

文章编号: 2095-4980(2017)06-0903-06

一种太赫兹频段粗糙凸体目标散射计算方法

王瑞君^{1,2}, 高敬坤¹, 邓彬¹, 秦玉亮¹, 王宏强¹

(1.国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2.空军试验训练基地三区, 甘肃 张掖 734100)

摘要: 太赫兹频段下目标散射特性计算需考虑目标表面的粗糙特性和目标材料参数。在对粗糙目标几何建模时, 通常的精细面元剖分建模方法使得散射计算问题难以求解。提出确定性建模与统计性建模相结合的粗糙目标几何建模方法, 并且基于全波法提出了一种太赫兹频段可计算任意材料、任意粗糙凸体目标散射场的计算方法。通过与通用电磁计算软件计算结果的比较验证了该方法的准确性。

关键词: 太赫兹; 散射计算; 全波法; 粗糙表面; 雷达成像

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201706.0903

Scattering computation of rough convex targets at terahertz frequencies based on full-wave method

WANG Ruijun^{1,2}, GAO Jingkun¹, DENG Bin¹, QIN Yuliang¹, WANG Hongqiang¹

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

2.The 3rd District, Air Base of Test and Training, Zhangye Gansu 734100, China)

Abstract: The influences of materials properties and surface roughness on the scattering computation of targets are considered at terahertz frequencies. For the geometric modeling of rough targets, the conventional fine facets splitting strategy will generate a large number of facets, making the solving of scattering calculation unaffordable. An efficient method combining deterministic modeling and statistical modeling is proposed. Then method based on Full-Wave Approach(FWA) for the scattering computation of arbitrary rough convex targets is realized at terahertz frequencies. The proposed scattering prediction method is verified by the simulations of standard targets comparing with the results of commercial electromagnetic computational software(FEKO).

Keywords: terahertz; scattering computation; Full-Wave Approach; rough targets; radar imaging

在太赫兹频段, 实际目标的表面细微粗糙结构对散射特性将会产生重要影响^[1-2]。但在对粗糙目标进行建模计算时, 如果按照微波领域方法进行传统的光滑面元剖分, 则面元数目极多, 计算量巨大而难以实现; 如果按照光学领域统计计算方法, 则会丢失电磁波的矢量特性和相干特性, 为开展目标的成像特性分析带来困难^[3]。雷达成像是分析目标散射特性、获取目标散射特征的重要手段^[4]。因此在理论上需要提出一种可对太赫兹频段粗糙目标进行散射特性建模与计算的方法, 进而可仿真获得太赫兹频段粗糙目标的高分辨力图像。本文从粗糙凸体目标的建模方法和粗糙面散射计算方法两方面研究太赫兹频段粗糙凸体目标的散射特性计算问题, 最终获得目标的散射场数据, 并利用粗糙目标对所提方法进行仿真和验证。

1 建模与计算

1.1 几何建模与面元剖分

目标的几何建模方式和数值模型形式决定了电磁计算的方法和效率。对于太赫兹频段粗糙电大尺寸目标, 本文提出基于面元法的粗糙面目标几何建模方法。首先利用面元剖分方法对实际目标进行建模, 剖分的面片大小应满足以下准则: 相对于波长来说, 剖分的面片尺寸应该足够大, 即忽略面片边缘的散射贡献, 同时相对于实际目

标来说,剖分的面片应足够小以保证剖分后的结果可反映实际目标的宏观轮廓结构。在完成上述几何建模后,对剖分后的所有面片进行第 2 次的粗糙面几何建模,这时采用蒙特卡洛方法生成粗糙面样本,利用一个或多个样本去实现每个剖分面片的粗糙建模,进而获得整个粗糙表面目标的数值模型。

上述的几何建模方式决定了需使用粗糙面散射的近似理论计算每个粗糙面片的散射场,进而获得整个目标的散射场数据。可以看出基于以上建模过程,最终可以建立一种基于近似解析方法的粗糙面目标散射特性快速计算方法。另外,这种方法可直接获得目标的散射场数据,进而可实现对目标的成像仿真。图 1 给出了基于面元法的粗糙凸体目标两级建模流程图。

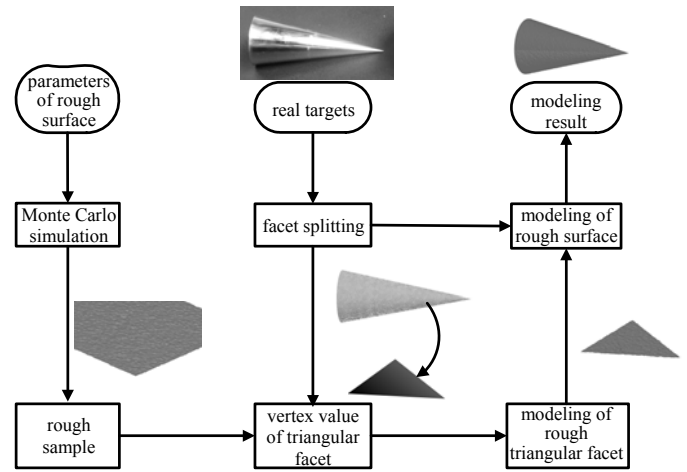


Fig.1 Flowchart of geometric modeling by facets generation for rough targets
图1 基于面元法的粗糙目标几何建模流程图

1.2 基于全波法的粗糙凸体目标散射计算

全波法由 E.Z.Bahar 于 20 世纪 80 年代提出^[5], 它从麦克斯韦方程和边界条件出发, 是一种较为严格的粗糙面散射求解方法, 可解决任意材料、任意粗糙度的粗糙面散射计算问题。对于 $f(x, y, z) = y - h(x, z) = 0$ 的粗糙面模型, 其散射全波解可表示为^[5]:

$$\mathbf{G}^f = \mathbf{G}_0 \int_A C_0^{in} \mathbf{T}^f \mathbf{F} \mathbf{T}^i \exp(ik_0(\bar{\mathbf{n}}^f - \bar{\mathbf{n}}^i) \cdot \bar{\mathbf{r}}_s) U(\bar{\mathbf{r}}_s) d\bar{A} \cdot \bar{\mathbf{n}} \mathbf{G}^i \equiv \mathbf{G}_0 \mathbf{C}(\bar{\mathbf{n}}^f, \bar{\mathbf{n}}^i) \mathbf{G}^i \quad (1)$$

式中: \mathbf{T}^i 和 \mathbf{T}^f 分别表示入射方向和散射方向上场分量在粗糙面参考坐标系与粗糙面上局部面片坐标系之间的变换关系; $\bar{\mathbf{n}}^i$ 和 $\bar{\mathbf{n}}^f$ 分别为入射波的入射方向和散射波的接收方向; $U(\bar{\mathbf{r}}_s)$ 为遮挡函数, 粗糙面上任一点位置矢量为:

$$\bar{\mathbf{r}}_s = x\bar{\mathbf{a}}_x + h(x, z)\bar{\mathbf{a}}_y + z\bar{\mathbf{a}}_z = \bar{\mathbf{r}} - f(x, y, z)\bar{\mathbf{a}}_y \quad (2)$$

由于全波法考虑了连续的边界条件, 因此其散射场公式中的积分与粗糙面内每个局部面片的法矢有关, 局部面片的单元面积可表示为:

$$d\bar{A} = \bar{\mathbf{n}} dx dy / (\bar{\mathbf{n}} \cdot \bar{\mathbf{a}}_y) \quad (3)$$

式中: $\bar{\mathbf{a}}_y$ 为粗糙面参考坐标系单位法矢; $\bar{\mathbf{n}}$ 为粗糙面上的局部单位法矢, 可表示为:

$$\bar{\mathbf{n}} = \nabla f / |\nabla f| = (-h_x \bar{\mathbf{a}}_x + \bar{\mathbf{a}}_y - h_z \bar{\mathbf{a}}_z) / \sqrt{h_x^2 + 1 + h_z^2} \equiv \sin \gamma \cos \delta \bar{\mathbf{a}}_x + \cos \gamma \bar{\mathbf{a}}_y + \sin \gamma \sin \delta \bar{\mathbf{a}}_z \quad (4)$$

式中: $h_x = \partial h / \partial x$; $h_z = \partial h / \partial z$ 。

式(1)中散射矩阵 \mathbf{F}^{PQ} ($P, Q = V, H$) 的元素则由下式给出^[6]:

$$F^{VV} = \frac{2C_0^{fn} \left[(\mu_r C_1^{in} C_1^{fn} \cos(\phi^{fn} - \phi^{in}) - S_0^{in} S_0^{fn})(1 - 1/\epsilon_r) + (1 - \mu_r) \cos(\phi^{fn} - \phi^{in}) \right]}{(C_0^{in} + \eta_r C_1^{in})(C_0^{fn} + \eta_r C_1^{fn})(C_0^{in} + C_0^{fn})} \quad (5)$$

$$F^{HH} = \frac{2C_0^{fn} \left[(\epsilon_r C_1^{in} C_1^{fn} \cos(\phi^{fn} - \phi^{in}) - S_0^{in} S_0^{fn})(1 - 1/\mu_r) + (1 - \epsilon_r) \cos(\phi^{fn} - \phi^{in}) \right]}{(C_0^{in} + C_1^{in}/\eta_r)(C_0^{fn} + C_1^{fn}/\eta_r)(C_0^{in} + C_0^{fn})} \quad (6)$$

$$F^{HV} = \frac{-2C_0^{fn} \eta_r \sin(\phi^{fn} - \phi^{in}) \left[(1 - 1/\epsilon_r) C_1^{in} - (1 - 1/\mu_r) C_1^{fn} \right]}{(C_0^{in} + \eta_r C_1^{in})(C_0^{fn} + C_1^{fn}/\eta_r)(C_0^{in} + C_0^{fn})} \quad (7)$$

$$F^{VH} = \frac{2C_0^{fn} \eta_r \sin(\phi^{fn} - \phi^{in}) \left[(1 - 1/\mu_r) C_1^{in} - (1 - 1/\epsilon_r) C_1^{fn} \right]}{(C_0^{in} + C_1^{in}/\eta_r)(C_0^{fn} + C_1^{fn}/\eta_r)(C_0^{in} + C_0^{fn})} \quad (8)$$

式中参数 $n_t, \eta_t, \epsilon_r, \mu_r$ 分别表示目标折射率、波阻抗、相对介电系数和相对磁导率。

相比基尔霍夫近似方法^[7]，全波法在计算粗糙面的散射场时需要获得粗糙面参考坐标系与粗糙面上局部面片坐标系之间的坐标变换关系^[3]，因此其计算复杂度有所增加，但优势在于全波法具备更加宽泛的适用范围、更高的计算精确度以及交叉极化计算能力。同时由于全波法的求解是基于连续边界条件的，因此在计算具有极大介电系数的粗糙金属目标时，极化散射系数需要采用修正处理公式^[8]。

基于全波法的太赫兹频段粗糙凸体目标散射计算的流程图如图2所示，具体步骤如下：

- 1) 根据计算频率参数对目标进行第1次粗剖分建模；
- 2) 根据实际目标表面的粗糙特性，利用蒙特卡洛仿真方法生成一个粗糙平板样本，使得其尺寸大于1)中剖分建模后目标上三角面片大小；
- 3) 设置粗糙目标散射计算的频率、极化、角度、介电系数等参数，导入经过1次剖分建模的目标数值模型和建立的粗糙面片样本模型；
- 4) 获取第1次剖分建模的目标上所有三角面片的顶点、边长、面积、法矢等参数，并根据入射波和散射波参数判断当前计算视角下面元遮挡情况；
- 5) 对可见面元，利用坐标变换方式将计算参数变换到面片坐标系中进行计算；
- 6) 根据面片坐标系中的三角面片的几何形状信息，利用已导入的粗糙面片样本建立相同形状的粗糙三角面片模型；
- 7) 获取面片坐标系中所有粗糙细分面元的法矢、面积、面片内局部坐标系与面片坐标系的坐标变换关系等，并在粗糙面片内进行遮挡判断；
- 8) 判断当前粗糙目标输入的介电系数，若为介质目标，则基于全波法计算粗糙三角面片的散射场，若为金属目标，则基于修正的极化散射系数计算粗糙三角面片的散射场；
- 9) 将在面片坐标系中计算得到的散射场值变换到目标坐标系；
- 10) 将目标上所有可见面片的散射场贡献叠加获得整个粗糙目标的散射场数据。

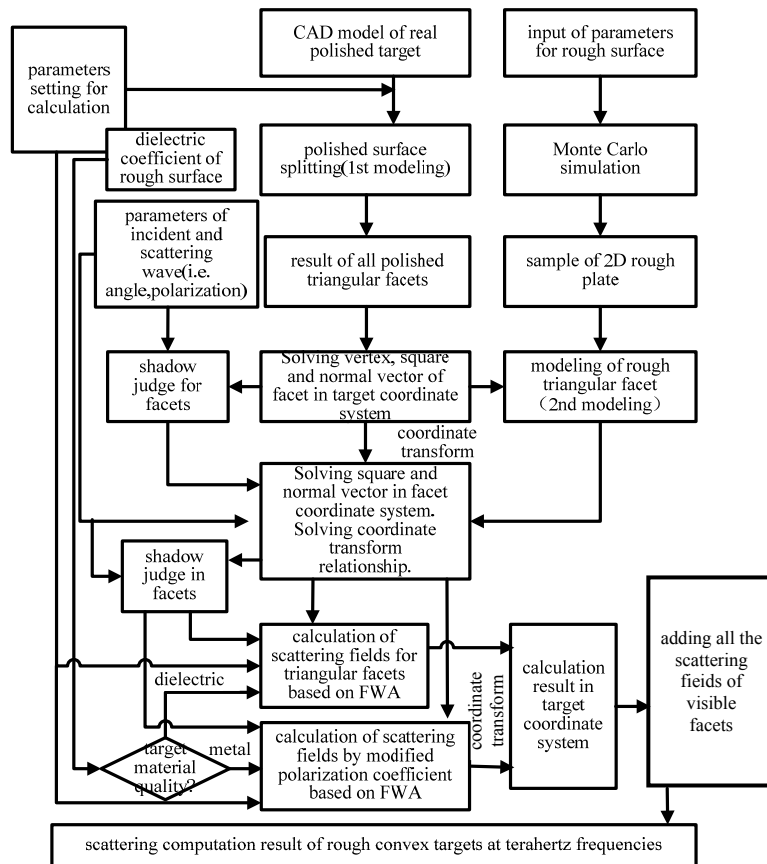


Fig.2 Flowchart of scattering computation of rough convex targets based on full-wave approach
图2 基于全波法的粗糙凸体目标散射计算流程图

2 仿真与分析

为验证本文提出的太赫兹频段粗糙凸体目标建模与计算方法的准确性,将本文方法的计算结果与通用电磁计算软件 FEKO 的计算结果进行比较。为保证本文计算方法与 FEKO 软件计算时粗糙目标模型的一致性,首先基于随机粗糙平板生成并保存数值模型,在计算时分别导入。考虑如图 3(a)所示的粗糙立方体几何模型,立方体每个面均为高斯随机粗糙面,且由同一正方形粗糙平板复制旋转后得到,立方体的边长为 10 cm,粗糙面的相关长度

为 $\lambda/2$,均方根值为 $\lambda/8$ 。通过本文建模方法,粗糙立方体的第 1 次面片剖分建模结果如图 3(b)所示,每个面剖分为 4 个三角面片。获取立方体上的所有三角面片信息,并进行遮挡判断,计算可见面片的散射场。对粗糙立方体的计算参数设置如下:计算频率为 300 GHz,计算方位角范围为 $40^\circ\sim 50^\circ$,俯仰角范围为 $50^\circ\sim 60^\circ$,角度间隔设定为 0.1° ,平板材料的折射率为 $800+800j$,入射极化方式为垂直极化。在获得方位向与俯仰向上一个二维面观测孔径后,基于转台成像的横向多普勒分辨原理可获得目标在二维多普勒平面内的成像结果。

首先,在雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)层面对本文计算方法与通用电磁计算软件 FEKO 的计算结果进行比较。图 4 给出了二者计算的粗糙立方体 RCS 对比结果,分别为方位角为 $40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ 时立方体 RCS 随俯仰角的变化曲线。对比可以看出二者的计算结果与曲线变化趋势基本保持一致,仅在部分视角下的计算结果存在差别,这验证了本文方法在太赫兹频段计算粗糙凸体目标散射的有效性。同时对比计算用时,发现本文方法具有更高的计算效率。如表 1 所示,分别基于蒙特卡洛仿真方法生成 10 个二维随机粗糙面,以此为基础生成 10 个粗糙立方体数值模型,分别导入 FEKO 和本文方法中依据本节设置的计算参数进行散射场计算,统计二者的计算用时并进行比较,计算平台配置为处理器 Intel i3 3.6 GHz,内存 4 GB。从表中可以看出,本文方法对所有模型均使用了更少的时间完成计算,平均约为 27.6 h,具有更高的计算效率。因为除了本文方法具有解析的计算公式外,FEKO 中的物理光学求解器融合了射线追踪策略进行面元遮挡判断而消耗了大量的时间开销。但 FEKO 中的射线追踪方法对交叉极化散射计算做出了贡献,而本文采用全波法本身具备交叉极化散射计算能力^[9]。

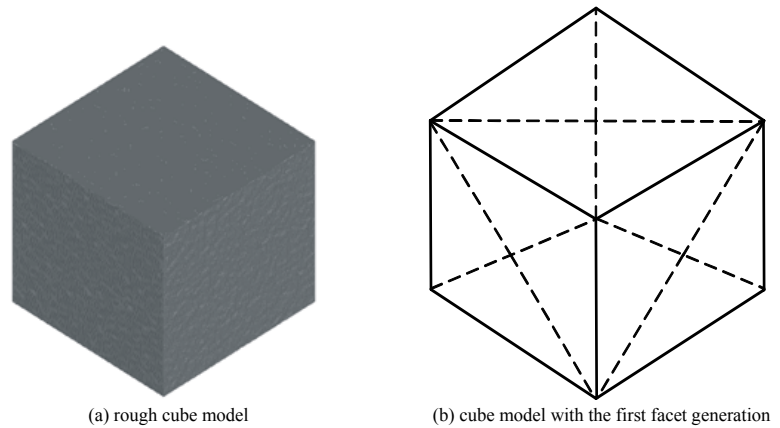


Fig.3 Rough cube and the result with the first facet generation

图 3 粗糙立方体模型及其首次剖分建模结果

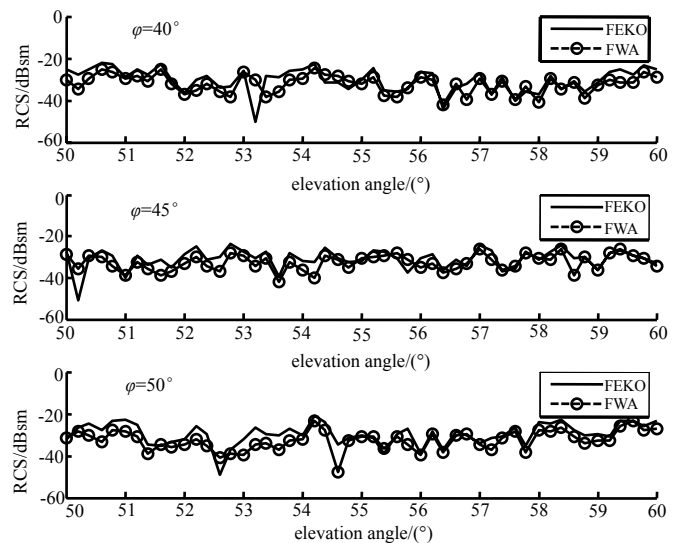


Fig.4 RCS comparison between the proposed method and the FEKO software

图 4 本文方法与 FEKO 软件计算的粗糙立方体 RCS 结果比较

表 1 仿真时间对比

Table1 Comparison of simulation time consumption

	sample 1/h	sample 2/h	sample 3/h	sample 4/h	sample 5/h	sample 6/h	sample 7/h	sample 8/h	sample 9/h	sample 10/h
FWA	27.626	27.630	27.622	27.625	27.621	27.619	27.624	27.628	27.623	27.627
FEKO	38.256	38.255	38.254	38.251	38.257	38.254	38.258	38.257	38.256	38.255

在图像域对计算结果进行比较,利用本文方法和 FEKO 计算的散射场数据进行雷达成像分析。如图 5 和图 6 分别给出了基于本文方法和基于 FEKO 软件计算数据的粗糙立方体成像结果。对比 VV 极化结果可以看出,二者的成像结果具有一致的散射分布规律,图像能量分布基本相同,这验证了本文计算方法的有效性和准确性。另一方面,本文方法在交叉极化下也可以获得粗糙立方体的成像结果,反映其轮廓结构信息,且幅度小于同极化图像

的幅度。本文方法可分析粗糙目标的交叉极化散射特性,因为全波法本身具有解释和描述粗糙面的去极化散射能力。相比本文方法的交叉极化成像结果,由 FEKO 软件数据得出的交叉极化图像散射分布规律存在较大区别,且边缘存在模糊。因为在 FEKO 6.0 软件进行计算时采用了物理光学求解器,物理光学法本身无法计算交叉极化结果,但该求解器融入了射线追踪策略进行了面元遮挡判断,因此其对目标交叉极化散射分量的计算产生贡献,但其在计算交叉极化散射分量时仍与更为精确的弹跳射线法存在差距。下一步将在高性能计算平台上,采用精确数值方法对粗糙立方体直接计算,并对交叉极化进行分析讨论。从上述结果可以看出,本文提出的基于全波法的粗糙凸体目标散射计算方法在 RCS 计算和同极化成像方面均可有效地分析和验证目标的散射特性。

基于全波法的粗糙目标散射计算方法还可实现对任意材料目标的散射计算。如图 7 所示为上述粗糙立方体模型在介电系数为 $\epsilon_r = -42 + 12j$ 时的成像结果。相比金属条件下成像结果(图 5)可以看出, VV 极化图像和 VH 极化图像能量分布均发生变化,其中 VV 极化图像在部分位置散射点分布发生变化,同时在一些地方仍与金属立方体具有类似的散射点分布。因为该材料依然具有较大的介电系数,因此目标具有较高的反射率。VH 极化图像变化则较为明显,特别是立方体侧面的 2 个面散射显著增强。不同极化下的图像均可反映粗糙目标的轮廓结构。

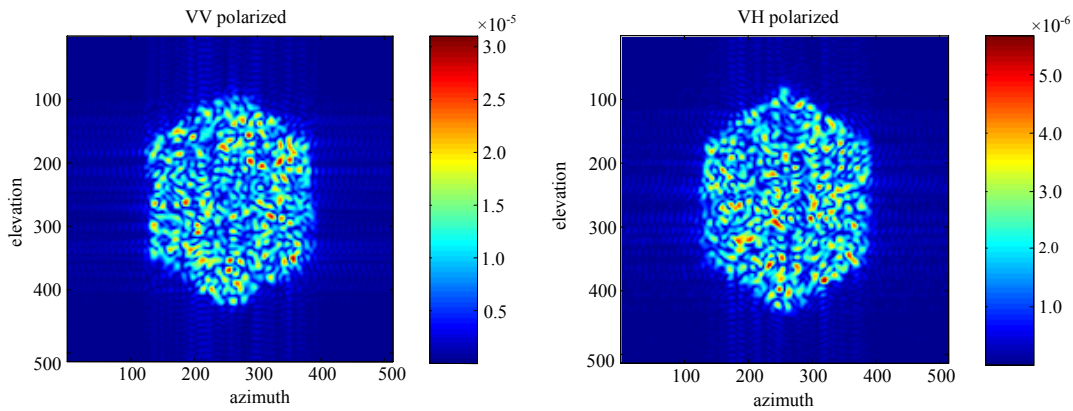


Fig.5 Imaging results of the rough metallic cube with data from the proposed method
图 5 基于本文方法计算数据的粗糙金属立方体成像结果

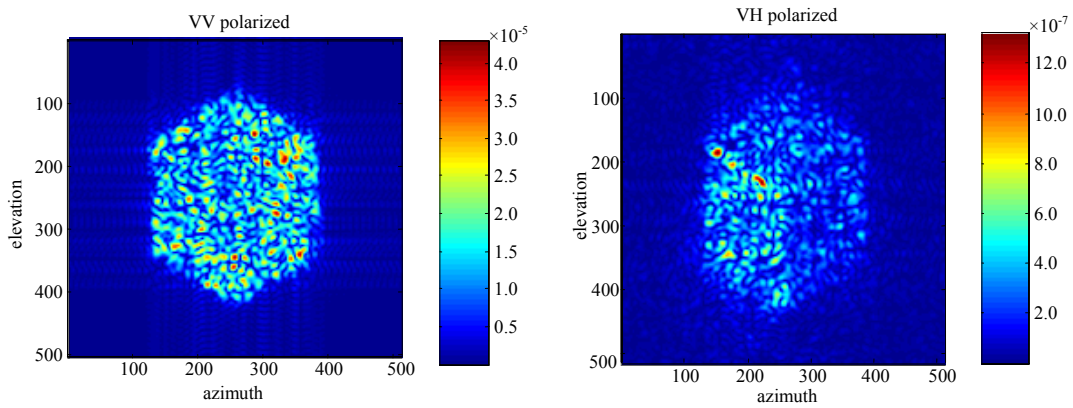


Fig.6 Imaging results of the rough metallic cube with data from FEKO software
图 6 基于 FEKO 软件计算数据的粗糙金属立方体成像结果

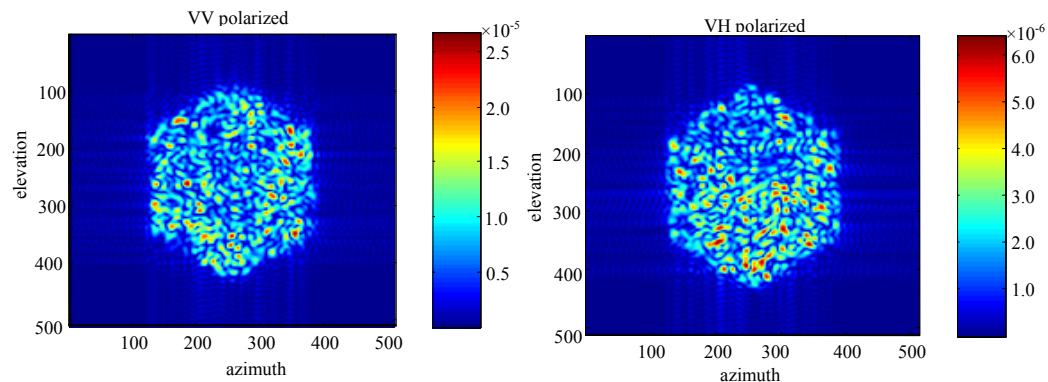


Fig.7 Imaging results of the rough dielectric cube with data from the proposed method
图 7 基于本文方法计算数据的粗糙介质立方体成像结果

3 结论

目标散射特性的理论计算方法是研究太赫兹频段目标散射并进行散射预测的重要手段之一。本文考虑目标表面粗糙特性和目标材料特性,研究了太赫兹频段粗糙凸体目标的散射特性建模与计算问题,提出了一种有效的太赫兹频段粗糙凸体目标几何建模与计算方法,可实现对任意材料、任意粗糙凸体目标散射计算。通过与 FEKO 计算结果进行比较验证了计算准确性。

参考文献:

- [1] JAGANNATHAN A,GATESMAN A J,HORGAN T,et al. Effect of periodic roughness and surface defects on the terahertz scattering behavior of cylindrical objects[C]// Terahertz Physics, Devices,and Systems IV:Advanced Applications in Industry and Defense. Orlando,FL,United States:[s.n.], 2010:76710E.
- [2] 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, 2014,12(6):783-787. (YANG Yang. Scattering characteristics of THz wave on rough metal sphere target[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(6):783-787.)
- [3] 王瑞君. 太赫兹目标散射特性关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2015. (WANG Ruijun. Research on key technology of target scattering characteristics at terahertz frequencies[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2015.)
- [4] 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.)
- [5] BAHAR E. Full-wave solutions for the scattered radiation fields from rough surfaces with arbitrary slope and frequency[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1980,28(1):11-21.
- [6] BAHAR E,LEE B S. Radar scatter cross sections for two-dimensional random rough surfaces—full wave solutions and comparisons with experiments[J]. Waves in Random Media, 1996,6(1):1-23.
- [7] 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. Basic theory and method of scattering from rough surfaces[M]. Beijing:Science Press, 2010.)
- [8] BAHAR E. Scattering and depolarization by rough surfaces near grazing angles—full wave solutions[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982,30(4):712-719.
- [9] BAHAR E,FITZWATER M A. Like-and cross-polarized scattering cross sections for random rough surfaces:theory and experiment[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1985,2(12):2295-2303.

作者简介:



王瑞君(1986-),男,内蒙古自治区凉城县人,博士,主要研究方向为太赫兹目标散射特性技术、太赫兹雷达成像技术等。email:wandering_jun@163.com.

高敬坤(1992-),男,山东省梁山县人,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,副教授,主要研究方向为雷达信号处理与微动目标指示。

秦玉亮(1980-),男,山东省潍坊市人,副研究员,主要研究方向为太赫兹雷达与量子成像。

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。