基于多流形表达的目标单次反射/绕射机理散射中心的全视角参数化建模方法

闫华* 陆金文 殷红成
散射辐射全国重点实验室 北京 100854
DOI:10.12238/ast.v1i1.13701

[摘　要] 诸多雷达应用，如场景信号模拟、目标识别等，需要通过适当的稀疏表示来压缩和快速重构目标散射特性数据。散射中心模型是一种广泛被采用的目标散射特性模型，可实现目标散射特性数据的稀疏、降维表达。该研究首先针对具有单次反射/绕射机理的目标散射特性数据，基于高频渐近理论和射线理论揭示了全视角散射中心（Global SC, GSC）的多流形结构。然后引入多流形结构聚类和曲线/曲面拟合算法来构建目标 GSC 模型。为了验证提出的理论和算法，对球头锥目标进行了仿真实验。仿真结果表明，GSC 模型可以大幅压缩全视角散射特性数据，同时确保重构精度。提出的多流形 GSC 表示模型及构建方法，可有效支撑半实物仿真系统有限内部存储下的快速信号模拟等应用。
[关键词] 散射中心；全视角散射中心；散射中心角度关联；多流形；散射机理
中图分类号：TN957.51 文献标识码：A

A Full View Parametric Modeling Method for the Scattering Center of a Single Reflection/Diffraction Mechanism of a Target Based on Multi Manifold Expression

Hua Yan*, Jinwen Lu, Hongcheng Yin
Planning and Design Research Institute Co., Ltd

[Abstract] Many radar applications, such as scene signal simulation and target recognition, require appropriate sparse representation to compress and quickly reconstruct target scattering characteristic data. The scattering center model is a widely used target scattering characteristic model, which can achieve sparse and reduced dimensional expression of target scattering characteristic data. This article first focuses on the scattering characteristics data of targets with single reflection/diffraction mechanisms, and based on high-frequency asymptotic theory and ray theory, reveals the multi manifold structure of the Global SC (GSC) scattering center from all angles. Then, multi manifold structure clustering and curve/surface fitting algorithms are introduced to construct the target GSC model. In order to verify the proposed theory and algorithm, simulation experiments were conducted on spherical cone targets. The simulation results show that the GSC model can significantly compress the full view scattering characteristic data while ensuring reconstruction accuracy. The multi manifold GSC representation model and construction method proposed in this article can effectively support applications such as fast signal simulation in semi physical simulation systems with limited internal storage.
[Key words] intelligent water conservancy; key technology; main function; application field; technical advantages

1 概述

在雷达技术中，目标散射特性通常采用若干物理量来描述，如雷达散射截面（RCS, Radar Cross Section）、高分辨率距离像（HRRP, High Resolution Range Profile）、角闪烁等。这些物理量在雷达系统设计、系统测试、系统仿真、目标识别等诸多应用中具有十分重要的意义。

实际应用中，常常需要建立数据库来存储目标散射特性数据。然而，散射特性数据对雷达的频率和视角非常敏感，因此通常要求频率、角度的采样间隔足够密集。于是，若需要存储宽带、全角度下的特性数据，其数据量将是非常巨大的。为此，有必要建立一种散射数据的稀疏表示并构建模型，来压缩散射特性数据。

根据几何绕射理论 (GTD, Geometrical Theory of Diffraction)[1]，电大尺寸目标的总散射可以近似地看成是一

系列独立散射中心响应的叠加。散射中心模型是目标散射特性的一种稀疏表示模型。至今，人们提出了多种类型的散射中心模型，如理想点模型[2]、Prony 模型[3]、GTD 模型[4]和属性散射中心（ASC, Attributed Scattering Center）模型[5]等，它们不同程度上给出了频率和角度的参数化表达。

一些研究人员利用散射中心模型来压缩散射特性数据，并在必要的时候重建它们。Tseng[6]基于理想点模型，利用时域或图像域加窗技术实现了 RCS 测量数据的压缩，并通过上述技术的逆过程进行 RCS 数据重建。Chang 等人[7]通过引入点散射中心和线散射中心（即延展型散射中心）的模型，提升了数据压缩的效果。Wang[8]利用 GTD 模型和多信号分类（MUSIC, MUlti-SIgnal Classification）参数估计算法实现宽带 RCS 数据的压缩。然而，具有足够的数据采样点数，是上述方法有效的先决条件。这使得当通过仿真获取 RCS 数据时，其效率将十分低下，特别是对于构建 3 维散射中心模型的情况。为了解决这个问题，文献[9-10]的作者尝试了一种数据插值和外推的方法来减少待压缩散射数据的采样点数。然而，仍需要足够的带宽和采样率来保证模型参数估计的精度，依然比较耗时。Bhalla 等人[11]提出了一种基于弹跳射线（SBR, Shooting and Bouncing Ray）的方法在点频、单视角下提取 3 维理想点散射中心模型参数。这种方法避免了大量的散射数据计算，可将散射中心建模效率提高 3—5 个数量级。另外，闫华等人[12]推导了散射中心频率依赖因子计算公式，进而将 SBR 技术与 GTD 模型相结合，将 Bhalla 方法扩展到了大宽带适用的情形[13]。该方法具有更强的频域外推能力和更高的数据压缩性能。

然而，上述散射中心模型及构建方法无法实现对目标散射更为复杂的角度依赖性的表达。为了解决这个问题，许多研究人员尝试在构建全视角散射中心（GSC, Global Scattering Center）模型。一种被普遍采用的 GSC 模型构建方法的主要思路是先提取各视角下的散射中心参数，再建立它们之间的关联关系。Bhalla 等人[14]将散射中心位置转换到以目标为中心的全局坐标系，并使用基于体素的方法关联各角度下的散射中心模型。周建雄等人[15-16]使用霍夫变换实现宽角散射中心关联。胡杰明等人[17]利用随机抽样一致（RANSAC, Random Sample Consensus）算法由各个角度下的 HRRP 构建 GSC 模型。值得注意的是，这些方法仅适用于固定型散射中心，即散射中心位置不随视角变化。然而，对于真实目标，也存在非固定型 SC（包括滑动型和延展型），它们的位置随着雷达视向角的变化而变化[18]。考虑到这一问题，文献[19-20]的作者开发了一种利用最近邻聚类算法构建 GSC 模型的新方法，该方法可同时适用于固定型、延展型和滑动型的散射中心。然而，该算法鲁棒性不足。文献[21]开发了一种基于点排序识别聚类结构（OPTICS, Ordering Points To Indentify the Clustering Structure）的方法，尽管一定程度上提高了算法的性能，但仍然难以分离相邻或者相交的散射中心点簇。总之，现有的 GSC 建模方法对于固定型、延展型和滑动型混合类型的 GSC，或者 GSC 彼此相邻或交叉的情况，性能仍显不足。

本文针对单次反射/绕射机理的目标散射特性数据，提出了基于多流形概念的 GSC 表征方法，并进一步引入多流形聚类和曲线/曲面拟合算法来构建目标 GSC 模型。所提出的方法能够提高角域的外推能力和数据压缩性能。本文的其余部分安排如下：第 3 节在高频渐近理论和射线理论的基础上，通过推导分析，揭示了全视角散射中心的多流形结构；第 3.1 节将多流形聚类算法应用于散射中心宽角关联，并给出了数据处理流程；第 4 节通过仿真实验来验证所提出方法的有效性；最后一节，对本文进行了总结。

2 宽角散射中心的多流形结构

本质上，散射中心形成的根源是高频散射机理的空间局域效应。通常，散射中心模型的一般形式为

$$S(k,\hat{r}) = \sum_{m=1}^{M} A_m(k,\hat{r}) e^{j2k\hat{r}\cdot \boldsymbol{x}_m(\hat{r})} \tag{1}$$

其中 $k = 2\pi f/c$ 为波数，f 为频率，c 为传播速度，$\hat{r}$ 为雷达视线的单位矢量，S 为特定发射和接收极化下的标量复散射截面，A_m、$\boldsymbol{x}_m$ 分别为第 m 个散射中心的幅度和位置。

在传统的散射中心概念中，散射中心的幅度和位置是恒定不变的常数，因此仅适用于较窄的频率和角度范围，这在处理宽角散射数据时并不经济。从 GSC 的角度来看，各个角度区域的散射中心是相互关联的，因此每个 GSC 的幅度和位置均为频率和角度的函数。

基于高频渐近理论和射线理论，如几何光学（GO, Geometrical Optics）、GTD、物理光学（PO, Physical Optics）、物理绕射理论（PTD, Physical Theory of Diffraction），可以推导出具有频率和角度依赖的散射中心表示。文章[12,22]推导并验证了任意多次反射/绕射机理的散射中心频率依赖因子的表达式。在本文中，我们重点研究散射中心位置与角度之间的关系。

2.1 基于 GO/GTD 的 SC 位置与雷达视角之间的关系

假设线偏振平面波照射在分片平滑、电大且理想导电（PEC, Perfect Electrically Conducting）的目标上。从 GO 理论来看，入射平面波被视为射向目标区域并在目标表面上反弹一次或多次的平行射线束。在本文中，我们仅考虑单次散射情况和单站（即后向散射）情况。

通常目标的单次散射机理主要包括镜面反射、边缘绕射和尖顶/角绕射。

对于双弯曲曲面的镜面反射机理贡献，从射线理论的角度来分析散射中心形成的过程，如图 1 所示。显然，对于单个面片来说，只有一条射线（图 1 中的红线）可以返回雷达。那么这条射线在曲面片上的弹跳点就可以看作是等效的散射中心位置（图 1 中的红点）。

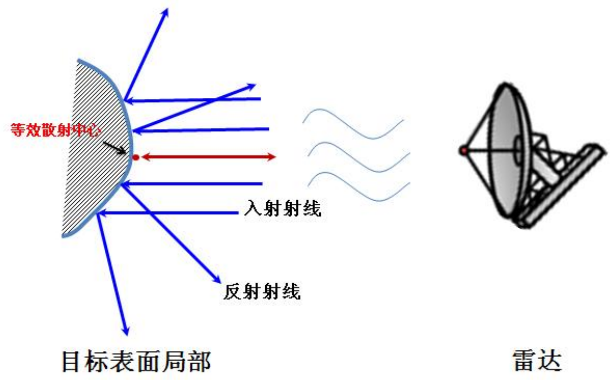


图 1 双弯曲曲面镜面反射机理形成 SC 的示意图

设 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 为散射中心的 3 维位置，$\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 为与散射中心位置 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 所对应的可见角度向量，它们都是变量。根据 GO 理论，单站情况下 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 与 $\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 满足如下约束：

$$\hat{r}_{\mathrm{sc}} \cdot \boldsymbol{x}_u^{\mathrm{sc}} = \hat{r}_{\mathrm{sc}} \cdot \boldsymbol{x}_v^{\mathrm{sc}} = 0 \tag{2}$$

其中 u 、v 分别是曲面片两个主曲率方向的坐标，$\boldsymbol{x}_u^{\mathrm{sc}}, \boldsymbol{x}_v^{\mathrm{sc}}$ 分别是 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 对 u 、v 的偏导数。

另外，$\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 可以写成

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} = \boldsymbol{x}(u_{\mathrm{sc}}, v_{\mathrm{sc}}),\ (u_{\mathrm{sc}}, v_{\mathrm{sc}}) \in D^2 \tag{3}$$

其中 D^2 可以表征镜面反射散射中心的可见角区域（2 维）。

从式（2）也可以看出，双弯曲曲面反射情形下每个特定的 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 对应着唯一的 $\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 。$\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 将随着 $\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 的变化而变化。对此，我们采用集合与空间的语言进行描述。用 P^{α}，C^{γ} 分别表示 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 在单个视角和所有视角下所有可能散射中心位置构成的子空间；用 N^{β}，Ω^{δ} 分别表示 $\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 在单个视角和所有视角下的子空间，其中 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 是子空间的维数。

我们可以将(3)重写为集合的表达形式：

$$X_m = \{\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} \mid \boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} = \boldsymbol{x}(u_{\mathrm{sc}}, v_{\mathrm{sc}})\} \to P^0 \subset C^2 \subset R^3 \tag{4}$$

其中 m 是第 m 个 GSC 的序号，固定视角下，集合 X_m 是一个 0 维空间 P^0（即一个点），这表明散射中心是局域型的。然而，当考虑所有可能视角时，X_m 则是一个二维空间的子区域。

进一步，从(2)的约束关系中可以得出如下对变量 $\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 的集合表示：

$$R_m = \{\hat{r}_{\mathrm{sc}} \mid \hat{r}_{\mathrm{sc}} = \hat{n}(u_{\mathrm{sc}}, v_{\mathrm{sc}})\} \to N^0 \subset \Omega^2 \subset S^2 \tag{5}$$

其中 $\hat{n}(u_{sc}, v_{sc})$ 是曲面片在 SC 位置处的法向量。

由于每个 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 对应单个 $\hat{r}_{\mathrm{sc}}$，R_m 是一个单位长度的点集（记为 N^0 ）。然而，当考虑各种可能的位置时，所有位置都形成单位球 S^2 上的二维区域 Ω^2 。

对于边缘绕射机理，图 2 描绘了弯曲边缘绕射形成散射中心的情况。

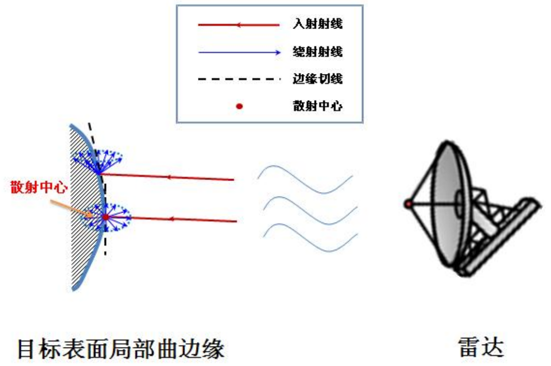


图 2 曲边缘绕射机理形成散射中心的示意图

从 GTD 理论来看，边缘绕射射线分布在一个圆锥面上，称为 Keller 锥（如图 2 所示）。与镜面反射的情况类似，对于单个曲线段来说，仍然只有一根射线（图 2 中的红线）可以返回雷达，并且该射线在边缘上的绕射点可以看作是等效的散射中心位置（图 2 中的红点）。

此时，$\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 、$\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 满足如下约束：

$$\hat{r}_{\mathrm{sc}} \cdot \boldsymbol{x}_t^{\mathrm{sc}} = 0 \tag{6}$$

其中 t 是曲边缘参数方程 $\boldsymbol{x}(t)$ 的坐标，$\boldsymbol{x}_t^{\mathrm{sc}}$ 是曲边缘参数方程 $\boldsymbol{x}(t)$ 在绕射点 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 处的导数。显然，$\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 满足

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} = \boldsymbol{x}(t_{\mathrm{sc}}),\ t_{\mathrm{sc}} \in D^1 = [t_1, t_2] \tag{7}$$

其中 $D^1 = [t_1, t_2]$ 可以表征边缘绕射散射中心的可见区间（1 维）。

与前面镜面反射情形的表达方式类似，我们也可以将式(7)重写成集合的形式：

$$X_m = \{\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} \mid \boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} = \boldsymbol{x}(t_{\mathrm{sc}})\} \to P^0 \subset C^1 \subset R^3 \tag{8}$$

其中固定视角下，X_m 呈现为 0 维子空间 P^0（即一个点）;但若考虑所有可能视角，X_m 呈现 1 维子空间区域 C^1 。

由式(6)的约束关系，可以得出关于 $\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 的集合表示：

$$R_m = \{\hat{r}_{\mathrm{sc}} \mid \hat{r}_{\mathrm{sc}} \cdot \boldsymbol{x}_t^{\mathrm{sc}} = 0\} \to N^1 \subset \Omega^2 \subset S^2 \tag{9}$$

与双弯曲曲面镜面反射情形不同的是，曲边缘散射中心的每个 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 可能对应无穷多个 $\hat{r}_{\mathrm{sc}}$，即特定位置 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 下，R_m 是单位向量形成的一维子空间（记为 N^1 ）。然而，当考虑不同位置 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 时，R_m 则形成了单位球面 S^2 上的二维区域 Ω^2 。

对于尖顶/角绕射机理，由 GTD 理论，散射中心的形成如图 3 所示。此时仍然只有一根射线返回雷达。

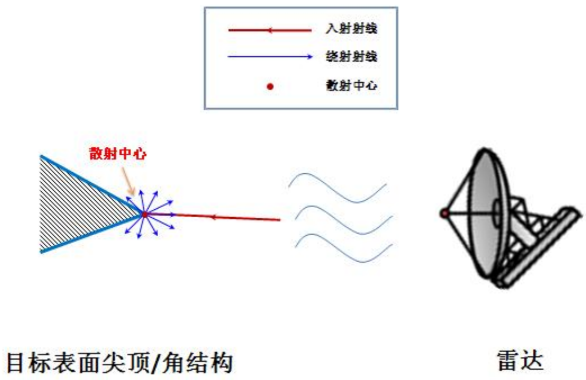


图 3 尖顶/角绕射机理形成散射中心的示意图

显然，绕射点就是尖顶点或尖角点，即

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} = \boldsymbol{x}_{\mathrm{tip/corner}} \tag{10}$$

同样，可以将式(11)重写为集合的形式：

$$X_m = \{\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} \mid \boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} = \boldsymbol{x}_{\mathrm{tip/corner}}\} \to P^0 = C^0 \subset R^3 \tag{11}$$

无论是固定视角情形，还是所有视角情形，X_m 均呈现 0 维子空间，即分别为 P^0、C^0。$\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 的集合表示为：

$$R_m = \{\hat{r}_{\mathrm{sc}} \mid \text{尖顶可见方向}\} \to N^2 = \Omega^2 \subset S^2 \tag{12}$$

即每个 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 都对应于无限多个 $\hat{r}_{\mathrm{sc}}$，R_m 形成单位球 S^2 上的二维区域 $N^2 = \Omega^2$。

从上面的讨论来看，来自双曲面、曲边缘和尖顶/角结构的所有 GSC 都是点或局部型散射中心。然而，根据 ASC 模型，也存在延展型散射中心，此时，散射中心位置可以呈现为线段[5]。在这种情况下，目标表面或边缘的曲率将为零，这使得 GO 和 GTD 表达产生奇异。接下来，将使用 PO 和 PTD 理论来解决这个问题。

2.2 基于 PO/PTD 的 SC 位置与雷达视角之间的关系

在单站和远场条件下，计算目标散射的 PO 公式为

$$S(k) = -\frac{\mathrm{j}k}{\sqrt{\pi}} \int f(\boldsymbol{x}) e^{\mathrm{j}kg(\boldsymbol{x})} dS \tag{13}$$

其中，$f(\boldsymbol{x})$ 为幅度函数，$g(\boldsymbol{x})$ 为路程函数，具有下面的形式

$$g(\boldsymbol{x}) = 2\hat{r} \cdot \boldsymbol{x} \tag{14}$$

$$f(\boldsymbol{x}) = \hat{r} \cdot \hat{n}(\boldsymbol{x}) \tag{15}$$

其中积分变量 $\boldsymbol{x}$ 可以在目标表面上取。

采用主曲率坐标表示曲面，即 $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}(u,v)$，于是 PO 积分式（13）化为

$$S(k) = -\frac{\mathrm{j}k}{\sqrt{\pi}} \iint f(u,v) e^{\mathrm{j}kg(u,v)} \mathrm{d}u\mathrm{d}v \tag{16}$$

使用驻相法（SPM, Stationary Phase Method）[23]，在非退化条件 $g_{uu}(u,v) \cdot g_{vv}(u,v) \neq 0$ 下，积分（16）近似等于若干临界点处产生的贡献之和，这里的临界点包括三种：内部驻相点、边界驻相点、角点，它们正好对应于前面从 GO/GTD 讨论的三种机理类型的 SC：镜面反射、边缘绕射、尖顶/角绕射。

而退化条件 $g_{uu}(u,v) \cdot g_{vv}(u,v) = 0$ 下，正是 GO/GTD 理论失效的情况。

退化条件表示 g_{uu} 和 g_{vv} 至少一项等于 0，于是下面分两种情况进行讨论。

情况 1：$g_{uu} \neq 0$，$g_{vv} = 0$

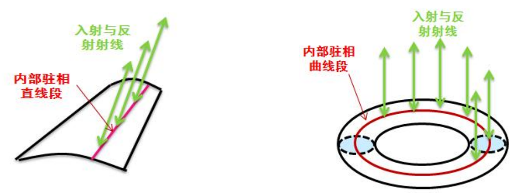
于是有

$$\hat{r} \cdot \boldsymbol{x}_{vv}(u,v) = 0 \tag{17}$$

由 SPM，驻相点处有 $g_u(u_s,v) = g_v(u_s,v) = 0$，即

$$\hat{r}_{\mathrm{sc}} \cdot \boldsymbol{x}_u(u_s,v) = \hat{r}_{\mathrm{sc}} \cdot \boldsymbol{x}_v(u_s,v) = 0,\ v \in [v_1, v_2] \tag{18}$$

不难推出 $\hat{n}(u_s,v) \cdot \boldsymbol{x}_{vv}(u_s,v) = 0$，可导出两种情况：$\boldsymbol{x}_{vv} = 0$ 或 $\hat{n} \perp \boldsymbol{x}_{vv}$，分别对应于单弯曲曲面或环面，如图 4 所示。与上一小节情况不同，在特定视角下，有无数根射线可以返回雷达。此时，驻相“点”不再是单个点，而是一条直线或曲线段，称为驻相线段。此时与前面的“点”或“局域型”散射中心不同，称其为“延展”型散射中心。



(a) 单弯曲曲面　(b) 环面

图 4 两种几何结构镜面反射及形成的“延展”型散射中心示意图

于是，单弯曲曲面镜面反射形成的散射中心位置 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 及其可见视线方向 $\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 可以写成下面的集合形式：

$$X_m = \{\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} \mid \boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} = \boldsymbol{x}(u_s,v), v \in [v_1,v_2]\} \to P^1 \subset C^2 \subset R^3 \tag{19}$$

$$R_m = \{\hat{r}_{\mathrm{sc}} \mid \hat{r}_{\mathrm{sc}} = \hat{n}(u_s,v), \text{任意} v \in [v_1,v_2]\} \to N^0 \subset \Omega^1 \subset S^2 \tag{20}$$

环面镜面反射形成的散射中心位置 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 及其可见视角 $\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 可以写成下面的集合形式：

$$X_m = \{\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} \mid \boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}} = \boldsymbol{x}(u_s,v), v \in [v_1,v_2]\} \to P^2 = C^2 \subset R^3 \tag{21}$$

$$R_m = \{\hat{r}_{\text{sc}} \mid \hat{r}_{\text{sc}} = \hat{n}(u_s, v), 任意 v \in [v_1, v_2]\} \\ \to N^0 = \Omega^0 \subset S^2 \tag{22}$$

情况 2：$g_{uu} = g_{vv} = 0$

于是，有 $x_{uu}(u,v) = x_{vv}(u,v) = 0$，假如不存在高阶驻相点，那么该曲面为平面。

由 SPM，可导出下面约束关系

$$\hat{r} \cdot \boldsymbol{x}_u(u,v) = \hat{r} \cdot \boldsymbol{x}_v(u,v) = 0,\ (u,v) \in D \tag{23}$$

同样的，存在无数条射线可以返回雷达，如图 5 所示。平面上的所有点都被视为散射中心，也属于延展型散射中心。

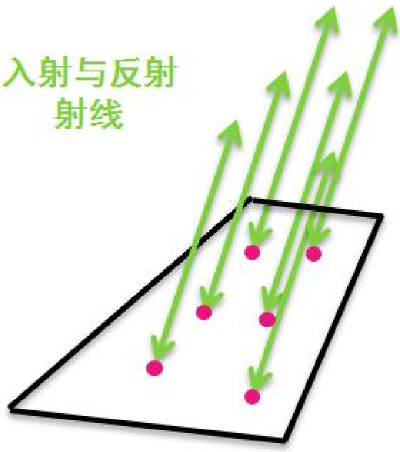


图 5 平面几何结构镜面反射及形成的“延展”型散射中心示意图

于是，平面镜面反射形成的散射中心位置 $\boldsymbol{x}^{\text{sc}}$ 及其可见视角 $\hat{r}_{\text{sc}}$ 可以写成下面的集合形式：

$$X_m = \{\boldsymbol{x}^{\text{sc}} \mid \boldsymbol{x}^{\text{sc}} = \boldsymbol{x}(u,v), (u,v) \in D\} \\ \to P^2 = C^2 \subset R^3 \tag{24}$$

$$R_m = \left\{\hat{r}_{\text{sc}} \mid \hat{r}_{\text{sc}} = \hat{n}(u,v), 任意 (u,v) \in D\right\} \\ \to N^0 = \Omega^0 \subset S^2 \tag{25}$$

接下来我们再讨论一下退化条件下的边缘绕射情况。根据 PTD 理论，边缘绕射的贡献可以表示为线积分的形式：

$$S^{\text{edge}}(k, \hat{r}) = -\frac{1}{\text{j}k}\int_{t_1}^{t_2} f_1\left(\boldsymbol{x}(t), \hat{r}\right) e^{\text{j}kg(\boldsymbol{x}(t),\hat{r})} \text{d}t \tag{26}$$

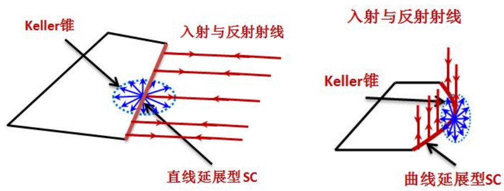
其中 $\boldsymbol{x}(t) = \left(u(t), v(t)\right)$ 为作为积分变量的被入射射线能够照到的边缘上的 3 维位置矢量。由 SPM，可以推出散射中心位置 $\boldsymbol{x}^{\text{sc}}$ 及其可见视线方向 $\hat{r}_{\text{sc}}$ 满足如下约束关系：

$$g_t = \hat{r}_{\text{sc}} \cdot \boldsymbol{x}_t^{\text{sc}} = 0 \tag{27}$$

退化条件下，有

$$g_{tt} = \hat{r}_{\text{sc}} \cdot \boldsymbol{x}_{tt}^{\text{sc}} = 0 \tag{28}$$

不难导出该条件等同于 $\boldsymbol{x}_{tt}^{\text{sc}} = 0$ 或 $\hat{r}_{\text{sc}} \perp \boldsymbol{x}_{tt}^{\text{sc}}$，它对应于直边缘绕射情况与沿着副法线入射的曲边缘情况，如图 6 所示。



(a) 直边缘(b) 沿着副法线入射的曲边缘

图 6 两种边缘结构绕射及形成“延展”型散射中心示意图

于是，直边缘绕射形成的散射中心位置 $\boldsymbol{x}^{\text{sc}}$ 及其可见视线方向 $\hat{r}_{\text{sc}}$ 可以写成下面的集合形式：

$$X_m = \{\boldsymbol{x}^{\text{sc}} \mid \boldsymbol{x}^{\text{sc}} = \boldsymbol{x}(t_{\text{sc}}), t_{\text{sc}} \in [t_1, t_2]\} \\ \to P^1 = C^1 \subset R^3 \tag{29}$$

$$R_m = \{\hat{r}_{\text{sc}} \mid \hat{r}_{\text{sc}} = \hat{a} \times \hat{t}, \hat{a}\ 是任意单位矢量\} \\ \to N^1 = \Omega^1 \subset S^2 \tag{30}$$

其中 $\hat{t}$ 是直边缘的方向矢量。

沿副法向入射的曲边缘形成的散射中心位置 $\boldsymbol{x}^{\text{sc}}$ 及其可见视线方向 $\hat{r}_{\text{sc}}$ 可以写成下面的集合形式：

$$X_m = \{\boldsymbol{x}^{\text{sc}} \mid \boldsymbol{x}^{\text{sc}} = \boldsymbol{x}(t_{\text{sc}}), t_{\text{sc}} \in [t_1, t_2]\} \\ \to P^2 = C^2 \subset R^3 \tag{31}$$

$$R_m = \{\hat{r}_{\text{sc}} \mid \hat{r}_{\text{sc}} = \hat{b}_e\} \to N^0 = \Omega^0 \subset S^2 \tag{32}$$

其中 $\hat{b}_e$ 是曲边缘的副法线方向矢量。

2.3 联合散射中心位置及其可见视线方向的 6 维特征空间及 GSC 多流形数据结构

现在总结一下上面讨论的 8 种散射结构，它们可以分为 6 种 GSC 类型。散射结构、GSC 类型和子空间维数如表 1 所示。GSC 类型可以通过散射中心的二维分类描述来给出[24]。$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 的含义已在 2.1 小节中给出。

从表 1 中可以看出以下几项推论：

1)不同的散射结构对应不同的 GSC 类型，并且其相应的集合 $P / N / C / \Omega$ 具有不同的维数特征；

表 1 8 种散射结构的 GSC 类型和子空间维数

散射结构	GSC 类型*	$\boldsymbol{\alpha}$	$\boldsymbol{\beta}$	$\boldsymbol{\gamma}$	$\boldsymbol{\delta}$
双弯曲曲面	SS	0	0	2	2
单弯曲曲面	SD	1	0	2	1
环面	DD	2	0	2	0
平面	DD	2	0	2	0
曲边缘（非副法向入射）	FS	0	1	1	2

曲边缘（副法向入射）	DD	2	0	2	0
直边缘	FD	1	1	1	1
尖顶/角	FF	0	2	0	2

* F、S、D 分别代表固定型散射中心、滑动型散射中心和延展型散射中心。

2）从所有 GSC 类型的 $\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 与 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 之间的约束条件来看，$\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 与目标表面 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 处的法向量有关，也就是说，$\hat{r}_{\mathrm{sc}}$ 支撑空间 N^{β} 是 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}}$ 支撑空间 P^{α} 的法空间；

3）任何 GSC 类型都存在关系

$$\alpha+\delta\equiv\beta+\gamma\equiv 2 \tag{33}$$

这表明在散射中心位置向量与视线方向向量的 6 维联合特征空间中，GSC 具有固定的维数：2。

由此，定义 6 维联合特征向量 $(\boldsymbol{x}^{\mathrm{sc}},\hat{r}_{\mathrm{sc}})$，那么表 1 中的任意一类 GSC 的 6 维联合特征必然分布一个 2 维的子空间中，并且不同类型的 GSC 所在的子空间嵌入维不同。

由于表面或边缘是分片或分段平滑的，因此我们可以得出结论，6 维特征向量形成 2 维子空间是嵌入在 6 维特征空间中 2 维流形。因此，表示为 6 维特征向量的目标 GSC 模型整体，具有多流形结构，即一系列 2 维子流形的组合，而每个子流形对应着一个与特定散射结构相关联的 GSC 分量。另外，值得说明的是，根据高频渐近理论的基本假设，以及不同机理的高频渐近表达公式[24]，每个分片或分段平滑的表面或边缘形成的 GSC 的幅度函数也是随着视线角的变化缓慢变化的，这个结论为我们建立 GSC 模型构建算法时提供了依据。

流形是表示和分析复杂数据集的一个非常重要的数学概念和工具。在本文的剩余部分，基于上述关于 GSC 数据的多流形结构，我们将基于多流形聚类算法将各个角度的散射中心关联起来，再通过幅度-角度数据拟合，实现宽/全视角散射特性数据的 GSC 模型表示。

3 GSC 建模方法

3.1 多流形聚类

利用聚类算法能够将宽角散射中心关联起来，但散射中心子流形之间可能相互靠近甚至交叠，大大增加了聚类难度。谱多流形聚类[25]（Spectral Multi-manifold Clustering, SMMC）算法通过将相互交叠的数据点拆解开来得到不同的子流形成分，能够解决上述问题。SMMC 算法综合考虑切空间相关的“结构相似度”和欧氏距离相关的“局部相似度”来辅助构造更合适的相似度矩阵，使得来自不同流形结构的数据点之间具有相对低的相似度权值，进而实现性能更优的多流形聚类。

假设散射中心数据集 X 包含 k 个平滑的子流形，且所有子流形的维度均为 d，首先通过给定样本点附近的近邻点来估计每个散射中心数据点的切空间。若任意数据点 x_i、x_j 处的切空间为 Θ_i、Θ_j，则 x_i 与 x_j 的切空间之间的结构相似度可定义为：

$$p_{ij}=p(\Theta_i,\Theta_j)=\left(\prod_{l=1}^{d}\cos\theta_l\right)^{o} \tag{34}$$

式中，$o\in\mathrm{N}^{+}$ 为可调参数；$0\le\theta_1\le,\cdots,\le\theta_d\le\pi/2$ 为 Θ_i 和 Θ_j 之间的主角度。

衡量 x_i 与 x_j 之间欧氏距离关系的局部相似度可定义为：

$$q_{ij}=\begin{cases}1 & x_i\in\mathrm{Knn}(x_j)\ 或\ x_j\in\mathrm{Knn}(x_i)\\ 0 & 其它情形\end{cases} \tag{35}$$

式中：$\mathrm{Knn}(x)$ 为与 x 欧式距离最近的 K 个数据点。

将结构相似度与局部相似度相融合，可以构造更合适的相似度矩阵，相应的相似度权值可表示为：

$$w_{ij}=p_{ij}q_{ij}=\begin{cases}\left(\prod_{l=1}^{d}\cos\theta_l\right)^{o} & x_i\in\mathrm{Knn}(x_j)或x_j\in\mathrm{Knn}(x_i)\\ 0 & 其它情形\end{cases} \tag{36}$$

最后将整个相似度矩阵分割为多个子矩阵，使得子矩阵内部的数据结点相似而不同子矩阵间的数据节点相异，利用谱方法实现散射中心多流形聚类。完成散射中心聚类后，可以直接将从属于同一典型结构的宽视角散射中心有效关联。

3.2 数据处理流程

GSC 建模的数据处理流程如图 7 所示，主要包括局部散射中心提取、散射中心宽角关联、散射结构类型判断和 GSC 表征。利用构建的 GSC 模型，可以直接重构宽角 RCS 数据。

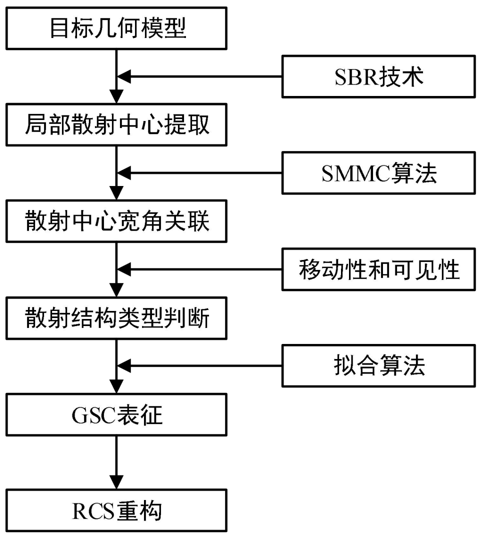


图 7 GSC 建模的数据处理流程

3.2.1 局部散射中心提取

给定目标几何模型和雷达参数，首先利用 SBR[26]技术计算目标的射线路径及散射场数据，进而利用射线积分成像[27]

方法快速生成目标的三维 ISAR（Inverse Synthetic Aperture Radar）像，计算公式为：

$$I(x,y,z)=[\sum_i \beta_i \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2k_0(z-z'_i)}\cdot \delta(x-x'_i,\mathrm{y}-y'_i,z-z'_i)]*h(x,y,\mathrm{z}) \tag{37}$$

式中，下标 i 为射线的序号；$*$ 为卷积运算；$\delta(\cdot,\cdot,\cdot)$ 为三维狄拉克函数；k_0 为中心波数；z 、x 、y 分别为径向和两个正交的横向距离；z'_i 为每根射线的总距离延迟；横向位置 x'_i 、y'_i 为第一次和最后一次弹射点横向位置的平均值；β_i 为每根射线远场散射贡献的复幅度值；$h(x,y,\mathrm{z})$ 为射线扩散函数，可表示为：

$$h(x,y,\mathrm{z})=k_0\,\mathrm{sinc}(\Delta k\cdot \mathrm{z})\cdot \mathrm{sinc}(k_0\Delta\phi\cdot x)\,\mathrm{sinc}(k_0\Delta\theta\cdot \mathrm{y}) \tag{38}$$

式中，Δk 、$\Delta\phi$ 、$\Delta\theta$ 分别为波数宽度和两个横向的角宽度。

获得目标的三维 ISAR 像后，利用迭代峰值搜索算法 -CLEAN[28]，可以进一步提取目标的局部散射中心。具体来说，通过迭代搜索残余 ISAR 像中的峰值点，提取相应散射中心的幅度和位置参数，然后从 ISAR 像中剔除该散射中心的点扩散响应。在第 n 次迭代，假设 A_n 、z'_n 、x'_n 、y'_n 为相应散射中心的幅度、径向和两个横向位置参数，则残余 ISAR 像为：

$$R_{n+1}=R_n-A_n h(x-x'_n,y-y'_n,z-z'_n) \tag{39}$$

直到残余 ISAR 像的峰值低于预设的阈值，迭代过程终止，完成单个视角下的局部散射中心提取。

3.2.2 散射中心宽角关联

为了全面表征目标在所有视角下的散射特性，需要提取不同仰仰角、方位角下的局部散射中心，在此基础上散射中心宽角关联的工作流程如图 8 所示。

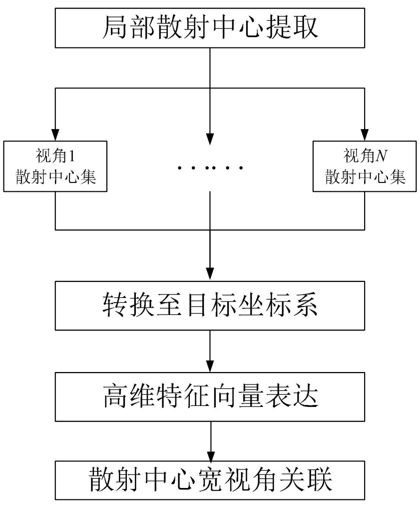


图 8 散射中心宽角关联的工作流程

首先将散射中心位置从雷达坐标系转换至目标坐标系，转换公式如下：

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \sin\theta\cos\phi & -\sin\phi & -\cos\theta\cos\phi \\ \sin\theta\sin\phi & \cos\phi & -\cos\theta\sin\phi \\ \cos\theta & 0 & \sin\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \\ z'_n \end{bmatrix} \tag{40}$$

根据第 2 节的原理，不同特征空间中的散射中心分布可能不同，需要在适合的特征空间中实现散射中心精准关联。根据弹跳次数对散射中心排序，进一步将散射中心数据表达为如下所示的 6 维特征向量。

$$(x,y,\mathrm{z},\theta,\varphi)\rightarrow(x,y,z,\sin\theta\cos\phi,\sin\theta\sin\phi,\cos\theta) \tag{41}$$

最后，根据 3.1 节的原理，利用 SMMC 算法实现 6 维特征空间中的散射中心宽视角关联。

3.2.3 散射结构的类型判断

实现宽视角关联后，可以根据散射中心的空间移动性和角度可见性来进一步判断散射结构类型。考虑任意结构，利用幅度加权的标准差来评估散射中心在 x、y、z 方向上的空间移动性，具体表达式为：

$$\begin{aligned}\sigma_x&=\sqrt{[\sum_{i=1}^{N}A_i(x_i-\overline{x})^2]/(\sum_{i=1}^{N}A_i)}\\ \sigma_y&=\sqrt{[\sum_{i=1}^{N}A_i(y_i-\overline{y})^2]/(\sum_{i=1}^{N}A_i)}\\ \sigma_z&=\sqrt{[\sum_{i=1}^{N}A_i(z_i-\overline{z})^2]/(\sum_{i=1}^{N}A_i)}\end{aligned} \tag{42}$$

式中：N 为典型结构对应的散射中心个数，A_i 、(x_i,y_i,z_i) 为散射中心的幅度和三维位置参数，$(\overline{x},\overline{y},\overline{z})$ 为散射中心幅度加权的三维平均位置。

同时利用可见率 V_θ 、V_ϕ 来评估散射中心在俯仰向和方位向的角度可见性，具体表达式为：

$$\begin{aligned}V_\theta&=\frac{\theta_{\mathrm{visible}}}{\theta_{\mathrm{all}}}\times 100\%\\ V_\phi&=\frac{\phi_{\mathrm{visible}}}{\phi_{\mathrm{all}}}\times 100\%\end{aligned} \tag{43}$$

式中：θ_{all} 、ϕ_{all} 为电磁计算的俯仰角和方位角总个数，$\theta_{\mathrm{visible}}$ 、ϕ_{visible} 为散射中心的可见俯仰角和方位角个数。

显然，σ_x 、σ_y 、σ_z 越大，散射中心在 x、y、z 方向上的离散程度越大，表明散射中心的空间移动性越强。V_θ 、V_ϕ 越大，表明散射中心在俯仰向和方位向的角度可见性越强。

3.2.4 GSC 表征

针对每个散射结构，关联后的 GSC 幅度相对平滑且具有不同的角度可见性，可以用二维多项式曲面进行表征。

类似地，考虑不同的散射结构类型，可以利用适合的曲

线/曲面拟合算法来实现 GSC 位置表征。FF、FD 和 DD 结构（见表 1 的定义）的散射中心在仰角和方位向的位置均相对固定，可以表征为幅度加权的平均位置。FS、SD 结构的散射中心通常在某个方向上的位置相对固定，在另一个方向上滑动，可以利用幅度加权平均位置和多项式曲线函数进行表征。SS 结构的散射中心通常在俯仰和方位向上均滑动，可以表征为二维多项式曲面函数。

对所有散射结构的 GSC 幅度和等效位置进行表征后，实现了目标 GSC 模型构建，能够直接重构目标的宽角 RCS 数据。

4 仿真结果

本节以 PEC 球头锥目标为例，验证 GSC 建模方法的有效性。由于轴对称性，仅考虑单个俯仰角情形。表 1 中的六种 GSC 类型退化为固定型、滑动型和延展型，6 维特征向量退化为 5 维特征向量 $(x, y, z, \cos\phi, \sin\phi)$ 。三维散射中心提取条件为：俯仰角 90o、方位角 0-180o、VV 极化、中心频率 10GHz、带宽 1GHz。

获取不同视角下的局部散射中心后，利用 SMMC 算法在 5 维特征空间中实现了宽角关联。散射中心宽角关联结果如图 9 所示，将从属于球头、锥面、圆环、底面、右曲边和左曲边结构的宽角散射中心数据有效关联和分离开。

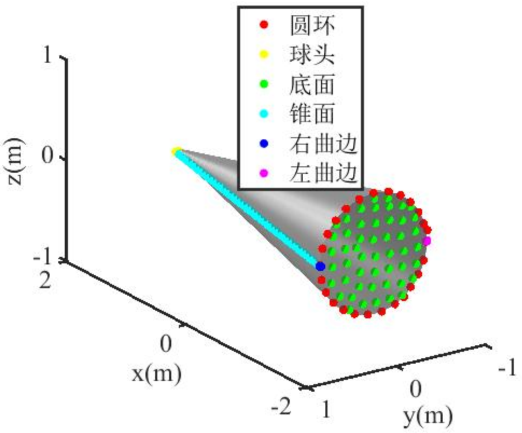


图 9 散射中心宽角关联结果

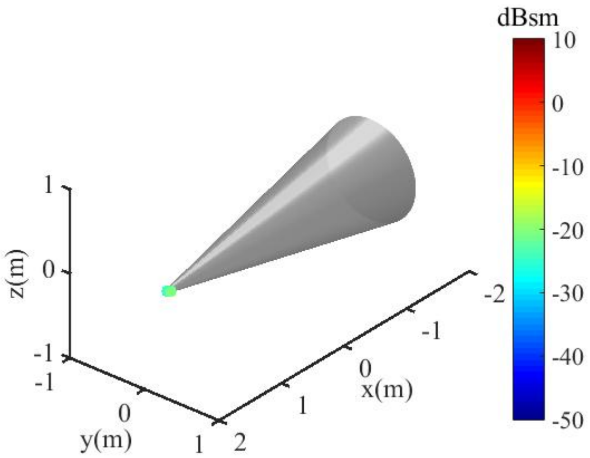
球头锥目标上六种典型结构的散射类型如表 2 所示，相应散射中心的位置标准差和角度可见率也在表中给出。

表 2 六种典型结构的散射类型

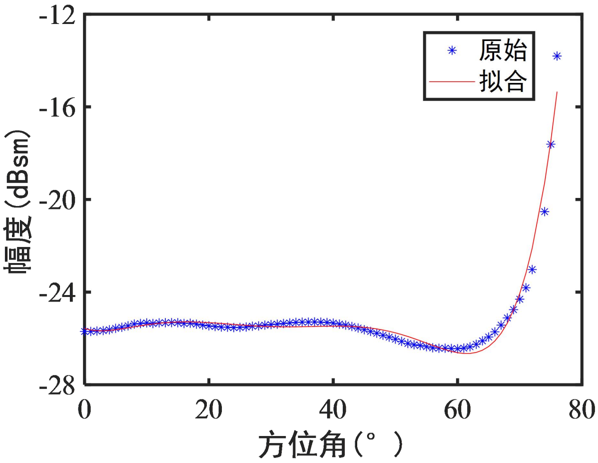
典型结构	σ_x	σ_y	V_ϕ/%	散射类型
球头	0.0733	0.0922	44.20	滑动型
锥面	0.9533	0.4003	0.33	延展型
圆环	0	0.6535	0.55	延展型
底面	0	0.5401	0.47	延展型
右曲边	0.0018	0.0019	91.71	固定型
左曲边	0.0033	0.0032	33.70	固定型

球头结构的散射中心在 x、y 方向上均具有一定的空间移动性，在方位向上具有很强的角度可见性，属于滑动型散射结构。锥面结构的散射中心在 x、y 方向上的空间移动性均很强，但是在方位向上的角度可见性很弱。圆环和底面结构的散射中心在 y 方向上具有很强的空间移动性，在方位向上的角度可见性很弱。因此，锥面、圆环和底面均属于延展型散射结构。右曲边和左曲边结构的散射中心在 x、y 方向上的空间移动性均很弱，在方位向上具有很强的角度可见性，属于固定型散射结构。

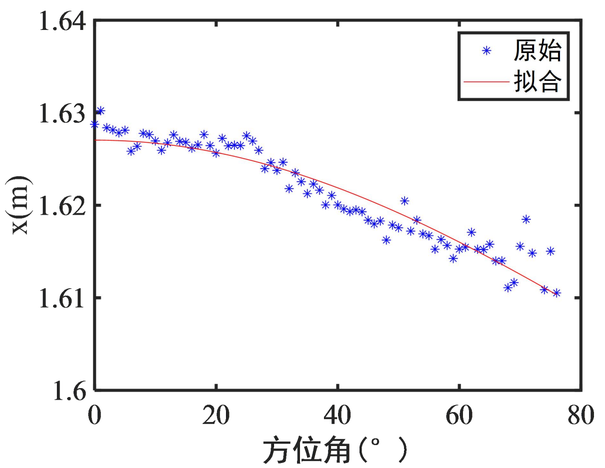
图 10 给出了球头结构的散射中心分布、GSC 幅度、位置 x 和位置 y，相应的拟合公式如式(44)所示。显然，幅度和位置可以分别用多项式曲线和傅里叶函数来拟合。拟合结果验证了多流形结构的平滑性。



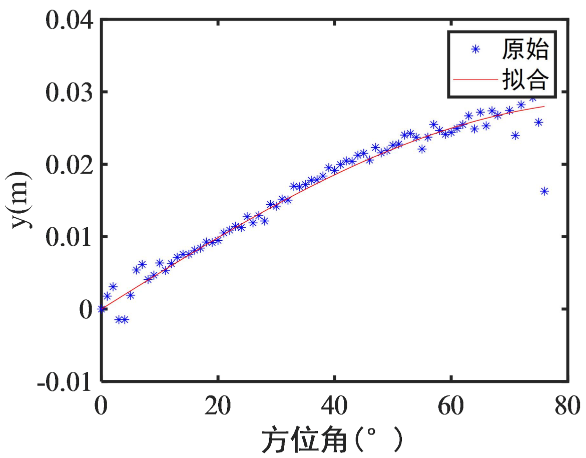
(a) 散射中心分布



(b) GSC 幅度



(c) GSC 位置 x

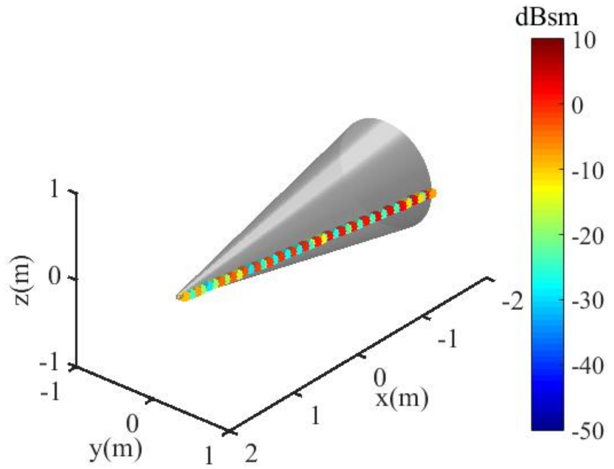


(d) GSC 位置 y

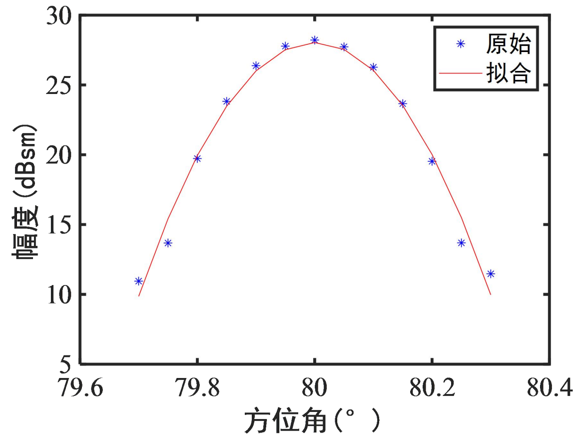
图 10 球头结构

$$
\begin{aligned}
A &= 0.4622\cdot\phi^6 + 0.8489\cdot\phi^5 - 0.7909\cdot\phi^4 - \\
&\quad 1.634\cdot\phi^3 - 0.1346\cdot\phi^2 + 128\cdot\phi - 25.48 \\
x &= 1.605 + 0.02204\cdot\cos(\phi) \\
y &= 0.02884\cdot\sin(\phi)
\end{aligned}
\tag{44}
$$

锥面、圆环、底面、右曲边、左曲边的散射中心分布和GSC幅度曲线分别如图11-15所示，相应的拟合公式如式(45)—(49)所示。特殊地，右曲边的GSC幅度由式(48)中的两个分段函数拟合。总的来说，上述结构的GSC幅度可以通过多项式曲线函数很好地拟合，位置可以利用幅度加权的平均位置来表征。



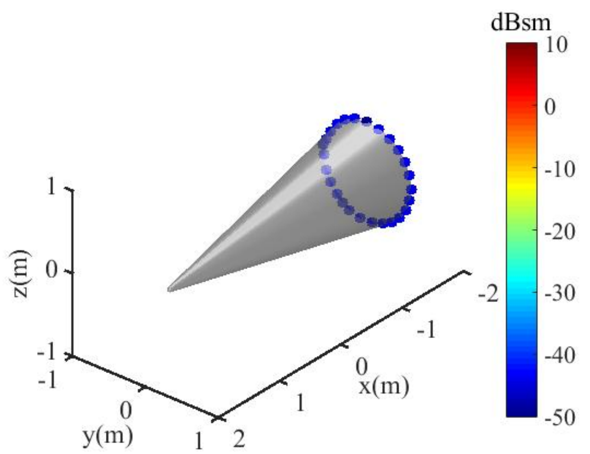
(a) 散射中心分布



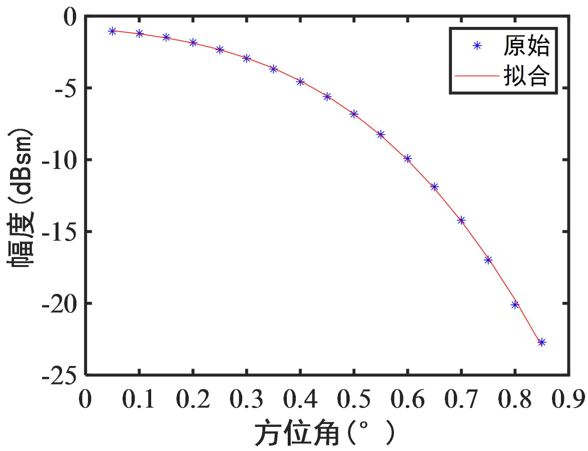
(b) GSC 幅度

图 11 锥面结构

$$
A = -7.634\cdot\phi^2 + 0.035\cdot\phi + 28.04 \tag{45}
$$



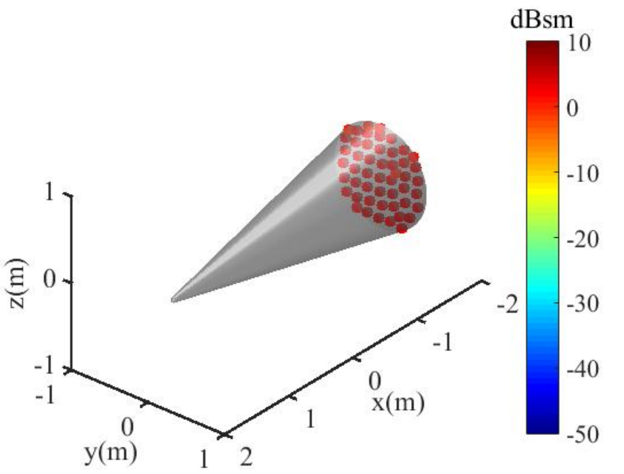
(a) 散射中心分布



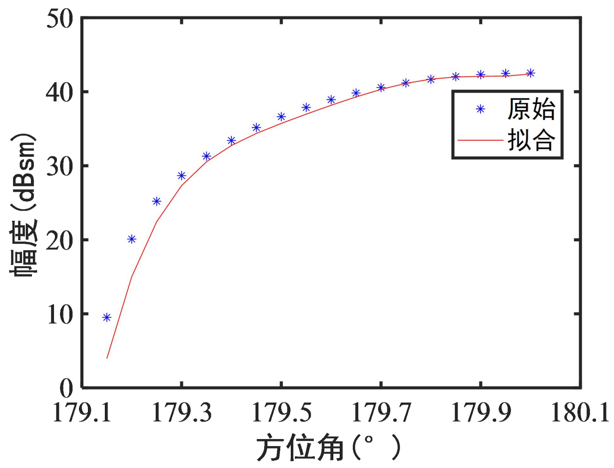
(b) GSC 幅度

图 12 圆环结构

$$A = -0.4383 \cdot \phi^3 - 2.562 \cdot \phi^2 - 5.833 \cdot \phi - 5.564 \quad (46)$$



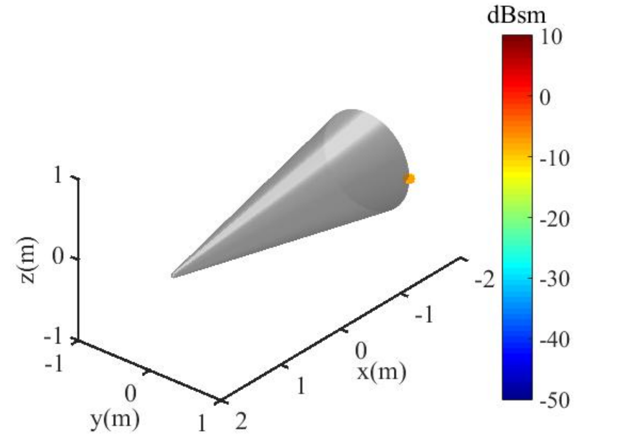
(a) 散射中心分布



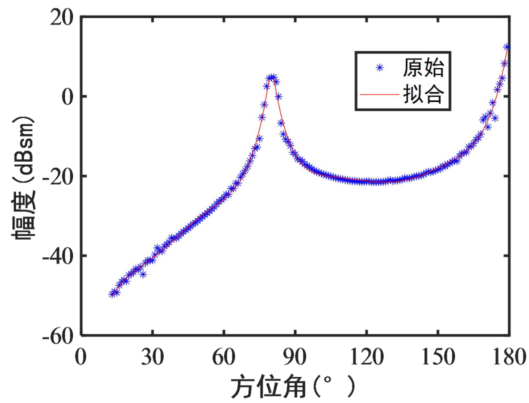
(b) GSC 幅度

图 13 底面结构

$$A = 1.058 \cdot \phi^5 - 1.494 \cdot \phi^4 - 1.098 \cdot \phi^3 - 0.8582 \cdot \phi^2 + 6.262 \cdot \phi + 38.17 \quad (47)$$



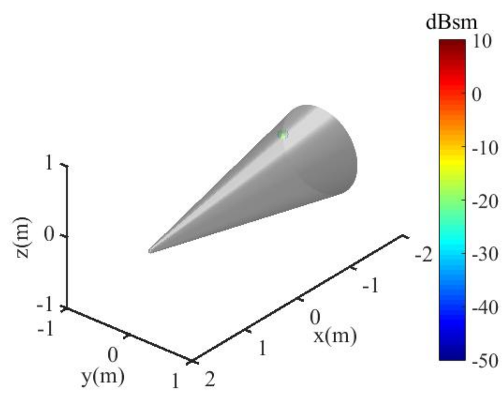
(a) 散射中心分布



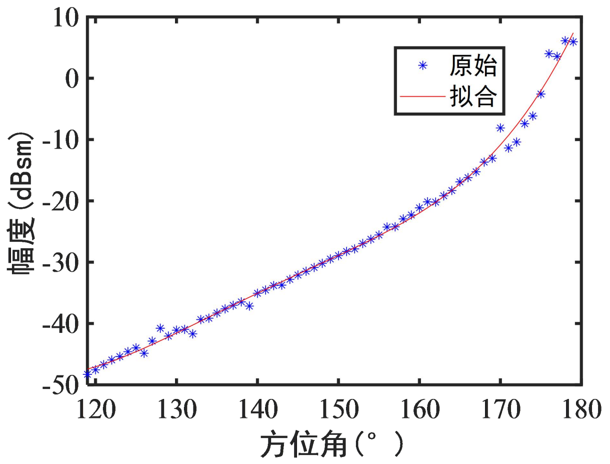
(b) GSC 幅度

图 14 右曲边结构

$$\begin{aligned} A_1 &= 1.191 \cdot \phi^5 + 1.729 \cdot \phi^4 - 1.299 \cdot \phi^3 - 1.706 \cdot \phi^2 + 10.03 \cdot \phi - 32.244 \\ A_2 &= 1.762 \cdot \phi^6 - 0.4955 \cdot \phi^5 - 3.714 \cdot \phi^4 + 1.802 \cdot \phi^3 + 6.013 \cdot \phi^2 + 1.002 \cdot \phi - 21.5 \end{aligned} \quad (48)$$



(a) 散射中心分布



(b) GSC 幅度

图 15 左曲边结构

$$A = 0.97\cdot\phi^4 + 1.867\cdot\phi^3 + 0.5544\cdot\phi^2 + 10.89\cdot\phi - 29.51 \quad (49)$$

为了构建目标的 GSC 模型，六种典型结构所需的角度、幅度和位置参数量如表 3 所示。仿真和重构的 RCS 曲线如图 16 所示，均方根误差(RMSE，Root Mean Squared Error)为 1.17dB。仅使用 77 个参数即可准确重构 RCS 数据。

表 3 所需的角度、幅度、位置参数量

典型结构	角度	幅度	位置
球头	2	7	4
锥面	2	3	3
圆环	2	4	3
底面	2	6	3
右曲边	4	13	3
左曲边	2	5	3

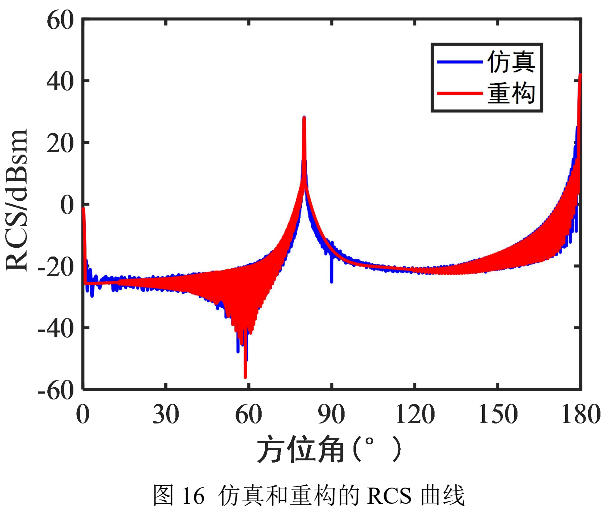


图 16 仿真和重构的 RCS 曲线

仿真、局部散射中心模型、GSC 模型的参数量、压缩率和误差如表 4 所示。

表 4 仿真、局部散射中心模型和 GSC 模型对比

参数	仿真	局部散射中心模型	GSC 模型
参数量	10803	23466	71
压缩率/%	/	217.22	0.66
RMSE/dB	/	1.1823	1.1733

以仿真数据为参考，局部散射中心模型和 GSC 模型的数据压缩率分别为 217.22 和 0.66，RMSE 分别为 1.18dB 和 1.17dB。显然，GSC 模型在保证重构 RCS 精度的同时，能够极大地压缩宽角散射数据。通过多流形数据的 GSC 建模，实现了宽角散射数据的高精度、高压缩率表征。

5 结论

本文提出了一种基于多流形表达的目标单次反射/绕射机理散射中心的全视角参数化建模方法。从高频渐近理论和射线理论出发，首先揭示了宽角散射中心的多流形结构。进一步，利用 SMMC 和曲线/曲面拟合算法实现了目标 GSC 模型构建。仅需 77 个参数就能准确重构球头锥目标在俯仰 90o、方位 0—180o 下的 RCS 数据。以仿真 RCS 为基准，压缩率和 RMSE 分别为 0.66 和 1.17dB。GSC 模型在保证重构 RCS 精度的同时，能够大幅压缩宽角散射数据。因此，多流形 GSC 模型是一种很好的低维稀疏表征方式，可以替代冗余的宽角散射数据。下一步，将把本文的理论和方法推广至多次散射情况。

[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.

[2] HUA Y, SARKAR T K. Matrix pencil method for es timating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise[J]. IEEE Transactions on Acoustics, S peech & Signal Processing, 1990, 38(5): 814-824.

[3] HURST M P, MITTRA R. Scattering center analysi s via Prony's method[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1987, 35(8): 986-988.

[4] POTTER L C, CHIANG D M, CARRIERE R, et al. A G TD-based parametric model for radar scattering[J]. IEE E Transactions on Antennas & Propagation, 1995, 443(10): 1058-1067.

[5] GERRY M J, POTTER L C, GUPTA I J, et al. A par ametric model for synthetic aperture radar measuremen ts[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 199 9, 47(7): 1179-1188.

[6] TSENG N. A very efficient RCS data compression and reconstruction technique[R]. Columbus: The Ohio S

tate University, 1992.

[7] CHANG L C, GUPTA I J, BURNSIDE W D, et al. A data compression technique for scattered fields from complex targets[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1997, 45(8): 1245 -- 1251.

[8] 王菁. 光学区雷达目标散射中心提取及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

[9] YANG Z L, FANG D G, SHENG W X. Frequency Extrapolation by Genetic Algorithm Based on GTD Model for Radar Cross Section[J]. Chinese Journal of Electronics, 2001, 10(4): 552-556.

[10] 邱志强. 基于空间谱估计的雷达目标散射中心提取研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

[11] BHALLA R, LING H. Three-Dimensional Scattering Center Extraction Using the Shooting and Bouncing Ray Technique[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1996, 44(11): 1445-1453.

[12] 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.

[13] 陆金文, 闫华, 张磊等. 基于弹跳射线技术的三维GTD模型构建方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(8): 2028-2036.

[14] BHALLA R, MOORE J, LING H. A global scattering center representation of complex targets using the shooting and bouncing ray technique[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1997, 45(12): 1850-1856.

[15] ZHOU J X, ZHAO H Z, SHI Z G, et al. Global scattering center model extraction of radar targets based on wideband measurements[J]. IEEE Trans. on Antennas & Propagation, 2008, 56(7): 2051-2060.

[16] ZHOU J X, SHI Z G, FU Q. Three-dimensional scattering center extraction based on wide aperture data at a single elevation[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(3): 1638-1655.

[17] HU J M, WEI W, ZHAI Q L, et al. Global scattering center extraction for radar targets using a modified RANSAC method[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016, 64(8): 3573-3586.

[18] GUO K Y, LI Q F, SHENG X Q, et al. Sliding scattering center model for extended streamlined targets[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 139(3): 499-516.

[19] ZHOU Y. High Frequency electromagnetic scattering prediction and scattering feature extraction[D]. Austin : The University of Texas at Austin, 2005.

[20] RAYNAL A M. Feature-Based Exploitation of Multidimensional Radar Signatures[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2008.

[21] 周哲夫. 典型体散射中心参数化模型重构方法及其应用[D]. 北京: 中国航天科工二院研究生院, 2016.

[22] 闫华. 目标电磁散射参数化表达与建模方法研究[D]. 北京: 中国传媒大学, 2020.

[23] PEREZ J, CATEDRA M F. Application of physical optics to the RCS computation of bodies modeled with NURBS surfaces[J]. IEEE Transactions Antennas & Propagation, 1994, 42(10): 1404–1411.

[24] JACKSON J A, RIGLING B D, MOSES R L. Canonical scattering feature models for 3D and bistatic SAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2010, 46(2): 525-541.

[25] Wang Y, Jiang Y, Wu Y. Spectral Clustering on Multiple Manifolds. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(7): 1149-1161.

[26] LING H, CHOU R C, LEE S W. Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity[J]. IEEE Transactions Antennas & Propagation, 1989, 37(2): 194-205.

[27] BHALLA R, LING H. A fast algorithm for signature prediction and image formation using the shooting and bouncing ray technique[J]. IEEE Transactions Antennas & Propagation, 1995, 43(7): 727-731.

[28] TSAO J, STEINBERG B D. Reduction of Sidelobe and Speckle Artifacts in Microwave Imaging: The CLEAN Technique[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1988, 36(4): 543-556.

作者简介：

闫 华（1981-），男，研究员，博士，主要研究方向为散射中心参数化建模与应用、雷达目标特性等。

陆金文（1994-），男，高级工程师，博士，主要研究方向为电磁散射参数化建模与应用、雷达目标特性等。

殷红成（1967-），男，研究员，博士，主要研究方向为电磁散射与逆散射、雷达目标特性、雷达目标识别等。

基金项目：

国家自然科学基金（62231001）