

НАЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ПРИ СОЗДАНИИ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ, ВОЕННОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Д.Б. Изюмов, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, izyumov@extech.ru

Е.Л. Кондратюк, ст. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, kel@extech.ru

В статье рассмотрены основные понятия терагерцового излучения и терагерцового диапазона частот, область их военного применения при создании высокоточного оружия и перспективных образцов вооружений, военной и специальной техники. Проанализированы такие области использования терагерцового частотного диапазона за рубежом, как: радиолокационные системы различного назначения; робототехнические комплексы военного и двойного назначения; микроэлектронные устройства и системы, разрабатываемые Управлением перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA). Представлена структура и динамика мировой патентной активности в области использования терагерцового диапазона радиоволн. Сформированы предложения по приоритетам научно-технологического развития Российской Федерации в интересах обороны и обеспечения безопасности государства в области использования и развития терагерцового диапазона частот.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, терагерцовый диапазон частот, высокоточное оружие, радиолокационная система, робототехнический комплекс, микроэлектроника, электронные технологии, оборонные исследования, ДАРПА, ведущие зарубежные страны, вооружение, военная и специальная техника.

FOREIGN EXPERIENCE IN THE USE OF THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE IN THE CREATION OF MODELS OF WEAPONS, MILITARY AND SPECIAL EQUIPMENT

D.B. Izyumov, Head of Department, SRI FRCEC, izyumov@extech.ru

E.L. Kondratyuk, Senior Researcher, SRI FRCEC, kel@extech.ru

The basic concepts of terahertz radiation and terahertz frequency range, the area of their military application in the development of precision weapons and advanced models of armaments, military and special equipment are considered in the article. Such areas of terahertz frequency range usage abroad as: radar systems for various purposes are analyzed; robotic complexes for military and dual use; microelectronic devices and systems developed by the Office of Advanced Research Projects of the US Department of Defense (DARPA). The structure and dynamics of the world patent activity in the field of using the terahertz range of radio waves are presented. Formed proposals on the priorities of scientific and technological development of the Russian Federation in the interests of defense and ensuring state security in the use and development of the terahertz frequency range.

Keywords: terahertz radiation, terahertz frequency range, high-precision weapon, radar system, robotic complex, microelectronics, electronic technologies, defense research, DARPA, leading foreign countries, armament, military and special equipment.

Опыт боевых действий в Сирийской арабской республике за последние три года показывает, что их основной особенностью стало масштабное применение высокоточного вооружения класса «воздух-поверхность» как российской военной авиацией, так и воздушными силами международной коалиции, возглавляемой США. Достаточно широко используются высокоточные артиллерийские боеприпасы и ракеты. При этом также становится очевидным, что отечественная авиация испытывает острую нехватку средств целеуказания и наведения для применения высокоточного оружия (ВТО). Результаты проведенных научных исследований показывают, что решение данных проблемных вопросов возможно (и уже частично решается) путем широкого использования миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов радиоволн [1,2]. Особое место из указанных диапазонов электромагнитного излучения при создании высокоточных систем наведения в настоящее время стал занимать так называемый терагерцовый (ТГц) диапазон радиоволн.

Терагерцовое излучение ($1 \text{ ТГц} = 10^{12} \text{ Гц}$) – это вид электромагнитного излучения, спектр частот которого расположен между инфракрасным и сверхвысокочастотным диапазонами (рис. 1): от 100 ГГц до 30 ТГц .

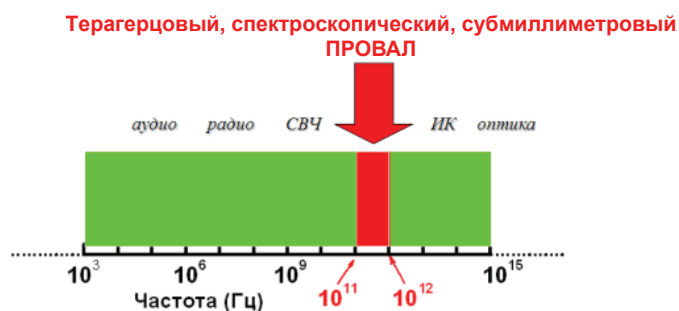


Рис. 1. Терагерцовый диапазон частот спектра электромагнитного излучения

Данный участок электромагнитного спектра долгое время оставался практически неосвоенным – в области проведения спектроскопических исследований и эффективного практического использования. Причин появления такого «терагерцового провала» было достаточно много. Важнейшая из них заключается в том, что терагерцовое излучение имеет очень «неудобную» длину волны: $3 \text{ мм} – 10 \text{ мкм}$. Сопоставимая с размерами деталей спектрометра или иного прибора, такая длина волны не позволяет применять ни обычные элементы оптических схем, ни привычные радиофизикам антенны или волноводы. Лишь за последние десятилетия удалось разработать достаточно эффективные методы терагерцовой спектроскопии – методы, к которым часто применяют приложение «квазиоптические». Так, например, в России современная «квазиоптическая» установка смонтирована в новой Лаборатории терагерцовой спектроскопии Московского физико-технического института [3].

Согласно имеющейся научно-технической информации [4] уже на протяжении последних 10–15 лет в ведущих зарубежных странах (США, Израиль, развитые страны-члены блока НАТО) при создании ВТО широкое применение находят коротковолновая часть миллиметровых и длинноволновая часть субмиллиметровых радиоволн (соответственно длины волн: $2,15–1,3 \text{ мм}$ и $0,96–0,88 \text{ мм}$). Анализ открытых источников информации показывает, что за рубежом основное внимание при создании перспективных образцов ВВСТ терагерцового диапазона сосредоточено на следующих системах [5, 6, 7]:

- высокоточных радиолокационных системах различного базирования для наблюдения, обнаружения и распознавания целей, способных функционировать в сложной электромагнитной обстановке;

- радиолокационных системах управления (наведения) высокоточным оружием;
- радиолокационно-оптических системах визуализации и получения изображений со сверхвысоким разрешением (например, создание приборов ночного видения, электронно-оптических преобразователей, инфракрасных камер, ультрафиолетовых камер и т. п.);
- системах космического сегмента информационно-управляющей глобальной сети;
- комплексах оружия направленной энергии (в целях разработки и создания перспективного электромагнитного оружия);
- сенсорных системах робототехнических комплексов (РТК) военного и двойного назначения;
- высокоинформативных, высокоскоростных и скрытных системах связи;
- системах навигации.

Например, создание систем космического сегмента терагерцового диапазона информационно-управляющей глобальной сети осуществляется в целях:

- обеспечения высокой надежности функционирования космической группировки спутников, объединенных в распределенную сеть, с широкой полосой пропускания;
- проведения радио и радиотехнической разведки объектов в космическом пространстве в ТГц диапазоне;
- обеспечения локации воздушно-космических объектов из космоса;
- дистанционного зондирования Земли;
- передачи значительных объемов полученных данных.

Использование терагерцовых сенсорных систем робототехнических комплексов (РТК) военного и двойного назначения необходимо для:

- формирования изображений в ТГц диапазоне для ведения круглосуточного наблюдения;
- беспроводного дистанционного группового управления и контроля РТК;
- оценки проходимости наземных РТК в водонасыщенных грунтах;
- обеспечения контроля состояния атмосферы при воздействии химического и бактериологического оружия;
- идентификации взрывчатых и других веществ.

Развитие научно-технического и технологического потенциала в области военного использования терагерцового частотного диапазона позволит повысить *точность* перспективных зарубежных систем обнаружения и целеуказания, *разрешение* радиолокационно-оптических систем визуализации и получения высококачественных изображений, *оперативность (своевременность)* передачи критически важной информации за счет применения высокоэффективных каналов передачи данных.

К основным областям использования терагерцового частотного диапазона за рубежом можно отнести: радиолокационные системы различного назначения; робототехнические комплексы военного и двойного назначения; микроэлектронные устройства и системы, разрабатываемые Управлением перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA).

Радиолокационные системы различного назначения

В настоящее время лишь в некоторых зарубежных странах и, в первую очередь, в США проводятся целенаправленные работы по изучению возможностей внедрения ТГц диапазона радиоволн для создания радиолокационных систем обнаружения и распознавания объектов, а также радиолокационных систем наведения и управления оружием [1–7].

К числу таких приоритетных работ по развитию систем и средств ТГц диапазона электромагнитного излучения можно отнести следующие.

1. РЛС обнаружения и распознавания (разрабатывается радиолокационная система радиовидения и обнаружения объектов в сложных метеоусловиях с дальностью действия 1–2 км, разрешающей способностью по дальности 0,5 м, диапазоном рабочих частот 300–400 ГГц, длинами волн в районе 0,96 мм и 0,88 мм).

2. Пассивно-активная РЛС (разрабатывается самолетная система обнаружения целей и картографирования, а также два радиометра с рабочими частотами 120 и 220 ГГц, длинами волн в районе 2,3 мм и 1,3 мм).

3. Всепогодная активно-пассивная РЛС наблюдения за полем боя с рабочей частотой 220 ГГц.

4. Измерительная РЛС для исследования отражательных характеристик наземных целей и условий распространения радиоволн (рабочие частоты 140 и 225 ГГц). Данные системы находились в последнее десятилетие на этапе исследований в различных компаниях и научно-исследовательских центрах США, но предполагается, что в настоящее время находятся в эксплуатации.

5. РЛС наведения и управления оружием субмиллиметрового диапазона радиоволн (разрабатываются в основном американскими компаниями Sperry и Rockwell). К данной группе РЛС относятся:

- моноимпульсная РЛС управления огнем противотанковых ракет (РЛС с повышенной скрытностью за счет управления мощностью излучения, оптимального подбора параметров сигнала и его поляризации; рабочая частота 140 ГГц; компания-разработчик Sperry, США);

- танковая РЛС обнаружения наземных целей и целеуказания Startle (РЛС со сжатием импульсов и линейно-частотной модуляцией; рабочая частота 230 ГГц; дальность действия по танку 3–5 км при мощности излучения передатчика 1–5 Вт и чувствительности приемника 10–12 Вт/Гц; сканирование лучом антенны с диаметром 35 см в пределах 3–45° по углу места и 20° по азимуту; диапазон измерения скорости цели 2–50 км/ч; количество одновременно обрабатываемых целей – 20; компания-разработчик Rockwell, США);

- РЛС типа Apache наведения противотанковых ракет третьего поколения (рабочая частота 240 ГГц; компания-разработчик Rockwell, США).

6. Радиолокационные датчики (РЛД) высокоточного оружия в космосе и воздухе (диапазон 0,88–0,73 мм; дальность действия по предварительным данным на высотах свыше 8 км может составить более 50 км).

7. Авиационные бомбы с радиолокационными головками самонаведения (ГСН) на конечном участке траектории (диапазон волн и соответствующие дальности действия ГСН выбираются в соответствии с боевой задачей).

8. Радиолокационные прицелы (РЛП) оружия ближнего боя (пулеметы, гранатометы). Диапазон рабочей волны – 1,25 мм. Такие радиолокационные системы могут входить в оборонительные системы форпостов, где обнаружение и целеуказание происходит с использованием других технических средств разведки, а точное прицеливание происходит с помощью РЛД терагерцового диапазона (дальность действия – до 1500 м).

9. Радиолокационные ГСН для противотанковых ракет, артиллерийских снарядов, реактивных снарядов, оперативно-тактических и тактических ракет на конечном участке траектории с дальностью действия до 2 км.

10. Новые фазированные антенные решетки (ФАР), использующие терагерцовый диапазон частот. Такие ФАР будут включать значительное количество компонентов. Ценовой вклад каждого компонента приведен на рис. 2. Существенный ценовой вклад обеспечивает фазовращатель, стоимость которого составляет 45% от стоимости ФАР. Весомые вклады вносят высокочастотная плата и приемный элемент.

Ряд элементов ФАР не могут быть выполнены с использованием традиционной кремниевой технологии, освоенной мировой промышленностью. В связи с чем, в настоящее время проводится ряд научно-исследовательских работ, направленных на изучение материалов, полупроводников, сегнетоэлектриков и электронных компонентов на базе терагерцовой микроэлектроники. Несмотря на значительные вложения в электронную компонентную базу терагерцового диапазона, принципы создания новых ФАР, скорее всего, останутся без изменений.

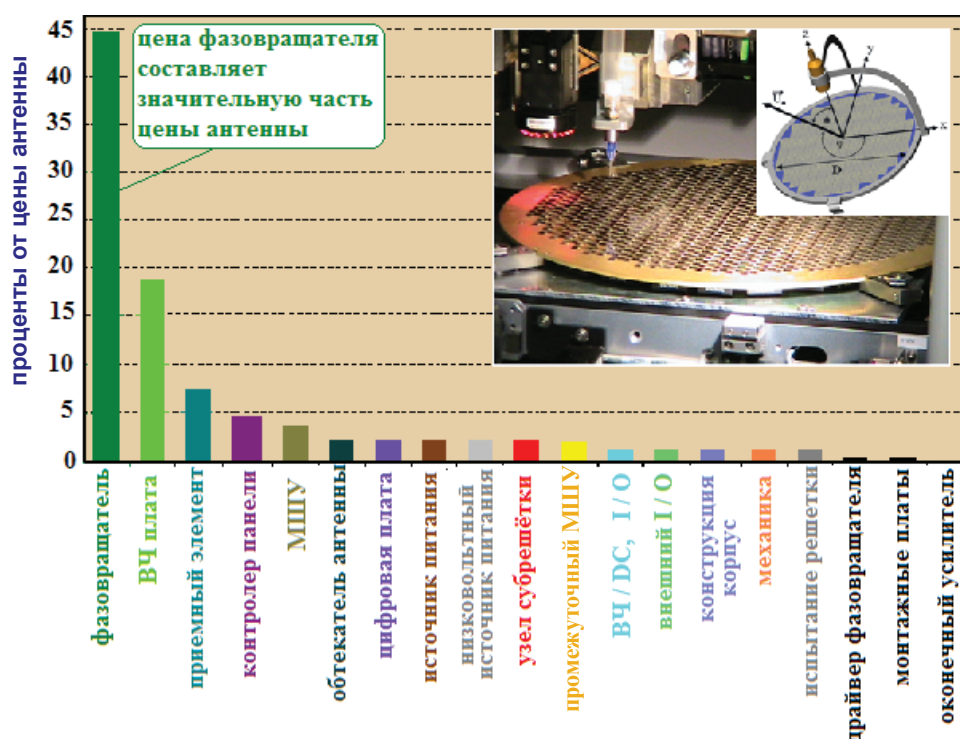


Рис. 2. Ценовой вклад компонентов в стоимость перспективной ФАР

Учитывая вышесказанное, зарубежные государства проводят долгосрочное активное финансирование указанного направления, считая его актуальным и перспективным. Так, основными компаниями, работающими на рынке сегнетоэлектрических структур, является большинство зарубежных мировых гигантов, приведенных на рис. 3.



Рис. 3. Основные фирмы, функционирующие на рынке сегнетоэлектрических структур

Анализ проводимых за рубежом научно-исследовательских работ, программных элементов и планов развития в области использования терагерцового диапазона частот показал,

что основными требованиями, предъявляемыми к перспективным терагерцевым радиолокационным устройствам (РЛУ), являются:

- высокое разрешение по дальности и угловым координатам при функционировании РЛУ на небольших дальностях действия в условиях плохой оптической видимости с целью обеспечения уверенного обнаружения и наведения управляемого оружия;

- использование различных диапазонов длин волн РЛУ в зависимости от дальности обнаружения:

- а) коротковолновая часть миллиметрового диапазона волн (длина волны в окне прозрачности 1,3 мм) для обнаружения целей до 4000 м и наведения управляемого оружия до 1000–1500 м;

- б) длинноволновая часть субмиллиметрового диапазона волн (длина волны в окнах прозрачности: 0,88 мм и 0,96 мм) для обнаружения целей до 1500–2000 м и наведения управляемого оружия до 1000–1500 м;

- обеспечение обнаружения неподвижных, малоподвижных и движущихся целей;

- угловое разрешение РЛС при обзоре на дальностях до 1000 м в пределах 3,5 д.у.¹ (около 15 угловых минут), что соответствует линейной разрешающей способности не более 3,5 м (на дальности 500 м – линейная разрешающая способность 1,5–2 м);

- вероятность обнаружения наземных целей на фоне подстилающей поверхности не ниже 0,9 при любых погодных условиях (включая дожди интенсивностью до 10 мм/ч) и вероятности ложной тревоги 10^{-6} ;

- небольшие масса и габариты.

При разработке перспективных РЛУ ТГц диапазона радиоволн необходимо учитывать также требования к вычислительной технике и программному обеспечению в целях эффективного функционирования системы, обладающей более высокой информативностью.

Робототехнические комплексы двойного назначения

Анализ открытых источников информации показывает, что в ведущих зарубежных странах основное внимание при создании перспективных робототехнических комплексов двойного назначения, использующих терагерцевый диапазон радиоволн, сосредоточено на следующих системах.

1. Создание мини-роботов, предназначенных для использования пехотными и подразделениями специальных операций, в системах обнаружения и управления которых могут использоваться средства терагерцевого диапазона волн

Такие роботы будут предназначены для решения задач ближней разведки, наблюдения и рекогносцировки [8, 9, 10].

Многие из данных роботов характеризуются как «забрасываемые», поскольку могут быть заброшены (запущены) оператором на определенную дальность и высоту (например, внутрь здания, исключая необходимость проникновения туда человека). Зачастую забрасываемые роботы рассматриваются как средства разового применения. Они могут размещаться в под сумке или кармане бойца вместе с небольшими пультами управления (некоторыми роботами можно управлять со смартфонов).

Наряду с легкими забрасываемыми мини-роботами создаются и более тяжелые устройства, которые можно сбрасывать, например, с автомобиля (если они не оснащены дополнительными датчиками). Забрасываемые роботы остаются предпочтительными для основных подразделений сухопутных войск, поскольку очень незначительно увеличивают носимую нагрузку солдат.

Ниже представлены примеры зарубежных разработок забрасываемых мини-роботов.

Роботы двойного назначения Throwbot XT и Reconscout XL американской компании Recon Robotics

Робот Throwbot XT (рис. 4), производство которого началось с середины 2012 г., имеет массу всего 540 г и является самой легкой системой семейства роботов компании Recon

¹ Делений угломера.

Robotics. Имеет гантелевидную конструкцию, обеспечивающую удобный захват рукой. Способен забрасываться оператором на дальность до 36 м, а хорошие противоударные характеристики позволяют сбрасывать такой робот с высоты более 9 м.



Рис. 4. Забрасываемый робот Throwbot XT (США)

В настоящее время основным сенсором робота Throwbot XT является черно-белая камера, работающая в условиях низкой освещенности с частотой 30 кадров/с и обладающая оптикой, обеспечивающей поле зрения 60°. Когда освещенность падает ниже установленного порога, автоматически включается источник ИК подсветки, обеспечивающий видимость более 7,5 м. В условиях задымления и запыления могут использоваться датчики ТГц диапазона волн. Также данный диапазон может использоваться в линиях передачи данных, которые могут настраиваться на три частоты, позволяя оператору управлять тремя роботами. Дальность связи оператора с роботом Throwbot XT составляет от 30 до 100 м.

Наземные забрасываемые мини-роботы Nerva 4×4 французской компании Nexter

Опытный образец робота Nerva массой 4 кг (рис. 5) был создан в 2012 г. Это первое поколение легких роботов, выпускаемых вновь созданным подразделением компании Nexter Robotics. Основной режим является стандартным и обеспечивает точное управление движением робота и его ориентировку. Линия передачи данных на современном этапе производства с частотой 2,4 ГГц обеспечивает радиус действия связи до 1 км на открытой местности и до 300 м в городских условиях.

Забрасываемая модель робота PocketBot швейцарской компании Novatiq

Масса робота PocketBot составляет 0,85 кг, сам робот приводится в движение посредством трех электродвигателей, установленных в корпусе, один из которых вращает третье заднее колесо через ременную передачу (рис. 6). PocketBot может выдержать падение с высоты 8 м и бросание на дистанцию до 30 м.

По данным компании Novatiq, трехколесная конфигурация робота позволяет значительно уменьшить его кинетическую энергию при ударе по сравнению с четырехколесной конфигурацией.

В комплект PocketBot входят один робот, один блок управления, два зарядных устройства, четыре батарейки, одна головная гарнитура и некоторые запчасти (такие как колеса, антенны, заглушки и др.). В передней части корпуса PocketBot установлена цветная камера с высоким разрешением, которая поворачивается на $\pm 90^\circ$. При недостаточном освещении камера с восьмикратным цифровым увеличением автоматически переключается в моно-

хромный режим для низкой освещенности. Также доступна инфракрасная подсветка. Робот оснащен водонепроницаемым микрофоном и небольшим водонепроницаемым громкоговорителем, позволяющим обращаться к людям вблизи RocketBot, например, к заложнику. Наверху RocketBot имеются точки крепления для установки дополнительных устройств, например, тепловизионной камеры или химических детекторов (однако в данном случае робот теряет способность к забрасыванию из-за риска поломки дополнительного оборудования).



Рис. 5. Забрасываемый робот Nerva (Франция)



Рис. 6. Забрасываемый робот PocketBot (Швейцария)

Время непрерывной работы PocketBot составляет 4–5 часов. Система цифровой видеозаписи сохраняет изображения на карте SD для дальнейшего анализа. Робот оснащен стандартным каналом передачи данных, обеспечивающим радиус действия 250 м на открытой местности и 70 м в случае не прямой видимости.

Робот EyeDrive американской группы компаний Mistral Group

Масса робота EyeDrive (рис. 7) составляет 3,76 кг. На каждой стороне робота устанавливаются черно-белая (0,08 лк) или цветная (0,19 лк) камеры. Имеется возможность установки дополнительной камеры с лазерным указателем со способностью поворота камеры вправо-влево на 48°. В сенсорный комплект робота включен микрофон, способный уловить звук с

пяти метров. Канал связи с роботом EyeDrive обеспечивает модуль связи массой один килограмм, подсоединяющийся через USB-порт к упрочненному ноутбуку оператора. Литий-ионные аккумуляторы обеспечивают среднюю продолжительность работы EyeDrive два часа (время варьируется от используемых датчиков), максимальная полезная грузоподъемность составляет 3,5 кг.



Рис. 7. Забрасываемый робот EyeDrive (США)

Заявленный радиус действия робота составляет 400 м на открытой местности и 70 м внутри зданий. Сигналы управления роботом на данном этапе развития технологий передаются на частоте 915 МГц, а видеосигналы — на частоте 2,4 ГГц. Помимо ВС США, робот EyeDrive состоит на вооружении израильской армии.

2. Создание универсальных человекоподобных роботов двойного и военного назначения

Примером данного направления является разработка и создание усовершенствованного робота Atlas (рис. 8) компании Boston Dynamics (США). Компания-разработчик Boston Dynamics ранее получила широкую известность, благодаря таким робототехническим комплексам военного назначения, как AlphaDog и Petman (оба проекта реализовывались по заказу Управления перспективных исследовательских проектов МО США DARPA).

В 2015 г. разработка робота Atlas профинансирована DARPA в рамках конкурса под названием DARPA Robotics Challenge (DRC). Цель — создание человекоподобного автономного робота, способного стать эффективным универсальным помощником для различных служб и подразделений при чрезвычайных ситуациях.

Для автономного функционирования робот Atlas оснащен мощной батареей, способен самостоятельно огибать препятствия и сообщать оператору о своем решении по выполнению той ли иной задачи. Робот разработан на основе операционной системы Android компании Google и способен переносить длительные (до 1 мин) перебои со связью, при этом управление роботом организовано по защищенной линии (сети) передачи данных.

За автономное мышление и восприятие окружающего пространства робота Atlas отвечают три бортовых компьютера, которые также используются для выполнения задач и планирования целей. Беспроводной маршрутизатор, расположенный в голове робота, позволяет совершать разного рода коммуникации.

Таким образом, в ведущих странах мира преимущественно проводятся исследования и разработки мини-роботов, относящихся к классу «забрасываемых» робототехнических средств, обладающих малыми массогабаритными характеристиками.

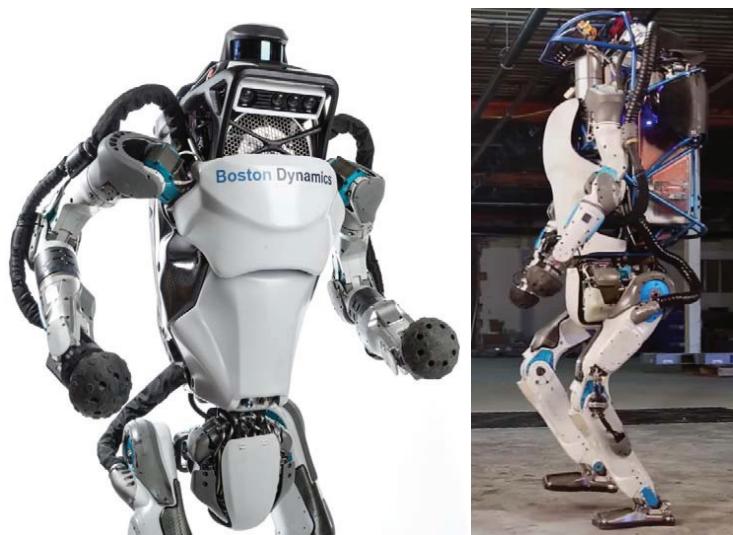


Рис. 8. Усовершенствованный человекоподобный робот Atlas (США)

Анализ зарубежных разработок робототехнических комплексов двойного назначения показывает, что большинство их средств обнаружения целей (объектов) функционируют как в терагерцовом, так и оптическом диапазонах. Линии передачи данных в основном используют частоту 2,4 ГГц (также доступны частоты 4,9 и 17 ГГц). Дальность действия таких систем составляет до 200 м по линии прямой видимости.

Рассматриваемые комплексы предназначены для решения задач ближней разведки, наблюдения и рекогносцировки, выполнения поисковых и специальных операций как на открытой местности, так и в городских условиях.

Микроэлектронные устройства и системы ТГц диапазона, разрабатываемые DARPA

Управление перспективных исследовательских проектов МО США DARPA имеет статус национального стратегического исследовательского центра (агентства) по разработке новых технологий в интересах национальной безопасности США. DARPA, являясь подотчетным агентством Министерства обороны США, ставит целью достижение и поддержание технологического превосходства и предотвращение внезапного появления в мире неожиданных для ВС США новейших ВВСТ.

Анализ программных элементов DARPA (за период с начала 2000-х годов и по настоящее время) и составляющих их исследовательских проектов позволил выявить три основных программных элемента (РЕ), относящихся к разработке систем терагерцового диапазона частот:

- РЕ 0601101Е «Оборонные исследования» (Defense Research Sciences);
- РЕ 0602716Е «Электронные технологии» (Electronics Technology);
- РЕ 0603767Е «Технологии датчиков» (Sensor Technology).

РЕ «Оборонные исследования» относится к фундаментальному виду исследований, РЕ «Электронные технологии» и «Технологии датчиков» – к прикладным. Каждый из перечисленных программных элементов включает ряд исследовательских проектов и программ в области ТГц диапазона.

Наибольший интерес заслуживает программный элемент РЕ 0602716Е «Электронные технологии», в рамках которого существует одноименный проект ELT-01, включавший с конца 1990-х годов по 2016 г. долгосрочную программу создания электронной компонентной базы в терагерцовом диапазоне длин волн – Terahertz Electronics.

Данная программа предусматривала два направления работ:

- разработку и демонстрацию материалов и технологий производства транзисторов и интегральных микросхем, предназначенных для создания приемников и задающих генераторов (резонаторов) терагерцового диапазона частот (Terahertz Transistor Electronics);
- разработку и демонстрацию устройств и технологий производства малогабаритных эффективных модулей мощных усилителей ТГц диапазона с масштабированными вакуумными приборами (Terahertz High Power Amplifier Modules).

В результате реализации программы Terahertz Electronics к 2016 г. отмечаются следующие достижения:

- завершена демонстрация усилителей высокой мощности и интегральных микросхем, функционирующих в диапазоне частот от 670 ГГц до 850 ГГц (0,67–0,85 ТГц);
- усовершенствована технология производства транзисторов, работающих на частоте 0,67 ТГц, и продемонстрированы возможности создания гетеродинных приемников и электронно-оптических преобразователей, также функционирующих на частоте 0,67 ТГц;
- завершена разработка и запущено производство вакуумных усилителей частоты 1,03 ТГц;
- продемонстрирован первый в мире терагерцовый усилитель монолитной интегральной СВЧ-микросхемы (Monolithic Microwave Integrated Circuit – MMIC), коэффициент усиления которого составил 10 дБ на частоте 1 ТГц.
- завершены исследования технологий задающего генератора и приемника, функционирующих на частотах, превышающих 0,67 ТГц;
- продемонстрирован генератор частоты 1,03 ТГц;
- продемонстрирован прототип терагерцовой двусторонней линии передачи данных с использованием технологии транзисторов с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor (HEMT) technology);
- продемонстрирован полупроводниковый усилитель сигналов частоты 1,03 ТГц;
- достигнуты улучшенные тепловые характеристики созданного вакуумного усилителя, функционирующего с интенсивным рабочим циклом на терагерцовых частотах;
- продемонстрирован первый в мире терагерцовый электронный усилитель на лампе бегущей волны.

Анализ финансирования DARPA показал, что на программу Terahertz Electronics с начала 2000-х годов было выделено не менее 150 млн долл. При этом с 2010 г. выделялось от 14 до почти 16 млн долл. ежегодно (в 2010 г. – 14,0 млн долл., в 2011 г. – 17,7 млн долл., в 2012 и 2013 гг. – по 15,6 млн долл., в 2014 г. – 14,3 млн долл. и 2015 г. – 8,0 млн долл.). Ряд работ по программе Terahertz Electronics проводилось при участии компании Northrop Grumman.

Таким образом, в программе Terahertz Electronics отмечается преимущество военного применения терагерцового диапазона частот. Предполагается, что переход в терагерцовый диапазон позволит в перспективе создавать РЛС высокого разрешения, близкого к разрешению оптико-электронных систем, надежные системы связи с миниатюрными антеннами, а также высокоэффективные спектрометры для обнаружения взрывчатых веществ. В дальнейшем планируется освоение и более высоких частот на основе уже созданной технологической базы.

Также отмечается, что терагерцовый диапазон электромагнитного излучения перспективен для аэрокосмических систем. Прозрачность атмосферы в ТГц диапазоне позволяет использовать его для обмена данными с космическими аппаратами, для дистанционного зондирования Земли и ряда других задач. В частности, использование данного диапазона позволит повысить пропускную способность спутниковых каналов связи, а также расширить рабочий спектральный диапазон космических разведывательных аппаратов. Использование более высокой, нежели в существующих активных и пассивных орбитальных системах дистанционного зондирования, частоты позволит повысить угловое (а, следовательно, и про-

странственное) разрешение без увеличения апертуры, обеспечит возможность круглосуточной и всепогодной съемки.

В настоящее время программный элемент *PE 0601101E «Оборонные исследования»* включает совместную университетскую программу в области долгосрочных фундаментальных исследований микроэлектроники (Joint University Microelectronics Program – JUMP). Эта программа нацелена на изучение и развитие инновационных технологий военного, специального и двойного назначения в области вычислительной техники, информационно-телекоммуникационных технологий и различных датчиков за горизонтом 2030-х годов. Особое внимание будет уделено расширению возможностей использования электромагнитного спектра от радиочастотного до терагерцового (от 3 Гц до 1 ТГц), исследованию новых материалов для создания интегральных микросхем, а также цифровых и запоминающих устройств для перспективной микроэлектроники. Финансирование программы JUMP начинается с 2018 г.

Программный элемент *PE 0603767E «Технологии датчиков»* включает программу ASTIR (Advanced Scanning Technology for Imaging Radars program). Эта программа развития технологий сканирования для РЛС формирования радиолокационных изображений. Цель программы – демонстрация новой архитектуры РЛС визуализации и получения изображений с очень высоким разрешением, использующей вспомогательную антенну с электронным сканированием. При создании такой РЛС планируется использовать научно-технический задел, полученный при разработке интегрированных электронных компонентов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

Реализация программы позволит создавать рентабельные РЛС визуализации и получения изображений высокого разрешения, способных работать в сложной электромагнитной обстановке. Такие системы найдут свое применение в технике специализированных охранных и инспекционных систем, мониторинга периметров баз, системах интроскопии (включая сканирование персонала при прохождении контрольных точек доступа), устройствах дистанционной идентификации различных веществ и т. п.

Структура и динамика мировой патентной активности в области использования терагерцового диапазона радиоволн

Анализ мировой патентной активности в области использования систем терагерцового диапазона показал, что, начиная с 2000 г., патентная активность в странах-членах НАТО, Китае, Японии возрастает линейно, в то время как в России данная тенденция выражена слабо. Статистический анализ, проведенный по приоритетным странам, приведен на рис. 9.

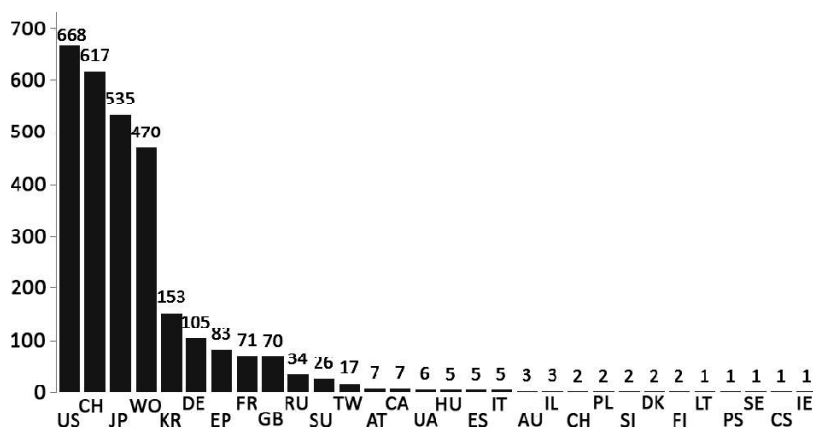


Рис. 9. Вариационный ряд патентной активности стран в области терагерцовых технологий по количеству полученных патентов

Нетрудно заметить, что Россия не входит в первую пятерку стран, занимая лишь десятую позицию мировой патентной активности в рассматриваемой области. Статистический анализ патентной активности по годам, сделанный по 2013 г. включительно, приведен на рис. 10.

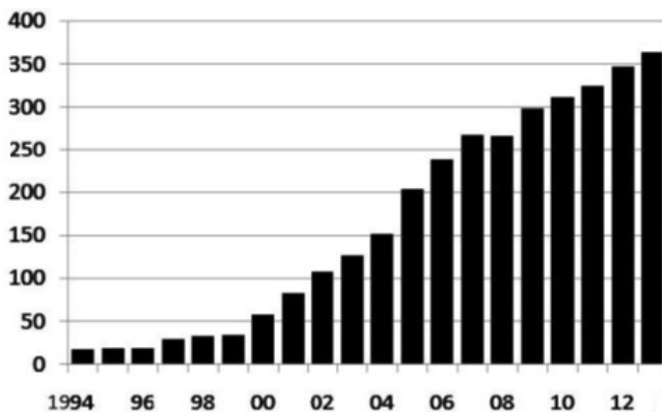


Рис. 10. Вариационный ряд патентной активности стран в области терагерцовых технологий по годам

Наибольшее количество опубликованных патентов (47%) относится к индексу (группам, подгруппам) H01S — устройствам со стимулированным излучением, в основном к лазерам, т.е. устройствам для генерирования, усиления, модуляции, демодуляции или преобразования частоты.

Следующий по количеству опубликованных патентов (26%) представляет индекс (группы, подгруппы) G02F — это устройства или приспособления для управления интенсивностью, цветом, фазой, поляризацией или направлением света, исходящего от независимого источника (например, для переключения, стробирования или модуляции). К данной группе относится и нелинейная оптика.

Таким образом, начиная с 2000 г. наблюдается мировой рост патентования новых технических устройств терагерцового диапазона. Странами-лидерами по количеству полученных патентов в рассматриваемой области являются США, Китай и Япония.

Предложения по приоритетам научно-технологического развития Российской Федерации в интересах обороны и обеспечения безопасности государства в области использования и развития терагерцового диапазона частот

Общее технологическое отставание России от стран-членов НАТО в области терагерцовых технологий составляет около 10–15 лет. Можно выделить три фактора, сдерживающих развитие важного для обороны Российской Федерации направления:

- отсутствие скоординированной государственной программы развития терагерцовых технологий;
- отсутствие целенаправленного государственного финансирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рассматриваемой области;
- низкий кадровый потенциал специалистов и экспертов в области терагерцовых технологий.

Предложениями по приоритетам научно-технологического развития Российской Федерации в интересах обороны и обеспечения безопасности государства в области развития терагерцовых технологий могут быть следующие:

1. Формирование и организация обеспечения следующих приоритетных научно-технологических направлений развития (представлен пример направлений развития, который не является далеко исчерпывающим):

- разработка математических методов и моделирующих программных сред проектирования 3-D электронных компонентов;
- поиск сегнетоэлектриков – кандидатов на применение в электронной компонентной базе терагерцового диапазона;
- отработка существующих технологических процессов под электронную компонентную базу терагерцового диапазона;
- разработка технологии прямого эпитаксиального роста сегнетоэлектрических перовскитов на кремнии и создания транзисторных структур с подзатворным сегнетоэлектриком;
- разработка технологии формирования тонкого слоя сегнетоэлектрика в существующую КМОП-технологию путем осаждения атомарных слоев (ALD – atomic layer deposition).

2. Разработка и принятие Федеральной целевой программы (ФЦП) освоения терагерцового диапазона частот в различных сферах деятельности государства. Например, не только в области обеспечения и повышения обороноспособности страны, но и в интересах развития здравоохранения, народного хозяйства и др. Ключевыми Заказчиками этого направления должны выступать РАН, Минобрнауки, Минпромторг и «Роскосмос».

РАН должна обеспечить научный задел в части материаловедения и существующих технологий, а так же научно обосновать группу материалов, которые обеспечат России технологический прорыв в терагерцовом диапазоне длин волн.

Минобрнауки должно скорректировать программы обучения и подготовки профильных специалистов, тем самым обеспечив развитие будущего кадрового потенциала.

Минпромторг должно обеспечить технологический задел и создать электронную компонентную базу терагерцового диапазона.

«Роскосмос» должен отвечать за разработку технических средств ТГц диапазона и развертывание космической группировки, объединенной в широкополосную сеть, в интересах локации воздушно-космического пространства, дистанционного зондирования Земли, обеспечения широкополосной радиосвязи.

В качестве одного из целевых показателей эффективности рекомендуемой к разработке и принятию ФЦП должно быть определено конкурентное преимущество на мировом рынке разрабатываемой электронной компонентной базы терагерцового диапазона и изделий из них.

3. Формирование, разработка и финансирование следующих тематик НИР и ОКР в области освоения терагерцового диапазона частот и развития терагерцовых технологий:

- НИР «Разработка математических методов и моделирующих программных сред проектирования 3-D электронных компонентов»;
- НИР «Исследования свойств материалов в интересах поиска сегнетоэлектриков – кандидатов на применение в электронной компонентной базе терагерцового диапазона»;
- НИР «Исследования и разработка технологии формирования тонкого слоя сегнетоэлектрика в существующую КМОП-технологию путем осаждения атомарных слоев (ALD – atomic layer deposition)»;
- НИР «Разработка технологии прямого эпитаксиального роста сегнетоэлектрических перовскитов на кремнии и создания транзисторных структур с подзатворным сегнетоэлектриком»;
- ОКР «Разработка балометрического фотоприемного устройства терагерцового диапазона длин волн»;
- ОКР «Разработка фазированной антенной решетки субтерагерцового диапазона на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок BST»;
- ОКР «Разработка электронно-перестраиваемых волноведущих компонентов на основе тонких пленок BST».

Выводы

В настоящее время ведущие зарубежные страны проводят исследования и разработки перспективных образцов ВВСТ, использующих терагерцовый диапазон радиоволн. К ним относятся, прежде всего, радиолокационные системы различного назначения, робототехнические комплексы двойного назначения и разработки в области микроэлектроники. Полученные к настоящему времени научно-технический и технологический заделы позволят в среднесрочной перспективе завершить не только разработку и создание опытных зарубежных образцов ВВСТ, но и перейти к серийному производству ряда высокоэффективных и высокоинформативных систем, а также наметить тенденции по их совершенствованию и будущей модернизации. В конечном итоге проводимые за рубежом исследования и разработки нацелены на создание высокоэффективных средств обнаружения, целеуказания и наведения высокоточного оружия.

Статья выполнена в ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по результатам работ в рамках Государственного задания по проекту № 2.12622.2018/12.1.

Список литературы

1. Пухов Р., дир. Центра АСТ. Российская воздушная операция в Сирии // Журнал «Россия в глобальной политике». 2016. Available at: Yaplakal.com/forum7/topic1317844.html; Glav.su/threads/1063406/ и vpk.name.
2. Быстров Р.П., Гуляев Ю.В., Гвоздев А.Е., Немцов А.В., Шеремет И.Б. Тенденции развития радиоэлектронных систем военного назначения. Монография // М.: Типография 3 ЦНИИ Минобороны России, 2012. 312 с.
3. Лаборатория терагерцовой спектроскопии приступила к работе. Available at: <https://mipt.ru/newsblog/lenta/thzlabopen>.
4. Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств-участников СНГ и технических средствах его выявления. Сер. Технические средства разведывательных служб капиталистических государств // ВИНТИ РАН, 2010, № 3–8.
5. Программные элементы 6-й Главной научно-технической программы Министерства обороны США.
6. Перечень критических военных технологий MCTL (Militarily Critical Technologies List) Министерства обороны США, 2014 год.
7. Программные элементы Управления перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA) за период с 2000 по 2017 гг. (например, Defense Advanced Research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2018 President's Budget Submission. February 2017).
8. Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств – участников СНГ и технических средствах его выявления. Сер. Технические средства разведывательных служб капиталистических государств // ВИНТИ РАН, № 4, 2017 г.
9. Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств – участников СНГ и технических средствах его выявления. Сер. Технические средства разведывательных служб капиталистических государств // ВИНТИ РАН, № 4, 2015 г.
10. Armada International. 2014, 38, № 5, Ground Robots. Pp. 5–16.

References

1. Pukhov R., Director of the AST Center (2016) *Rossiyskaya vozdushnaya operatsiya v Sirii* [Russian air operation in Syria] *Zhurnal «Rossiya v global'noy politike»* [Magazine «Russia in Global Politics»]. Available at: Yaplakal.com/forum7/topic1317844.html; Glav.su/threads/1063406/ and vpk.name.
2. Bystrov R.P., Gulyaev Yu.V., Gvozdev A.E., Nemtsov A.V., Sheremet I.B. (2012) *Tendentsii razvitiya radioelektronnykh sistem voennogo naznacheniya* [Trends in the development of military-purpose radio electronic

systems] *Monografiya Tipografiya 3 TsNII Minoborony Rossii* [Monograph. Printing House 3 of the Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia]. Moscow. 312 p.

3. *Laboratoriya teragertsovoy spektroskopii pristupila k rabote* [Laboratory of terahertz spectroscopy has started to work]. Available at: <https://mipt.ru/newsblog/lenta/thzlabopen>.

4. *Inostrannaya pechat' ob ekonomicheskom, nauchno-tekhnicheskom i voennom potentsiale gosudarstv-uchastnikov SNG i tekhnicheskikh sredstvakh ego vyyavleniya* [Foreign press about the economic, scientific, technological and military potential of the CIS member states and technological means of its detection] *Ser. Tekhnicheskies sredstva razvedyvatel'nykh sluzhb kapitalisticheskikh gosudarstv. VINITI RAN* [Ser. Technical means of reconnaissance services of capitalist states. VINITI RAS]. 2010, No. 3–8.

5. *Programmnye elementy 6-y Glavnoy nauchno-tekhnicheskoy programmy Ministerstva oborony SShA* [Program elements of the 6th Main Scientific and Technological Program of the US Department of Defense].

6. (2014) *Perechen' kriticheskikh voennykh tekhnologiy MCTL* (Militarily Critical Technologies List) *Ministerstva oborony SShA* [The list of critical military technologies MCTL (Militarily Critical Technologies List) of the US Department of Defense].

7. (2017) *Programmnye elementy Upravleniya perspektivnykh issledovatel'skikh proektov Ministerstva oborony SShA (DARPA) za period s 2000 po 2017 gg. (naprimer, Defense Advanced Research Projects Agency* [Program elements of the Office of Advanced Research Projects of the US Department of Defense (DARPA) for the period from 2000 to 2017 (for example, Defense Advanced Research Projects Agency)]. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2018 President's Budget Submission, February 2017).

8. (2015) *Inostrannaya pechat' ob ekonomicheskom, nauchno-tekhnicheskom i voennom potentsiale gosudarstv – uchastnikov SNG i tekhnicheskikh sredstvakh ego vyyavleniya. Ser. Tekhnicheskies sredstva razvedyvatel'nykh sluzhb kapitalisticheskikh gosudarstv* [Foreign press about the economic, scientific, technological and military potential of the CIS member states and technological means of its detection. Ser. Technical means of reconnaissance services of capitalist states] *VINITI RAN* [VINITI RAS]. No. 4, 2017.

9. (2015) *Inostrannaya pechat' ob ekonomicheskom, nauchno-tekhnicheskom i voennom potentsiale gosudarstv – uchastnikov SNG i tekhnicheskikh sredstvakh ego vyyavleniya. Ser. Tekhnicheskies sredstva razvedyvatel'nykh sluzhb kapitalisticheskikh gosudarstv* [Foreign press about the economic, scientific, technological and military potential of the CIS member states and technological means of its detection. Ser. Technological means of reconnaissance services of capitalist states] *VINITI RAN* [VINITI RAS]. No. 4, 2015.

10. Armada International (2014), Ground Robots, 38, No. 5, pp. 5–16.