

太赫兹频段粗糙目标散射中心建模研究*

王瑞君¹ 高敬坤² 周峰¹

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 西安 710043; 2. 北京天绘卫星中心, 北京 100192)

摘要: 太赫兹雷达可获取目标的精细散射特征信息, 对于目标探测、成像和识别具有重要意义。针对太赫兹频段雷达目标散射中心建模问题进行讨论, 分析了散射中心模型、目标回波和目标图像之间的内在物理关系, 并基于粗糙面散射理论中的全波方法和信号处理中的滤波方法提出一种构建目标散射中心模型的方法, 可同时描述粗糙目标的传统相干散射中心和非相干面散射行为, 为太赫兹频段粗糙目标的散射回波仿真提供了一种有效的描述手段。

关键词: 太赫兹, 粗糙目标, 散射中心建模, 全波法

Research on Scattering Center Modeling of Rough Targets in Terahertz Band

WANG Rui-jun¹, GAO Jing-kun², ZHOU Feng¹

(1. College of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710043, China;

2. Tianhui Satellite Center, Beijing 100192, China)

Abstract: Terahertz radar can obtain the detailed scattering feature of targets, which is of great significance for target detection, imaging and recognition. In this paper, the scattering center modeling of radar target in terahertz band is discussed. The inherent physical relationship among the scattering center model, the target echo and the target imaging result is analyzed. A new method of target scattering center modeling is proposed based on the full wave approach(FWA) and the signal filtering method, which can describe both the traditional coherent scattering center and the non-coherent scattering behavior of rough targets. The method provides an effective description for the scattering echo simulation of rough targets in terahertz band.

Key words: terahertz, rough target, scattering center modeling, full-wave approach

引言

随着雷达工作频段的提高, 雷达成像的分辨率也越来越高, 目标更加丰富的电磁散射特性得以更加精细地展现。特别是在太赫兹频段, 通过高分辨雷达成像技术可以获取目标更多、更丰富的散射特征信息, 包括目标的轮廓、细微结构和表面分布等特征^[1]。目标散射中心模型的提出为描述实际目标的电磁散射提供了有效的途径, 它反映了光学区目标的散射特性, 是目标特性分析和目标识别的基础。复杂目标的散射中心模型研究在高分辨率成像、雷达探测、目标识别等领域有重要的应用价值^[2]。同样, 在太赫兹频段, 目标的散射中心建模研究对于目标散射特性分析、太赫兹雷达回波快速生成和目标

识别等具有重要意义。

前期的相关研究发现^[3-4], 在太赫兹频段, 目标散射中心模型既会包含传统类型散射中心, 比如分布型散射中心(平板反射、直劈绕射、圆柱单曲面反射)、滑动型散射中心(双曲面反射、曲边绕射)和局部型散射中心(尖顶绕射)等, 又会包含由粗糙表面产生的难以直接采用传统散射中心模型描述的复杂散射分量, 而且这些散射分量的散射机理尚无解析表达式来表示。

本文针对太赫兹频段粗糙目标的复杂散射机理, 对粗糙表面目标散射中心建模问题进行探讨, 并尝试基于粗糙面理论中的全波方法^[5]和信号处理中的滤波方法来构建目标散射中心模型, 并最终提供一种描述太赫兹频段粗糙目标散射回波的有效手段。

1 粗糙目标散射中心建模分析

根据电磁散射理论,在光学区,目标总的电磁散射可表示为若干散射中心散射贡献的相干叠加,而每一个散射中心都对应着特定的电磁散射机理,如镜面反射、边缘绕射、爬行波、尖顶绕射、多次散射等,通常这些机理产生于目标外形上的驻相点或不连续处。由于每种机理成分可表示成雷达参数(频率、极化、视线角)和目标参数(几何、材料)的解析表达式,因此,从散射机理出发,建立与姿态、频率、极化以及目标结构等因素关联的且具有宽适应性的散射中心参数化模型,并据此提取可用于目标识别的特征,是散射中心研究的主要内容。

在太赫兹频段,由于目标表面的粗糙结构特征变得更加明显,除了传统的典型散射机理外,粗糙表面引起的散射机理也变得不可忽视,目标表面的随机粗糙结构特征在太赫兹相干成像中表现为相干斑^[6],相干斑同其他散射机理一起共同作用一方面导致目标的图像细节发生变化和模糊、另一方面却能描述目标的纹理结构特征和目标轮廓信息,使得目标图像接近于类光学图像,为目标识别带来好处^[7-8]。但是,对于相干斑散射机理的描述难以直接采用传统散射中心模型,给出其随频率、极化、姿态角和目标参数的解析表达式。

在散射中心模型中,“中心”的概念与目标的雷达图像呈明显的点状特征密切相关。散射中心既和电磁散射规律相关,又和雷达成像结果紧密联系。因此可以从雷达图像的角度出发来描述散射中心模型。根据雷达成像原理,在远场条件下,散射回波在笛卡尔坐标系中插值后,它与图像间是一对傅里叶变换对,这里图像是指包含相位的复数图像。由此,假设已知目标在一定角度范围和频带范围中的散射回波时,便可以利用傅里叶变换快速得到其散射中心的空间分布。图像中的每个像素点均代表一个理想型点散射中心,其幅度和相位就是该散射中心的幅度和相位。此时,再通过傅里叶逆变换,若不考虑插值的误差,则可以精确地得到目标在空间的散射场分布。而散射中心模型中,包含了一定程度的近似,因此,也可以根据需要将图像中较弱的散射点略去,仅保留主要的散射中心,这时复数图像就表征了目标的散射中心模型。

从散射中心建模为目标回波快速模拟服务的角度来看,针对粗糙目标,可将其散射特性建模为相干散射分量和非相干散射分量,其中相干散射可由传

统散射中心模型去描述,其基本散射机理仍包含传统的平板反射、直劈绕射、单曲面反射、双曲面反射、曲边绕射和尖顶绕射等,但这些散射分量的强度会受到一定的调制而减弱。重点在于对非相干散射分量部分所表示的散射机理进行建模。下面主要尝试基于粗糙面散射理论中的全波方法和信号处理中的滤波方法来构建目标散射中心模型,为粗糙目标的散射回波提供一种有效的描述手段。

2 太赫兹频段粗糙目标散射中心建模

2.1 基于全波方法的目标散射场建模

针对粗糙面散射问题的全波方法,是由美国学者 E. Bahar 最早提出的,它是一种可解决任意材料、任意粗糙度的粗糙面散射问题的计算方法。

对于如图 1 所示的粗糙面, $y = h(x, z)$, 全波法中粗糙面的散射系数表示式如下^[5]:

$$\langle \sigma^{PQ} \rangle_U = \int A^{PQ}(\mathbf{n}^f, \mathbf{n}^i, \mathbf{n}) p(\mathbf{n}) d\mathbf{n} \left[Q(\mathbf{n}^f, \mathbf{n}^i) + \frac{1}{A_y} \left| \int v_y \mathcal{X} \exp(iv_x x + iv_z z) dx dz \right|^2 \right] \quad (1)$$

上式中的各项定义如下:

$$A^{PQ}(\mathbf{n}^f, \mathbf{n}^i, \mathbf{n}) = \frac{1}{\pi} \left| \frac{k_0 D^{PQ}}{v_y \mathbf{n} \cdot \mathbf{a}_y} \right|^2 P_2 \quad (2)$$

其中,角标 P 和 Q 分别表示不同极化方式(V 或 H), k_0 为自由空间波数, \mathbf{n}^i 、 \mathbf{n}^f 和 \mathbf{n} 分别为入射场单位向量、散射场单位向量和粗糙面局部法矢量,且满足以下关系:

$$\mathbf{v} = (\mathbf{n}^f - \mathbf{n}^i) k_0 = v_x \mathbf{a}_x + v_y \mathbf{a}_y + v_z \mathbf{a}_z = \mathbf{k}_0^f - \mathbf{k}_0^i \quad (3)$$

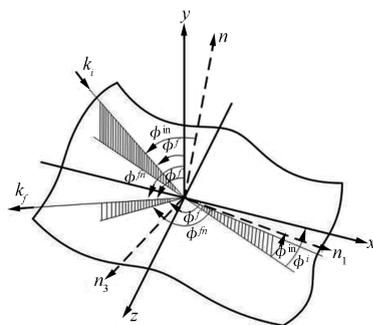


图 1 全波法坐标系定义

散射矩阵 D 中不同极化方式下的各项均为入射场单位向量、散射场单位向量和粗糙面局部法矢量的函数。

$$D(\mathbf{n}^f, \mathbf{n}^i) = \begin{bmatrix} D^{VV} & D^{VH} \\ D^{HV} & D^{HH} \end{bmatrix} = (-\mathbf{n}^i \cdot \mathbf{n}) T^f F T^i \quad (4)$$

其中, \mathbf{T}^f 和 \mathbf{T}^i 分别为粗糙面局部坐标系与全部坐标系之间的坐标变换矩阵。式(2)中遮蔽函数 P_2 在单站情况下的计算可根据 \mathbf{n} 的统计分布进行化简。

$$Q(\mathbf{n}^f, \mathbf{n}^i) = v_y^2 \int (\chi_2 - |\chi|^2) \exp(i\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}_d) dx_d dz_d \quad (5)$$

其中, $\mathbf{r}_d \approx (x-x')\mathbf{a}_x + (z-z')\mathbf{a}_z$ 表示粗糙面上任意两点之间的距离矢量。粗糙表面特征函数 χ_2 和 χ 是粗糙参数的函数。

$$p(\mathbf{n}) d\mathbf{n} = p(h_x, h_z) dh_x dh_z \quad (6)$$

$p(h_x, h_z)$ 表示粗糙面上任意两点的联合概率密度函数, 且假设 $h(x, z)$ 和 $h'(x', z')$ 的概率密度函数是统计独立的。式(6)中被积函数在高斯表面假设下的表示式为:

$$p(h_x, h_z) = \frac{1}{2\pi\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{h_x^2 + h_z^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (7)$$

其中,

$$\sigma_n^2 = \frac{\pi}{2} \int_0^{+\infty} W(k) k^3 dk, h_x = \frac{\partial h}{\partial x}, h_z = \frac{\partial h}{\partial z} \quad (8)$$

不同类型相关函数对应的功率谱函数不同, 前面已假设粗糙面为高斯粗糙表面, 此处再假设粗糙表面各向同性, 则功率谱函数为

$$W(k) = \frac{h^2 l}{\sqrt{4\pi}} \exp\left(-\frac{k^2 l^2}{4}\right) \quad (9)$$

因此, 式(1)可进一步写为以下形式:

$$\langle \sigma^{PQ} \rangle_v = \int A^{PQ}(\mathbf{n}^f, \mathbf{n}^i, \mathbf{n}) p(\mathbf{n}) d\mathbf{n} \left[Q(\mathbf{n}^f, \mathbf{n}^i) + A_y |v_y \chi|^2 \text{sinc}^2(v_x L_x) \text{sinc}^2(v_z L_z) \right] \quad (10)$$

式(10)是将式(1)中第二项积分式(对应散射场中的相干分量)化简的结果, 这一简化已默认积分区域为矩形。由此亦可见, 散射场中的相干分量是依赖于目标的具体形状的, 且其求解的核心过程为式(1)中的第二项积分项的求解。这与物理光学近似下的高频计算方法十分相似, 唯一不同是积分项外的系数。在进行粗糙目标的相干场分量计算时, 这一积分结果还需受到粗糙参数的调制, 即表面越粗糙相干分量越小。当粗糙特征函数 $\chi \rightarrow 0$ 时, 这一积分项也趋于0。

可见, 式(1)括号中的第一项和第二项分别对应了散射系数的非相干分量与相干分量。利用上述

的粗糙面散射理论, 可以从能量和统计的角度描述粗糙面散射的相干与非相干分量的大小。

然而对于散射中心的刻画, 仅有这一信息是不够的。由于散射中心描述的场需支持后续的成像处理, 因此散射场的相位信息至关重要。根据将散射场分为相干散射场与非相干散射场的思路, 将粗糙面的散射场表示如下:

$$E_{\text{total}}^S = E_{\text{coherent}}^S + E_{\text{incoherent}}^S \quad (11)$$

其中, E_{coherent}^S 的幅度可由粗糙面理论计算所得相干散射的能量值求得, 相位则利用经典的散射场 Gordon 公式求得。 $E_{\text{incoherent}}^S$ 的幅度亦可用粗糙面理论求得, 下面重点讨论这一项相位的求取方法。

为方便起见, 针对如图2所示的粗糙圆板模型及相应的观测几何来讨论。假设固定观测俯仰角, 方位角在 360° 中变化。在这种情况下, 对同一粗糙圆板在不同方位角下的观测可近似视为对同一粗糙参数下不同样本的观测, 此时, 非相干散射场的幅度与相位随频率和角度变化具有很强的随机性。从信息论的角度看, 这种随机性恰恰说明了散射场中包含了丰富的信息, 而这些信息则由具体的样本决定。同一粗糙参数下的不同样本对应的散射场亦具有显著差异, 而只在统计意义下服从若干相似的规律。因此, 只有确定了样本的所有参数, 才可能计算得到其对应的准确的散射场。或者说, 一旦给出了非相干散射场的具体相位, 则其一定对应于某个具体样本。然而, 在研究中, 并不关心样本间的差异性, 而只关注对于单个样本而言能否提供合理的、满足真实散射条件的散射场, 以及多个样本的散射场是否仍满足粗糙面理论统计意义下的解。

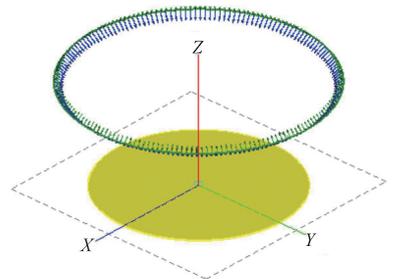


图2 粗糙圆板多样本观测几何关系示意图

2.2 滤波过程

将粗糙圆板散射回波随频率和方位角度的变化过程建模为平稳随机过程, 这样建模的合理性在于, 不同方位角下的观测可近似视为同一方位角对不同样本的观测, 而所有样本均由相同的粗糙参数生成,

于是各方位观测数据服从相同的统计分布,且其相关性强弱仅与角度间隔有关而与观测角的绝对大小无关。对于实际的复杂目标,散射回波随频率和观测角度的变化应为更一般的复杂的非平稳随机过程,这种更复杂的散射模型可以平稳随机过程为基础推广得到,这里主要详细介绍基于平稳随机过程的粗糙目标散射回波建模方法。

同样以粗糙圆板观测模型为例对建模方法进行说明。

2.2.1 距离向滤波

距离向是指散射场随频率变化而变化的一维,距离向滤波的含义是施加各频点数据间的相关性,从而使其保持与真实目标几何结构的一致性。对于圆板目标,距离向滤波的表达如下:

$$s_{\varphi}(k) = \text{FT}_r \left(\text{IFT}_k(n_{\varphi}(k)) \right) \cdot \left(\text{rect} \left(\frac{r}{D \cdot \sin(\theta)} \right) \cdot \text{sinc}((k_{\max} - k_{\min})r) \right) \quad (12)$$

其中, $n_{\varphi}(k)$ 为给定方位角下的波数域随机白噪声, D 为圆板直径, φ 为方位角, θ 为俯仰角, k_{\max}, k_{\min} 分别为最大波数和最小波数, r 为与波数 k 对应的矢径大小, FT 和 IFT 分别表示正/逆傅里叶变换。

2.2.2 多普勒向滤波

多普勒向是指散射场随角度变化而变化的一维,对于单频点而言,散射场的幅度与相位因观测角度而发生的变化并非无章可循,而是相互依赖的,数据间具有一定的相关性。这种相互依赖体现在散射数据的多普勒带宽是有限的,具体对于前述的粗糙圆板模型而言,散射数据随方位角的多普勒带宽由频率、俯仰角、圆板半径决定。考虑圆板目标的方位最大尺寸为 D , 即圆板直径,方位向(多普勒向)滤波的表达如下:

$$s_k(\varphi) = \text{FT}_{\phi} \left(\text{IFT}_{\varphi}(n_k(\varphi)) \cdot \text{rect} \left(\frac{2\pi\phi}{D\Delta\varphi k \sin\theta} \right) \right) \quad (13)$$

其中, $n_k(\varphi)$ 为给定波数 k 下的方位向随机白噪声, ϕ 与 φ 互为对偶变量, $\Delta\varphi$ 为方位角的采样间隔。

2.2.3 距离多普勒联合滤波

对距离向和多普勒向进行二维联合滤波,其具体含义是,某一距离单元中的多普勒带宽同样需满足目标几何结构的限制。对于上述圆板,在俯仰角固定时,同一距离单元中的目标横向宽度在不同方

位角下保持不变,因而同一距离单元内的多普勒带宽亦保持不变。某距离单元内的多普勒带宽由频率、俯仰角、该距离单元内目标的横向宽度决定。

距离多普勒联合滤波的表达式如下:

$$s(k, \varphi) = \text{FT}_{r, \phi} \left(\text{IFT}_{\varphi} \left(\text{IFT}_k(n(k, \varphi)) \cdot \left(\text{rect} \left(\frac{r}{D \sin(\theta)} \right) \cdot \text{sinc}((k_{\max} - k_{\min})r) \right) \right) \cdot \text{rect} \left(\frac{2\pi\phi}{\sqrt{D^2 - 4r^2} \Delta\varphi k \sin\theta} \right) \right) \quad (14)$$

其中, $n(k, \varphi)$ 为关于波数和方位角的二维随机白噪声。

对于随机粗糙圆板目标的散射回波 $s(k, \varphi)$, 经过如上所述的三重滤波后,即加入了圆板形状目标对随机散射场的调制信息,所得仿真散射场或散射回波可用作后续雷达成像等处理的输入。

对于一般目标散射中心的建模方法,可利用上面的平稳随机过程模型推广得到,其建模过程同样可以分为距离向滤波、多普勒向滤波和距离多普勒联合滤波三个步骤,其区别在于,此时的滤波过程不再是时空不变的线性系统,而是一个时空变非线性系统。

当前模型尚不能考虑对图像中纹理信息等涉及像素空间相关性的特征的描述,这是模型需要进一步完善的方向。另外,由建模过程也可看出,对粗糙目标散射回波的建模存在着最简建模复杂度的问题,也就是说,与光滑目标的散射不同,粗糙目标的散射是一个非常复杂的过程。光滑目标的散射可以用形式简单的指数项求和式表达,从信号的角度看,每个指数项代表一个窄带的单频信号,少数指数项的和仍然具有频域的稀疏性,因此其散射模型具有解析且简洁的形式。对于粗糙目标,散射点数量急剧增加,仍从信号的角度解释,则散射点数量的增加亦代表了图像带宽、信息量的增加与稀疏性的减弱。在这种情况下,是否能用简洁如光滑目标散射中心模型的表达式来描述粗糙目标的散射行为,其结论并非显而易见,由此也就引出了散射中心模型的最简复杂度问题。根据目前研究进展,一般认为粗糙目标不再具有类似的简洁的解析的表示式,其模型的复杂度需包含描述复杂的面散射行为的能力,本文所描述的建模方法,正是对粗糙目标这种既包含非相干的面散射又包含相干的边缘散射的一种描述手段。

3 仿真结果分析

对于论文描述的粗糙目标散射中心模型,下面通过对散射中心模型生成的回波进行可视化处理,即利用图像域仿真结果来验证模型的有效性。

成像观测几何如图2所示,观测俯仰角为 50° ,方位角范围为 $0\sim 360^\circ$,角度间隔 0.5° ,频率范围为 $280\sim 320\text{ GHz}$,间隔 2 GHz 。粗糙圆板直径为 4 cm ,仿真规模约为 $40\lambda\times 40\lambda$ 。不同粗糙参数的粗糙圆板的成像结果如图3所示。

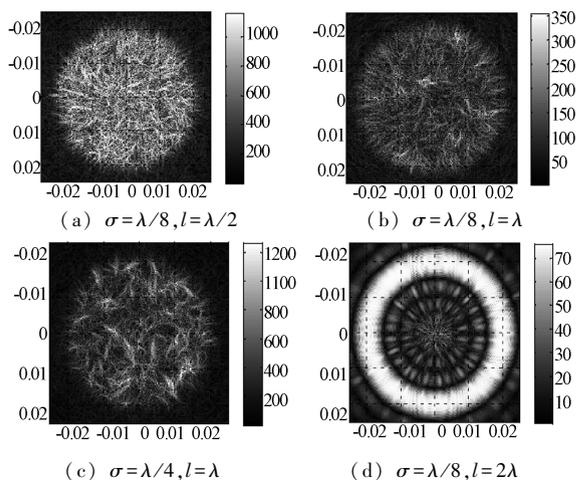


图3 不同粗糙参数圆板成像结果

仿真时假设平面波照射,因此散射场中包含了面散射分量和边缘绕射分量。对比图3(a)~(d)可以看出,当粗糙度 σ 较大、相关长度 l 较小时,成像结果是明暗相间的圆板形状,表明这时目标以非相干的面散射为主,散射分量贡献主要来自于粗糙表面区域;当相关长度增加、粗糙度减小时,粗糙面边缘逐渐呈现出清晰的确定性的环状结构,表明随着圆板变得光滑,相干散射分量占总散射分量的比重不断增加,相干散射分量贡献主要来自于目标上的边缘区域。

图4为粗糙圆板在不同观测俯仰角下的成像结果,可以看出在相干成像方式下,成像结果受到相干斑的影响十分明显,不同俯仰角下图像灰度的明暗交替变化就是相干斑的直接体现。相干斑的存在是由于点扩展函数旁瓣引起,而旁瓣形状与回波波束域支撑区形状有直接关系,因此,图像的特征亦会随着观测方式的变化而变化。

4 讨论

理论和实验研究表明,太赫兹频段目标的粗糙表面和细微结构散射已成为目标散射的重要组成部分

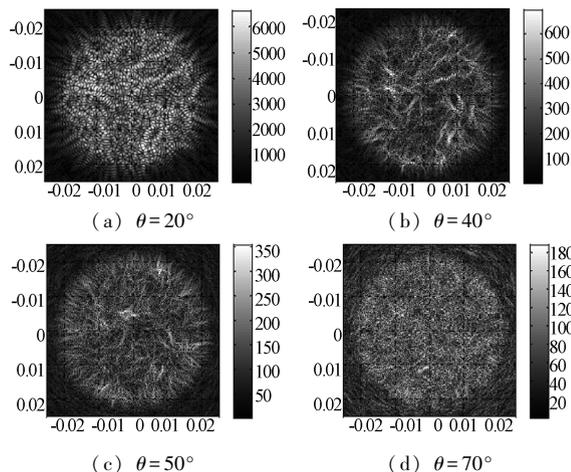


图4 粗糙圆板($\sigma=\lambda/8, l=\lambda$)不同俯仰角下成像结果

分,但现有的散射中心模型还难以准确描述这些散射分量,这为目标回波模拟和太赫兹雷达信号处理应用研究带来困难。

目前的散射中心模型大都是对金属目标典型结构散射的描述,在太赫兹频段,目标的材料特性发生变化,目标结构虽仍包含有典型结构,但复杂粗糙结构更加普遍,因此难以利用典型结构的散射中心模型去描述,为了实现太赫兹雷达目标的散射中心建模,需要从不同角度提出新的思路和方法。

本文提出了一种太赫兹频段粗糙目标散射中心建模方法,但太赫兹频段目标散射中心描述的雷达目标散射特性还要满足精确性的要求,这样才能逼真地模拟真实目标散射场回波,这需要进一步对散射中心模型精确性与相干散射/非相干散射建模关系进行研究,并建立散射中心模型精确性验证方法和衡量指标。

太赫兹散射中心建模研究还需处理好确定性与统计性之间的关系,一般研究粗糙面的散射需要使用统计方法,但是在研究中,并不考察多个粗糙样本间的差异性,而只关注对于单个样本而言能否提供合理的、满足真实散射的散射中心模型或者散射场,以及多个样本是否符合统计特性。

参考文献

- [1] 殷红成,郭琨毅. 目标电磁散射特性研究的若干热点和难点问题[J]. 电波科学学报, 2020, 35(1): 128-134
Yin H C, Guo K Y. Hot-topics and difficult problems in the research filed of electromagnetic scattering characteristics of targets[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2020, 35(1): 128-134

