

基于目标属性散射中心模型的正向参数化建模

谢若晗, 何思远*, 朱国强, 张云华

武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072

摘要 针对雷达目标自动识别, 对目标属性散射中心进行了参数化建模。建模前, 基于实体部件分解的目标进行高精度几何建模, 提出了一套含空间射线分集的射线追踪方法。基于此, 发展了一套基于空间射线分集的目标散射中心参数化正向建模方法。在现有的提取面类散射源的基础上, 增加了目标边缘强散射源的散射中心, 同时推算出了其模型参数。将该方法所得的结果与现有高频方法的结果进行对比, 验证了参数化模型的有效性。所提出的参数化建模的方法为雷达目标特征数据库的获取提供了一条新的辅助途径。

关键词 散射; 参数化建模; 属性散射中心模型; 射线分集; 边缘绕射

中图分类号 TN959.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.122901

Forward Parametric Modeling Based on Target Attribute Scattering Center Model

Xie Ruohan, He Siyuan*, Zhu Guoqiang, Zhang Yunhua

Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China

Abstract The target attribute scattering center is parametrically modeled for automatic identification of the radar targets. Before generating the model, high-precision geometric modeling is applied based on the decomposition of the solid parts, and a set of ray tracing methods exhibiting spatial ray diversity is proposed. Based on this ray tracing step, a set of parametric forward-modeling methods is developed for estimating the center of scattering based on the spatial ray diversity. Further, the center of the strong scattering source with respect to the target edge is added on the basis of the already extracted surface scattering source. The model parameters are also derived during this additive process. The results obtained using this method are compared with those obtained using the typically used high-frequency method, confirming the effectiveness of the parametric model. Thus, the proposed method for parametric modeling provides a new auxiliary mechanism for compiling the radar target features.

Key words scattering; parametric modeling; attribute scattering center model; ray diversity; edge diffraction

OCIS codes 290.1350; 290.5825

1 引言

当今雷达分辨技术、目标隐身技术等快速发展, 雷达具有时空分辨率高、抗干扰能力强等多个突出优点^[1], 因此, 雷达目标的散射特性研究已具有普遍性、基本性, 是目标识别、电子对抗等雷达军事领域的重要研究方向之一。对于大多数雷达目标而言, 其散射频段主要位于入射波波长远小于目标特征尺寸的区段内, 即高频区。在此区段内, 雷达目标后

向散射回波的响应可以等效为多个独立的散射源的散射响应之和。这些独立的散射源一般被称为等效多散射中心, 简称为多散射中心。雷达目标的回波信号在散射中心模型的描述下具有简洁性和物理相关性, 故散射中心模型精准且有效地描述了复杂目标的散射现象及特性。此外, 合成孔径雷达(SAR)包含了目标几何特征等信息, 能够较为直观地展示目标的形状轮廓、长度尺寸等特点, 具有全天候、全天时成像的优势^[2]。因此, 散射中心模型被广泛应

收稿日期: 2018-11-27; 修回日期: 2019-01-06; 录用日期: 2019-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(61571333, 61301061)

* E-mail: siyuanhe@whu.edu.cn

用于 SAR 图像的雷达目标自动识别系统中。基于上述分析,准确描述目标特性的关键即是建立精细且准确的散射中心模型。

描述散射中心的模型有很多,例如:理想点散射中心模型^[3]、衰减指数和模型^[4]、基于几何绕射理论(GTD)^[5]的属性散射中心模型等。本文采用的散射中心模型为最能揭示散射机理的属性散射中心模型^[6]。1995年, Potter 等^[7]提出 GTD 模型,基于几何光学(GO)理论和物理光学(PO)理论^[8],在考虑频率参数对散射中心模型的影响后利用幂函数的形式引入频率参数概念,从而更加精准地描述了散射中心模型对应目标的几何结构的特征。1997年, Potter 等^[9]对原有的利用频率参数描述的 GTD 模型进行改进,考虑到方位角对散射中心响应的影响,利用指数函数的形式引入方位角参数并提出了属性散射中心模型。1999年, Potter 等在充分考虑散射中心响应对于方位的依赖关系后,完善了属性散射中心模型。基于方位对于相应散射中心的不同影响, Potter 等将散射中心模型分为局部散射中心和分布散射中心两类。至此,属性散射中心模型不但充分地刻画了目标几何结构的形状、位置和尺寸等物理信息,赋予了模型确切的物理意义,而且对于真实目标的逼近效果更显著,更有效地反映了物理结构对于目标电磁散射特性的影响,揭示了目标的散射机理。

根据雷达散射截面缩减优化、目标识别等领域的发展成果可见,目标表面各个强散射源的影响已经得到了较为有效的抑制。近年来,随着相控阵雷达等技术的快速发展,雷达可利用目标回波对径向运动目标的多个强散射点进行测量,且具有高分辨成像能力^[10],因此,通过建立目标的参数化模型完成目标识别的方法逐渐被广泛采纳。为实现目标完整的参数化建模,除去建立连续部件的参数化模型外,边缘、台阶、尖顶等不连续性部件的参数化建模也必须计入其中。目标表面的边缘、台阶、顶帽等不连续性部件会对电磁波产生绕射,而这些弱散射源产生的绕射对目标总散射的影响也是不可忽略的^[11]。因此,对于弱散射源电磁散射特性的研究变得越来越重要,也是当下雷达电磁散射特性研究的重要发展方向之一。目前,目标表面的散射场可以通过 PO 计算得到,因此,目标边缘散射场的计算、研究对目标精确识别具有重要意义。

基于以上论述,本文提出了一种完全正向的目标散射中心参数化建模方法。从目标的几何模型出

发,利用空间射线分集技术筛选得到目标的强散射中心源,借助属性散射中心模型对各个强散射源进行参数估计与确定,从而实现对各类结构形成的强散射中心的参数化建模。

2 属性散射中心模型

在高频区域内,由于电磁散射存在局部效应,雷达目标的总体后向回波响应可以由目标上多个独立散射中心的响应叠加而成。散射中心模型对目标后向散射回波信号的描述简洁,并且与物理相关,因此被广泛应用于基于 SAR 的目标自动识别系统中。

相较于 GTD 散射中心模型,属性散射中心模型额外描述了散射强度分别与散射中心类型、雷达观测目标方位之间的关系,具体由两个描述幅度特征的函数(衰减的指数函数和 sinc 函数)组成,分别对应局部型散射中心、分布型散射中心与观测方位角的关系。局部型散射中心有角、三面体、边缘等散射形式,分布型散射中心有平板、柱面等散射形式。属性散射中心模型的表达式为

$$E_i^*(f, \varphi) = A_i \left(j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \text{sinc}[kL_i \sin(\varphi - \varphi'_i)] \cdot \exp(-kc\gamma_i \sin \varphi) \cdot \exp[-j2k(x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi)], \quad (1)$$

式中: $E_i^*(f, \varphi)$ 为第 i 个散射中心的散射场; f 为频率; c 为光速; φ 为方位角,取值范围为 $[-\varphi_m/2, \varphi_m/2]$, φ_m 表示最大成像观测角; i 为散射中心的序号, $i=1, 2, \dots, p$, p 为散射中心总个数; A_i 为第 i 个散射中心的幅度参数; f_c 为雷达带宽的中心频率; $k=2\pi f/c$ 为波数; L_i 为第 i 个散射中心的长度参数; φ'_i 表示分布型散射中心成像方位角的偏离程度; γ_i 为第 i 个散射中心的位置矢量在成像面上的投影; x_i 和 y_i 分别是散射中心在距离和方位的位置参数; α_i 描述了第 i 个散射中心的频率依赖关系。

由(1)式可以看出,该模型用结构参数 L 、 φ' 和 γ_i 实现了散射中心与方位角关系的表征,同时实现了对两种类型的散射中心的描述。描述局部型散射中心时, $L_i=0$;描述分布型散射中心时, $\gamma_i=0$ 。根据文献^[6]可知,对于三面角、边缘等局部型散射中心来说,它们的散射特性均随方位角的变化而缓慢变化,可用衰减参量 γ 描述幅度随方位角的轻微依赖特性, γ 通常取很小的值(一般取值 10^{-10}),因此指数函数表征了这种局部缓变性的机理。这里的指数函数仅是数学上的近似拟合,不具有物理含义。对于平板、二面角、圆柱体等分布型散射中心来说,

它们的幅度特征依赖于方位角。这种依赖关系可以通过 PO 推导得到,采用 sinc 函数即可描述分布散射中心模型对方位角的依赖性。在 SAR 图像上呈现“一条亮线”,其具有长度属性,而参数 L 就是用来描述散射中心在成像角度下的方位向上有效展布长度的量(在局部散射中心模型中, $L=0$)。由 sinc 函数的特征可知,随着角度扫描的进行,幅值不断减小,但仍具有连续性。总散射场是 p 个独立散射中心的贡献之和,即

$$E^s(f, \varphi) = \sum_{i=1}^p E_i^s(f, \varphi) \quad (2)$$

因此,可以用参数集 $\Theta = \{\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_p\}$ 来表示整个目标的散射中心模型,其中 $\Theta_i = (A_i, \alpha_i, x_i, y_i, L_i, \gamma_i, \varphi_i')$,是含有 7 个参数的向量。由这 7 个参数构成的集合很好地描述了每个散射中心的物理特性。

3 雷达目标的参数化建模

本文描述的属性散射中心参数化建模从几何模型出发,筛选出散射回波中的强散射源,并以其为建模对象,构成属性散射中心模型,实现对散射中心的描述。

散射中心涉及到的参数(包含幅度、位置、频率依赖参数和长度)可以利用文献[12]中提及的方法进行确定。目标某姿态下参数化重构的散射场便可由上述方法得到的参数代入至属性参数模型中得到。

3.1 正向的强散射中心筛选方法

为了得到目标的总散射响应,必须得到目标上多个独立散射中心的响应,因此需要对得到目标的强散射源进行筛选。传统的散射中心筛选方法是根据目标的散射回波数据确定的,该方法需要计算的数据较为庞大、占用计算机的资源过多,且缺少确切的物理意义。本文采用的散射中心筛选是利用空间射线追踪、分集技术实现的。

射线追踪的发展是建立在几何光学和几何绕射理论基础上的。借助几何光学,可以把入射波看成是光学中的入射光线,波的传播方向等同于光线的传播方向。根据光线的直线传播定律、独立传播定律、反射定律和折射定律可以进行光线追踪,因此借助几何光学的理论方法,通过模拟空间中回波的路径可以实现对空间中射线的反射特性、散射特性等描述的目的。射线追踪流程如图 1 所示。空间射线分集技

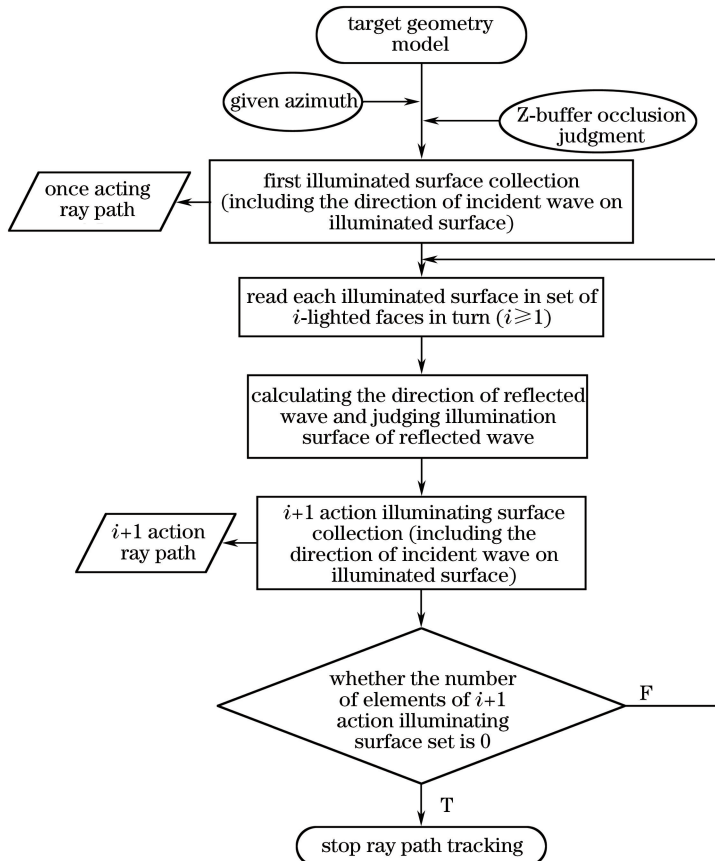


图 1 射线路径追踪流程图

Fig. 1 Flow chart of ray path tracing

术^[12]主要依据的媒介是雷达射线,通过对空间中的射线进行标记可将来自不同部件、方向或路径的射线分离开,并将路径相同的射线进行归类。此外,除了射线可以提供目标相应的信息外,还需要分析多个回波对应的多个独立散射源的来源,明确这些独立的散射源属于目标的哪一部件、结构或是位置。

具体实现方法为:在对目标进行分解时,标记分解得到的 M 个实体部件分别为 I_1, I_2, \dots, I_M 。当入射射线 r_i 照射目标的三角面片 t_i (面片的作用点为其中心 Q_i) 时,记录该三角面片的索引号 I_{Q_i} 。根据几何光学反射定律,该三角面片产生的反射射线可以看作一条再次作用于目标的其他面片的入射射线,顺序记录下该作用面片的索引号,以此类推,直到该条射线不再作用目标的任何其他面片为止。假设这条入射射线 r_i 的顺序作用点序列为 $[Q_1, Q_2, \dots, Q_M]$, 则该条射线的路径标记的对应区域的索引号为 $[I_{Q_1}, I_{Q_2}, \dots, I_{Q_M}]$ 。根据以上方法完成射线追踪后,即可得到具有所有射线路径的射线总集,明确每条射线先后经过了目标表面的哪些区域。因此,可以根据射线路径的不同对射线进行归类,将具有相同路径的射线归为同一类放入同一个射线子集合 $S_j = \{r_{j_1}, r_{j_2}, \dots, r_{j_n}, \dots, r_{j_{N_j}}\}$, 其中 j 是子集的编号, N_j 是集合 S_j 中射线的条数,最终实现射线分集。基于此,通过精准地建立目标的几何模型,分解实体部件,并借助空间射线分集技术,即可完成散射源与目标实体部件的一一对应。

本文主要通过以下步骤实现强散射中心的筛选^[13]: 1) 目标完成实体部件分解后,入射波进行照射,确定入射波的入射方向,明确观察方向。在目标表面进行射线追踪,确定每条射线的路径。根据路径的不同,将射线进行归类、分集。2) 确定每条射线上携带散射射线的能量,相同路径的散射总场的能量就是每一条射线携带的能量的总和。3) 利用射线追踪的物理光学法计算得到不同路径射线的散射场,按照大小进行排序,就可以得到该入射角度和观察角度方位下散射源对目标总散射场的贡献程度。根据经验值设置雷达散射截面(RCS, S_{RC})的阈值为 -20 dB,筛选出散射贡献较强的散射源,明确贡献较强的散射源的信息。从排序的候选散射源队列中选出若干个,将其 RCS 叠加并与总场作对比。若两者方均根误差小于 2 dB,则认为这些强散射来源可以用来反映目标的散射特性,否则需要补充强散射来源,直到叠加的 RCS 与总场的方均根误差小于 2 dB。于是,目标的总散射场就近似为这些

强散射源的散射场的累加和。

以某一个姿态角下某型号巡航导弹的强散射源判定和筛选为例,导弹上各个部件的编号以及名称如图 2 所示,雷达入射波的参数设置如下:姿态角 $\theta = 120^\circ$,方位角 $\varphi = 90^\circ$,入射波频率为 1.2 GHz。当前角度下,应用空间射线分集技术确定部件及部件之间耦合的散射来源并预估其 RCS 值。将该值转换为相对幅度值参数 A ,并将散射来源按照相对幅度值参数 A 的大小进行排序,结果如表 1 所示,其中 α 为频率依赖参数, $r(x, y, z)$ 为三维的散射中心位置, L 为长度。

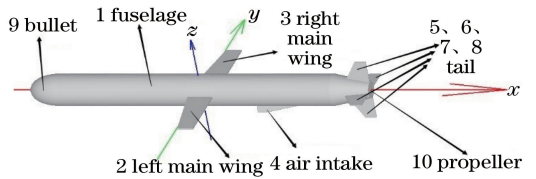


图 2 巡航导弹的部件示意图

Fig. 2 Schematic of parts of cruise missile

表 1 巡航导弹目标的散射源筛选结果

Table 1 Scattering source screening results for cruise missile target

Serial number	Partnumber	α	A	$r(x, y, z)$	L
1	1	0.5	0.0319	(0.034, 0.229, -0.132)	4.469
2	7	1.0	0.0024	(2.661, 0.008, -0.008)	0.269
3	1	0.5	0.0020	(1.207, 0.059, -0.260)	0.003
4	1	0.5	0.0016	(0.068, 0.266, -0.013)	0.000
5	9	0.5	0.0012	(-2.370, 0.226, -0.131)	0.017

为了对散射源提取结果的精度进行验证,在 xoz 平面内围绕导弹一周,即选取姿态角 $\theta = 0^\circ$ 进行强散射源筛选,对全空间角度进行离散采样,采样间隔为 3° ,主要散射源在该范围内具有小角度缓变性。在此条件下,对数据进行平滑处理,筛选出来的散射源合成的全方位散射特性与真实目标的电磁散射特性基本一致。主要散射源贡献与散射总场的对比如图 3 所示,方均根误差为 1.6 dB。

由于存在进气孔,导弹为非对称结构,在 $\theta = 90^\circ$ 和 $\theta = 270^\circ$ 的姿态下 RCS 存在差别。在 $\theta = 90^\circ$ 附近时,由于推进器底部有较强的镜面回波,此时的 RCS 波动范围较大;在 $\theta = 270^\circ$ 附近时,弹头对当前角度的散射贡献最大,其他部件可忽略,此时的

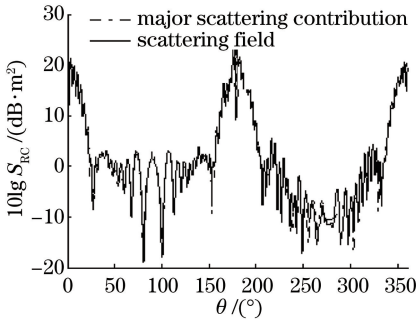


图3 主要散射源贡献与散射总场的对比

Fig. 3 Comparison between major scattering source contribution and total scattering field

RCS波动范围较小;在 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=180^\circ$ 时,弹身完全垂直于入射波的方向,且两主翼的法向平行于入射波方向,因此该角度下的RCS达到最大值。

以某型号坦克为例,如图4所示。选取姿态 $\theta=21^\circ$, φ 从 75° 变化至 104° ,进行强散射源筛选。采用如巡航导弹同样的处理后,筛选出来的散射源合成的散射特性分别与相同姿态下目标在暗室测量的结果、真实目标的电磁散射特性作对比,如图5所示,误差结果分别为1.6795 dB和0.54147 dB,三者的结果相互接近,验证了强散射源筛选方法的有效性。图5中的峰值1主要来自坦克盖与坦克身形成的二面角的贡献,峰值2主要来自坦克身上的大圆柱与坦克身形成的顶帽结构产生的强散射作用。

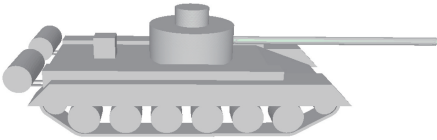


图4 某型号坦克示意图

Fig. 4 Schematic of certain type of tank

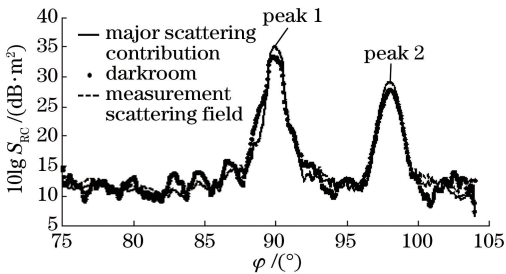


图5 主要散射源贡献分别与暗室测量结果、散射总场的对比

Fig. 5 Comparison between major scattering source contributions and darkroom measurement or total scattering field

3.2 边缘绕射参数化建模

散射中心参数化建模是通过雷达回波信息筛选出的目标强散射源信息得到的目标特性的过程,并与由目标几何模型的相关参数(频率、位置等参数)生成的目标特性作对比、匹配,从而实现目标的高精度识别。

目标的散射特性主要由面类结构和边缘结构组成,因此,为了实现目标的识别工作,必须要区分开面类的散射作用和边缘的散射作用,并分别对面类结构、边缘结构进行参数化建模,确保散射机理清晰。本文主要对边缘的识别进行阐述。

3.2.1 边缘识别

为了精确呈现雷达目标的外部特征,确保尺寸信息的高精度重合,使用ANSYS软件中的Workbench模块进行几何建模。建模的整体思路为自底向上,即由点到面再到体。在完成目标的几何建模后,为了满足参数化模型建模的需求,需要对几何模型进行剖分,即分解目标的实体部件,还原出目标的每部分独立部件。基于上述条件,在软件中对几何模型进行剖分时,采用三角面元作为剖分单元,并须遵循以下规则:1)当模型表面的外法向突变时,将其划分为不同的部分;2)剖分工作完成后,不改变或不影响目标部件内、外部的散射机理;3)目标剖分得到的各部分尽量为目标的独立实体部件或是实体部件的组合。

遵循上述规则完成几何目标的剖分后即可得到由三角面元构成的目标的几何信息,包括三角面元的点、面等信息。但是,在剖分过程中,目标的同一表面会出现许多由相邻的三角面元构成的虚假边缘。这些虚假边缘不属于目标的真实边缘,不应该被考虑到边缘绕射的计算中,而应该被舍弃。因此,为了避免虚假边缘可能带来的影响,作以下规定:当相邻的两个面元的外法线向量的夹角超过 10° 时,这两个面元的公共边称为真实的边缘,即劈边,两个面元构成的结构叫做劈结构。根据以上规则剔除虚假边缘,可得目标所有面元的位置、法向信息以及所有劈边的两点信息。由此可求得劈边的单位法向向量,并可将单位法向向量统一化,即均转化为正向的单位法向向量。依据单位法向向量相同可判断出平行的劈边,再通过遍历的方法判断共点的劈边,根据一定的原则(平行且共点则同属于一条线段,劈边方向均为正向,可首尾相连)将劈边合并成目标部件上的边缘。

根据空间射线、追踪分集技术可知,若散射中心

的贡献仅来自于一条独立的射线,则散射中心的位置就是产生该条射线的一次作用反射点的位置;若散射中心的贡献是由多条具有相同路径的射线共同产生的,则以上多条射线的耦合作用点即为该散射中心的位置。通过计算上述等效反射点的加权平均就可得到散射中心的位置信息^[8]。

对于边缘散射来说,通过上述方法实现了边缘结构的判别以及散射中心位置信息的确定,下面的内容主要就如何确定散射中心的幅度信息进行展开。

3.2.2 用增量长度绕射系数理论计算目标绕射场

为了说明本文散射中心提取方法的有效性,验证所建立的参数化模型的精度,还需得到散射中心的幅度参数 A 。为此,对比参数化模型重构的 RCS 曲线与用物理光学加上增量长度绕射系数理论(ILDC)^[14-17]计算所得的边缘绕射场。

当利用高频近似方法实现电磁散射的计算时,需要考虑到尖顶、棱边等不连续部件的散射问题,而计算这些部件的散射均需要采用绕射理论。本文计算目标绕射场的方法为增量长度绕射系数理论。

图 6 为边缘绕射的示意图, β_i 和 β_s 为劈边缘切向分别与入射方向和散射方向的夹角, φ_i 和 φ_s 分别为入射方向和散射方向的横向分量与一个劈表面间的夹角, n 为劈角对 π 的归一化数值。

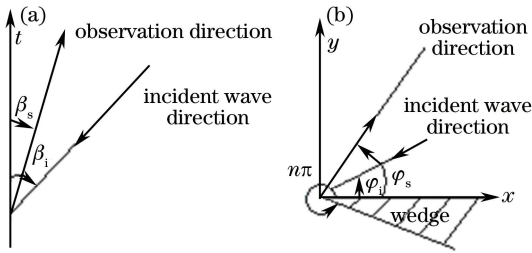


图 6 边缘绕射示意图。(a)局部坐标系;(b)角度表示
Fig. 6 Schematic of edge diffraction. (a) Local coordinate system; (b) angle representation

ILDC 的绕射系数由等效电磁流(MEC)的绕射系数和物理光学项两部分组成,可表示为

$$d_{///} = D_e - D'_{//}, \quad (3)$$

$$d_{\perp\perp} = D_m - D'_{\perp}, \quad (4)$$

$$d_{//\perp} = D_{em} \sin \beta_i - D'_{//\perp}, \quad (5)$$

式中: D_e 、 D_m 、 D_{em} 为 MEC 的绕射系数; D'_{\perp} 、 $D'_{//}$ 、 $D'_{//\perp}$ 为物理光学项,具体可参考文献^[18]。

ILDC 并矢系数 \hat{d} 可以用两对单位矢量的分量来表示,分别是与入射平面构成平行和垂直关系的单位矢量 $e_{//}^i, e_{\perp}^i$, 与散射平面构成平行和垂直关系

的单位矢量 $e_{//}^s, e_{\perp}^s$,

$$\hat{d} = d_{\perp\perp} e_{\perp}^s e_{\perp}^i + d_{\perp//} e_{\perp}^s e_{//}^i + d_{//\perp} e_{//}^s e_{\perp}^i + d_{///} e_{//}^s e_{//}^i, \quad (6)$$

式中: $d_{\perp\perp}$ 为入射波和散射波均为垂直极化时的绕射系数; $d_{\perp//}$ 为入射波为平行极化且散射波为垂直极化时的绕射系数; $d_{//\perp}$ 为入射波为垂直极化且散射波为平行极化时的绕射系数; $d_{///}$ 为入射波和散射波均为平行极化时的绕射系数。

入射场极化分量可表示为

$$\mathbf{p} = e_{\perp}^i \cos \gamma + e_{//}^i \sin \gamma, \quad (7)$$

式中: γ 为入射极化方向和入射平面法线之间的张角。故 $\hat{d} \cdot \mathbf{p}$ 可表示为

$$\hat{d} \cdot \mathbf{p} = d_{\perp\perp} e_{\perp}^s \cos \gamma + d_{\perp//} e_{\perp}^s \sin \gamma + d_{//\perp} e_{//}^s \cos \gamma + d_{///} e_{//}^s \sin \gamma. \quad (8)$$

综上,绕射场的表达式为

$$E^d = E^i \frac{\exp[j(kR - \pi/4)]}{\sqrt{2\pi R}} \hat{d} \cdot \mathbf{p} dt, \quad (9)$$

式中: E^i 为入射场; R 为等效源点与场点的距离; dt 为边缘单元。对(9)式沿劈边进行积分运算^[17]即可得到劈的绕射场。

以直角外劈为算例,构建单姿态下直角外劈的参数化模型,外劈如图 7 所示。

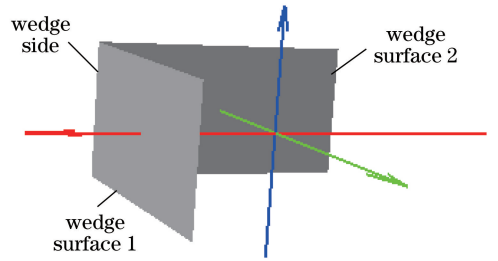


图 7 直角外劈模型示意图

Fig. 7 Schematic of right-angle external splitting model

直角外劈由两个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 无厚度长方形平板所构成,300 MHz 频率的平面波入射,入射角度 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = -45^\circ$ 。1) 进行实体部件分解,外劈的两个面分别为区域 1 和区域 2,劈边为区域 3。2) 对模型进行空间射线分集提取强散射中心,并按照散射中心 RCS 贡献大小进行排序,输出结果如表 2 所示。表 2 还给出了每个散射中心对应的等效的散射机理以及参数化模型中的频率依赖参数 α 、相对幅值参数 A 和三维位置参数 $r(x, y, z)$ 。

3.2.3 参数化模型重构 RCS 与 ILDC 理论计算结果的对比验证

对图 7 所示的直角外劈每隔 3° 进行采样,分别

表2 直角外劈目标的散射源筛选结果

Table 2 Scattering source screening results for right-angle external splitting target

Scattering center	α	RCS / (dB · m ²)	A	$r(x, y, z)$
Wedge surface1	1	13.67	0.0136	(10, 0, 0)
Wedge surface2	1	13.67	0.0136	(0, -10, 0)
Wedge side	0	7.83	0.0069	(10, -10, 0)

建立参数化模型并且将各个参数代入到属性散射中心模型中进行重构。将所得的结果与高频方法计算所得的结果进行对比(数据经平滑处理),如图8所示,可以看出,二者吻合效果良好。 $\varphi = -140^\circ$ 、 $\varphi = 40^\circ$ 处的峰值是入射波分别垂直入射到劈面1和劈面2产生镜面反射而造成的较强散射。

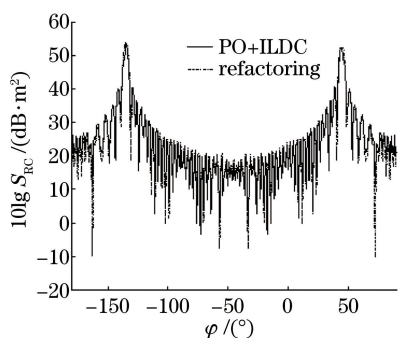


图8 直角外劈目标参数化模型重构 RCS 与 ILDC 理论计算的结果对比

Fig. 8 Comparison between parametric model reconstruction with RCS and ILDC theoretical calculation for right-angle external splitting target

再以长宽高均为 1 m 的理想纯导体(PEC)立方体为例。立方体的散射机理比较简单,仅有平板散射以及边缘绕射作用,不含部件之间的相互耦合作用。采用同样的方法进行参数化建模,设置 $\theta = 90^\circ$, φ 从 0° 变化至 180° ,入射频率为 3 GHz。参数化模型中包含面元的散射贡献以及边缘的散射贡献,重构所得的 RCS 曲线与高频方法计算所得的曲线进行对比,如图9所示,方均根误差为 2.93 dB。 $\varphi = 0^\circ$ 、 $\varphi = 90^\circ$ 和 $\varphi = 180^\circ$ 处的峰值均是在正入射情况下立方体的表面产生的镜面反射而造成的较强散射。

4 结 论

针对雷达目标自动识别,提出了一种散射中心模型参数化建模的方法。根据含空间射线分集的射线追踪技术筛选出了目标面类和边缘上的强散射源,并对强散射源进行了分析验证。同时,根据属性

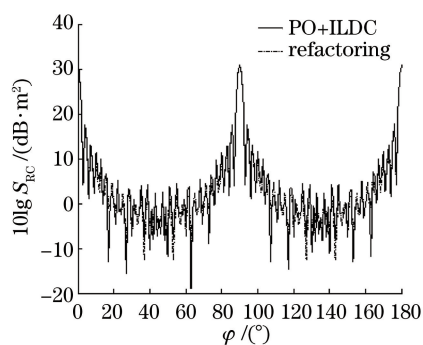


图9 PEC立方体目标参数化模型重构 RCS 与 ILDC 理论计算的结果对比

Fig. 9 Comparison between parametric model reconstruction with RCS and ILDC theoretical calculation for PEC cubic target

散射中心模型,对一些参数进行了确定。结合具体算例,说明了基于属性散射中心模型的参数化建模的准确性,验证了本文方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Liu Y P, Wang C, Xia H Y. Application progress of time-frequency analysis for lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 120005. 刘燕平, 王冲, 夏海云. 时频分析在激光雷达中的应用进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120005.
- [2] Ma S, Deng K Z, Zhuang H F, et al. Otsu change detection of low and moderate resolution synthetic aperture radar image by using multi-texture features [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 062804. 马骥, 邓喀中, 庄会富, 等. 中低分辨率合成孔径雷达影像多纹理特征的 Otsu 变化检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 062804.
- [3] Wehner R D. High-resolution radar [M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 1995: 197-237.
- [4] Hurst M, Mittra R. Scattering center analysis via Prony's method [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1987, 35(8): 986-988.
- [5] Wang M G. Geometric diffraction theory [M]. Xi'an: Northwest Telecommunications Engineering Institute Press, 1985: 17-39. 汪茂光. 几何绕射理论 [M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985: 17-39.
- [6] 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.

- [7] Potter L C, Chiang D M, Carriere R, *et al.* A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43(10): 1058-1067.
- [8] Lu S, Xu P G. Analytical method for electromagnetic field boundary value problem[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005.
鲁述, 徐鹏根. 电磁场边值问题解析方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
- [9] Potter L C, Moses R L. Attributed scattering centers for SAR ATR [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(1): 79-91.
- [10] Sun L F, He Z S, Ji B F, *et al.* Modeling and tracking of maneuvering extended objects using high resolution sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0228001.
孙力帆, 何子述, 冀保峰, 等. 基于高精度传感器量测的机动扩展目标建模与跟踪[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0228001.
- [11] Yuan F. Research on anisotropic impedance boundary electromagnetic problem algorithm [D]. Wuhan: Wuhan University, 2006: 17-27.
袁飞. 各向异性阻抗边界电磁问题算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006: 17-27.
- [12] He Y. Refinement research on algorithms and applications of high-frequency electromagnetic scattering from complex targets[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014: 32-60.
何洋. 复杂目标精细化高频电磁建模方法及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014: 32-60.
- [13] Wang J, Zhou J J, Wang F. 2D scattering centers extraction of objects based on GTD model [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(4): 958-962.
王菁, 周建江, 汪飞. 基于 GTD 模型的目标二维散射中心提取[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 958-962.
- [14] Knott E. The relationship between Mitzner's ILDC and Michaeli's equivalent currents [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1985, 33(1): 112-114.
- [15] Xiao H, Hu W D. EM scattering calculation of planar structure based on the theory of ILDC [J]. Electronic Warfare Technology, 2004, 19(5): 26-31.
肖慧, 胡卫东. 基于 ILDC 理论的平面结构电磁散射计算[J]. 电子对抗技术, 2004, 19(5): 26-31.
- [16] Qin D H, Wang B F, Liu T J. Improvements of edges detecting and diffraction field computing in GRECO [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(8): 1160-1163.
秦德华, 王宝发, 刘铁军. GRECO 中棱边检测方法及其绕射场计算的改进[J]. 电子学报, 2003, 31(8): 1160-1163.
- [17] Ross R. Radar cross section of rectangular flat plates as a function of aspect angle [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 329-335.
- [18] Xue J. High-frequency RCS visual prediction and radar imaging for complex targets [D]. Wuhan: Wuhan University, 200: 17-23.
薛俊. 复杂目标高频 RCS 可视化预估及雷达成像研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009: 17-23.