиоизображения зондируемого объекта по его интерференционной картине в радиолокации, как и в оптике, используют последовательность преобразований, которая прямо следует из спектрального подхода к задаче дифракции. Первый шаг – двумерное преобразование Фурье от интерференционной картины

$$F_n(\mathbf{u}) \Leftrightarrow f_n(\mathbf{p}).$$

Второй шаг – умножение Фурье-образа предметного поля на комплексно сопряженный Фурье-образ АФС

$$F(\mathbf{u}) = F_n(\mathbf{u}) E_0^*(\mathbf{u}).$$

И наконец, восстановленное радиоизображение находится с помощью вычисления обратного преобразования Фурье

$$f(\mathbf{p}) \Leftrightarrow F(\mathbf{u}).$$

Данный алгоритм был реализован программно и использовался для получения радиоизображений тестовых сцен при зондировании механически перемещаемой антенной решетки, состоящей из модулей RSM2650.

Прототип системы досмотра и блок регистрации волновых проекций

На рис. 4 представлен прототип системы досмотра, у которого антенная решетка перемещается со скоростью 1 м/с. Данный прототип имеет следующие параметры:

– скорость сканирования 1 м/с;

- область сканирования $0,8 \times 2$ м;
- питание 220 В;
- связь и управление по Ethernet.

Антенная решетка состоит из четырех одинаковых блоков (подрешеток) по 96 модулей RSM2650. Все блоки объединены через интерфейс Ethernet 1G в единую сеть для последующей передачи измеренных волновых проекций в модуль вычисления ра-

диоизображения. Модуль вычисления был реализован на базе ПК. Для передачи пакетов с данными между платой управления и модулем вычисления использовался протокол с квитированием на основе UDP, не допускающий потери пакетов. Для его реализации применялось IP ядро MicroBlaze фирмы Xilinx.



Рис. 4. Вид прототипа радиоволновой бесконтактной системы досмотра

Fig. 4. Prototype view of the radio-wave non-contact inspection system

В подрешетках использовалась электронная коммутация с последовательным опросом модулей RSM2650. Таким образом, одновременно в общей решетке опрашивалось 4 модуля RSM2650. Влияние одновременно работающих модулей RSM2650 друг на друга было минимальным из-за пространственного разнеса и некоторой разницы в частоте зондирования, которая по паспортным данным могла варьироваться в пределах 1% от опорной частоты. На каждый опрос одного модуля RSM2650 затрачивалось 10 мкс, которые состоят из времени установления рабочего состояния, времени измерения и времени выключения. Таким образом, опрос всей решетки проводился менее чем за 1 мс. При средней скорости вертикального сканирования 1 м/с общее время опроса рабочей зоны составило около 2 с.

Полученные радиоизображения и их анализ

Пример исходных данных в виде интерференционной картины при зондировании объекта в виде металлического шарика диаметром 1 см представлен на рис. 5, а. Эти данные использовались для построения

аппаратной функции системы. На рис. 5, б представлено его радиоизображение.

Пример металлизированного многоугольника с размерами ступеньки 5 см представлен на рис. 6. В этом многоугольнике находится отверстие квадратной формы размером 2×2 см. На рис. 6, а представлена фотография этого металлизированного многоугольника, на рис. 6, б – его интерференционная картина, по которой возможно определить форму и размеры зондируемого объекта. На представленном радиоизображении (рис. 6, в) идентифицируются не только границы фигуры, но и отверстие квадратной формы. Полученный результат позволяет оценить приблизительно детальность радиоизображения, которая с учетом качества восстановления отверстия не хуже 0,5 см.

На рис. 7 представлено восстановленное радиоизображение тестового образца имитатора взрывчатого вещества (ВВ) размерами 8×6 см, размещенного на картонной коробке. Имитатор ВВ представлял собой кусок мыла, которое имеет диэлектрическую проницаемость, близкую к диэлектрической проницаемости ВВ.

Одним из возможных применений радиоволновой бесконтактной системы является досмотр грузов в диэлектрических тарах. На рис. 8, *a* представлена интерференционная картина предметов (бутылки с водой и пластиковый пистолет), помещённых в диэлектрическую непрозрачную коробку; на рис. 8, *b* – их радиоизображение.

На рис. 9 представлены интерференционная картина и радиоизображение керамического ножа как примера холодного оружия, не регистрируемого досмотровыми металлодетекторами.

На рис. 10 представлено восстановленное радиоизображение тела живого человека с закрепленным на нем имитатором ВВ (*a*) и без него (*b*).

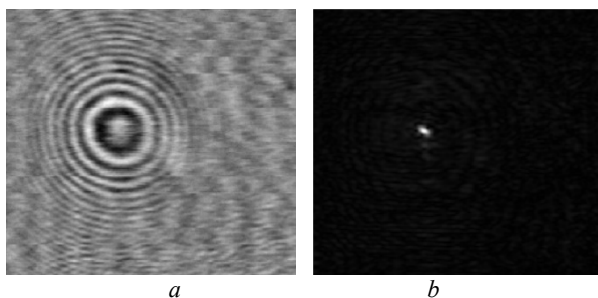


Рис. 5. Интерференционная картина металлического шарика (*a*) и его радиоизображение (*b*)

Fig. 5. Interference pattern of a metal ball (*a*) and its radio image (*b*)

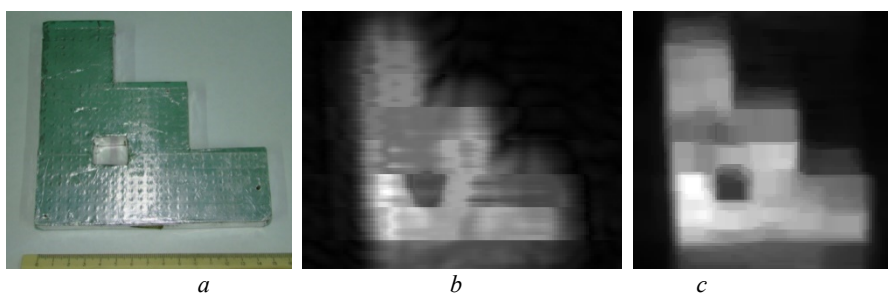


Рис. 6. Фотография металлизированного многоугольника (*a*), его интерференционная картина (*b*) и радиоизображение (*c*)

Fig. 6. Photograph of the test object (*a*), its interference pattern (*b*) and radio image (*c*)

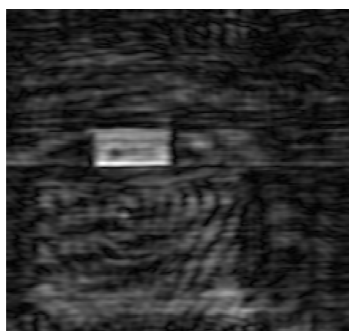


Рис. 7. Радиоизображение имитатора ВВ

Fig. 7. The radio image of the explosion simulator

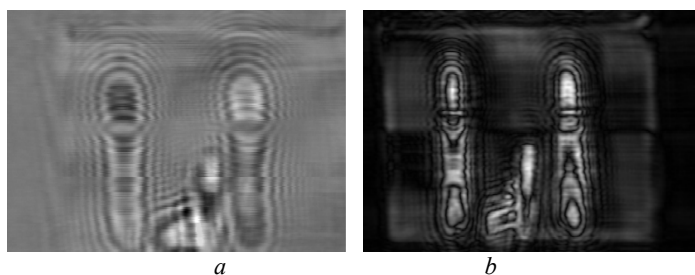


Рис. 8. Интерференционная картина (*a*) и радиоизображение (*b*) содержимого коробки

Fig. 8. Interference pattern (*a*) and radio image (*b*) of the box contents

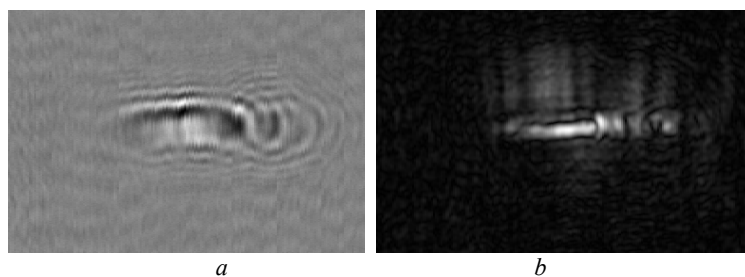


Рис. 9. Интерференционная картина (a) и радиоизображение керамического ножа (b)

Fig. 9. Interference pattern (a) and radio image of a ceramic knife (b)

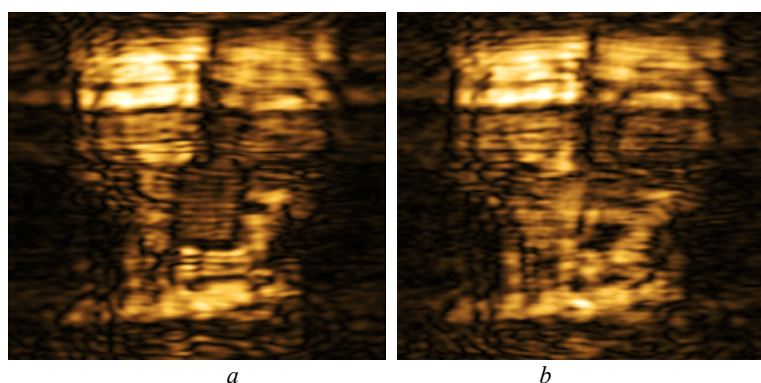


Рис. 10. Радиоизображение человека с закрепленным имитатором ВВ (a) и без него (b)

Fig. 10. Radio image of a person with a fixed BB simulator (a) and without it (b)

При сравнении этих радиоизображений (см. рис. 10, a и b) видно, что имитатор ВВ выделяется на фоне человеческого тела.

Заключение

Разработанный действующий прототип радиоволновой бесконтактной системы досмотра на основе матрицы модулей RSM2650 позволяет производить поиск скрытых под одеждой человека малоразмерных предметов без вреда для человека. Этот поиск происходит путем регистрации распределения квадратурных составляющих радиосигналов, которое оказывается необходимым и достаточным условием для построения радиоизображений зондируемых объектов методом апертурного синтеза на частоте зондирования 24 ГГц. Конструкция разработанной антенной решетки обеспечивает шаг скани-

рования по горизонтали в 2 мм, что позволило увеличить наполнение апертуры в поперечном направлении.

Разработана и экспериментально подтверждена методика построения радиоизображения зондируемого объекта по результатам одночастотной радиолокации. Прототип радиоволновой бесконтактной системы досмотра позволяет построить картину зондируемого объекта, сфокусированную на поперечную плоскость, проходящую через объект, не только по форме объекта, но и по его рельефу.

В ходе дальнейшей работы планируется внедрение автоматических алгоритмов построения радиоизображений от различных предметов (различные виды холодного и огнестрельного оружия, взрывных устройств и т.п.), в том числе и на основе алгоритмов обучения нейронных сетей.

Список источников

1. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Airport Passenger Screening Using Millimeter Wave Machines: Compliance with Guidelines*. Washington DC : The National Academies Press, 2017. V. 185. P. 10–22.
2. Федянин И.С., Клюков А.В. Доплеровский метод измерения диэлектрической проницаемости влажных материалов // Труды 5-й конференции студенческого научно-исследовательского инкубатора. Томск : Изд-во Томского государственного университета, 2008. С. 62.
3. Papathanassiou K.P., Cloude S.R. Single baseline polarimetric SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39 (11). P. 2352–2363.
4. Mette T., Papathanassiou K.P., Hajnsek I. Biomass estimation from polarimetric SAR interferometry over heterogeneous forest terrain // IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS '04. 2004. 20–24 Sept. V. 1. P. 511–514.

5. Praks J., Kugler F., Papathanassiou K., Hajnsek I., Hallikainen M. Height estimation of boreal Forest: interferometric model based inversion at L and X-band. HUTSCAT profiling scatterometer // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2007. V. 4(3). P. 466–470.
6. Cloude S.R., Papathanassiou P.K., Pottier E. Radar Polarimetry and Polarimetric Interferometry // IEICE Transactions on Electronics. 2001. V. 84(12). P. 1814–1822.
7. Kaestner A.P., Baath L.B. Microwave Polarimetry Tomography of Wood // IEEE Sensors Journal. 2005. V. 5(2). P. 209–215.
8. Cloude S.R., Papathanassiou P.K. Three-Stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry // IET Radar, Sonar and Navigation. 2003. V. 150(3). P. 125–134.
9. King R.J. Microwave electromagnetic nondestructive testing of wood // Symposium on Non-Destructive Testing of Wood. Washington State University proceedings, 1978. P. 121–134.
10. Вопросы подповерхностной радиолокации / под ред. А.Ю. Гринёва. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.
11. Головкин М.М., Почанин Г.П. Применение преобразования Хо для автоматического обнаружения объектов на георадарном профиле // Электромагнитные волны и электронные системы. 2004. № 9–10. С. 22–30.
12. Groenenboom J., Yarovsky A.G. Data processing for a landmine detection dedicated GPR // Eighth International conference on Ground Penetrating Radar. 2000. P. 367–371.
13. Franchois A., Pichot C. Microwave imaging – complex permittivity reconstruction with a Levenberg – Marquardt method // IEEE transactions on antennas and propagation. 1997. V. 45(2). P. 203–215.
14. Якубов В.П., Суханов Д.Я. Решение обратной задачи подповерхностной локации в приближении сильно преломляющей среды // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2007. № 50(4). С. 329–338.
15. Суханов Д.Я., Якубов В.П. Применение сигналов с линейной частотной модуляцией в трехмерной радиотомографии // Журнал технической физики. 2010. № 80(4). С. 115–119.
16. Якубов В.П., Мирончев А.С., Андреев А.Г., Пономарева И.О. Искусственные метаматериалы и радиотомография // Известия вузов. Физика. 2010. № 53(9). С. 17–20.

References

1. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2017) *Airport Passenger Screening Using Millimeter Wave Machines: Compliance with Guidelines*. Washington DC: The National Academies Press. 185. pp. 10–22.
2. Fedyanin, I.S. & Klokov, A.V. (2008) Doppler method for measuring dielectric permittivity of wet materials. *Proceedings of the 5th conference of the Student Research Incubator*. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University. pp. 62.
3. Papathanassiou, K.P. & Cloude, S.R. (2001) Single baseline polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 39(11). pp. 2352–2363.
4. Mette, T., Papathanassiou, K.P. & Hajnsek, I. (2004) Biomass estimation from polarimetric SAR interferometry over heterogeneous forest terrain. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS '04, 20-24 Sept. 2004*. 1. pp. 511–514.
5. Praks, J., Kugler, F., Papathanassiou, K., Hajnsek, I. & Hallikainen, M. (2007) Height estimation of boreal Forest: interferometric model based inversion at L and X-band vs. HUTSCAT profiling scatterometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 4(3). pp. 466–470.
6. Cloude, S.R., Papathanassiou, P.K. & Pottier, E. (2001) Radar Polarimetry and Polarimetric Interferometry. *IEICE Transactions on Electronics*. 84(12). pp. 1814–1822.
7. Kaestner, A.P. & Baath, L.B. (2005) Microwave Polarimetry Tomography of Wood. *IEEE Sensors Journal*. 5(2). pp. 209–215.
8. Cloude, S.R. & Papathanassiou, P.K. (2003) Three-Stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry. *IET Radar, Sonar and Navigation*. 150(3). pp. 125–134.
9. King, R.J. (1978) Microwave electromagnetic nondestructive testing of wood. *Symposium on Non-Destructive Testing of Wood. Washington State University proceedings*. pp. 121–134.
10. Grinev A.Yu. (Ed.) (2005) *Issues of subsurface radiolocation*. Moscow: Radiotekhnika Publisher. pp. 416.
11. Golovko, M.M. & Pochanin, G.P. (2004) Application of Xo transform for automatic detection of objects on GPR profile. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 9-10. pp. 22–30.
12. Groenenboom, J. & Yarovsky, A.G. (2000) Data processing for a landmine detection dedicated GPR. *Eighth International conference on Ground Penetrating Radar*. pp. 367–371.
13. Franchois, A. & Pichot, C. (1997) Microwave imaging – complex permittivity reconstruction with a Levenberg – Marquardt method. *IEEE transactions on antennas and propagation*. 45(2). pp. 203–215.
14. Yakubov, V.P. & Sukhanov, D.Ya. (2007) The solution of the inverse problem of subsurface location in the strongly refractive medium approximation. *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Radiofizika*. 50(4). pp. 329–338.
15. Sukhanov, D.Ya. & Yakubov, V.P. (2010) Application of signals with linear frequency modulation in three-dimensional radio tomography. *Journal of Technical Physics*. 80(4). pp. 115–119.
16. Yakubov, V.P., Mironchev, A.S., Andretsov, A.G. & Ponomareva, I.O. (2011) Artificial metamaterials and radio tomography. *Russian Physics Journal*. 53(9). pp. 895–899.

Информация об авторах:

Смокотин Павел Валерьевич – аспирант Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: skpelectronics@gmail.com

Шипилов Сергей Эдуардович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой радиофизики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: s.shipilov@gmail.com

Сатаров Раиль Наилевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории терагерцовых исследований Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: satarov.rail@gmail.com

Кузьменко Иван Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kuzmenko.ivan.yu@gmail.com

Муксунов Тимур Рамильевич – кандидат технических наук, инженер-исследователь научно-образовательного центра «Технологии безопасности» Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: t0snake0mr@ya.ru.

Федянин Иван Сергеевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией методов, систем и технологий безопасности Сибирского физико-технического института Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: vanyaff@sibmail.com.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Smokotin Pavel V., PhD student, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: ckpelectronics@gmail.com

Shipilov Sergey E., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), head of department, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: s.shipilov@gmail.com

Satarov Rail N., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: satarov.rail@gmail.com

Kuzmenko Ivan Yu., Cand.Sc. (Engineering), associate professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kuzmenko.ivan.yu@gmail.com

Muksunov Timur R., Cand.Sc. (Engineering), engineer-researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: t0snake0mr@ya.ru

Fedyanin Ivan S., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), head of laboratory, Siberian Physics and Technology Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: vanyaff@sibmail.com

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023