



МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДОСМОТРА В ИК- И ТГц-ДИАПАЗОНАХ

В.В.Старцев, В.К.Попов, А.В.Наумов,
АО "ОКБ АСТРОН";
ООО "Инфракристалл", Моск.обл., Лыткарино

Осознание существования террористической угрозы в отношении объектов особой важности выдвинуло задачу обеспечения этих объектов современными средствами защиты. Описан мультиспектральный комплекс обнаружения скрытно проносимых предметов в инфракрасном и терагерцевом диапазонах электромагнитных волн, приведены его основные технические и конструктивные характеристики.

Различные материалы и биологические ткани обладают различным поглощением в терагерцевом диапазоне, что обеспечивает необходимую контрастность изображений. Разработанный комплекс предназначен для обнаружения запрещенных органических, металлических и полимерных веществ при скрытом проносе в элементах одежды, в терагерцевом диапазоне радиоволн и комбинированном виде в видимом, инфракрасном, терагерцевом диапазонах. Краткий обзор развития технологии инфракрасного детектирования ранее был представлен в журнале "Фотоника" (см. Фотоника, 2017, № 3, "Мультиспектральный модуль обнаружения и анализа угроз для охраны протяженных объектов на базе ИК- и видео систем"). В компании АО "ОКБ Астрон" разработан и создан терагерцевый комплекс обнаружения запрещенных предметов. В статье описаны назначение и область применения комплекса, его основные технические и конструктивные характеристики.

ТЕРАГЕРЦЕВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Диапазон частот терагерцевого (ТГц) излучения занимает промежуточное положение между инфракрасной (ИК) и микроволновой областями электромагнитного спектра (рис.1). Условно границами ТГц-диапазона считаются частоты 0,02 ТГц и 10,00 ТГц [1]. Этот частотный интервал занимает часть электромагнитного спектра между инфракрасным (ИК) и микроволновым диапазонами, поэтому его часто также называют дальним ИК-

IR AND THZ-RANGES MULTISPECTRAL SCREENING SYSTEM

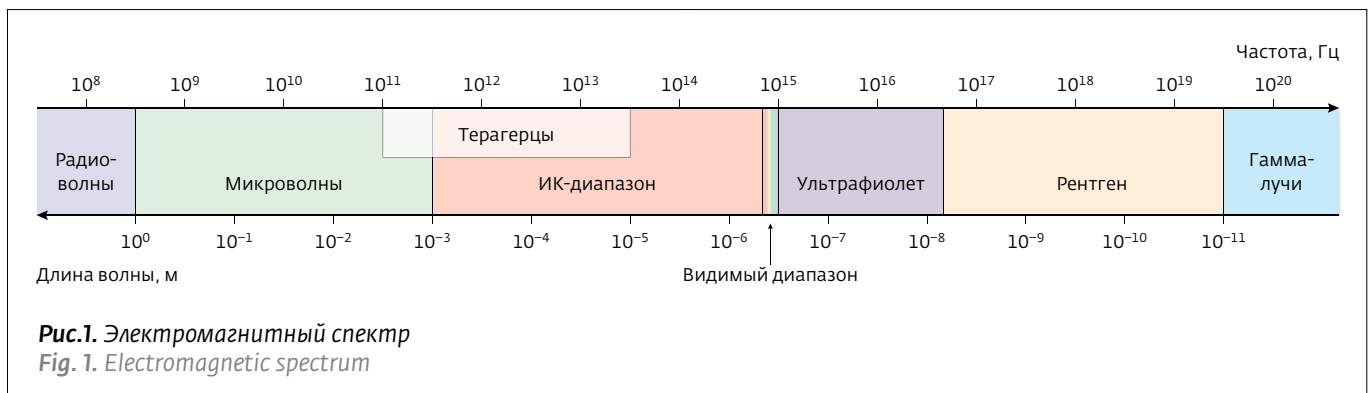
V.V.Startsev, V.K.Popov, A.V.Naumov,
JSC "OKB ASTRON",
LLC "Infrakristall", Moscow Region, Lytkarino

Awareness of the existence of terrorist threats against the facilities of particular importance has placed a priority on the task of providing these facilities with modern means of protection. A multispectral complex for detecting concealed objects in the infrared and terahertz ranges of electromagnetic waves is described, as well as its main technical and design characteristics are given.

Different materials and biological tissues have different absorption in the terahertz range, which provides the necessary contrast of images. The developed complex is designed to detect forbidden organic, metallic and polymeric substances with concealed carrying in clothing elements, in the terahertz range of radio waves and in a combined form in the visible, infrared, and terahertz ranges. A brief review of the development of infrared detection technology was previously presented in the journal "Photonics" (see Photonics, 2017, No. 3, "IR and video system based multispectral module of detection and analysis of threats for the protection of extended objects"). A terahertz complex for detecting forbidden items has been developed and created by JSC "OKB Astron". This article describes the purpose and scope of the complex, its main technical and design characteristics.

TERAHERTZ RADIATION

The frequency range of terahertz (THz) radiation ranks an intermediate position between the infrared (IR) and microwave regions of the electromagnetic spectrum (Fig. 1). Conditionally, the limits of the THz range are the frequencies from 0.02 THz to 10.00 THz [1]. This frequency interval occupies a part of the electromagnetic spectrum between the infrared (IR) and microwave ranges, so it is often also called the far IR or submillimeter range. The spectra of complex organic molecules (molecules of proteins and DNA, explosives, etc.) lie in the terahertz range.



или субмиллиметровым диапазоном. В терагерцевом диапазоне лежат спектры сложных органических молекул (молекулы белков и ДНК, взрывчатых веществ и др.).

Терагерцевое излучение является неионизирующим, в отличие от рентгеновского излучения. Биологические ткани обладают различным поглощением в данном диапазоне, что позволяет обеспечить контрастность снимков. По сравнению с видимым и ИК-излучением терагерцевое излучение менее подвержено рассеянию. В результате в этом диапазоне прозрачны многие сухие диэлектрические материалы, такие как ткани, дерево, бумага, пластмассы. Поэтому терагерцевое излучение можно использовать для неразрушающего контроля материалов, сканирования в аэропортах и прочих контролируемых службах. В то же время длина волны излучения достаточно мала, чтобы обеспечить субмикронное пространственное разрешение при использовании свободно распространяющегося излучения. Молекулы различных веществ имеют свои уникальные резонансные линии в терагерцевом спектре, которые можно использовать для точной идентификации. Это позволяет проводить идентификацию молекул по их спектральным "отпечаткам". В сочетании с получением изображения в терагерцевом диапазоне это позволяет определить не только форму, но и состав исследуемого объекта.

Терагерцевое излучение может быть детектировано во временной области, т.е. может быть измерена как амплитуда, так и фаза электромагнитного поля. Это позволяет напрямую измерять вносимый исследуемым объектом сдвиг фаз, а значит позволяет исследовать быстропротекающие процессы. Особенность терагерцевого анализа заключается в том, что он обладает возможностью одновременно измерять амплитуду и фазу волны. В обычных спектроскопах, используемых службами контроля скрытно проносимых пред-

Terahertz radiation is non-ionizing, in contrast to X-ray radiation. Different biological tissues have different absorption in this range, which allows for the contrast of the images. Compared with visible and IR radiation, terahertz radiation is less susceptible to scattering. As a result, many dry dielectric materials, such as textiles, wood, paper, plastics, are transparent in this range. Therefore terahertz radiation can be used for non-destructive material control, scanning at airports and other controlled services. Furthermore, the wavelength of the radiation is sufficiently small to provide submicron spatial resolution when using freely propagating radiation. Molecules of different substances have their own unique resonance lines in the terahertz spectrum, which can be used for accurate identification. This makes it possible to identify the molecules by their spectral "imprints". In combination with obtaining an image in the terahertz range, this makes it possible to determine not only the shape, but also the composition of the object under study.

Terahertz radiation can be detected in the time domain, i.e., it can be measured as the amplitude and phase of the electromagnetic field. This makes it possible to directly measure the phase shift introduced by the object under investigation, and therefore allows one to investigate fast processes. The peculiarity of terahertz analysis is that it has the ability to simultaneously measure the amplitude and phase of a wave. In conventional spectroscopes used by the services of control of concealed items, only the intensity of radiation at certain frequencies is measured. Terahertz experiments often include measurements of the temporal characteristics of the electromagnetic field of terahertz pulses that interacted with the sample (i.e., reflected or passed through). The Fourier transform applied to these time domain data provides information on the phase and amplitude of



метов, измеряют только интенсивность излучения на определенных частотах. Терагерцевые эксперименты часто включают в себя измерения временных характеристик электромагнитного поля терагерцевых импульсов, которые взаимодействовали с образцом (т.е. отразились или прошли через него). Преобразование Фурье, примененное к этим данным временной области, позволяет получить информацию о фазе и амплитуде импульса, а также множество дополнительной информации об образце, с которым взаимодействовал терагерцевый импульс [2–4].

ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК

Первые эксперименты, связанные с детектированием ТГц-излучения, проводились еще в 1897 году Хенриком Рубенсом и Фоксом Николасом [5]. Тогда они решали задачу определения спектрального состава излучения абсолютно черного тела с помощью болометра. Намного позднее, в 1975 году, Аустон [6] разработал генератор импульсного ТГц-излучения, построенный на основе фотопереключателя – фотопроводящей антенны, возбуждаемой фемтосекундными лазерными импульсами оптического диапазона. Создание в 80-х годах мощных импульсных лазеров, в частности, фемтосекундных, т.е. генерирующих импульсы длительностью порядка 100 фс ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$), открыло путь для разработки компактных источников терагерцевого излучения, основанных на взаимодействии лазерного излучения с веществом. Выяснилось, что терагерцевое излучение можно получить за счет нелинейного преобразования высокоинтенсивного лазерного излучения в кристаллах (генерация разностной частоты), а также за счет некоторых линейных эффектов, таких как индуцированная лазерным импульсом генерация носителей в полупроводниках.

В конце 80-х годов свершился прорыв в терагерцевых исследованиях: был впервые продемонстрирован метод терагерцевой спектроскопии во временной области (Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz TDS). Этот метод основан на генерации и детектировании когерентного терагерцевого излучения с помощью импульсов одного и того же лазера. В отличие от других методов, где измеряется только огибающая импульса или мощность излучения, терагерцевая спектроскопия во временной области позволяет с высоким разрешением непосредственно детектировать электрическое поле терагерцевого импульса, длительность которого – всего порядка 1 пс (10^{-12} с). Непосред-

ственно, а также разнообразия дополнительной информации о образце, с которым терагерцевый импульс взаимодействовал [2–4].

HISTORY AND STATE OF THE ART DEVELOPMENTS

The first experiments related to the detection of THz radiation were carried out back in 1897 by Henrik Rubens and Fox Nicholas [5]. At that time they have been solving the problem of determining the spectral composition of the radiation of an absolute black body using a bolometer. Much later, in 1975, Auston [6] developed a generator of pulsed THz radiation, built on the basis of a photo-switch: a photoconductive antenna excited by femtosecond laser pulses of the optical range. The creation of powerful pulsed lasers, in particular, femtosecond lasers generating pulses of duration about 100 fs ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) in the 80's opened the way for the creation of compact sources of terahertz radiation, based on the interaction of laser radiation with the substance. It was found that terahertz radiation can be obtained through the nonlinear conversion of high-intensity laser radiation in crystals (generation of a difference frequency), and also due to certain linear effects, such as laser-induced carrier generation in semiconductors.

At the end of the 1980s, a breakthrough in terahertz studies occurred: Terahertz Time-Domain Spectroscopy (THz TDS) method was demonstrated for the first time. This method is based on the generation and detection of coherent terahertz radiation using pulses from the same laser. Unlike other methods, where only the pulse envelope or the radiation power is measured, terahertz time-domain spectroscopy allows for the direct detection of the electric field of a terahertz pulse with a high resolution, the duration of which is only about 1 ps (10^{-12} s). Direct measurement of the electric field makes it possible to extract information on the phase shift of the terahertz field when it interacts with the object, and thus offers opportunities for studying ultrafast processes (occurring over a fraction of picoseconds).

The development of laser technology, the creation of installations capable of generating stable and powerful ultrashort laser optical pulses, has led to the further development of THz spectroscopy [7, 8]. The first studies in this field were conducted by Martin Nuss et al. at the Bell Labs in the early 1990s. Historically, the first leader in terahertz studies was the research team from the Rensselaer Poly-



ственное измерение электрического поля позволяет извлечь информацию о сдвиге фазы терагерцевого поля при его взаимодействии с объектом, а значит, открывает возможности для исследования сверхбыстрых (происходящих за доли пикосекунд) процессов.

Развитие лазерной техники, создание установок, способных генерировать стабильные и мощные ультракороткие лазерные оптические импульсы, привело к дальнейшему развитию ТГц-спектроскопии [7, 8]. Первые исследования в этой сфере провели Мартин Нусс и его коллеги в лабораториях Bell Labs в начале 1990-х годов. Исторически первым лидером в терагерцевых исследованиях стала исследовательская группа из Ренселлеровского политехнического института во главе с доктором Сичен Чжань. Ренселлеровский политехнический институт одним из первых открыл отдельную лабораторию, которая занимается только терагерцевыми исследованиями. На конференции CLEO (Conference on Lasers and Electro-Optics) в 2005 году Сичен Чжань и его коллеги сделали доклад о первых результатах применения терагерцевых волн для выявления взрывчатых веществ и биологического оружия. Используя терагерцевое излучение на частоте 0,3 ТГц, они сумели дистанционно идентифицировать образцы муки, соли, соды и спор бактерий.

Компания TeraView, Кембридж (Англия), выделилась из исследовательской лаборатории Toshiba в начале 2001 года. Сотрудники TeraView первыми провели ряд экспериментов по многослойному сканированию полупроводниковых микросхем, что уже открывало перед новой тех-

nic Institute, headed by Dr. Xi-Cheng Zhang. The Rensselaer Polytechnic Institute was one of the first to open a separate laboratory, which only deals with terahertz research. At CLEO (Conference on Lasers and Electro-Optics) in 2005, Xi-Cheng Zhang et al. made a report on the first results of using terahertz waves to detect explosives and biological weapons. Using terahertz radiation at a frequency of 0.3 THz, they were able to remotely identify samples of flour, salt, soda and bacteria spores.

TeraView, Cambridge (England), separated from the Toshiba research laboratory in early 2001. TeraView researches were the first to conduct a series of experiments on multi-layer scanning of semiconductor chips, which has already offered opportunities of practical use of the new technology in non-destructive testing.

StarTiger research group (Space Technology Advancements by Resourceful, Targeted and Innovative Groups of Experts and Researchers) was founded in 2002 by the European Space Agency based on the Rutherford and Appleton lab (England, Oxford). StarTiger Group has obtained the world's first terahertz photo of a human hand. The sensor developed by StarTiger Group uses terahertz radiation of 2 frequency bands: 0.25 and 0.30 THz. Thus, an image is obtained in two spectra and a contrast is created between the materials with different transmittance and reflection parameters in different spectra. The main advantage of this sensor is due to the fact that it does not emit electromagnetic waves. This is a passive camera of the terahertz range emitted by almost all objects, both biological and non-living ones.



нологией перспективы практического использования в дефектоскопии.

Исследовательская группа StarTiger (Space Technology Advancements by Resourceful, Targeted and Innovative Groups of Experts and Researchers) была основана в 2002 году Европейским космическим агентством на базе лаборатории Резерфорда и Эплтона (Англия, Оксфорд). Группа StarTiger получила первую в мире терагерцевую фотографию руки человека. Сенсор, разработанный группой StarTiger, использует терагерцевое излучение 2 диапазонов частот – 0,25 и 0,30 ТГц. Таким образом, получается изображение в двух спектрах и создается контраст между материалами с различными параметрами пропускания и отражения в разных спектрах. Основное достоинство такого сенсора связано с тем, что он не излучает электромагнитные волны. Это пассивная камера терагерцевого диапазона, который испускается практически всеми объектами, как биологическими, так и не живыми.

Оборонная компания QinetiQ из Великобритании в те же годы разработала также двухспектральный терагерцевый сенсор. Поскольку сенсор функционирует на двух частотах – 250 и 300 гигагерц, то становится возможным различать материалы, используя их оптические характеристики, например отражающую способность. В терагерцевом спектре отражающая способность тела снижается, а излучательная способность повышается с ростом частоты излучения. Эту особенность можно использовать для того, чтобы снизить число ложных тревог. Удалось получить изображение различных объектов через разные материалы – ножи и неметаллические предметы, спрятанные в карманах и газете.

Английская компания ThruVision (выделилась из лаборатории Резерфорда и Эплтона в начале 2000-х годов) в 2008 году разработала новый тип ТГц-детектора для индустрии безопасности и провела его испытания. В основе детекторов лежит использование микроструктур на основе GaAs и GaInAs с фотонными кристаллами. Детектор позволяет улавливать излучение в диапазоне от нескольких сот гигагерц до нескольких терагерц и имеет чувствительность на уровне пиковатт. Особенно ценным является налаженное промышленное производство матриц детекторов терагерцевого диапазона этой фирмой. Достоинством данной технологии является то, что она пассивная и позволяет получать изображения с помощью излучения самого объекта. Детекторы работают при комнатной температуре с частотой больше

During the same years, QinetiQ Defense Company from the UK has also developed a two-spectral terahertz sensor. Since the sensor operates at two frequencies, 250 and 300 GHz, it becomes possible to distinguish materials using their optical characteristics, for example, reflectivity. In the terahertz spectrum, the reflectivity of the body decreases, and the emissivity increases with increasing radiation frequency. This feature can be used to reduce the number of false alarms. It was possible to obtain the image of various objects through different materials: knives and non-metallic objects, hidden in pockets and newspaper.

The English company ThruVision (separated from the Rutherford and Appleton lab in the early 2000s) developed and tested a new type of THz detector for the security industry in 2008. The detectors are based on the use of GaAs and GaInAs based microstructures with photonic crystals. The detector allows capturing radiation in the range from several hundred gigahertz to several terahertz and has sensitivity at the picowatt level. Especially valuable is the established industrial production of matrixes of terahertz range detectors by this company. The advantage of this technology is that it is passive and allows you to obtain images using the radiation of the object itself. The detectors operate at room temperature with a frequency of more than 1 Hz, which allows you to capture moving objects.

The basics of using a combined visible and terahertz image in the early 2000s were suggested by Rick Blum, a professor at LeHigh University (USA). The resulting combined image gives more information than is contained in each original image separately. The combined image has enough information to see, for example, a weapon concealed under clothing. The basic idea of combining two images is as follows. The digital pattern of the original image is subjected to wavelet transform, superimposed by a terahertz image. The inverse wavelet transform allows you to obtain a combined image. This approach was implemented by us in the development of the complex.

Nowadays, terahertz technology is developing as a completely new diagnostic direction. Terahertz waves allow us to see through many optically opaque materials. With the help of terahertz radiation it is possible to obtain a picture of the structure similar to the X-ray, but without the use of potentially dangerous X-ray radiation. Terahertz sensor is a passive sensor and absolutely harm-

1 Гц, что позволяет снимать движущиеся объекты.

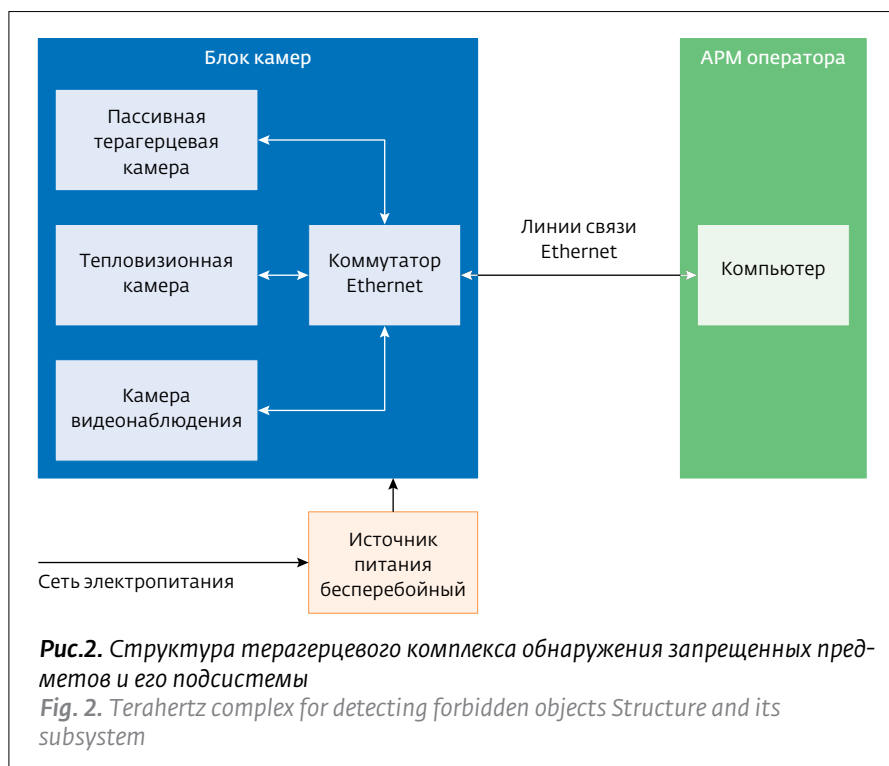
Основы применения комбинированного видимого и терагерцевого изображения в начале 2000-х годов предложил Рик Блум, профессор университета LeHigh (США). Полученное им комбинированное изображение дает больше информации, чем содержится в каждом исходном изображении по отдельности. На комбинированном изображении достаточно информации, чтобы видеть, например, оружие, скрытое под одеждой. Основная идея комбинирования двух изображений заключается в следующем. Цифровой образ исходного изображения подвергается вейвлет-преобразованию (Wavelet transform), на который накладывается терагерцевое изображение. Обратное вейвлет-преобразование позволяет получить комбинированное изображение. Такой подход был реализован нами при разработке комплекса.

Сегодня терагерцевая технология развивается в качестве абсолютно нового диагностического направления. Терагерцевые волны позволяют видеть сквозь многие оптически непрозрачные материалы. С помощью терагерцевого излучения можно получить снимок, по структуре подобный рентгеновскому, но без использования потенциально опасного рентгеновского излучения. Терагерцевый сенсор представляет собой пассивный датчик и абсолютно безвреден для человека, так как источником сигналов здесь является естественное излучение объектов. В аэропортах терагерцевый сенсор можно использовать для обнаружения оружия, спрятанного под одеждой. Причем в отличие от детекторов металла, которые используются сейчас, терагерцевый сенсор способен заметить и неметаллическую взрывчатку [9–14].

СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА

В состав созданного на АО "ОКБ Астрон" терагерцевого комплекса обнаружения запрещенных предметов (рис.2) входит:

- терагерцевая камера;
- камера видеонаблюдения;
- тепловизионная камера;
- АРМ оператора;

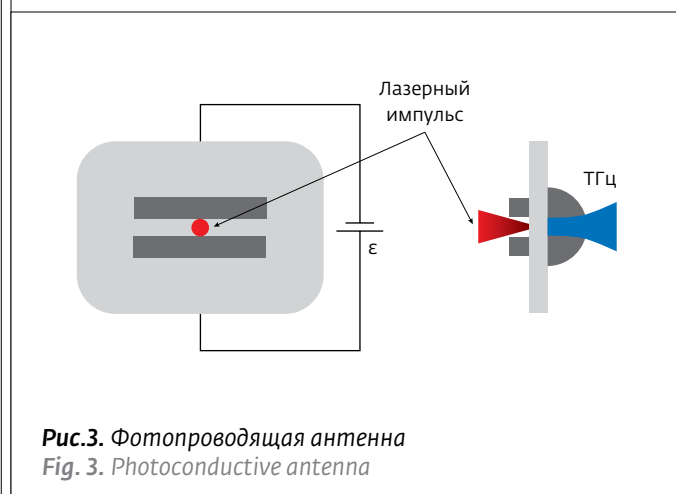


less to human, since the source of signals here is the natural radiation of the objects. At airports, a terahertz sensor can be used to detect weapons concealed under clothing. Moreover, unlike metal detectors, which are used now, a terahertz sensor is also capable of detecting non-metallic explosives [9–14].

COMPLEX STRUCTURE

The terahertz complex for detecting forbidden objects created by JSC "OKB ASTRON" (Fig. 2) includes:

- Terahertz camera.





- средства передачи информации от средств досмотра на АРМ оператора;
- источник бесперебойного питания.

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА КОМПЛЕКСА ОБНАРУЖЕНИЯ

Фотопроводящие антенны

Фотопроводящая антенна (ФП-антенна, photoconducting switch) является одним из наиболее часто используемых генераторов и приемников терагерцевого излучения. ФП-антенна состоит из двух металлических электродов (рис.3), расположенных на некотором расстоянии друг от друга на полупроводниковой подложке. К электродам прикладывается напряжение порядка нескольких киловольт. При освещении зазора между электродами ультракоротким лазерным импульсом концентрация носителей заряда в полупроводнике резко возрастает на короткое время (порядка единиц или десятков пикосекунд). Для эффективного поглощения лазерного излучения с освобождением носителей энергия фотона лазерного излучения должна превышать ширину запрещенной зоны полупроводника. Возникшие свободные носители ускоряются приложенным к зазору полем, в результате чего возникает кратковременный импульс тока, который и является источником терагерцевого излучения. Таким образом, лазерный импульс служит сверхбыстрым переключателем для антенны, переводящим ее из изолирующего в проводящее состояние. Длительность импульса тока и спектр испускаемой терагерцевой волны определяется временем жизни носителей в полупроводнике.

В реальной ситуации энергия терагерцевого импульса испытывает насыщение при увеличении энергии лазерного импульса. Это связано с тем, что фотоиндуцированные носители экранируют поле смещения. Увеличение поля смещения тоже наталкивается на ограничения, связанные с возможным электрическим пробоем подложки. Поле электрического пробоя составляет около 400 кВ/см для арсенида галлия (GaAs).

Приемник излучения

Выбор приемника излучения (ПИ) и длины волны, на которой он будет работать, определяет все остальные элементы конструкции изделия. Современная техника обнаружения взрывчатых (ВВ), отравляющих (ОВ) и наркотических (НВ) веществ в основном использует методы забора пробы воздуха и его хроматографический анализ. Наличие характерных полос поглощения в терагерцевой

- Surveillance camera.
- Thermal imaging camera.
- Operator's AWS.
- Means of transferring information from the means of inspection to the operator's workstation
- Uninterruptible power supply system.

ELEMENT BASE OF THE DETECTION COMPLEX

Photoconductive antennas

Photoconductive antenna (PC-antenna, photoconducting switch) is one of the most commonly used terahertz radiation generators and receivers. The PC-antenna consists of two metal electrodes (Fig. 3), located at some distance from each other on a semiconductor substrate. A voltage of the order of several kilovolts is applied to the electrodes. When the gap between electrodes is illuminated by an ultrashort laser pulse, the density of charge carriers in a semiconductor increases sharply for a short time (of the order of one or tens of picoseconds). For effective absorption of laser radiation with the release of carriers, the energy of laser radiation photon should exceed the width of the semiconductor forbidden band. The resulting free carriers are accelerated by a field applied to the gap, resulting in a short-time current pulse, which is the source of terahertz radiation. Thus, the laser pulse serves as an ultrafast switch for the antenna, which transfers it from the insulating state to the conducting state. The duration of the current pulse and the spectrum of the emitted terahertz wave are determined, basically, by the lifetime of the carriers in the semiconductor.

In a real-world situation, the energy of the terahertz pulse experiences saturation with increasing energy of the laser pulse. This is due to the fact that the photoinduced carriers shield the displacement field. The increase in the displacement field also encounters the limitations associated with possible electrical breakdown of the substrate. The electric breakdown field is about 400 kV/cm for gallium arsenide (GaAs).

Radiation receiver (RR)

The selection of the radiation receiver (RR) and the wavelength at which it will operate determines all other elements of the product design. Modern techniques for detecting explosive (ES), toxic (TS) and narcotic (NS) substances mainly apply the methods of sampling air and its chromatographic analysis. The presence of characteristic absorp-

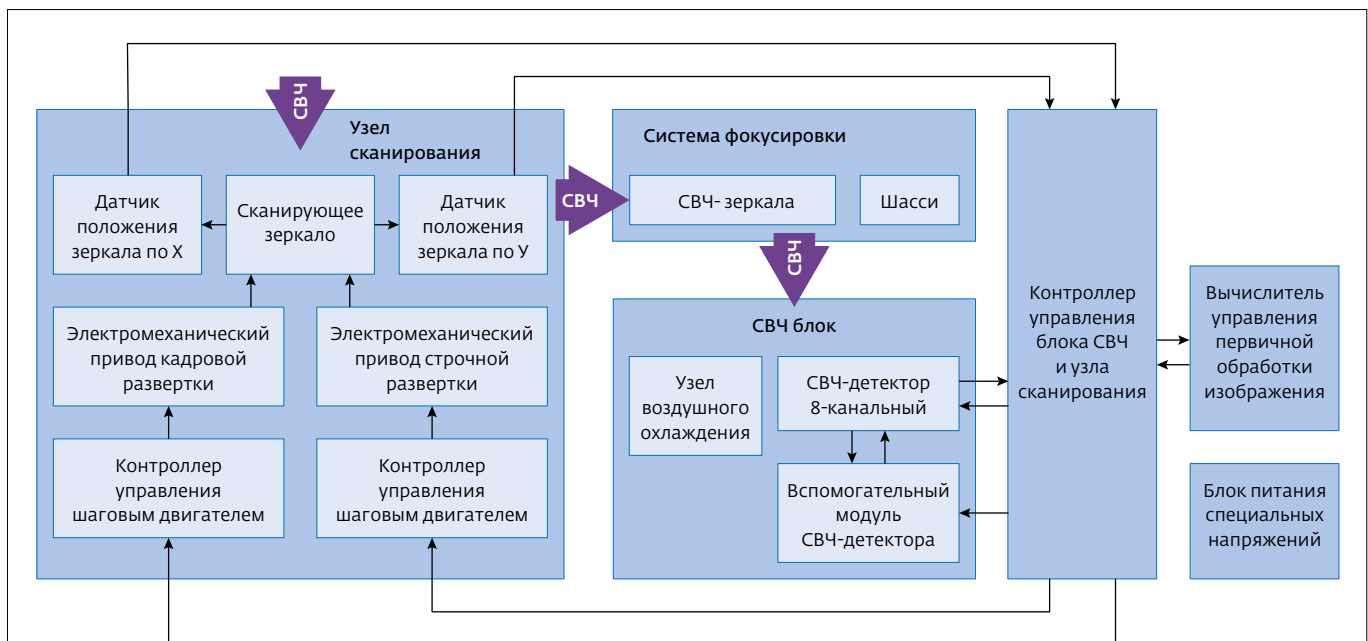


Рис.4. Структурная схема терагерцевой камеры
Fig. 4. Structural diagram of the terahertz camera

области спектра у ВВ, ОВ и НВ, а также отсутствие такого поглощения у материалов контейнера указывают на перспективность применения ТГц-излучения для их обнаружения спектральными методами и на возможность разработки и создания стационарных и портативных систем безопасности на основе терагерцевого видения.

Основным вопросом при выборе приемника является метод использования в активном или пассивном режиме. Однако существуют значительные трудности в изготовлении источников терагерцевого излучения для подсветки в активном режиме. Разработанный нами комплекс детектирует собственное терагерцевое излучение объектов без дополнительной подсветки.

СТРУКТУРА ТЕРАГЕРЦЕВОЙ КАМЕРЫ

Терагерцевая камера (ТГцК) состоит из блоков (рис.4):

- Узел сканирования.
- Система фокусировки.
- СВЧ блок.
- Контроллер управления.
- Вычислитель управления и первичной обработки изображения.

Система фокусировки и оптическая схема

Зеркальные системы (ЗС) имеют значительные преимущества перед линзовыми системами.

tion bands in the terahertz region of the spectrum in ES, TS and NS, as well as the absence of such absorption in the container materials, indicate the promise of using THz radiation for their detection by spectral methods, as well as the possibility of developing and creating stationary and portable security systems based on Terahertz vision.

The main issue in choosing a receiver is the method of use in the active or passive mode. However, there are significant difficulties in the production of terahertz radiation sources for backlighting in the active mode. The complex developed by us detects its own terahertz radiation of objects without additional illumination.

TERAHERTZ CAMERA STRUCTURE

The terahertz camera (THZC) consists of the following units (Fig. 4):

- Scanning unit
- Focusing system
- Microwave units
- Control controller
- Control calculator and primary image processing.

Focusing system and optical scheme

The mirror systems (MS) take significant precedence over the lens systems. They consist of reflective surfaces that do not introduce chromatic aber-

Они состоят из отражающих поверхностей, не вносящих хроматических aberrаций, поэтому чисто зеркальные системы наилучшим образом применяют в ультрафиолетовой (УФ) и инфракрасной (ИК) областях спектра. При сравнительно несложных конструкциях ЗС можно получить достаточно совершенную коррекцию сферической aberrации. Эти системы имеют высокую светосилу и разрешающую способность при большей компактности. Поскольку оптическое стекло не работает в ТГц-области спектра излучения, компоненты оптической схемы ЗС были выполнены нами из металла.

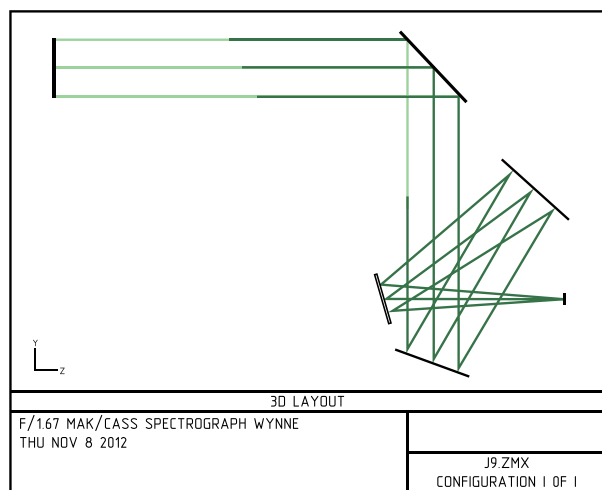
Система фокусировки терагерцевого потока состоит из 4 алюминиевых зеркал, установленных на жестком шасси. Входное зеркало плоское – сканирующее; узел сканирования обеспечивает механическую развертку потока терагерцевого излучения от объекта на приемный детектор. Второе и четвертое зеркала цилиндрические, а третье – торическое. Первое зеркало является сканирующим, оно обеспечивает получение изображения необходимого пространства предметов и передает изображение на поверхность второго зеркала, которое формирует световое пятно, передаваемое на приемник излучения (рис.5). Коррекция искажений оптической системы выполнена по методу гауссовской квадратуры, при которой плотность трассируемых лучей определяется числом лучей, расположенных вдоль радиуса. Максимальное число равно 18. Этого достаточно для aberrаций зрачка вплоть до 36 порядка.

rations, so purely mirror systems are best used in the ultraviolet (UV) and infrared (IR) spectral regions. With relatively simple MS designs, it is possible to obtain a rather perfect correction for spherical aberrations. These systems have a high aperture ratio and resolution, with greater compactness. Since the optical glass does not work in the THz region of the emission spectrum, the components of the MS optical scheme were made of metal.

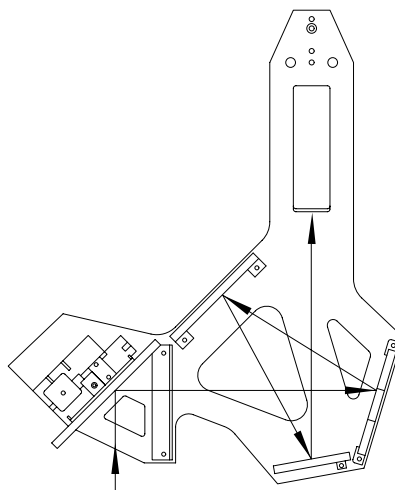
The first mirror is scanning, it provides an image of the necessary space of objects, and transfers the image to the surface of the second mirror, which forms a light spot transmitted to the radiation receiver (Fig. 5). Correction of distortions of the optical system is performed by the method of Gaussian quadrature, wherein the density of traced rays is determined by the number of rays located along the radius. The maximum number is 18. This is sufficient for pupil aberrations up to 36 orders of magnitude.

The focusing system provides the concentration of the terahertz radiation flux from the object to a ruler of 8 conical waveguides of the receiving detector. The terahertz flux focusing system consists of 4 aluminum mirrors mounted on a rigid chassis. The flat input mirror is scanning; the scanning assembly provides a mechanical sweep of the terahertz radiation flux from the object to the receiving detector. The second and fourth mirrors are cylindrical, and the third one is toric.

The diameter of the focused spot of the terahertz radiation flux is approximately equal to the



a)



b)

Рис.5. Оптическая схема терагерцевой камеры (а) и шасси оптической системы терагерцевой камеры с зеркалами (б)
Fig. 5. Optical scheme of the terahertz camera (a) and the terahertz camera optical system chassis with mirrors (b)

Система фокусировки обеспечивает концентрацию потока ТГц-излучения от объекта на линейку из 8 конических волноводов приемного детектора. Диаметр сфокусированного пятна потока терагерцевого излучения примерно равен диаметру входного отверстия конического волновода рупорной антенны приемного детектора, около 7 мм. Это обеспечивает прием всего терагерцевого потока, поступающего от объекта на входное окно ТГцК, что обеспечивает получение максимальной чувствительности системы.

СВЧ-блок, приемник излучения

Приемником потока терагерцевого излучения является СВЧ-блок, который получает терагерцевый сигнал от системы фокусировки. СВЧ-блок состоит из восьмиканального СВЧ-детектора, вспомогательного модуля и узла воздушного охлаждения. СВЧ-детектор состоит из восьми идентичных каналов, работающих одновременно для получения восьмикратного повышения скорости сканирования.

СВЧ-приемник выполнен по гетеродинной схеме. Частота гетеродина 125 ГГц и преобразование производится на второй гармонике гетеродина в смесителе из встречно-параллельных диодов Шоттки. Рабочая полоса усилителя промежуточной частоты 20 ГГц. СВЧ-детектор представляет собой восемь приемных конических волноводов рупорных антенн, расположенных в линию, но со смещением в шахматном порядке. Такое расположение сделано для того, чтобы между эффективными апертурами волноводов не было просветов, так как эффективные апертуры меньше физических входных диаметров приемных конических волноводов. Внутри каждого приемного волновода установлен смеситель на встречно-параллельных диодах Шоттки. Сигнал гетеродина подводится к смесителям по волноводам специальной конфигурации для обеспечения распределения одинаковой мощности и одной фазы для каждого диодного смесителя (рис.6).

Сигнал ПЧ усиливается малошумящими СВЧ-усилителями и детектируется активной схемой детектирования. Вспомогательный модуль СВЧ-детектора обеспечивает установку и поддержание режимов работы всех СВЧ-модулей для получения оптимального усиления и динамического диапазона полезного сигнала от бъекта. Получившийся сигнал оцифровывается и подается на контроллер управления и обработки для дальнейшего формирования кадра изображения.

diameter of the entrance aperture of the conical waveguide of the horn antenna of the receiving detector, i.e. about 7 mm. This ensures the reception of the whole terahertz flux coming from the object to the THzC input window, which ensures the maximum sensitivity of the system.

Microwave unit, radiation receiver

The receiver of the terahertz radiation flux is a microwave unit that receives a terahertz signal from the focusing system. The microwave unit consists of an eight-channel microwave detector, an auxiliary module and an air cooling assembly. The microwave detector consists of eight identical channels operating simultaneously to obtain an eightfold increase in the scan rate.

The microwave receiver is performed by heterodyne scheme. The frequency of the heterodyne is 125 GHz, and the conversion is performed at the second heterodyne harmonic of the local oscillator in a mixer of counter-parallel Schottky diodes. The operating band of the intermediate frequency amplifier is 20 GHz. The microwave detector consists of eight receiving conical waveguides of horn antennas arranged in a line, but with a staggered offset. This arrangement is made in order that there are no gaps between the effective apertures of the waveguides, since the effective apertures are smaller than the physical input diameters of the receiving conical waveguides. A mixer is mounted on the counter-parallel Schottky diodes inside each receiving waveguide. The local oscillator signal is fed to the mixers via waveguides of a special configuration to ensure the distribution of the same power and one phase for each diode mixer (Fig. 6).

The FC signal is amplified by low-noise microwave amplifiers and detected by an active detection circuit. The auxiliary module of the microwave detector ensures the installation and maintenance of the operating modes of all microwave modules in order to obtain the optimum amplification and the dynamic range of the useful signal from the object. The resulting signal is digitized and fed to the control and processing controller to further form the image frame.

SURVEILLANCE CAMERA

AXIS M1011 video surveillance camera with the Axis Communications built-in lens was used by us as a finished product. The surveillance camera is installed next to the input window of the terahertz camera.

КАМЕРА ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

Камера видеонаблюдения модели AXIS M1011 со встроенным объективом компании "Axis Communications" использовалась нами как готовое изделие. Камера видеонаблюдения установлена рядом с входным окном терагерцевой камеры.

ТЕПЛОВИЗИОННАЯ КАМЕРА

Нами применена тепловизионная камера модели АСТРОН 384. Тепловизионный объектив компании "Астрон" является готовым изделием. Объектив выполнен из монокристалла германия с полосой пропускания 7-14 мкм и фокусным расстоянием 28 мм, пространственное разрешение IFOV 0,89 мрад (IFOV Instantaneous Field of View). Единственной дополнительной особенностью изделия являются повышенные требования к качеству германиевой оптики, что достигается использованием для изготовления заготовок высокосовершенных монокристаллов с низкой плотностью дислокаций и отсутствием их скоплений. Тепловизионная камера установлена рядом с входным окном терагерцевой камеры.

КОНТРОЛЛЕР УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ СВЧ-БЛОКА И УЗЛА СКАНИРОВАНИЯ

Сигналы в цифровом виде от каждого из восьми каналов синхронизируются с положением входного сканирующего зеркала одновременно по двум координатам. Кадр изображения последовательно строится из 6 вертикальных полос, в свою очередь состоящих из восьми столбцов (по числу входных СВЧ-конических волноводов и детекторов). Полезный сигнал от объекта весьма мал по своей природе происхождения и маскируется неизбежными тепловыми шумами всего приемного тракта, поэтому производится цифровое накопление информации для каждого элемента (пикселя) кадра. При этом за несколько кадров полезная составляющая сигнала растет быстрее шумовой составляющей, что и позволяет лучше увидеть различные участки объекта. Сформированные кадры направляются на компьютер для дальнейшей обработки специальным программным обеспечением с целью выявления скрытых предметов и устранения помеховых сигналов.

УЗЕЛ СКАНИРОВАНИЯ

Узел сканирования предназначен для выполнения поворота первого зеркала системы фокусировки в двух плоскостях с целью последовательного обхода площади объекта и формирования кадра изображения в терагерцевом диапазоне. Поворот-

THERMAL CAMERA

We used a thermal imaging camera ASTRON384. The Astron thermal imaging lens is a finished product. The lens is made of a germanium single crystal with a bandwidth of 7-14 μm and a focal length of 28 mm, IFOV spatial resolution of 0.89 mrad (IFOV - instantaneous field of view). The only additional feature of the product is the increased requirements for the quality of germanium optics, which is achieved using high-quality single crystals with low dislocation density and the absence of dislocation clusters for manufacturing blanks. The thermal camera is installed next to the input window of the terahertz camera.

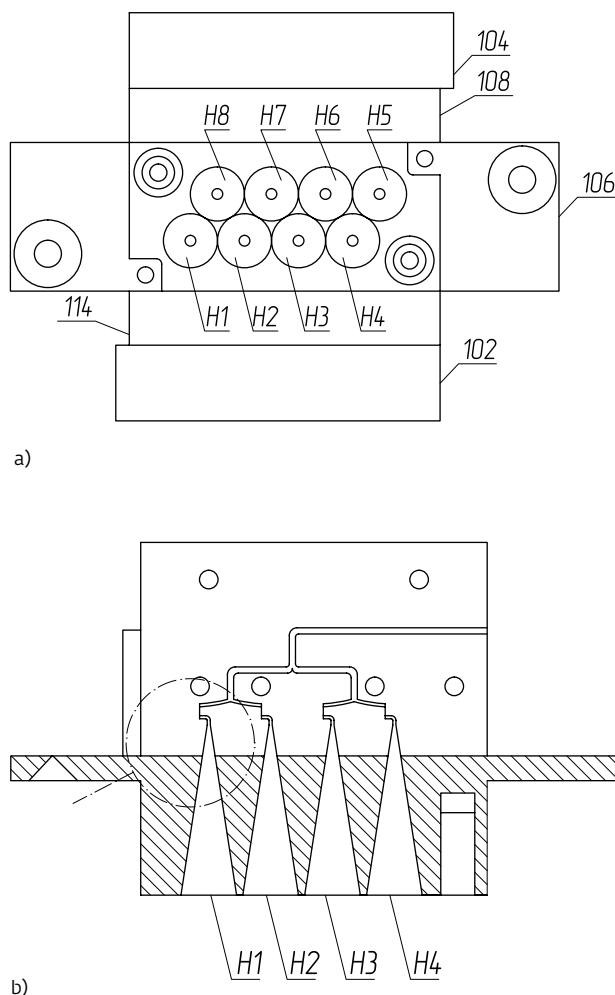


Рис. 6. Восьмиканальный СВЧ-детектор (а) и рупорные волноводные антенны (б)

Fig. 6. Eight-channel microwave detector (a) and horn waveguide antennas (b)

ное зеркало закреплено на механизме узла сканирования. Два шаговых двигателя обеспечивают механическую развертку по вертикали и горизонтали потока терагерцевого излучения от объекта. Основные детали выполнены из алюминия для снижения массы и соответственно динамических нагрузок. Каждый шаговый двигатель управляется от собственного контроллера управления. Контроллеры управления двигателями получают управляющие сигналы от контроллера управления блока СВЧ. Узел сканирования выдает два сигнала синхронизации в контроллер управления блока СВЧ, которые соответствуют средним положениям поворотного зеркала. По этим сигналам производится синхронизация центра кадра изображения в терагерцевом диапазоне с основной оптической осью системы фокусировки. Узел сканирования установлен на шасси системы фокусировки для обеспечения точности и стабильности работы оптической системы терагерцевой камеры.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ТЕРАГЕРЦЕВОГО КОМПЛЕКСА

Тест-объекты размещались на теле человека и закрывались различными материалами. На рис.7а приведены изображения (скриншот

CONTROL AND PROCESSES CONTROLLER OF THE MICROWAVE UNIT AND THE SCANNING UNIT

The signals in digital form from each of the eight channels are synchronized with the position of the input scanning mirror of simultaneously by two coordinates. The image frame is consistently constructed from 6 vertical bands, which in turn consist of eight columns (by the number of input microwave conical waveguides and detectors). The useful signal from the object is very small by its nature of origin and is masked by the inevitable thermal noise of the entire receiving path; therefore, digital accumulation of information is made for each frame element (pixel). Furthermore, for several frames, the useful component of the signal grows faster than the noise component, which makes it possible to better see the various sections of the object. The generated frames are sent to the computer for further processing with special software to identify hidden objects and eliminate jamming signals.

SCANNING UNIT

The scanning unit is designed to rotate the first focusing mirror in two planes in order to sequen-

экрана АРМа) экспериментатора с надетым муляжом пояса, скрытого под одеждой. В центральной части (рис.7b) находится изображение, получаемое с терагерцевого канала (тестируемый объект уже виден). На рис.7с дано комбинированное изображение, обработанное аналитическим блоком АРМ. Видно, что комплекс уверенно обнаруживает тестируемый объект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В АО "ОКБ Астрон" сформулирована концепция активной системы обнаружения на базе ТГц-источников и детекторов, обеспечивающей возможность обнаружения скрытно проносимых веществ, выбрана схема генерации ТГц-излучения и приема отраженного и рассеянного излучений. Также разработаны основы технологии компактных источников и приемников ТГц-излучения на базе наноструктур GaAs и InGaAs. Разработана конструкция и изготовлен макет компактного источника ТГц излучения (до 1,2 ТГц) на полупроводниковых наноструктурах с доставкой излучения, в том числе и по наноструктурированному оптоволокну. Разработана конструкция и изготовлен макет приемника ТГц-излучения (до 1,2 ТГц) с чувствительностью, позволяющей регистрировать сигналы от объектов обнаружения в режиме реального времени.

На базе ТГц-источников и детекторов компанией АО "ОКБ Астрон" изготовлена активная система обнаружения скрытно проносимых веществ. Система состоит из пассивной терагерцевой камеры, камеры видеонаблюдения и тепловизионной камеры, изделие выполнено в виде моноблока. В конструкции комплекса совместно с каналом ТГц-диапазона (реализованным пассивной терагерцевой камерой) реализованы: канал видеонаблюдения в видимом оптическом диапазоне и канал изображения в ИК-области спектра (8-14 мкм), имеется возможность последующего наложения полученных изображений и их совместной обработки. Параметры системы:

- частота смены кадров видеосигнала – 6 кадр/с;
- разрешение кадра видеосигнала – 320×240 пикселей для оптического и ИК-диапазона;

tially bypass the area of the object and form an image frame in the terahertz range. The rotating mirror is attached to the mechanism of the scanning unit. Two stepper motors provide a vertical and horizontal mechanical sweep of the terahertz radiation flux from the object. The main parts are made of aluminum to reduce weight and therefore dynamic loads. Each stepper motor is controlled from its own control controller. The control controllers receive control signals from the microwave unit control controller. The scanning unit outputs two synchronization signals to the microwave unit control controller, which correspond to the average positions of the rotating mirror. These signals synchronize the center of the image frame in the terahertz range with the main optical axis of the focusing system. The scanning unit is mounted on the chassis of the focusing system to ensure the accuracy and stability of the optical system of the terahertz camera.

TERAHERTZ COMPLEX OPERATION RESULTS

The test objects were placed on the human body and concealed under various materials. Fig. 7a shows the images (screenshot of the AWS screen) of the experimenter with the model belt concealed under the clothes. There is an image obtained from the terahertz channel in the central part (Fig. 7b) (the tested object is already visible). Fig. 7c gives a combined image processed by the AWS analyzer. It can be seen that the complex positively detects the tested object.

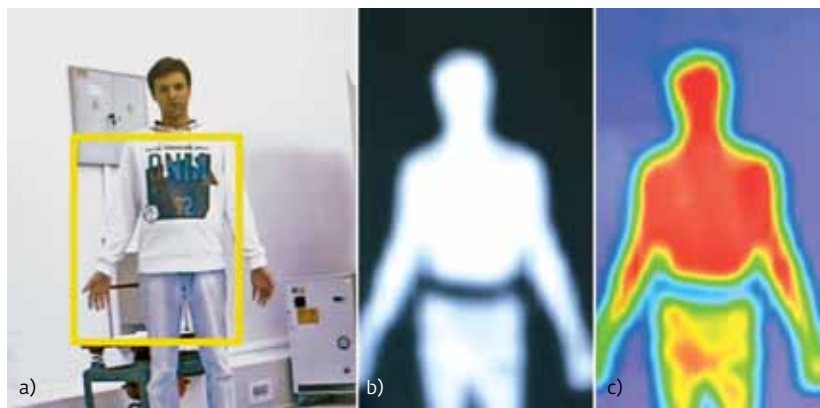


Рис.7. Изображения тест-объектов в видимом диапазоне (а), в терагерцевом диапазоне (b) и суммарное обработанное изображение (с)
Fig. 7. Images of tested objects in the visible range (a), in the terahertz range (b) and the complete processed image (c)



- формат изображения – jpg, видеоролика – avi;
- дальность передачи видеосигнала от комплекса – до АРМ оператора – до 100 м;
- время хранения записанной видеоинформации – не менее 30 суток.

Отображение результата досмотра осуществляется в двух режимах:

- терагерцевой камеры
- комбинированного видеонаблюдения с графическим выделением зоны расположения скрытого объекта (места закладки) на изображении досматриваемого субъекта.

Разработано специальное программное обеспечение (СПО) для АРМ оператора. Оно позволяет создавать масштабную проекционную модель объекта досмотра с последующей автоматической обработкой видеосигналов, получаемых от пассивной терагерцевой камеры, камеры видеонаблюдения, тепловизионной камеры, с целью обнаружения запрещенных предметов.

СПО выдает автоматическую сигнализацию оператору о попытках противодействия распознаванию; выдает фото- и видео-изображения во внешнюю систему в видимом диапазоне для проведения фотоидентификации лица; определяет точное пространственное положение и соответ-

CONCLUSION

JSC "OKB Astron" has formulated the concept of an active detection system based on THz sources and detectors, which makes it possible to detect concealed substances, a scheme for generating THz radiation and receiving reflected and scattered radiation was selected. Also, the fundamentals of the technology of compact sources and receivers of THz radiation based on GaAs and InGaAs nanostructures have been developed. A design was developed and a model of a compact THz radiation source (up to 1.2 THz) was manufactured based on semiconductor nanostructures with radiation delivery, including nanostructured fiber. A design was developed and a model of a THz radiation receiver (up to 1.2 THz) was manufactured with a sensitivity that allows recording signals from detection objects in real time.

JSC "OKB Astron" has manufactured an active system for detecting covertly carried substances based on THz sources and detectors. The system consists of a passive terahertz camera, a video surveillance camera and a thermal imaging camera, the product is configured as a single unit. The design of the complex together with the THz



ствующие масштабные коэффициенты для проведения сравнения зарегистрированных аномалий изображений с библиотекой запрещенных к проносу предметов; с целью обнаружения запрещенных предметов производит синтез изображения субъекта путем анализа видеосигналов, полученных от пассивной терагерцевой камеры, камеры видеонаблюдения и тепловизионной камеры.

Возросшая в последнее время террористическая угроза в отношении объектов особой важности на первый план выдвигает задачу обеспечения этих объектов современными средствами защиты. Борьба с терроризмом – одна из самых приоритетных задач, стоящих перед всеми силовыми ведомствами России. Предлагаемая АО "ОКБ "Астрон" новая досмотровая система позволит существенно повысить уровень безопасности важнейших объектов российской инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Майская В.** На пути к достижению субмиллиметрового диапазона длин волн. – Электроника НТБ, 2013, № 6(00129), с. 33–58.
 2. **Lee Y.-S.** Principles of Terahertz Science and Technology. Springer, 2009, p. 340.
 3. **Svintsov D., Vyurkov V., Yurchenko S., Otsuji T., Ryzhii V.** Hydrodynamic Model of Electron-Hole Plasma in Graphene. – Journal of Applied Physics, 2012, v. 111, 083715; doi: 10.1063/1.4705382.
 4. **Ryzhii V., Satou A., and Otsuji T.** Plasma Waves in Two-Dimensional Electron-Hole System in Gated Graphene Heterostructures. – Journal of Applied Physics, 2007, v.101, 024509; doi: 10.1063/1.2426904.
 5. **Baryshnikov N.V., Ryzii V., Ryabova N., Ryzii M., Mitin V., Otsuji T., Karasik V.E.** Terahertz and Infrared Photodetectors Based on Multiple Graphene Layer and Nanoribbon Structures. – Opto-electronics Review 20, 2012, № 1, p.15–25.
 6. **Rubens H., Nichols E.F.** Heat Rays of Great Wave Length – Phys. Rev., 1897, v.4, p. 314–323, (1897).
 7. **Auston D.H.** Picosecond Optoelectronic Switching and Gating in Silicon. – Appl. Phys. Lett., 1975, v. 26, p.101–103.
 8. **Grischkowsky D., Keiding S., Vanexter M.** Far-Infrared Time-Domain Spectroscopy with Terahertz Beams of Dielectrics and Semiconductors. – J. Opt. Soc. Am., B7, 1990, p.2006–2015.
 9. **Cheville R.A., Grischkowsky D.** Time-Domain Terahertz Pulsed Ranging Studies. – Appl. Phys. Lett., 1995, v. 67, p.1960–1962.
 10. **Pickwell-MacPherson E.** Practical Considerations for in Vivo THz Imaging. – Terahertz Science and Technology, 2010, v. 3, № 4.
 11. **Yang Y., Shutler A., Grischkowsky D.** Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 THz. – Optics express, 2011, v. 19, № 9.
 12. **Wallace V.P., Woodward R.M., Fitzgerald A.J.** Terahertz Pulsed Imaging of Cancers. – Proceedings of SPIE, 2003, p. 4949.
 13. **Kemp M.C.** Millimetre. Wave and THz Technology for the Detection of Concealed Threats – A Review. – Proc. of SPIE, 2006, v. 6402.
 14. **Зайцев К.И., Карасик В.Е., Королева С.А., Фокина И.Н.** Исследование возможности использования терагерцевых изображающих систем для медицинской диагностики. – Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2012, № 4.
- band (implemented by a passive terahertz camera) provides for a video image channel in the visible optical range and an image channel in the infrared spectral region (8–14 μm) with the possibility of subsequent imposition of the images and their joint processing.
- System parameters:
- Video signal frame rate is 6 fps,
 - Resolution of the video signal frame: 320 × 240 pixels for the optical and IR range,
 - Image format is jpg, video is avi
 - Video transmission range: from the complex to the operator's workstation is up to 100 m,
 - Storage time of the recorded video information is not less than 30 days.
- The display of the result of the security screening is carried out in two modes:
- by a terahertz camera
 - by combined video surveillance with a graphic isolation of the concealed object location area (embedding location) on the image of the screened subject.
- Special software has been developed for the operator's workstation. It allows creating a large-scale projection model of the object of security screening with the subsequent automatic processing of video signals received from a passive terahertz camera, a video surveillance camera, a thermal camera, in order to detect forbidden objects.
- The special software provides automatic signaling to the operator about attempts to resist recognition; it yields photo and video images to the external system in the visible range for photo identification of the face; it determines the exact spatial position and the corresponding scale factors for comparing the recorded image anomalies with a catalogue of forbidden objects; with the purpose of detecting forbidden objects, it synthesizes the image of the subject by analyzing the video signals received from a passive terahertz camera, a video surveillance camera and a thermal camera.
- The recently increased terrorist threat with respect to the facilities of particular importance places a priority on the task of providing these facilities with modern means of protection. The fight against terrorism is one of the highest priorities for all Russian security agencies. The new scanning system offered by JSC "OKB Astron" will significantly increase the level of safety of the most important facilities of the Russian infrastructure.