

文章编号: 2095-4980(2021)04-0660-06

## 基于最大二维熵的被动式太赫兹安检目标分割

徐华晟<sup>1a,1b,2</sup>, 李超<sup>\*1a,1b,2</sup>, 方广有<sup>1a,1b,2</sup>

(1.中国科学院 a.空天信息创新研究院; b.电磁辐射与探测技术重点实验室, 北京 100190;  
2.中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

**摘要:** 针对被动式太赫兹安检的检测需求, 提出一种基于最大二维熵的隐蔽目标分割方法。该方法设计了一组适用于被动式太赫兹图像的滤波器组, 实现噪声过滤和图像增强; 设计了一种待检区域自生成的算法, 实现对重点检测区域的自动覆盖; 同时, 引入二维熵的概念, 实现对待检测区域内的隐蔽目标的轮廓分割。在 0.2 THz 频段的被动成像下开展了评估和对比实验, 实验表明本文方法具有较好的分割效果和实时性能。

**关键词:** 被动式太赫兹图像; 图像处理; 二维熵; 隐蔽目标检测; 目标分割

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020616

## Concealed object segmentation based on maximum two-dimensional entropy for passive terahertz security

XU Huasheng<sup>1a,1b,2</sup>, LI Chao<sup>\*1a,1b,2</sup>, FANG Guangyou<sup>1a,1b,2</sup>

(1a.Aerospace Information Research Institute; 1b.Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2.School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A method of the concealed object segmentation based on maximum two-dimensional entropy for passive terahertz security is proposed. The method firstly employs a filter bank to reduce image noise. A self-generated detection region algorithm is designed, which can automatically cover the key detection area. The concept of two-dimensional entropy is introduced to implement the concealed object segmentation. Evaluation and comparison experiments are conducted in 0.2 THz band passive images, demonstrating that the method has a good segmentation performance and real-time performance. It may have an important application in the automatic detection for terahertz security.

**Keywords:** passive terahertz image; image processing; two-dimensional entropy; concealed object detection; object segmentation

太赫兹波是指频率范围为 0.1~10 THz 的电磁波, 兼具有微波与红外的相似特性, 主要表现在太赫兹波比微波具有更好的成像分辨力, 同时又比红外具有更好的穿透性<sup>[1]</sup>。此外, 相比于 X 射线, 太赫兹安检认为是安全无害的<sup>[2]</sup>。因此, 太赫兹成像与检测在其技术领域具有广阔的发展与应用前景<sup>[2-6]</sup>。

在太赫兹成像的 2 种方式(主动成像和被动成像)中, 被动成像在安全性和隐私性方面具有更大的优势。但由于物体自身太赫兹辐射微弱、易受环境温度影响等, 隐蔽目标的检测对被动式成像是相当大的挑战<sup>[2]</sup>。目前, 国内外对太赫兹人体成像中隐蔽目标的检测研究尚少, 文献[7]总结并分析了几种智能处理太赫兹成像的方法及其优缺点; 文献[8]通过灰度拉伸的二值化方法对目标轮廓进行了提取; 文献[9]提出了基于能量泛函的太赫兹特征区域分解方法。

本文提出一种基于最大二维熵的被动式太赫兹隐蔽目标的分割方法。该方法首先针对被动式太赫兹成像的信噪比低、成像模糊等问题, 设计了一个滤波器组, 进而获得人体轮廓的二值化图像; 在此基础上, 设计了一种待

收稿日期: 2020-11-13; 修回日期: 2021-01-07

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目(2019B010157001; 2020B0101110001); 国家重点研发计划资助项目(2017YFA0701004; 2018YFF01013004); 国家自然科学基金资助项目(61671432; 61731020; 61988102); 中国科学院科技创新重点部署资助项目(KGFZD-135-18-029)

\*通信作者: 李超 email: cli@mail.ie.ac.cn

检区域自动生成算法，实现了人体重点区域的自动覆盖；之后，引入信息熵的概念，基于最大化二维熵的理论完成了对隐蔽目标的轮廓分割任务。

## 1 被动式太赫兹图像预处理

使用文献[9]中的被动式太赫兹成像系统采集图像，如图 1 所示。原始成像的信噪比相对较低，且目标成像边缘较模糊，如果直接对原始图像进行目标分割，其效果很难令人满意，因此，需要先对太赫兹图像进行必要的预处理。图 2 为预处理的流程，分别为：a) 图像滤波；b) 直方图均衡化；c) 二值化处理。

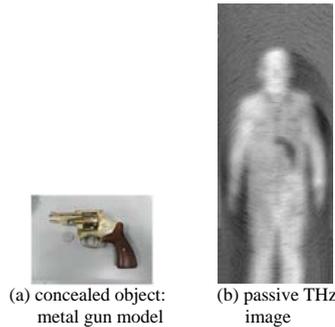


Fig.1 Example image of the passive terahertz concealed object imaging  
图 1 被动式太赫兹隐蔽目标成像

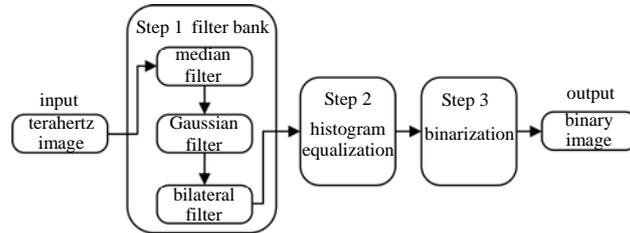


Fig.2 Preprocessing flowchart of passive terahertz image  
图 2 被动式太赫兹图像预处理流程图

首先对被动式太赫兹图像进行滤波处理。在此阶段，针对被动式太赫兹成像中存在的椒盐噪声和高斯噪声等，设计一个由中值滤波器、高斯滤波器和双边滤波器依次串行构成的滤波器组，实现太赫兹图像的滤波和增强效果。中值滤波是一种非线性滤波，能够很好地消除椒盐噪声<sup>[10]</sup>：

$$M_f(I(x,y)) = \text{Med}\{I(x+i,y+j) \mid -\frac{k-1}{2} \leq i,j \leq \frac{k-1}{2}, i,j \in \mathbb{Z}\} \quad (1)$$

式中： $k$  为中值滤波器的窗口尺寸( $k=3$ )； $I$  为像素灰度值； $\text{Med}\{\cdot\}$  为取中值操作。

高斯滤波一般用于平滑图像，它能够很好地过滤高斯噪声<sup>[10]</sup>：

$$G_f(I(x,y)) = \sum_{j=-h}^h \sum_{i=-h}^h I(x+i,y+j)K(x+i,y+j), h = \frac{k-1}{2} \quad (2)$$

式中： $K$  为高斯滤波器窗口； $k$  为窗口大小( $k=5$ )。

双边滤波是一种图像空间域和灰度域的综合性滤波器，它能尽可能地保留图像中物体边缘的梯度信息，同时又能平滑物体非边缘区域的噪声<sup>[10]</sup>：

$$\begin{cases} B_f(p) = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_s(\|p-q\|) G_r(|I_p - I_q|) I_q \\ W_p = \sum_{q \in S} G_s(\|p-q\|) G_r(|I_p - I_q|) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $p$  为像素坐标； $s$  为以  $p$  为中心的滤波器窗口； $q$  为窗口内任意一点； $I$  表示对应下标像素的灰度值； $G_s$  和  $G_r$  分别为空间域和灰度域的高斯核函数； $W_p$  为归一化的加权和。

将 3 种滤波器依次组合，构成一个滤波器组  $F$ 。该滤波器组  $F$  的滤波流程为：

$$T^{\text{filtered}} = F[T^{\text{original}}] = B_f(G_f(M_f(T^{\text{original}}))) \quad (4)$$

式中： $T^{\text{original}}$  为太赫兹原始图像； $T^{\text{filtered}}$  为通过该滤波器组后的滤波图像。

图 3 展示了该滤波器组  $F$  的滤波效果，可以看到，滤波器组  $F$  能够去除大部分噪声，达到了图像增强的效果。另一方面，通过分析滤波前后的频谱图发现，该滤波器组  $F$  能够过滤掉原始太赫兹图像中大部分高频噪声，保留了低频部分的成像信息，这有利于降低图像高频噪声点对后续二值化的干扰。

预处理的第二阶段是直方图均衡化。由于不同太赫兹图像之间的成像对比度存在差异，为减小这些差异对二值化的影响，对滤波后的图像进行直方图均衡化处理<sup>[10]</sup>。如图 4(a)所示，直方图均衡化后的图像灰度分布更加均

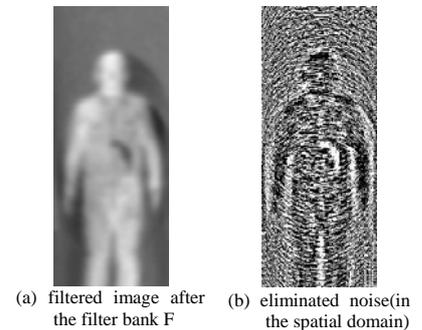


Fig.3 Filtering results of the filter bank F displayed in the spatial domain  
图 3 空间域下的滤波器组 F 的滤波效果图

匀，成像对比度也更加均衡，减少了后续二值化处理对图像灰度分布不均的敏感程度。

预处理的第三阶段是二值化，目的是获得人体轮廓的二值化图像。采用常用的大津法二值化<sup>[11]</sup>，图 4(b)为大津法二值化的效果，图像中人体和背景被清晰地区分开来。至此，被动式太赫兹图像的预处理完毕，获得了一张只包含人体轮廓的二值化图像。

## 2 被动式太赫兹隐蔽目标分割

### 2.1 待检区域自生成算法

对隐蔽目标进行轮廓分割之前，针对待检测目标一般藏匿于人体躯干部位的实际场景特点，设计了一种能够自动生成待检区域的算法。该算法根据人体在成像中的不同位置，自动生成能够覆盖人体躯干的重点检测区域，不仅提高了检测算法的运行效率，还能够直接避免由非人体区域内产生的虚警误检。

算法的输入为经过预处理得到的二值化图像，该算法的流程为：

- 1) 裁剪输入图像的下半幅图像；
- 2) 对裁剪得到的图像分别从左右两边往中间遍历搜索二值分界，以此确定人体躯干两侧所在列的位置，作为待检区域的左右边界，如图 5(a)中的参考线 A 和 B；
- 3) 计算左右边界 A 和 B 的垂直中心线 C，大致确定头部所在列的位置；再沿参考线 C 自上而下搜索头部上边界 D；然后根据预设偏移值推算出待检区域的上下边界，如图 5(a)中的参考线 E 和 F；
- 4) 综合以上边界坐标，输出覆盖人体躯干重点待检测区域的矩形框，如图 5(b)中绿色标注所示。

### 2.2 基于最大二维熵的隐蔽目标分割

在待检区域内对隐蔽目标进行轮廓分割。由于隐蔽目标在人体背景里所占的比例相对较小，传统的大津法<sup>[11]</sup>并不适用。对此，一方面，引入信息论里熵的概念，认为当目标和背景的熵越大时，信息总量越大，此时目标和背景的分割效果越好<sup>[12]</sup>；另一方面，由于被动式太赫兹图像的信噪比低，如果仅使用像素点的灰度信息计算一维熵，则阈值很容易受图像噪声的干扰，导致隐蔽目标的分割效果欠佳。为此，又引入邻域均值灰度，表示像素间的空间信息，降低阈值对噪声的敏感程度，且像素和邻域像素具有很强的空间相关性，使目标和背景在二维直方图上的分布比在一维灰度直方图上更容易区分。综上，以点灰度和邻域均值灰度构造二维直方图，基于最大化二维熵的目标函数来计算最佳分割阈值<sup>[13]</sup>。

设图像 F 的尺寸为  $W \times H$ ，灰度级数为  $L$ ，像素点  $(x,y)$  的灰度值为  $f(x,y)$ ，在其  $k \times k$  邻域内的灰度均值为  $g(x,y)$ ，即式(5)：

$$g(x,y) = \frac{1}{k^2} \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n f(x+i,y+j), \quad n = \frac{k-1}{2} \quad (5)$$

其实， $g(x,y)$  可以看作是原图像 F 经过  $k \times k$  窗口滤波得到的平滑图像，记为 G，则原图像 F 的每个像素点  $(x,y)$  都对应有一个由点灰度  $f$  及其邻域均值灰度  $g$  组成的二维特征对，定义为  $\{f(x,y), g(x,y)\}$ 。

对特征对  $\{f,g\}$  进行二维分布直方图累积。设  $N_{ij}$  为图像 F 里点灰度为  $i$  且邻域均值灰度为  $j$  的像素点的个数， $p_{ij}$  为二维特征对  $\{i,j\}$  的概率，即  $p_{ij} = N_{ij} / (W \times H)$ ，通过原图像 F 和平滑图像 G 可以统计得到关于点灰度  $f$  和邻域均值灰度  $g$  的二维分布直方图，如图 6 所示(横轴是点灰度，纵轴是邻域均值灰度)。分析图 6 可知，绝大部分像素的点灰度与邻域均值灰度的相关性很强，因此这部分像素基本分布在二维直方图过原点的对角线附近；而对于处在隐蔽目标边缘的像素以及一些噪声像素，由于这

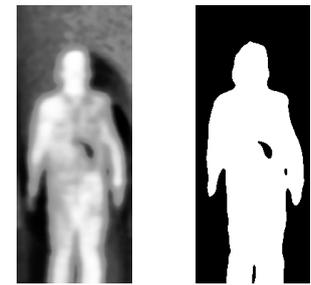


Fig.4 Binarization with OTSU thresholding  
图 4 大津法二值化处理

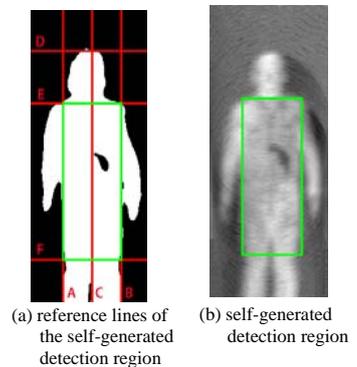


Fig.5 Algorithm of the self-generated detection region  
图 5 待检区域自生成算法

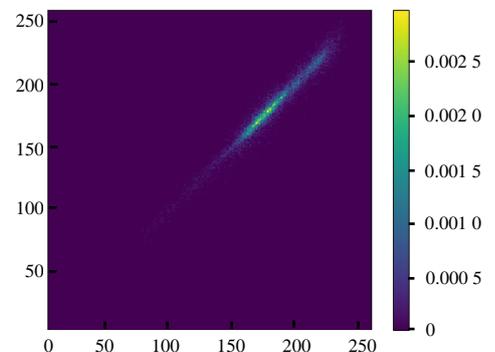


Fig.6 Two-dimensional distribution histogram of grayscale and neighborhood mean grayscale  
图 6 灰度-邻域均值灰度的二维分布直方图

些像素的点灰度与邻域均值灰度的相关性较弱，因此分布在对角线的两侧，且分布幅值急剧下降。

根据信息论中熵的概念，图像的离散二维熵定义为：

$$H = -\sum_i \sum_j p_{ij} \log p_{ij} \quad (6)$$

为使目标和背景所包含的信息总量最大，即实现二维熵的最大化，定义二维阈值矢量 $(\alpha, \beta)$ 的目标函数为：

$$\Phi(\alpha, \beta) = \log[P_A(1-P_A)] + \frac{H_A}{P_A} + \frac{H_L - H_A}{1-P_A} \quad (7)$$

式中： $P_A = \sum_{i=0}^{\alpha} \sum_{j=0}^{\beta} p_{ij}$ ； $H_A = -\sum_{i=0}^{\alpha} \sum_{j=0}^{\beta} p_{ij} \log p_{ij}$ ； $H_L = -\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_{ij} \log p_{ij}$ 。

根据最大化二维熵的原则，通过枚举 $\alpha$ 和 $\beta$ 来优化目标函数 $\Phi(\alpha, \beta)$ ，使目标函数最大化的二维阈值矢量，记为 $(\alpha_0, \beta_0)$ ：

$$(\alpha_0, \beta_0) = \underset{\alpha, \beta}{\operatorname{argmax}} \Phi(\alpha, \beta), \quad 0 \leq \alpha, \beta \leq L-1 \quad (8)$$

在得到的阈值矢量中，阈值 $\alpha_0$ 对应于像素点灰度分布维度下的阈值，适用于原图像 $F$ ；阈值 $\beta_0$ 对应于像素邻域均值灰度分布维度下的阈值，适用于平滑图像 $G$ 。取这 2 个阈值的均值作为分割阈值，记为 $T$ (式(9))。重新定义待分割图像为 $h(x, y)$ ，该图像是原图像 $F$ 和平滑图像 $G$ 的平均图像再加上偏置常量 $b$ (式(10))。最终在图像 $h(x, y)$ 上执行阈值 $T$ 的目标分割(式(11))，输出图像 $h_t(x, y)$ 如图 7(b)所示。

$$T = \frac{\alpha_0 + \beta_0}{2} \quad (9)$$

$$h(x, y) = \frac{1}{2}f(x, y) + \frac{1}{2}g(x, y) + b \quad (10)$$

$$h_t(x, y) = \begin{cases} 1, & h(x, y) < T \\ 0, & h(x, y) \geq T \end{cases} \quad (11)$$

图 7 为几种阈值分割方法的效果对比。通过对比可知，基于类间方差最大化的大津法，由于待检区域中的目标和背景的空间占比悬殊，对隐蔽目标的分割效果很难令人满意；而基于点灰度的一维熵的方法，虽然解决了上述问题，但计算出的阈值易受图像噪声的干扰，对隐蔽目标的分割效果仍然欠佳；相比于基于一维熵的方法，基于二维熵的阈值分割方法不仅使用了点灰度分布的维度，还增加了邻域均值灰度分布的维度，从空间域的层面上降低了阈值对噪声的敏感程度，因此该方法对隐蔽目标的分割效果优于前 2 种方法。

对分割得到的二值化图像使用 Suzuki85 算法<sup>[14]</sup>进行轮廓搜索。如图 8(a)所示，可以发现图中仍存在一些非目标的干扰轮廓。为尽可能地消除这些干扰轮廓，对所有轮廓进行遍历，过滤掉面积远小于目标轮廓的小轮廓和位于图像边缘的干扰轮廓。实验证明，合适的过滤参数对隐蔽目标分割性能的提升有很大帮助。图 8(b)是过滤后的轮廓分割效果，通过对比可以发现，过滤后的轮廓中已经没有面积极小的干扰轮廓，且只剩下目标轮廓。最后，根据当前待检区域的坐标原点，将区域内隐蔽目标的轮廓坐标平移变换为原图像坐标系中的轮廓坐标，即完成了被动式太赫兹图像中隐蔽目标的轮廓分割任务，如图 8(c)所示。

### 3 实验结果

使用前文中的被动式成像系统<sup>[9]</sup>，采集制作了一组被动式太赫兹人体安检数据集。该数据集包含 896 幅图像，每幅图像的人体衣物下在躯干部位不同位置随机藏匿有 0~2 个待检测目标物体(手机、手枪)，以保证数据集的多样性和随机性。同时，对数据集中所有目标物体的轮廓进行人工标注，以实现检测结果与实际结果的对照评估。以下评估实验和对比实验均在此数据集上进行。

本实验采用的评估指标分别为精确率(Precision)、召回率(Recall)和综合评价指标 F-score。精确率和召回率往

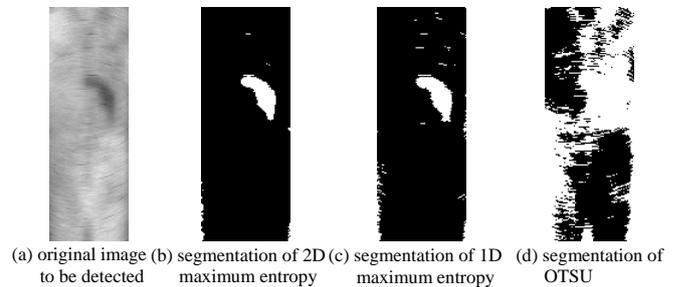


Fig.7 Comparison of several segmentation methods

图 7 几种阈值分割的效果对比

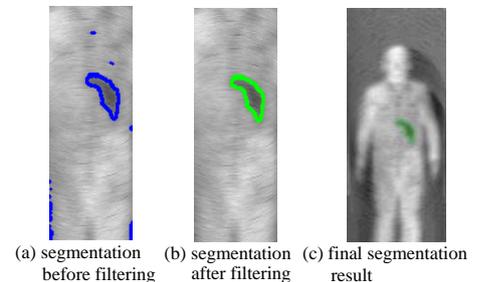


Fig.8 Contour segmentation filtering

图 8 轮廓过滤

往呈负相关，而综合评价指标 F-score 是精确率和召回率的调和平均数，能够综合反映检测性能。引入交并比(Intersection Over Union, IOU)对分割结果的准确性进行判定。

在不同交并比判定标准下，对本文提出的分割方法进行检测性能评估。表 1 为 IOU 在 0.05~0.5 的等分区间里的实验指标数据。实验表明，在一定 IOU 范围内，综合评价指标可以维持较高的水平。在算法实时性方面，本实验环境下(CPU: Intel Core i5-8250U@1.60 GHz, RAM: 8 G, code: Python)平均检测帧率可达 3.6 FPS。图 9 为该方法对被动式太赫兹人体成像中隐蔽目标的分割效果样例。

表 1 不同交并比 IOU 下的评估指标  
Table 1 Evaluation under difficult IOUs

IOU	Precision	Recall	F-Score
0.05	0.861 6	0.956 9	0.906 8
0.10	0.861 6	0.956 9	0.906 8
0.15	0.861 6	0.956 9	0.906 8
0.20	0.859 4	0.950 4	0.902 6
0.25	0.859 4	0.933 2	0.894 8
0.30	0.852 7	0.918 1	0.884 2
0.35	0.823 7	0.887 9	0.854 6
0.40	0.796 9	0.853 4	0.824 2
0.45	0.734 4	0.793 1	0.762 6
0.50	0.687 5	0.743 5	0.714 4

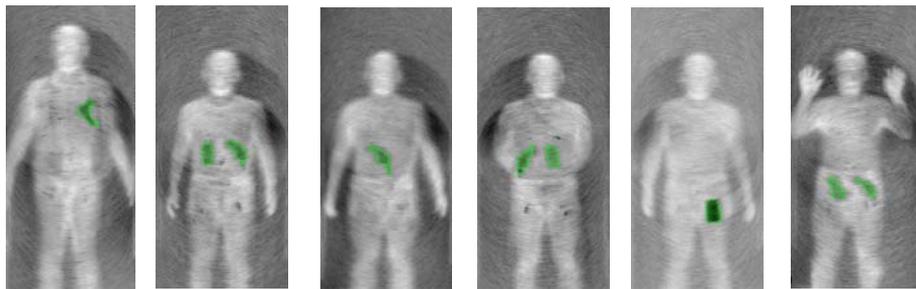


Fig.9 Several examples of results of the concealed object segmentation for passive terahertz images  
图 9 被动式太赫兹人体图像中隐蔽目标的轮廓分割

除此之外，还进行了对比实验，对照组分别是基于类间方差最大化的大津法 OTSU<sup>[11]</sup>、基于最大化一维熵的方法<sup>[12]</sup>和基于能量泛函的太赫兹特征区域分解方法<sup>[9]</sup>。通过分析图 10 中各组评估曲线可以发现，在 0.05~0.5 的 IOU 区间内，本文提出的隐蔽目标分割方法在三大评估指标上都呈现出明显的优势，分割性能优于其他 3 种方法。在三者的对比实验中，本方法性能表现最好，其次是基于最大化一维熵的方法，再其次是基于能量泛函的太赫兹特征区域分解方法，而大津法在本实验的分割任务中性能表现明显逊于前三者。

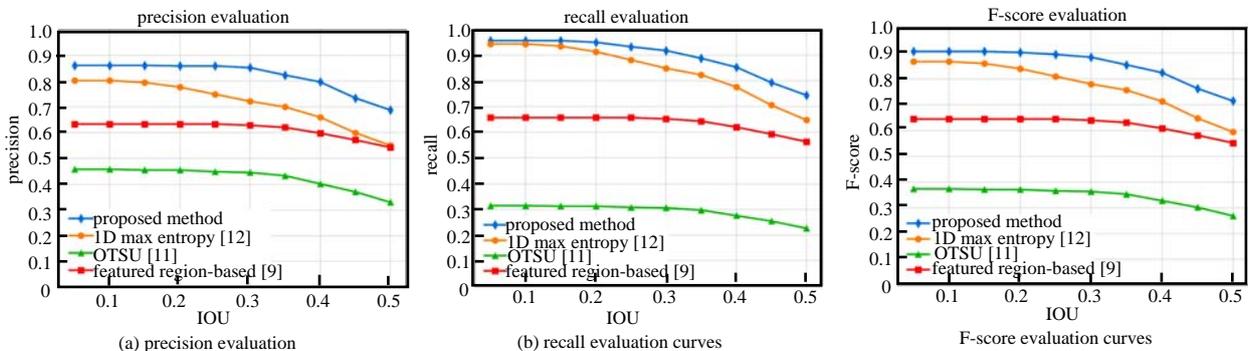


Fig.10 Performance comparison of the concealed object segmentation methods  
图 10 隐蔽目标分割方法性能对比

#### 4 结论

针对被动式太赫兹图像的特点，本文提出了一种基于最大二维熵的隐蔽目标分割的方法。面对被动式太赫兹成像信噪比低、图像模糊等问题，首先设计了一种滤波器组，由中值滤波、高斯滤波和双边滤波串行组合而成，具有较好的滤波性能。本文设计的待检区域自生成算法能够实现对人体躯干重点区域的自动覆盖，这不仅提高了检测效率，还降低了非人体区域的虚警检测。同时，该方法不仅使用了点灰度的分布维度，还考虑了邻域均值灰度的分布维度，以此构成了二维熵，并基于最大化二维熵的优化原则，实现了被动式太赫兹隐蔽目标的分割任务。评估和对比实验在 0.2 THz 被动式成像数据集上进行，实验表明该方法能够对被动式太赫兹安检场景中隐蔽目标进行轮廓分割，且具有较好的检测分割性能。该方法在太赫兹智能安检系统中将具有重要的应用价值。

#### 参考文献：

[ 1 ] ARMSTRONG C M. The truth about terahertz[J]. IEEE Spectrum, 2012,49(9):36-41.

- [ 2 ] 成彬彬,李慧萍,安健飞,等. 太赫兹成像技术在站开式安检中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6): 843–848. (CHENG Binbin,LI Huiping,AN Jianfei,et al. Application of terahertz imaging in standoff security inspection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):843–848.) doi:10.11805/TKYDA201506.0843.
- [ 3 ] APPLEBY R,WALLACE H B. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007,55(11):2944–2956.
- [ 4 ] 王天鹤,吴紫阳,丁金闪,等. 基于多特征联合的太赫兹药品检测方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(2):190–195,254. (WANG Tianhe,WU Ziyang,DING Jinshan,et al. A multi-feature joint medicine inspection method based on THz–TDS[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(2):190–195,254.) doi:10.11805/TKYDA2019038.
- [ 5 ] COOPER K B,DENGLER R J,LLOMBART N,et al. THz imaging radar for standoff personnel screening[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):169–182.
- [ 6 ] 刘丰,朱忠博,李栋,等. 太赫兹波在遥感技术中的应用探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(5):693–701. (LIU Feng,ZHU Zhongbo,LI Dong,et al. Discussion on terahertz techniques in remote sensing[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(5):693–701.) doi:10.11805/TKYDA201305.0693.
- [ 7 ] 陈韬,孟坤,朱礼国,等. 基于太赫兹光谱成像技术的智能处理方法分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1): 7–12. (CHEN Tao,MENG Kun,ZHU Ligu,et al. Intelligent processing methods based on the terahertz spectral imaging technique[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):7–12.) doi:10.11805/TKYDA201601.0007.
- [ 8 ] 张馨,赵源萌,张存林. 被动式太赫兹图像分割算法[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(6):1597–1600. (ZHANG Xin,ZHAO Yuanmeng,ZHANG Cunlin. Passive terahertz image segmentation algorithm[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6):1597–1600.) doi:10.3788/HPLPB20132506.1597.
- [ 9 ] LI R,LI C,LI H,et al. Study of automatic detection of concealed targets in passive terahertz images for intelligent security screening[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018,9(2):165–176. doi:10.1109/TTHZ.2018.2889407.
- [10] GONZALEZ R C,WOODS R E,EDDINS S L. Digital image processing using MATLAB[M]. Beijing:Electronics Industry Publishing House, 2004.
- [11] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems,Man,and Cybernetics, 1979,9(1):62–66.
- [12] KAPUR J N,SAHOO P K,WONG A K. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. Computer Vision,Graphics, and Image Processing, 1985,29(3):273–285.
- [13] CHEN W T,WEN C H,YANG C W. A fast two-dimensional entropic thresholding algorithm[J]. Pattern Recognition, 1994,27(7): 885–893.
- [14] SUZUKI S. Topological structural analysis of digitized binary images by border following[J]. Computer Vision,Graphics, and Image Processing, 1985,30(1):32–46.

#### 作者简介：

徐华晟(1995–), 男, 江西省赣州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为信号处理、图像处理、模式识别与机器学习. email:xuhuasheng1995@163.com.

李超(1978–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场理论与微波技术、太赫兹成像技术.

方广有(1963–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为超宽带雷达成像理论与技术、探地雷达技术.