

## **ПРЕИМУЩЕСТВА ШИРОКОПОЛОСНОГО (ИК-ТГц) ЛОЦИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ**

### ***Александр Григорьевич Черевко***

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, кандидат физико-математических наук, зав. кафедрой физики, тел. (913)980-60-71, e-mail: persp14@mail.ru

### ***Валерик Сергеевич Айрапетян***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, зав. кафедрой специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (913)462-10-75, e-mail: V.hayr10004@mail.ru

### ***Валерий Григорьевич Эдвабник***

АО «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, доктор экономических наук, заместитель генерального директора по развитию АО «НИИЭП», тел. (383)216-05-52

Рассматриваются преимущества широкодиапазонного (ИК-ТГц) опознавания объектов в условиях дымовых, пылевых завес и тумана. Показано, что лоцирование объектов в диапазоне ИК-ТГц обеспечит опознавание объектов в указанных условиях. Приведены результаты локации объектов в ТГц диапазоне, дающие информацию об ЭПР объекта и результаты локации в ИК диапазоне. Сравнение затухания сигнала ИК и ТГц диапазона в условиях дымовых, пылевых завес и тумана указывают на необходимость объединения этих диапазонов для решения задач лоцирования объектов в условиях реальных помех, возникающих в боевых, антитеррористических операциях и при чрезвычайных ситуациях.

**Ключевые слова:** терагерцы; ИК, ТГц излучение; пылевые, дымовые завесы, лоцирование; коэффициент пропускания.

## **BROADBAND IDENTIFICATION OF OBJECTS-ADVANTAGES IN DIFFICULT INTERFERENCE**

### ***Alexander G. Cherevko***

Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, 86, Kirova St., Novosibirsk, 630102, Russia, Ph. D., Head of Physics Department, phone: (913)980-60-71, e-mail: persp14@mail.ru

### ***Valerik S. Ayrapetyan***

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Head of Special Devices, Innovations and Metrology Department, phone: (913)462-10-75, e-mail: V.hayr1004@mail.ru

### ***Valery G. Edvabnik***

Scientific Research Institute of Electronic Devices, 53, Pisareva St., Novosibirsk, 630005, Russia, D. Sc., Deputy Director General for Development, phone: (383)216-05-52

The advantages of wide-range (IR THz) identification of objects in smoke, dust curtains and fog are considered. It is shown that the identification of objects in these conditions is provided by using extended (IR THz) range. The results of the object location in the THz range, giving information about the ESR of the object, and the results of the location in the IR range are presented. Comparison of the attenuation of the IR and THz signal in the conditions of smoke, dust curtains and fog indicate the need to combine these ranges to solve the problems of locating objects in conditions of real interference arising in combat, antiterrorist operations and in emergency.

**Key words:** IR, THz radiation, dust, smoke curtains, locating; transmittance, absorptance.

### ***Введение***

Современное высокоточное оружие широко использует системы наведения инфракрасного диапазона в окнах прозрачности атмосферы  $\sim (1-10)$  мкм, что обеспечивает необходимую точность лоцирования объекта, который не скрыт пылевыми, дымовыми завесами или туманом. В присутствии этих мешающих факторов поглощение ИК излучения заметно, даже на порядки, возрастает, и система наведения может сработать нештатно. Такой результат объясняется релеевским рассеиванием ИК излучения, при котором сечение рассеяния растет как  $(1/\lambda^4)$ . Современные конфликты сопровождаются значительным задымлением и часто происходят в регионах, где возникают песчаные бури. Антитеррористические операции могут сопровождаться дымовыми завесами, такие же помехи возникают и при чрезвычайных ситуациях. Системы наведения должны работать в условиях тумана, где также существенно релеевское рассеяние излучения. Кроме того, дымовые и пылевые завесы устанавливают объекты для экстренной маскировки. Таким образом, актуальной задачей является повышение эффективности систем наведения, работающих в условиях пылевых, дымовых завес и тумана. Задача может быть решена путем использования широкополосной системы наведения, использующей ИК и ТГц диапазон. Такой подход решает проблему релеевского рассеивания, обеспечивая необходимую точность систем наведения.

### ***Методы и материалы***

Терагерцовый диапазон частот электромагнитного спектра (ТГц-диапазон) лежит между областью миллиметровых длин волн и инфракрасным диапазоном. Граничные частоты ТГц-диапазона в настоящее время точно не определены и в разных источниках определяются по-разному. В наиболее широкой интерпретации ТГц-диапазон занимает область частот от 100 ГГц до 10 ТГц (диапазон длин волн от 3 мм до 30 мкм). Учитывая эту интерпретацию, логику ГОСТ 24375-80 и рекомендации Международного союза электросвязи в настоящей работе к ТГц-диапазону отнесем диапазон частот 0,3 – 10 ТГц (30-1000 мкм). Таким образом, ТГц-диапазон является областью сближения электроники и фотоники, существенно отличающихся как теоретической базой, так и техникой генераций, осуществления приема и обработки электромагнитных волн. В основе традиционной электроники лежит классическая теория электромагнетизма

и теория переноса, описывающая электрон-дырочное взаимодействие и возникающее в результате излучение, в то время как в основе фотоники лежат квантомеханические принципы взаимодействия излучения и материи.

Статистический анализ патентной активности, проведенный авторами с использованием открытых источников, в частности [1, 2], показал, что наблюдается линейный рост числа патентов, в этой области, начиная с 2000 года (рис. 1).

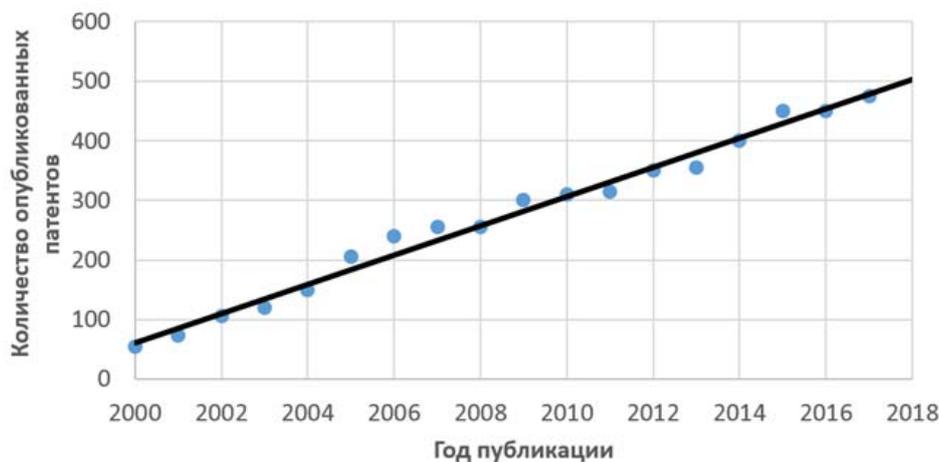


Рис. 1. Мировая тенденция развития ТГц локации (по материалам патентных исследований)

Статистический анализ результатов поиска по странам приоритета показал, что наибольшее число патентов в исследуемой области выдано в странах НАТО, а также США, Китае, Японии (рис. 2). Достаточно большое количество подано в качестве международных заявок. Из рисунка видно, что число Российских патентов в этой области на порядок меньше, чем патентов США, что указывает на актуальность проблемы, поставленной в настоящем исследовании.

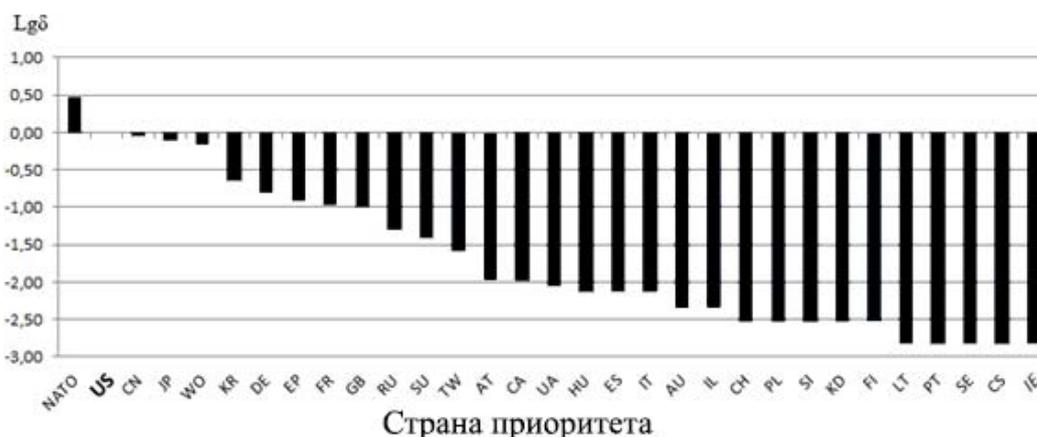


Рис. 2. Относительное число зарегистрированных патентов по ТГц локации ( $\delta = N_K/N_{US}$ , где  $N_{US}$  – число патентов, зарегистрированных в США)

Из рис. 3 видно, что максимум излучения абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой  $T = 20 - 50$  К находится в ТГц диапазоне. Таким образом, холодные объекты в стратосфере и космосе всегда излучают в ТГц диапазоне, при этом, как следует из рис.3 в полосе поглощения шириной в 1 мкм на детектор площадью в  $1 \text{ см}^2$  будет падать излучение мощностью от  $4 \cdot 10^{-9}$  до  $4 \cdot 10^{-7}$  Вт и, при соответствующей пороговой чувствительности приемника, которая в настоящее время достигнута, это излучение будет зарегистрировано. В результате, можно утверждать, что ТГц локация имеет фундаментальную базу, по крайней мере, для пассивной, наименее уязвимой ее части. Высказанное утверждение подтверждается тем фактом, что для изучения космических объектов созданы радиотелескопы, работающие именно в ТГц диапазоне.

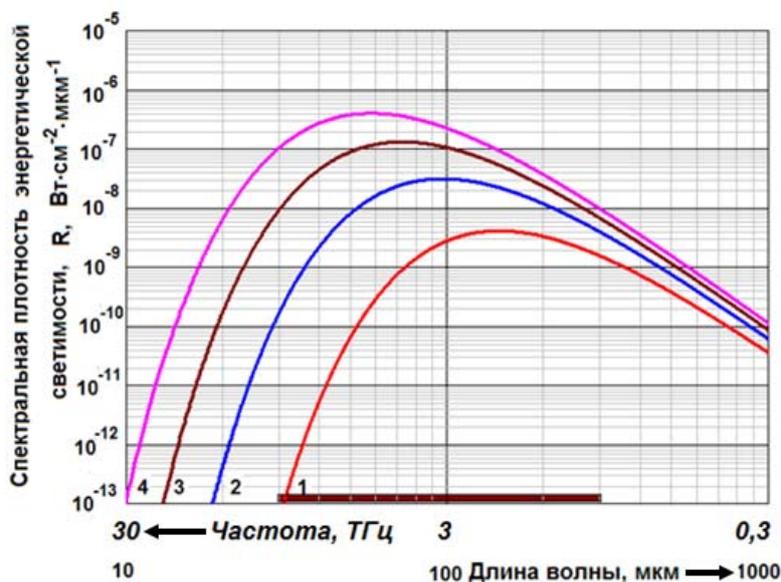


Рис.3. Частотная зависимость спектральной плотности энергетической светимости АЧТ при различных температурах АЧТ. 1 –  $T=20$  К; 2 – 30 К; 3 – 40 К; 4 – 50 К. Залитый прямоугольник – область дальнего ТГц диапазона

## Результаты

### *Анализ окон пропускания в ТГц диапазоне.*

К сожалению, следует отметить малое количество экспериментальных данных о ТГц рассеянии в тумане, дожде, аэрозольных смесях и т.д. пробел связан с отсутствием достаточного количества источников монохроматического ТГц излучения. В настоящее время существует один тип надежного мощного монохроматического ТГц излучения – это лазеры на свободных электронах (ЛСЭ). Таких лазеров в мире считанное количество. При этом единственный в России и самый мощный в мире источник ТГц излучения – это Новосибирский ЛСЭ (НЛСЭ), характеристики которого представлены в табл. 1.

## Характеристики Новосибирского ЛСЭ

№ п/п	Параметр	Величина
1	Средняя мощность	100–300 Вт
2	Пиковая мощность	300–900 кВт
3	Частота повторения импульсов	5,6 МГц
4	Длительность импульса	(60...100) пс
5	Диапазон перестройки длин волн, $\lambda$ , (частот)	(0.03–0.24) мм (1.3–10.0) ТГц
6	Относительная ширина спектра	0,2–0,5 %
7	Исходная поляризация (степень поляризации излучения)	Линейная (> 99,6 %)
8	Поперечная когерентность	Полная
9	Временная когерентность	(40 ... 100) пс
10	Диаметр гауссова пучка на выходе метрологической станции	50–100 мм
11	Расходимость излучения	Дифракционная

Настоящая работа, как мы надеемся, при своем развитии позволит в дальнейшем поставить необходимые эксперименты с НЛСЭ и получить надежные данные по поглощению ТГц излучения. Как следует из характеристик НЛСЭ (табл. 1) важными преимуществами этого прибора является большая мощность в непрерывном режиме, возможность плавной регулировки длины волны его излучения и стабильная частота следования импульсов, что позволяет применить синхронное детектирование и повысить чувствительность экспериментальной установки.

Среди расчетных работ представляет интерес статья [3], где допускается существование окон пропускания в ТГц диапазоне, в частности, предполагаемое окно при 7,2 ТГц имеет коэффициент пропускания сравнимый с сантиметровым диапазоном, т.е. пригодно для создания дальнедействующего ТГц локатора (рис.4). Таким образом, вопрос об окнах пропускания ТГц диапазона остается открытым и требует экспериментальных исследований, поскольку теоретические модели недостаточно точны. Такой эксперимент возможно поставить на основе НЛСЭ.

*Экспериментальные результаты, подтверждающие возможность ТГц локации.*

Авторами разработана экспериментальная установка [4] и проведены измерения ЭПР сложных объектов (рис.5) с использованием НЛСЭ в качестве источника (длина волны 130 мкм). Как видно из рисунка разработка ТГц канала системы наведения имеет практические перспективы.

На рис. 5 приведен экспериментальный результат, когда модель облучается со стороны крыльев. При этом наблюдается минимальное рассеяние (минимальная ЭПР). Здесь существенный вклад могут давать кили хвостового оперения модели.

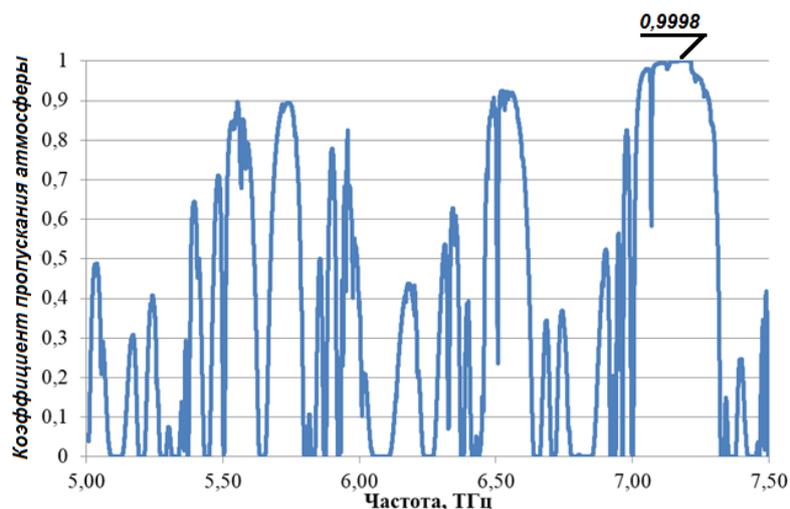


Рис. 4. Коэффициент пропускания атмосферы на уровне моря, средняя широта, лето, стандартная американская модель 1976 года. Расчет Института оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) [3]

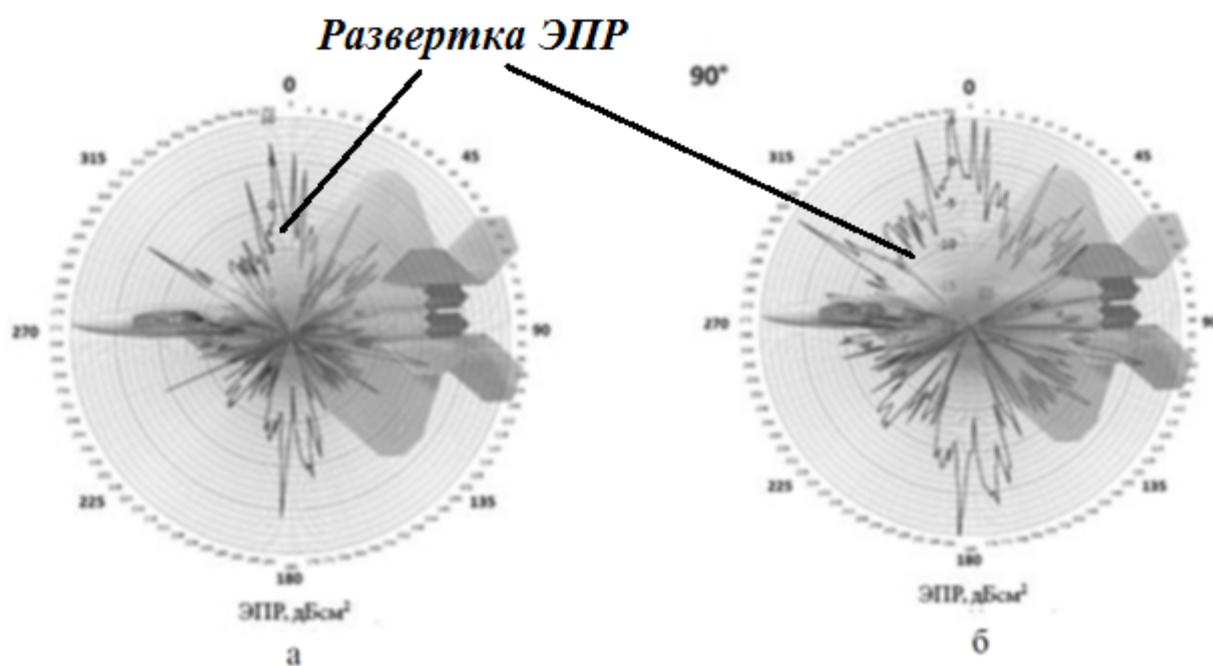


Рис. 5. а) круговая развертка ЭПР модели истребителя F-22 “Raptor”; б) увеличенный масштаб

### Обсуждение

Учитывая, что на затухание ТГц и ИК излучения влияет достаточно много факторов целесообразно экспериментально определить эффективность широкополосной системы наведения (ШСН) для мутных сред [5, 6]. Эффективность определим, сравнив затухание ТГц и ИК излучения при прохождении мутных

сред. На рис. 6 представлена полученная нами в результате обработки литературных экспериментальных данных концентрационная зависимость затухания излучения ИК и ТГц диапазона. Пылевой заслон создавался бентонитовым порошком, который представляет собой смесь глины, образованной из разложения вулканического пепла и в основном состоящей из монтмориллонита и бейделлита. Авторами использовался бентонит в виде частиц пыли для загрузки камеры. Средний радиус частиц составляет 4,3 мкм. Как видно из рис. 6, поглощением ТГц излучением в мутных песчаных средах по сравнению с поглощением ИК излучения можно пренебречь.

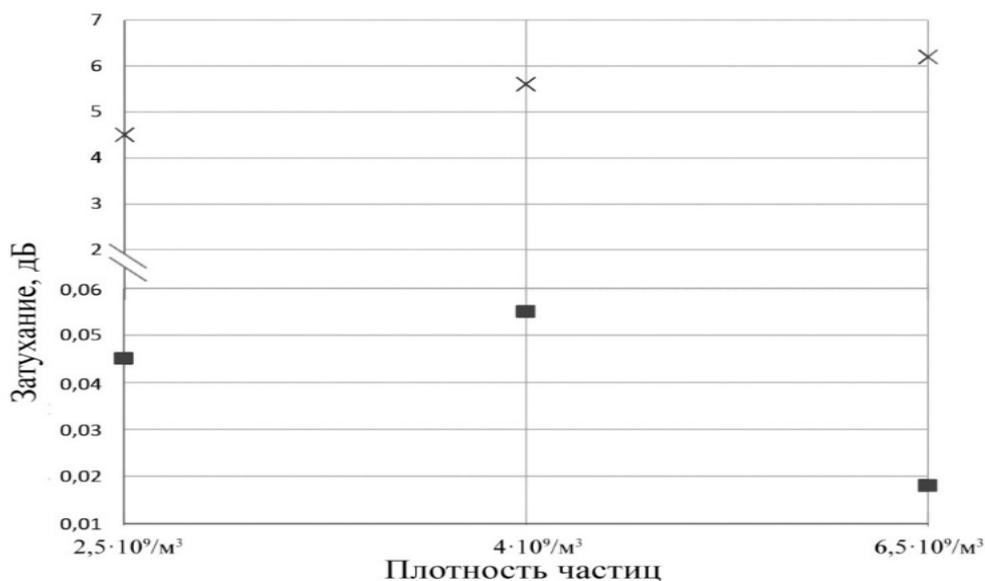


Рис. 6. Эффективность ТГц локаторов при лоцировании в условиях пылевой (бентонитовой) завесы – эксперимент: (X) – ИК излучение ( $\lambda = 1,5$  мкм,  $f = 200$  ТГц), (■) – ТГц излучение ( $f = 0,625$  ТГц), средний радиус частиц – 4,3 мкм

Уровень эффективности работы ТГц локатора по сравнению с ИК-локатором ясен из рис. 7, где приведена расчетная частотная зависимость отношения затуханий ИК и ТГц диапазонов ( $\chi_{\text{ИК}}/\chi_{\text{ТГц}}$ ).

Плотность частиц:  $5 \cdot 10^6$  частиц на кубический сантиметр, радиус частиц 0,2 мкм – расчет.  $f=1$  ТГц – точечная линия,  $f=2$  ТГц – штриховая линия,  $f=3$  ТГц – штрих пунктирная линия. Расчет выполнен с использованием данных [7].

Данные, приведенные на рис.7, показывают, что при задымлениях ТГц локатор более эффективен, чем ИК локатор. Приведенные данные относятся к отдельным частотам, для многих других частот экспериментальные результаты отсутствуют. Таким образом, существует необходимость получения экспериментальных данных по затуханию ИК и ТГц излучения в атмосфере и мутных средах во всем ТГц диапазоне, где такие данные практически отсутствуют (имеются лишь результаты расчета).

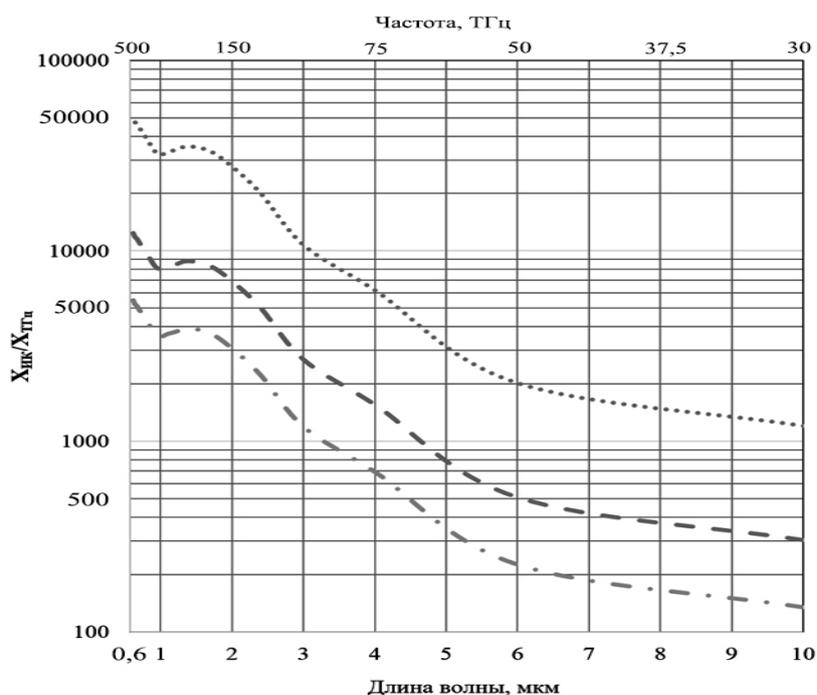


Рис. 7. Сравнительная эффективность ТГц локаторов и локаторов ИК диапазона (1,5 мкм,  $f = 200$  ТГц) при лоцировании в условиях дымовой завесы

В настоящее время в мире ведется интенсивная работа по созданию ТГц локаторов, а, значит, и систем наведения табл. 2.

Таблица 2

#### Область применения ТГц локаторов для тропосферы

Источники	Тип локатора	Области применения
[8-11]	Активный	Получение ЭПР сложных электрически крупных тел
[12]	Активный	Обеспечение безопасности объектов
[13-16]	Активный	Обеспечение безопасности людей, в том числе и на массовых мероприятиях, аэропортах, вокзалах, митингах

Преимущество ТГц локаторов – возможность работать при наличии пылевых, дымовых завес и тумана, высокая точность, основной недостаток – короткодействие.

Важным преимуществом ИК локаторов и систем наведения является их дальное действие, поскольку они работают в окнах прозрачности атмосферы табл. 3.

Таким образом, ИК и ТГц локаторы дополняют друг друга. Исходя из этого, разработка широкополосных (ИК-ТГц) систем обнаружения (наведения) является целесообразной табл. 4.

Таблица 3

## ИК локаторы

Название ИК локатора	Организация, страна	Диапазон перестройки, нм	Энергия, мДж	Частота повт., Гц	Длит. имп., нс	Ширина линии, см <sup>-1</sup>	Расходимость, мрад
МОРО-HF	Spectra Physics, USA	440–1 800	75	10	4–6	0,075	–
Scan Line-S	Lambda Physics Inc., USA	420–2 500	150	1 000	7	1	–
Panther	Continium, USA	410–2 500	100	10	7	0,1	–
Mirage 3 000	Continium, USA	1 500–4 000	10	10	0,5	0,017	–
BBO-3BII	U-Oplaz Technologies Inc., USA	200–4 000	100	1–100	1–10	–	–
OPO-C	Polytec PI Inc., USA	205–4 000	до 150	50	6–12	0,3	–
Vega 200	Thomson CSF Laser, France	225–4 000	50	10	10	0,2	–
Sunlite EX	Continium, USA	205 f=5 000	50	7	7	0,02	–
LT2215	Lotis ТП, Беларусь	410–2 500	40	20	5–6	0,24	4–8
OPO ABC	СГГА, Новосибирск, РФ	1 441–4 240	до 50	25–30	10	0,6	3,3–3,5

Таблица 4

Обоснование перспективности создания широкополосной (ИК-ТГц) системы наведения – ШСН

№ п/п	Характеристика ШСН	ИК канал	ТГц канал	Прогнозируемое св-во ШСИ
1	Размер лоцируемого объекта, м	0,01 м	0,1 м	0,1
2	Дальнодействие	10 км	Не установлено, требуются экспериментальные исследования. В отдельных расчетах R ~ 10 км. Известные из открытой печати результаты, ~ 0,1 км	Экспертные оценки - 1 км
3	Работоспособность в тумане	Нет	Да	Да

№ п/п	Характеристика ШСН	ИК канал	ТГц канал	Прогнозируемое св-во ШСИ
4	Работоспособность при дымовой завесе	Нет	Да	Да
5	Работоспособность при пылевой завесе	Нет	Да	Да
4	Работоспособность при северном сиянии северного сияния	Да	Да	Да
5	Работоспособность при региональных конфликтах	Фрагментарно	Фрагментарно	Работоспособно
6	Работоспособность при анти-террористических операциях	Фрагментарно	Фрагментарно	Работоспособно
7	Работоспособность при чрезвычайных ситуациях	Фрагментарно	Фрагментарно	Работоспособно

### *Заключение*

Анализ публикаций и патентов указывает на заметный рост научных прикладных работ, направленных на освоение ТГц диапазона для решения народнохозяйственных и оборонных задач, в заметной степени направленных на использование ТГц излучения в локации.

1. Начиная с 2000 года патентная активность в этой области в странах НАТО, Китае и Японии возрастает практически линейно, в то время как в России подобная тенденция слабо выражена, поскольку число российских патентов и заявок в области перспективных локационных технологий терагерцового диапазона на порядок меньше, чем в США, а также Китае и Японии.

2. Полученные экспериментальные данные по локации в ТГц диапазоне показали принципиальную возможность реализации систем наведения в ТГц диапазоне. Выполненный анализ указывает на необходимость экспериментального исследования затуханию ИК и ТГц излучения в атмосфере и мутных средах (пылевая и дымовая завеса, туман) во всем ТГц диапазоне, что дает возможность разработки широкополосной системы наведения работоспособной при локальных конфликтах, антитеррористических операциях, чрезвычайных ситуациях, сопровождаемых пылевыми и дымовыми завесами, а также работоспособных в тумане и при северном сиянии. Такие ШСН смогут выполнять задачи обнаружения объектов установленными пылевыми и дымовыми завесами, в частности, при для защиты от ИК систем наведения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cherevko A.G. Patent activity of developed countries in the terahertz range – Comparative analysis // Proceedings 13th International Scientific-Technical Conference on actual problems of electronics APEIE - 2016. - Vol. 1, Part 2. - P. 190-192.

2. Усанов Д.А, Романова Н.В., Салдина Е.А. перспективы и тенденции развития терагерцовых технологий: патентный ландшафт // Экономика науки. – 2017. - Т.3, № 3. - С. 189-202.

3. Михайленко С.Н., Бабилов Ю.Л., Головкин В.Ф. Информационно-вычислительная система "Спектроскопия атмосферных газов". Структура и основные функции // Оптика атмосферы и океана. 2005. - Т. 18, № 09. - С. 765-776.
4. Черевко А.Г. и др. Рассеяние терагерцевых волн объектами сложной конфигурации с использованием Новосибирского лазера на свободных электронах // Вестник СибГУТИ. 2016. № 3. – С. 204-214.
5. Su K. et al. Experimental comparison of terahertz and infrared data signal attenuation in dust clouds // Journal of the Optical Society of America A. - 2012. - vol. 29, number 11. - p. 2360.
6. Su K. et al. Experimental comparison of performance degradation from terahertz and infrared wireless links in fog // Journal of the Optical Society of America A. - 2012. - vol. 29, number 2. - p. 179.
7. Jung P. et al. The influence of smoke on the THz imaging // Photonics Letters of Poland. - 2012. - vol. 4, number 3. - p. 94-96.
8. Gente R. et al. Scaled bistatic radar cross section measurements with a fiber-coupled THz time domain spectrometer // 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. - 2012. - doi: 10.1109/IRMMW-THz.2012.6380347.
9. Liang L. et al. Broadband and wide-angle RCS reduction using a 2-bit coding ultrathin metasurface at terahertz frequencies // Scientific Reports. - 2016. vol. 6, number 1. - doi: 10.1038/srep39252.
10. Iwaszczuk K., et. al. Terahertz radar cross section measurements // OPTICS EXPRESS. - 2010. - Vol. 18, No. 25. - p. 26399-26408
11. Lui H. et al. Terahertz radar cross-section characterisation using laser feedback interferometry with quantum cascade laser // Electronics Letters. - 2015. - vol. 51, number 22. - p. 1774-1776.
12. Yang Q. et al. Experimental research on vehicle-borne SAR imaging with THz radar // Microwave and Optical Technology Letters. - 2017. - vol. 59, number 8. - p. 2048-2052.
13. Song Q., et. al. Fast continuous terahertz wave imaging system for security // Opt. Commun. - 2009. - vol. 282. no. 10. - pp. 2019–2022.
14. Grajal J. et al. 3-D High-Resolution Imaging Radar at 300 GHz With Enhanced FoV // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. - 2015. vol. 63, number 3. - p. 1097-1107.
15. Cooper K. et al. Fast high-resolution terahertz radar imaging at 25 meters // Terahertz Physics, Devices, and Systems IV: Advanced Applications in Industry and Defense. - 2010. – doi: 10.1117/12.850395.
16. Federici J. et al. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs // Semiconductor Science and Technology. - 2005. vol. 20, number 7. - p. S266-S280.

© А. Г. Черевко, В. С. Айрапетян, В. Г. Эдвабник, 2019