

1-2-2019

A Method of 3D Scattering Center Extraction Based on Multiple HRRP Series

Cui Shan

Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China;

Li Sheng

Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China;

Yan Hua

Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

A Method of 3D Scattering Center Extraction Based on Multiple HRRP Series

Abstract

Abstract: Scattering center extraction is the key content in the research of radar target characteristics, particularly the sliding type of scattering center. *An extraction method based on the parametric scattering center model is proposed, which takes advantage of Hough transformation to extract geometric location and sliding radius parameters. The distance is gotten in the line of radar sight, and the useful information is obtained from high-resolution range profile (HRRP) series, which estimates size parameter of scattering centers and accomplishes signal reconstruction.* This method solves the problems of point and sliding scattering center extraction. Simulation example manifests the applicability of the reconstructed model.

Keywords

scattering center, parametric scattering model, typical reflector, position parameter, size parameter

Recommended Citation

Cui Shan, Li Sheng, Yan Hua. A Method of 3D Scattering Center Extraction Based on Multiple HRRP Series[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 443-451.

一种基于 HRRP 的三维散射中心提取方法

崔闪, 李胜, 闫华

(电磁散射重点实验室, 北京 100854)

摘要: 散射中心提取是雷达目标特性研究中的关键内容, 滑动型散射中心的提取尤其重要。提出一种基于典型体散射中心参数化模型的提取方法, 通过二次 Hough 变换得到散射中心的位置和滑动半径参数, 在此基础上得到散射中心在雷达视线上的距离, 并从一维距离像历程图中获取有用的信息, 进而估算出散射中心的尺寸参数, 并对散射中心进行信号重建。此方法既能解决点散射中心的提取问题, 又能很好地解决滑动型散射中心的提取问题。仿真实例证明了重建模型的适用性。

关键词: 散射中心; 参数化模型; 典型体; 位置参数; 尺寸参数

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 02-0443-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201802010

A Method of 3D Scattering Center Extraction Based on Multiple HRRP Series

Cui Shan, Li Sheng, Yan Hua

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

Abstract: Scattering center extraction is the key content in the research of radar target characteristics, particularly the sliding type of scattering center. An extraction method based on the parametric scattering center model is proposed, which takes advantage of Hough transformation to extract geometric location and sliding radius parameters. The distance is gotten in the line of radar sight, and the useful information is obtained from high-resolution range profile (HRRP) series, which estimates size parameter of scattering centers and accomplishes signal reconstruction. This method solves the problems of point and sliding scattering center extraction. Simulation example manifests the applicability of the reconstructed model.

Keywords: scattering center; parametric scattering model; typical reflector; position parameter; size parameter

引言

理论计算和实验测量均表明, 目标在高频区的散射场可由目标上局部散射源的散射场矢量合成获得, 这些局部散射源称为目标等效散射中心或目

标散射中心^[1]。目标散射中心是目标在高频区散射的基本特征之一, 其物理概念是对光学区雷达目标电磁散射机理贴切而简洁的描述, 更隐含了对目标局部精细几何结构识别的可能性, 对于雷达数据压缩、散射特性分析、目标识别等研究领域具有重要的作用和意义, 建立适应不同目标以及散射机理的散射中心模型是目标散射中心研究的重要内容^[2]。

传统的窄带雷达由于带宽小、分辨率低, 雷达回波蕴含的信息量较为单一, 较早提出的散射中心模型只是将回波简单地表达成一系列的谐波信号



收稿日期: 2015-07-07; 修回日期: 2016-02-17;
作者简介: 崔闪(1990-), 男, 江苏, 硕士, 工程师, 研究方向为散射中心提取、图像处理; 李胜(1980-), 男, 安徽, 硕士, 高工, 研究方向为目标检测与识别、机载下视测量; 闫华(1981-), 男, 黑龙江, 硕士, 高工, 研究方向为散射中心提取、图像处理。

<http://www.china-simulation.com>

之和^[3]。然而, 宽带雷达技术的进一步发展(如超宽带、大视角成像等)对散射中心研究也提出了更高的要求。传统的点散射中心模型是一种位置固定、各向同性、非色散的理想模型, 随着带宽和视角范围增大, 模型误差会增加, 且无法有效提取信号所携带的更为丰富的目标信息。因此, 建立一种能够描述大宽带、大视角的目标散射中心模型成为近些年来研究热点问题^[4]。

散射中心位置和尺寸是典型体散射中心参数化模型中的重要参数之一, 与目标几何结构存在对应关系, 为目标识别和攻击点选择提供了重要依据。宽带雷达可以获得目标一维高分辨像^[5], 它是散射中心在视线方向的投影分布, 能部分地反映目标的几何结构特征, 但具有姿态敏感性。散射中心高维位置重构技术联合多个视角下的低维高分辨像估计散射中心的三维空间位置, 信息的全面性和稳定性都大大提高, 是近年备受关注的一种新的获取散射中心空间分布特征的方法^[6]。

围绕散射中心的模型构建和参数提取等方法开展研究, 重点研究了典型体散射中心参数化模型的构建、典型体散射中心位置参数和尺寸参数提取, 以及基于典型体散射中心模型的特征信号重构。

1 典型体散射中心参数化模型

“典型体散射中心参数化模型”的思想是把各种散射中心用一组典型体来描述, 由此散射中心的参数化模型就由典型体的解析表达来代替。典型体的解析表达是通过高频渐近方法来获得的, 一般是以几何尺寸为参数的函数表达式。这样, 参数化模型就把目标散射特性与目标表面具体的几何尺寸联系起来^[7]。由于典型体模型给出了散射幅度与频率、方位视向角、俯仰视向角的依赖关系, 因此典型体散射中心模型是一个三维模型, 其形式一般较为复杂, 但精度较高, 能够较精确地描述散射行为。

俄亥俄州立大学 J. A. Jackson 和 R. L. Moses 等提出了六类典型体散射中心参数化模型^[8], 包括矩形平板、二面角、三面角、圆柱、顶帽以及圆

球。将复杂目标的散射特征信号分解为若干典型体散射的矢量和, 每一个典型体参数化散射特性由类型、位置、方向、尺寸等参数表述。

在高频条件下, 复杂目标的散射特性可以表示为若干典型体响应的矢量和, 单站条件下的复杂目标雷达后向散射信号可表示为:

$$S(k) = \sum_m P_m M_{\Gamma(m)}(k, \phi, \theta; \Theta_m) e^{-jk\Delta R(\Theta_m)} \quad (1)$$

式中: ϕ 和 θ 为雷达入射的方位视向角和俯仰视向角, $k = 2\pi f/c$ 为电磁波的波数, $M_{\Gamma(m)}$ 描述第 m 个典型体的频率响应, $\Delta R(\Theta_m)$ 表示第 m 个典型体参考几何中心位置到雷达的双程距离, P_m 表示第 m 个典型体 2×2 的极化响应矩阵, 变量 $\Gamma(m)$ 表示第 m 个典型体的类型, 矢量 Θ_m 包含了若干物理参数, 如目标的位置、朝向、尺寸等。

2×2 阶极化响应矩阵 P 如式(2)所示:

$$P = \begin{bmatrix} P_{vv} & P_{vh} \\ P_{hv} & P_{hh} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: 下角标中的 v 和 h 表示垂直极化和水平极化。按照电磁波反射次数的不同, 可以将极化响应矩阵 P 分成奇次反射表达和偶次反射表达。矩形平板、直角三面角、圆柱和球属于奇次反射典型体, 直角二面角和圆柱顶帽属于偶次反射典型体。对理想导体而言, 极化矩阵 P 可以表达为:

$$P_{\text{odd}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, P_{\text{even}} = \begin{bmatrix} -\cos(2\zeta) & \sin(2\zeta) \\ \sin(2\zeta) & \cos(2\zeta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: ζ 是典型体相对于雷达视线的旋转角度。

式(1)中: 对于每一个典型体而言, $\Delta R(\Theta_m)$ 可以直观表示为典型体参考几何中心位置到典型体表面驻相点位置在雷达视线上的双程距离, 即:

$$\Delta R(\Theta_m) = 2[\Delta R_o(\Theta_m) - \Delta R_r(\Theta_m)] \quad (4)$$

在远场条件下, $\Delta R(\Theta_m)$ 可以近似写成如下形式:

$$\Delta R(\Theta_m) \approx 2[(x_o - x_r)(\cos\phi \cos\theta) + (y_o - y_r)(\sin\phi \cos\theta) + (z_o - z_r)\sin\theta] \quad (5)$$

式中: (x_o, y_o, z_o) 是典型体参考几何中心的位置, (x_r, y_r, z_r) 是典型体散射中心的位置。由于不同典型体的曲率半径不同, 引起表面驻相点位置随雷达

视线角变化关系不同, 其参数化模型中的 $\Delta R(\Theta_m)$ 表达形式也不同。

平板、直角二面角和直角三面角是没有曲率半径的, 因此其 $\Delta R_r = 0$; 圆柱、圆柱顶帽和圆球的曲率半径不为 0, 且各不相同, 因此其具有对应的 ΔR_r 表达形式:

$$\Delta R_r^{\text{cylinder}} = 2r \cos \phi \tag{6}$$

$$\Delta R_r^{\text{top-hat}} = 2r \cos \theta \tag{7}$$

$$\Delta R_r^{\text{sphere}} = 2r \tag{8}$$

式中: r 是圆柱、圆柱顶帽和圆球对应的曲率半径。

特别地, 圆柱顶帽中的柱体半径为 r , 高度为 h , 帽沿宽度为 d , 其二次反射 PO 解表达式为:

$$S_{hh,vv} = \pm 2\sqrt{jkr \sin \theta} e^{j2kr \sin \theta} \min\{h, d \cot \theta\} \tag{9}$$

式中: HH 极化取 “+”, VV 极化取 “-”。

2 散射中心参数估计方法

二维滑动型散射中心是指散射中心位置只与方位视向角相关, 与俯仰视向角无关, 典型结构如柱面、圆形顶帽等, 散射中心随方位角滑动分布曲线为二维曲线。

在三维空间中, 雷达视线方向为 OD , $O(x_0, y_0, z_0)$ 是目标参考几何中心在目标本体坐标系中的位置, A 是散射中心在坐标系中位置, $D(x, y, z)$ 是散射中心在雷达视线上的投影, θ 、 ϕ 分别为雷达视线在目标本体坐标系中的俯仰视向角和方位视向角, 在不同俯仰视向角下散射中心随方位视向角变化曲线函数为 $\mathbf{r}(\phi) = (x(\phi), y(\phi), z(\phi))$, 当散射中心的滑动轨迹为圆(典型结构如圆柱、圆形顶帽等)时, 轨迹函数可表示为圆心 (x_0, y_0, z_0) 和滑动半径 r_0 的形式。如图 1 所示, 不同视角下散射中心视线位置满足式(10)。

$$\begin{aligned} x(\phi) &= x_0 + r_0 \cos \phi \\ y(\phi) &= y_0 + r_0 \sin \phi \\ z(\phi) &= z_0 \end{aligned} \tag{10}$$

散射中心在雷达视线上的投影距离 $R(\theta, \phi)$ 满足:

$$\begin{aligned} R(\theta, \phi) &= x(\phi) \sin \theta \cos \phi + \\ & y(\phi) \sin \theta \sin \phi + z(\phi) \cos \theta \end{aligned} \tag{11}$$

对于圆形轨迹, 投影距离 $R(\theta, \phi)$ 满足:

$$\begin{aligned} R(\theta, \phi) &= x_0 \sin \theta \cos \phi + y_0 \sin \theta \sin \phi + \\ & z_0 \cos \theta + r_0 \sin \theta \end{aligned} \tag{12}$$

式中: 滑动半径 r_0 为常数。

对于理想点散射中心有:

$$r_0 = 0 \tag{13}$$

在三维情况下联合俯仰视向角和方位视向角, 将散射中心投影距离与散射源中心、滑动半径以及散射源高度坐标建立关联关系。

在实际参数估计时, 由于俯仰视向角采样较为稀疏, 难以直接通过关联求解 z 坐标。分析可知, 滑动半径与 z 轴的高度坐标之间存在约束关系。可得高度坐标 z 和轨迹方程的关系式(14)和(15):

$$z_0 \cot \theta = -x(\phi) \cos \phi - y(\phi) \sin \phi + \frac{R(\theta, \phi)}{\sin \theta} \tag{14}$$

$$z_0 \cot \theta = -x_0 \cos \phi - y_0 \sin \phi - r_0 + \frac{R(\theta, \phi)}{\sin \theta} \tag{15}$$

由式(14)和(15)可以看出, 在俯仰视向角一定的情况下, 轨迹曲线方程与高度满足线性关系。特别是对于圆形轨迹参数, 当圆心确定后, 其滑动半径和高度坐标满足线性关系, 其斜率为 $-\cot \theta$ 。这说明同一个散射中心在不同俯仰视向角下, 高度-滑动半径拟合曲线的斜率是不同的, 且只与 θ 有关。

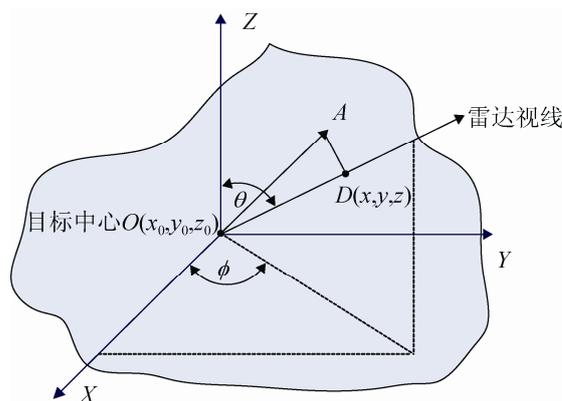


图 1 雷达视线上散射中心的投影示意图
Fig. 1 Projection of the scattering center on radar

由以上分析可以看出: 当散射中心高度 z 不同时, 观测的轨迹曲线是一组相似曲线, 特别是对于

圆形轨迹,其滑动半径与高度 z 呈线性关系,基于此性质可以进一步通过参数变化提取三维位置参数。此外,当轨迹曲线曲率半径较大,较小方位视向角范围内散射中心的轨迹曲线也可以通过圆锥曲线去近似。

为进行 Hough 变换^[9],建立三维累加矩阵 (x_m, y_n, z_p) ,为三维空间点阵,范围由各方向上的采样间隔决定, (x_m, y_n, z_p) 分别是各个方向上的采样点数目,累加矩阵单元所有的格点值的初值都为0。

对获得的一维距离像历程二值分析图中每个值为1所对应的距离 r_i 、方位角 ϕ_i 与俯仰角 θ_i ,做变换到参数 (x, y, z) 的域中,即:

$$x \cos \phi_i \sin \theta_i + y \sin \phi_i \sin \theta_i + z \cos \theta_i = R(\phi_i, \theta_i; x, y, z, r_0) - r_0 \sin \theta_i \quad (16)$$

对于累加矩阵,满足方程(16)的格点值加1,其余不变。接下来选择另一个二值图中值为1所对应的距离、方位角与俯仰角,得到一条新的直线方程,同样满足新方程的格点值再次加1。以此类推,重复上面过程直到所有二值图中值为1的点全部遍历一次,得到参数域图像。因为建立的累加矩阵是三维的,得到的参数域图像也是三维的。

然后,对得到的三维参数域图像进行切片处理,提取出某一高度下的二维切片图像,对此二维图像再做二值分析,得到新的二值图像,在此基础上做二次 Hough 变换,参数变为 x_u, y_v, r_w 。

二次 Hough 变换公式为:

$$\sqrt{(x_m - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 - r_q^2} \leq \frac{\Delta r}{2} \quad (17)$$

同样构建累加矩阵,满足方程(17)的格点值加1,其余不变。由此得到不同圆半径下的 Hough 变换图,通过检测参数图像累加矩阵的最大值,获得散射中心的二维位置估计 (x_0, y_0) ,同时获得了此高度下满足式(17)的圆半径 r_0 的估计。

最后需要建立“高度-圆半径”关系曲线。在上述步骤下,得到某俯仰角下某一高度的圆半径估计,采用相同的方法,得到多组高度-圆半径的数

据,再通过线性拟合得到高度与圆半径满足的直线方程。

针对另一个固定俯仰角下的 RCS 数据重复进行上述步骤,获得另一组高度与圆半径满足的直线方程。对两条直线方程联立求解,得到的交点即为散射中心的高度估计 z 与滑动型散射中心圆半径的估计 r_0 ,当然,对于点散射中心而言, $r_0=0$ 。综合前面的散射中心二维位置估计值 (x_0, y_0) ,最终获得了散射中心三维位置 (x_0, y_0, z_0) 与滑动半径 r_0 的估计值。

根据二次 Hough 变换提取到的目标某散射中心的三维位置 (x_0, y_0, z_0) 与滑动半径 r_0 。将这些信息代入到散射中心在雷达视线上的距离公式(11),这样就可以得到目标某散射中心在某俯仰角下的一维距离像历程图,再将与整个目标的一维距离像历程图作对比,在该散射中心与整个目标一维距离像历程图轨迹重合处提取出幅度变化的信息,绘出该俯仰角下此散射中心的 RCS 幅度变化图。

这样不可避免的两个问题是:1、图像中的交叉点,也就是目标中不同部位在这一方位角下散射中心在雷达视线上的距离一样,幅度变化剧烈程度会陡然上升。2、图像中的缺失点,也就是目标中不同散射中心在这一方位角下出现遮挡,幅度会陡然下降。

若要考虑单个散射中心对成像的贡献,就要先排除出这些影响因素,做插值,这里采用最常用的线性插值方法,并将起伏变化剧烈的曲线依据前后方位角的幅度做平滑处理,滤除掉震荡剧烈的部分,雷达目标的 RCS 等特性随目标姿态角变化敏感,工程中常用滑窗平滑方法抑制数据的随机噪声和快速起伏,这就得到了平滑后的该俯仰角下此散射中心的 RCS 幅度变化图,同理推知其余俯仰角下的幅度变化,绘出全姿态角下的 RCS 幅度空间分布图。

在全姿态角下的 RCS 幅度空间分布图上提取必要的信息,根据典型部件的参数化模型公式就可以反演出散射中心的尺寸大小。

判断这些散射中心的尺寸是否正确, 可以由反演出的散射中心尺寸, 联合提取出的散射中心位置和滑动半径信息, 带入到典型体参数化模型公式中, 进行矢量叠加, 重构出信号, 绘出重构信号的全姿态角下的 RCS 幅度空间分布图, 并与从一维距离像历程图中提取到的 RCS 幅度分布图作对比, 误差小于一定范围的, 就可以认为散射中心尺寸大小提取得准确。

3 实验与仿真验证

以 Slicy 模型的电磁仿真数据为基础, 验证所述方法的可行性和有效性。

一般情况下, 目标散射中心的个数不止一个, 针对多散射中心关联问题, 建立了一个包含了若干典型体的模型——Slicy 模型, 结构如图 2 所示。

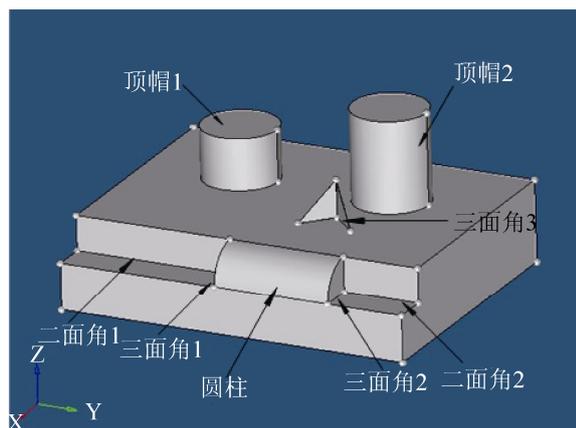


图 2 Slicy 模型图
Fig. 2 Slicy model

雷达频率范围 $f=7.99\text{ GHz}\sim 12.01\text{ GHz}$, 频率采样间隔为 $\Delta f=0.03\text{ GHz}$, 频率采样点个数 $M_f=135$; 方位角范围 $\phi=0\sim 2\pi$, 方位角采样间隔 $\Delta\phi=\pi/900$, 方位角采样点数 $M_a=1\ 801$; 俯仰角范围 $\theta=0\sim \pi/2$, 俯仰角采样间隔 $\Delta\theta=\pi/900$, 俯仰角采样点数 $M_b=451$ 。

以左侧圆柱顶帽结构为例, 介绍提取方法。

在俯仰角为 70° 的情况下, 对电磁仿真数据进行分析, 首先对原始频域数据做一维距离像处理, 获得一维距离像历程图, 对其做二值分析, 并对

二值图像做 Hough 变换, 变换参照式(16), 将图像域变换到参数域, 参数为三维空间坐标 (x, y, z) , 并对参数域图像做进一步切片处理, 取出参数 $z=0.60\text{ m}$ 处的切片图像, 得到图 3(a), 色度条代表累加矩阵的数值大小。为了准确得到 Hough 变换图中圆柱顶帽的圆半径大小, 对图 3(a)再做二值处理, 得到二值图像, 图 3(b), 进行二次 Hough 变换, 变换参照式(17), 将其变换到 (x, y, r) 的三维参数域中, 通过检测参数图像累加矩阵的最大值获得二次 Hough 变换的切片图, 此时的圆半径为 0.39 m , 得到图 3(c), 色度条代表累加矩阵的数值大小。

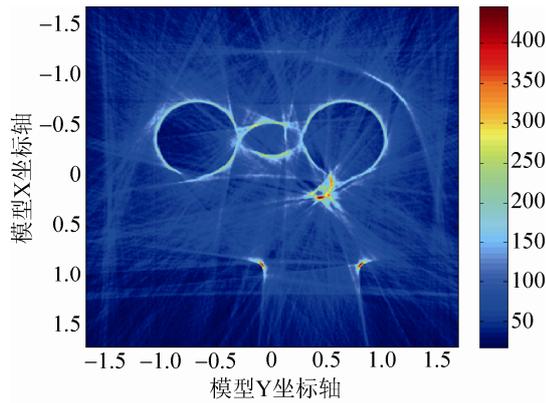
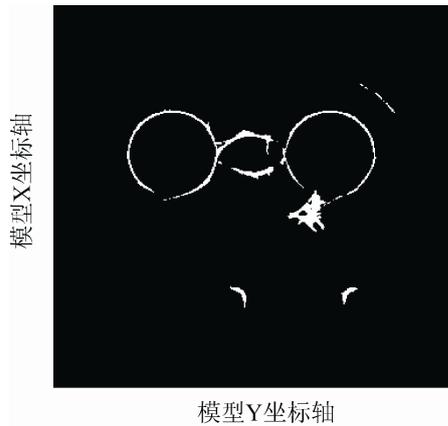
通过二次 Hough 变换, 成功找到了圆半径, 并在图 3(c)的最佳聚焦点处得到了滑动型散射中心圆柱底面中点的二维位置估计 (x, y) , 具体数值为顶帽 1 $(-0.37, -0.70)$, 顶帽 2 $(-0.38, 0.66)$ 。

这样, 经过二次 Hough 变换, 得到俯仰角 $\theta=70^\circ$ 下, 滑动型散射中心高度和圆半径的对应数据, 即 $z=60\text{ m}$ 对应 $r_0=0.39\text{ m}$, 采用同样的方法, 得到多组数据, 即对应的“高度-滑动半径”关系, 由这些数据得到类似于式(15)的曲线拟合方程, 建立第 2 节中提出的“高度-圆半径”关系曲线。

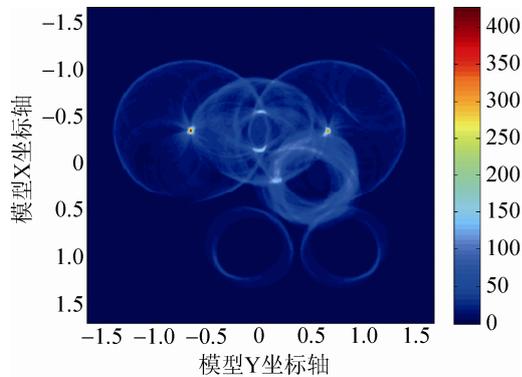
一个俯仰角下的观测数据只能求解出一条“高度-圆半径关系曲线”拟合方程, 缺少估计滑动型散射中心高度的必要信息, 根据第 2 节中提出的方法, 对两个不同俯仰角下的“高度-圆半径关系曲线”方程联立求解, 得到交点的横纵坐标代表着滑动型散射中心圆柱顶帽的真实高度 $z=0.714\ 3\text{ m}$ 和圆半径 $r_0=0.351\ 5\text{ m}$ 。

根据二次 Hough 变换提取到的左侧圆柱顶帽的三维位置和滑动半径: $r_0=0.35\text{ m}$, $x_0=-0.37\text{ m}$, $y_0=-0.70\text{ m}$, $z_0=0.71\text{ m}$ 。

与图 2 中 Slicy 模型的几何位置作对比, 将左侧圆柱顶帽的三维位置和滑动半径列在表 1 中, 表中单位设定为毫米(mm)。

(a) $z=0.60$ m 二维切片处一次 Hough 变换图

(b) 该切片下一次 Hough 变换的二值图像

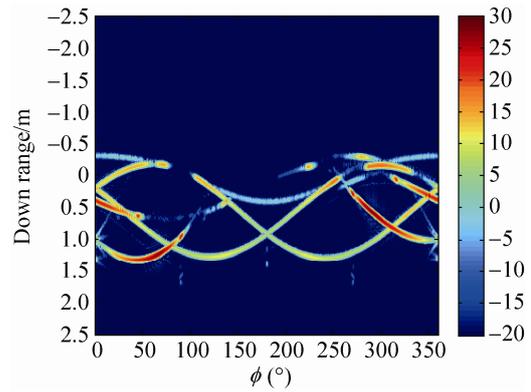
(c) $r_0=0.39$ m 二维切片的二次 Hough 变换图图3 $\theta=70^\circ$ 的 Hough 变换过程图
Fig. 3 Hough transform at $\theta=70^\circ$

将三维位置和滑动半径代入到散射中心在雷达视线上的距离式(12), 得到左侧圆柱顶帽的径向距离轨迹图, 图 4(b), 再将与 Slicy 模型的一维距离像历程图, 图 4(a), 作对比, 黑色星形的曲线是左侧圆柱顶帽的径向距离轨迹和整个 Slicy 模型的一维距离像历程图的一条幅度突出的轨迹基本

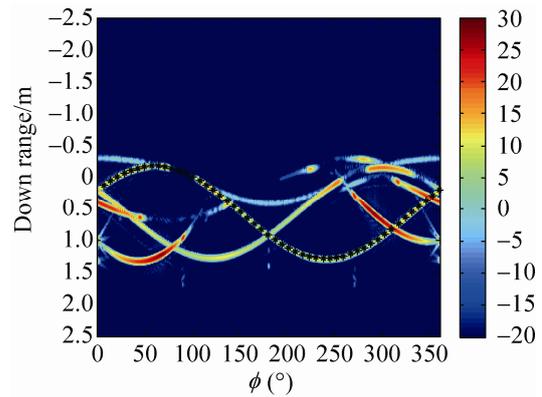
重合, 说明此典型结构的位置参数和滑动半径提取效果良好。

表1 左侧圆柱顶帽的位置信息
Tab. 1 Position parameters of left top hat

模型几何位置	模型圆柱半径	提取出的散射中心位置	提取出的滑动半径
$(-38, -68, 71)$	33	$(-37, -70, 71)$	35



(a) 一维距离像历程



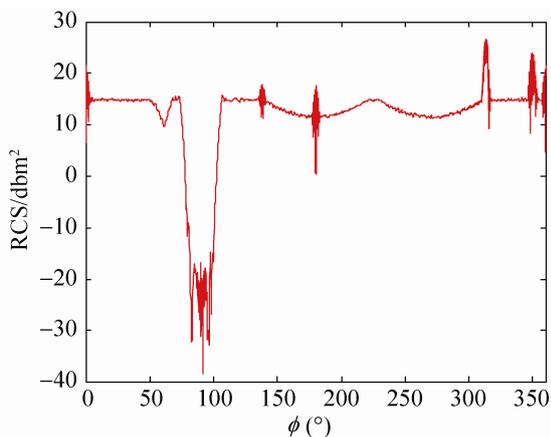
(b) 径向距离轨迹

图4 $\theta=70^\circ$ 的径向距离轨迹图
Fig. 4 Down range trajectory at $\theta=70^\circ$

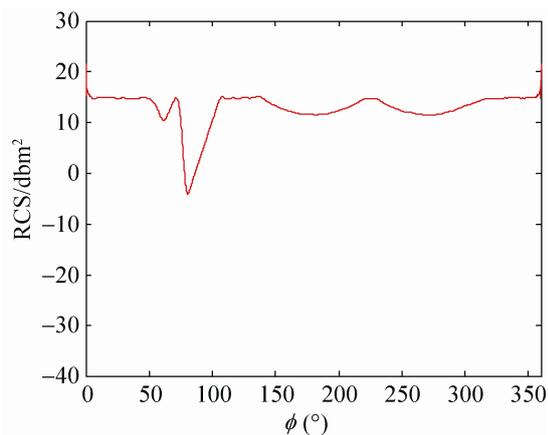
径向距离轨迹随着方位视向角的变化并无幅度变化, 是一条等值的曲线, 要想得到随方位视向角变化的 RCS 幅度信息, 还需知道左侧圆柱顶帽的尺寸大小。

在径向距离轨迹附近提取历程图中的幅度信息, 得到 RCS 幅度变化曲线, 见图 5(a)。第 2 节中提出了这种方法不可避免的两个问题是: 1、图像中的交叉点(如图 5(a)中方位视向角 140° 、 180° 附近), 也就是特定角度下散射中心在距离像中的

位置相互重叠的问题, 幅度变化程度会陡然剧烈。2、图像中的缺失点(如图 5(a)中方位视向角 $90^\circ \sim 110^\circ$ 之间), 也就是复杂目标中的多散射结构之间存在几何遮挡效应, 幅度会陡然下降, 在某些角度下, 甚至会下降 30 dB 以上。



(a) 差值平滑处理前



(b) 差值平滑处理后

图 5 $\theta=70^\circ$ 的 RCS 幅度变化曲线图
Fig. 5 RCS amplitude curve at $\theta=70^\circ$

这些现象都是由于模型其他散射结构在不同方位视向角下对左侧圆柱顶帽的影响。散射结构之间的相互遮挡, 反映在目标的一维距离像历程图, 就是在某些角度某些径向距离上, 散射幅度会突然出现缺失; 还有由于不同的散射结构在某些雷达视线上的径向距离相等, 反映在目标的一维距离像历程图, 就是在某些角度某些径向距离上, 产生干涉效应, 散射幅度会突然剧烈震荡。这是有别于单独散射结构的。

若要考虑其单独贡献, 按照第 2 节中提出的改进方法, 应当做进一步差值平滑处理。将起伏明显的曲线依据前后方位视向角的幅度做处理, 滤除掉震荡剧烈的部分, 得到图 5(b)。可以用同样的方法提取其余俯仰视向角下的全方位视向角 RCS 幅度变化曲线, 由此得到 RCS 空间分布图, 见图 6。

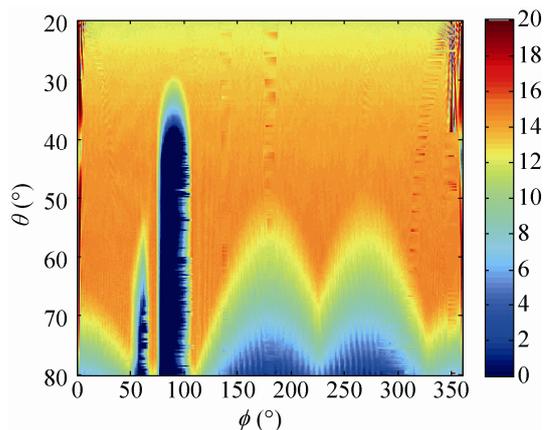
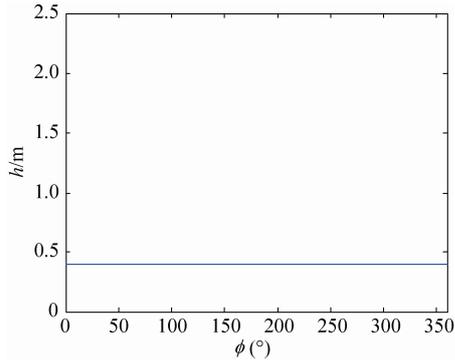


图 6 RCS 空间分布图
Fig. 6 RCS spatial distribution

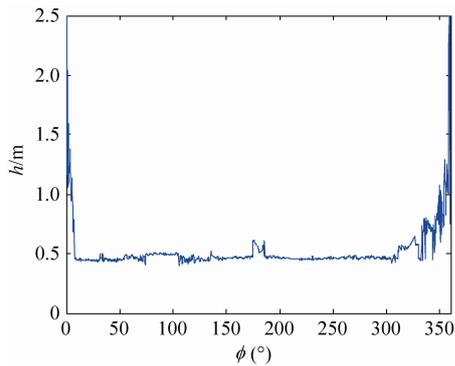
由提取出的 RCS 空间分布图, 可以提取出每一个方位视向角下的 RCS 幅度最大值, 以及这个幅度最大值所对应的视向角, 将信息代入式(18), 得到圆柱顶帽高度 h 和帽沿宽度 d 。顶帽高度提取效果见图 7, 帽沿宽度提取效果见图 8。

从图 7 中可以看出, 提取出的圆柱顶帽的高度大约在 0.45 m, 与设定值 0.41 m 相比, 误差值主要出现在图 5 所说的交叉点和缺失点位置, 相对误差在 10% 以内。

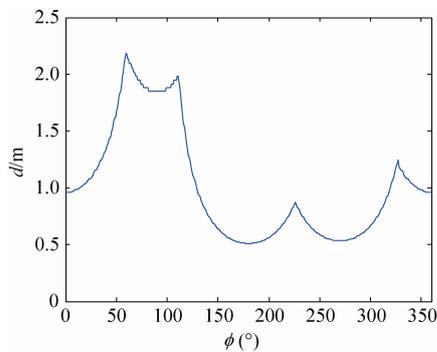
从图 8 中可以看出, 提取出的圆柱顶帽的帽沿宽度起伏变化较大, $50^\circ \sim 100^\circ$ 、 $340^\circ \sim 360^\circ$ 附近由于其他结构部件的影响, RCS 幅度值锐减, 导致提取出的尺寸参数误差值较大, 但在其他角度, 也就是左侧圆柱顶帽不被遮挡的情况下, 提取出的尺寸参数较为准确, 相对误差在 10% 以内。



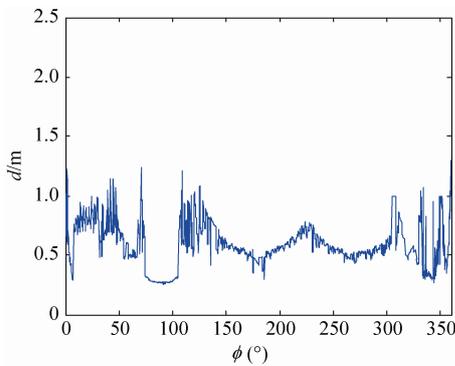
(a) 设定值



(b) 提取值

图7 Slicy模型左侧圆柱顶帽高度提取效果图
Fig. 7 Height extraction of left top hat

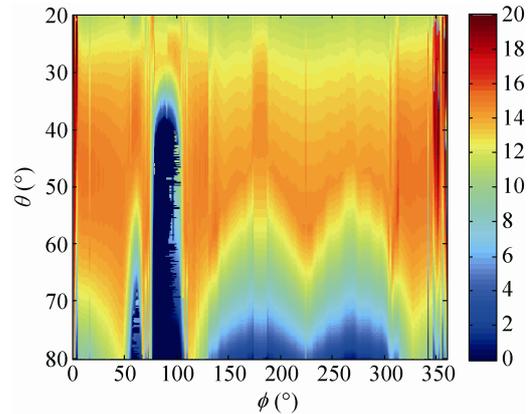
(a) 设定值



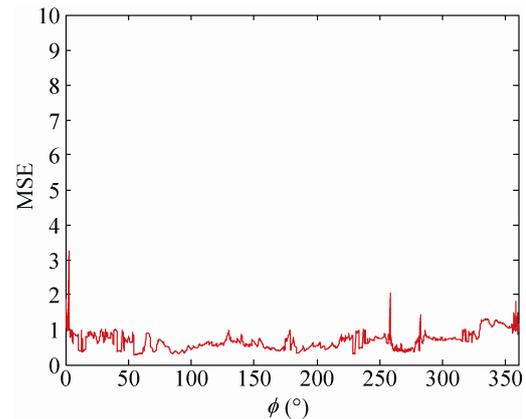
(b) 提取值

图8 Slicy模型左侧圆柱顶帽沿宽度提取效果图
Fig. 8 Brim width extraction of left top hat

反演后 RCS 的幅度空间分布见图 9(a), 对比图 6, 将最小均方根误差的全方位视向角变化曲线画出, 见图 9(b)。部分方位视向角下误差较大, 主要是在一维距离像历程图中存在交叉和缺失的角度, 其他方位视向角的均方根误差值都较小。



(a) 空间分布



(b) 误差分布

图9 RCS反演后的空间分布及误差
Fig. 9 Spatial distribution and error of the RCS

4 结论

通过建立二维滑动型散射中心随视向角变化的轨迹关联方程, 并针对圆轨迹建立滑动半径与高度的关联方程, 提出了基于二次 Hough 变换的散射中心位置参数提取方法, 该方法很好地解决二维滑动型散射中心位置参数的提取问题, 实现散射中心三维空间参数提取。二维滑动型散射中心作为广泛存在于目标上的典型散射体结构(如圆形顶帽), 是对固定散射中心在方位上的维度扩展, 引入二维

滑动型散射中心大幅度提高散射中心的方位角度范围, 通过对其三维空间参数的精确提取, 为大角度区域散射特征信号重构以及高分辨率散射中心分布模拟奠定基础。结合典型体散射中心参数化模型中物理尺寸参数与幅度分布的关系, 提出一种基于散射中心幅度分离的尺寸参数估计方法, 通过对一维距离像历程图中的散射中心进行分离, 拟合得到散射中心 RCS 幅度随角度变化关系, 结合模型公式估计出物理尺寸参数。基于物理特性的典型体散射中心参数化模型能够有效模拟复杂目标不同类型强散射中心。典型体散射中心模型物理尺寸参数能够精确描述散射结构, 结合散射中心位置参数能够准确模拟目标的散射特征, 可用于快速特征重构, 以支撑目标特征模拟、识别等研究。实验从 Slicy 模型入手, 验证了方法的有效性和稳健性。

参考文献:

- [1] 黄培康. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 宇航出版社, 1993: 168-180.
Huang Peikang. Radar Target Signature[M]. Beijing: The Aerospace Press, 1993: 168-180.
- [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: 230-235.
Huang Peikang, Yin Hongcheng, Xu Xiaojian. Radar Target Characteristics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 230-235.
- [3] 周剑雄. 光学区雷达目标三维散射中心重构理论与技术[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2006: 2-16.
Zhou Jianxiong. Theory and Technology on Reconstructing 3D Scattering Centers of Radar Targets in Optical Region[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2006: 2-16.
- [4] Zhou Jianxiong, Zhao Hongzhong, Shi Zhiguang, et al. Extracting Global 3D Scattering Center Model of Radar Target from Multiple HRR Profiles[C]// Boston. IEEE Radar Conference, 2007: 811-816.
- [5] Bai Xueru, Zhou Feng, Bao Zheng. High-Resolution Radar Imaging of Space Targets Based on HRRP Series [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (S0196-2892), 2014, 52(5): 2369-2381.
- [6] Zhong Jinrong, Wen Gongjian, Hui Bingwei, et al. Three-dimensional positions of scattering centers reconstruction from multiple SAR images based on radargrammetry[J]. Changsha. J. Cent. South Univ (S2095-2899), 2015(22): 1776-1789.
- [7] Rademacher R W. Bayesian Methods and Confidence Intervals for Automatic Target Recognition of SAR Canonical Shapes[D]. Ohio. Air Force Institute of Technology. Thesis of Master, 2014: 5-10.
- [8] Jackson J A, Riglign B D, Moses R L. Parametric Scattering Models for Bistatic Synthetic Aperture Radar[C]// Rome. IEEE Radar Conference, 2008: 1-5.
- [9] 周品, 李晓东. Matlab 数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 197-199.
Zhou Pin, Li Xiaodong. Matlab Digital Image Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 197-199.