

base during reconstruction of other images. O-fields use intra-field coding, and predictions for O-fields are not formed. N-even-fields are images coded by prediction based on the previous field. N-fields utilize intra-field coding that produces line difference of two neighbor lines of even and odd fields. M-odd-fields are coded under prediction based on previous odd-field from other frame. Even and odd fields are replaced together over all video or frame of group to improve visual quality of image. That provides to frames with higher resolution and improving of image quality. This work also discusses practical realization of ONM system, coding scheme and decoding devices. We present their detailed descriptions and comparison analysis of known systems based on MPEG-compression together with methods for improving of compression effectiveness for digital video data stream over television channel.

Keywords: quantizer, predictor, entropy coding, multiplexer, decimation, adder.

DOI: 10.18469/ikt.2015.13.2.12.

Bezrykov Vadim Nicolaevich, Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Television and Sound-broadcasting, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 495 957 77 08. E-mail: cdtv@mail.ru

Balobanov Andrey Vladimirovich, PhD in Technical Science, Assistant professor of the Department of Television and Sound-broadcasting, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 495 957 77 08. E-mail: andrey_sam@mail.ru.

Balobanov Vladimir Grigorjevich, PhD in Technical Science, Associated Professor of the Department of Radiocommunication, Broadcasting and Television, Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russian Federation. Tel.: +7 846 3368701. E-mail: balobanov@tv.psati.ru.

References

1. Balobanov A.V., Balobanov V.G., Bezrukov V.N. Szhatie tsifrovogo potoka videosignala v televizionnom kanaley svyazi [Compression of digital video stream in a television communication channel]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2013, vol.11, no. 3, pp. 60-64.
2. Smirnov A.V., Peskin A.E. *Tsifrovoe televidenie* [Digital TV - from theory to practice]. Moscow, Hotline – Telecom Publ., 2005. 352 p.
3. Balobanov V.G., Bezrukov V.N., Balobanov A.V. *Sposob szhatiya tsifrovogo potoka v televizionnom kanale svyazi* [Method of compression in the television digital stream communication channel]. Patent RF, no. 2467499, 2012.
4. Kataev S.I., Hromoi B.P., Bezrukov V.N., Balobanov V.G. *Sposob peredachi dvuh programm cherno-belogo televideniya* [Method of transmitting two programs in black and white television]. Copyright certificate RF, no. 301875, 1971.

Received 25.02.2015

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 54.061

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФУНКЦИИ РАЗМЫТИЯ ТОЧКИ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАТУР ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ

Березовский А.А.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: andrey.berezowskiy@gmail.com*

В работе показано, как, используя следующую из схемы формирования терагерцевого изображения зависимость функции рассеяния точки (ФРТ) произвольного химического вещества от его спектра поглощения, идентифицировать это вещество только по зарегистрированному сенсором изображению. Для этого описана система формирования изображения в ТГц диапазоне, и для этой системы получена зависимость ФРТ изображения от сигнатуры вещества в предположении сильной дефокусировки. Предложен способ оценки ФРТ по искаженному изображению и метод обнаружения сигнатуры. В рамках

моделирования для двух различных сигнатур были рассчитаны функции размытия точки, получены искаженные изображения, оценена помехоустойчивость принятия решения о том, какая из двух участвовавших в моделировании сигнатур стала причиной искажений на зарегистрированном, неизвестном для алгоритма принятия решения, изображении.

Ключевые слова: терагерцевая спектроскопия, функция размытия точки, слепая идентификация, сигнатуры химических веществ, дифракционный предел, дефокусировка, матричный сенсор.

Введение

Терагерцевый диапазон, находящийся между миллиметровыми волнами и инфракрасным излучением, из-за трудностей, связанных с технической реализацией приема и передачи сигналов, известен в литературе как «THz gap» [1]. Тем не менее именно в этом диапазоне у химических веществ был обнаружен механизм поглощения радиоволн, дающий специфический для каждого вещества набор пиков поглощения и за счет этого позволяющий различать образцы по их спектру.

В наше время специалисты по безопасности ставят вопрос о возможности практических применений терагерцевой спектроскопии для обнаружения опасных веществ, скрытых внутри писем и посылок, багажа в аэропорту, под одеждой и т. д. [2]. В связи с появлением коммерческих терагерцевых спектрометров временного разрешения (terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) по всему миру были проведены исследования спектра поглощения различных веществ, запрещенных к хранению и распространению а также похожих на них по спектру, но не представляющих опасности [3-14]. Оказалось, что для взрывчатых веществ например, методом ТГц-спектроскопии можно обнаружить значительное количество образцов, обычно участвующих в подобных экспериментах в отношении других методов.

В таблице 1 собрано несколько публикаций об обнаружении опасных веществ с целью приблизительно оценить, какие вещества сейчас являются наиболее изучаемыми. Требования к регистрирующей аппаратуре можно оценить в первом приближении, если принять во внимание, что для обнаружения наиболее информативными являются пики поглощения. Для исследований [3-4; 7; 11] они оказались, как показано на рис. 1, в основном в диапазоне 0,5 ... 3 ТГц. В настоящее время, кроме упомянутых выше работ по сбору сигнатур опасных веществ, также публикуются работы по решению задач обнаружения и различения химических веществ, в терагерцевом диапазоне при помощи методов обработки сигналов, позволяющих обойтись меньшим объемом измерений при решении задачи идентификации [13; 15].

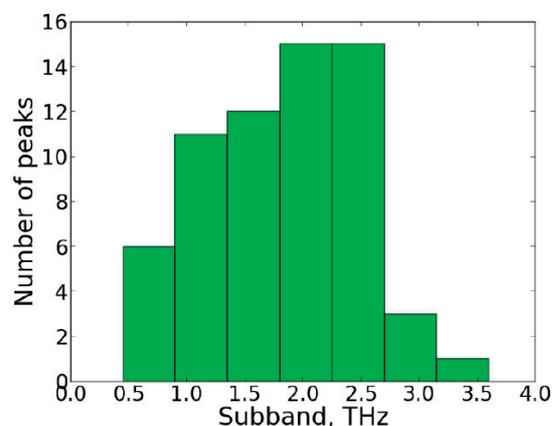


Рис. 1. Распределение пиков поглощения по диапазону частот

В работе представлен способ идентифицировать материал образца с использованием системы получения изображений в терагерцевом диапазоне, не прибегая непосредственно к спектроскопии. Данный подход описывает, как идентифицировать химическое вещество при помощи значительно более простого оборудования, чем THz-TDS-техника, использованная в ранее опубликованных работах.

Модель процесса формирования терагерцевого изображения

На рис. 2 показана обычная схема формирования изображения, при этом исследуемое вещество расположено так, чтобы можно было зарегистрировать изображение в режиме поглощения. На этом данном рисунке BB – источник широкополосного терагерцевого излучения. В качестве источника излучения можно использовать, например, излучение человеческого тела в терагерцевом диапазоне, как это было сделано в работах [31-32], или излучение Солнца. Лучи R попадают на образец S , состоящий целиком из идентифицируемого вещества χ , который, если это одно из изученных в предыдущих работах веществ описанным ниже образом, ослабит некоторые компоненты спектра благодаря пикам поглощения.

Из закона Бугера-Ламберта-Бера [33-34] следует, что для каждой частоты f спектра источника BB интенсивность излучения будет ослаблена в $e^{\alpha_{\chi}(f)}$ раз, где $\alpha_{\chi}(f)$ – спектр поглощения

изучаемого вещества χ . Получившиеся «окрашенные» таким образом лучи R_c со спектром $g_\chi(f) \propto e^{-\alpha_\chi(f)}$ фокусируются линзой L на матрицу чувствительных к интенсивности излучения элементов M , например болометров.

Из-за дифракционных ограничений а также благодаря дисперсии в линзе L изображение y_χ будет, очевидно, результатом свертки некой ФРТ $h_\chi(l_1, l_2)$ и неизвестного, неискаженного изображения $x_\chi(m_1, m_2)$, зависящих от выбора просвечиваемого образца $\chi \in X$:

$$y_\chi(m_1, m_2) = \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} x_\chi(m_1 - l_1, m_2 - l_2) h_\chi(l_1, l_2) dl_1 dl_2 + n(m_1, m_2), \quad (1)$$

где l_1, l_2, m_1, m_2 – пространственные координаты, $n(m_1, m_2)$ – случайный шум, $L_1; L_2$ – размеры ФРТ. Ниже будет показано как связаны ФРТ $h_\chi(l_1, l_2)$ и спектр поглощения $\alpha_\chi(f)$ для произвольного вещества χ и предложен способ идентификации вещества χ только по зарегистрированному сенсором изображению y_χ .

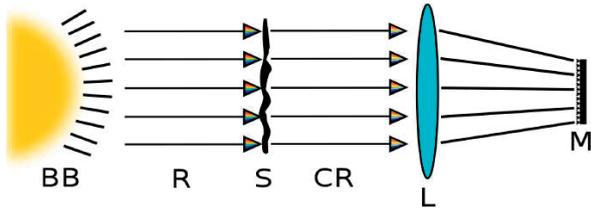


Рис. 2. Схема регистрации изображения

Связь спектра поглощения химического вещества с ФРТ на зарегистрированном изображении этого вещества

Как было установлено [35] и подтверждено при восстановлении изображений [36], в случае относительно сильных расфокусировок можно пренебречь дифракционными ограничениями и использовать равномерное размытие для описания ФРТ. Для излучения на частоте f :

$$h(f, l_1, l_2) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r^2(f)}, & l_1^2 + l_2^2 < r^2(f); \\ 0, & l_1^2 + l_2^2 \geq r^2(f). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь l_1, l_2 – пространственные координаты, $r(f)$ – радиус размытия, зависящий от частоты.

При исследовании образца S , состоящего из вещества χ , на каждой частоте излучение будет ослаблено согласно спектру поглощения этого

вещества. Вследствие некогерентности волн различных частот результирующая ФРТ $h_\chi(l_1, l_2)$ будет определяться следующим выражением:

$$h_\chi(l_1, l_2) = \int_{f_1}^{f_2} g_\chi(f) h(f, l_1, l_2) df, \quad (3)$$

где f_1 и f_2 – границы полосы чувствительности сенсора.

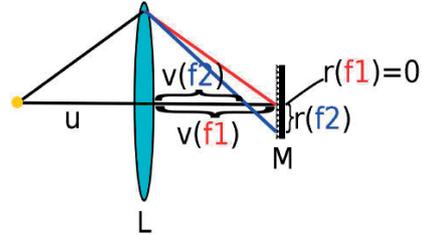


Рис. 3. Радиус размытия

Найдем зависимость $r(f)$. На рис. 3 построено изображение точки для частот излучения f_0 и $f > f_0$. Пусть $v(f)$ обозначает расстояние до сфокусированного изображения точки, удаленной от линзы на расстоянии u . Экран размещен на таком расстоянии, что линза дает неискаженное изображение в плоскости M для некоторой частоты f_0 . Физически на этой частоте ФРТ будет представлять из себя диск Эйри, однако, если, как мы условились выше, не применять геометрическую ФРТ для относительно малых размытий с целью моделирования искажения изображений, то можно считать $r(f_0) = 0$. Путем элементарных тригонометрических преобразований и, дополнительно, принимая во внимание вариант рис. 3 для случая $f < f_0$, получим:

$$r(f) = \left| \frac{v(f_0)}{v(f)} - 1 \right| \frac{D}{2}, \quad (4)$$

где D – диаметр линзы.

Предположим, что линза L является тонкой линзой. Тогда для нее справедлива следующая формула [33]:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v(f)} = \frac{1}{F(f)}, \quad (5)$$

где $F(f)$ – фокусное расстояние линзы. Также известно [33] выражение для зависимости $F(\lambda)$:

$$\frac{1}{F(f)} = (n(f) - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n(f) - 1)d}{nR_1R_2} \right), \quad (6)$$

где $n(f)$ – показатель преломления вещества линзы, зависящий от длины волны излучения,

R_1 и R_2 – радиусы кривизны линзы, d – толщина линзы на оптической оси.

Подставив в (4) формулы (5) и (6), мы сможем описать $r(f)$ следующим образом:

$$r(f) = \left| \frac{(n(f)-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n(f)-1)d}{nR_1R_2}\right)\left(u - \left((n(f)-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n(f)-1)d}{nR_1R_2}\right)\right)^{-1}\right)}{(n(f_0)-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n(f_0)-1)d}{nR_1R_2}\right)\left(u - \left((n(f_0)-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n(f_0)-1)d}{nR_1R_2}\right)\right)^{-1}\right)} - 1 \right| \frac{D}{2} \quad (7)$$

Зависимость $n(f)$ можно аппроксимировать при помощи уравнения Коши [37]:

$$n(\lambda) = B + \frac{C}{\lambda^2} + \frac{D}{\lambda^4} + \dots, \quad (8)$$

где $\lambda = \frac{c}{f}$ – длина волны в вакууме, B ; C ; D ... – константы, которые можно определить, зная для линзы коэффициенты преломления $n(\lambda_i)$ на некоторых λ_i .

Моделирование идентификации сигнатур химических веществ по зарегистрированному изображению

При моделировании использовались характеристики коммерчески доступной собирающей линзы производства корпорации Thorlabs для терагерцевого диапазона. Параметры линзы приведены в таблице 2. У данной линзы $R_2 = \infty$, и при использовании первых двух слагаемых в (8), с учетом приведенных выше соображений, зависимость радиуса размытия от частоты можно описать как:

$$r(f) = \left| \frac{(B + \frac{Cf^2}{c^2} - 1)\left(\frac{u}{R_1} - (B + \frac{Cf^2}{c^2} - 1)^{-1}\right)}{(B + \frac{Cf_0^2}{c^2} - 1)\left(\frac{u}{R_1} - (B + \frac{Cf_0^2}{c^2} - 1)^{-1}\right)} - 1 \right| \frac{D}{2}. \quad (9)$$

Для удобства численного интегрирования ФРТ для одной частоты (2) можно задать через функцию $sign(l_1, l_2)$. Тогда интеграл (3), дающий ФРТ для заданного спектра поглощения вещества χ , можно вычислить в виде:

$$h_\chi(l_1, l_2) = \int_{f_1}^{f_2} e^{-\alpha_\chi(f)} \frac{1}{2\pi r^2(f)} (sign(r(f) - \sqrt{l_1^2 + l_2^2}) + sign(r(f) + \sqrt{l_1^2 + l_2^2})) df. \quad (10)$$

Предположив, что в диапазоне частот от $f_1 = 0.5THz$ до $f_2 = 3THz$ коэффициент пре-

ломления $n(f)$ линзы L меняется на 20%, можно оценить коэффициенты в уравнении Коши:

$$C = \frac{n(f_2) - n(f_1)}{(f_2/c)^2 - (f_1/c)^2} = 2,88 \cdot 10^9;$$

$$B = n(f_2) - \frac{Cf_2^2}{c^2} = 1,392$$

и смоделировать формирование изображений образцов S_1 и S_2 , состоящих из материалов χ_1 и χ_2 со спектрами поглощения, соответственно, α_1 и α_2 , изображенными на рис. 4.

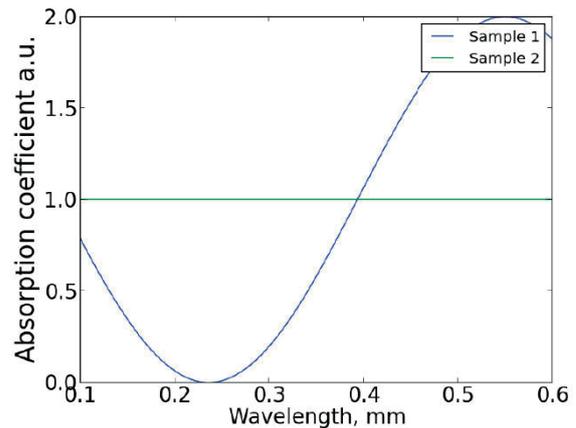


Рис. 4. Спектры поглощения, использованные при моделировании

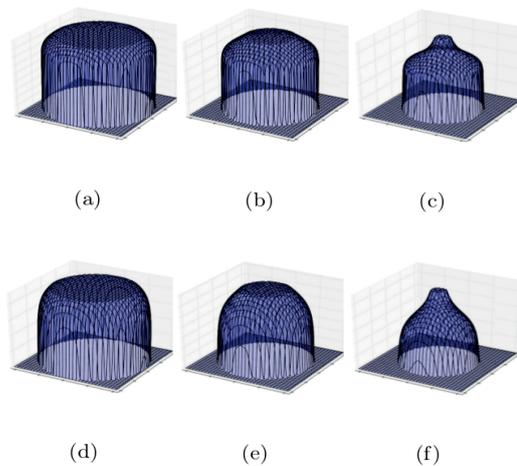


Рис. 5. Результаты моделирования ФРТ по спектрам поглощения с рис. 4.

Таблица 1. Опасные вещества и методы их обнаружения

Вещество\Метод	Дифференциальная спектроскопия	Спектрометрия ионной подвижности	Масс-спектрометрия	Рамановская спектроскопия	Медоносные пчелы [16]	Нейтронная активация	Кремниевые нанонити	Собаки	Рентгеновское излучение	Рекомендации специалистов по безопасности	Терагерцевая спектроскопия
Гексоген	[17]	[18]	[19]	[20, 21]	[22]	[23]	[24]	[25]	[26]	[27]	[4, 8, 7, 14]
Тринитротолуол	[17]	[18]	[19]		[22]	[23]	[28, 24]	[25]	[26]	[27]	[4, 7, 14]
ТЭН	[17]	[18]	[19]	[20, 21]		[23]	[24]	[25]	[26]		[4, 8, 7, 14]
Аммиачная селитра	[17]	[18]				[23]		[25]		[27]	[7]
2,4-динитротолуол	[29]	[18]				[23]					[7]
m DNB	[29]	[18]				[23]					[7]
Тетрил		[18]				[23]					[7]
TNA		[18]				[23]					
TNB		[18]				[23]					
TNP		[18]				[23]					
Октоген		[18]	[19]			[23]					[4, 7]
Нитроглицерин		[18]	[19]	[20]		[23]					[7]
2,6-динитротолуол		[18]				[23]					[7]
2A-DNT						[23]					[7]
4A-DNT						[23]					[7]
EGDN		[18]				[23]					
дАДФ		[18]				[23]					
$KClO_4$											[7]
$KClO_3$											[7]
Пероксид ацетона		[18]	[19]							[27]	[11]
p-MNT		[18]				[23]					
DMNB		[18]	[19]		[30]	[23]					[7]
o-MNT		[18]				[23]					
2-ADNT		[18]				[23]					
ГМТД			[19]			[23]				[27]	
Семтекс				[20]	[22]	[23]		[25]			[4, 8]
Динамит						[23]		[25]			
Порох						[23]		[25]			[7, 14]
ТАТБ						[23]			[26]		
4-нитротолуол						[23]					[7]
Нитрат мочевины						[23]				[27]	

При помощи численного интегрирования для каждого пикселя (l_1, l_2) было вычислено выражение (10) для ФРТ. В случае каждого из двух образцов S_1 и S_2 в процессе эксперимента оценивалось по три ФРТ для различных положений матрицы M относительно образца.

При расстоянии между образцом и линзой $u = 250$ мм расстояния между образцом и матрицей были взяты поочередно 115; 195 и 272 мм, что соответствовало сфокусированному изображению для длин волн 0,05; 0,07 и 0,09 мм соответственно. В результате были получены три ФРТ h_1^1 , h_1^2 и h_1^3 для образца S_1 , а также h_2^1 , h_2^2 и h_2^3 для образца S_2 (см. рис. 5).

ФРТ для образца S_1 (верхний ряд) при расстоянии от линзы до матрицы 115, 195 и 272 мм – (а): h_1^1 , (б): h_1^2 , (с): h_1^3 ; ФРТ для образца S_2 (нижний ряд) при тех же расстояниях до матрицы – (д): h_2^1 , (е): h_2^2 , (ф): h_2^3 .

Таблица 2. Параметры линзы

F (0,5ТГц)	100 мм
R_1	40 мм
D	50 мм
n (0,5ТГц)	1,4

При формировании изображения моделирование производилось для размера матрицы 39×39 пикселей. В вышеописанных условиях съемки это соответствует физическому размеру 90×90 мм². В этом случае физический размер ФРТ будет равен 26×26 пикселей, что соответствует размерам ФРТ, изображенным на рис. 5, равным 60 мм в каждом пространственном измерении. Такие условия съемки позволяют при относительно крупном размере одного пикселя обеспечить, как будет показано ниже, ФРТ от различных спектров поглощения $\alpha(f)$ достаточно различий для успешной идентификации.

При помощи дискретизированных ФРТ было смоделировано искажение случайного изображения x . Для $y_\chi^1, y_\chi^2, y_\chi^3$ результатов свертки (1) некоторого случайного изображения x_χ с каждой из ФРТ $h_\chi^1, h_\chi^2, h_\chi^3$ решалась задача идентификации спектра поглощения $\alpha(f)$.

В моделировании алгоритм принятия решения (11), полагая неизвестным изображение x_χ , по зарегистрированным изображениям $y_\chi^1, y_\chi^2, y_\chi^3$ при различных уровнях аддитивного шума обнаруживал, какое вещество χ из двух, участву-

ющих в моделировании образцов со спектром поглощения α_1 или α_2 , является причиной для зарегистрированных изображений. Решающее правило имеет вид:

$$k = \underset{k}{\operatorname{argmin}} J(y_\chi^1, y_\chi^2, y_\chi^3 | h_k^1, h_k^2, h_k^3), \quad (11)$$

где принятие решения k означает, что алгоритм принял решение о том, что наблюдаемое изображение является результатом прохождения лучей через образец S_k . Критерий J использует идею метода взаимных отношений [38], основанного на евклидовом расстоянии, и является оптимальным в случае гауссовского шума n в уравнении (1):

$$J(y_\chi^1, y_\chi^2, y_\chi^3 | h_k^1, h_k^2, h_k^3) = \sum_{i,j} \sum_f |Y_\chi^i H_k^j - Y_\chi^j H_k^i|^2, \quad (12)$$

где заглавные буквы означают соответствующие преобразования Фурье.

Полученная зависимость вероятности ошибки от соотношения «сигнал-шум» показана на рис. 6.

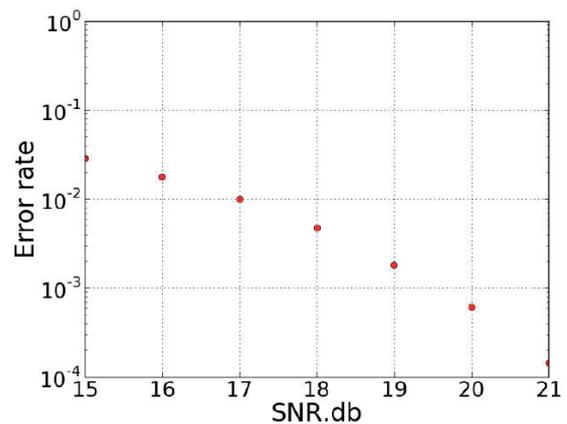


Рис. 6. Зависимость вероятности ошибки обнаружения от соотношения «сигнал-шум»

Заключение

В работе представлен новый подход к обнаружению химических веществ в ТГц диапазоне, использующий спектральные особенности различных химических веществ, но не являющийся при этом методом спектроскопии. Данный метод использует тот факт, что изображения веществ, пропускающих различные части спектра в различных пропорциях, при регистрации матрицей чувствительных к интенсивности приемников ТГц излучения (например болометров) в результате дисперсии в собирающей линзе будут иметь различные искажения. Эти искажения можно

заранее оценить, используя описанный в работе подход, а также измерить экспериментально, используя алгоритм слепой идентификации например [39]. Это возможно без знаний о том, какое изображение было изначально искажено.

Литература

1. The Terahertz Wave eBook. June 2012 // URL: http://dl.zthz.com/eBook/zomega%5C_ebook%5C_pdf%5C_1206%5C_sr.pdf (д.о. 11.01.2015).
2. Kemp M.C. Explosives Detection by Terahertz Spectroscopy – A Bridge Too Far? // *Terahertz Science and Technology*, IEEE Transactions on. Vol.1, No.1, 2011. – P. 282-292. // URL: <http://dx.doi.org/10.1109/tthz.2011.2159647> (д.о.10.01.2015).
3. Kemp M.C. et al. Security applications of terahertz technology // *Aero Sense*. Vol. 5070, 2003. The International Society for Optical Engineering, Aug. 1, 2003. – P. 44-52. // URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.500491> (д.о. 10.01.2015).
4. Tribe W.R. et al. Hidden object detection: security applications of terahertz technology // Vol. 5354, 2004. – P.168-176. // URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.543049> (д.о. 10.01.2015).
5. Cook D.J. et al. Through container THz sensing: applications for explosives screening // *Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics III*. Vol. 5354 / Ed. by R. J. Hwu. Apr. 2004. – P. 55–62. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. // URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.525466> (д.о. 10.01.2015).
6. McLeod R.R., Wagner K.H. Vector Fourier optics of anisotropic materials // *Adv. Opt. Photon.* Vol.6, No.4, 2014. – P. 368-412. (Technical Digest CD). ISSN urn:issn:0021-8898.
7. Chen J. et al. Absorption coefficients of selected explosives and related compounds in the range of 0.1-2.8 THz // *Opt. Express*. Vol.15, No.19, 2007. – P. 12060–12067. // URL:<http://dx.doi.org/10.1364/oe.15.012060> (д.о.10.01.2015).
8. Davies A.G. et al. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs // *Materials Today*. Mar. Vol.11, No.3, 2008. – P. 18-26. // URL: [http://dx.doi.org/10.1016/s1369-7021\(08\)70016-6](http://dx.doi.org/10.1016/s1369-7021(08)70016-6) (д.о. 10.01.2015).
9. Zhang L. et al. Terahertz wave reference-free phase imaging for identification of explosives // *Applied Physics Letters*. Mar. Vol.92, No.9, 2008. // URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2891082> (д.о. 10.01.2015).
10. Demers J.R. et al. A high signal-to-noise ratio, coherent, frequency-domain THz spectrometer employed to characterize explosive compounds // *Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2008. IRMMW-THz 2008. 33-rd Intern. Conf. on. IEEE, 2008. – P. 1-3. // URL: <http://dx.doi.org/10.1109/icipmw.2008.4665534> (д.о. 10.01.2015).
11. Wilkinson J. et al. Terahertz absorption spectrum of triacetone triperoxide (TATP) // *Chemical Physics Letters*. Aug. 28, Vol.478, No.4-6, 2009. – P. 172–174. // URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cplett.2009.07.079> (д.о. 10.01.2015).
12. Trzcinski T., Palka N., Szustakowski M. THz spectroscopy of explosive-related simulants and oxidizers // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. Jan. 1, Vol. 59, No.4, 2011. – P. 445-447. // URL: <http://dx.doi.org/10.2478/v10175-011-0056-4> (д.о. 11.01.2015).
13. Palka N. Identification of concealed materials, including explosives, by terahertz reflection spectroscopy // *Optical Engineering*. Vol.53, No. 3, 2013. – P. 031202. // URL: <http://dx.doi.org/10.1117/1.oe.53.3.031202> (д.о. 10.01.2015).
14. Etayo D. et al. Experimental Explosive Characterization for Counterterrorist Investigation // URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10762-013-9988-0> (д.о. 10.01.2015).
15. Ryniec R., Piszczek M., Szustakowski M. Spectral sampling method for identification explosives // *Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2010 35-th International Conference on. IEEE, 2010. – P. 1-2. // URL: <http://dx.doi.org/10.1109/icipmw.2010.5612444> (д.о. 11.01.2015).
16. Davis P. J., Wadhams L., Bayliss J. S. Detection of odors using insects. July 2007. // URL: <https://www.google.ru/patents/US7237504>; US Patent 7,237,504. (д.о. 11.01.2015).
17. Dubroca T., Brown G., Hummel R. E. Detection of explosives by differential hyperspectral imaging // *Optical Engineering*. Vol.53, No.2, 2014. – P. 021112. // URL: <http://dx.doi.org/10.1117/1.oe.53.2.021112> (д.о. 10.01.2015).
18. Buryakov I.A. Detection of explosives by ion mobility spectrometry // *Journal of Analytical Chemistry*. Aug. 1. Vol.66, No.8, 2011. – P. 674-694. // URL: <http://dx.doi.org/10.1134/s1061934811080077> (д.о. 10.01.2015).
19. U.S. N.R.C., Assessment of Security Technologies for Transportation. Conclusions and Opportunities to improve airport passenger screening with mass spectrometry. 2004. //

- URL: <http://www.worldcat.org/isbn/030909240>. (д.о. 11.01.2015).
20. Fleger Y. et al. Narrow gated Raman and luminescence of explosives. // *Journal of Luminescence*. Sept. Vol.129, No. 9, 2009. – P. 979-983. // URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlumin.2009.04.008> (д.о. 11.01.2015).
 21. Wentworth R.M. et al. Standoff Raman hyperspectral imaging detection of explosives // *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE*. // IEEE, June 2007. – P. 4925-4928. // URL: <http://dx.doi.org/10.1109/aps.2007.4396649> (д.о. 11.01.2015).
 22. Hutchinson A. Bees vs Bombs. Aug. 1, 2011. // URL: <http://www.popularmechanics.co.za/science/bees-vs-bombs/> (д.о. 11.01.2015).
 23. Gozani T. et al. Explosive detection system based on thermal neutron activation // *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*. Dec. Vol.4, No.12. 1989. – P. 17-20. // URL: <http://dx.doi.org/10.1109/62.46985> (д.о. 11.01.2015).
 24. Prachi P. An Ultrasensitive Explosives Detector. Sept. 22, 2010. // URL: <http://www.technologyreview.com/news/420882/an-ultrasensitive-explosives-detector/> (д.о. 11.01.2015).
 25. Bomb Dogs // worldwidecanine.com. – URL: http://www.worldwidecanine.com/expldet_dogs%5C_wwc.htm; (д.о. 11.01.2015).
 26. Lalleman A.S. et al. A dual X-ray backscatter system for detecting explosives: Image and discrimination of a suspicious content // *Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2011 IEEE*. – IEEE, Oct. 2011. – P. 299-304. // URL: <http://dx.doi.org/10.1109/nssmic.2011.6154503> (д.о. 10.01.2015).
 27. Counterterrorism 2014 Calendar. National Counterterrorism Center, 2014. // URL: <https://books.google.ru/books?id=ATqmoAEACAAJ> (д.о. 11.01.2015).
 28. Engel Y. et al. Supersensitive Detection of Explosives by Silicon Nanowire Arrays // *Angewandte Chemie International Edition*. Sept.10. Vol.49, No.38, 2010. – P. 6830-6835. // URL: <http://dx.doi.org/10.1002/anie.201000847> (д.о. 11.01.2015).
 29. Dubroca T., Vishwanathan K., Hummel R. E. The limit of detection for explosives in spectroscopic differential reflectometry // *Vol. 8018*, 2011. // URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.884154> (д.о. 11.01.2015).
 30. New device uses sniffer bees to detect explosives. Apr. 6, 2011. // URL: <http://www.homelandsecuritynewswire.com/new-device-uses-sniffer-bees-detect-explosives%5C#.VLKICKc-00U.citeulike> (д.о. 11.01.2015).
 31. Cooper K.B. et al. THz Imaging Radar for Standoff Personnel Screening // *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*. Vol.1, No.1, 2011. – P. 169-182. // URL: <http://dx.doi.org/10.1109/tthz.2011.2159556> (д.о. 11.01.2015).
 32. May T. et al. Passive standoff terahertz imaging with 1 hertz frame rate // *Vol. 6949*, 2008. // URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.777952> (д.о. 11.01.2015).
 33. Hecht E. *Optics*. Addison-Wesley, 2002. // URL: <http://books.google.ru/books?id=7aG6QgAACAAJ>.
 34. Bohren C.F., Huffman D.R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, Apr. 23, 1998. // URL: <http://dx.doi.org/10.1002/9783527618156> (д.о. 10.01.2015).
 35. Lee H.-C. Review of image-blur models in a photographic system using the principles of optics // *Optical Engineering*. Vol.29, No.5, 1990. – P. 405–421. // URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.55609> (д.о. 10.01.2015).
 36. Savakis A.E., Trussell H.J. On the accuracy of PSF representation in image restoration // *Image Processing, IEEE Transactions on*. Apr. Vol.2, No.2, 1993. – P. 252–259. // URL: <http://dx.doi.org/10.1109/83.217229> (д.о. 10.01.2015).
 37. Jenkins F.A., White H.E., Jenkins F.A. *Fundamentals of optics*. McGraw-Hill, 1976. // URL: <http://www.worldcat.org/isbn/0070323305> (д.о. 10.01.2015).
 38. Hua Y. Fast maximum likelihood for blind identification of blind identification of multiple FIR channels // *IEEE Transactions on Signal Processing*. Mar. Vol.44, 1996. – P. 661–672.
 39. Berezovskiy A. A., Goryachkin O. V. Multichannel image blind deconvolution algorithm // *Vol. 8410*, 2012. // URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.927392> (д.о. 11.01.2015).
 40. Berezovskiy A. Passive THz spectroscopy with a blind deblurring algorithm: tech. rep. Haifa, Israel, Nov. 2014.

Получено 12.03.2015

Березовский Андрей Андреевич, м.н.с. Кафедры теоретических основ радиотехники и связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Тел. 8-937-655-62-83. E-mail: andrey.berezowskiy@gmail.com

IDENTIFICATION OF POINT BLURRING FUNCTION IN THE PROBLEM OF CHEMICAL MATTER SIGNATURE LOCALIZATION OVER THZ FREQUENCY RANGE

Berezovskiy A.A.

Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: andrey.berezowskiy@gmail.com

This work presents a method for identification of chemical matter only via image registered by THz sensor imaging system. Here we use chemical matter point blurring function dependence on absorption spectrum that is got from scheme of THz image formation. System of THz image formation is described, and point blurring function dependence on chemical matter signature was obtained by supposing a strong defocusing. We propose method for point blurring function evaluation by distorted image and method for signature localization. During the simulation point blurring functions were computed for two different signatures, and distorted images were obtained. We estimated a decision-making noise immunity where signature had been applied to in simulation which was the main reason of distortions registered over image unknown for decision-making algorithm.

Keywords: THz spectroscopy, point blurring function, blind identification, chemical matter signature, diffraction limit, defocusing, matrix sensor.

DOI: 10.18469/ikt.2015.13.2.13.

Berezovskiy Andrei Andreevich, Ph.D. candidate, Department of Radio Engineering and Telecommunication Theory, Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russian Federation. Tel.: +79376556283. E-mail: andrey.berezowskiy@gmail.com

References

1. The Terahertz Wave eBook. 2012. Available at: http://dl.z-thz.com/eBook/zomega_ebook_pdf_1206_sr.pdf (accessed 11.01.2015).
2. Kemp M.C. Explosives Detection by Terahertz Spectroscopy – A Bridge Too Far? *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 2011, vol. 1, no.1, pp. 282-292. doi: 10.1109/tthz.2011.2159647.
3. Kemp M.C. et al. Security applications of terahertz technology. *Aero Sense, Proc. SPIE*, 2003, vol. 5070, pp. 44-52. doi: 10.1117/12.500491.
4. Tribe W.R. et al. Hidden object detection: security applications of terahertz technology. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5354, pp. 168-176. doi: 10.1117/12.543049.
5. Cook D.J. et al. Through container THz sensing: applications for explosives screening *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5354, pp. 55–62. doi: 10.1117/12.525466.
6. McLeod R.R., Wagner K.H. Vector Fourier optics of anisotropic materials. *Adv. Opt. Photon.*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 368-412. doi: 10.1364/AOP.6.000368.
7. Chen J. et al. Absorption coefficients of selected explosives and related compounds in the range of 0.1-2.8 THz. *Opt. Express*, 2007, vol. 15, no. 19, pp. 12060–12067. doi: 10.1364/oe.15.012060.
8. Davies A.G. et al. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs. *Materials Today*, 2008, vol. 11, no. 3, pp. 18-26. doi: 10.1016/s1369-7021(08)70016-6.
9. Zhang L. et al. Terahertz wave reference-free phase imaging for identification of explosives. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 92, no. 9. doi: 10.1063/1.2891082.
10. Demers J.R. et al. A high signal-to-noise ratio, coherent, frequency-domain THz spectrometer employed to characterize explosive compounds. *Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008. IRMMW-THz 2008. 33-rd Intern. Conf. on. IEEE*, 2008. pp. 1-3. doi: 10.1109/ictimw.2008.4665534.
11. Wilkinson J. et al. Terahertz absorption spectrum of triacetone triperoxide (TATP). *Chemical Physics Letters*, 2009, vol. 478, no. 4-6, pp. 172–174. doi: 10.1016/j.cplett.2009.07.079.
12. Trzcinski T., Palka N., Szustakowski M. THz spectroscopy of explosive-related simulants and oxidizers. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2011, vol. 59, no. 4, pp. 445-447. doi: 10.2478/v10175-011-0056-4.

13. Palka N. Identification of concealed materials, including explosives, by terahertz reflection spectroscopy. *Opt. Eng.*, 2013, vol. 53, no. 3, p. 031202. doi: 10.1117/1.oe.53.3.031202.
14. Etayo D. et al. Experimental Explosive Characterization for Counterterrorist Investigation. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, vol. 34, no. 7-8, pp. 468-479. doi: 10.1007/s10762-013-9988-0.
15. Ryniec R., Piszczek M., Szustakowski M. Spectral sampling method for identification explosives. *Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2010 35-th International Conference on. IEEE*, 2010. pp. 1-2. doi: 10.1109/icimw.2010.5612444.
16. Davis P.J., Wadhams L., Bayliss J.S. *Detection of odors using insects*. US Patent 7237504, 2007.
17. Dubroca T., Brown G., Hummel R.E. Detection of explosives by differential hyperspectral imaging. *Opt. Eng.*, 2014, vol. 53, no. 2, 021112. doi: 10.1117/1.oe.53.2.021112.
18. Buryakov I.A. Detection of explosives by ion mobility spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*, 2011, vol. 66, no. 8, pp. 674-694. doi: 10.1134/s1061934811080077.
19. *Opportunities to Improve Airport Passenger Screening with Mass Spectrometry*. Committee on Assessment of Security Technologies for Transportation. The National Academies Press, 2004. 57 p.
20. Fleger Y. et al. Narrow gated Raman and luminescence of explosives. *Journal of Luminescence*, 2009, vol. 129, no. 9, pp. 979-983. doi: 10.1016/j.jlumin.2009.04.008.
21. Wentworth R.M. et al. Standoff Raman hyperspectral imaging detection of explosives. *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE*, 2007, pp. 4925-4928. doi: 10.1109/aps.2007.4396649.
22. Hutchinson A. Bees vs Bombs. Available at: <http://www.popularmechanics.co.za/sci-ence/bees-vs-bombs/> (accessed 11.01.2015).
23. Gozani T. et al. Explosive detection system based on thermal neutron activation. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, 1989, vol. 4, no. 12, pp. 17-20. doi: 10.1109/62.46985.
24. Prachi P. An Ultrasensitive Explosives Detector. Available at: <http://www.technologyreview.com/news/420882/anultrasensitive-explosives-detector/> (accessed 11.01.2015).
25. *Bomb Dogs*. Available at: http://www.worldwidecanine.com/expldetdogs_wwc.htm (accessed 11.01.2015).
26. Lalleman A.S. et al. A dual X-ray backscatter system for detecting explosives: Image and discrimination of a suspicious content. *Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2011 IEEE*, 2011. pp. 299-304. doi: 10.1109/nssmic.2011.6154503.
27. *Counterterrorism 2014 Calendar*. National Counterterrorism Center (U.S.), 2014.
28. Engel Y. et al. Supersensitive Detection of Explosives by Silicon Nanowire Arrays. *Angewandte Chemie International Edition*, 2010, vol. 49, no. 38, pp. 6830-6835. doi: 10.1002/anie.201000847.
29. Dubroca T., Vishwanathan K., Hummel R. E. The limit of detection for explosives in spectroscopic differential reflectometry. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 8018, 80181L. doi: 10.1117/12.884154.
30. *New device uses sniffer bees to detect explosives*. Available at: <http://www.homelandsecuritynewswire.com/new-device-uses-sniffer-bees-detect-explosives> (accessed 11.01.2015).
31. Cooper K.B. et al. THz Imaging Radar for Standoff Personnel Screening. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*. 2011, vol. 1, no. 1, pp. 169-182. doi: 10.1109/tthz.2011.2159556.
32. May T. et al. Passive standoff terahertz imaging with 1 hertz frame rate. *Proc. SPIE*, 2008, vol. 6949, 69490C. doi: 10.1117/12.777952.
33. Hecht E. *Optics*. Addison-Wesley, 2002. 698 p.
34. Bohren C.F., Huffman D.R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 1998. 530 p. doi: 10.1002/9783527618156.
35. Lee H.-C. Review of image-blur models in a photographic system using the principles of optics. *Opt. Eng.*, 1990, vol. 29, no. 5, pp. 405-421. doi: 10.1117/12.55609.
36. Savakis A.E., Trussell H.J. On the accuracy of PSF representation in image restoration. *Image Processing, IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, vol. 2, no. 2, pp. 252-259. doi: 10.1109/83.217229.
37. Jenkins F.A., White H.E., *Fundamentals of optics*. McGraw-Hill, 1976.
38. Hua Y. Fast maximum likelihood for blind identification of multiple FIR channels. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, vol. 44, no. 3, pp. 661-672. doi: 10.1109/78.489039
39. Berezovskiy A. A., Goryachkin O. V. Multichannel image blind deconvolution algorithm. *Proc. SPIE*, 2012, Vol. 8410, 84100J. doi: 10.1117/12.927392.
40. Berezovskiy A. Passive THz spectroscopy with a blind deblurring algorithm. *Tech. rep. Haifa, Israel*, 2014.

Received 12.03.2015