

文章编号: 2095-4980(2025)05-0495-07

粗糙二面角结构 THz 极化散射特性分析

郑雨晴¹, 徐志明^{*1}, 吴其华¹, 刘晓斌¹, 郝晓军², 艾小锋¹

(1. 国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073; 2. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘要: 太赫兹频段目标的极化散射特性与低频段相比, 呈现显著差异。本文以二面角为例, 研究不同表面粗糙度参数对目标散射结构判别及目标轮廓完整性的影响。基于线性滤波法对粗糙二面角进行几何建模; 通过 Pauli 极化分解对太赫兹极化图像进行部件解译, 定量分析雷达图像中目标轮廓完整性。电磁仿真验证表明: 随着粗糙度增加, 二面角的偶次散射分量减少, 奇次散射分量增多, 雷达图像的目标轮廓完整性更高。同时也表明了将极化解译与光学解译融合是太赫兹频段目标识别的重要思路。

关键词: 太赫兹; 极化解译; 目标特性; 二面角

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2023435

Polarization scattering characteristics analysis of rough dihedral angle at terahertz frequencies

ZHENG Yuqing¹, XU Zhiming^{*1}, WU Qihua¹, LIU Xiaobin¹, HAO Xiaojun², AI Xiaofeng¹

(1. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Hunan Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effect on Electronics & Information System,

Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: There is a significant difference between the terahertz frequency and low frequency in the polarization scattering characteristics of targets. Taking dihedral angle as the research object, the influence of different surface roughness on the identification of target scattering structure and the integrity of profile is studied. Firstly, the rough model is geometrically constructed based on the linear filtering method. Then, the component interpretation is performed on the polarization image by Pauli polarization decomposition, and the integrity of target contour in radar image is quantitatively analyzed. Finally, the electromagnetic simulation results prove that the even component of dihedral angle decreases and the odd component increases with the increase of roughness, and the integrity of target profile is higher in radar image. Results show that the fusion of polarization interpretation and optical interpretation is an important approach for target recognition at terahertz frequencies.

Keywords: terahertz; polarization interpretation; target characteristic; dihedral angle

随着雷达系统由单极化向多极化发展, 极化信息在目标识别方面表现出极大优势^[1]。目标极化特性与其形状结构密切相关, 能够反映目标表面粗糙度、对称性和取向等信息^[2-4]。与微波雷达相比, 太赫兹雷达波长短, 带宽大, 具有极高的“空时频”分辨力^[5], 能够将目标结构刻画得更清晰。将太赫兹雷达成像与极化相结合可极大增强雷达对目标信息的获取能力。因此, 分析太赫兹频段下目标极化散射机理具有重要的实际意义。

收稿日期: 2023-12-25; 修回日期: 2024-02-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071475); 国家自然科学基金重大项目课题资助项目(61890541; 61890542)

*通信作者: 徐志明 email: zmxu_nudt@163.com.

引用格式: 郑雨晴, 徐志明, 吴其华, 等. 粗糙二面角结构 THz 极化散射特性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(5): 495-501. DOI: 10.11805/TKYDA2023435.

Citation format: ZHENG Yuqing, XU Zhiming, WU Qihua, et al. Polarization scattering characteristics analysis of rough dihedral angle at terahertz frequencies[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(5): 495-501. DOI: 10.11805/TKYDA2023435.

太赫兹频段下目标表面粗糙度对散射特性的影响十分显著^[6-7]。针对太赫兹频段下目标散射特性,杨洋^[8]分析了太赫兹波在粗糙金属球体目标上的散射特性。张海峰等^[9]基于分区域三角面元剖分的物理光学方法,计算了钝锥高超声速飞行器的雷达截面积(Radar Cross Section, RCS),证明了太赫兹频段下 RCS 精确度更高,能较好地反映目标结构特征。高敬坤等^[10-11]提出了一种基于全波法的粗糙凸体目标散射特性计算方法。关于太赫兹目标极化特性,高敬坤等^[12]针对不同粗糙参数下的导体圆锥在雷达图像中的表现规律进行了分析,结果表明交叉极化图像更能反映目标轮廓信息。目前针对太赫兹目标表面粗糙度的影响已被广泛讨论,但对太赫兹目标极化特性的研究仍不够深入,粗糙度对目标极化特性的作用机理及其对极化目标识别的影响亟待分析。

二面角作为一种典型结构,其散射特性对太赫兹雷达目标探测与识别具有重要意义。因此,本文选定二面角作为研究对象,从太赫兹雷达图像上目标散射结构判别及轮廓完整性两方面探究粗糙度对目标极化特性的影响机理。

1 粗糙二面角建模及成像

太赫兹频段目标的极化特性与表面粗糙度密切相关。如图 1 所示,当二面角表面绝对光滑时,入射电磁波将在二面角 2 个平面上各反射 1 次,回波方向与原入射方向平行;而粗糙二面角的漫反射增强,镜面反射减弱,散射点增多,散射机制变得复杂,给极化目标识别带来困难。

对于粗糙二面角的建模,基于蒙特卡洛方法模拟生成高斯型随机粗糙面^[13]。即在频域用功率谱进行滤波,再进行快速逆傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)得到粗糙面的高度起伏。坐标系 XYZ 定义如图 2 所示,电磁波方向由 PO 确定,点 P' 为点 P 在平面 XOY 内的投影,电磁波入射方位角定义为 P'O 对应 X 轴顺时针旋转角度 φ ,入射俯仰角定义为 PO 与 Z 轴夹角 θ 。

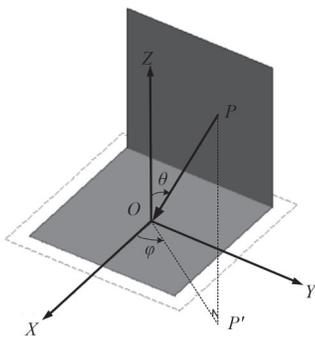


Fig.2 Coordinate system of dihedral angle model
图 2 二面角模型坐标系

电磁计算方法采用高频近似方法中的弹跳射线法,可实现电大尺寸复杂目标的高效仿真。为满足高分辨力成像要求并提高计算效率,采用极坐标格式算法(Polar Format Algorithm, PFA)进行二维成像。电磁仿真参数设置见表 1。全极化雷达图像如图 3 所示,交叉极化通道回波强度远小于同极化通道。由于二面角边缘的镜面散射分量减弱,其表面的散射效应相对增强,使观测目标轮廓与尺寸的观测更清晰,雷达图像对目标表面细微结构特征刻画得更完整。

2 粗糙度对目标散射结构判别影响分析

对单个粗糙样本进行 Pauli 分解。根据粗糙面散射理论及实际工程情况,复杂表面的粗糙程度可分为近光滑($0 \leq \delta \leq \lambda/32$)、微粗糙($\lambda/32 \leq \delta \leq \lambda/8$)、中粗糙($\lambda/8 \leq \delta \leq \lambda/4$)和高粗糙($\lambda/4 \leq \delta \leq \lambda/2$)^[14]。因此仿真分析 δ 为 0、 $\lambda/32$ 、 $\lambda/8$ 、 $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ 下的粗糙二面角的极化分解结果,为保持取值等间隔,加入 $\lambda/16$ 的粗糙度。图 4 为成像角度范围为 $\varphi = -6^\circ \sim 6^\circ$ 、角度采样间隔为 0.6° (表示为 $\varphi = -6^\circ:0.6^\circ:6^\circ$)时各粗糙度下的极化分解结果,图中蓝色表示单次散射,红色为二次散射,绿色为 $\pi/4$ 二次散射。

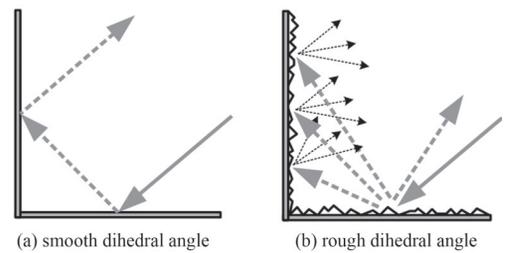


Fig.1 Schematic diagram of dihedral angular scattering mechanism
图 1 二面角散射机制示意图

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

parameter	value
root mean square δ of rough surface height fluctuation	$\lambda/32, \lambda/8, \lambda/4, \lambda/2$
dihedral angle dimension	10 cm \times 10 cm
scanning frequency/GHz	90:1:110
azimuth angle of incident electromagnetic wave $\varphi/(^\circ)$	-6:0.6:6
pitch angle of incident electromagnetic wave $\theta/(^\circ)$	45
range resolution/m	0.007 5
azimuth resolution/m	0.007 2

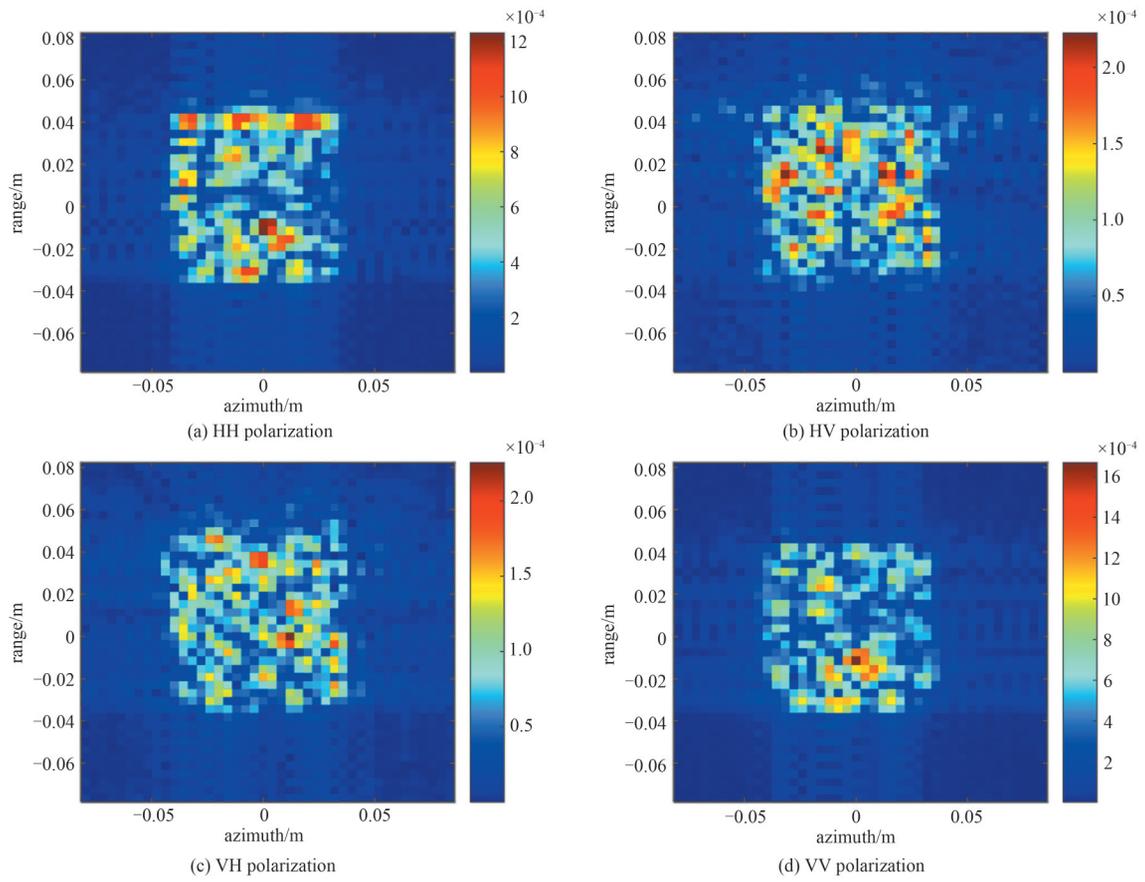


Fig.3 Simulation results of coarse dihedral angle fully polarized radar images($\delta=\lambda/8$)
图 3 粗糙二面角全极化雷达图像仿真结果($\delta=\lambda/8$)

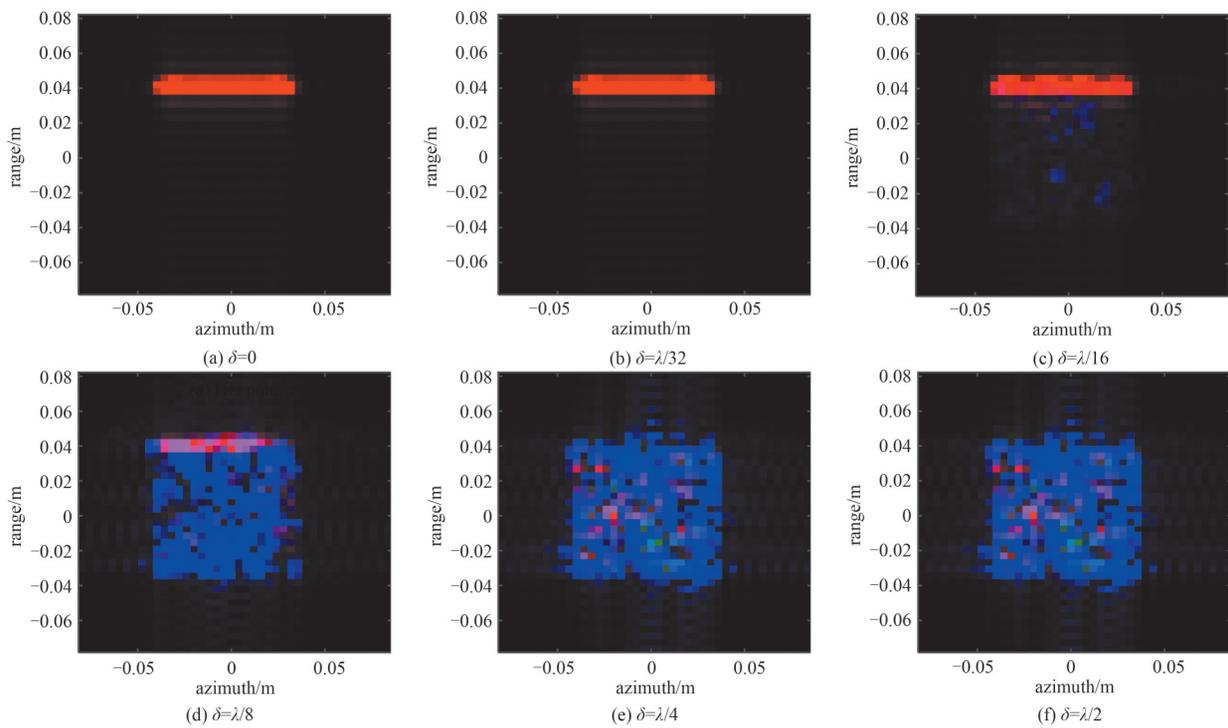


Fig.4 Pauli RGB pseudo-color map with different roughness dihedral angles
图 4 不同粗糙度二面角 Pauli RGB 伪彩图

从图 4 可以看出：

1) 当表面绝对光滑时，二面角上边缘处表现出二次散射机制。由于电磁波入射俯仰角为 45° ，因此上边缘位置的纵坐标为 $2^{-0.5} \times 0.05 \approx 0.035$ m。此时极化分解结果能够正确表征二面角的极化特性，可实现目标散射结构的正确判别。

2) 当表面达到微粗糙时，仍以二次散射为主导，粗糙度对散射机制判别的影响可忽略不计。

3) 随着粗糙度由微粗糙逐渐增大，目标表面细微粗糙结构对电磁波散射的影响变大，散射点数目急剧增加，二面角散射分量急剧下降，单次散射分量逐渐增多，基于目标变极化效应无法实现散射结构的有效判别。但目标轮廓形状逐渐清晰，可通过图像区域特征或矩特征实现目标区分与识别。由于目标表面粗糙由随机过程产生，因此目标轮廓内部的强散射点分布具有随机性，对于二维形状相似的不同目标，其表面散射强度分布是否具有差异性，仍有待进一步分析。

图 5 进一步表明，在一定的观测角度范围内，二面角散射机制的变化趋势类似，但一定粗糙度下各散射机制占比略有不同。当表面达到中粗糙后，奇次散射分量稍呈下降趋势，二次散射分量和 $\pi/4$ 二次散射分量稍上升。当粗糙度与波长相当时，粗糙表面将更多的目标信息调制到散射场中，增大了雷达图像与光学图像的相似度。

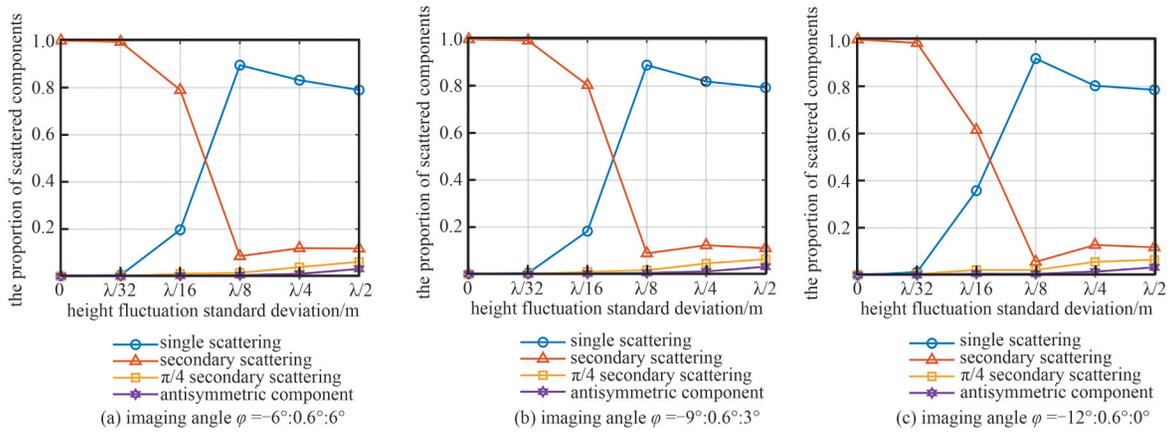


Fig.5 Analysis of the influence of roughness on dihedral angular scattering structure discrimination at different observation angles

图 5 不同观测角度下粗糙度对二面角散射结构判别的影响分析

3 粗糙度对目标轮廓完整性影响分析

由前文分析可知，随着粗糙度的增加，二面角非镜面反射区域在雷达图像中逐渐显现，本节针对粗糙度对雷达成像的目标轮廓完整性的影响进行研究。为实现对全极化雷达图像信息的有效利用，获取较完整的目标轮廓，首先采用极化滤波提高雷达图像对比度，即以雷达图像的对比度作为目标函数，寻找一组最优极化矢量提高图像质量^[15]，便于后续的轮廓完整性分析。仿真中 HH 通道信噪比设置为 0 dB，其他极化通道噪声强度与 HH 通道相同，其他参数同表 1，优化结果如图 6 所示。

接下来，获取目标参考完整轮廓。将目标点云数据向雷达成像平面进行投影得到理论目标轮廓，如图 7 所示；得到的参考图像如图 8 所示，方位向范围为 $[-0.042, 0.028]$ m，距离向范围为 $[-0.035, 0.035]$ m，对比图 6 可知，雷达图像显示了反映目标尺寸与形状的潜力。

截取雷达图像在参考目标轮廓内部的区域 S ，对各像素点强度进行阈值判断。阈值定义为该区域内像素强度最大值与某一常数系数 r 的乘积；目标轮廓完整性定义为雷达图像中，目标参考轮廓内部满足阈值条件的像素点数目与参考轮廓内总像素点数目之比：

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \varepsilon(i,j) \eta(i,j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \varepsilon(i,j)} \quad (1)$$

式中： $\varepsilon(i,j) = \begin{cases} 1, & (i,j) \in S \\ 0, & (i,j) \notin S \end{cases}$ ； $\eta(i,j) = \begin{cases} 1, & F(i,j) \geq r \times \max(F(i,j)) \\ 0, & \text{else} \end{cases}$ ； N 为雷达图像 F 方位向采样点数目； M 为距离向

采样点数目； S 为参考图像区域； $\max(\cdot)$ 表示取最大值。

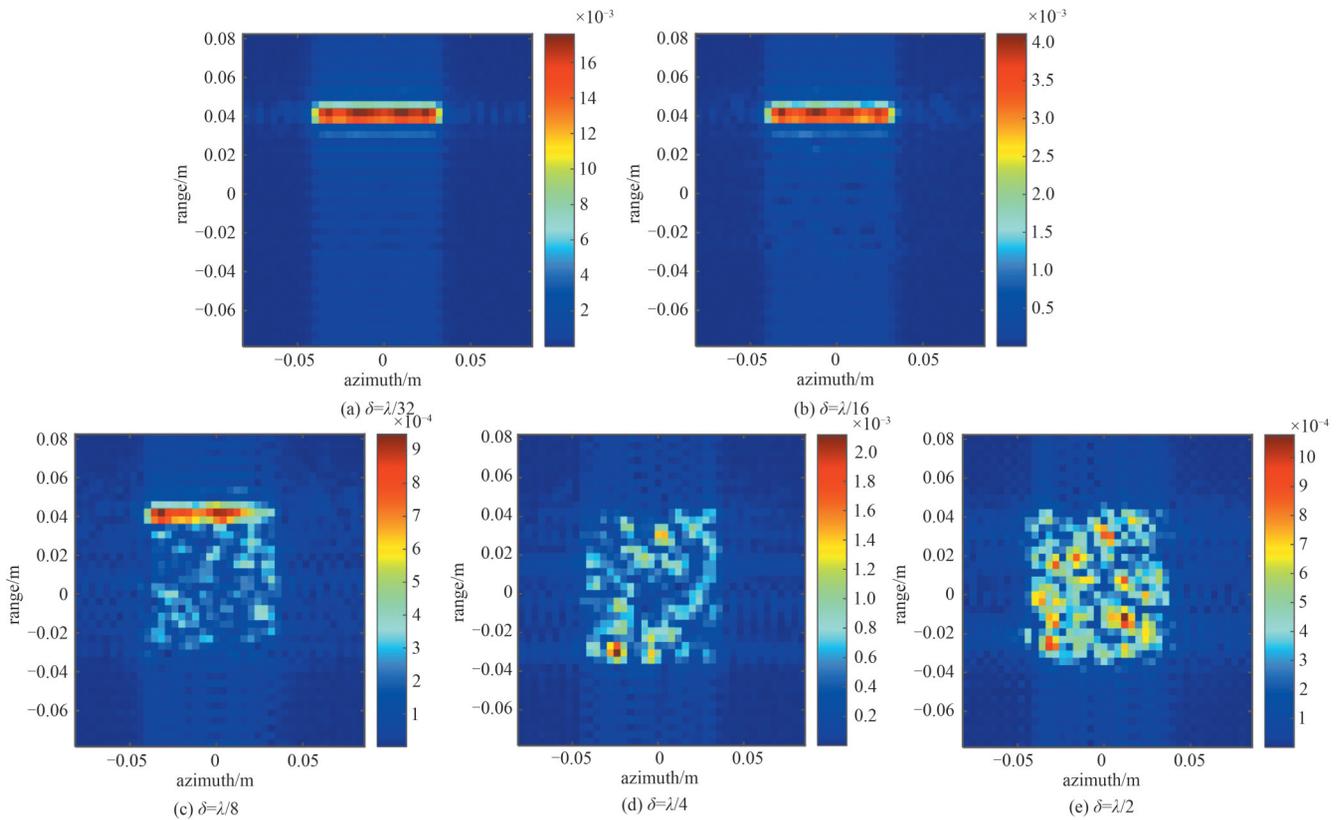


Fig.6 Image enhancement results
图6 图像增强结果

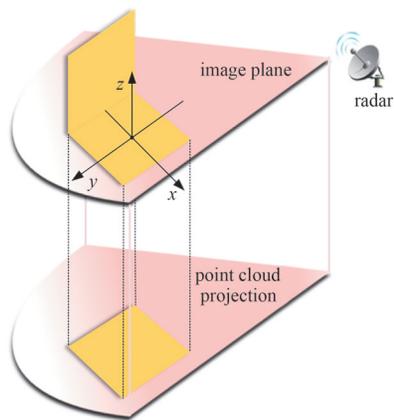


Fig.7 Diagram of dihedral corner point cloud projection
图7 二面角点云投影示意图

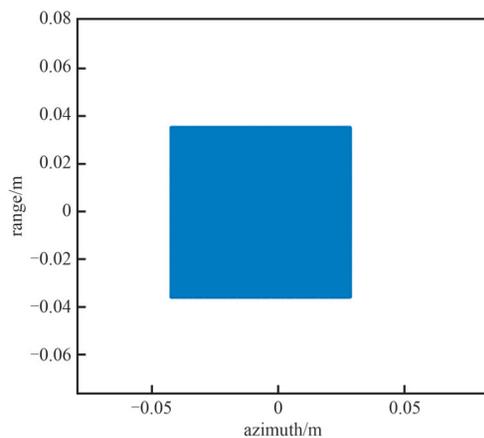


Fig.8 Reference image based on target projection
图8 基于目标投影的参考图像

仿真分析了 r 取值为 $0:0.1:1$ 时的目标轮廓完整性随粗糙度的变化，图 9 中给出了部分典型 r 值下的结果。在目标为近光滑和微粗糙时，镜面散射仍占主导地位，目标轮廓完整性较差。当常数系数 r 取值为 0.1 时，满足阈值条件的像素点数目较多，成像角度 $\varphi = -6^\circ:0.6^\circ:6^\circ$ 下，在目标表面达到中粗糙时，轮廓完整度已达到 0.8 。在仿真的 3 种成像角度条件下， $r=0.1$ ，粗糙度 $\delta = \lambda/8$ 时，目标轮廓完整性急剧增大。但对于常数系数 r 取值为 0.3 和 0.5 时，目标表面达到高粗糙，轮廓完整度仍在 0.6 以下，说明目标表面高度起伏产生的散射强度较低，阈值取值较大大会导致目标区域检测不完整，获得的检测结果无法作为目标二维投影的参考。

实际中，目标粗糙度为确定值，电磁波频率越高，同一粗糙度对目标 RCS 的影响越大。仿真中设置的频率为 100 GHz ，波长为 3 mm ，说明毫米量级的粗糙起伏已能够对目标后向散射产生影响，并反映在雷达图像中，基于图像特征可进一步实现目标尺寸、形状及粗糙程度的反演。

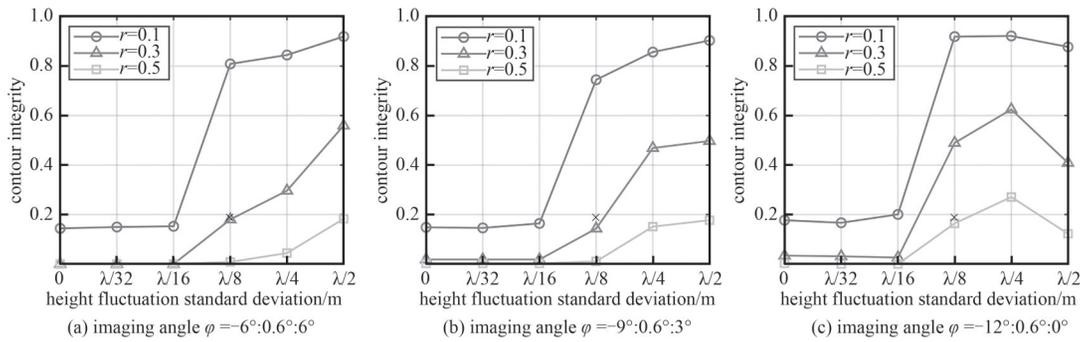


Fig.9 Analysis of influence of roughness on dihedral angular profile integrity

图9 粗糙度对二面角轮廓完整性影响分析

4 结论

本文基于太赫兹雷达成像结果分析了粗糙度对二面角散射结构判别及成像轮廓完整性的影响。仿真结果表明,粗糙度对目标极化散射特性影响显著;达到中粗糙后,二面角的单次散射分量占比已占主要地位,说明通过极化解译已无法有效识别目标;而随着粗糙度持续增加,目标轮廓更加完整,基于图像形状可采用光学解译方法,提取图像区域特征或矩特征进行目标识别。因此在太赫兹频段极化解译可能会出现失效的情况,将极化解译与光学解译结合是解决该问题的有效思路。

参考文献:

- [1] 王雪松. 瞬态极化雷达理论、技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2023. (WANG Xuesong. Theory, technology and application of transient polarization radar[M]. Beijing: National Defense University Press, 2023.)
- [2] 王雪松. 雷达极化技术研究现状与展望[J]. 雷达学报, 2016,5(2):119–131. (WANG Xuesong. Status and prospects of radar polarimetry techniques[J]. Journal of Radars, 2016,5(2):119–131.) DOI:10.12000/JR16039.
- [3] 赵春雷,王亚梁,阳云龙,等. 雷达极化信息获取及极化信号处理技术研究综述[J]. 雷达学报, 2016,5(6):620–638. (ZHAO Chunlei, WANG Yaliang, YANG Yunlong, et al. Review of radar polarization information acquisition and polarimetric signal processing techniques[J]. Journal of Radars, 2016,5(6):620–638.) DOI:10.12000/JR16092.
- [4] 王雪松,陈思伟. 合成孔径雷达极化成像解译识别技术的进展与展望[J]. 雷达学报, 2020,9(2):259–276. (WANG Xuesong, CHEN Siwei. Polarimetric synthetic aperture radar interpretation and recognition: advances and perspectives[J]. Journal of Radars, 2020,9(2):259–276.) DOI:10.12000/JR19109.
- [5] 王宏强,邓彬,秦玉亮. 太赫兹雷达技术[J]. 雷达学报, 2018,7(1):1–21. (WANG Hongqiang, DENG Bin, QIN Yuliang. Review of terahertz radar technology[J]. Journal of Radars, 2018,7(1):1–21.) DOI:10.12000/JR17107.
- [6] PANG Shuang, ZENG Yang, YANG Qi, et al. Study on terahertz RCS scaled measurements for metal plates of rough surfaces[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2021,42(7):813–827. DOI:10.1007/s10762-021-00813-7.
- [7] 江月松,聂梦瑶,张崇辉,等. 粗糙表面涂覆目标的太赫兹波散射特性研究[J]. 物理学报, 2015(2):1. (JIANG Yuesong, NIE Mengyao, ZHANG Chonghui, et al. Terahertz scattering property for the coated object of rough surface[J]. Acta Physica Sinica, 2015(2):1.) DOI:10.7498/aps.64.024101.
- [8] 杨洋. 太赫兹波在粗糙金属球体目标上的散射特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014(6):783–787. (YANG Yang. Scattering characteristics of THz wave on rough metal sphere target[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014(6):783–787.) DOI:10.11805/TKYDA201406.0783.
- [9] ZHANG Haifeng, LI Jiangting, BIAN Zheng, et al. Electromagnetic scattering characteristics of blunt cone aircraft under THz waves based on PO method[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022,50(9):3200–3209. DOI:10.1109/TPS.2022.3186729.
- [10] GAO Jingkun, WANG Ruijun, DENG Bin, et al. Electromagnetic scattering characteristics of rough PEC targets in the terahertz regime[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017(16):975–978. DOI:10.1109/LAWP.2016.2615641.
- [11] 高敬坤,邓彬,秦玉亮,等. THz全尺寸凸体粗糙目标雷达回波散射建模与成像仿真[J]. 雷达学报, 2018,7(1):97–107. (GAO Jingkun, DENG Bin, QIN Yuliang, et al. Radar echo scattering modeling and image simulations of full-scale convex rough targets at terahertz frequencies[J]. Journal of Radars, 2018,7(1):97–107.) DOI:10.12000/JR17086.
- [12] 高敬坤,王瑞君,邓彬,等. THz频段粗糙导体圆锥的极化成像特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):401–408. (GAO Jingkun, WANG Ruijun, DENG Bin, et al. Characteristics of polarized imaging of a conducting cone with surface roughness

- at terahertz frequencies[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):401–408.) DOI:10.11805/TKYDA201503.0401.
- [13] KIM H, JOHNSON J T. Radar images of rough surface scattering: comparison of numerical and analytical models[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002,50(2):94–100. DOI:10.1109/8.997977.
- [14] 董纯柱, 胡利平, 朱国庆, 等. 地面车辆目标高质量 SAR 图像快速仿真方法[J]. 雷达学报, 2015,4(3):351–360. (DONG Chunzhu, HU Liping, ZHU Guoqing, et al. Efficient simulation method for high quality SAR images of complex ground vehicles[J]. Journal of Radars, 2015,4(3):351–360.) DOI:10.12000/JR15057.
- [15] 孙挺, 程旭. 一种基于全极化回波的微多普勒增强算法[J]. 电子学报, 2017,45(9):2071–2076. (SUN Ting, CHENG Xu. A novel method of micro-Doppler signature enhancement based on full polarization echoes[J]. Acta Electronica Sinica, 2017,45(9):2071–2076.) DOI:10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.003.

作者简介:

郑雨晴(1998–), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹目标极化特性. email:zhengyuqing@nudt.edu.cn.

吴其华(1990–), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为雷达电子对抗.

郝晓军(1978–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为复杂电磁环境效应、雷达信号处理.

徐志明(1994–), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为双基地雷达目标特性与特征提取.

刘晓斌(1990–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达系统建模与仿真.

艾小锋(1983–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为双基地雷达成像、特征提取.

(上接第 481 页)

作者简介:

王忠钰(1995–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力通信系统建设与运维. email:1217968131@qq.com.

卢志鑫(1993–), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为移动通信、电力线载波通信.

吕国远(1978–), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统与信息系统管理.

刘乙召(1990–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力通信系统建设与运维.

李霜冰(1973–), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统规划设计及建设运维.

岳顺民(1966–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电网企业数字化转型.

韩雨阳(2000–), 女, 硕士, 主要研究方向为电力接入网动态路由规划.