

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106591

基于 FLICM 的浅层目标毫米波全息检测研究

翟盛杰 姚金杰 杨志良

(中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室 太原 030051)

摘要: 检测浅层隐匿目标要求探测系统能有效穿透各种介质并能对不同深度处的目标实现成像。毫米波由于其穿透性高、对生物体伤害小、环境适应能力强和在该波段下不同材料的回波对比度较好的特点广泛应用于隐匿目标探测领域。宽带毫米波探测系统通过 FMCW 毫米波雷达阵列采集隐匿目标的反射信号以重建电场分布信息,获取目标的图像。但是毫米波探测系统的距离分辨力不足,重建的图像会受全息散斑的影响引入伪像而干扰真实目标的图像。针对这一问题,提出基于结合局部信息的模糊 c 均值阈值算法(FLICM)分割真实目标的方法以减少虚假目标的干扰,并将所提出的算法与传统算法进行了比较。实验结果表明,所提出的算法有效地实现了隐匿目标的图像分割,抑制了散斑的影响,提高了对隐匿物品的探测精度。

关键词: FLICM;毫米波全息成像;目标检测

中图分类号: TN958.94 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Research on mmwave holographic detection of shallow target based on FLICM

Zhai Shengjie Yao Jinjie Yang Zhiliang

(Shanxi Provincial Key Laboratory of Information Detection and Processing, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Detection of shallow concealed targets requires that the detection system can effectively penetrate all kinds of media and image the targets at different depths. Millimeter wave is widely used in the field of concealed target detection because of its high penetrability, little damage to organisms, strong adaptability to the environment and good echo contrast of different materials in this band. The broadband millimeter wave detection system collects the reflected signal of the hidden target through FMCW millimeter wave radar array to reconstruct the electric field distribution information and obtain the target image. However, the range resolution of millimeter wave detection system is insufficient, and the reconstructed image will be affected by holographic speckle to introduce artifacts and interfere with the real target image. In order to solve this problem, proposes a real target segmentation method based on fuzzy c-means thresholding algorithm (FLICM) combined with local information to reduce the interference of false targets, and compares the proposed algorithm with the traditional algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm effectively realizes the image segmentation of hidden objects, suppresses the influence of speckle, and improves the detection accuracy of hidden objects.

Keywords: FLICM;mmwave holographic imaging;targets detection

0 引言

检测隐匿目标是现代无损检测、安防检查和军事侦察的重要部分。目前毫米波主动检测系统十分成熟,大量应用在安检领域^[1]。在毫米波段,金属材料的发射率几乎为0,反射率接近于1^[2],金属与其他物质的反射特性差别较为明显。相反的,塑料等介电性能较差的材料在毫米波波段透射率更高,反射率较低,其在毫米波图像中的幅值较金

属材料要低,易受到其他因素的干扰。毫米波可以以较小的损耗探测被隐藏在复杂介质中的隐匿目标,频率为73和81 GHz的毫米波穿透常见的木制、玻璃和墙体等材料的衰减较小^[3]。并且毫米波波长较短,成像分辨力相对较高,理论分辨率有可能达到人眼的观测效果,探测不同目标的对比度较好,不会威胁身体健康,在探测浅层隐匿目标上具有绝佳的优势^[4]。目前毫米波成像系统大多采用近场全息成像算法,该算法由 SAR 成像算法发展而来,成像分辨率高,

收稿日期:2021-05-06

探测距离较远^[5]。但随着电磁波频率的增大,隐藏目标会和周围的杂物逐渐表现为粗糙目标,在相干成像结果中呈现出散斑效应^[6],这会严重影响毫米波成像系统对目标的成像效果,介电性能较差的目标易被散斑遮盖。散斑效应与不同距离向上目标的反射信号的叠加有关。增加带宽是削弱散斑效应的有效方法,带宽为 40 GHz 的亚毫米波成像系统相比带宽为 4 GHz 的系统成像效果更好,散斑影响更小^[7]。但是大部分毫米波系统主频没有亚毫米波系统那么高,相对带宽较低,提高带宽到 40 GHz 的成本要远远高于亚毫米波系统。

本文提出并论证利用基于目标局部信息的模糊 c 均值阈值算法(FLICM)分割浅层隐匿目标的图像以弱化散斑的影响。通过使用 60 GHz 毫米波传感器 IWR6843 组建毫米波全息成像系统并模拟散斑效应的生成环境以检测算法的有效性。

1 毫米波全息成像原理

毫米波全息成像系统通过利用雷达成像原理收集人体或物体在扫描场景中的散射场信息来实现成像。与常见的被动光学成像不同,毫米波全息成像需要利用大孔径的阵列来采集数据,并且空间中阵列的排布需要满足空间奈奎斯特采样定律^[8]。本文利用平面扫描技术实现毫米波系统的二维孔径合成,如图 1 所示。其中图 1(a)为平面扫描阵列成像系统的工作原理示意图,图 1(b)为成像系统的实物图。将宽带毫米波 FMCW 雷达沿图 1(a)所示的 x - y 平面轨迹移动进行数据采集,采集面便形成了一个类似于相控阵形式的合成孔径,波束集体指向目标^[9]。在某一测量瞬间,收发器位于位置 $(x_0, y_0, 0)$,一目标点 (x, y, z_0) 位于相距成像系统的距离为 z_0 的平面上。通过获取目标散射信息 $\sigma(x, y, z)$ 沿 xOy 平面上的等效分布 $s(x, y, z=z_0)$ 就能实现目标横断面的二维成像。

宽带毫米波雷达的采集信号包含了处在不同距离上的材料的反射数据。提取平面扫描阵列在距离 z_0 处的回波数据 $s(x, y)$ 。如图 1(a)所示, $s(x, y)$ 中位置 (x', y') 处接收的距离 z_0 处目标上一点 (x, y) 的反射回波数据可以表示为:

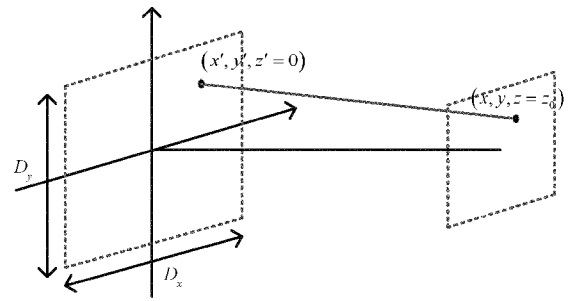
$$s(x', y') = \iint \exp(-j2k\sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + z_0^2}) f(x, y) dx dy \quad (1)$$

其中, $f(x, y)$ 是二维目标的散射率函数。成像算法通过计算同一距离面上的反射信号 $s(x, y)$ 对应的 $f(x, y)$ 实现成像,即重建待测目标体的散射分布,求解目标位置处的电场分布 $E(x, y, z)$ 。 $f(x, y)$ 可由下式推出:

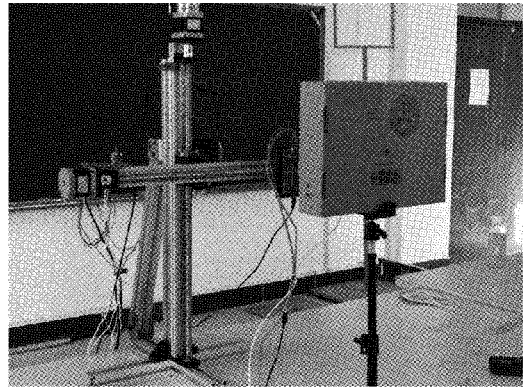
$$f(x, y) = FT_{2D}^{-1} \left(FT_{2D}[s(x, y)] \frac{1}{k_z} \exp(-jk_z z_0) \right) \quad (2)$$

其中,

$$FT_{2D}[s(x, y)] = \iint s(x, y) \exp(-j(k_x x + k_y y)) dk_x dk_y \quad (3)$$



(a) 工作原理示意图



(b) 实物图

图 1 平面扫描毫米波全息成像系统

对于位于目标坐标系 $(0, 0, z_0)$ 原点的点目标,扫描阵列接收到的反射波数据为:

$$h(x', y') = \exp(-j2k\sqrt{(x')^2 + (y')^2 + z_0^2}) \quad (4)$$

其中, $h(x', y')$ 是成像系统中的点扩散函数 PSF。假如重建图像的像素位置与毫米波雷达在平面扫描采样时的位置一致,式(1)可以用下式表示:

$$s(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) \quad (5)$$

通过匹配滤波重建目标的散射场信息^[10]:

$$f(x, y) = F_{2D}^{-1} [F_{2D}[s(x, y)] F_{2D}[h(x, y)]] \quad (6)$$

F_{2D} 是二维傅里叶变换:

$$F_{2D}[s(x, y)] = \iint s(x, y) \exp(-j(\omega_1 x + \omega_2 y)) dx dy \quad (7)$$

式(6)中匹配滤波器 $h(x, y)$ 由式(4)推出:

$$h(x, y) = c^{-j2k\sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2}} \quad (8)$$

式(8)中的滤波器也可以认为是位于目标坐标系原点 $(0, 0, z_0)$ 的点目标反射波数据的共轭^[11]。

基于前文的分析,毫米波系统实现全息成像的步骤总结如下。

1) 利用宽带毫米波雷达在二维平面的扫描构建二维平面孔径,毫米波雷达需在空间上均匀采样。

2) 对回波数据聚焦到 z_0 处,提取复数采样数据 $s(x, y)$,并对 $s(x, y)$ 做二维傅里叶变换。

3) 计算匹配滤波器 $h(x, y)$,并对 $h(x, y)$ 做二维傅里叶变换。

- 4) 计算 $F_{2D}[s(x,y)]$ 和 $F_{2D}[h(x,y)]$ 的乘积, 并做二维逆傅里叶变换, 实现 $s(x,y)$ 和 $h(x,y)$ 的卷积。
- 5) 计算各坐标处的幅度并显示数据。

2 成像散斑分析

从式(5)中可以看出全息图像的复振幅 $A(\mathbf{r}')$ 是成像系统点扩散函数 $PSF(\cdot)$ 和目标面 z_0 处的复散射系数 $f(\mathbf{r})$ 的卷积:

$$A(\mathbf{r}') = \iint_S f(\mathbf{r}) PSF(\mathbf{r}' - \mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (9)$$

式中: \mathbf{r}' 为重构图像的坐标位置矢量。

从式(8)中可以看出 $PSF(\cdot)$ 函数与三维分布 x, y, z 有关^[12]。 x, y 方向的精度由扫描架控制, z 方向的精度则与毫米波雷达本身的性质有关。宽带毫米波雷达的距离分辨率 Δr 由其调频带宽 B 决定:

$$\Delta r = \frac{c}{2B} \quad (10)$$

式中: c 是光速。

如果阵列聚焦的目标面 z_0 是不平坦的粗糙面, 且该面在 z 方向上的起伏处于 Δr 内, 那么 z_0 处的信号 $s(x,y)$ 就是从目标面略微不同的深度接收到的反射信号。这会引起来相和相消干涉, 使得重建的图像上出现斑点。斑点处的复振幅较高, 会掩盖很多目标的特征, 增加带宽和空间分辨率可以提高系统对散射体的分辨力, 进而减小干扰^[13]。

本文使用的毫米波传感器 IWR6843 的最大带宽为 4 GHz, 对应的 z 方向的分辨力为 3.75 cm, 对粗糙平面的分辨力较低。为对比散斑对图像的影响, 设置光滑金属表面和粘贴了塑料胶带的粗糙金属表面的对照组, 如图 2 所示。通过对比图 2(c) 和 (d) 可以明显看出粗糙表面所导致的散斑明显影响了图像的重建效果。

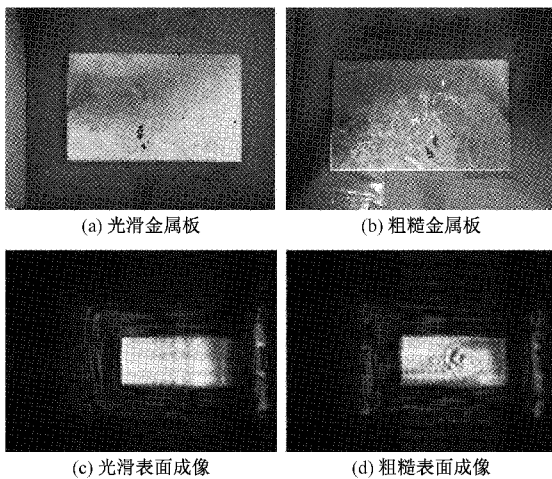


图 2 光滑表面与粗糙表面成像对比

相较于反射率较高的金属, 介电性能较差的物体成像效果受散斑影响较大。图 3(a) 为用塑料胶带绑在盒子内部的指尖陀螺和水果刀, 图 3(b) 为全息成像结果。对比

图 3(a) 和 (b), 全息成像结果中出现了虚假的圆形物体, 且图像幅值与真实物体的幅值接近。需要设计算法将真实物体的图像分割出来, 去除虚假目标。

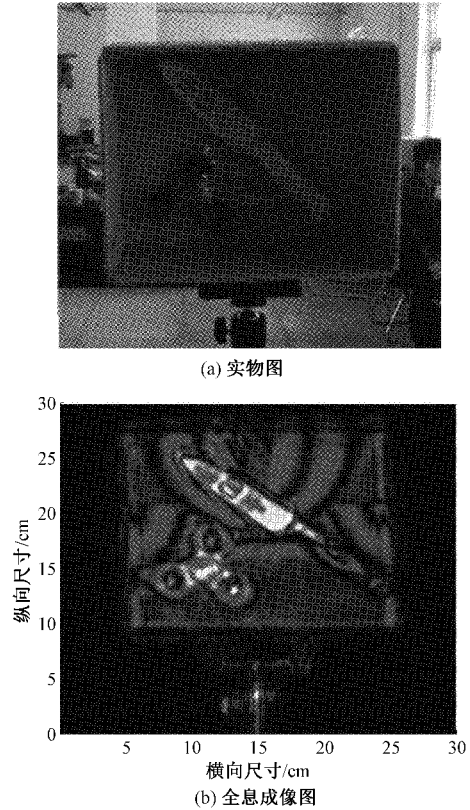


图 3 隐蔽物全息成像

3 基于 FLICM 算法的目标图像分割

由于表面粗糙和被测材料毫米波波段反射率较低的原因, 隐蔽目标的图像幅值与散斑幅值差别较小。受散斑的干扰难以在原始图像中区分真实目标和虚假目标。利用图像分割算法可以提升期望目标在毫米波图像中的效果, 降低干扰。基于大津法 (Otsu) 的图像分割算法能有效改善无源毫米波辐射成像的效果^[14]。而在太赫兹反射式成像应用中, 基于模糊 c 均值阈值算法 (FCM) 的改进分割算法应用更广泛^[15]。文中的毫米波反射式成像系统的成像结果更适合用 FCM 算法分割。但是 FCM 算法分割结果容易受初始聚类中心的影响, 设计之初没有考虑邻域像素的相关性。本文利用结合局部信息的 FCM 算法 (FLICM) 和基于幅度的预处理实现图像增强, 分割存在真实目标的区域, 去除图像中的虚假目标。FLICM 算法相比 FCM 算法在目标函数中引入了新的模糊因子来提高算法对干扰的鲁棒性, 并通过中心像素点和其邻域点的距离来控制邻域信息对中心像素点的影响程度从而改善了参数选择问题^[16]。目前 FLICM 算法在合成孔径雷达 (SAR) 图像变化检测中应用广泛^[17]。

FLICM 聚类算法是由 Krindis 和 Chatzis 提出的, FLICM 的特点是使用模糊局部相似度度量, 目的是保证噪声不敏感和图像细节保持。特别地, 在目标函数中引入模糊因子来提高聚类性能。该模糊因子的数学定义为:

$$G_{ki} = \sum_{\substack{j \in N_i \\ j \neq i}} \frac{1}{d_{ij} + 1} (1 - u_{kj})^m \|x_i - v_k\|^2 \quad (11)$$

此外, 对隶属度划分矩阵和聚类中心的计算如下:

$$u_{ki} = \frac{1}{\sum_{l=1}^c \left(\frac{\|x_i - v_k\|^2 + G_{ki}}{\|x_i - v_l\|^2 + G_{li}} \right)^{1/(m-1)}} \quad (12)$$

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ki}^m x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ki}^m} \quad (13)$$

其中, 初始隶属度划分矩阵是随机计算的。

为降低噪声对图像分割的影响, 首先对全息成像的结果做预处理, 滤除图像中幅值较低的部分, 增强原始图像质量。利用 FCM 算法和 FLICM 算法在聚类中心为 2 的限制条件下分别处理目标图像, 其中 FLICM 算法设置的邻域为 3。计算目标的聚类中心和隶属度划分矩阵, 分割真实目标的图像, 得到如图 4 所示的分割结果。其中图 4(a) 为由 FCM 算法分割的结果, 图 4(b) 为由 FLICM 算法分割的结果。FLICM 算法的分割结果相比 FCM 算法屏蔽了更多的虚假目标, 保留了目标大部分边缘信息, 实现了更好的分割效果。FCM 算法保留的边缘信息和虚假目标更多。

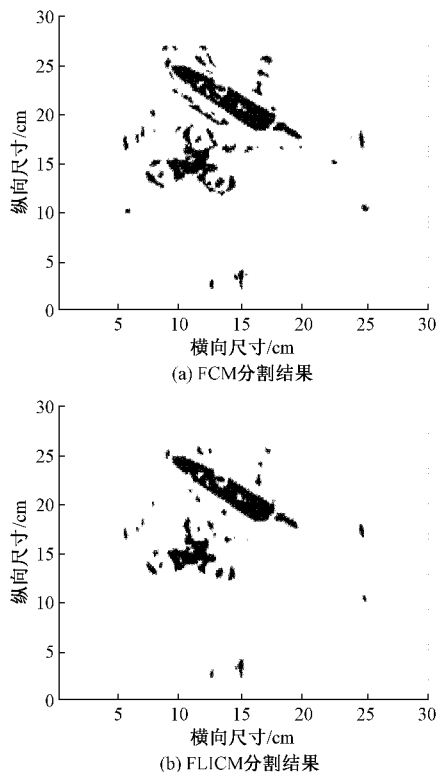


图 4 算法分割结果

为去除分割图像中由散斑引入的孤立点, 删除图像中少于 30 pixel 连通分量, 得到如图 5 所示的结果。图 5(a) 和 (b) 分别为 FCM 分割结果的处理和 FLICM 分割结果的处理。FLICM 的处理结果杂斑更少, 更贴近实际结果。

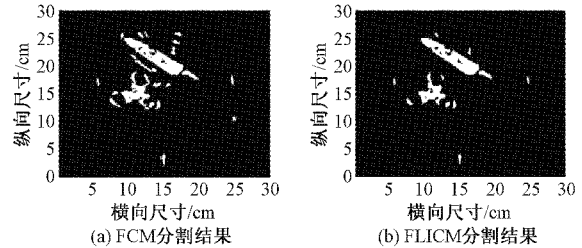


图 5 分割结果处理

基于 FLICM 的毫米波全息成像真实目标分割步骤总结如下。

- 1) 对全息成像的结果做预处理, 滤除全息图像中幅值较低的部分;
- 2) 利用 FLICM 聚类算法计算聚类中心和隶属度划分矩阵;
- 3) 由隶属度矩阵生成分割真实目标的图像;
- 4) 删除少于限定阈值像素的连通分量, 减少杂斑。

4 结 论

本文针对毫米波全息成像中因带宽限制导致的散斑现象进行了研究, 针对因散斑现象引入的虚假目标问题, 提出了利用 FLICM 算法分割真实目标的方法, 降低了虚假目标的影响, 提高了毫米波系统识别目标的能力。通过基于毫米波传感器 IWR6843 的成像实测实验验证了该方法的有效性。

参考文献

- [1] 李霆, 孟祥新, 张华坤, 等. W 波段主动式近场成像试验研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19):28-32.
- [2] 于畅扬, 张光锋, 王虹, 等. 基于毫米波辐射成像的浅埋金属探测[J]. 电光与控制, 2020, 27(1):94-97.
- [3] KHATUN M, GUO C, MATOLAK D, et al. Indoor and outdoor penetration loss measurements at 73 and 81 GHz [C]. 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), IEEE, 2020, DOI: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013945.
- [4] ZHANG X, LIANG J, WANG N, et al. Broadband millimeter-wave imaging radar-based 3-D holographic reconstruction for nondestructive testing [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 68(3): 1074-1085.
- [5] 潘丰, 王文静, 孟祥新, 等. 基于 SAR 成像的 FBP 算法, FFBP 算法三维快速重建[J]. 电子测量技术, 2020, 43(4):153-158.

- [6] 经文,江舸,成彬彬,等.毫米波全息成像中的部分发育散斑模型[J].光学学报,2019,39(5):115-123.
- [7] 牛铁杰,王子野,乔灵博.宽带全息重建算法应用于亚毫米波成像系统初探[J].CT理论与应用研究,2016,25(5):531-538.
- [8] 乔灵博,王迎新,赵自然,等.毫米波全息成像的空间采样条件[J].清华大学学报(自然科学版),2014,54(11):1407-1411.
- [9] 胡楚锋,周洲,李南京,等.一种时域平面扫描三维成像算法研究[J].仪器仪表学报,2012,33(4):46-50.
- [10] PATOLE S, TORLAK M. Two dimensional array imaging with beam steered data [J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2013, 22 (12): 5181-5189.
- [11] YANIK M E, TORLAK M. Near-field MIMO-SAR millimeter-wave imaging with sparsely sampled aperture data[J]. IEEE Access, 2019:31801-31819.
- [12] QIAO L, WANG Y, ZHAO Z, et al. Total variance regularization for millimeter-wave holographic imaging[C]. 2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), IEEE, 2014, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2014.6956098.
- [13] WANG Z, QIAO L, WANG Y, et al. A wide-band three-dimensional submillimeter-wave imaging system based on vector network analyzer [C]. 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves(IRMMW-THz), IEEE, 2016, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758482.
- [14] YU C, ZHANG G, GAO Y. Improved threshold-based segmentation method for millimeter wave radiometric image [C]. 2019 International Conference on Modeling, Simulation, Optimization and Numerical Techniques (SMONT 2019), Atlantis Press, 2019: 169-171.
- [15] WANG Y, SUN Z, WU L, et al. A hybrid-algorithm-based region of interest segmentation in THz imaging[C]. Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies VI, International Society for Optics and Photonics, 2019, DOI: 10.1117/12.2538890.
- [16] 刘俊,吕芳,薛海鹏.结合高斯核与各向异性邻域抑制的模糊聚类图像分割[J].电子测量技术,2020,43(3):132-138.
- [17] ZHU H, GUO Y, NIU M, et al. SAR image change detection based on Spark-FLICM algorithm [C]. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE, 2016: 3354-3357.

作者简介

翟盛杰,硕士研究生,主要研究方向为毫米波探测与成像。

E-mail:qq872095807@163.com

姚金杰(通信作者),工学博士,副教授,主要研究方向为位置服务与应用、微波与毫米波技术等。

E-mail:yyyjinjie163.com

杨志良,工学博士,讲师,主要研究方向为抗干扰通信、信号检测与处理等。

E-mail:yangzhiliang188@nuc.edu.cn