

文章编号: 1671-0576(2024)01-0020-07

目标近场电磁散射中心建模与特征参数反演

鲁童童^{1,2}, 方金鹏¹, 童广德^{1,2}, 贺新毅^{1,2}, 王爽^{1,2}

(1. 上海无线电设备研究所, 上海 201109; 2. 散射辐射全国重点实验室, 上海 200438)

摘要: 为了通过较少散射场数据实现雷达目标特性建模和参数反演, 提出了一种基于时频图多普勒特征的散射中心建模和特征参数反演方法, 采用单频点下的一维角度近场扫描数据实现对目标二维散射中心的提取。通过平滑伪 Wigner-Ville 分布 (smooth and pseudo Wigner-Ville distribution, SPWVD) 分析方法生成高分辨率时频图, 根据不同类型散射中心的多普勒特征, 通过 Radon 逆变换 (inverse Radon transform, IRT) 提取散射中心模型的位置和幅度参数, 并将提取的散射中心位置参数与几何模型参数、散射中心模型重构雷达散射截面 (RCS) 与仿真的 RCS 进行了性能对比。结果表明: 该方法只需要单频点的一维角度扫描数据, 即可有效提取目标散射中心位置和幅度等特征参数, 且重构 RCS 的均方根误差小于 3 dBsm。

关键词: 近场电磁散射特性; 属性散射中心模型; 时频分析; 参数反演

中图分类号: O441

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2024.01.004

Modeling and Parameter Inversion of Near-field Electromagnetic Scattering Center of Target

LU Tongtong^{1,2}, FANG Jinpeng¹, TONG Guangde^{1,2},
HE Xinyi^{1,2}, WANG Shuang^{1,2}

(1. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China;

2. National Key Laboratory of Scattering and Radiation, Shanghai 200438, China)

Abstract: To realize radar target characteristic modeling and parameter inversion with less scattering data, a scattering center modeling and parameter inversion method was proposed based on Doppler characteristics of time-frequency image. The 2D scattering center was extracted from near-field 1D angle scanning data at single frequency. Smooth and pseudo Wigner-Ville distribution (SPWVD) analysis method was used to generate high resolution time-frequency image. The Doppler characteristics of scattering centers were analyzed to estimate position and amplitude parameters of the scattering center model by inverse Radon transform (IRT). Then the scattering center position parameter was compared with the geometric model parameters, the rebuilt radar cross section (RCS) of the scattering center was compared with the RCS obtained by simulation. The simulation results show that the proposed method can extract position and amplitude parameters of scattering center

effectively from 1D angle scanning data at single frequency, the root-mean-error of the reconstructed RCS is less than 3 dBsm.

Key words: near-filed electromagnetic scatter characteristic; attribute scattering center model; time-frequency analysis; parameter inversion

0 引言

散射中心模型作为一种目标近场电磁散射特性的参数化表征模型,具备稀疏性、物理性和扩展性^[1]。散射中心模型采用参数化公式来描述,每个散射中心相当于 Stratton-Chu 积分中的一个数学不连续处。随着建模精度要求的提高,散射中心模型从点散射中心模型发展为包含目标几何参数的属性散射中心模型^[2-3]。散射中心的属性参数可反映目标的几何结构和尺寸,在高分辨雷达的图像解译和目标识别领域具有较高的应用价值^[4]。

属性散射中心模型参数可通过散射场数据估计得到,传统估计方法包括基于谱估计的极化多信号分类法(PMUSIC)、旋转不变性参数估计技术(ESPRIT)以及峰值剔除法(CLEAN)等,这些参数提取方法需要频率和角度二维数据才能提取二维位置参数。本文方法利用不同类型的散射中心在时频像中的特征,采用单频点下的一维角度扫描数据即可提取二维散射中心坐标,仅需较少数据即可实现散射参数反演和目标建模。

1 属性散射中心模型

散射中心模型采用数学公式描述散射幅度与目标尺寸、散射类型、频率、观测角度等参数之间的关系。POTTER 等^[5]在几何绕射理论(GTD)散射中心模型的基础上,采用 sinc 函数和指数函数描述散射幅度,提出了属性散射中心模型。目标的散射场由若干散射中心共同贡献所得,其复数散射场的表达式为

$$E(f, \phi) = \sum_{i=1}^N A_i (jf/f_c)^{\alpha_i} \exp(-2\pi f \gamma_i \sin \phi) \times \text{sinc}(2\pi f L_i \sin(\phi - \phi_i)/c) \exp(-j4\pi f (\mathbf{r}_i \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}})/c) \quad (1)$$

式中: f 为雷达频率; ϕ 为方位角; i 为散射中心的编号; N 为散射中心总数; A_i 为散射中心的散射幅度; f_c 为雷达中心频率; α_i 为频率依赖因子; γ_i 为幅度衰减因子; L_i 为散射中心长度参数; ϕ_i 为散射中心的相位修正角; c 为电磁波速度; \mathbf{r}_i 为散射中心位置矢量; $\hat{\mathbf{r}}_{\text{los}}$ 为雷达视角方向矢量。

依据散射中心幅度对位置和方位的依赖性,可以将属性散射中心进一步分为局部型散射中心(local scattering center, LSC)和分布型散射中心(distribute scattering center, DSC)。

局部型散射中心由目标表面不连续结构的散射等效形成,比如飞机的机头、机翼连接处、尾翼端点等,散射机理包括顶点绕射、边缘绕射、缝绕射、角绕射等。局部型等效散射中心的位置不随观测角度变化,可见范围较宽,且幅度较为稳定。采用指数函数描述其散射幅度, LSC 的复数散射场表达式为

$$E(f) = \sum_{i=1}^N A_i \exp(-j4\pi f (\mathbf{r}_i \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}})/c) \quad (2)$$

分布型散射中心主要由目标片状结构的散射等效形成,比如飞行器的机翼等,散射机理包括平面反射等。分布型等效散射中心的位置不固定,在一定范围内分布,可通过长度确定其位置参数。相比于 LSC, DSC 的可见范围较窄,只在雷达视角与目标平面结构垂直时可见。采用 sinc 函数描述其散射幅度,则目标 DSC 的复数散射场表达式为

$$E(f, \phi) = \sum_{i=1}^N A_i \text{sinc}(2\pi f L_i \sin(\phi - \phi_i)/c) \times \exp(-j4\pi f (\mathbf{r}_i \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}})/c) \quad (3)$$

本文的散射场都是由单频点下的一维角度扫描数据仿真获得的。观测天线绕目标匀速转动,并保证扫描角度与采样时间序列对应。通过时频变换进行分析,散射中心的时频特征与多普勒频率随

角度的变化特征对应。因此,根据时频图中的多普勒频率变化规律,可以提取模型的未知参数。

目前已有很多成熟的雷达信号时频分析方法。为了获得高分辨率数据,同时避免误差与交叉项干扰,本文采用平滑伪 Wigner-Ville 分布(smooth and pseudo Wigner-Ville distribution, SPWVD)的分析方法获取时频图像。SPWVD 的基本思想是在时域和频域对信号分别加窗平滑,信号 $s(t)$ 的 SPWVD 的时频谱可以定义为

$$W_s^{\text{SP}}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(u)h(\tau)s(t-u+\tau/2) \times s^*(t-u-\tau/2)\exp(-j\omega\tau)dud\tau \quad (4)$$

式中: t, τ 为时间; ω, u 为角频率; $g(u)$ 为频域平滑窗函数; $h(\tau)$ 为时域平滑窗函数; $*$ 为共轭运算符。 $g(u), h(\tau)$ 均为实偶函数,并且 $h(0) = g(0) = 1$ 。通过 SPWVD 分析方法得到的信号时频曲线具有高分辨率与集中性,这对于准确获取多普勒频率特征曲线、提取散射中心模型参数具有重要意义。

2 基于时频分析的属性散射中心模型参数估计方法

2.1 LSC 模型参数估计方法

根据 LSC 模型定义,采用近场散射特性分析专用软件进行目标 LSC 的仿真建模。在 (10 m, 5 m, 0 m) 处设置一个半径为 0.1 m 的金属球,采用物理光学法(PO)进行仿真。近场天线距离坐标原点 1 000 m,在频率为 1 GHz 下对金属球进行 360°方位角扫描,获得金属球的雷达散射截面(RCS),并对其复数电场进行 SPWVD 分析。扫描角度与采样时间对应,采样率设置为 1 000 Hz,得到的金属球的 LSC 时频图如图 1 所示。

由图 1 可以看出,金属球的 LSC 的多普勒频率随方位角呈正弦规律变化。

金属球 LSC 中的第 i 个散射中心的多普勒频率

$$f_{\text{D},i}(t) = \frac{2f}{c} \frac{d(\hat{\mathbf{r}}_{\text{los}} \cdot \mathbf{r}_i)}{dt} = \frac{2}{\lambda} \frac{d\phi_i}{dt} = -\frac{2}{\lambda} \frac{d\zeta}{dt} r_i \sin \zeta \quad (5)$$

式中: $\rho_i = \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}} \cdot \mathbf{r}_i$ 为散射中心在雷达视角上的距离; λ 为雷达信号的波长; ζ 为雷达视角方向矢量

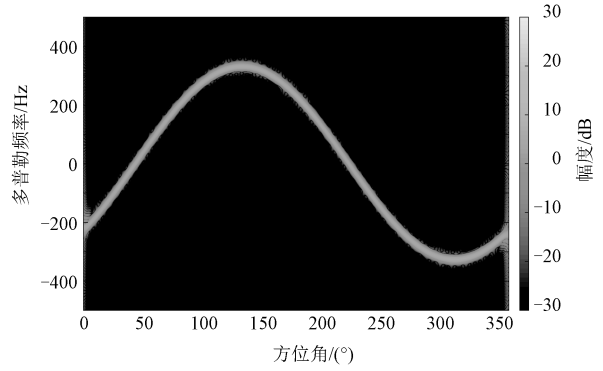


图 1 金属球的 LSC 时频图

$\hat{\mathbf{r}}_{\text{los}}$ 与散射中心位置矢量 \mathbf{r}_i 之间的夹角; r_i 为散射中心到坐标原点的距离。可知, $f_{\text{D},i}(t)$ 随着 ζ 呈正弦规律变化。

为了提取 LSC 模型中散射中心的位置矢量 \mathbf{r}_i , 可以将其时频图从笛卡尔坐标系转换至极坐标系,从而生成一维-二维/三维散射映射图(OTSM)^[6]。设 LSC 中的第 i 个散射中心在二维坐标系中的坐标为 (x_i, y_i) , 则

$$\rho_i = \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}} \cdot \mathbf{r}_i = x_i \cos \phi + y_i \sin \phi \quad (6)$$

LSC 中第 i 个散射中心的多普勒频率 $f_{\text{D},i}(t)$ 的表达式可改写为

$$\begin{aligned} f_{\text{D},i}(t) &= \frac{2f}{c} \frac{d(x_i \cos \phi + y_i \sin \phi)}{dt} \\ &= \frac{2f}{c} \left(-x_i \sin \phi \frac{d\phi}{dt} + y_i \cos \phi \frac{d\phi}{dt} \right) \quad (7) \end{aligned}$$

将时频图转换为二维 OTSM,扫描角度与采样时间按采样率对应,此时 $d\phi/dt$ 为常数,LSC 的第 i 个散射中心的多普勒频率 $f_{\text{D},i}(t)$ 投影至二维 OTSM 上的坐标为 (x'_i, y'_i) , 其表达式为

$$\begin{cases} x'_i = f_{\text{D},i}(t) \cos \phi \\ \quad = \frac{2f}{c} \frac{d\phi}{dt} (-x_i \sin \phi \cos \phi + y_i \cos^2 \phi) \\ y'_i = f_{\text{D},i}(t) \sin \phi \\ \quad = \frac{2f}{c} \frac{d\phi}{dt} (-x_i \sin^2 \phi + y_i \cos \phi \sin \phi) \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可得

$$\begin{aligned} \left(x'_i - \frac{y_i}{2} \frac{2f}{c} \frac{d\phi}{dt} \right)^2 + \left(y'_i + \frac{x_i}{2} \frac{2f}{c} \frac{d\phi}{dt} \right)^2 &= \\ \left(\frac{2f}{c} \frac{d\phi}{dt} \right)^2 \left(\frac{y_i^2}{4} + \frac{x_i^2}{4} \right) &= \quad (9) \end{aligned}$$

与图 1 金属球的 LSC 时频图对应的金属球的 OTSM 如图 2 所示。

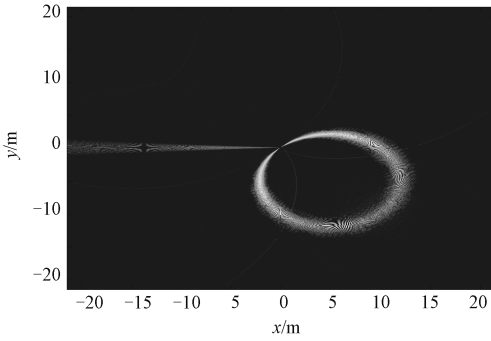


图 2 金属球的 OTSM

$$\begin{aligned} \text{IRT}(R(f_D, \phi)) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} R(f_D, \phi) \exp(-j2\pi f_D v) \exp(-j2\pi(k_x x + k_y y)) df_D dk_x dk_y \\ &= \delta(x - M \sin \varphi) \delta(y - M \cos \varphi) \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$R(f_D, \phi) = \delta(f_D - M \sin(\phi + \varphi)) \quad (11)$$

式中: $\text{IRT}(\cdot)$ 为 Radon 逆变换函数; v 为方位角 ϕ 对应的采样时间序列; k_x, k_y 分别为 x, y 方向的波数; $\delta(\cdot)$ 为冲激函数; M, φ 分别为正弦曲线的幅度和相位。图 1 时频图对应的 IRT 图如图 3 所示。

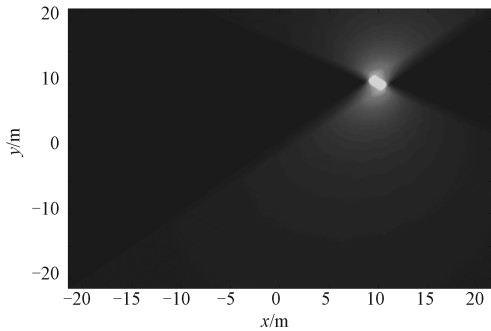


图 3 金属球的 IRT 图

经过 IRT 之后, 正弦曲线表现为固定的点, 其位置坐标 (x, y) 为 $(M \sin \varphi, M \cos \varphi)$, 则 LSC 对应正弦曲线的幅度和相位可以表示为

$$\begin{cases} M = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \varphi = \arctan(x/y) \end{cases} \quad (12)$$

由图 3 可以看出: 点目标的位置为 $(10 \text{ m}, 5 \text{ m})$, 可见范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 其位置与定义的目标位置一致, 可见范围与图 1 中多普勒曲线的可见范围一致。

2.2 DSC 模型参数估计方法

根据 DSC 模型定义, 采用近场散射特性分析

结合式(9)可以看出: LSC 经过变换后, 散射点在 OTSM 上的投影坐标 (x'_i, y'_i) 的变化轨迹是以 $(y_i/2, -x_i/2)$ 为圆心的圆。在图 2 中, 圆心坐标为 $(5 \text{ m}, -5 \text{ m})$, 从圆心可以反推 LSC 的位置坐标。

LSC 的位置坐标也可以通过 Radon 逆变换^[7] (inverse Radon transform, IRT) 获取。对图 1 所示的包含多普勒频率 f_D 的散射中心时频图 $R(f_D, \phi)$ 进行 IRT, 其表达式为

专用软件进行仿真建模。DSC 由平面结构镜面反射形成, 因此在 $(-5.0 \text{ m}, 5.0 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 到 $(5.0 \text{ m}, 5.0 \text{ m}, 0.2 \text{ m})$ 之间定义一个长方形金属片, 在频率为 1 GHz 下仿真金属片的 RCS, 并对其复数电场进行 SPWVD 变换。为了避免金属片边缘散射形成的 LSC 对其时频图中的多普勒特征提取产生影响, 过滤幅度小于 0 dB 的数据, 得到的长方形金属片的 DSC 时频图如图 4 所示。

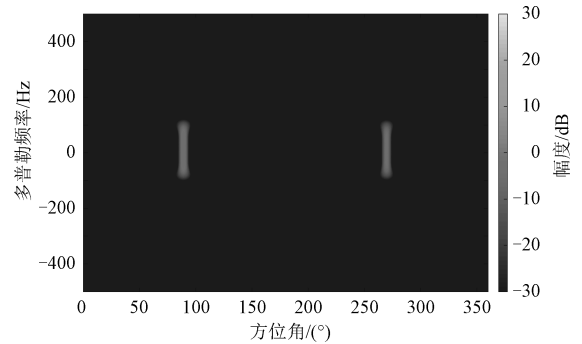


图 4 长方形金属片的 DSC 时频图

由图 4 可以看出: 金属片的 DSC 在时频图中表现为竖直亮线, 且仅在特定观测角度下出现。根据 DSC 模型以及时频成像机理, 在 xoy 平面上, 设 DSC 模型中的两个端点分别为点 A 与点 B, 其坐标分别为 $(x_a, y_a, 0)$ 和 $(x_b, y_b, 0)$, 则散射点均匀分布于线段 \overline{AB} 之间, 点 A 与点 B 的几何关系为

$$(x_a - x_b) \sin \theta \cos \phi = (y_a - y_b) \sin \theta \sin \phi \quad (13)$$

式中: θ 为俯仰角。

设点 A 与点 B 的多普勒频率分别为 $f_{D,a}$, $f_{D,b}$, 则 DSC 两端点的多普勒频率差

$$\Delta f_D = f_{D,a} - f_{D,b} = (2/\lambda)[(x_b - x_a)\sin\theta \sin\phi + (y_a - y_b)\sin\theta \cos\phi]d\phi/dt \quad (14)$$

结合点 A 和点 B 的几何关系,可得

$$\Delta f_D = \frac{2}{\lambda} \frac{(x_b - x_a)}{\sin\phi} \sin\theta \frac{d\phi}{dt} \quad (15)$$

在 DSC 可见角度下, \hat{r}_{los} 与线段 \overline{AB} 垂直。

根据多普勒频率差,可得线段 \overline{AB} 的真实长度 L_r 。结合 DSC 模型以及时频变换公式,得到的多普勒频率差 Δf_D 与目标真实长度 L_r 以及 DSC 长度 L 之间的关系式为

$$\Delta f_D = k_0 L \frac{d\phi}{dt} = k_0 \frac{L_r \sin\theta}{\pi} \frac{d\phi}{dt} \quad (16)$$

式中: k_0 为常数,与采样率设置有关。

由式(16)可以看出:DSC 的长度可直接由多普勒频率差计算得到,无需进行 IRT。由于 DSC 的边界会形成 LSC,因此可以通过 LSC 的位置参数结合 DSC 已知参数,推测 DSC 端点的位置。更为精确的 DSC 参数可以结合可见角度下的距离像获得。DSC 的可见角度对应雷达观测角度,可以通过两个 DSC 对应方位角之间的角度差获取目标的几何信息,如机翼和机身雷达观测角之间的角度差,图 4 中两个 DSC 的角度差为 180° ,对应平板结构正前方和正后方的观测位置。

3 数值实验与结果分析

3.1 多个点目标模型算例

采用 FEKO 仿真软件进行目标 RCS 仿真。用 8 个半径为 0.1 m 的金属球组成一个点目标飞机模型,球心坐标为 $(-8 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(-3 \text{ m}, -3 \text{ m})$, $(-3 \text{ m}, 3 \text{ m})$, $(6 \text{ m}, 12 \text{ m})$, $(6 \text{ m}, -12 \text{ m})$, $(9 \text{ m}, 6 \text{ m})$, $(9 \text{ m}, -6 \text{ m})$, $(6 \text{ m}, 0 \text{ m})$, 采用 PO 仿真。天线距离坐标原点 1 000 m,在频率为 1 GHz 下对飞机模型进行 360° 方位角扫描,获得点目标飞机模型的 RCS,并对其复数电场进行 SPWVD 变换,得到的点目标飞机模型时频图如图 5 所示。可以看出:在时频图中有多条正弦曲线,对应多个散射中心的多普勒特征,可见范围理论上均为 $0^\circ \sim 360^\circ$;时频图中各曲线在 90° 和 270° 附近不连续,这是由于多条正弦曲线在交叉处存在干扰。

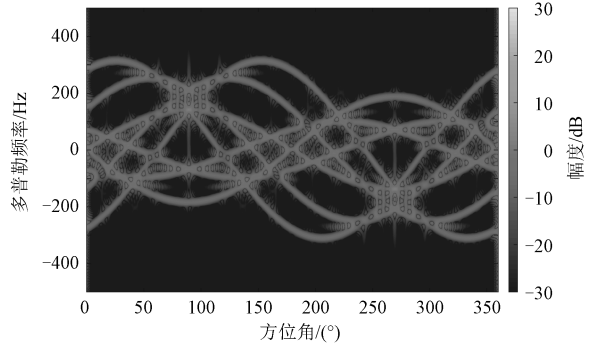


图 5 点目标飞机模型时频图

进一步,采用 IRT 得到 LSC 的坐标和幅度,所得点目标飞机模型的 IRT 图如图 6 所示。

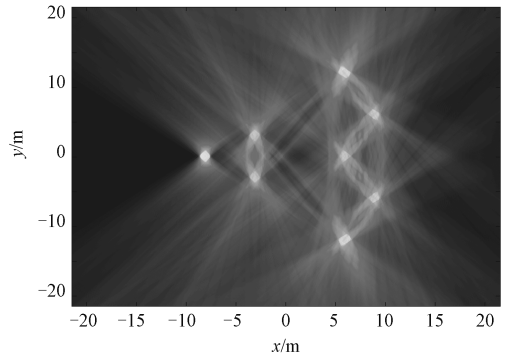


图 6 点目标飞机模型的 IRT 图

提取 IRT 图中的极值点,其坐标为 LSC 位置坐标。LSC 幅度和相位由式(12)计算得出,LSC 可见范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。根据 LSC 模型生成散射电场,得到的点目标飞机模型散射中心重构 RCS 与 FEKO 软件仿真 RCS 的对比结果如图 7 所示,重构的点目标飞机模型的时频图如图 8 所示。

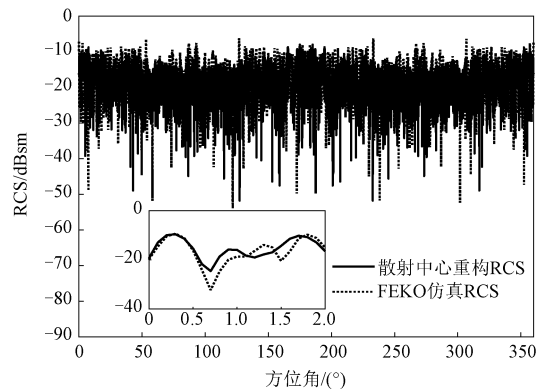


图 7 点目标飞机模型重构的 RCS 与 FEKO 仿真的 RCS 对比图

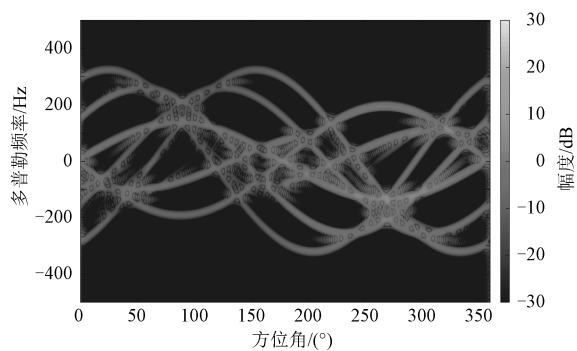


图 8 重构的点目标飞机模型的时频图

由图 7 可以看出,点目标飞机模型散射中心重构的 RCS 与 FEKO 软件仿真的 RCS 总体变化趋势基本一致,两者的均方根误差为 2.9 dBsm。图 8 的时频图与图 5 的相比,飞机模型的多普勒特征一致,部分正弦曲线可见范围较小。经分析,这是由自动检测算法对正弦曲线的角度范围判断异常导致的,后续将进一步对 LSC 检测算法进行优化。

3.2 简易飞机模型算例

采用圆柱体、长方体等结构构建简易飞机模型,如图 9 所示,其中黑色部分表示飞机模型,○表示 LSC 位置。

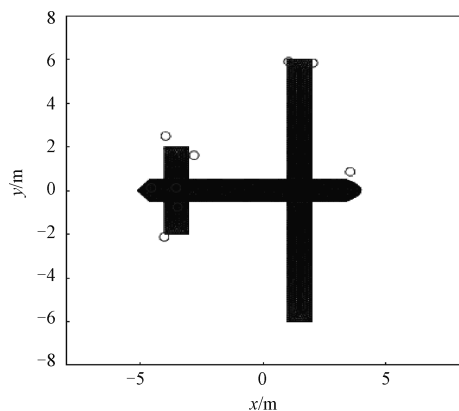


图 9 简易飞机模型及其 LSC 位置图

设置仿真参数:频率为 3 GHz,雷达观测方位角为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。采用 PO 仿真,天线距离坐标原点 1 000 m,在频率为 1 GHz 下对简易飞机模型进行 360° 方位角扫描,获得简易飞机模型的 RCS,对其复数电场进行 SPWVD 变换,得到重构的简易飞机模型的时频图如图 10 所示。

由图 10 可以看出:在时频图中的正弦曲线可

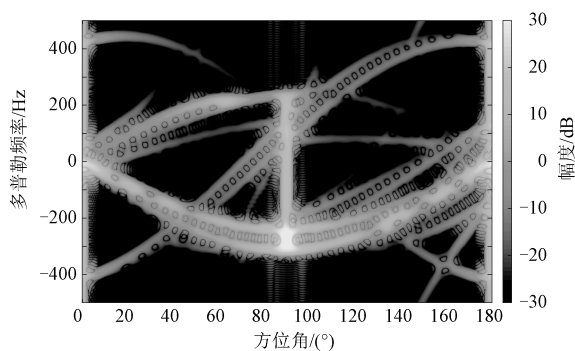


图 10 重构的简易飞机模型的时频图

见范围不再是 $0^\circ \sim 360^\circ$,左下角的正弦曲线可见范围为 $0^\circ \sim 50^\circ$ 。采用 IRT 提取 LSC,简易飞机模型的 IRT 图如图 11 所示。

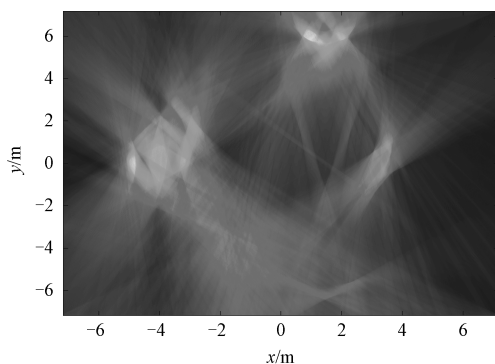


图 11 简易飞机模型的 IRT 图

由图 11 可知:提取的 LSC 基本分布在飞机模型的机头和机翼端点处,与图 9 所示 LSC 分布基本一致。图 10 所示时频图中有明显的竖直亮线,该亮线对应 DSC 特征,可见角度为 90° 。DSC 长度参数由竖直亮线的长度得到,在方位角为 90° 、沿多普勒频率轴方向,取竖直亮线两个端点的多普勒频率差,代入式(16),得到 DSC 的长度参数为 5.085 m,与飞机模型机翼到尾翼的真实距离 5 m 接近。

根据散射中心模型生成散射电场,得到的简易飞机模型散射中心重构的 RCS 与 FEKO 软件仿真的 RCS 的对比结果如图 12 所示。

由图 12 可以看出:简易飞机模型散射中心重构 RCS 与 FEKO 仿真 RCS 基本一致,两者的均方根误差为 2.1 dBsm。LSC 主要位于飞机模型的机翼端点和机头等结构不连续处,DSC 主要位于飞机模型的机身部分,与上文理论推导一致。

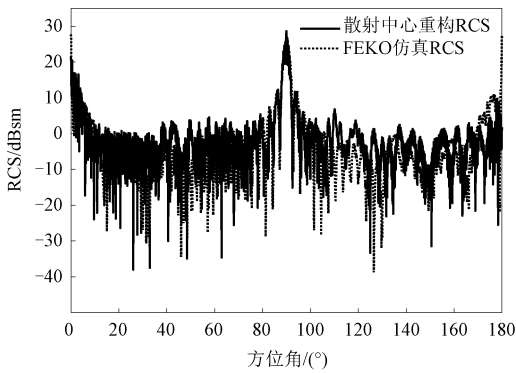


图 12 简易飞机模型重构的 RCS 与 FEKO 仿真的 RCS 对比图

4 结论

本文给出了一种散射中心参数提取方法,并通过算例验证其有效性。该方法基于多普勒特征提取散射中心位置和幅度参数,只需要单频点下的角度扫描数据即可提取散射中心的二维位置参数,不受扫频带宽限制,且重构 RCS 的均方根误差小于 3 dBsm。后续应进一步优化 LSC 的提取方法,提高建模准确度,同时研究针对实测数据的散射中心建模方法,提取观测雷达非匀速旋转时

获得的目标多普勒特征,更好地为目标识别提供技术支撑。

参考文献

(上接第 19 页)

- [10] 乔凯,智喜洋,杨冬,等. 空中弱目标天基光学探测性能表征及匹配设计方法[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(5): 642-647.
- [11] 胡建明,乔凯,智喜洋,等. 天基观测条件下复杂环境对空中弱小目标可探测性的影响[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(3): 351-357.
- [12] KIM S, LEE J. Scale invariant small target

- [1] 梁子长,岳慧,王晓冰,等. 广义 RCS 及近场电磁散射建模应用[J]. 上海航天, 2011, 28(2): 32-37.
- [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.
- [3] 梁子长,王晓冰,魏飞鸣,等. 近场电磁散射特点及其对建模要求[J]. 电波科学学报, 2020, 35(1): 141-148.
- [4] 屈泉西. 雷达目标散射中心模型及其应用[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [5] POTTER L C, MOSES R L. Attributed scattering centers for SAR ATR [J]. Image Processing IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(1): 79-91.
- [6] 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, 2006.
- [7] 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.

detection by optimizing signal-to-clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track[J]. Pattern Recognition, 2012, 45(1): 393-406.

- [13] 刘尊洋,邵立,汪亚夫. 基于辐射通量表观对比度光谱的红外预警卫星探测波段选择方法[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(5): 492-497.