

文章编号: 2095-4980(2015)03-0401-08

THz 频段粗糙导体圆锥的极化成像特性

高敬坤, 王瑞君, 邓彬, 黎湘, 王宏强

(国防科学技术大学 空间电子技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要: 太赫兹频段下粗糙导体表面会对电磁散射回波的幅度、相位、极化状态产生影响, 为分析这一影响, 以导体圆锥为例, 研究了不同粗糙参数表面电磁散射在雷达图像中的表现规律。基于谱方法和坐标变换对粗糙圆锥面进行建模, 利用高频电磁计算方法获得不同粗糙度导体圆锥样本多角度、多频点、全极化的单站散射场, 基于转台模型, 利用二重积分法获得目标二维像。从仿真结果可以看出, 粗糙与理想光滑导体的圆锥图像存在明显差异, 粗糙圆锥图像中能量分布偏离理想光滑情况下的强散射区域; 随着粗糙度的增加, 图像能量分布愈加均匀; 相比于同极化图像, 交叉极化图像更具反映目标轮廓信息的潜力。

关键词: 太赫兹; 粗糙导体圆锥; 交叉极化; 雷达成像

中图分类号: TN011

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201503.0401

Characteristics of polarized imaging of a conducting cone with surface roughness at terahertz frequencies

GAO Jingkun, WANG Ruijun, DENG Bin, LI Xiang, WANG Hongqiang

(Institution of Space Electronic Technology, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: The rough surface of targets can cause complex impact on the amplitude, phase, polarization of the scattered fields at THz frequencies. For weighting and describing surface roughness effects, a Perfect Electric Conductor(PEC) cone is taken as an example to illustrate the characteristics of the scattered fields of rough surface in radar imaging. The model of rough cone surface is obtained based on the spectral method. Multi-angle, multi-frequency, full polarized monostatic scattered fields are obtained by utilizing the high frequency methods of computational electromagnetics. Then the targets images are obtained by using the duplicate integral method according to the rotation model. Obvious differences between rough and ideal smooth cone can be found from the reconstruction images. The simulation results show that as the roughness degree increases, the energy distribution of rough cone images departs from those highlighting regions in smooth cone images; and the cross-polarized images have better potential of describing the target profile comparing to the like-polarized images.

Key words: Terahertz; rough surface Perfect Electric Conductor cone; cross-polarization; radar imaging

太赫兹频段的特殊性, 一方面使太赫兹技术在成像应用方面具有巨大潜力与优势^[1-2]; 另一方面, 目标太赫兹频段特殊的电磁散射特性^[3-6]使目标太赫兹图像与微波频段雷达图像特征有显著差异^[7-8]。随着频段的升高, 目标表面在微波频段下的理想光滑假设不再适用。表面粗糙成为影响目标太赫兹电磁散射特性的重要因素。

关于粗糙表面对雷达图像的影响, 已有学者开展了相关研究, 文献[9]详细研究了一维粗糙面在雷达图像中的特点和规律; 文献[10-12]研究了粗糙海面在合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像中的表现规律, 并利用了极化信息。以上研究都是以粗糙面作背景, 而不是以具有一定形状的目标粗糙面为研究对象。针对太赫兹频段目标表面粗糙对雷达图像的影响, 2011年, 美国麻萨诸塞州立大学亚毫米波技术实验室研究了不同粗糙度表面与不同细微结构金属圆柱对太赫兹雷达图像的影响^[7], 2013年, 王瑞君等^[8]利用数值仿真手段, 研究了金属圆柱的周期粗糙表面在太赫兹图像中的表现规律。上述研究都表明目标粗糙表面对雷达图像有显著影响, 且对粗

收稿日期: 2014-10-25; 修回日期: 2014-12-13

糙表面在雷达图像中的表现规律进行了有益探索,然而现有研究仍不够深入,针对太赫兹频段目标粗糙表面在交叉极化图像中的表现规律研究尚未开展。针对现有研究的不足,本文采用数值仿真手段,以导体圆锥为例,采用高频计算方法对不同粗糙度导体圆锥进行散射计算,利用多角度、多频点、全极化的单站散射数据获得目标二维图像,探究不同粗糙度目标在不同极化状态下所获图像中的特征规律。

1 理论分析

假设平面波照射到散射体上,惠更斯原理表明,散射体外任一点处的场可由包围散射体的闭曲面上切向场唯一表示,在远场条件下,散射场可表示为^[13]:

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = \frac{ik_0 \exp(ik_0 R_0)}{4\pi R_0} \hat{k}_s \times \int_S (\hat{n} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) - \eta_0 \hat{k}_s \times (\hat{n} \times \mathbf{H}(\mathbf{r}))) \cdot \exp(-ik_0(\hat{k}_s - \hat{k}_i) \cdot \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (1)$$

式中: R_0 为散射体上参考点到观察点的距离; k_0, η_0 分别为波传播空间的波数、波阻抗; \hat{k}_i, \hat{k}_s 分别为入射与散射电磁场的传播方向。通常使闭曲面 S 恰好包围散射体,以利用边界条件简化切向电磁场的求取。对于理想导体体,表面切向电场为零,故上式可简化为:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = & \frac{-ik_0 \exp(ik_0 R_0)}{4\pi R_0} \eta_0 \hat{k}_s \times \hat{k}_s \times \int_S (\hat{n} \times \mathbf{H}(\mathbf{r})) \cdot \exp(-ik_0(\hat{k}_s - \hat{k}_i) \cdot \mathbf{r}') d\mathbf{r}' = \\ & \frac{-ik_0 \exp(ik_0 R_0)}{4\pi R_0} \eta_0 \int_S (\hat{h}_s \hat{h}_s + \hat{v}_s \hat{v}_s) \cdot (\hat{n} \times \mathbf{H}(\mathbf{r})) \cdot \exp(-ik_0(\hat{k}_s - \hat{k}_i) \cdot \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\hat{h}_s \hat{h}_s + \hat{v}_s \hat{v}_s$ 为并矢。由于 $\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^i(\mathbf{r}) + \mathbf{H}^s(\mathbf{r})$, 故式(2)等号左右都包含了未知的散射场,无法直接求解,在高频假设下,通常使用近似方法进行求解,如:物理光学法(Physical Optics, PO)、几何光学法(Geometrical Optics, GO)、弹跳射线法(Shooting and Bouncing Ray, SBR)等。

假设雷达以单站方式工作,且只接受单一极化方向的电磁波,则式(2)由矢量方程退化为标量方程,进一步假设雷达与目标相对运动满足转台模型,此时式(2)中的曲面积分退化为转台平面上的二重积分,则式(2)可简化为:

$$\mathbf{E}^s \frac{\exp(ik_0 R_0)}{R_0} = G(K, \theta) = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} g(x, y) \cdot \exp(-iK(x \cos \theta + y \sin \theta)) dx dy \quad (3)$$

式中: $G(K, \theta)$ 为目标的频域回波; $g(x, y)$ 代表雷达图像; $K = 2k_0$ 为双程波数; θ 为目标坐标系下的观测角。根据积分相似逆变换,可写出重构目标图像的二重积分公式:

$$g(x, y) = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{K_{\min}}^{K_{\max}} G(K, \theta) \cdot |K| \exp(iK(x \cos \theta + y \sin \theta)) dK d\theta \quad (4)$$

至此,已从理论上获得了目标的散射场,并根据散射场得到了转台模型下的频域雷达回波信号。由上面分析可看出,一般情况下,目标散射场中包含了 \hat{h}_s, \hat{v}_s 2 个极化方向的散射信息,而在以往研究粗糙目标散射特性时,往往只使用了某一极化方向上的信息,却并未利用另一方向上的信息,此时获得的雷达图像只包含了目标散射场中某一极化域的信息,这对于目标信息获取无疑是一种损失。

2 几何建模、散射计算与成像方法

在几何建模方面,粗糙圆锥的建模思路是:首先利用高斯分布随机粗糙面的谱方法建立二维粗糙平面,然后利用坐标变换得到粗糙圆锥面。依据粗糙面理论,二维高斯粗糙面^[9]对应的功率谱密度为:

$$S(k_x, k_y) = \delta^2 \frac{l_x l_y}{4\pi} \exp\left(-\frac{k_x^2 l_x^2 + k_y^2 l_y^2}{4}\right) \quad (5)$$

式中: l_x, l_y 分别为 x, y 向的相关长度; δ 为高度起伏均方根; k_x, k_y 分别为 x, y 方向波数。取功率谱密度的平方根,得到二维粗糙面的幅频关系,加入 $(0, 2\pi)$

平均分布的随机相位,得到二维粗糙面频谱,最后通过二维逆傅里叶变换,获得符合设定参数的粗糙平面。令 $z(x, y)$ 表示获得的二维高斯粗糙平面,为得到如图 1 所示的锥面,做如下定义:圆锥母线长 R , 底面半径 r , 锥面表面单位法矢 \hat{n} , 方位角 ϕ , 比例因子 $a \in (0, 1)$ 。则粗糙锥面可表示为:

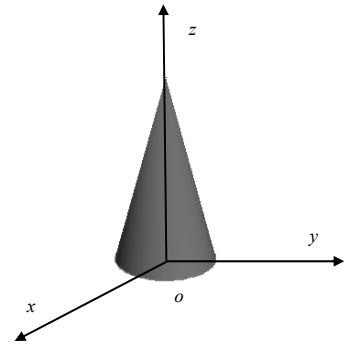


Fig.1 Target coordinate system diagram
图 1 目标坐标系示意图

$$\begin{cases} x(a,\theta) = (ar + z'(a,\theta)\hat{n}(\theta)(\hat{x}\cos\theta + \hat{y}\sin\theta))\cos\theta \\ y(a,\theta) = (ar + z'(a,\theta)\hat{n}(\theta)(\hat{x}\cos\theta + \hat{y}\sin\theta))\sin\theta \\ z(a,\theta) = (1-a)\sqrt{R^2 - r^2} + z'(a,\theta)\hat{n}(\theta)\hat{z} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $z'(a,\theta)=z(x,y)$ ； $x=aR\cos(\theta/R)$ ； $y=aR\sin(\theta/R)$ 。可见，给定 $R,r,z(x,y)$ 后，粗糙锥面由参数 θ,a 描述。

散射计算采取基于 SBR 的高频近似算法。SBR 是对复杂形体进行散射计算的一种有效手段，射线追踪亦是对电磁波散射机理的一种直观又深刻的描绘。本文数值实验的全极化散射数据利用 CST 软件中的渐近求解器(A 求解器)计算获得，CST 软件操作界面如图 2 所示，A 求解器基于 SBR 方法，同时考虑了边缘绕射效应，适用于本文中电大尺寸的电磁计算。

在成像算法方面，为了尽量准确地体现粗糙表面对目标图像的影响，避免由近似成像算法带来的图像畸变，直接利用式(4)进行二重积分成像。

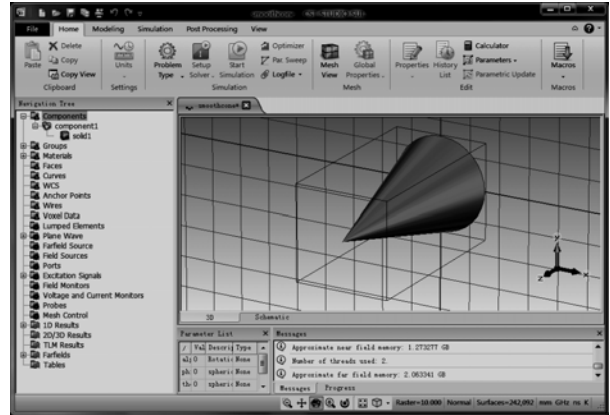


Fig.2 CST user interface
图 2 CST 操作界面

3 仿真结果与分析

本文所建立的圆锥模型母线长为 6 cm，底面半径为 1.5 cm。仿真设置的中心频率为 300 GHz，对应波长为 1 mm，其他仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置
Table 1 Parameters configuration

bandwidth/GHz	angle range/(°)	incident angle(θ,ϕ)= $(-3^\circ\sim 3^\circ,0^\circ)$		incident angle(θ,ϕ)= $(72.5^\circ\sim 78.5^\circ,0^\circ)$	
		frequency sampling interval/GHz	angle sampling interval/(°)	frequency sampling interval/GHz	angle sampling interval/(°)
40	6	1.6 GHz	0.4	2.0	0.3
range resolution/mm	azimuth resolution/mm	range aliasing limit/mm	azimuth aliasing limit/mm	range aliasing limit/mm	azimuth aliasing limit/mm
3.7	4.8	93.7	71.6	75.0	95.5

3.1 理想光滑导体圆锥成像

由图 3、图 4 可以看出，在理想光滑假设下，太赫兹频段的导体圆锥图像仍然表现为简单点与线的组合，相比于微波雷达图像，除了分辨率的优势并无更多的特征。当入射角为 $(\theta,\phi)=(-3^\circ\sim 3^\circ,0^\circ)$ 时，HH 图像表现为圆锥底面处的线段，这反映了锥底的边缘散射效应，HV 极化无法成像，说明此时锥体散射不存在去极化效应；当入射角为 $(\theta,\phi)=(72.5^\circ\sim 78.5^\circ,0^\circ)$ 时，HH 图像表现为一条明暗渐变的线段，反映了锥体侧面镜面反射强度的渐变，HV 极化同样无法成像，说明散射场中不包含 HV 分量。

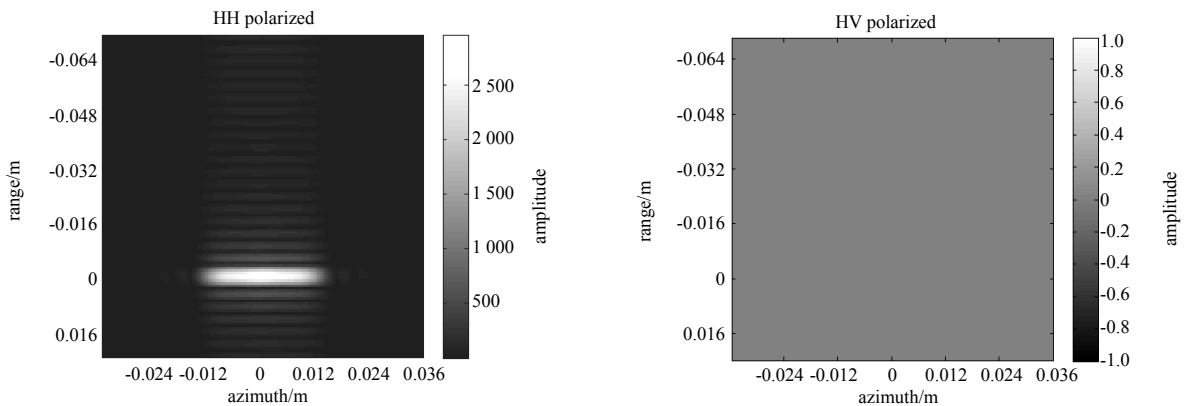


Fig.3 Incident angle $(\theta,\phi)=(-3^\circ\sim 3^\circ,0^\circ)$
图 3 入射角 $(\theta,\phi)=(-3^\circ\sim 3^\circ,0^\circ)$

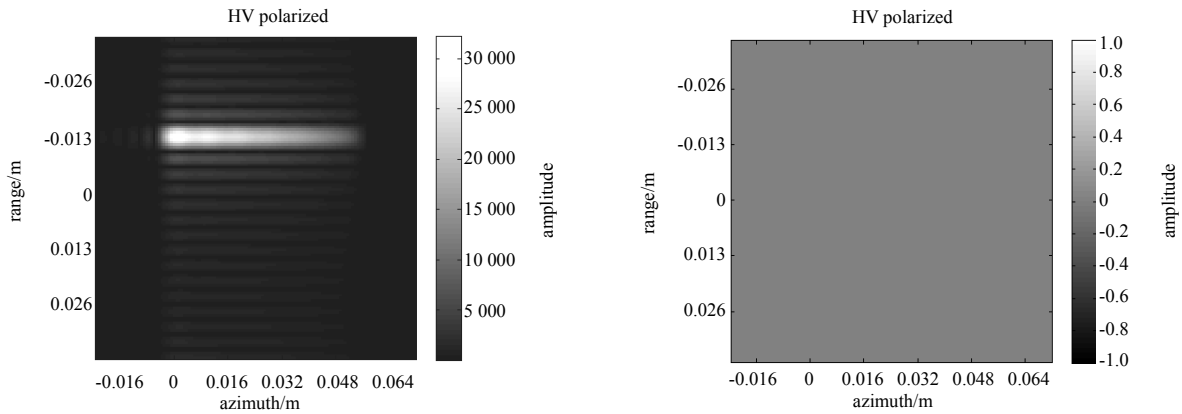


Fig.4 Incident angle $(\theta, \varphi) = (72.5^\circ \sim 78.5^\circ, 0^\circ)$
图 4 入射角 $(\theta, \varphi) = (72.5^\circ \sim 78.5^\circ, 0^\circ)$

3.2 不同粗糙度导体圆锥成像

当入射角为 $(\theta, \varphi) = (-3^\circ \sim 3^\circ, 0^\circ)$ 时, 由图 5 看出, 在粗糙度为 $\lambda/80$ 时, HH 图像与光滑情况相差不明显, 仍表现为锥底部较强的一条线段, 随着粗糙度的增加, 锥侧面逐渐显现出一些亮斑, 当粗糙度达到 $\lambda/10$ 时, 底部亮线的明暗不均匀, 同时锥侧面有明显可见的亮斑; 由图 6 看出, 当粗糙度为 $\lambda/80$ 时, 锥体散射中已存在一定的去极化效应, 随着粗糙度的增加, 锥体侧面有越来越多的亮斑显现, 交叉极化图像中并不存在同极化图像中稳定的较强的散射成分(如锥底面边缘的绕射效应)。

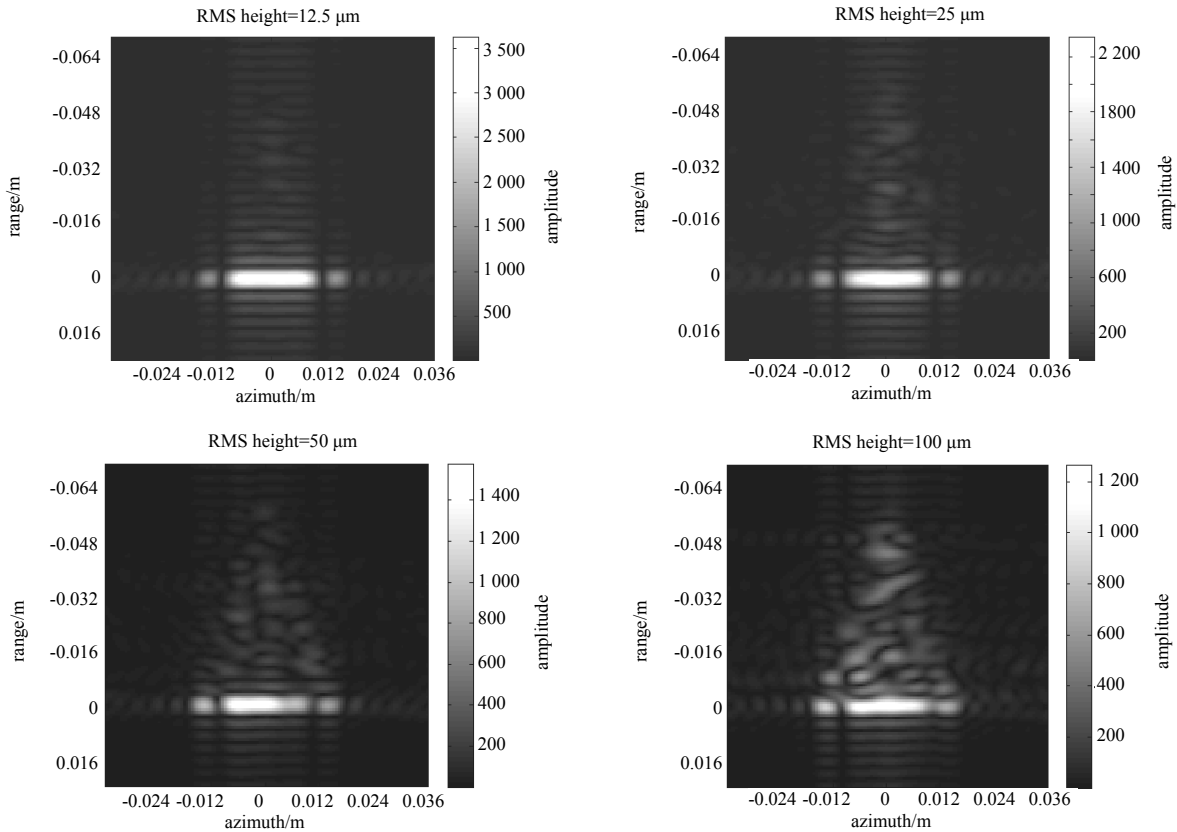


Fig.5 Incident angle HH polarized $(\theta, \varphi) = (-3^\circ \sim 3^\circ, 0^\circ)$
图 5 入射角 HH 极化 $(\theta, \varphi) = (-3^\circ \sim 3^\circ, 0^\circ)$

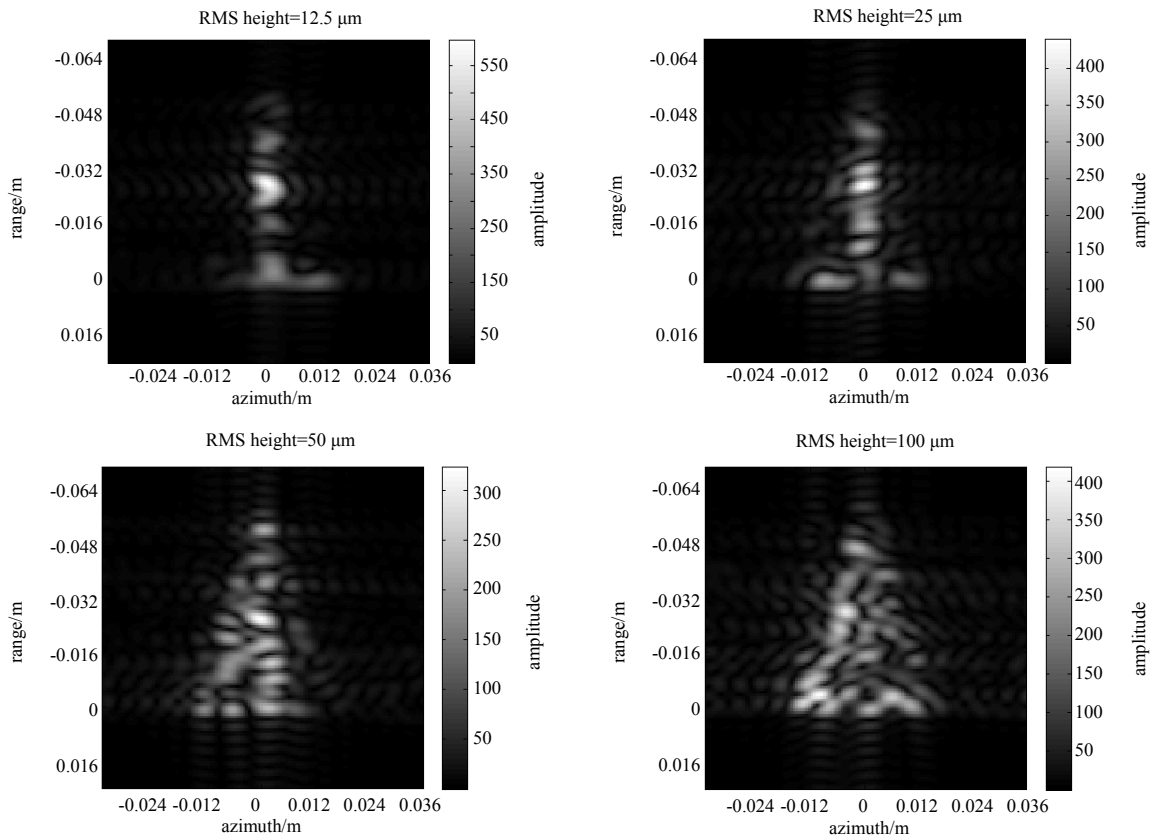


Fig.6 Incident angle $(\theta, \phi) = (-3^\circ \sim 3^\circ, 0^\circ)$ HV polarized

图 6 入射角 $(\theta, \phi) = (-3^\circ \sim 3^\circ, 0^\circ)$ HV 极化

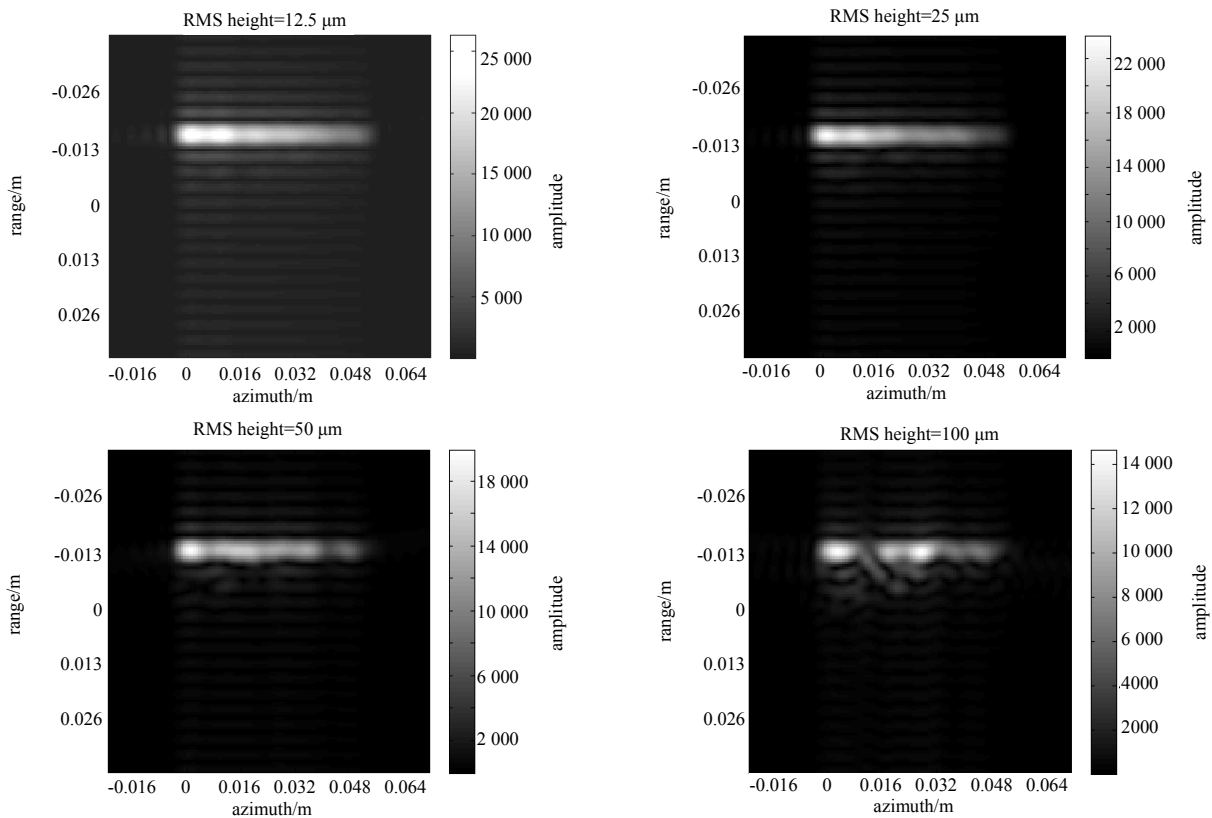


Fig.7 Incident angle $(\theta, \phi) = (72.5^\circ \sim 78.5^\circ, 0^\circ)$ HH polarized

图 7 入射角 $(\theta, \phi) = (72.5^\circ \sim 78.5^\circ, 0^\circ)$ HH 极化

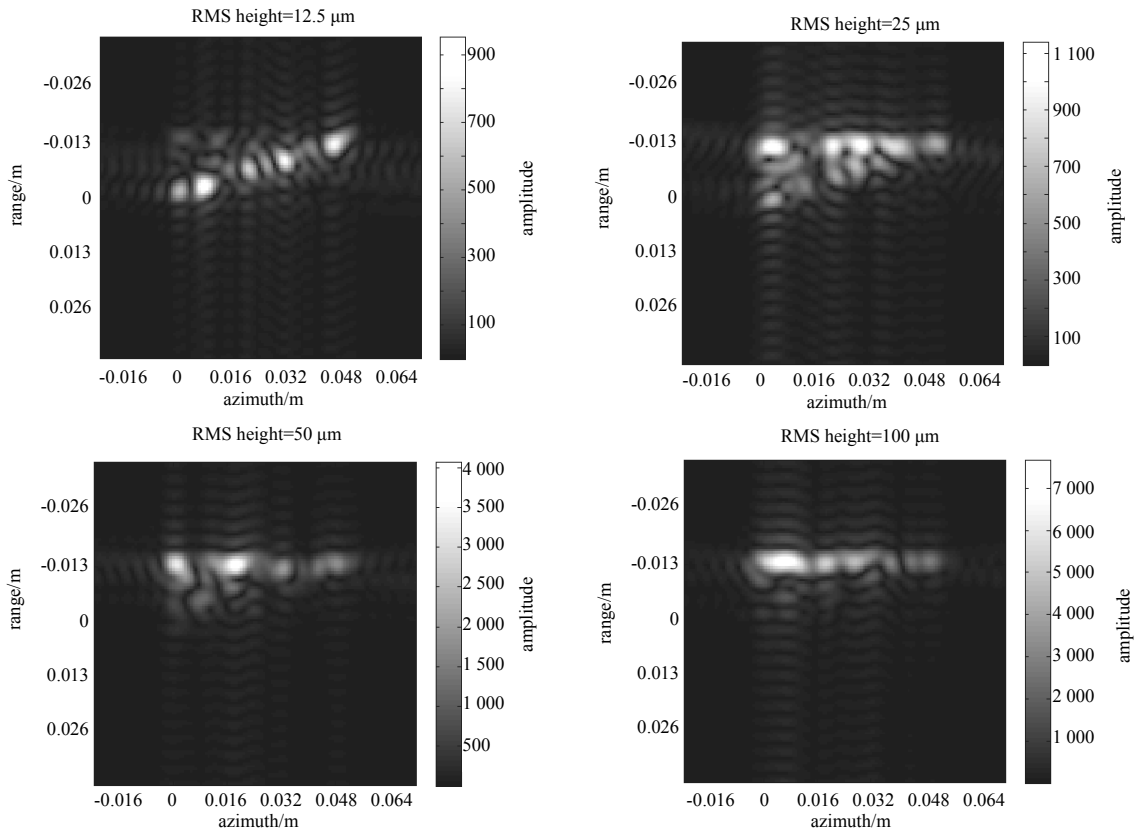


Fig.8 Incident angle $(\theta, \phi) = (72.5^\circ \sim 78.5^\circ, 0^\circ)$ HV polarized

图 8 入射角 $(\theta, \phi) = (72.5^\circ \sim 78.5^\circ, 0^\circ)$ HV 极化

当入射角为 $(\theta, \phi) = (72.5^\circ \sim 78.5^\circ, 0^\circ)$ 时, 由图 7 看出, 在粗糙度为 $\lambda/80$ 时, HH 图像与光滑情况相差不明显, 仍表现为锥侧面镜面反射处较强的一条线段, 随着粗糙度的增加, 非镜面反射的区域逐渐开始有亮斑显示, 但镜面反射仍占主导地位; 粗糙度达到 $\lambda/10$ 时, 侧面的非镜像区域有亮斑显示, 已能明显观察到表面粗糙对图像的影响。由图 8 看出, 当粗糙度为 $\lambda/80$ 时, HV 图像并未表现为镜面反射处的一条明亮线段, 亮斑更多分布在整个锥体的侧面, 而非镜面方向。

需要说明的是, 仿真实验中使用的模型是一定统计意义粗糙度参数下的单个样本, 所得结果存在一定的随机性, 但粗糙参数变化对图像的影响仍能从中反映出来。

3.3 结果分析

依据式(3), 假定入射电场的幅度为 1, 可将目标的雷达散射截面(Radar Cross-Section, RCS)表示为 $RCS = 4\pi |G(K, \theta)|^2$ 。在上一节的仿真中, 依据转台模型, 仿真获得了目标一定转角与带宽的二维回波数据, 将所有数据点对应 RCS 的平均值作为定量分析散射场强度的依据, 结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出, 在 2 种入射角下 HH 极化回波强度都高于 HV 极化, 且随着粗糙度的增加, HH 强度都有下降趋势, HV 强度都有上升趋势。图 9(a)中的 2 条曲线并不具有严格的单调性, HH 极化下, 粗糙均方根高度为 $100 \mu\text{m}$ 时, 散射强度较均方根高度为 $80 \mu\text{m}$ 时反而略微上升, 粗糙均方根高度为 $12.5 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ 时, HV 极化强度略有下降。这主要由以下原因造成: 一方面, 在图 9(a)中入射角下, 锥体的散射包含了边缘散射、面散射等多种因素, 由图 5 可以看出, 随着粗糙度增加, 边缘绕射分量降低而面散射分量增强, 两方面因素共同作用是造成其变化趋势不单调的原因之一; 另一方面, 由于仿真所用的粗糙锥模型具有一定的随机性, 导致仿真结果有一定波动性。

由仿真结果及上面的分析发现, 粗糙导体圆锥的 HH 极化图像仍然保留有光滑情况下图像的特点(如锥底面边缘绕射和镜面反射使图像中出现的明亮线段), 随着粗糙度的增加, 锥体其他区域(锥体侧面和非镜面反射区域)对散射的贡献亦逐渐增加, 边缘与镜面点的贡献逐渐减弱, 从而使总的 HH 极化散射能量也逐渐减弱。粗糙导体圆锥的 HV 极化图像中, 并没有 HH 图像中存在的稳定的强散射区域, 图像的能量并未集中于边缘或镜面反射点

等强散射区域,而是随机分布于整个锥体的几何范围内。结合式(2)和 SBR 的计算方法,可以对 HV 图像表现出的特点作如下解释:对于粗糙导体圆锥,使用 PO 或 GO 方法都无法获得交叉极化分量,数学上可解释为其忽略了二阶及二阶以上的散射场,物理上可解释为其忽略了二次及以上的多次散射场,SBR 算法考虑了多次散射,因此具全极化的散射场计算能力。HV 图像对应于 HV 散射场,体现了物体表面的多次散射,由图 9 可知,在粗糙度为零时,导体圆锥的 HV 散射场为零,镜面反射点或非连续的底面边缘等区域对 HV 分量并无贡献,因此, HV 散射场的能量来源于面散射, HV 图像中能量更多分布于整个目标的几何区域,而不是集中于孤立的非连续区域或镜面反射点,从而更具反映目标轮廓信息的潜力。

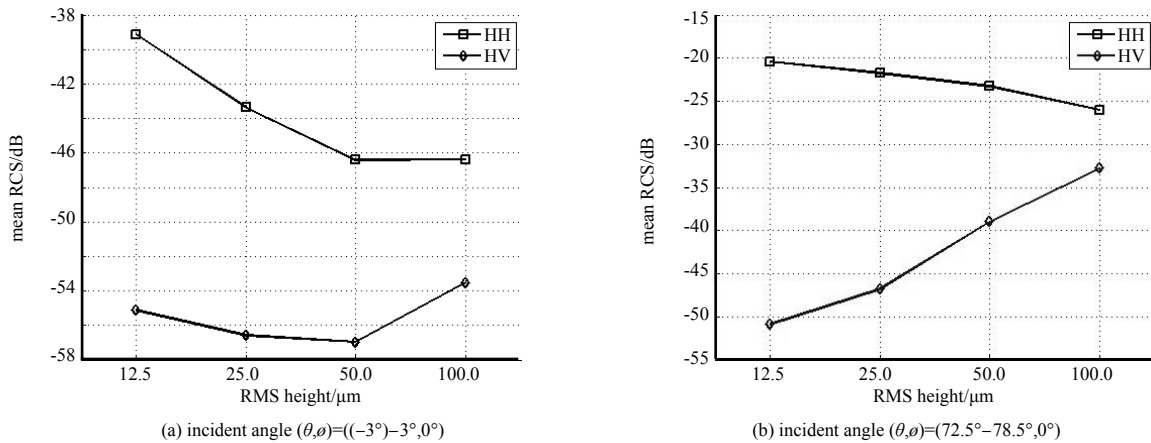


Fig.9 Mean RCS vs. RMS height
图9 目标平均 RCS 随粗糙度变化趋势

4 结论

本文基于高频电磁计算方法,对不同粗糙度的导体圆锥进行全极化电磁散射计算,利用仿真数据对目标进行二维成像。从仿真结果可以看出,粗糙起伏均方根高度在 $12.5 \mu\text{m}(\lambda/80)$ 时,目标图像与理想光滑目标图像间已存在明显差异;粗糙起伏均方根高度达到 $100 \mu\text{m}(\lambda/10)$ 时,所得图像已不再表现为少数散射中心,图像能量向整个目标几何区域扩散,且已能体现一定的目标轮廓信息。综上所述,初步得出以下结论:随着粗糙度的增加,目标图像不再表现为散射中心的组合,图像能量向整个目标几何区域扩散;相比于同极化图像,交叉极化图像更具反映目标轮廓信息的潜力。

参考文献:

- [1] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Technology, 2002,50(3):910-928.
- [2] 刘盛纲,钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009,38(5):481-486. (LIU Shenggang, ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and it's applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009,38(5):481-486.)
- [3] 蒋彦雯,邓彬,王宏强,等. 基于时域光谱系统的太赫兹圆柱 RCS 测量[J]. 红外与激光工程, 2014,43(7):2223-2227. (JIANG Yanwen, DENG Bin, WANG Hongqiang, et al. RCS measurement of cylinders in terahertz band based on the time-domain spectroscopy system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014,43(7):2223-2227.)
- [4] McGowan R W, Cheville R A, Grischkowsky D R. Experimental study of the surface waves on a dielectric cylinder via terahertz impulse radar ranging[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory & Technology, 2000,48(3):417-418.
- [5] Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements[J]. Optics Express, 2010,18(25):26399-26408.
- [6] Gente R, Jansen C, Geise R, et al. Scaled bistatic radar cross section measurements of aircraft with a fiber-coupled THz time-domain spectrometer[J]. IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology, 2012,2(4):424-431.
- [7] Jagannathana A, Gatesmana A J, Horgana T, et al. Effect of periodic roughness and surface defects on the terahertz scattering behavior of cylindrical objects[C]// Proc of SPIE. Orlando, Florida: International Society for Optics and Photonics, 2010: 76710E.

- [8] 王瑞君,邓彬,王宏强,等. 不同表面结构特征圆柱导体的太赫兹散射特性[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(6):1549-1554. (WANG Ruijun,DENG Bin,WANG Hongqiang,et al. Scattering characteristics for cylindrical conductor with different surface micro-structure in terahertz regime[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6):1549-1554.)
- [9] Kim Hyunjun,Johnson J T. Radar images of rough surface scattering comparison of numerical and analytical models[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2002,50(2):94-100.
- [10] HE Y,SHEN H,Perrie W. Remote sensing of ocean waves by polarimetric SAR[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2006,23(12):1768-1773.
- [11] ZHANG B,Perrie W,HE Y. Validation of RADARSAT-2 fully polarimetric SAR measurements of ocean surface waves[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans(1978-2012), 2010,115,C06031, doi:10.1029/2009JC005887.
- [12] ZHANG B,Perrie W,Vachon P W,et al. Ocean vector winds retrieval from C-band fully polarimetric SAR measurements[J]. IEEE Trans. on Geosci Remote Sens, 2012,50(11):4252-4261.
- [13] 郭立新,王蕊,吴振森. 随机粗糙面散射的基本理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2010. (GUO Lixin,WANG Rui,WU Zhensen. The Basic Theory and Method of Random Rough Surface Scattering[M]. Beijing:Science Press, 2010.)

作者简介:



高敬坤(1992-),男,山东省梁山县人,在读硕士研究生,主要研究方向为目标特性与雷达信号处理.email:oscar923@aliyun.com.

王瑞君(1986-),男,内蒙古自治区凉城县人,在读博士研究生,主要研究方向为目标特性与雷达信号处理.

邓彬(1981-),男,山东省济宁市人,讲师,主要研究方向为雷达信号处理与微动目标指示.

黎湘(1967-),男,湖南省湘潭市人,教授,博士生导师,主要研究方向为雷达信号处理与目标识别.

王宏强(1970-),男,陕西省宝鸡市人,研究员,博士生导师,主要研究方向为雷达信号处理.

(上接第 360 页)

Biography:



Ata Khalid(1964-), received his PhD from Kings College London in electronic device engineering in 2000. He worked several years in Kings to develop MMIC design and fabrication processes, development of HBTs and HEMTs. In 2004 he moved to school of engineering at University of Glasgow to develop solid state THz radiation source technology based on planar Gunn diodes. He is member of IEEE and Institute of Physics(IOP). email:ata.khalid@glasgow.ac.uk.

LI Chong(1979-), received M.Sc. (distinction) at Manchester University in 2007 and Ph.D. at Glasgow University in 2011. His PhD was about development of millimeter-wave sources and circuits. Since August 2011, Chong has been working at Glasgow University as a post-doc in the fields of terahertz imaging and detector technology. He joined National Physical Laboratory in January 2014 and his current research activities include antenna metrology and wireless sensor networks.

Lai Bun Lok(1974-), is a research associate in department of Electronic & Electrical Engineering in the faculty of Engineering Science, University College London.

David R S Cumming(B.Eng. Glasgow, Ph.D. Cambridge) is the Professor of Electronic Systems at Glasgow University where he is the Research Dean and leads the Microsystem Technology group. He works on sensor systems and technologies for biomedical and imaging. He is a founder Mode Diagnostics and worked for Ion Torrent that commercialized his CMOS sensor technology for use in gene sequencing. He is FRSE, FIEEE and FIET, and holds a Royal Society Wolfson Merit Award.