

## 基于 ISAR 图像的中段目标二维几何特征反演方法

徐少坤\* 刘记红 袁翔宇 陆静  
(中国洛阳电子装备试验中心 洛阳 471003)

**摘要:** 该文针对弹道导弹防御系统的目标识别问题,研究了中段目标的2维几何特征反演方法。基于中段目标的外形特征,提出了一种描述目标2维几何结构的稳定特征量,该特征量不受目标姿态变化和雷达工作条件的影响。基于中段目标的电磁散射特性,建立了目标在不同姿态下的ISAR成像结果与目标2维几何特征的映射关系,进而提出一种基于ISAR像的中段目标2维几何特征反演方法,能够稳定地反演出中段目标飞行过程中所有姿态下的2维几何特征。通过电磁计算数据和暗室测量数据验证了所提方法的有效性和稳定性。

**关键词:** 目标识别; 中段目标; 2维几何特征; ISAR图像; 反演

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)02-0339-07

DOI: 10.11999/JEIT140338

## Two Dimensional Geometric Feature Inversion Method for Midcourse Target Based on ISAR Image

Xu Shao-kun Liu Ji-hong Yuan Xiang-yu Lu Jing  
(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** This paper focuses on Two Dimensional (2D) geometric feature inversion method of midcourse targets, serving for the target recognition problem of ballistic missile defense system. Based on the figuration characteristic of midcourse targets, a stable characteristic quantity, which describes the 2D geometric configuration of target, is proposed. The characteristic quantity is independent on the target attitude variation and radar work condition. Then the expression form of 2D geometric feature in radar image is analyzed with respect to different intervals, the mapping relationships between ISAR images under various target attitudes and the 2D geometric feature of target are established, and an 2D geometric feature inversion method for midcourse targets based on ISAR image is proposed. The proposed method can stably estimate the 2D geometric feature of midcourse targets under all attitudes during the midcourse flight, which is verified by the simulation experiments with electromagnetic computed data and measured data in anechoic chamber.

**Key words:** Target recognition; Midcourse target; Two-Dimensional (2D) geometric feature; ISAR image; Inversion

### 1 引言

弹道导弹防御(Ballistic Missile Defense, BMD)是国家领土安全的重要组成部分,弹道目标在中段飞行过程中状态平稳,留给BMD系统的反应时间相对充足,被认为是弹道导弹攻防对抗的主要阶段<sup>[1,2]</sup>。导弹攻防对抗的关键在于对真假弹头的有效识别,国际上对美国BMD系统有效性的怀疑也主要集中在这一方面<sup>[3-5]</sup>。几何结构特征是目标的固有属性,包括形状、尺寸、结构等,对中段目标识别具有重要的意义<sup>[6,7]</sup>。

宽带雷达是BMD系统目标识别的核心传感器<sup>[7-9]</sup>,基于宽带雷达回波反演目标的几何结构特征是BMD系统雷达目标识别的主要手段<sup>[10-13]</sup>。美

国早在20世纪70年代就具备了反演中段目标几何结构特征的能力,并研究了基于几何特征的目标识别算法,但由于保密原因,其技术细节未见报道<sup>[7]</sup>。文献[10-12]研究了基于多幅高分辨距离像的目标径向尺寸估计方法,文献[13]基于ISAR图像研究了目标尺寸和形状等特征反演方法,但上述方法得到的均是目标图像的尺寸,描述的是目标在雷达视线或成像平面上的投影尺寸,与雷达的照射视线相关;另外,上述研究都是基于理想电磁散射模型展开的,而中段目标运动过程中出现镜面反射等非理想散射的可能性较大<sup>[14]</sup>,当出现非理想散射现象时,上述方法可能无法有效提取目标的几何特征。因此,需要进一步研究有效而稳健的中段目标几何特征反演方法。

本文基于中段目标的电磁散射特性,提出了一

种描述目标 2 维几何结构的稳定特征量, 该特征量属于目标的固有属性, 不受目标姿态变化和雷达工作条件的影响, 只与少量的等效散射中心位置和长度因子有关。针对这一特性, 本文将雷达照射角划分成几个典型的观测区间, 深入分析目标 2 维几何特征在雷达图像中的表现形式, 建立了目标在不同姿态下的 ISAR 成像结果与目标 2 维几何特征的映射关系, 进而提出了一种 2 维几何特征反演方法。基于电磁计算数据和暗室测量数据的实验结果表明, 本文方法能够稳定地反演出中段目标的 2 维几何特征, 反演精度较高。

## 2 中段目标电磁散射特性分析及 2 维几何特征的稳定描述

### 2.1 中段目标的电磁散射特性分析

中段目标一般是锥+柱+台结构的刚体目标, 通常为旋转对称体, 几何结构较为简单, 而且距离雷达较远, 满足远场条件, 可认为入射波为平面波。电磁波照射到中段目标上形成的散射场可以用相应位置的散射中心近似, 目标的散射中心模型可描述目标的轮廓特征。

由于中段目标飞行过程中姿态变化范围较大, 目标的电磁散射模型会发生相应的变化, 不能用单一姿态下的散射中心模型对目标建模。表 1 给出了某锥柱体目标在不同姿态下的电磁波照射模型和相应的暗室测量数据成像结果, 其中视线角指的是雷达视线与目标对称轴之间的夹角。可见, 结果中强散射点(等效散射中心)位置较为清晰, 散射点的实际位置与目标几何形体上不连续处吻合较好, 成像结果较好地诠释了目标的电磁散射特性; 特别地, 当视线角为  $72^\circ \sim 77^\circ$  时, 成像结果为一个沿方位向延伸跨越了几个单元的“斑”, 此时目标的电磁散射主要由锥体的镜面反射构成, 体现为一个展布式散射中心。

对于中段旋转对称体目标, 中段飞行过程中,

目标的等效散射中心可能在展布式散射中心和局域式散射中心之间相互转换, 可采用属性散射中心模型<sup>[15]</sup>对中段目标的电磁散射特性进行统一描述, 即

$$\begin{aligned} \tilde{E}(f, \theta) = & \sum_{i=1}^I A_i \left( j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \exp \left( -j \frac{4\pi f}{c} r_i(\theta) \right) \\ & \cdot \text{sinc} \left( \frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\theta - \bar{\theta}_i) \right) \exp(-2\pi f \gamma_i \sin \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $f$  和  $\theta$  分别表示电磁波的频率和入射角度,  $f_c$  为工作载频;  $I$  表示目标等效散射中心个数;  $A_i$  表示散射中心的强度;  $r_i(\theta)$  表示散射中心到雷达的距离;  $\alpha_i$  表示频率影响因子, 一般满足  $\alpha_i \in \{\pm 1, \pm 0.5, 0\}$ ;  $\{\gamma_i, L_i, \bar{\theta}_i\}$  是散射中心的属性因子, 对于局域式散射中心,  $L_i = 0, \bar{\theta}_i$  没有意义,  $\gamma_i$  表征散射率对方位角的依赖性; 对于展布式散射中心,  $L_i > 0, \bar{\theta}_i$  表征散射中心相对于雷达的方向, 同时  $\gamma_i = 0$ 。

### 2.2 中段目标 2 维几何特征的稳定描述

从表 1 中的成像结果可以看出, 由于遮挡效应, 目标体上的可视散射中心集中在靠近雷达电磁波入射方向的表面上。例如, 在图 1 所示的照射条件下, 只有 1~3 号散射中心是可视的。通常锥体目标的结构特征可用 3 个等效散射中心(锥顶一个, 锥底两个)的位置来描述, 锥+柱或锥+台组合体(下文将两者统称为锥台组合体)目标的腰部连接处也存在等效散射中心, 但这些散射中心不影响目标的整体尺寸, 该类目标的 2 维尺寸同样可由顶部和底部的 3 个等效散射中心反演得到。

反演中段目标的几何机构特征时, 通常可将目标等效为一个圆锥体(目标为锥台体结构时, 等效为目标顶点和底面所确定的圆锥体, 如图 1 中虚线所示)。等效圆锥体的 2 维几何尺寸与其母线长度  $l$  和半锥角  $\varphi_0$  具有一一对应关系, 本文将  $(l, \varphi_0)$  定义为中段目标的 2 维几何特征, 它是反映圆锥体目标自身结构特性的特征量, 与测量条件无关, 也不随雷达观测视角的改变而变化, 对中段目标识别具有重要意义。

表 1 不同姿态角下锥体模型暗室测量成像结果

视线角( $^\circ$ )	0-5	20-25	72-77	90-95
照射示意图				
暗室成像结果				

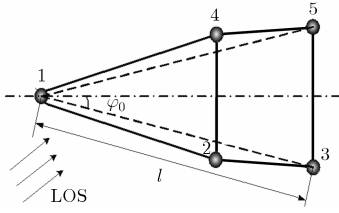


图1 典型弹道目标外形及等效散射中心示意图

### 3 目标二维几何特征在 ISAR 像中的表现形式

利用锥体目标的 3 个散射中心在 ISAR 图像中的相对位置可反演得到其 2 维几何特征。但是，由于存在遮挡和镜面散射现象，在不同照射角下，目标的 3 个散射中心在 ISAR 图像中的相对位置会发生改变，其 2 维几何特征  $(l, \varphi_0)$  与 ISAR 图像的对应关系也不同。如图 2 所示，当雷达照射视角  $\theta$  在  $0^\circ \sim 180^\circ$  范围内变化时 ( $180^\circ \sim 360^\circ$  的情况与  $0^\circ \sim 180^\circ$  相同)，根据是否出现遮挡和镜面散射现象，可将雷达视线的照射方向分 5 个区间进行分析，研究基于 ISAR 像反演目标 2 维几何特征的方法。

对某暗室测量锥台体模型按照图 2 所示的姿态区间进行划分，不同区间测量数据的成像结果如图

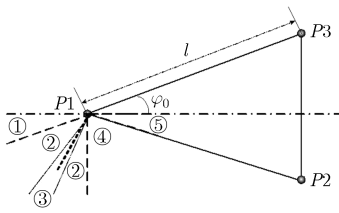


图6 电磁波照射锥体目标示意图

3 所示。由于目标底部没有封闭，当电磁波从目标尾部照射时，存在非常强的腔体散射，如图 3(d)和 3(e)所示。实际目标的尾部通常是封闭的，不存在腔体散射，因此，下文分析过程中不考虑目标尾部的腔体散射。

设  $\theta$  表示电磁波照射目标的平均视线角，成像积累角大小为  $\nu$ ，则成像区间为  $[\theta - \nu/2, \theta + \nu/2]$ 。下面分别分析图 2 中 5 个照射区间内目标的 2 维几何特征在 ISAR 图像中的表现形式。

(1)当雷达视线在区间①内，即  $\theta < \varphi_0$  时，锥顶和锥底的 3 个散射中心  $P1, P2$  和  $P3$  均是可视的，如图 3(a)所示。设目标图像的径向尺寸为  $d_r$ ，方位向尺寸为  $d_a$ ，根据几何投影关系， $d_r$  表示  $P1$  与  $P3$  连线在雷达视线方向上的投影， $d_a$  表示  $P2$  与  $P3$  连线在雷达视线法线方向上的投影，则目标的 2 维几何特征为

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 &= \cot^{-1} \left( \frac{2d_r}{d_a} - \tan \theta \right) \\ l &= \frac{d_r}{\cos(\varphi_0 - \theta)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(2)当雷达视线位于区间②内，即  $\varphi_0 \leq \theta < \pi/2$  且  $\theta \notin [\pi/2 - \varphi_0 - \nu/2, \pi/2 - \varphi_0 + \nu/2]$  时， $P3$  将被遮挡，成像结果中只能看到  $P1$  和  $P2$ ，可将目标看作一个线目标，如图 3(b)所示。根据几何投影关系， $d_r$  和  $d_a$  分别为  $P1$  与  $P2$  连线在雷达视线方向和雷达视线法线方向上的投影，则当  $\varphi_0 \leq \theta < \pi/2 - \varphi_0$  时，

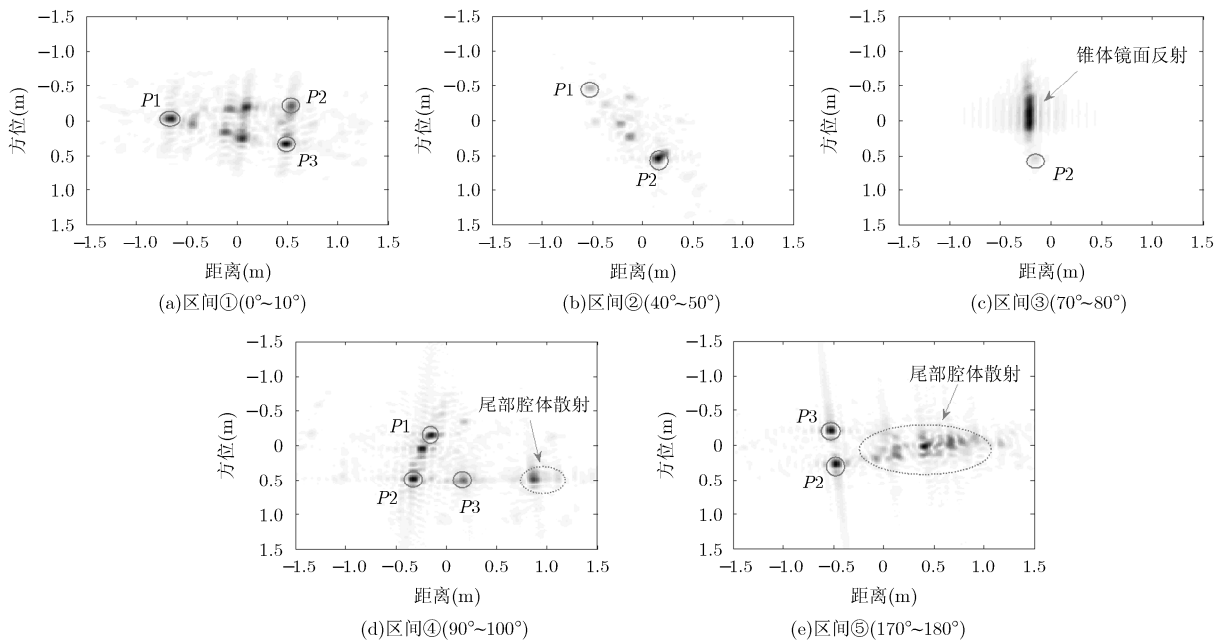


图3 雷达从不同区间锥台体目标的成像结果

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 &= \cot^{-1}(d_r/d_a) - \theta \\ l &= \sqrt{d_a^2 + d_r^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

当  $\pi/2 - \varphi_0 < \theta < \pi/2$  时,

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 &= \pi - \cot^{-1}(d_r/d_a) - \theta \\ l &= \sqrt{d_a^2 + d_r^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(3) 当雷达视线在区间③内, 即  $\theta \in [\pi/2 - \varphi_0 - v/2, \pi/2 - \varphi_0 + v/2]$  时, 雷达视线在垂直于锥体母线的方向附近变化, 目标的电磁散射主要表现为锥体的镜面散射, 等效为一个展布式散射中心, 成像结果如图 3(c)所示。设展布式散射中心在方位向的长度为  $L_0$ , 根据电磁散射理论, 此时  $L_0$  与锥体母线长度一致, 可根据目标图像的方位向尺寸得到目标的母线长度, 半锥角  $\varphi_0$  则可通过估计镜面散射中心的方向角获得。假设镜面散射中心的方向角为  $\bar{\theta}$ , 则

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 &= \pi/2 - \bar{\theta} \\ l &= L_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

对于锥台体目标, 当雷达视线垂直于锥体母线或台体母线时, 目标的电磁散射主要表现为镜面散射, 但还存在相对较弱的边缘散射, 如图 3(c)中的  $P_2$ , 此时镜面散射中心的长度对应的是镜面散射结构的母线长度, 直接将其视为等效锥体的母线长度将存在较大误差。如图 3(c)所示, 设镜面散射中心与  $P_2$  之间的方位向距离为  $d'_a$ , 距离向距离为  $d_r$ , 则等效锥体的母线长度为

$$l = \sqrt{d_r^2 + (d'_a + L_0/2)^2} \quad (6)$$

(4) 当雷达视线在区间④内, 即  $\pi/2 \leq \theta < \pi - \varphi_0$  时, 不存在遮挡现象,  $P_1$ ,  $P_2$  和  $P_3$  均是可视的, 如图 3(d)所示。根据散射中心的位置关系,  $(l, \varphi_0)$  与图像尺寸  $d_r$  和  $d_a$  的对应关系还应分两种情况讨论。

当  $\pi/2 \leq \theta < \pi/2 + \varphi_0$  时,  $d_r$  为  $P_2$  与  $P_3$  连线在雷达视线方向上的投影,  $d_a$  为  $P_1$  与  $P_3$  连线在雷达视线法线方向上的投影, 则

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 &= \tan^{-1} \left( \frac{d_r \sin \theta}{d_r \cos \theta + 2d_a \sin \theta} \right) \\ l &= \frac{\sqrt{(2d_a + d_r \cot \theta)^2 + d_r^2}}{2 \sin \theta} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

当  $\pi/2 + \varphi_0 \leq \theta < \pi - \varphi_0$  时,  $d_r$  为  $P_1$  与  $P_2$  连线在雷达视线方向上的投影,  $d_a$  为  $P_1$  与  $P_3$  连线在雷达视线法线方向上的投影, 则

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 &= \tan^{-1} \left( \frac{d_a \cos \theta + d_r \sin \theta}{d_r \cos \theta + d_a \sin \theta} \right) \\ l &= \sqrt{\frac{d_r^2 + d_a^2 + 2d_r d_a \sin 2\theta}{1 - (\sin 2\theta)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)中,  $(l, \varphi_0)$  的估计均受  $d_r$  和  $d_a$  估计结果的影响, 当  $\theta \approx 3\pi/4$  时,  $d_r$  和  $d_a$  的估计误差将导致  $l$  和  $\varphi_0$  估计出现野值。对于锥体目标, 有式(9)所示的先验信息:

$$\left. \begin{aligned} \max(d_a, d_r) &\leq l \leq \sqrt{d_a^2 + d_r^2} \\ \varphi_0 &\geq \pi - \tan^{-1} \left( \frac{d_a}{d_r} \right) - \theta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

因此, 可将式(8)修正为

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 &= \max \left( \tan^{-1} \left( \frac{d_a \cos \theta + d_r \sin \theta}{d_r \cos \theta + d_a \sin \theta} \right), \right. \\ &\quad \left. \pi - \tan^{-1} \left( \frac{d_a}{d_r} \right) - \theta \right) \\ l &= \min \left( \max \left( \sqrt{\frac{d_a^2 + d_r^2 + 2d_r d_a \sin 2\theta}{1 - (\sin 2\theta)^2}}, d_r, d_a \right), \right. \\ &\quad \left. \sqrt{d_a^2 + d_r^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

(5) 当雷达视线在区间⑤内, 即  $\pi - \varphi_0 \leq \theta \leq \pi$  时, 目标顶部的散射中心  $P_1$  将被遮挡, 目标的电磁散射主要表现为底面圆盘的散射, 等效为散射中心  $P_2$  和  $P_3$ , 如图 3(e)所示。根据几何投影关系,  $d_r$  和  $d_a$  分别为  $P_2$  与  $P_3$  连线在雷达视线方向和雷达视线法线方向上的投影, 即

$$2l \sin \varphi_0 = \frac{d_r}{\sin \theta} = -\frac{d_a}{\cos \theta} \quad (11)$$

式中, 目标的 2 维几何特征  $l$  和  $\varphi_0$  是耦合的, 只能根据  $d_r$  和  $d_a$  估计出圆锥体的底面圆盘半径  $l \sin \varphi_0$ , 无法得到具体的 2 维几何特征  $l$  和  $\varphi_0$ 。在中段目标飞行过程中, 雷达视线角在区间⑤的可能性较低, 因此这种情况不会影响实际情况中的中段目标 2 维几何特征估计。

综上所述, 目标的 2 维几何特征  $(l, \varphi_0)$  与目标 ISAR 像的径向尺寸和横向尺寸及目标的姿态角存在一个分段映射关系  $f: (d_r, d_a, \theta) \rightarrow (l, \varphi_0)$ 。

#### 4 目标 2 维几何特征反演方法

根据中段目标 2 维几何特征在 ISAR 图像中的表现形式, 基于 ISAR 图像反演目标的 2 维几何特征时, 需要预先确定雷达照射目标的平均视线角, 实际应用时可通过目标的轨道信息进行确定。

在 ISAR 图像中, 目标的径向尺寸可通过距离向相距最远的两个散射中心的位置确定; 横向尺寸

可通过方位向相距最远的两个散射中心的位置确定(若图像中包含展布式散射中心,则可将长度为 $L_0$ 的展布式散射中心看成是方位向相距 $L_0$ 的两个局域式散射中心)。综上所述,基于 ISAR 图像反演中段目标 2 维几何特征的方法可描述如下:

(1)根据目标轨道信息确定雷达的平均视线角 $\theta$ ;

(2)对回波数据进行成像处理,得到 2 维图像域数据 $X$ ;

(3)基于图像域的方法估计目标等效散射中心的位置和长度<sup>[15,16]</sup>,记为 $\{(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{L}_i) | i = 1, 2, \dots, I\}$ ,其中 $I$ 表示散射中心个数, $\hat{x}_i$ 和 $\hat{y}_i$ 分别表示散射中心的方位向坐标和距离向坐标, $\hat{L}_i$ 表示散射中心的长度;

(4)根据散射中心参数估计结果计算该姿态下目标的径向尺寸和横向尺寸,计算方法如下:

$$d_r = \max(\hat{y}_i) - \min(\hat{y}_i) \quad (12)$$

$$d_a = \max\left(\hat{x}_i + \frac{\hat{L}_i}{2}\right) - \min\left(\hat{x}_i - \frac{\hat{L}_i}{2}\right) \quad (13)$$

(5)根据 $\theta$ 确定映射关系 $f:(d_r, d_a, \theta) \rightarrow (l, \varphi_0)$ ,利用 $d_r$ 和 $d_a$ 计算目标的 2 维几何特征 $(l, \varphi_0)$ 。

由于目标的 2 维几何特征只与锥顶和锥底的 3 个等效散射中心有关,为了提高算法效率,在估计散射中心参数时,只需对几个感兴趣区域内的散射中心进行分析,即可反演目标的 2 维几何特征。

## 5 仿真实验及分析

### 5.1 电磁计算数据验证分析

为验证本文方法的有效性,首先利用电磁计算的数据进行分析。目标模型为圆锥体,高 3 m,底面半径为 0.6 m,对应的母线长度为 3.06 m,半锥角为 $11.31^\circ$ 。电磁计算时,雷达视线方向的起始角为 $0^\circ$ (沿鼻锥方向入射),视线角间隔为 $0.1^\circ$ ,视线终止角为 $180^\circ$ 。方位向每间隔 $5^\circ$ 选取一组数据进行 ISAR 成像,成像积累角为 $10^\circ$ ,利用所成的 ISAR 像反演目标的 2 维几何特征,结果如图 4 和图 5 所示。

图 4 给出了平均视线角在 $5^\circ \sim 170^\circ$ 变化时目标径向尺寸和横向尺寸的估计结果。可以看出,从 ISAR 图像中反演出来的径向尺寸和横向尺寸与目标等效散射中心在雷达视线方向和法线方向的投影尺寸误差较小,说明本文方法能较好地估计出目标等效散射中心的投影分布,但是由于遮挡现象,目标散射中心的投影分布并不能准确反映目标本身的真实投影尺寸,反演得到的径向尺寸和横向尺寸无法准确描述目标的真实结构。图 5 给出了目标在 $5^\circ \sim 170^\circ$ 变化时的 2 维几何特征反演结果,结果表明,目标的 2 维几何特征估计精度较高,估计误差较小,只有当姿态角接近 $135^\circ$ 时, $l$ 和 $\varphi_0$ 的估计误差较大,这是因为在该状态下 $l$ 和 $\varphi_0$ 的反演结果对 $d_r$ 和 $d_a$ 的估计误差非常敏感,与理论分析结果一致。

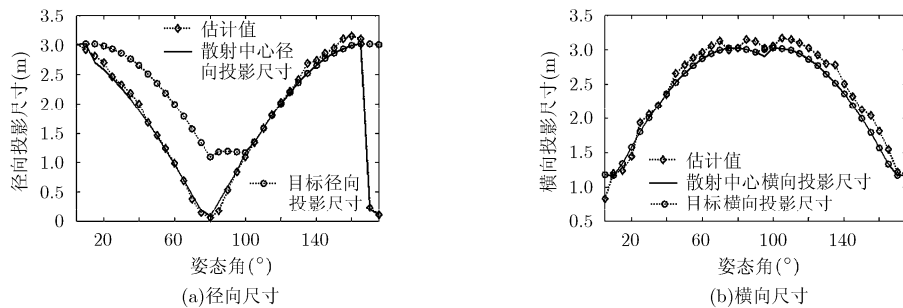


图 4 目标径向尺寸与横向尺寸估计结果

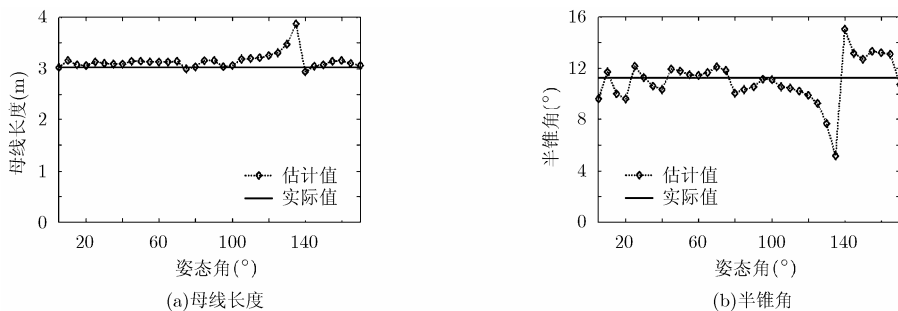


图 5 目标 2 维几何特征估计结果

## 5.2 暗室测量数据验证分析

为进一步验证本文方法的有效性,利用暗室测量的锥台体和锥球体目标数据进行分析,目标结构尺寸如图 6 所示。锥台体目标的长度为 1.2 m,底面直径为 0.52 m,等效锥体的母线长度和半锥角分别为 1.228 m 和 12.23°;锥球体目标的长度为 0.66 m,底面直径为 0.14 m,等效锥体的母线长度和半锥角分别为 0.664 m 和 6.65°。在方位向每间隔 5°选取一组数据进行 ISAR 成像,成像积累角为 10°,利用所成 ISAR 像反演目标的 2 维几何特征,结果如图 7 和图 8 所示。

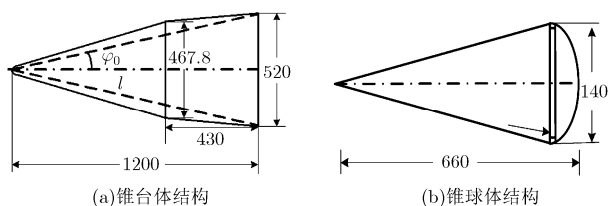


图 6 暗室测量目标结构尺寸(mm)

图 7 给出了雷达平均视线角在 0°~90°范围内变化时锥台体目标的 2 维几何特征反演结果。由于采用的锥台体目标模型底部是没有封闭的空腔结构,当电磁波从目标尾部入射时,目标的等效散射中心分布无法准确反映目标的尺寸信息(如图 3(d),图 3(e)所示),此处仅用 0°~90°的观测数据进行分析。可以看出,在不同照射视线角下,利用本文方法均

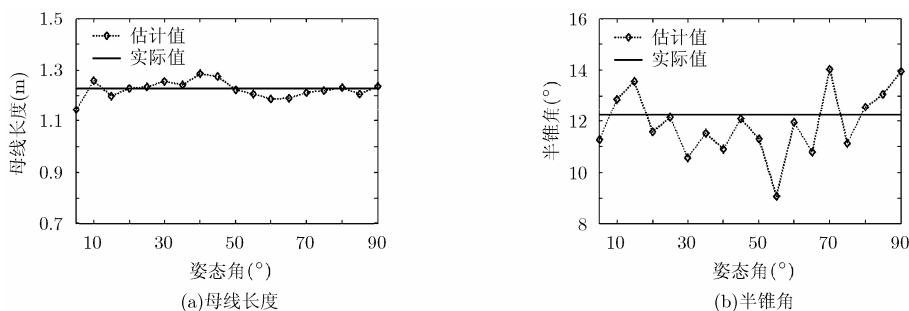


图 7 锥台体目标 2 维几何特征反演结果

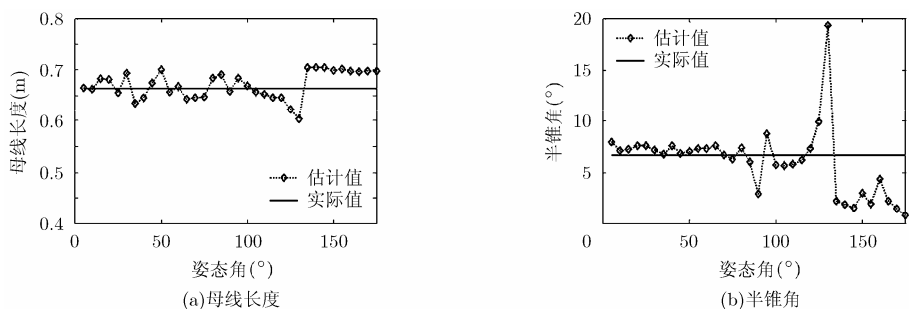


图 8 锥球体目标 2 维几何特征反演结果

可有效估计出目标的母线长度,估计误差低于 10%,目标的等效半锥角在大多数情况下也可得到较准确的估计,验证了本文方法对锥台体目标 2 维几何特征反演的有效性。

图 8 给出了雷达平均视线角在 0°~180°范围内变化时锥球体目标的 2 维几何特征反演结果。结果表明,目标的母线长度估计精度较高,只有当姿态角接近 135°时, $l$  和  $\varphi_0$  的估计误差较大,这是因为该姿态下  $l$  和  $\varphi_0$  的反演结果对  $d_r$  和  $d_a$  的估计误差非常敏感,但经过修正处理后,母线长度的估计误差可降到 10%以内。另外,当雷达平均视线角大于 135°时,目标母线长度的估计值始终大于真实值,半锥角的估计结果偏小,这是因为当电磁波从目标尾部入射时,锥球体目标尾部的等效散射中心在球面上滑动,使目标的母线长度反演结果偏大,而半锥角的反演结果偏小。

## 6 结束语

几何结构特征是目标最直观的物理特性之一,中段目标 2 维几何特征反演可为 BMD 系统中段目标识别提供重要的依据。本文研究了中段目标的 2 维几何特征反演方法,针对中段旋转对称体目标特殊的形体结构,定义了一种描述其 2 维几何结构的特征量,该特征量属于目标的固有属性,与目标姿态和雷达的照射条件无关。论文详细分析了中段目标的电磁散射特性,建立了目标 2 维几何特征与其

ISAR 成像结果的映射关系,在此基础上提出了一种 2 维几何特征反演方法,能够在各种照射条件下稳定估计出中段目标的 2 维几何特征。值得注意的是,获取高质量的目标 ISAR 图像是本文方法应用的前提,实验过程中都是基于转台目标获取 ISAR 图像的,对于真实的中段目标,其运动过程较为复杂,雷达照射视线角非均匀变化,将影响中段目标的成像和定标结果,进而影响基于 ISAR 图像的 2 维几何特征反演结果,因此,在实际应用过程中,中段目标的 ISAR 成像和图像定标问题还需要研究解决。

### 参考文献

- [1] 庄钊文,刘永祥,黎湘. 目标微动特性研究进展[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 520-525.  
Zhuang Zhao-wen, Liu Yong-xiang, and Li Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 520-525.
  - [2] 袁斌,徐世友,刘洋,等. 基于复数经验模式分解的非旋转对称空间进动目标回波分离及成像研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 1-7.  
Yuan Bin, Xu Shi-you, Liu Yang, et al. Echo separation and imaging of spatial precession targets with unsymmetrical appendix parts based on CEMD[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 1-7.
  - [3] 刘永祥. 导弹防御系统中的雷达目标综合识别研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2004.
  - [4] Department of State, Department of Defense, Proposed U. S. missile defense assets in Europe[OL]. <http://www.mda.mil/>, 2010.5.
  - [5] 俞万友. 弹道导弹中段真假弹头识别技术[D]. [硕士学位论文], 上海交通大学, 2013.
  - [6] 梁必帅,张群,娄昊,等. 基于微动特征关联的空间自旋目标宽带雷达三维成像[J]. 电子与信息学报, 2013, V35(9): 2133-2140.  
Liang Bi-shuai, Zhang Qun, Lou Hao, et al. Three-dimensional broadband radar imaging of space spinning targets based on micro-motion parameter correlation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(9): 2133-2140.
  - [7] Camp W W, Mayhan J T, and O'Donnell R M. Wideband radar for ballistic missile defense and range-doppler imaging of satellites[J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 2000, 12(2): 267-280.
  - [8] Delancey W P and Ward W W. Radar development at Lincoln laboratory: an overview of the first fifty years[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000, 12(2): 147-166.
  - [9] Lemnios W Z and Grometstein A A. Overview of the Lincoln laboratory ballistic missile defense program[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(1): 9-32.
  - [10] 毕莉,赵锋,高勋章,等. 基于一维距离像序列的进动目标尺寸估计研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8): 1825-1830.  
Bi Li, Zhao Feng, Gao Xun-zhang, et al. Study on precession target's dimension estimation based on HRRPs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(8): 1825-1830.
  - [11] 艾小峰,邹小海,李永祯,等. 基于时间-距离像分布的锥体目标进动与结构特征提取[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2083-2088.  
Ai Xiao-feng, Zou Xiao-hai, Li Yong-zhen, et al. Feature extraction of precession and structure of cone-shaped object based on time-HRRP distribution[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2083-2088.
  - [12] 姚汉英,孙文峰,马晓岩. 基于高分辨距离像序列的锥柱体目标进动和结构参数估计[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 537-544.  
Yao Han-ying, Sun Wen-feng, and Ma Xiao-yan. Precession and structure parameters estimation of cone-cylinder target based on the HRRPs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 537-544.
  - [13] 金光虎. 中段弹道目标 ISAR 成像及物理特性反演技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2009.
  - [14] Xu S K, Liu J H, Wei X Z, et al. Wideband electromagnetic characteristic modeling and analysis of missile targets in ballistic midcourse[J]. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*, 2012, 55(6): 1655-1666.
  - [15] Moses R L, Potter L C, and Gupta I J. Feature extraction using attributed scattering center models for model-based automatic target recognition[R]. Stinfo Final Report, The Ohio State University, USA, 2005: 28-42.
  - [16] Xu S K, Wei X Z, Li X, et al. Parameter estimation and performance analysis of coherent polarization attributed scattering center model[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2013, 22(1): 195-201.
- 徐少坤: 男, 1983 年生, 博士, 研究方向为雷达成像、雷达目标识别及雷达对抗。
- 刘记红: 男, 1983 年生, 博士, 研究方向为压缩感知、雷达信号处理及雷达成像。
- 袁翔宇: 男, 1974 年生, 高级工程师, 研究方向为雷达及雷达对抗。
- 陆静: 女, 1973 年生, 高级工程师, 研究方向为雷达及雷达对抗。