

ДИСТАНЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ В ИК-ТГц ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН

Валерик Сергеевич Айрапетян

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, д.т.н., заведующий кафедрой специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. +7 (913) 462-10-75, e-mail: V.hayr10004@mail.ru

В работе рассматриваются вопросы обнаружения объектов в условиях дымовых, пылевых завес и тумана в диапазонах ИК-ТГц длин электромагнитных волн. Показано, что дистанционное обнаружение объектов и определение направления их движения в условиях реальных помех в атмосфере обеспечивается с высокой точностью и надежностью в диапазонах ИК-ТГц. Результаты экспериментальных измерений и выполненные расчеты показывают, что для уменьшения затухания приемного сигнала от объекта в условиях дымовых, пылевых завес и тумана необходимо совместное применение ИК и ТГц методов.

Ключевые слова: ИК, ТГц излучение, пылевые, дымовые завесы, коэффициент пропускания атмосферы

REMOTE DETECTION OF OBJECTS IN THE PRESENCE OF INTERFERENCE IN IR-THz WAVELENGTH RANGE

Valerik S. Ayrapetyan

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D.Sc., Head of Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: +7 (913) 462-10-75, e-mail: V.hayr1004@mail.ru

The paper deals with issues of object detection in conditions of smoke, dust curtains and fog in the IR-THz ranges of electromagnetic wavelengths. It is shown that remote detection of objects and determination of their movement direction under conditions of real interference in the atmosphere is provided with high accuracy and reliability in the IR-THz ranges. The results of experimental measurements and the performed calculations show that to reduce the attenuation of the signal received from the object under conditions of smoke, dust curtains and fog, it is necessary to use IR and THz methods together.

Keywords: IR, THz radiation, dust, smoke screens, atmospheric transmittance

Введение

Современное высокоточное оружие широко использует системы наведения инфракрасного диапазона в окнах прозрачности атмосферы $\sim (1-9)$ мкм, что обеспечивает необходимую точность обнаружения и определения направления движения объекта, который не скрыт пылевыми, дымовыми завесами или туманом [1]. В присутствии этих мешающих факторов поглощение обратно рассеянного от объекта ИК излучения заметно возрастает, что приводит к нестабильной работе системы наведения. Резкое возрастание поглощения сигнала объясняется рэлеевским рассеянием ИК излучения, при котором сечение рассеяния растет как $(1/\lambda^4)$.

Современные конфликты сопровождаются преднамеренными (организованными) и/или непреднамеренными помехами (включая взаимные помехи). Антитеррористические операции сопровождаются дымовыми завесами, такие же помехи возникают и при чрезвычайных ситуациях. Системы наведения должны надежно работать в условиях тумана, где существенный вклад в коэффициенте поглощения вносит рэлеевское рассеяние [1]. Кроме того, преднамеренные (организованные) помехи (дымовые, пылевые завесы и др.) устанавливаются объекты для экстренной маскировки. Таким образом, актуальной задачей является повышение чувствительности и эффективности действия систем наведения, работающих в условиях пылевых, дымовых завес и тумана. Такая задача может быть решена использованием широкополосной системы наведения, использующей ИК и ТГц диапазоны, так как максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела (АЧТ) приходится именно на эти диапазоны электромагнитных волн [2]. На рис. 1 приведен спектры поглощения АЧТ при температуре от 20 до 50 К в ТГц диапазоне [2]. Максимальное пропускание излучения АЧТ в ТГц диапазоне решает проблему рэлеевского рассеяния, обеспечивая высокую эффективность действия и необходимую точность систем наведения [2].

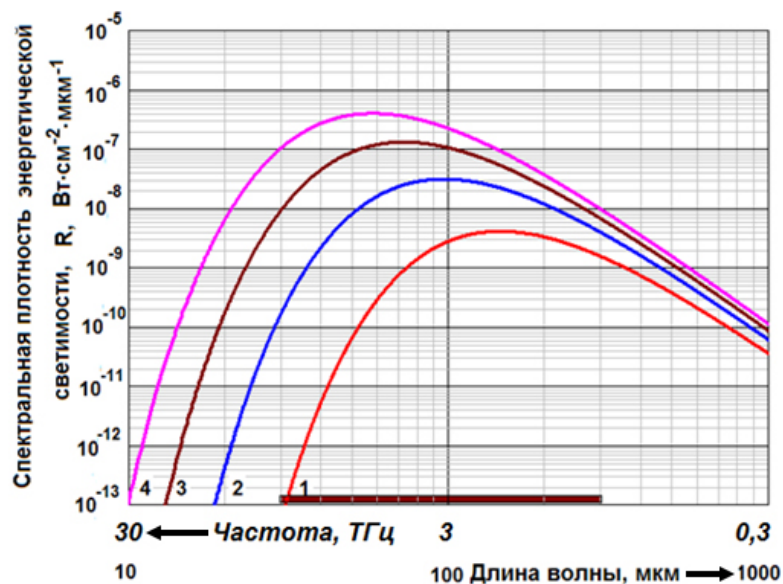


Рис.1. Частотная зависимость спектральной плотности энергетической светимости АЧТ при различных температурах АЧТ [2]. 1 – $T=20$ К; 2 – 30 К; 3 – 40 К; 4 – 50 К. Залитый прямоугольник – область дальнего ТГц диапазона

Таким образом, объекты, движущиеся в верхних слоях атмосферы и космосе, имеют максимум излучения в ТГц диапазоне, при этом, как следует из рис.1, в полосе поглощения шириной в 1 мкм на детектор площадью в 1 см² будет падать излучение мощностью от $4 \cdot 10^{-9}$ до $4 \cdot 10^{-7}$ Вт. Такая мощность сигнала превышает порог чувствительности современных приемников, следовательно, сиг-

нал будет зарегистрирован системой наведения. Это подтверждается тем фактом, что для изучения космических объектов используются радиотелескопы, работающие в ТГц диапазоне длин электромагнитных волн.

Обсуждение

Известно, что преднамеренные (организованные) и/или непреднамеренные помехи в атмосфере вносят дополнительный вклад в эффекты поглощения и рассеяния электромагнитного излучения. На рисунке 2 показано прохождение электромагнитного излучения через стандартную атмосферу на горизонтальной трассе длиной 1 828 м на уровне моря с малым спектральным разрешением [3,4].

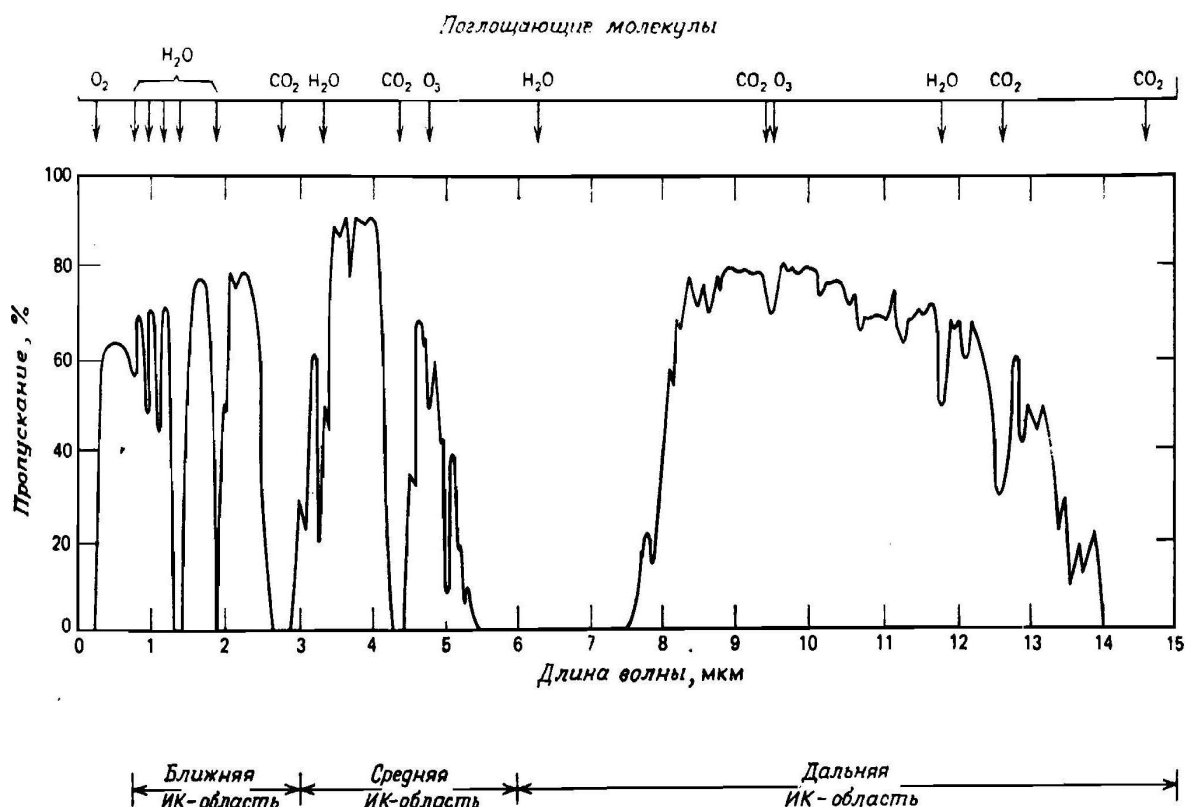


Рис.2. Пропускание атмосферы на горизонтальной трассе длиной 1 828 м на уровне моря

В инфракрасном спектральном интервале (1–10 мкм) имеется всего несколько окон прозрачности атмосферы. Спектральная прозрачность еще ухудшается при наличии дополнительных помех. Если записать этот спектр с высоким разрешением, то в этом диапазоне длин волн можно наблюдать множество микроокон прозрачности. Именно эти микроокна представляют большой интерес для узкополосных ИК и ТГц источников. Наиболее перспективными длинами волн ИК-ТГц излучения являются те, которые попадают в окна прозрачности атмосферы [5].

Незначительное количество публикаций об исследованиях ИК-ТГц рассеяния в тумане, дожде, аэрозольных смесях и т.д. связано с отсутствием достаточного количества высокомонохроматичных источников ИК-ТГц излучения. В инфракрасном диапазоне наиболее перспективными являются параметрические генераторы света (ПГС). В табл. 1 приведены основные технические характеристики ПГС, выпускаемых в мире.

Таблица 1

Основные технические характеристики ИК перестраиваемых лазеров [3]

Название ИК локаторов	Организация, страна	Диапазон перестройки, нм	Энергия, мДж	Частота повт., Гц	Длит. имп., нс	Ширина линии, см ⁻¹	Расходимость, мрад
Scan Line-S	Lambda Physics Inc., USA	420–2 500	150	1 000	7	1	–
Vega 200	Thomson CSF Laser, France	225–4 000	50	10	10	0,2	–
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	–
Sunlite EX	Continium, USA	205–5 000	50	7	7	0,02	–
OPO-C	Polytec PI Inc., USA	205–4 000	до 150	50	6–12	0,3	–
МОРО-НФ	Spectra Physics, USA	440–1 800	75	10	4–6	0,075	–
BBO-3ВII	U-Oplaz Technologies Inc., USA	200–4 000	100	1–100	1–10	–	–
OPO ABC	СГУГиТ, Новосибирск, РФ	1410–9030	до 50	25–30	10	0,6	3,3–3,5
LT2215	Lotis ТП, Беларусь	410–2 500	40	20	5–6	0,24	4–8

Из перечисленных ИК перестраиваемых лазеров можно выделить многофункциональный комплекс «ОРО ABC», разработанный в Сибирском государственном университете геосистем и технологий (СГУГиТ). В работах [7–9] сообщается об испытании многофункционального комплекса «ОРО ABC», с плавной

и/или дискретной перестройки длины волны излучения в диапазоне 1,41 до 9,03 мкм. Продемонстрирована возможность дистанционного обнаружения и определения направления движения объектов при наличии различного рода помех в открытой атмосфере методом дифференциального поглощения и рассеяния.

В ТГц диапазоне высокоинтенсивное монохроматическое излучение можно получить на основе лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) [10]. Таких лазеров в мире – считанное число. При этом единственный в России и самый мощный в мире источник ТГц излучения – это Новосибирский ЛСЭ (НЛСЭ), характеристики которого представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные технические характеристики Новосибирского ЛСЭ [10]

№п/п	Техническая характеристика	Значение
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, λ	(0,03 – 0,24) мм
6	Относительная ширина спектра	(1,3 – 10,0) ТГц
7	Исходная поляризация (степень поляризации излучения)	0,2 – 0,5 % 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, при своем развитии, позволит в дальнейшем поставить необходимые эксперименты с НЛСЭ и получить надежные данные по поглощению ТГц излучения. Анализ основных технических характеристик НЛСЭ (табл. 2) показывает, что наиболее важными из них являются высокая интенсивность излучения лазера, работающего в непрерывном режиме, а также возможность плавной перестройки частоты излучения и высокая частота повторения световых импульсов. Основным преимуществом ТГц лазерного излучения является его беспрепятственное прохождение через пылевые, дымовые завесы и туман, высокая точность, недостатком считается экспоненциальное затухание излучения с расстоянием (короткодействие) [11,12].

В ИК диапазоне привлекательным для дистанционного исследования параметров движущиеся объектов является многофункциональный комплекс «ОРО АВС» с системой наведения, преимуществом которого являются его дальное действие, высокая интенсивность и узкая спектральная ширина излучения, необходимая для беспрепятственного прохождения через микроокна прозрачности атмосферы.

Таким образом, ИК и ТГц оптические системы дополняют друг друга. Исходя из этого, разработка широкополосных (ИК-ТГц) оптических систем обнаружения (наведения) (ШСН) является целесообразной (табл. 3) [1].

Таблица 3

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

№ п/п	Характеристика ШСН	ИК канал	ТГц канал	Прогнозируемое св-во ШСН
1	Размер лоцируемого объекта, м	0,01 м	0,1 м	0,1 м
2	Дальнодействие	10 км	Не установлено, требуются экспериментальные исследования. В отдельных расчетах $R \sim 10$ км. Известные из открытой печати результаты, $\sim 0,1$ км [13,14]	Экспертные оценки - 1 км
3	Работоспособность в тумане	Нет	Да	Да
4	Работоспособность при северном сиянии	Да	Да	Да
5	Работоспособность при дымовой завесе	Нет	Да	Да
6	Работоспособность при пылевой завесе	Нет	Да	Да
7	Работоспособность при антитеррористических операциях	Фрагментарно	Фрагментарно	Работоспособна
8	Работоспособность при чрезвычайных ситуациях	Фрагментарно	Фрагментарно	Работоспособна
9	Работоспособность при региональных конфликтах	Фрагментарно	Фрагментарно	Работоспособна

Выводы

В работе показано, что полученные результаты экспериментальных исследований с применением ИК–ТГц оптических систем могут привести к заметному росту числа фундаментальных прикладных и научных работ, направленных на освоение ИК-ТГц диапазона для решения народнохозяйственных и оборонных задач, и позволяют сделать следующие выводы.

1. Для дистанционного обнаружения и определения направления движения объектов при наличии различного рода помех в открытой атмосфере методом дифференциального поглощения и рассеяния наиболее подходящим являются

высокоэнергетичные (>10 мДж) ИК параметрические лазеры с плавной и/или дискретной перестройкой частоты излучения.

2. Для обеспечения высокой чувствительности и точности измерения обратно рассеянного от объекта сигнала целесообразно использовать перестраиваемые ПГС со спектральной шириной излучения меньше окна прозрачности атмосферы.

3. Полученные экспериментальные данные по локации в ТГц диапазоне показали принципиальную возможность реализации систем наведения в ТГц диапазоне. Анализ данных показывает необходимость продолжения экспериментальных исследований взаимодействия ИК и ТГц излучения с атмосферой, содержащей мутные среды (пылевая и дымовая завеса, туман).

4. В работе обоснованы условия разработки ШСН во всем ИК-ТГц диапазоне, работоспособной при локальных конфликтах, антитеррористических операциях, чрезвычайных ситуациях, сопровождаемых пылевыми и дымовыми завесами, а также работоспособной в тумане и при северном сиянии. Такие ШСН смогут выполнять задачи обнаружения объектов за оперативно установленными пылевыми и дымовыми завесами, в частности, для защиты от ИК систем наведения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

2. Черевко А.Г., Айрапетян В.С., Эдвабник В.Г. Преимущества широкополосного (ИК-ТГц) лоцирования объектов при наличии помех / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018: XIV Междунар. науч. конгр., Национальная конф. «Наука. Оборона. Безопасность», 21–22 апр. 2019 г., Новосибирск: сб. материалов. – Новосибирск: СГУГиТ, 2019. – С. 87–97.

3. Межерис, Р. Лазерное дистанционное зондирование атмосферы / Р. Межерис. – М.: Мир, 1987.

4. Molina M.J., Rowland F.S. Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom Catalyzed Destruction of Ozone, *Nature*, 249, 810–812 (1972).

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. V.S. Ayrapetyan, *Journal of Applied Physical Science International*, ISSN No. : 2395-5260 (Print), 2395-5279, Vol.: 3, Issue.: 2.

7. Apresyan G.M., Ayrapetyan V.S., Sargsyan K.A., Sargsyan T.K., Tunable OPO for Differentiation Absorption LIDARs. Proc. Int. Conf. on Lasers, Applications and Technologies LAT-2002, 22–28 June 2002, Moscow, 89–91.

8. Айрапетян В.С. Внерезонаторная параметрическая генерация с плавной и (или) дискретной перестройкой частоты излучения / Вестник НГУ, Серия: Физика, 2009, т.4, вып.3, с. 20 – 24.

9. Jung P. et al. The influence of smoke on the THz imaging // *Photonics Letters of Poland*. – 2012. – Vol. 4, number 3. – P. 94–96.

10. 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.

11. 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.
12. Iwaszczuk K., et. al. Terahertz radar cross section measurements // *OPTICS EXPRESS*. – 2010. – Vol. 18, No. 25. – P. 26399–26408.
13. 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.
14. 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.

© В. С. Айрапетян, 2021