

Обнаружение скрытых предметов на терагерцовых изображениях на основе метода максимизации взаимной информации

Д.М. Мурашов¹, А.А. Морозов², Ф.Д. Мурашов³

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Вавилова 42, Москва, Россия, 119333

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Моховая 11, стр. 7, Москва, Россия, 125009

³Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе 4, Москва, Россия, 125993

Аннотация. Предлагается новый алгоритм локализации и идентификации объектов на изображениях, полученных на пассивном терагерцовом комплексе обнаружения скрытно проносимых запрещённых предметов. Предлагаемый алгоритм основан на методе максимизации взаимной информации, применяемом в задачах совмещения изображений. Для сокращения вычислительных затрат предлагается анализировать критерий в точках локальных максимумов функции взаимной корреляции изображений, вычисляемой в частотной области. Предлагаемый алгоритм не требует настройки параметров. Вычислительный эксперимент показал эффективность алгоритма и возможность его применения в системах безопасности для обнаружения скрытых объектов.

1. Введение

Одно из направлений создания систем безопасности связано с разработкой систем обнаружения скрытых предметов по изображениям, получаемым в терагерцовом диапазоне (100 ГГц - 3 ТГц). Как правило, такие изображения характеризуются низким отношением сигнал/шум, небольшим количеством отсчетов, невысоким разрешением, низкой контрастностью, нечеткостью объектов (см. рисунок 1(а)). Эти особенности терагерцовых изображений осложняют распознавание скрытых объектов.

Один из подходов к решению задачи обнаружения скрытых объектов по терагерцовым изображениям состоит в сегментации изображений и распознавании выделенных объектов. Многие из предложенных методов сегментации базируются на предположении о наличии на терагерцовом изображении трех областей (фона, тела человека и скрытых предметов), характеризующихся своим диапазоном радиометрической температуры, которым соответствуют диапазоны уровней серого тона. Для описания исследуемых изображений применяются модели гауссовых смесей. Такие модели являются основой для разработки алгоритмов многоуровневой сегментации [1-3]. Для более качественной сегментации на этапе предварительной обработки применяются алгоритмы подавления шума, например, алгоритм анизотропной диффузии и алгоритм нелокальных средних (nonlocal means, или *NL-means*) [1]. В

работе [3] для локализации объектов предложен многоуровневый EM алгоритм. На первом уровне выделяются два объекта: фон и тело человека. На втором уровне EM алгоритмом выделяется скрытый предмет на фоне тела. С целью ослабления влияния шума и характеристик фона могут комбинироваться изображения, полученные в разных спектральных диапазонах. В работе [4] для распознавания скрытых объектов предложен алгоритм на основе метода максимального правдоподобия, структура которого также близка к EM-алгоритмам. В работе [5] для повышения эффективности детектирования скрытых предметов комбинируются изображения, полученные в терагерцовом и видимом диапазонах. В работе [6] скрытые под одеждой предметы локализуются по изображениям, получаемым в четырех каналах системы, работающей в 3-х и 8-ми миллиметровых диапазонах длин волн с вертикальной и горизонтальной поляризацией. Алгоритм многоуровневой сегментации комбинирует алгоритм k -средних, EM алгоритм для оценки параметров гауссовой смеси и байесовский классификатор. Альтернативный подход к задаче обнаружения объектов на терагерцовых изображениях заключается в использовании методов сопоставления эталонного изображения объекта и предъявленного изображения. В работе [7] для обнаружения объектов на таких изображениях применен метод на основе локализации максимума коэффициента корреляции. В данной работе предлагается для обнаружения объектов на терагерцовых изображениях применять метод сопоставления изображений на основе максимизации взаимной информации [8].

2. Постановка задачи

Предполагается, что имеется набор изображений предметов, которые должны быть обнаружены под одеждой людей, проверяемых с помощью пассивного терагерцового комплекса. Объекты, которые видны на изображении, должны быть сопоставлены с эталонами, и необходимо принять решение об их идентичности или отличии.

Пусть имеется N изображений предметов (эталонов) U_n , $n=1,2,\dots,N$. Пусть предъявлено изображение V . Нужно определить, какой из эталонов U_n присутствует на изображении V .

Для решения такой задачи обычно предварительно выполняется операция сегментации объектов на входном изображении, формируются признаковые описания изображений объектов U_n , и далее в признаковом пространстве находятся разделяющие поверхности между классами рассматриваемых объектов.

Перечисленные выше свойства терагерцовых изображений затрудняют сегментацию объектов. Поэтому предпочтительно использовать методы, не требующие сегментации. В данной работе предлагается решать указанную задачу как задачу сопоставления изображений [9]. Пусть в качестве меры сходства эталона и объектов на изображении V будет критерий $J(U_n, V)$. Тогда задачу можно сформулировать следующим образом. Требуется найти изображение эталона U_m , которое обеспечивает максимальное значение меры сходства $J(U_n, V)$:

$$U_m = \arg \max_{U_n} \{J(U_n, V)\}, \quad n=1,2,\dots,N \quad (1)$$

Известные методы, не требующие сегментации изображений, в частности, методы на основе максимизации значения функции взаимной корреляции, максимизации коэффициента корреляции [7, 9] и максимизации взаимной информации [8, 10]. Метод максимизации взаимной информации применялся в задаче совмещения изображений. Эти методы не требуют априорных знаний о связи между предъявленным изображением и эталоном, а также не требуют информации о статистических характеристиках изображений. Метод корреляционного сопоставления на терагерцовых изображениях не всегда позволяет найти правильное решение (см. рисунок 1). Взаимная информация вычисляется непосредственно по совместному распределению яркости этих изображений и более полно учитывает данные, содержащиеся в сопоставляемых изображениях, чем корреляционные показатели. Взаимная информация является количественной характеристикой статистической связи изображений. Большое сходство эталона и предъявляемого изображения даст большее значение взаимной

информации. Поэтому в предлагаемой работе для решения задачи (1) в качестве меры сходства будет использоваться взаимная информация.

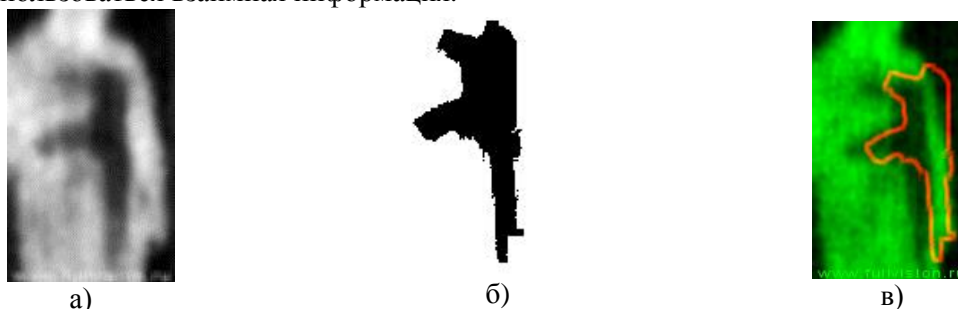


Рисунок 1. Результат корреляционного сопоставления изображений: (а) изображение человека со скрытым объектом, полученное с комплекса THERZ-7A; (б) изображение эталона; (в) результат ошибочного корреляционного сопоставления, красным цветом показан контур эталона.

Для применения теоретико-информационного подхода необходима вероятностная модель связи между изображением эталона и предъявленным изображением. Пусть значения яркости на сравниваемых изображениях в точке \mathbf{x} с координатами (x, y) описываются дискретными случайными переменными $U(\mathbf{x})$ и $V(\mathbf{x})$ со значениями u и v , квантованными на конечное число уровней K и L , соответственно. Если изображения $U(\mathbf{x})$ и $V(\mathbf{x})$ отображают одну и ту же сцену, то существует связь между переменными $U(\mathbf{x})$ и $V(\mathbf{x})$. Будет использоваться модель, аналогичная предложенной в [8, 11]:

$$V(Tr(\mathbf{x})) = F(U(\mathbf{x})) + \eta(\mathbf{x}), \quad (2)$$

где Tr – преобразование координат (для совмещенных изображений) $V(Tr(\mathbf{x})) = U(\mathbf{x})$; F – функция преобразования яркости, моделирующая связь между двумя изображениями объекта; $\eta(\mathbf{x})$ – случайная переменная, моделирующая шум. Модель (2) можно рассматривать как модель дискретной стохастической информационной системы со входом U и выходом V . Взаимная информация между входом и выходом системы определена выражением:

$$I(U;V) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L p(u_k, v_l) \log \left[\frac{p(u_k, v_l)}{p(u_k)p(v_l)} \right], \quad (3)$$

где функции $p(u)$, $p(v)$ и $p(u, v)$ задают, соответственно, одномерные и двумерное дискретные распределения вероятностей значений яркости изображений U и V . Если в качестве меры сходства будет использоваться взаимная информация (3), то задача (1) будет сформулирована как задача поиска на предъявленном изображении V изображения эталона U_n , максимизирующего критерий (3):

$$U_m = \arg \max_{U_n} \{ I(U_n; V) \}. \quad (4)$$

В следующем разделе предлагается алгоритм решения поставленной задачи.

3. Сопоставление изображения эталонов с изображениями, полученными в терагерцовом диапазоне

Непосредственное вычисление значений взаимной информации на множестве пикселей, соответствующих пересечению изображений U_n и V при различных положениях U_n относительно V , требует больших вычислительных затрат. Поэтому на практике применяются различные методы ускоренного вычисления величины взаимной информации. Например, в работе [8] получено дифференциальное уравнение для поиска экстремума функции (3) в задаче совмещения изображений.

В данной работе предлагается вычислять значения взаимной информации $I(U_n;V)$ в точках изображения V , соответствующих локальным максимумам функции взаимной корреляции [9], которые указывают координаты точек, где возможно наибольшее соответствие содержания предъявленного изображения V эталону U_n . Количество таких точек существенно меньше числа пикселей изображения V , а функция взаимной корреляции изображений быстро вычисляется в частотной области. Указанные обстоятельства позволяют существенно ускорить вычисление взаимной информации и поиск решения задачи (4). Так как функция взаимной корреляции чувствительна к изменениям амплитуд уровней яркости сопоставляемых изображений, для ее вычисления мы будем использовать контурные препараты изображений U_n и V , на которых границы объектов имеют достаточно стабильный высокий уровень яркости. Функция взаимной корреляции определяется выражением:

$$c_{U_n,V}(x,y) = \sum_s \sum_t C_{U_n}(s,t) C_V(x+s,y+t), \quad (5)$$

где C_{U_n} и C_V – контурные препараты изображений U_n и V , x и y – пространственные координаты точек изображения C_V , s и t – координаты точек в области пересечения изображений C_{U_n} и C_V . Учитывая сильную зашумленность терагерцовых изображений, для получения контурных препаратов будут применяться маски стохастических градиентов [12] для соотношения сигнал/шум SNR=1. Вычисление функции (5) будет осуществляться в частотной области.

Таким образом, алгоритм поиска на терагерцовых изображениях объекта, соответствующего условию (4), включает следующие операции: (а) сглаживание изображения V и получение контурных препаратов C_{U_1} и C_V изображений U_1 и V , соответственно; (б) вычисление функции взаимной корреляции контурных препаратов C_{U_1} и C_V по формуле (7); (в) нахождение точек локальных максимумов $c_{U_1,V}(x,y)$; (г) вычисление взаимной информации $I(U_1;V)$ в точках локальных максимумов $c_{U_1,V}(x,y)$; (д) определение максимума взаимной информации $I_{\max}(U_1;V)$; (е) повторение шагов (а) - (д) для изображений U_1, \dots, U_N ; (ж) определение максимального значения взаимной информации $I_{\max}(U_m;V)$ среди значений $I_{\max}(U_1;V)$, $I_{\max}(U_2;V)$, ..., $I_{\max}(U_N;V)$ и соответствующего эталона U_m , который и будет решением задачи (4).

Предлагаемый алгоритм не содержит параметров и не требует настройки. На рисунке 2 проиллюстрированы основные этапы локализации объектов. Входное изображение, зафиксированное комплексом THERZ-7A, и изображение эталона объекта показаны на рисунках 2(а) и 2(б). Контурные препараты этих изображений представлены на рисунках 2(в) и 3(г). Визуализация функции взаимной корреляции контурных препаратов показана на рисунке 2(д). На рисунке видны локальные максимумы поверхности, формируемой функцией $c_{U_n,V}(x,y)$. Результат локализации объекта на входном изображении, соответствующий максимуму взаимной информации $I(U_n;V)$, продемонстрирован на рисунке 2(е).

4. Эксперимент

Для оценки возможности применения изложенного выше подхода для решения задачи выявления скрытых объектов проведен вычислительный эксперимент. Эксперимент проводился следующим образом. Получены изображения нескольких предметов, которые будут детектироваться на изображениях, полученных на выходе терагерцовой установки, и сформированы эталонные изображения. Эталонные изображения показаны на рисунке 3.

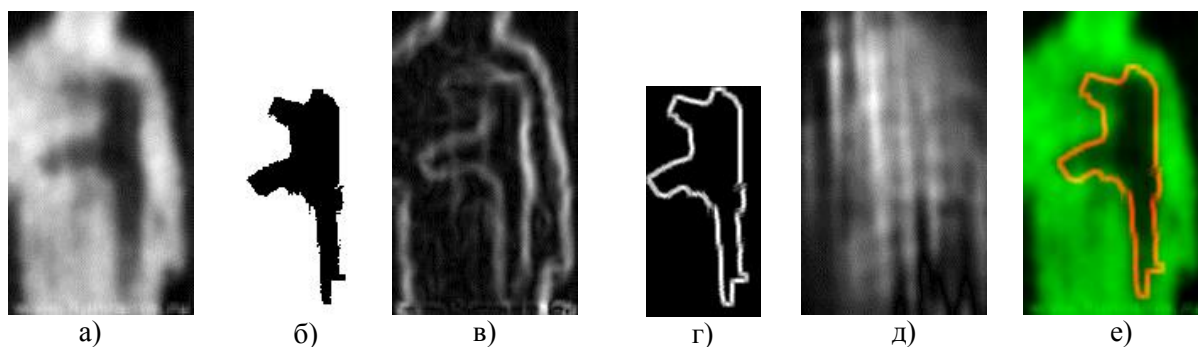


Рисунок 2. Основные этапы локализации объектов: (а) изображение, зафиксированное комплексом THERZ-7A; (б) изображение эталона объекта; (в) контурный препарат входного изображения; (г) контурный препарат изображения эталона; (д) визуализированная функция взаимной корреляции контурных препаратов $c_{Un,V}(x, y)$; (е) результат локализации объекта на входном изображении, соответствующий максимуму взаимной информации $I(U_n; V)$.



Рисунок 3. Изображения эталонов распознаваемых объектов: (а) автомат Калашникова (АК); (б) пистолет ТТ; (в) пистолет Walther.

Предметы последовательно помещались под одежду человека, и производилась съемка комплексом THERZ-7A. Для каждого скрытого предмета комплексом фиксировалась видеопоследовательность. С помощью предложенного метода выполнялось сопоставление эталонов, показанных на рисунке 4 (а-в) с кадрами полученных видеопоследовательностей и фиксировались значения меры сходства. Дальность съемки составляла около двух метров и менялась незначительно, поэтому при сравнении использовались изображения эталонов при одном значении коэффициента масштаба. Результаты сопоставления показаны на рисунках 4(а-д), а соответствующие значения взаимной информации представлены в Таблице 1. Из рисунка 4 следует, что скрытые объекты успешно локализуются предложенным методом на основе комбинации корреляционного сопоставления и сопоставления по максимуму взаимной информации.

Из данных, приведенных в Таблице 1, следует, что при сопоставлении изображений, полученных на выходе терагерцового комплекса, и эталонных изображений объектов максимум взаимной информации достигается, если эталон соответствует скрытому объекту. Указанное обстоятельство свидетельствует о том, что предложенный метод может применяться для обнаружения и распознавания запрещенных скрытых объектов в системах безопасности.

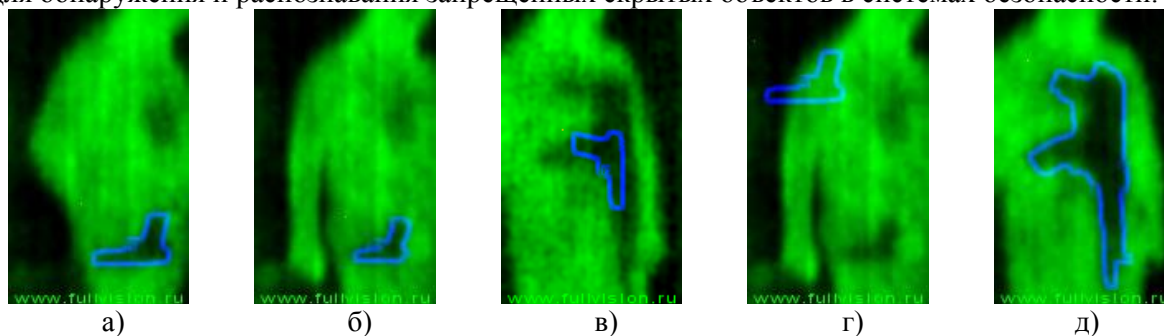


Рисунок 4. Результат сопоставления эталонов и изображений скрытых объектов: (а) пистолета ТТ, скрытого под одеждой, и его эталона; (б) скрытого пистолета Walther и его эталона; (в) скрытого автомата АК и эталона ТТ; (г) скрытого пистолета Walther и эталона ТТ; (д) скрытого автомата АК и его эталона.

Таблица 1. Значения взаимной информации, вычисленные при сопоставлении эталонов и изображений скрытых объектов.

Скрытый объект	Эталон		
	АК	ТТ	Walther
АК	0.307398	0.295407	0.276332
ТТ	0.191471	0.404531	0.345492
Walther	0.162791	0.267373	0.342771

4. Заключение

Предложен новый алгоритм локализации и идентификации объектов на изображениях, полученных на пассивном терагерцовом комплексе обнаружения скрытно проносимых запрещённых предметов. Предлагаемый алгоритм сформирован в виде комбинации методов сопоставления по максимуму взаимной корреляции и максимуму взаимной информации. Для сокращения вычислительных затрат предлагается анализировать критерий в точках локальных максимумов функции взаимной корреляции изображений, вычисляемой в частотной области. Предлагаемый алгоритм не требует настройки параметров. Вычислительный эксперимент показал эффективность алгоритма и возможность его применения в системах безопасности для обнаружения скрытых объектов. Дальнейшие исследования будут ориентированы на повышение качества обнаружения и распознавания скрытых объектов за счет применения методов предварительной обработки терагерцовых изображений и исследования методов локализации, инвариантных к геометрическим преобразованиям.

5. Литература

- [1] Shen, X. Detection and segmentation of concealed objects in terahertz images / X. Shen, C.R. Dietlein, E. Grossman, Z. Popovic, F.G. Meyer // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2008. – Vol. 17(12). – P. 2465-2475.
- [2] Lee, D.S. Automatic image segmentation for concealed object detection using the expectation-maximization algorithm / D.S. Lee et al. // *Optics express*. – 2010. – Vol. 18(10). – P. 10659-10667.
- [3] Martínez, O. Concealed object detection and segmentation over millimetric waves images / O. Martínez, L. Ferraz, X. Binefa, I. Gómez, C. Dorronsoro // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2010. – P. 31-37.
- [4] Antsiperov, V.E. Automatic target recognition algorithm for low-count terahertz images / V.E. Antsiperov // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 746-751. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-746-751.
- [5] Kowalski, M. Hidden Object Detection System Based on Fusion of THz and VIS Images / M. Kowalski, N. Palka, M. Piszczek, M. Szustakowski // *Acta Physica Polonica A*. – 2013. – Vol. 124(3). – P. 490-493.
- [6] Yeom, S. Vector clustering of passive millimeter wave images with linear polarization for concealed object detection / S. Yeom, D. Lee, H. Lee, J. Son, V.P. Gushin // *Progress in Electromagnetics Research*. – 2013. – Vol. 39. – P. 169-180.
- [7] Trofimov, V.A. Concealed object detection using the passive THz image without its viewing / V.A. Trofimov, V.V. Trofimov, I.L. Shestakov, R.G. Blednov // *Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XIX*. – International Society for Optics and Photonics. – 2016. – Vol. 9830. – P. 98300E.
- [8] Viola, P. Alignment by maximization of mutual information / P. Viola, W.M. Wells III // *International Journal of Computer Vision*. – 1997. – Vol. 24(2). – P. 137-154.
- [9] Gonzalez, R.C. Digital image processing. Third edition / R.C. Gonzalez, R.E. Woods. – Pearson Prentice Hall, 2008. – 954 p.
- [10] Maes, F. Multimodality image registration by maximization of mutual information / F. Maes, A. Collignon, D. Vandermeulen, G. Marchal, P. Suetens // *IEEE transactions on Medical Imaging*. – 1997. – Vol. 16(2). – P. 187-198.

- [11] Escolano, F. Information theory in computer vision and pattern recognition / F. Escolano, P. Suau, B. Bonev. – Springer Science & Business Media, 2009. – 364 p.
- [12] Jain, A.K. Fundamentals of digital image processing / A.K. Jain. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989. – 569 p.

Благодарности

Авторы выражают благодарность компаниям ЗАО «Астрон» и ООО «АСофт» за предоставленное оборудование для регистрации терагерцового излучения THERZ-7A.

Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ, проекты № 18-07-01295 и № 16-29-09626.

A technique for localizing and identifying concealed objects in terahertz images based on mutual information maximization

D.M. Murashov¹, A.A. Morozov², F.D. Murashov³

¹FRC CSC RAS, Vavilov street 42, Moscow, Russia, 119333

²Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Mokhovaya 11-7, Moscow, Russia, 125009

³Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe Shosse 4, Moscow, Russia, 125993

Abstract. In this paper, a new technique for localizing and identifying concealed objects in images acquired by passive THz imaging system is proposed. The technique is based on known method for mutual information maximization successfully used for image matching. For reducing computational expenses, we propose to analyse mutual information at local maxima of cross-correlation function computed in Fourier domain. The proposed technique does not require parameter tuning. Computing experiment approved the efficiency of the proposed technique and possibility of its implementation in security systems.