

## 太赫兹低频段粗糙目标的表面散射及成像特性研究

柴鑫悦<sup>1</sup>, 胡浩<sup>1</sup>, 胡晓雪<sup>1</sup>, 马欣茹<sup>1</sup>, 席思星<sup>2</sup>, 王晓雷<sup>1\*</sup><sup>1</sup>南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所, 天津 300350;<sup>2</sup>河北工程大学数理科学与工程学院, 河北 邯郸 056038

**摘要** 目标表面散射特性是利用太赫兹波进行雷达成像、目标识别和定位的物理基础, 而影响目标表面散射特性的因素主要是目标材料和表面粗糙度。以金属铝材料为例, 基于 0.1 THz 频点处的 Drude 模型参数拟合结果, 利用基尔霍夫近似 (KA) 法分析了高斯型随机粗糙铝表面的散射系数。对蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 粗糙目标的雷达散射截面 (RCS) 进行仿真分析, 实现了二维逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像。研究结果表明: 目标 RCS 仿真结果与 KA 理论分析结果相符, 即在小俯仰角下表面粗糙度与 RCS 呈负相关, 而在大俯仰角下表面粗糙度与 RCS 呈正相关。此外, 在一定的粗糙范围内, 随着表面粗糙度的增加, 目标表面的散射中心增多, 在 ISAR 图像上形成密集的“斑点状”效果, 更能反映目标的形状和结构。

**关键词** 粗糙面散射; 低频太赫兹波; 散射系数; 基尔霍夫近似; 雷达散射截面; 逆合成孔径雷达成像

中图分类号 TN957.53

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232282

## Surface Scattering and Imaging Characteristics of Rough Targets in Terahertz Low-Frequency Band

Chai Xinyue<sup>1</sup>, Hu Hao<sup>1</sup>, Hu Xiaoxue<sup>1</sup>, Ma Xinru<sup>1</sup>, Xi Sixing<sup>2</sup>, Wang Xiaolei<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;<sup>2</sup>School of Mathematics and Physics Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China

**Abstract** Target surface scattering characteristics are the physical basis of terahertz waves used in radar imaging and target recognition and location. The main factors affecting target surface scattering characteristics are the target material and surface roughness. This study uses metal aluminum as an example and fits the Drude model parameters of aluminum at 0.1 THz. Based on the fitting results, the scattering coefficient of a Gaussian random rough aluminum surface is analyzed using Kirchhoff approximation (KA) method. Subsequently, Monte-Carlo rough targets with different roughness are modeled, and the radar scattering cross-section (RCS) is calculated to image the two-dimensional inverse synthetic aperture radar (ISAR). The research results show that the target RCS simulation results are consistent with KA theory analysis, that is, surface roughness is negatively correlated with RCS at a small pitch angle, whereas surface roughness is positively correlated with RCS at a large pitch angle. In addition, in a certain rough range, as the surface roughness increases, the scattering center of the target surface increases, and the ISAR image forms a dense "speckle" effect, which can better reflect the shape and structure of a target.

**Key words** rough surface scattering; low-frequency terahertz wave; scattering coefficient; Kirchhoff approximation; radar cross section; inverse synthetic aperture radar imaging

## 1 引言

太赫兹波介于红外和微波之间。对于金属目标, 当入射波从红外过渡到微波时, 金属表面的电导率会

从与频率有关的复数变为与频率无关的实数, 这使得处于红外和微波照射下的金属目标分别呈现出电介质和导体的特性<sup>[1-2]</sup>, 从而影响目标的散射特性。因此, 对金属介电特性的分析至关重要。此外, 对于同一入

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2023-12-14; 录用日期: 2023-12-21; 网络首发日期: 2024-01-04

基金项目: 国家自然科学基金 (61875093)

通信作者: \*wangxiaolei@nankai.edu.cn

射光,随着金属表面粗糙度的增加,散射光中漫反射分量增加,使得金属表面散射特性<sup>[3]</sup>或光波偏振态<sup>[4]</sup>发生改变从而直接影响雷达成像。

总之,在太赫兹低频段,确定了金属目标材料的介电常数和表面粗糙结构之后就能对目标表面散射及成像特性进行分析。一方面,金属目标的介电常数可以通过实验进行测量,但由于存在误差等因素,不能直接使用测量值,必须对测量值进行拟合以得到在某一频点处相对准确的模型参数。Ordal等<sup>[5-6]</sup>先后测量了远红外频段和亚毫米波频段下 14 种金属的光学常数;Markovic等<sup>[7]</sup>、王宏强等<sup>[8]</sup>利用 Ordal 的实验结果,分别对 1.5~1363.7 THz、1~100 THz 频率范围内的金属 Drude 模型参数进行了拟合。但由于很多太赫兹测量系统都在较低频段工作,因此对太赫兹低频段下金属介电特性的研究具有较为重要的现实意义。另一方面,金属目标的粗糙表面可通过线性滤波法生成。目前用于研究粗糙目标表面散射特性的电磁散射方法主要分为粗糙面解析近似法和精确数值方法两大类。粗糙面解析近似方法包括微扰法(SPM)、基尔霍夫近似(KA)法等,这些方法能够在不严格的条件下快速给出预估结果。国内外很多学者<sup>[9-11]</sup>已经证实通过 SPM、KA 等方法可以准确描述粗糙目标散射系数的实验结果。然而,散射系数只能反映表面粗糙度对散射光强度分布的影响,想要分析成像效果还需要得到散射场的相位信息。利用电磁散射仿真软件计算目标的雷达散射截面(RCS),结合成像算法进行相位补偿是实现粗糙目标仿真成像的一种有效手段。国防科技大学的王瑞君等<sup>[12-13]</sup>提出了一种太赫兹频段下粗糙目标散射中心建模方法,分析了不同粗糙度下粗糙圆盘的相干和非相干散射行为,但并没有分析目标表面粗糙度对成像效果的影响;高敬坤等<sup>[14]</sup>利用全波法(FWA)和弹跳射线(SBR)法计算了太赫兹频段下全尺寸粗糙目标的 RCS 并进行了仿真成像,结果表明 FWA 的运算速度和精度更好。因此,旨在建立具有不同表面粗糙度的粗糙目标模型,并针对模型尺寸选择适合的 FWA 来研究表面粗糙度对 RCS 和成像效果的影响。通过这种方法可以在设计和应用太赫兹雷达系统时充分考虑目标表面粗糙度对成像结果的影响。对于实际应用中更为普遍的情况,即目标表面粗糙度已经确定,也可以参考所提研究方法去选择合适的散射模型<sup>[8]</sup>和成像

算法<sup>[15-16]</sup>进行研究,以提高成像的清晰度和分辨率。这对于准确掌握太赫兹频段粗糙目标的表面散射及成像特性,提高粗糙目标在太赫兹低频段的雷达探测精度和光学成像质量具有重要的理论意义。

本文首先基于遗传算法(GA)和金属 Drude 模型在 0.1~3.0 THz 频率范围内拟合了铝(Al)的测量数据,并给出了在 0.1 THz 等拟合频点处 Drude 模型参数的拟合结果以及相对误差。基于拟合结果,对蒙特卡罗(Monte-Carlo)粗糙面进行建模,利用 KA 分析了表面粗糙度、散射角和频率对随机高斯型粗糙铝表面散射系数的影响。最后基于电磁仿真软件 FEKO 分析了表面粗糙度对粗糙目标的 RCS 和成像效果的影响。仿真结果揭示了在小俯仰角和大俯仰角下,表面粗糙度与 RCS 展现出截然相反的相关关系。散射成像图像以“斑点状”形式呈现,并且在一定的粗糙度范围内,表面粗糙度越大,这些“斑点”越密集,目标形状和结构也就越明显,从而优化了成像效果。

## 2 相对介电常数的确定

确定太赫兹低频段金属目标的相对介电常数需要基于合适的模型和算法对金属的实测数据进行拟合,以得到所需频点处的模型参数,然后通过进一步计算可以得到金属的相对介电常数。微波波段金属目标的光学特性通常使用 Drude 模型进行描述,拟合 Drude 模型可以采用多种算法,常用的有 GA、梯度下降(GD)法<sup>[17]</sup>、模拟退火(SA)算法<sup>[18]</sup>等。考虑到 Drude 模型的复杂性和多维性,通常需要采用全局搜索能力较强的算法来获得更好的拟合效果。遗传算法是一种基于自然进化原理的优化算法,适合处理多维、复杂的优化问题,具有较强的全局搜索能力<sup>[19]</sup>。此外,遗传算法还具有其他优势:1)可以处理连续或离散数据,适用范围广;2)具有很好的鲁棒性,可以避免陷入局部最优解;3)实现相对简单。

### 2.1 遗传算法

GA 最早由美国的 Holland 教授<sup>[20]</sup>提出,是模拟生物在自然界环境中的遗传和进化过程形成的自适应全局优化搜索算法。GA 借用生物遗传学的观点,通过对初始种群施加自然选择、交叉和变异等一系列遗传操作来产生新一代的种群,并逐步使种群进化到包含近似最优解的状态。图 1 为 GA 流程框图。

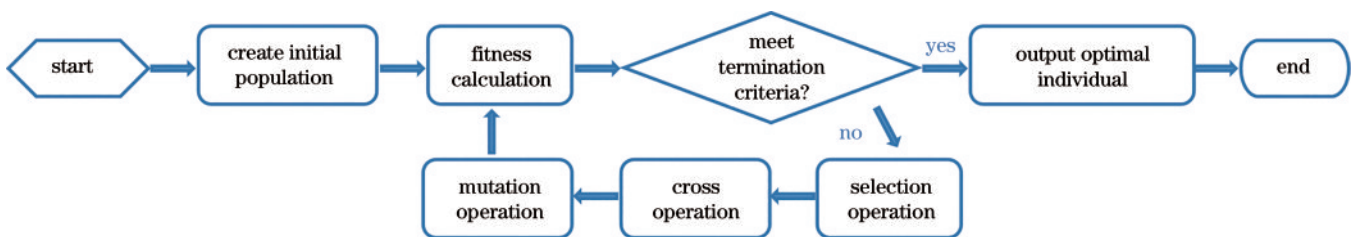


图 1 遗传算法流程图

Fig. 1 Flowchart of genetic algorithm

## 2.2 金属 Drude 模型

处于微波波段的金属目标的导体特性,通常用金属 Drude 模型来描述。金属的相对介电常数表达式为<sup>[21]</sup>

$$\epsilon_r(\omega) = \frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} = \epsilon_r'(\omega) - i\epsilon_r''(\omega) = 1 + i \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \frac{1}{\omega(\gamma_0 - i\omega)}, \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为外场的频率; $N$ 为单位体积中的传导电子数; $m$ 为电子质量; $\epsilon_0$ 为真空中的介电常数; $\gamma_0$ 为动量迁移的碰撞频率; $\epsilon$ 为 Al 的介电常数。 $\epsilon_r(\omega)$ 的实部为  $\epsilon_r'(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma_0^2}$ , 虚部为  $\epsilon_r''(\omega) = \frac{\omega_p^2 \gamma_0}{\omega^3 + \omega \gamma_0^2}$ ,  $\omega_p$ 为等

离子体频率,且  $\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0}$ , 其中  $e$  为电子电量。

## 2.3 拟合结果及相对误差

铝具有密度小、存量丰富、耐腐蚀和延展性好等特点,被广泛用于民事和军事领域。本文所用的金属铝的实测数据均来自于文献[6],基于 GA 对 0.1~3.0 THz 频率范围内的数据分别在 0.1、0.3、0.5 THz 频点处进行了拟合。设置种群大小  $N_{NP}=100$ , 最优个体集大小  $D=20$ , 交叉概率  $P_c=0.7$ , 变异概率  $P_m=0.001$ , 最大迭代次数为 600。图 2(a)给出了在 0.1 THz 处相对介电常数的实部和虚部适应度函数进化曲线,图 2(b)为拟合结果。

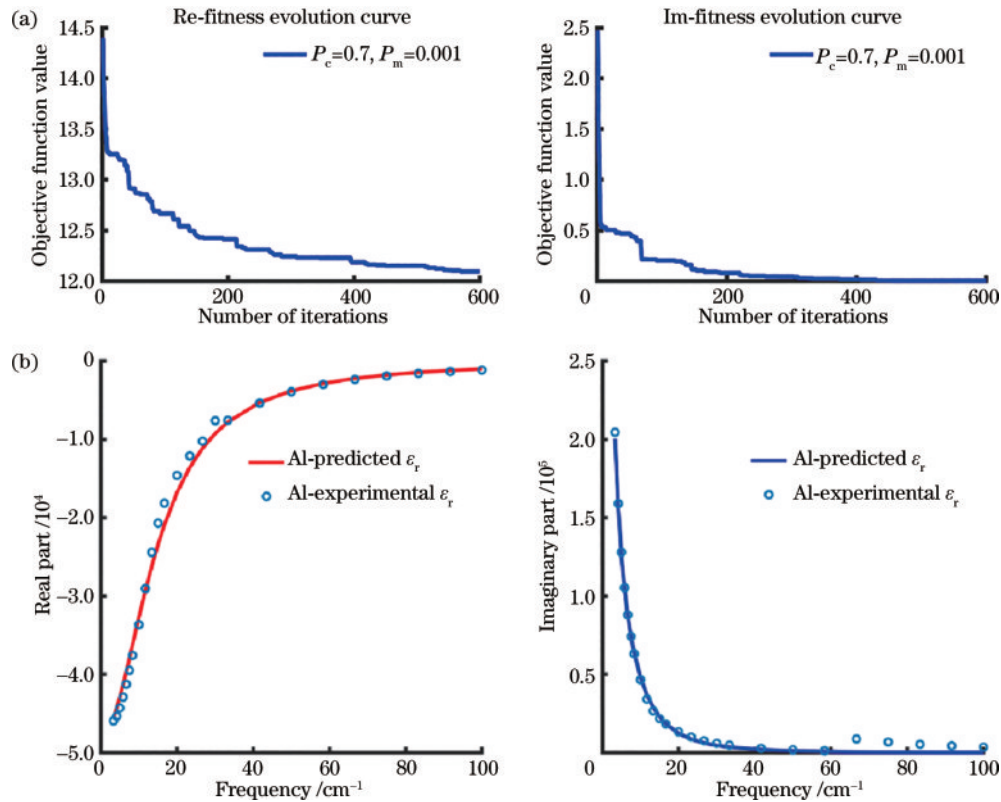


图 2 Al 相对介电常数的拟合。(a) 实部和虚部的适应度函数进化曲线; (b) 拟合结果

Fig. 2 Fitting of Al relative permittivity. (a) Fitness function evolution curves of real and imaginary parts; (b) fitting results

从拟合结果上看,金属铝相对介电常数的实部和虚部拟合曲线与实验数据高度重合,证明了 GA 和金属 Drude 模型的有效性。为了更客观地分析拟合结果,

表 1 给出了在 0.1、0.3、0.5 THz 频点处拟合的模型参数及实部和虚部的相对误差。从表 1 中可以看出,在 0.1 THz 处实部和虚部的拟合相对误差都是最小的。

表 1 不同拟合频点处的模型参数及实虚部相对误差

Table 1 Model parameters and relative errors of real and imaginary parts at different fitting frequencies

Fitted frequency point /THz	Collision frequency / $\text{cm}^{-1}$	Plasma frequency / $\text{cm}^{-1}$	Real part relative error	Imaginary part relative error
0.1	14.6891	$3.2128 \times 10^3$	0.0122	0.1532
0.3	14.3337	$3.2163 \times 10^3$	0.0115	0.1626
0.5	13.1614	$2.8568 \times 10^3$	0.0863	0.3178

### 3 粗糙铝表面的散射系数

#### 3.1 基尔霍夫近似法

Beckmann 等<sup>[22]</sup>在研究周期性粗糙面的电磁散射问题时引入了 KA 方法,该方法适用于计算表面均方根高度小于入射波长且表面相关长度大于入射波长的情况。根据近似方法的不同,可以分为标量近似法和驻留相位法,这两种方法分别适用于均方根高度较小和较大的情况。为了研究表面粗糙度对散射系数的影响,以 HH 极化为例,对结果进行分析说明。通过标量近似法和驻留相位法得到的双站散射系数<sup>[23]</sup>由下式给出

$$\sigma_{\text{HH,BL}} = \pi k_1^2 |a_0|^2 \exp(-q_z^2 \delta^2) \Lambda(q_x) \Lambda(q_y) + (|a_0| k_1 l / 2)^2 \exp(-q_z^2 \delta^2) \sum_{n_0=1}^{\infty} \frac{(q_z^2 \delta^2)^{n_0}}{n_0! n_0} \exp\left[-\frac{(q_x^2 + q_y^2) l^2}{4n_0}\right], \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{HH,ZL}} = \frac{(k_1 q |U_{\text{HH}}|)^2}{2 |q_z|^4 \delta^2 |\rho''(0)|} \exp\left[-\frac{q_x^2 + q_y^2}{2q_z^2 \delta^2 |\rho''(0)|}\right], \quad (3)$$

式中: $k_1$ 为入射波波数; $a_0$ 为极化常数; $q$ 为相位因子的大小, $q_x$ 、 $q_y$ 、 $q_z$ 分别为相位因子在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的分量的大小; $n_0$ 为阶次; $\Lambda$ 为狄拉克函数; $\delta$ 为粗糙表面的均方根高度; $l$ 为表面相关长度; $U_{\text{HH}}$ 为 HH 极化下的散射场。对于各向同性高斯型随机粗糙面, $\rho''(0) = -2/l^2$ 为粗糙面的相关函数。式(2)和(3)满足

$$q_x = k_1(\sin \theta_s \cos \phi_s - \sin \theta_i \cos \phi_i), \quad (4)$$

$$q_y = k_1(\sin \theta_s \sin \phi_s - \sin \theta_i \sin \phi_i), \quad (5)$$

$$q_z = k_1(\cos \phi_s + \cos \phi_i), \quad (6)$$

$$q = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2}, \quad (7)$$

式中: $\theta_i$ 和 $\theta_s$ 分别为入射角和散射角; $\phi_i$ 和 $\phi_s$ 分别为入射方位角和散射方位角。 $a_0$ 和 $U_{\text{HH}}$ 由下式给出

$$a_0 = -R_{\text{HH}}(\cos \theta_i + \cos \theta_s) \cos(\phi_s - \phi_i), \quad (8)$$

$$U_{\text{HH}} = \frac{\sqrt{2[1 - \hat{\mathbf{n}}_s \cdot \hat{\mathbf{n}}_i]} |q_z| \left[ R_{\text{VV}}(\hat{\mathbf{h}}_s \cdot \hat{\mathbf{n}}_i)(\hat{\mathbf{h}}_i \cdot \hat{\mathbf{n}}_s) + R_{\text{HH}}(\hat{\mathbf{v}}_s \cdot \hat{\mathbf{n}}_i)(\hat{\mathbf{v}}_i \cdot \hat{\mathbf{n}}_s) \right]}{\left\{ (\hat{\mathbf{h}}_s \cdot \hat{\mathbf{n}}_i)^2 + (\hat{\mathbf{v}}_s \cdot \hat{\mathbf{n}}_i)^2 \right\} |q_z|}, \quad (9)$$

式中: $\hat{\mathbf{n}}_i$ 和 $\hat{\mathbf{n}}_s$ 分别为入射场和散射场的单位矢量; $\hat{\mathbf{h}}_i$ 和 $\hat{\mathbf{h}}_s$ 分别为水平极化入射波和散射波的单位极化矢量; $\hat{\mathbf{v}}_i$ 和 $\hat{\mathbf{v}}_s$ 分别为垂直极化入射波和散射波的单位极化矢量。 $R_{\text{HH}}$ 和 $R_{\text{VV}}$ 分别为水平极化和垂直极化下的菲涅耳反射系数,可由下式给出

$$R_{\text{HH}} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}, \quad (10)$$

$$R_{\text{VV}} = \frac{\epsilon_r \cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\epsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}. \quad (11)$$

#### 3.2 散射系数随散射角和频率的变化情况

基于第 2 节在 0.1 THz 频点处的拟合结果,利用 KA 法得到了不同表面粗糙度下散射系数随散射角和

频率的变化关系。当入射波频率  $f$  为 0.1 THz 时,波长  $\lambda$  为 3 mm。在  $\theta_i = \phi_i = 0$  且  $\phi_s = \pi$  的情况下,设定三种表面粗糙度:1)  $\delta = 0.2\lambda$ ,  $l = 3\lambda$ ; 2)  $\delta = 0.2\lambda$ ,  $l = 2\lambda$ ; 3)  $\delta = 0.6\lambda$ ,  $l = 2\lambda$ ,以探究不同表面粗糙度下 HH 极化散射系数( $\sigma_{\text{HH}}$ )随散射角( $\theta_s$ )和频率( $f$ )的变化情况。需要说明的是,表面粗糙度与  $\delta$  呈正相关,与  $l$  呈负相关。图 3(a)和图 3(b)分别为上述三种设定条件下的计算结果,对于  $\delta = 0.2\lambda$  的两种表面粗糙度采用标量近似法进行计算,对于  $\delta = 0.6\lambda$  的表面粗糙度需要采用驻留相位法进行计算。

从图 3 中可以看出:1) 散射观测角比较小时, $\sigma_{\text{HH}}$  随表面粗糙度的增大而减小;2) 散射观测角比较大时, $\sigma_{\text{HH}}$  随表面粗糙度的增大而增大;3)  $\sigma_{\text{HH}}$  几乎不随频

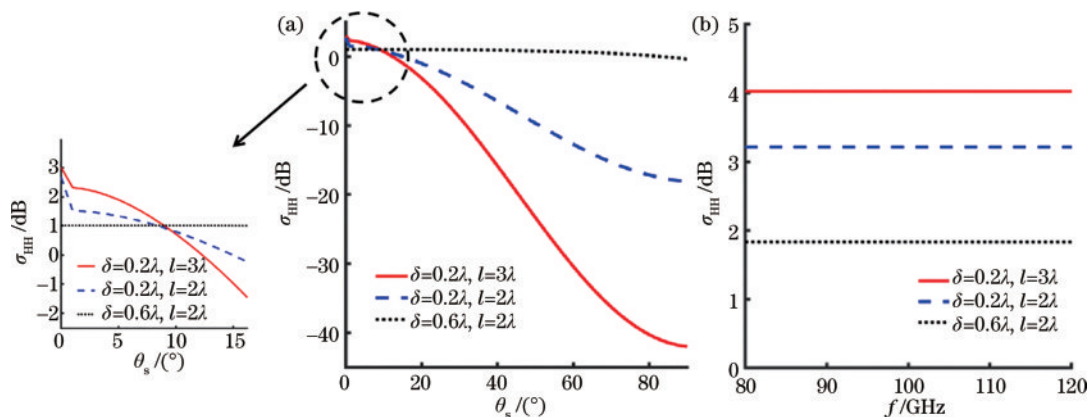


图 3 不同表面粗糙度下  $\sigma_{\text{HH}}$  随不同因素的变化情况。(a) 散射角  $\theta_s$ ; (b) 频率  $f$

Fig. 3 Variation of  $\sigma_{\text{HH}}$  with different factors under different surface roughness. (a) Scattering angle  $\theta_s$ ; (b) frequency  $f$

率变化。结果表明:在镜反射方向及附近小角度内,表面越光滑散射效应越强;当远离镜反射方向时,表面越光滑散射效应越弱。此外,从图 3(a)的放大部分可知,当散射观测角在入射角附近时,镜反射分量较多。

## 4 不同粗糙度目标的 RCS 和成像分析

### 4.1 Monte-Carlo 粗糙目标建模

粗糙面的表面粗糙度是通过以波长为度量单位的统计参数来表征的,通常用来描述粗糙面的统计量有功率谱密度、均方根高度、表面相关长度、表面均方根斜率等。假设要生成的二维粗糙面长度分别为  $L_x$  和  $L_y$ , 均匀离散距离为  $\Delta_x$  和  $\Delta_y$ , 离散点数分别为  $M$  和  $N$ , 即有  $L_x = M\Delta_x$  和  $L_y = N\Delta_y$ 。则采用 Monte-Carlo 方法生成的随机粗糙面上每一点处 ( $x_m = m\Delta_x, y_n = n\Delta_y$ ) 的高度<sup>[24]</sup>可以表示为

$$h(x_m, y_n) = \frac{1}{L_x L_y} \times \sum_{m=-M/2+1}^{M/2} \sum_{n=-N/2+1}^{N/2} F(k_{m_k}, k_{n_k}) \exp[i(k_{m_k} x_m + k_{n_k} y_n)], \quad (12)$$

式中:  $k_{m_k} = 2\pi m_k / L_x$ ;  $k_{n_k} = 2\pi n_k / L_y$ 。  $F(k_{m_k}, k_{n_k})$  为概率密度函数, 由下式给出

$$F(k_{m_k}, k_{n_k}) = 2\pi \sqrt{L_x L_y} W(k_{m_k}, k_{n_k}) \times \begin{cases} \frac{X(0, 1) + jX(0, 1)}{\sqrt{2}}, & m_k \neq 0, M/2 \text{ and } n_k \neq 0, N/2 \\ X(0, 1), & m_k = 0, M/2 \text{ and } n_k = 0, N/2 \end{cases}, \quad (13)$$

式中:  $(m_k, n_k)$  为频域中点的位置;  $X(0, 1)$  表示均值为 0、方差为 1 的高斯随机变量。  $W(k_{m_k}, k_{n_k})$  为高斯功率谱密度函数, 由下式给出

$$W(k_{m_k}, k_{n_k}) = \delta^2 \frac{l_{m_k} l_{n_k}}{4\pi} \exp\left(-\frac{k_{m_k}^2 l_{m_k}^2 + k_{n_k}^2 l_{n_k}^2}{4}\right), \quad (14)$$

式中:  $l_{m_k}, l_{n_k}$  分别为  $x, y$  方向的表面相关长度,  $l_{m_k} = l_{n_k} = l$ 。

为了直观地展示表面粗糙度对二维目标成像效果的影响, 利用 MATLAB 生成了具有不同粗糙度的高斯型 T 字表面, 如图(4)所示。图 4(a)~(c) 分别是表面粗糙度为 1)  $\delta = 0.2\lambda, l = 3\lambda$ ; 2)  $\delta = 0.2\lambda, l = 2\lambda$ ; 3)  $\delta = 0.6\lambda, l = 2\lambda$  时的建模结果, 表面粗糙度逐渐增加。图 4(d) 为粗糙目标俯视图, 目标尺寸为  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 。将利用 Monte-Carlo 方法生成的表面模型导入电磁仿真软件 FEKO, 设置入射波中心频率为  $0.1 \text{ THz}$ , 铝的相对介电常数为第 2 节拟合结果, 表面涂覆铝层厚度为  $1 \text{ mm}$ 。

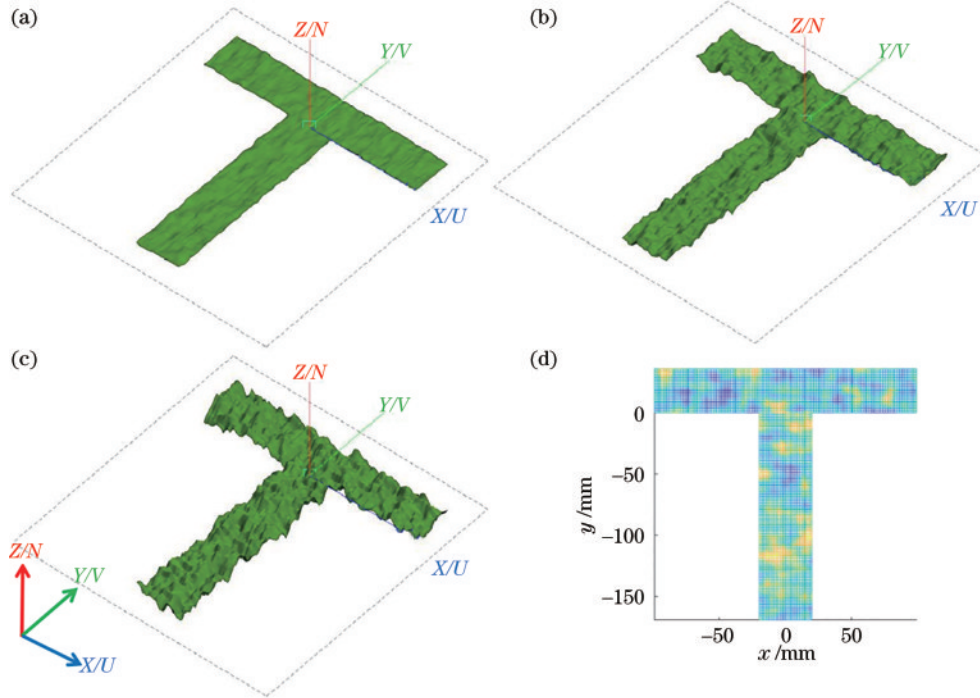


图 4 粗糙目标模型。(a)(b)(c) 不同表面粗糙度; (d) 俯视图

Fig. 4 Rough target model. (a) (b) (c) Different surface roughness; (d) top view

### 4.2 RCS 计算结果

为了解决太赫兹低频段大尺寸目标的散射问题, 通过几何建模的方式得到目标数值模型, 并据此找到了效率最高的电磁散射计算方法<sup>[25]</sup>。当模型尺寸为几十倍波

长时, 采用多层快速多极子算法 (MLFMA) 来计算 RCS 更为高效。针对所建立的模型, 首先设定观测俯仰角为  $10^\circ$ , 方位角为  $(-90^\circ, 90^\circ)$ , 间隔为  $1^\circ$ , 频率为  $0.1 \text{ THz}$ 。图 5(a)~(c) 给出了三个模型的 RCS 计算结果。

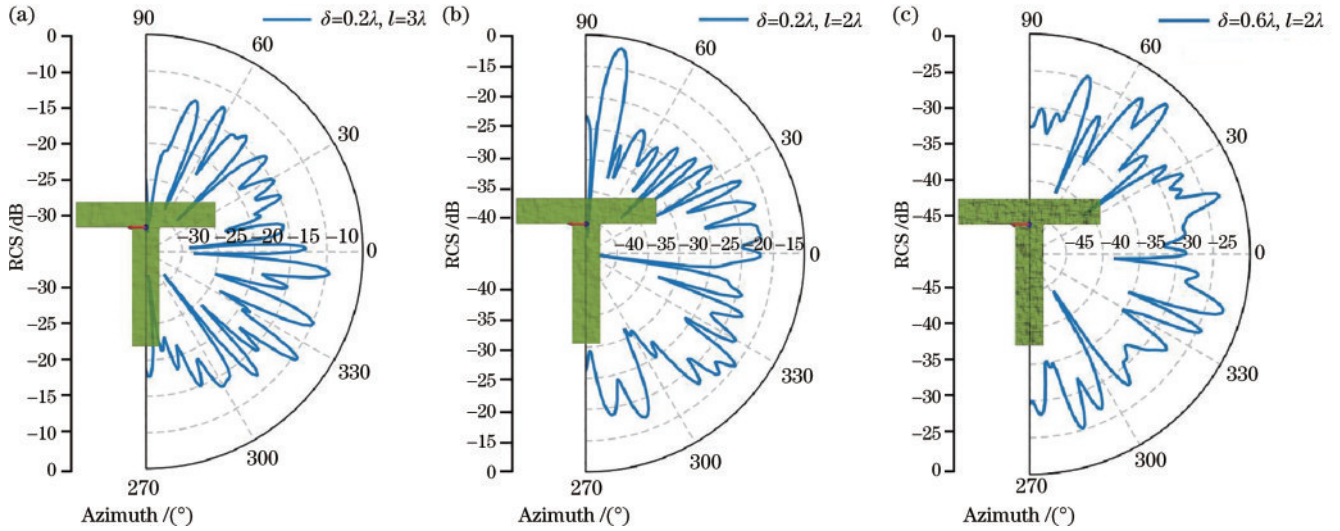


图 5 不同表面粗糙度的目标 RCS。(a)  $\delta=0.2\lambda, l=3\lambda$ ; (b)  $\delta=0.2\lambda, l=2\lambda$ ; (c)  $\delta=0.6\lambda, l=2\lambda$

Fig. 5 Target RCS with different surface roughness. (a)  $\delta=0.2\lambda, l=3\lambda$ ; (b)  $\delta=0.2\lambda, l=2\lambda$ ; (c)  $\delta=0.6\lambda, l=2\lambda$

对比图 5(a)~(c), 可以看出, 当  $\delta=0.2\lambda, l=3\lambda$  时, 大部分方位角下的 RCS 在  $-20\text{ dB}$  到  $-15\text{ dB}$  之间且分布比较均匀; 当  $\delta=0.2\lambda, l=2\lambda$  时, RCS 在  $-20\text{ dB}$  左右且分布开始不均匀; 当  $\delta=0.6\lambda, l=2\lambda$  时, RCS 在  $-30\text{ dB}$  到  $-25\text{ dB}$  之间且分布不均匀。因此, 可以得出结论: 随着表面粗糙度的增加, 目标 RCS 减小且散射分布不均匀度增加。

为了对比雷达俯仰角对 RCS 的影响, 设置俯仰角为  $90^\circ$ , 方位角为  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 间隔为  $1^\circ$ , 频率为

$0.1\text{ THz}$ 。图 6(a) 和图 6(b) 给出了不同均方根高度和不同表面相关长度下的全角度 RCS 结果。

图 6(a)~(b) 表明: 当俯仰角为  $90^\circ$  时, 随表面粗糙度的增加, 目标 RCS 增大且散射分布趋于均匀。因此, 在小俯仰角下, 表面越光滑, 散射效应越强; 反之, 在大俯仰角下, 表面越光滑, 散射效应越弱。该仿真结果与第 3 节的理论分析结论一致, 验证了模型和仿真的正确性和有效性。

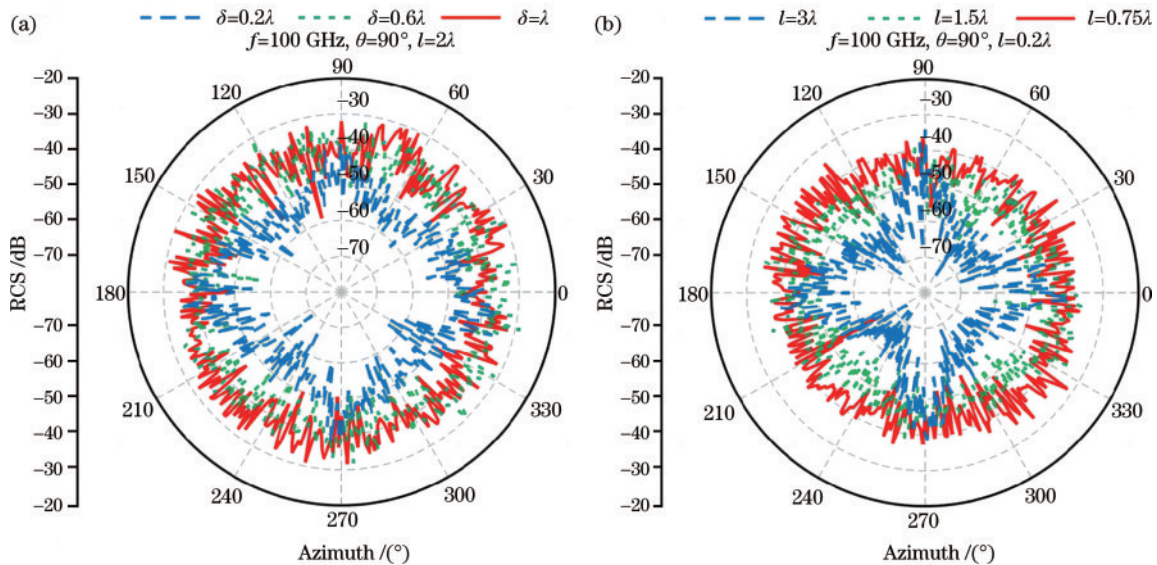


图 6 不同粗糙情况下的全角度 RCS。(a)  $l$  相同,  $\delta$  不同; (b)  $\delta$  相同,  $l$  不同

Fig. 6 Full angle RCS for different rough conditions. (a) Same  $l$ , different  $\delta$ ; (b) same  $\delta$ , different  $l$

### 4.3 二维 ISAR 成像

对上述 T 型铝目标, 在俯仰角为  $60^\circ$ 、方位角为  $-30^\circ \sim 30^\circ$ 、雷达频率为  $90 \sim 110\text{ GHz}$  的情况下进行了仿真计算。基于二维 ISAR 成像<sup>[26]</sup>原理和反投影 (BP) 成像算法得到了  $x$ - $y$  平面的结果。以 HH 极化为例,

图 7(a)~(c) 为不同表面粗糙度目标的仿真成像结果, 图 7(d)~(f) 为对应的散射中心示意图。

对比图 7(a)~(c) 的仿真成像结果, 可以清晰地看到表面粗糙度对目标成像结果的影响。当表面较为光滑时, 目标的形状和轮廓几乎无法辨识。然而, 随着表

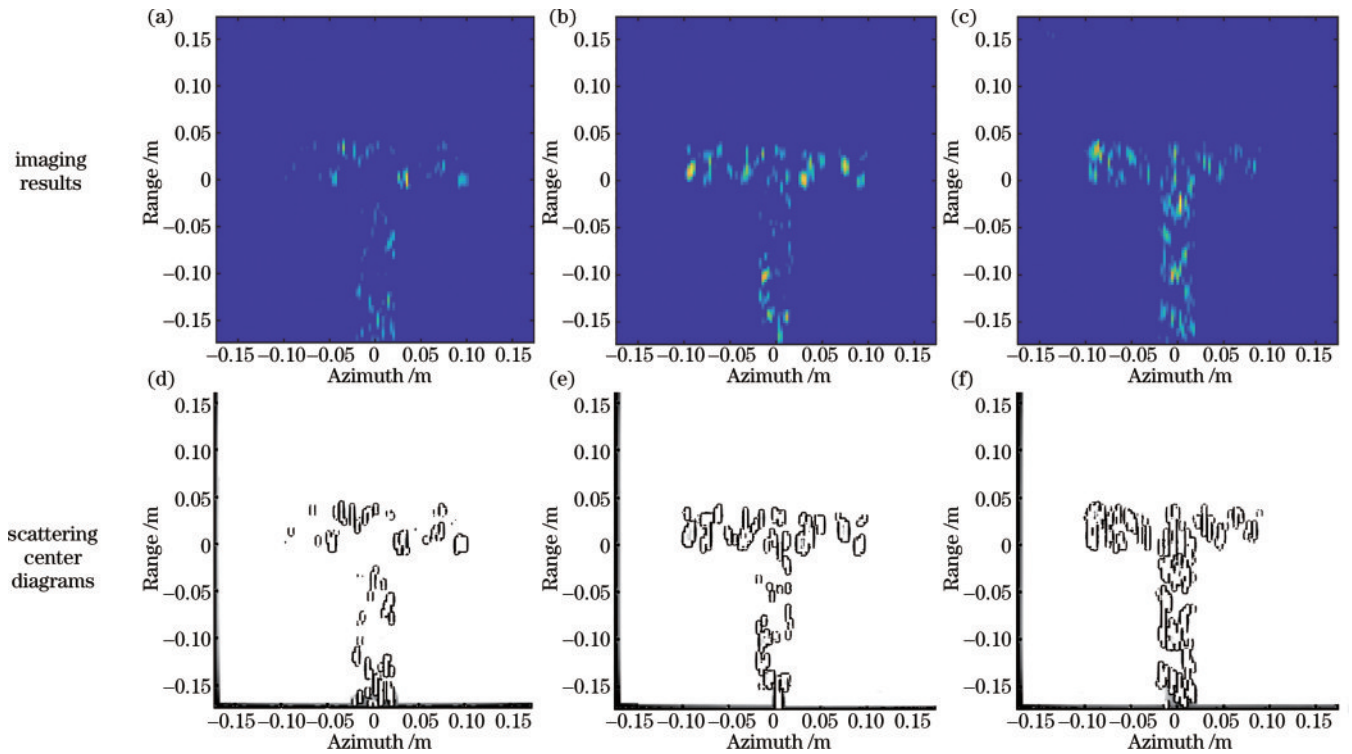


图7 不同表面粗糙度目标的成像结果及散射中心示意图。(a)(d) $\delta=0.2\lambda, l=3\lambda$ ; (b)(e) $\delta=0.2\lambda, l=2\lambda$ ; (c)(f) $\delta=0.6\lambda, l=2\lambda$   
 Fig. 7 Imaging results and scattering center diagrams of targets with different surface roughness. (a)(d)  $\delta=0.2\lambda, l=3\lambda$ ;  
 (b)(e)  $\delta=0.2\lambda, l=2\lambda$ ; (c)(f)  $\delta=0.6\lambda, l=2\lambda$

面粗糙度的增加,目标逐渐变得清晰,形状和轮廓也愈发明显。尤其在图7(c)中,可以轻易地识别出一个T形状的目标。进一步观察图7(d)~(f)的散射中心示意图,可以发现目标散射中心呈现出“斑点”状的分布。这些“斑点”不规则地分布在目标轮廓内,并且随着表面粗糙度的增加,目标表面的散射中心数量增多,逐渐“填充”目标区域,从而显示出目标的形状和轮廓。这一现象显然有利于对目标的识别和分辨。需要说明的是,从有利于识别和分辨目标的角度考虑,表面粗糙度应该有一个合适的范围。当目标表面比较光滑时,散射信号只存在于镜反射方向附近,此时雷达接收到的信号很弱,无法准确识别目标。当目标表面粗糙度大于波长时,目标表面的散射中心会更加密集,导致散射信号相互干扰,也会影响对目标的识别和分辨。但考虑到缺乏明确的评价标准、数据量大且处理困难、目标特性存在差异以及雷达系统参数的影响等原因,想要确定合适的表面粗糙度范围比较困难。

综上所述,不同表面粗糙度目标的成像结果会表现出不同的散射中心分布特征,利用这一结论,可以实现以下应用:1)区分不同目标或同一目标的不同区域。通常来说,不同目标或同一目标的不同区域具有不同的表面粗糙度,可以得到不同的成像结果。从中可以提取出与表面粗糙度相关的特性(例如散射中心的数量、分布密度、分布形状等),通过对比不同表面粗糙度的提取结果,来区分不同的目标或同一个目标的不同特征区域。2)控制斑点噪声的数量和分布。实际雷达

获取的图像中会存在噪声,需要对得到的图像进行分区滤波和降噪等处理。利用本文结论,可以对散射中心较少且稀疏(相对比较光滑)的区域采用边缘保留滤波器或高斯滤波器进行平滑处理;而对于散射中心较多且密集(相对比较粗糙)的区域采用适应性更强、更能保留细节的滤波器进行处理。通过这种分区处理的方式去控制斑点噪声的数量和分布,提高雷达图像的质量和识别准确率。此外,根据本文的研究结果,雷达系统参数(例如波形、功率、频率和带宽、入射角度和极化方式等)和采用的信号处理技术(例如逆向算法、自适应滤波、多目标跟踪、深度学习等)可能是影响成像清晰度和图像质量的重要因素。

## 5 结 论

针对低频太赫兹波在具有随机起伏的高斯型粗糙表面的金属目标的散射特性及成像特性方面开展了理论分析和仿真研究。理论分析表明:在太赫兹低频段,频率对散射的影响可以忽略;当入射波以小角度入射目标表面时,表面越光滑,镜面反射分量越多,散射效应越强;反之,对于同样的粗糙表面,当入射波以大角度入射时,散射效应会减弱。通过计算并比较仿真模型的RCS与理论分析结果的一致性,证明了仿真模型的准确性。ISAR成像结果表明:对于相同的雷达仿真系统,在一定的表面粗糙度范围内,目标表面越粗糙,成像“斑点”越多越密集,即目标散射中心越多。散射中心是“填充”在目标轮廓内的,因此,散射中心越多

越能反映目标的形状和轮廓,更有利于识别和分辨目标。这些方法和结论对太赫兹频段目标识别和探测的理论研究具有重要参考价值,有助于更好地理解太赫兹波在粗糙面上的散射机制,同时也为太赫兹雷达系统的设计和优化提供了有力的理论支持和实践指导。

## 参 考 文 献

- [1] Lucyszyn S. Investigation of anomalous room temperature conduction losses in normal metals at terahertz frequencies[J]. IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation, 2004, 151(4): 321-329.
- [2] Rakić A D. Algorithm for the determination of intrinsic optical constants of metal films: application to aluminum [J]. Applied Optics, 1995, 34(22): 4755-4767.
- [3] 杨洋, 姚建铨, 张镜水, 等. 粗糙铜表面对低频太赫兹波的散射实验[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(1): 36-39, 79.  
Yang Y, Yao J Q, Zhang J S, et al. Terahertz scattering on rough copper surface[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(1): 36-39, 79.
- [4] 杨璐, 佟倩, 周芷茵, 等. 随机粗糙面穆勒矩阵的数值分析[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(5): 0529002.  
Yang L, Tong Q, Zhou Z Y, et al. Numerical analysis of Mueller matrix for random rough surfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(5): 0529002.
- [5] Ordal M A, Bell R J, Alexander R W, Jr, et al. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W[J]. Applied Optics, 1985, 24(24): 4493-4499.
- [6] Ordal M A, Bell R J, Alexander R W, Jr, et al. Optical properties of Al, Fe, Ti, Ta, W, and Mo at submillimeter wavelengths[J]. Applied Optics, 1988, 27(6): 1203-1209.
- [7] Markovic M I, Rakić A D. Determination of the reflection coefficients of laser light of wavelengths  $\lambda \in (0.22 \mu\text{m}, 200 \mu\text{m})$  from the surface of aluminum using the Lorentz-Drude model[J]. Applied Optics, 1990, 29(24): 3479-3483.
- [8] 王宏强, 王瑞君, 邓彬, 等. 太赫兹频段目标散射特性技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 29-31.  
Wang H Q, Wang R J, Deng B, et al. Techniques for target scattering characteristics in the terahertz band[M]. Beijing: Science Press, 2020: 29-31.
- [9] Jagannathan A, Gatesman A J, Giles R H. Characterization of roughness parameters of metallic surfaces using terahertz reflection spectra[J]. Optics Letters, 2009, 34(13): 1927-1929.
- [10] DiGiovanni D A, Gatesman A J, Goyette T M, et al. Surface and volumetric backscattering between 100 GHz and 1.6 THz[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9078: 90780A.
- [11] 史杰, 钟凯, 刘楚, 等. 太赫兹频段金属粗糙表面散射特性[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1217004.  
Shi J, Zhong K, Liu C, et al. Scattering properties of rough metal surface in terahertz region[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1217004.
- [12] 王瑞君, 高敬坤, 周峰. 太赫兹频段粗糙目标散射中心建模研究[J]. 微波学报, 2021, 37(5): 34-38, 45.  
Wang R J, Gao J K, Zhou F. Research on scattering center modeling of rough targets in terahertz band[J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(5): 34-38, 45.
- [13] 王瑞君, 高敬坤, 邓彬, 等. 一种太赫兹频段粗糙凸体目标散射计算方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(6): 903-908.  
Wang R J, Gao J K, Deng B, et al. Scattering computation of rough convex targets at terahertz frequencies based on full-wave method[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(6): 903-908.
- [14] 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 J K, Deng B, Qin Y L, 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.
- [15] 张猛, 张晓莉, 金钊, 等. 米散射激光雷达降噪反演算法研究和应用[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(20): 2028011.  
Zhang M, Zhang X L, Jin Z, et al. Research and application of denoising algorithm for Mie lidar signal [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(20): 2028011.
- [16] 方宇杰, 王霞, 苏秉华. 基于遗传-反卷积算法的飞行时间测距相机非视域成像[J]. 光学学报, 2023, 43(21): 2111002.  
Fang Y J, Wang X, Su B H. Reconstruction of non-line-of-sight depth data using genetic algorithm Lucy-Richardson based on time of flight camera[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(21): 2111002.
- [17] Ilya S, James M, George D, et al. On the importance of initialization and momentum in deep learning[EB/OL]. [2023-11-09]. <https://www.cs.toronto.edu/~fritz/absps/momentum.pdf>.
- [18] Zhang J, Zhang Q, Zhang H, et al. Optimization of Drude model with simulated annealing algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1159: 032003.
- [19] Chen Y, Qian H. Genetic algorithm for fitting drude model: a review[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1159: 032001.
- [20] 包子阳, 余继周, 杨杉. 智能优化算法及其MATLAB实例[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2018: 9-19.  
Bao Z Y, Yu J Z, Yang S. Intelligent optimization algorithm and MATLAB example[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018: 9-19.
- [21] 陈秉乾, 王稼军, 程福臻. Drude的金属经典电子论(1900)与超导体的London方程(1935)[J]. 大学物理, 2007, 26(11): 8-10.  
Chen B Q, Wang J J, Cheng F Z. Drude classical electron theory of metal (1900) and London equation (1935) of superconductor[J]. College Physics, 2007, 26(11): 8-10.



- [22] Beckmann P, Spizzichino A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2009, 23(1): 87-98.
- [23] 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 L X, Wang R, Wu Z S. Basic theory and method of random rough surface scattering[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [24] Hastings F D, Schneider J B, Broschat S L. A Monte-Carlo FDTD technique for rough surface scattering[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, 43(11): 1183-1191.
- [25] 梁达川, 魏明贵, 谷建强, 等. 缩比模型的宽频时域太赫兹雷达散射截面(RCS)研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(21): 214102.  
Liang D C, Wei M G, Gu J Q, et al. Broad-band time domain terahertz radar cross-section research in scale models[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 214102.
- [26] Liu T, Li J, Pi Y M, et al. Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering target with distributed high resolution radars[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, 12(2): 025009.