

任意多次散射机理的GTD散射中心模型频率依赖因子表达

闫 华* 张 磊 陆金文 邢笑宇 李 胜 殷红成

(电磁散射重点实验室 北京 100854)

摘 要: 几何绕射理论(GTD)模型是一种重要的散射中心模型,能准确描述雷达目标主要散射机理的频率依赖行为,但目前在频率依赖因子与散射机理类型之间尚未建立明确、一般的数学关系。该文从射线理论出发,结合几何光学(GO), GTD, 物理绕射理论(PTD)和驻相法(SPM)等方法,推导了理想电导体(PEC)目标任意多次散射机理的频率依赖因子数学表达式。该表达式具有简洁、统一的解析形式,指出散射中心频率依赖因子与形成散射中心的射线反射次数、射线经过的几何元素维数以及射线场焦散情况等因素有关。一系列典型组合体目标的电磁仿真与微波暗室测量数据验证了提出公式的有效性。该文提出的频率依赖因子表达可应用于正向参数化建模中频率依赖因子的正向推算。

关键词: 散射中心模型; 多次散射机理; GTD模型; 频率依赖因子

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2021)03-0370-12

DOI: 10.12000/JR21005

引用格式: 闫华, 张磊, 陆金文, 等. 任意多次散射机理的GTD散射中心模型频率依赖因子表达[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 370–381. doi: 10.12000/JR21005.

Reference format: YAN Hua, ZHANG Lei, LU Jinwen, *et al.* Frequency-dependent factor expression of GTD scattering center model for the arbitrary multiple scattering mechanism[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(3): 370–381. doi: 10.12000/JR21005.

Frequency-dependent Factor Expression of the GTD Scattering Center Model for the Arbitrary Multiple Scattering Mechanism

YAN Hua* ZHANG Lei LU Jinwen XING Xiaoyu

LI Sheng YIN Hongcheng

(*Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China*)

Abstract: This paper presents a derivation of a formula with a concise and uniform analytic form by the Stationary Phase Method (SPM) plus Geometrical Optics (GO), the Physical Theory of Diffraction (PTD), and Geometrical Theory of Diffraction (GTD) to calculate the frequency-dependent factor for the arbitrary multiple scattering mechanism, validated by the simulated and measured data of a series of canonical ensembles, validated by the simulated and measured data of a series of canonical ensembles. Although the GTD model, a scattering center model, can accurately describe the frequency-dependent characteristic of several main scattering mechanisms of the radar target, no explicit and general expression relates the frequency-dependent factor to the type of scattering mechanism. The derived formula relates the scattering center's frequency-dependent factor with bounce times, dimensions of all the encountered geometrical elements, and a caustic type of ray contributing to the scattering center and can be applied to determine the parameter value of frequency-dependent factor of the GTD model and its derived versions in the forward parametric modeling.

Key words: Scattering center model; Multiple scattering mechanism; GTD model; Frequency-dependent factor

收稿日期: 2021-01-11; 改回日期: 2021-03-01; 网络出版: 2021-03-23

*通信作者: 闫华 yanhuaibit@126.com *Corresponding Author: YAN Hua, yanhuaibit@126.com

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0825804)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (2018YFC0825804)

责任主编: 朱国强 Corresponding Editor: ZHU Guoqiang

1 引言

当雷达目标尺寸远大于电磁波波长时，其总散射响应可看成若干局部等效散射源响应的相干叠加，这些等效散射源称为目标的散射中心^[1,2]。为了表达目标散射中心，目前已发展了一系列参数化的形式^[3-13]，它们具有简洁、稀疏、机理相关等优点，在雷达目标的数据压缩^[14,15]、信号仿真^[16]、超分辨率成像^[17]、特征控制^[18]和目标识别^[15,19,20]等领域已获得广泛应用。

散射中心参数化模型试图描述散射中心的频率、视向角、极化等参数的依赖行为。最简单的散射中心模型为理想点散射中心模型，它将散射中心的幅度与位置视为常数，即不随频率和视向角变化。1987年，Hurst等人^[3]提出了散射中心的Prony模型，将散射中心的幅度描述成频率的衰减指数函数的形式。但当雷达带宽较大时，此形式将偏离实际散射中心的频率依赖行为。1991年，Carrière等人^[4]总结了球、柱、直边、曲边、三面角、二面角等典型体的近似散射解形式以及它们的频率依赖关系，提出了基于几何绕射理论(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)的模型，指出散射中心幅度对频率的依赖应该满足幂函数关系，而不是衰减指数函数关系。1995年，Potter等人^[5]基于物理光学(Physical Optics, PO)和GTD理论分析了若干主要散射机理，最终导出了GTD模型，并通过与传统参数化模型进行对比分析，指出GTD模型在分辨能力和统计性能上具有的优越性。随后人们在GTD模型的基础上发展了若干新的参数化模型，如极化GTD模型^[6-8]、多项式GTD模型^[9]、属性散射中心(Attributed Scattering Center, ASC)模型^[10]、改进的ASC模型^[11-13]等。它们均继承了GTD模型的频率依赖关系，并进一步扩展了对角度依赖或极化依赖的表达。因此，GTD模型在参数化模型发展过程中具有十分重要的意义，其有效性在实际应用中也得到了充分的验证。

GTD模型有3个方面的优点。(1)GTD模型保持了传统理想点模型和Prony模型的简洁性与稀疏性，因而参数反演相对容易，且可实现超分辨性能^[5]；(2)模型中频率的幂函数指数也称为频率依赖因子，只能取若干离散的半整数值，而不同取值对应着不同的散射机理类型，因此具有十分明确的物理意义，作为识别特征可显著提升目标识别正确率^[20]，而且使基于该模型的估计算法具有更优的统计性能^[5]；(3)GTD模型能够反映散射中心在较大带宽范围内的频率依赖行为，可实现目标散射数据的高度压缩与频率外推^[15]。

目前人们对GTD模型频率依赖因子的物理内涵的理解仍然不够深入，尚未在频率依赖因子与散射机理/结构类型之间建立起明确的数学关系。Potter等人^[5]在其文章中只是以表格形式列举了若干频率依赖因子取值与散射机理类型的关系(见表1)，列举的散射机理类型有限，尤其是关于多次散射机理只给出了二面角、三面角两种情形，远远不能涵盖实际复杂目标的机理类型。尽管本文作者在前期工作中^[21,22]研究了单站情形下包含镜面反射与边缘绕射的15种二次散射机理，给出了更多机理类型的频率依赖因子取值，但对于更为一般的任意多次散射机理，其频率依赖因子应该如何取值，或者是否存在明确的数学表达，目前尚无相关工作予以讨论。

近年来，出现了一种新的参数化建模技术——正向参数化建模方法^[23-26]。与传统的逆向方法不同，正向方法不采用参数估计或反演方式，而是基于电磁散射机理的先验知识与电磁建模技术来正向推算模型参数。例如，He等人^[23]提出了基于若干典型结构的频率依赖因子正向推算方法；Li等人^[24]基于表面电流分布确定散射中心模型参数。尽管如此，由于缺乏明确且通用的多次散射机理频率依赖因子数学表达，这些方法只能解决若干特殊典型结构频率依赖因子的正向推算，难以推广至任意多次散射机理或结构情形，有时甚至需要通过人工辅助来进行判断，这大大限制了正向建模方法的适用范围和工程实用性。因此，建立任意多次散射机理的散射中心频率依赖因子表达对正向建模技术具有十分重要的意义。

针对上述问题，本文将从射线理论出发，建立单站情形下任意多次散射机理的目标散射中心频率依赖因子的明确数学表达。本文后续内容安排如下：(1)给出非焦散情形下单次反射/绕射机理的GO/GTD模型及其频率依赖关系；(2)进一步将其推广至任意多次反射/绕射机理情形，建立非焦散情形下多次反射/绕射机理的频率依赖关系；(3)通过多次散射的几何光学/几何绕射理论-物理绕射理论(GO/GTD-PTD)混合方法与驻相法(Stationary

表 1 GTD模型频率依赖因子取值及其对应的散射机理类型

Tab. 1 The values of frequency-dependent factor of GTD model and corresponding mechanisms

频率依赖因子取值	散射机理类型
1	平板、二面角、三面角的反射
1/2	单弯曲曲面的反射
0	双弯曲曲面的反射、直边的绕射
-1/2	曲边的绕射
-1	尖顶、角的绕射

Phase Method, SPM), 推导任意多次散射机理形成散射中心的频率依赖公式; (4)通过一系列典型组合体目标的仿真实验和微波暗室测量试验获得的目标散射数据, 对本文提出的频率依赖因子数学表达式进行验证。

2 任意多次散射机理形成散射中心的频率依赖因子计算公式

根据射线理论, 电磁波可以通过一簇几何射线管来描述, 而电磁波的传播与散射则看成是各个射线管在空间传播以及在物体表面发生反射、透射、绕射的结果。射线的传播、反射、透射可通过GO来计算^[27], 射线的绕射可通过GTD^[1,28]或一致绕射理论(Uniform Geometrical Theory of Diffraction, UTD)^[29]来计算。假设本文考虑的目标为表面分片光滑的理想电导体(Perfect Electric Conductor, PEC)且电尺寸足够大, 电磁波在目标表面的透射和曲面绕射(即爬行波)可忽略不计, 则考虑的主要单次散射机理包括镜面反射、边缘绕射、尖角/顶绕射。对复杂目标来说, 还要考虑多次散射机理, 即电磁波或射线经历多次反射或绕射的传输过程。多次散射射线场可综合GO和GTD/UTD进行计算。需要注意的是, GO, GTD, UTD等射线理论存在焦散点处场值发散的问题。PO^[2,28,30]和物理绕射理论(Physical Theory of Diffraction, PTD)^[28,31]能有效解决射线理论中焦散区场值发散的问题。为了解决多次散射射线在焦散区场值发散的问题, 有学者提出了混合GO-PO方法^[32], 即对于在目标表面弹跳总次数为 N 的射线管, 前 $N-1$ 次反射采用GO方法计算, 获得第 N 次反射处的入射场, 最后一次反射以及传播到场点的计算则采用PO方法。本文将其拓展至包含绕射的情形, 即前 $N-1$ 次反射/绕射采用GO/GTD方法计算, 最后一次反射/绕射则采用PTD方法计算, 称为GO/GTD-PTD方法。其中, 目标的PTD解由PO积分加上边缘修正的等效边缘电流(Equivalent Edge Current, EEC)^[31]积分来计算。

目标的每一种单次或多次机理成分将形成特定的散射中心, 其表达式可采用驻相法(SPM)^[27,31,32]求解PO/PTD积分来获得。下面将采用GO/GTD-PTD-SPM方法来考察不同散射机理形成的散射中心的频率依赖性。本文只考虑远场情形, 即发射和接收离目标足够远(两个距离均满足 $\gg d^2/\lambda$, d 为目标尺寸, λ 为波长)。

2.1 非焦散情形下单次反射/绕射机理的GO/GTD模型及其频率依赖关系

假设一簇射线管入射到一个分片光滑曲面目标

的表面之上, 可能被曲面反射, 或被边缘绕射, 或被尖顶/角绕射, 分别对应着3种不同的散射机理: 镜面反射机理、边缘绕射机理和尖顶/角绕射机理。根据GO和GTD理论^[1,27,28], 3种散射机理形成的射线场具有不同的频率依赖性: 镜面反射射线场的频率依赖关系为 k^0 ; 边缘绕射射线场的频率依赖关系为 $k^{-1/2}$; 尖顶/角绕射射线场的频率依赖关系为 k^{-1} 。

需要注意的是, 在射线场的焦散区, 由于GO和GTD理论失效, 上述结论不再成立。

2.2 非焦散情形下多次反射/绕射机理的频率依赖关系

现在考虑多次散射机理。设一根射线在目标表面经历了 N 次弹跳。显然, 最终的出射射线场为每次弹跳散射变换函数的连乘。因此出射射线场的频率依赖函数亦为幂函数形式, 且其指数为每次弹跳散射频率依赖因子的总和, 即

$$\mathbf{E}_N^{\text{GO/GTD}}(k) \sim k^{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \quad (1)$$

其中, α_i 为每次弹跳散射变换频率依赖因子。由前面的讨论, 其取值如下:

$$\alpha_i = \begin{cases} 0, & \text{镜面反射} \\ -1/2, & \text{边缘绕射} \\ -1, & \text{尖顶/角绕射} \end{cases} \quad (2)$$

若定义 d_i 为射线的第 i 次被反射或绕射的几何元素的维数, 即

$$d_i = \begin{cases} 2, & \text{面} \\ 1, & \text{边缘} \\ 0, & \text{尖顶/角} \end{cases} \quad (3)$$

则对比式(2)和式(3), 显然有 $\alpha_i = (d_i - 2)/2$ 。于是, 可以将经历了 N 次弹跳的射线场的频率依赖式(1)写为

$$\mathbf{E}_N^{\text{GO/GTD}}(k) \sim k^{\sum_{i=1}^N \frac{d_i - 2}{2}} \quad (4)$$

与单次弹射射线场相同, 式(4)给出的多次射线场的频率依赖性只在非焦散区有效。

2.3 多次散射的GO/GTD-PTD积分公式

为了获得射线场在焦散区的频率依赖关系, 采用GO/GTD-PTD混合方法, 即将PTD应用于由GO/GTD得到的在目标表面发生第 N 次弹跳之前的射线场(即经过 $N-1$ 次弹跳的射线场)。

目标的总散射场可通过对不同弹跳次数射线场在目标表面激发电流的远场积分进行求和而得到^[27,32], 其中激发的电流包括在目标表面激发的面电流和在目标表面边缘上激发的线电流, 其形式如下

$$\mathbf{E}^s = \mathbf{E}_1^s + \mathbf{E}_2^s + \cdots + \mathbf{E}_N^s + \cdots + \mathbf{E}_{N_{\max}}^s \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_N^s &= \mathbf{E}_N^{\text{PO}} + \mathbf{E}_N^{\text{EEC}} \\ &= \frac{jke^{-j2kr}}{4\pi r} \left[\iint_{\Gamma_N} \mathbf{f}_1(\mathbf{x}'_N) e^{jkg(\mathbf{x}'_N)} dS' \right. \\ &\quad \left. + \int_{L_N} \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_N^*) e^{jkg(\mathbf{x}_N^*)} dl^* \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)中, $\mathbf{E}_N^s$ 为所有经历 N 次弹跳射线场的总贡献, $N_{\max}$ 为最大弹跳次数; 式(6)中方括号中第1项对应着面电流的PO积分, 第2项对应着边缘电流的EEC积分; Γ_N 和 L_N 分别为射线在目标表面发生第 N 次弹跳时所照亮的的面区域与边缘线段; 注意, 这里忽略了照亮面与阴影面边界的绕射贡献; 积分变量 $\mathbf{x}'_N$ 和 $\mathbf{x}_N^*$ 分别为 Γ_N 和 L_N 上的位置矢量; 被积函数 $\mathbf{f}_1(\mathbf{x}'_N)$ 和 $\mathbf{f}_2(\mathbf{x}_N^*)$ 与经过 $N-1$ 次弹跳的射线在目标表面的场有关, $g(\cdot)$ 为射线沿传播路径从发射到接收的总路程。

根据PO和EEC积分公式^[26,29], $\mathbf{f}_1(\mathbf{x}'_N)$ 和 $\mathbf{f}_2(\mathbf{x}_N^*)$ 可由下面的式子给出

$$\mathbf{f}_1(\mathbf{x}'_N) = -2[\hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{n}}(\mathbf{x}'_N)] \bar{\mathbf{E}}_N^-(\mathbf{x}'_N) \quad (7)$$

$$\mathbf{f}_2(\mathbf{x}_N^*) = Z_0 \bar{\mathbf{I}}(\mathbf{x}_N^*) \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{t}}^* + \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{x}_N^*) \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{t}}^* \quad (8)$$

$$\bar{\mathbf{I}}(\mathbf{x}_N^*) = -\frac{1}{Z_0} \sqrt{\frac{8\pi}{jk}} \frac{\hat{\mathbf{t}}^* \cdot \bar{\mathbf{E}}_N^-(\mathbf{x}_N^*)}{\sin \beta} D_s \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{x}_N^*) = -Z_0 \sqrt{\frac{8\pi}{jk}} \frac{\hat{\mathbf{t}}^* \cdot \bar{\mathbf{H}}_N^-(\mathbf{x}_N^*)}{\sin \beta} D_h \quad (10)$$

其中, $\hat{\mathbf{r}}$ 为雷达视线矢量; $\hat{\mathbf{n}}$ 为目标表面法矢量; Z_0 为波阻抗; $\bar{\mathbf{I}}$ 和 $\bar{\mathbf{M}}$ 分别为等效边缘电磁流; $\hat{\mathbf{t}}^*$ 为边缘切矢量; $\bar{\mathbf{E}}_N^-$ 为射线在目标表面第 N 次弹跳之前的实值电场矢量, 其复指数相位因子已被提出, 那么由式(4), 其频率依赖函数为

$$\bar{\mathbf{E}}_N^- \sim k \sum_{i=1}^{N-1} \frac{d_i - 2}{2} \quad (11)$$

而 $D_{s,h}$ 为GTD的绕射系数, 它具有 $k^{-1/2}$ 的频率依赖性^[1,28]。再综合式(7)–式(11), 可以推出 $\mathbf{f}_1(\mathbf{x}'_N)$ 和 $\mathbf{f}_2(\mathbf{x}_N^*)$ 的频率依赖函数为

$$\mathbf{f}_1(\mathbf{x}'_N) \sim k \sum_{i=1}^{N-1} \frac{d_i - 2}{2} \quad (12)$$

$$\mathbf{f}_2(\mathbf{x}_N^*) \sim k^{-1 + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{d_i - 2}{2}} \quad (13)$$

2.4 SPM方法与任意多次散射机理形成散射中心的频率依赖公式

利用SPM近似计算积分式(6)的解析形式, 进而获得目标任意多次散射机理形成散射中心的频率

依赖性。设目标表面照亮面 Γ_N 和边缘 L_N 分别表示成下面的参数方程形式

$$\mathbf{x}'_N = \mathbf{x}'_N(u, v), \quad \mathbf{x}_N^* = \mathbf{x}_N^*(t) \quad (14)$$

其中, $(u, v) \in U \subset R^2$ 为曲面参数坐标, U 为定义在二维欧几里得空间上的区域; $t \in T \subset R$ 为曲线参数坐标, T 为定义在一维欧几里得空间上的区间。于是, 照亮面 Γ_N 上的路程函数 $g(\mathbf{x}'_N)$ 可以表示成 (u, v) 的二元函数 $g'(u, v)$ 。为了方便, 我们仍将其表示成 $g(u, v)$; 而边缘 L_N 上的 $g(\mathbf{x}_N^*)$ 可以表示成一元函数 $g(t)$ 。

假设 $g(u, v)$ 和 $g(t)$ 分片/段2阶可导, 则 $g(u, v)$ 与 $g(t)$ 具有下面的泰勒展开式:

$$\begin{aligned} g(u, v) &= g(u_0, v_0) + g_u(u_0, v_0) \Delta u + g_v(u_0, v_0) \Delta v \\ &\quad + \frac{1}{2} [\Delta u \quad \Delta v] \mathbf{Q}(u_0, v_0) [\Delta u \quad \Delta v]^T + o(\rho^2) \end{aligned} \quad (15)$$

$$g(t) = g(t_0) + g_t(t_0) \Delta t + \frac{1}{2} g_{tt}(t_0) \Delta t^2 + o(\Delta t^2) \quad (16)$$

其中, $\Delta u = u - u_0$, $\Delta v = v - v_0$, $\rho = \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}$, $\Delta t = t - t_0$; $g_t(t)$ 为1阶导数, $g_{tt}(t)$ 为2阶导数, $g_u(u, v)$, $g_v(u, v)$ 为1阶偏导, $\mathbf{Q}(u, v)$ 为Hessian矩阵, 其4个矩阵元 $g_{\alpha\beta}$ 为 g 对 u, v 的2阶偏导。

根据矩阵 $\mathbf{Q}(u, v)$ 的秩(记为 $\text{rank}(\mathbf{Q})$) 不同, 下面分3种情况讨论:

(1) 在子区域内, 恒满足 $\text{rank}(\mathbf{Q}) = 2$

此时, 显然有 $\det(\mathbf{Q}) \neq 0$, 由GO理论, 散射场无焦散。根据SPM^[30], 当满足 $\det(\mathbf{Q}) \neq 0$ 时, 快速振荡的面积分或线积分可近似由面或线上的若干特殊点附近的很小区域的贡献之和给出, 这些特殊点称为驻相点或临界点。式(6)中方括号里第1项的面积分(对应着PO积分)近似等于3类临界点贡献之和; 而第2项(对应着EEC积分)近似等于第2类和第3类临界点贡献之和。其中, 第1类临界点又称为内部驻相点(该点满足驻相条件 $g_u = 0$, $g_v = 0$), 其表达式与GO公式相同, 对应着镜面散射中心; 第2类临界点又称边界驻相点(该点满足驻相条件 $g_t = 0$), 对应着边缘散射中心; 第3类临界点对应着角点, 对应着尖角/顶散射中心。需要注意的是, 由于满足相同的驻相条件, EEC积分给出的第2类临界点(边缘散射中心)和第3类临界点(尖角/顶散射中心)的位置与PO积分给出的相同, 它只是在幅度上对PO积分的第1、第3类临界点贡献进行了修正。

根据SPM, 式(6)中方括号内两项积分给出3类临界点的附加频率依赖关系分别为 k^{-1} , $k^{-3/2}$ 和

k^{-2} , 综合被积函数 $f_1(\mathbf{x}'_N)$ 和 $f_2(\mathbf{x}^*_N)$ 的频率依赖关系式(12)和式(13), 可以得到最终的 N 次散射机理形成散射中心的频率依赖性与式(4)完全一致。

(2) 在子区域内, 恒满足 $\text{rank}(\mathbf{Q}) = 1$

此时有 $\det(\mathbf{Q}) = 0$, 由GO给出的场处于焦散区。 $\text{rank}(\mathbf{Q}) = 1$ 说明Hessian矩阵 $\mathbf{Q}$ 只有一个非零特征值, 此时称为一重焦散情形。因此, 通过特定的正交变换 $\mathbf{U} : [\Delta u, \Delta v]^T \rightarrow [\Delta u', \Delta v']^T = \mathbf{U}[\Delta u, \Delta v]^T$, 可将 $\mathbf{Q}$ 进行对角化:

$$\mathbf{U}\mathbf{Q}\mathbf{U}^T = \mathbf{Q}_d = \begin{bmatrix} g_{u'u'} & 0 \\ 0 & g_{v'v'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{u'u'} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

则路程函数 g 的泰勒展开式可化成只有一个平方项的标准二次型:

$$g(u', v') = g(u_0, v_0) + g_{u'}(u_0, v_0) \Delta u' + g_{v'}(u_0, v_0) \Delta v' + \frac{1}{2} g_{u'u'}(u_0, v_0) \Delta u'^2 + o(\rho^2) \quad (18)$$

根据SPM, 驻相条件为 $g_{u'}(u_0, v_0) = g_{v'}(u_0, v_0) = 0$ 。由于 $g_{v'v'} = 0$, 则可近似认为在一定范围内 $g(u', v')$ 不随 v' 变化, 即 $g(u', v') \approx g(u')$ 。于是, 式(6)中PO积分项可化成下面的形式

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_N^{\text{PO}} &\approx \frac{jke^{-j2kr}}{4\pi r} e^{jkg(u_0)} \int_{v'_1}^{v'_2} dv' \int_{-\infty}^{\infty} f_1(u', v') \\ &\quad \cdot e^{\frac{j}{2} kg_{u'u'}(u_0, v') \Delta u'^2} du' + \mathbf{E}_N^{\text{PO-edge}} \\ &= \frac{j^{3/2} k^{1/2} e^{-j2kr}}{2^{3/2} \pi^{1/2} r} e^{jkg(u_0)} \\ &\quad \cdot \int_{v'_1}^{v'_2} \frac{f_1(u_0, v')}{\sqrt{g_{u'u'}(u_0, v')}} dv' + \mathbf{E}_N^{\text{PO-edge}} \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)的第1项为第1类临界点(即内部驻相点或镜面散射中心)的贡献, 考虑到 $f_1(u_0, v')$ 的频率依赖性式(12), 以及 $d_N = 2$, 可以立刻得到此时镜面散射中心的频率依赖性为

$$\mathbf{E}_N^{\text{PO-cl}} \sim k^{\frac{1}{2} + \sum_{i=1}^N \frac{d_i - 2}{2}} \quad (20)$$

与非焦散情形频率依赖式(4)相比, 频率依赖因子增加了 $1/2$ 的修正项, 本文称为焦散修正形式。

式(19)的第2项为PO给出的边缘积分贡献, 根据Carluccio等人^[33]的工作, 具有下面的形式

$$\mathbf{E}_N^{\text{PO-edge}} = -\frac{1}{jk} \oint_{\partial U} \frac{\hat{n}_{\partial U}^{(2)} \cdot (\mathbf{p}^* - \mathbf{p}_0^*)}{\nabla^{(2)} g \cdot (\mathbf{p}^* - \mathbf{p}_0^*)} f_1(\mathbf{p}^*) e^{jkg(\mathbf{p}^*)} dl^* \quad (21)$$

其中, $\mathbf{p}^* = (u^*(t), v^*(t))$, t 为边缘线的参数坐标(见式(14)定义), ∂U 为照亮面 Γ_N 在参数坐标空间定义域 U 的边界线, 实际上, 它对应着边缘线 L_N 。

对比PO边缘积分式(21)与EEC边缘积分式(式(6)第2项), 两者被积函数的幅度函数项具有相同的频率依赖性, 而复指数的相位函数完全相同。由此, 可以将两者合并成一个边缘积分项(即总的边缘绕射贡献, 记为 $\mathbf{E}_N^{\text{d}}$), 其形式如下:

$$\mathbf{E}_N^{\text{d}} = \frac{jke^{-j2kr}}{4\pi r} \int_{L_N} \mathbf{F}_2(\mathbf{x}_N^*) e^{jkg(\mathbf{x}_N^*)} dl^* \quad (22)$$

其中, $\mathbf{F}_2(\mathbf{x}_N^*)$ 为合并的幅度函数, 由式(21)、式(6)、式(12)和式(13), 可得其频率依赖性为

$$\mathbf{F}_2(\mathbf{x}_N^*) \sim k^{-1 + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{d_i - 2}{2}} \quad (23)$$

对于边缘积分式(22)来说, 存在两种情况: 边缘线上存在子区间恒满足 $g_{tt}(t) \neq 0$, 或恒满足 $g_{tt}(t) = 0$ 。

当 $g_{tt}(t) \neq 0$ 时, 边缘绕射场无焦散, 边缘积分与情形1相同, 存在第2类临界点(边界驻相点)和第3类临界点(角点)。此时, 相应散射中心的频率依赖性满足式(4)。

当 $g_{tt}(t) = 0$ 时, 边缘绕射场处于焦散区, 由泰勒展开式(16), 边缘积分式(22)可化为

$$\mathbf{E}_N^{\text{d-c}} \approx \frac{jke^{-j2kr}}{4\pi r} e^{jkg(t_0)} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{F}_2(\mathbf{x}_N^*(t)) l_t^* e^{jkg_t(t_0)\tau} d\tau \quad (24)$$

若 $g_t(t_0) \neq 0$, 根据SPM, 积分式(24)可近似表达达成第3类临界点(角点)的贡献, 此时, 相应散射中心的频率依赖性满足无焦散修正的式(4)。

当满足驻相条件 $g_t(t_0) = 0$ 时, 式(24)化为

$$\mathbf{E}_N^{\text{d-c}} = \frac{jke^{-j2kr}}{4\pi r} e^{jkg(t_0)} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{F}_2(\mathbf{x}_N^*(t)) l_t^* d\tau \quad (25)$$

联合式(23)及 $d_N = 1$, 可得该子区域形成的边缘绕射贡献的频率依赖性为

$$\mathbf{E}_N^{\text{d-c}} \sim k^{\frac{1}{2} + \sum_{i=1}^N \frac{d_i - 2}{2}} \quad (26)$$

可见, 式(26)与镜面反射情形的焦散修正形式(式(20))完全一致。这说明, 焦散修正与散射机理类型无关, 而只和产生焦散的类型有关, 它们均是由于路程函数的Hessian矩阵只有一个特征值为0(即一重焦散)所引起的, 因此, 称式(20)或式(26)为频率依赖公式的一重焦散修正形式。

(3) 在子区域内, 恒满足 $\text{rank}(\mathbf{Q}) = 0$

同情形2类似: $\det(\mathbf{Q}) = 0$, GO给出的场处于焦散区。 $\text{rank}(\mathbf{Q}) = 0$ 说明Hessian矩阵 $\mathbf{Q}$ 两个特征值均为0, 此时矩阵 $\mathbf{Q}$ 为零矩阵, 称为二重焦散情形。于是, 由泰勒展开式(22), 路程函数可近似表达成线性函数为

$$g(u, v) \approx g(u_0, v_0) + g_u(u_0, v_0) \Delta u + g_v(u_0, v_0) \Delta v \quad (27)$$

当 $g_u(u_0, v_0)$, $g_v(u_0, v_0)$ 不全为零时, PO积分式(式(6)第1项)无内部驻相点, 只包含边缘积分贡献, 其形式如式(21), 其关于频率依赖性的结论与情形2相同。

当 $g_u(u_0, v_0) = g_v(u_0, v_0) = 0$ 时, 路程函数式(27)化为常数, 于是PO积分式(式(6)第1项)将化成为

$$\mathbf{E}_N^{\text{PO}} = \frac{jke^{-j2kr}}{4\pi r} e^{jkg(u_0, v_0)} \iint_{\Gamma_N} \mathbf{f}_1(\mathbf{x}'_N) dS' \quad (28)$$

再由 $\mathbf{f}_1(u_0, v')$ 的频率依赖性式(16), 以及 $d_N = 2$, 可立刻得到此时的频率依赖性为

$$\mathbf{E}_N^{\text{PO-cII}} \sim k^{1+\sum_{i=1}^N \frac{d_i-2}{2}} \quad (29)$$

与非焦散情形频率依赖表达式(4)相比, 频率依赖因子增加了1的修正项。这与一重焦散修正形式(20)和式(26)是不同的。由于它是由路程函数的Hessian矩阵两个特征值为0(即二重焦散)所引起的, 称式(29)为频率依赖公式的二重焦散修正形式。

综合上面3种情形的讨论结果, 即非焦散形式(式(4))和两种焦散修正形式(式(20)或式(26)和式(29)), 最终可得统一的任意多次散射机理形成散射中心的频率依赖公式

$$\mathbf{E}_N \sim k^{\alpha_c + \sum_{i=1}^N \frac{d_i-2}{2}} \text{ 或 } \alpha = \alpha_c + \sum_{i=1}^N \frac{d_i-2}{2} \quad (30)$$

其中, α 为频率依赖因子; N 为多次散射机理的散射次数; d_i 为反射几何元素的维数, 如式(3)所定义; α_c 为焦散修正因子, 其取值总结如下

$$\alpha_c = \begin{cases} 0, & \text{无焦散} \\ 1/2, & \text{一重焦散} \\ 1, & \text{二重焦散} \end{cases} \quad (31)$$

特殊地, 针对一次散射机理, 可以容易地验证散射中心频率依赖式(30), 式(31)的正确性。取散射次数 $N = 1$, 式(30)化为 $\alpha = \alpha_c + (d_1 - 2)/2$ 。由式(2), 式(3), 对于镜面反射机理有 $d_1 = 2$, 则频率依赖因子公式进一步简化为 $\alpha = \alpha_c$ 。由式(31)可知, 此时频率依赖因子可以取3种值(0, 1/2, 1), 分别对应着3种焦散情形, 即无焦散、一重焦散和二重焦散。

可以进一步指出, 在单次散射机理及远场条件下, 3种焦散情形实际上分别对应3种目标表面几何形状: 双弯曲曲面、单弯曲曲面和平面。根据前面3种焦散类型定义, 3种焦散类型分别对应着路程函数的Hessian矩阵具有不同的秩(即非零特征值个

数)。对于一次散射机理, 路程函数可以写成 $g(\mathbf{x}') = \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{x}'$, 其中 $\hat{\mathbf{r}}$ 为雷达视线, $\mathbf{x}'$ 为目标表面照亮区的任一点。不妨取目标坐标系的 z 轴与 $\hat{\mathbf{r}}$ 方向一致, 则有 $g = z(x, y)$, 其中 x, y, z 为位置矢量 $\mathbf{x}'$ 在该目标坐标系下的坐标, 即此时路程函数为目标表面的曲面方程。那么, 路程函数的Hessian矩阵就是目标表面的曲率矩阵。考虑到曲率矩阵的特征值为目标表面的主曲率, 于是, 无焦散情形, 目标表面的两主曲率均不为0, 此时对应着双弯曲曲面; 一重焦散情形, 目标表面只有一个主曲率不为0, 此时对应着单弯曲曲面; 二重焦散情形, 目标表面两个主曲率均为0, 此时对应着平面。

对于单次边缘绕射机理有 $d_1 = 1$, 则频率依赖因子公式简化为 $\alpha = \alpha_c - 1/2$ 。由式(31)可知, 此时频率依赖因子可以取两种值(-1/2, 0), 注意对于边缘绕射只有两种焦散类型, 即无焦散和一重焦散。类似地, 可以指出, 在单次边缘绕射和远场条件下, 两种焦散分别对应着两种目标表面边缘几何形状: 曲边缘和直边缘。对于单次尖顶/角绕射机理有 $d_1 = 0$, 且此时只存在无焦散一种情形, 则由式(30)和式(31), 频率依赖因子 $\alpha = -1$ 。

综上, 通过与表1中给出的频率依赖因子取值对比可知, 频率依赖因子式(30)和式(31)可以正确地预测单次散射机理的频率依赖因子数值。

3 典型二次、三次散射机理的频率依赖公式验证

为了进一步验证频率依赖式(30)的有效性, 本文将平板(方板或圆盘)、圆柱、球、立方体和圆锥体等6种典型体进行两两组合, 得到20种组合体目标, 然后通过电磁仿真和微波暗室测试两种手段获取目标散射数据, 并提取二次散射机理形成散射中心, 估计频率依赖因子, 最终与式(30)预测的频率依赖因子取值进行对比, 验证两者的一致性。

6种典型体目标的尺寸如表2所示, 其中若干典型体存在两种尺寸。形成的20种组合体的几何示意图由表3给出, 基于本文提出式(30)可以给出每种组合体的频率依赖因子的理论取值, 也在表3中列出。

目标散射仿真数据通过北京环境特性研究所开发的电磁建模软件RatsPro v1.0对目标网格模型进行计算而获得, 该软件包含了多种计算方法——射线弹跳追踪(Shooting and Bouncing Ray, SBR)法^[34]、矩量法(Method of Moments, MoM)和特征基函数法(Characteristic Basis Function, CBFM)^[35]等, 不同的计算任务需要选择不同的方

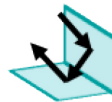
表 2 6种典型体尺寸参数列表

Tab. 2 Size parameters for 6 canonical objects

典型体名称	尺寸参数
方形平板	边长500 mm, 厚度10 mm
圆柱体	(1)直径200 mm, 长300 mm; (2)直径150 mm, 长300 mm
球体	(1)直径100 mm; (2)直径300 mm
半圆锥体	(1)直径50 mm, 100 mm; (2)直径125 mm, 400 mm
直角四面体	(1)底边200 mm, 棱边200 mm, 劈角20°; (2)底边350 mm, 棱边350 mm, 劈角50°
圆盘	半径500 mm, 厚度8 mm

表 3 20种组合体目标及其中产生的二次反射/绕射机理的几何结构示意与频率依赖因子取值

Tab. 3 Types of double reflection/diffraction mechanisms, 20 combination objects, corresponding geometric diagram and theoretical values of the frequency-dependent factor

散射机理类型	组合体名称	几何示意图	理论 α 值
镜面反射-镜面反射	平板-平板(垂直)		1
	圆柱-平板(垂直、平行)		1/2
	球-平板		0
	圆柱-圆柱(垂直、平行)		1/2
	球-圆柱		0
	球-球		0
边缘绕射-镜面反射	直劈-平板(垂直、平行)		0
	直劈-圆柱(垂直、平行)		0
	直劈-球		-1/2
	曲劈-平板		-1/2
	曲劈-圆柱		-1/2
	曲劈-球		-1/2
边缘绕射-边缘绕射	直劈-直劈(垂直、平行)		-1/2
	曲劈-直劈		-1
	曲劈-曲劈		-1

法。文中多次镜面反射情形采用SBR方法来计算，而镜面-边缘散射和边缘-边缘散射情形则采用MoM或CBFM方法来计算。目标散射测试数据通过在北京环境特性研究所微波暗室中对组合体目标的金属实物模型进行RCS测试而获得。最终获得的目标散射仿真数据和测试数据为RCS幅相数据。获得目标RCS幅相数据之后，需要进一步对数据进行处理以得到频率依赖因子。本文采用一种基于频带分割的方法——子带图像比较(Spectrum Parted Linked Image Test, SPLIT)算法^[36]来估计频率依赖因子。该方法通过对不同子带上估计的散射中心幅度进行比较来实现频率依赖因子的估计。其主要做法为：在目标的宽带散射响应上任意截取两段足够带宽的子频带数据(一般取总带宽的40%较优^[21])，其中心频率为 f_{c1} 和 f_{c2} ，分别对这两段子频带数据进行散射中心位置及幅度参数估计，则各子带散射中心幅度系数的估计值与子带中心频率之间的关系为

$$|\hat{A}_{m1}/\hat{A}_{m2}| = (f_{c1}/f_{c2})^{\alpha_m} \quad (32)$$

其中， $\hat{A}_{m1}$ 和 $\hat{A}_{m2}$ 分别为两子带上第 m 个散射中心对应的幅度系数估计值。由式(32)可实现对散射中心类型参数的估计。

图1以圆柱-圆柱垂直组合为例，给出了仿真的VV极化下的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)扫频曲线与子带分割示意图，选择了40%子带，则两个子带中心频率分别为 $f_{c1}=10$ GHz和 $f_{c2}=16$ GHz。图2(a)和图2(b)分别给出了两个子带的一维距离像以及采用ESPRIT(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)算法^[37]估计的二次镜面反射机理所对应的散射中心幅度参数 $\hat{A}_{m1}$ 与 $\hat{A}_{m2}$ 的结果。于是，根据式(32)可立刻估计出频率依赖因子的值 $\alpha=0.5499$ 。

通过上述方法对20种组合体仿真数据进行二次散射机理频率依赖因子估计，表4给出了估计结果以及与理论值的对比。仿真条件为频率8~18 GHz、极化VV和HH，视向角选择典型强散射方向。结果表明，估计的频率依赖因子与式(30)预测的理论值大部分情况都较为一致。其中，若干组合体(如球-平板组合、圆柱-圆柱平行组合等)的频率依赖因子估计值与理论值的误差较大，且VV和HH极化的误差也有所差别。其主要原因是存在其他幅度更强或相当的散射中心对所关注机理的散射中心形成“干扰”，影响了其频率依赖因子的估计精度，并且当“干扰”散射中心存在着较明显的极化差异时，频率依赖因子的估计误差也具有明显的差别(如参考文献^[21]中的讨论)。针对多于二次散射的机理，采用三面角与双顶帽结构，结果如表5所示，估计的频率依赖因子与理论预测值相符。

另外，通过上述SPLIT算法对7种组合体暗室测试数据进行二次散射机理频率依赖因子估计，表6给出了散射机理类型、组合体几何示意图以及估计结果与理论值的对比。暗室测量条件为频率

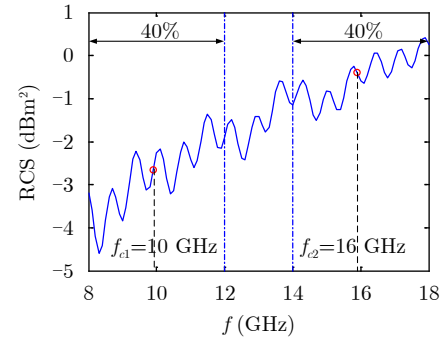


图1 圆柱-圆柱垂直组合体的RCS曲线与子带分割示意图

Fig. 1 RCS curve for cylinder-cylinder orthogonal combination objects and sketch map of frequency band splitting

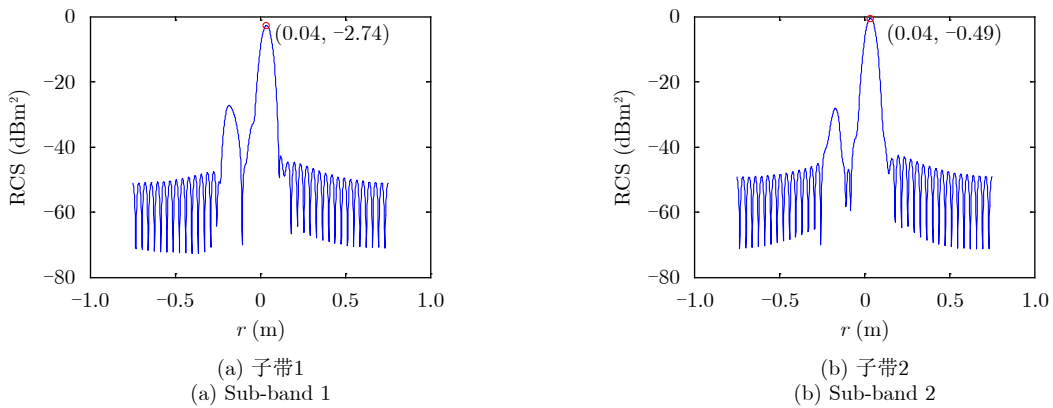


图2 各子带散射中心参数提取结果

Fig. 2 Results of scattering center extraction for each sub-band scattering data

表 4 基于20种组合体仿真数据的二次散射机理形成散射中心的频率依赖因子估计与理论值对比

Tab. 4 Comparison of theoretical frequency-dependent factor values by proposed formula and estimated ones by simulation data for scattering centers induced by double scattering from 20 combination objects

组合体名称	估计 α 值		理论 α 值	组合体名称	估计 α 值		理论 α 值
	VV	HH			VV	HH	
平板-平板(垂直)	1.0000	0.9988	1	直劈-圆柱(垂直)	0.0383	0.0028	0
圆柱-平板(垂直)	0.5011	0.4949	1/2	直劈-圆柱(平行)	2.90e-4	-4.90e-5	0
圆柱-平板(平行)	0.5015	0.5753	1/2	直劈-球	-0.5040	-0.6427	-1/2
球-平板	0.0385	-0.1048	0	曲劈-平板	-0.4957	-0.4904	-1/2
圆柱-圆柱(垂直)	0.5499	0.5034	1/2	曲劈-圆柱	-0.3976	-0.4226	-1/2
圆柱-圆柱(平行)	0.5438	0.3807	1/2	曲劈-球	-0.5909	-0.6195	-1/2
球-圆柱	-0.0616	0.0831	0	直劈-直劈(垂直)	-0.5000	-0.5000	-1/2
球-球	-0.0591	-0.0591	0	直劈-直劈(平行)	-0.5000	-0.5000	-1/2
直劈-平板(垂直)	1.68e-4	-0.0053	0	曲劈-直劈	-0.9428	-1.1978	-1
直劈-平板(平行)	-4.05e-7	-2.34e-6	0	曲劈-曲劈	-0.9428	-1.0302	-1

表 5 基于2种组合体仿真数据的三次散射机理形成散射中心频率依赖因子估计与理论值对比

Tab. 5 Comparison of theoretical frequency-dependent factor values by proposed formula and estimated ones by simulation data for scattering centers induced by triple scattering from 2 combination objects

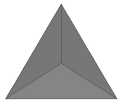
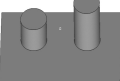
组合体名称	几何示意图	估计 α 值	理论 α 值
垂直三面角结构		0.9934	1
双顶帽结构		0.5097	1/2

表 6 基于7种组合体暗室测量数据的二次散射机理形成散射中心的频率依赖因子估计与理论值对比

Tab. 6 Comparison of theoretical frequency-dependent factor values by proposed formula and estimated ones by measurement data in microwave anechoic chamber for scattering centers induced by double scattering from 7 combination objects

机理类型	组合体名称	几何示意图	估计 α 值	理论 α 值
边缘绕射-镜面反射	四面体-圆盘(垂直)		0.1589	0
边缘绕射-边缘绕射	四面体-四面体(垂直)		-0.4829	-1/2
边缘绕射-镜面反射	四面体-圆柱(平行)		-0.0485	0
镜面反射-镜面反射	平板-圆柱(平行)		0.5345	1/2
镜面反射-镜面反射	直二面角(垂直)		1.0314	1
镜面反射-镜面反射	圆柱-圆盘(垂直)		0.5048	1/2
镜面反射-镜面反射	双圆柱(垂直)		0.5115	1/2

8~12 GHz、极化HH, 俯仰角90°, 方位角选择典型强散射方向。结果表明, 估计的频率依赖因子与式(30)预测的理论值较为一致。

可见, 基于仿真的结果与基于测试的结果均验证了本文提出的频率依赖因子公式的有效性。

4 结论

本文从射线理论出发, 基于GO/GTD-PTD混合方法与SPM方法, 推导了PEC目标任意多次散射机理形成散射中心的频率依赖因子表达式。频率依赖因子与反射次数、射线在目标表面多次弹射所经过的几何元素维数以及焦散情况有关。最后针对一系列典型组合体目标, 进行了仿真实验和微波暗室测试试验, 通过获得的RCS仿真与暗室测试数据, 验证了本文提出的理论与公式的有效性。本文提出的频率依赖因子计算公式具有较强的普适性, 可应用于复杂目标电磁散射正向参数化建模中频率依赖因子参数的正向推算。

致谢 在本文修改过程中, 武汉大学电子信息学院朱国强教授提出了重要的修改意见和建议, 特此致谢!

参 考 文 献

- [1] KELLER J B. Geometrical theory of diffraction[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, 52(2): 116–130. doi: [10.1364/JOSA.52.000116](https://doi.org/10.1364/JOSA.52.000116).
- [2] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 230–237.
HUANG Peikang, YIN Hongcheng, and XU Xiaojian. Radar Target Signature[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 230–237.
- [3] HURST M P and MITTRA R. Scattering center analysis via Prony's method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, 35(8): 986–988. doi: [10.1109/TAP.1987.1144210](https://doi.org/10.1109/TAP.1987.1144210).
- [4] CARRIÈRE R and MOSES R L. High-resolution parametric modeling of canonical radar scatterers with application to radar target identification[C]. The IEEE 1991 International Conference on Systems Engineering, Dayton, USA, 1991. doi: [10.1109/ICSYSE.1991.161070](https://doi.org/10.1109/ICSYSE.1991.161070).
- [5] POTTER L C, CHIANG D M, CARRIÈRE R, *et al.* A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, 43(10): 1058–1067. doi: [10.1109/8.467641](https://doi.org/10.1109/8.467641).
- [6] 代大海, 王雪松, 肖顺平. 基于相干极化GTD模型的散射中心提取新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(7): 1057–1061. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2007.07.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2007.07.010).
DAI Dahai, WANG Xuesong, and XIAO Shunping. Novel method for scattering center extraction based on coherent polarization GTD model[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(7): 1057–1061. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2007.07.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2007.07.010).
- [7] FULLER D F. Phase history decomposition for efficient scatterer classification in SAR imagery[D]. [Ph. D. dissertation], Air Force Institute of Technology, 2011: 67–150.
- [8] DUAN Jia, ZHANG Lei, XING Mengdao, *et al.* Polarimetric target decomposition based on attributed scattering center model for synthetic aperture radar targets[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(12): 2095–2099. doi: [10.1109/LGRS.2014.2320053](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2320053).
- [9] HALMAN J and BURKHOLDER R J. Sparse expansions using physical and polynomial basis functions for compressed sensing of frequency domain EM scattering[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1048–1051. doi: [10.1109/LAWP.2015.2394474](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2394474).
- [10] GERRY M J, POTTER L C, GUPTA I J, *et al.* A parametric model for synthetic aperture radar measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1999, 47(7): 1179–1188. doi: [10.1109/8.785750](https://doi.org/10.1109/8.785750).
- [11] AI Fazhi, ZHOU Jianxiong, HU Lei, *et al.* The parametric model of non-uniformly distributed scattering centers[C]. The IET International Conference on Radar Systems (Radar 2012), Glasgow, UK, 2012. doi: [10.1049/cp.2012.1712](https://doi.org/10.1049/cp.2012.1712).
- [12] 冯艾茜, 郭琨毅, 盛新庆. 无翼平底弹头的属性散射中心模型改进与参数估计[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(9): 961–967. doi: [10.15918/j.tbit1001-0645.2015.09.016](https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2015.09.016).
FENG Aixi, GUO Kunyi, and SHENG Xinqing. Modification and parameter estimation of attributed scattering center model for flat-based warhead without wings[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(9): 961–967. doi: [10.15918/j.tbit1001-0645.2015.09.016](https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2015.09.016).
- [13] LI Zenghui, JIN Kan, XU Bin, *et al.* An improved attributed scattering model optimized by incremental sparse Bayesian learning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(5): 2973–2987. doi: [10.1109/TGRS.2015.2509539](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2509539).
- [14] TSENG N Y and BURNSIDE W D. A very efficient RCS data compression and reconstruction technique[R]. NASA-CR-191378, 1992.
- [15] 王菁. 光学区雷达目标散射中心提取及其应用研究[D]. [博士学位论文], 南京航空航天大学, 2010: 3–77. doi: [10.7666/d.d167227](https://doi.org/10.7666/d.d167227).
WANG Jing. A study on radar optical region target scattering center extraction and its applications[D]. [Ph. D. dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010: 3–77. doi: [10.7666/d.d167227](https://doi.org/10.7666/d.d167227).

- [16] BHALLA R and LING Hao. A fast algorithm for signature prediction and image formation using the shooting and bouncing ray technique[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, 43(7): 727–731. doi: [10.1109/8.391147](#).
- [17] MENSA D L. High Resolution Radar Imaging[M]. Dedham, MA: Artech House, 1981.
- [18] RAYNAL A M. Feature-based exploitation of multidimensional radar signatures[D]. [PHD dissertation]. The University of Texas at Austin, 2008.
- [19] ZHOU Jianxiong, SHI Zhiguang, CHENG Xiao, *et al*. Automatic target recognition of SAR images based on global scattering center model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3713–3729. doi: [10.1109/tgrs.2011.2162526](#).
- [20] CHIANG H C and MOSES R L. ATR performance prediction using attributed scattering features[C]. SPIE 3721, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VI, Orlando, United States, 1999: 785–796.
- [21] 邢笑宇. 耦合散射中心模型频率依赖关系及其估计[D]. [硕士论文], 中国航天第二研究院, 2014: 18–28.
XING Xiaoyu. EM scattering modeling and application research of complex targets in the typical environment[D]. [Master dissertation], The Second Academy of China Aerospace, 2014: 18–28.
- [22] YAN Hua, LI Sheng, LI Huanmin, *et al*. Monostatic GTD model for double scattering due to specular reflections or edge diffractions[C]. 2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, Chengdu, China, 2018. doi: [10.1109/COMPEM.2018.8496539](#).
- [23] HE Yang, HE Siyuan, ZHANG Yunhua, *et al*. A forward approach to establish parametric scattering center models for known complex radar targets applied to SAR ATR[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(12): 6192–6205. doi: [10.1109/TAP.2014.2360700](#).
- [24] LI Qifeng, GUO Kunyi, SHENG Xinqing, *et al*. High precise scattering centers models for cone-shaped targets based on induced currents[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017, 2017: 7482895. doi: [10.1155/2017/7482895](#).
- [25] 张磊, 何思远, 朱国强, 等. 雷达目标三维散射中心位置正向推导和分析[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(12): 2854–2860. doi: [10.11999/JEIT180115](#).
ZHANG Lei, HE Siyuan, ZHU Guoqiang, *et al*. Forward derivation and analysis for 3-D scattering center position of radar target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(12): 2854–2860. doi: [10.11999/JEIT180115](#).
- [26] LIU Jin, HE Siyuan, ZHANG Lei, *et al*. An automatic and forward method to establish 3-D parametric scattering center models of complex targets for target recognition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(12): 8701–8716. doi: [10.1109/TGRS.2020.2989856](#).
- [27] LEE S W. Electromagnetic reflection from a conducting surface: Geometrical optics solution[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1975, 23(2): 184–191. doi: [10.1109/TAP.1975.1141040](#).
- [28] 汪茂光. 几何绕射理论[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
WANG Maoguang. Geometrical Diffraction Theory[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 1994.
- [29] KOUYOUMJIAN R G and PATHAK P H. A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(11): 1448–1461. doi: [10.1109/PROC.1974.9651](#).
- [30] PEREZ J and CATEDRA M F. Application of physical optics to the RCS computation of bodies modeled with NURBS surfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(10): 1404–1411. doi: [10.1109/8.320747](#).
- [31] MICHAELI A. Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1984, 32(3): 252–258. doi: [10.1109/TAP.1984.1143303](#).
- [32] LING H, CHOU R C, and LEE S W. Shooting and bouncing rays: Calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1989, 37(2): 194–205. doi: [10.1109/8.18706](#).
- [33] CARLUCCIO G, ALBANI M, and PATHAK P H. Uniform asymptotic evaluation of surface integrals with polygonal integration domains in terms of UTD transition functions[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(4): 1155–1163. doi: [10.1109/TAP.2010.2041171](#).
- [34] 殷红成, 朱国庆, 董纯柱, 等. 基于自适应射线管分裂的多次反射计算方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(4): 700–706. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2013.04.04](#).
YIN Hongcheng, ZHU Guoqing, DONG Chunzhu, *et al*. Efficient multi-reflection computational method based on adaptive ray tube splitting[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(4): 700–706. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2013.04.04](#).
- [35] 侯兆国, 王超, 殷红成. 电大复杂目标电磁散射计算的特征基函数方法[J]. 制导与引信, 2009, 30(2): 24–29. doi: [10.3969/j.issn.1671-0576.2009.02.006](#).
HOU Zhaoguo, WANG Chao, and YIN Hongcheng. Characteristic basis function method for electromagnetic scattering computation of electrically large complex target[J]. *Guidance & Fuze*, 2009, 30(2): 24–29. doi: [10.3969/j.issn.1671-0576.2009.02.006](#).
- [36] FULLER D F and SAVILLE M A. The spectrum parted

linked image test (SPLIT) algorithm for estimating the frequency dependence of scattering center amplitudes[C]. SPIE 7337, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVI, Orlando, United States, 2009. doi: [10.1117/12.819329](https://doi.org/10.1117/12.819329).

[37] QUINQUIS A, DEMETER S, and RADOI E. Enhancing the resolution of the radar target range profiles using a class of subspace eigenanalysis-based techniques[J]. Digital Signal Processing, 2001, 11(4): 288-303. doi: [10.1006/dspr.2001.0394](https://doi.org/10.1006/dspr.2001.0394).

作者简介



闫 华(1981-), 男, 博士, 电磁散射重点实验室高级工程师, 研究方向为雷达目标散射特性、计算电磁学、特征提取、参数化建模等。



李 胜(1980-), 男, 硕士, 电磁散射重点实验室高级工程师, 主要研究方向为雷达目标特征控制、特征提取等。



张 磊(1991-), 男, 博士, 电磁散射重点实验室工程师, 主要研究方向为雷达目标散射特性、散射中心参数化建模、SAR目标识别等。



殷红成(1967-), 男, 博士, 电磁散射重点实验室研究员, 研究方向为雷达目标特性、计算电磁学、目标识别等。



陆金文(1994-), 男, 电磁散射重点实验室博士研究生, 主要研究方向为雷达目标散射特性、电磁散射参数化建模等。