

## 基于 HRRP 序列的中段目标二维几何特征反演方法

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

**摘要:** 针对导弹防御系统中的目标识别问题, 该文研究弹道中段目标的 2 维几何特征反演方法。基于中段目标的特殊物理结构, 分析了进动锥体目标在雷达径向投影尺寸的变化规律, 建立了中段目标 2 维几何特征与其径向尺寸序列的映射关系, 进而提出一种基于 HRRPs 的 2 维几何特征反演方法, 能够稳定反演出中段进动目标在不同姿态下的 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; 高分辨距离像序列; 径向尺寸

**中图分类号:** TN95

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2017)10-2366-08

**DOI:** 10.11999/JEIT161303

## Two-dimensional Geometric Feature Inversion Method for Midcourse Target Based on HRRPs

XU Shaokun LIU Jihong YUAN Xiangyu

(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, the regular pattern of radial dimension is analyzed with respect to different intervals, the mapping relationships between HRRP under various target attitudes and the 2D geometric feature of target are established, then an 2D geometric feature inversion method for midcourse targets based on HRRPs is proposed accordingly. The method can estimate stably the 2D geometric feature of midcourse targets 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; High Resolution Range Profile sequence (HRRPs); Radial dimension size

### 1 引言

弹道目标识别是导弹攻防对抗胜负的关键<sup>[1-4]</sup>, 针对弹道目标识别的弹头成像欺骗干扰技术已成为弹载突防干扰装备发展的重要方向之一, 为评估其干扰效果, 最直观的方法是提取假目标和真实弹头目标的识别特征进行比对。几何结构特征是目标的固有属性, 不随雷达的观测条件变化, 基于宽带雷达回波反演弹头的几何结构特征是弹道目标识别的重要途径<sup>[4]</sup>, 同时也是弹头成像欺骗干扰效果评估的客观依据。

宽带雷达是弹道目标识别的核心传感器<sup>[5-7]</sup>, 能够获得目标的高分辨距离像序列 (High Resolution Range Profile sequence, HRRPs) 和逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 图像, 进而反演目标的几何结构特征<sup>[8-12]</sup>,

可为弹道目标识别提供重要的依据。据报道, 美国在 20 世纪 70 年代就具备了反演弹道目标几何特征的能力, 并研究了相应的目标识别算法, 但由于保密原因, 其技术细节未见报道<sup>[5]</sup>。国内方面, 文献[8,9]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[10,11]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尺寸, 反映的是目标在雷达视线或成像平面上的投影尺寸, 敏感于观测视线角, 不利于目标识别的具体应用。另外, 上述工作主要是基于理想电磁散射模型开展的, 而弹道目标在实际飞行过程中出现非理想散射的可能性较大<sup>[13]</sup>, 上述方法在实际运用时存在一定的局限性。文献[12]提出了一种描述中段目标自身物理属性的 2 维几何特征, 该特征不受观测条件的影响, 并提出了一种基于 ISAR 图像的 2 维几何特征反演方法, 该方法的前提是获取高质量的目标 ISAR 图像, 但是由于微动等因素的影

响，通常难以获得高质量的中段目标 ISAR 图像。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。

本文在文献[12]的基础上，分析了基于 ISAR 图像反演中段目标 2 维几何特征时存在的问题，进而针对中段目标的锥体结构，将雷达观测角划分成几个典型的观测区间，分析了不同观测区间内弹道目标 HRRPs 的表现形式和径向投影尺寸的动态变化规律，分区间建立了目标 2 维几何特征与其径向长度极值之间的映射关系，进而基于目标径向尺寸与 HRRPs 之间的对应关系，提出了一种弹道中段目标 2 维几何特征反演方法，并利用仿真数据和暗室测量数据进行了仿真验证，验证结果表明，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 基于 ISAR 图像反演目标 2 维几何尺寸的限制性

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。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。对于锥体目标，其几何结构可用 3 个等效散射中心(锥顶 1 个，锥底 2 个)的位置来描述，对于锥+柱或锥+台组合体(下文统称为锥台组合体)目标，其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 个等效散射中心近似表征，如图 1(a)所示，其 2 维尺寸特征可由 P1, P2, P3 3 个散射中心表征。

针对中段目标的特殊几何结构，在反演其几何特征时，可将其等效为一个圆锥体，利用其母线长度  $l$  和半锥角  $\varphi_0$  表征其 2 维几何特征，该特征属于目标的固有属性，与目标的运动状态和雷达的观测条件无关。在反演中段目标的 2 维尺寸特征时，最直观的方法是利用其等效的 3 个等效散射中心在 ISAR 图像中的位置信息计算其 2 维几何特征，该方法的前提是能获得聚焦效果好的 ISAR 图像，以便

准确提取散射中心的位置参数，进而反演目标的 2 维几何特征<sup>[12]</sup>。

但是，在中段目标实际飞行过程中，弹头目标通常存在进动，如图 1(b)所示， $\theta_0$  表示雷达观测目标的平均视线角， $\gamma$  和  $\omega_c$  分别表示目标的进动角和进动频率，则进动目标的姿态角变化规律为<sup>[10]</sup>

$$\psi(t) = \gamma \cos \omega_c t + \theta_0 \quad (1)$$

式中， $\psi(t)$  表示目标相对于雷达视线的姿态角； $l$  和  $\varphi_0$  分别表示锥体目标的母线长度和半锥角。可见，进动过程中目标的进动角在  $[\theta_0 - \gamma, \theta_0 + \gamma]$  区间变化。根据图 1 所示模型的暗室测量数据合成进动目标回波，其同常规脉冲压缩处理后的 ISAR 成像结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出，由于目标进动，目标姿态的非均匀变化，导致 ISAR 成像结果出现散焦，难以从图中确定 P1, P2, P3 3 个散射中心的准确位置，因此，基于 ISAR 图像反演目标的 2 维几何特征还需首先解决进动目标的 ISAR 成像问题。相对于 ISAR 图像，中段目标的 HRRPs 通常比较容易获得，而且目标进动使得目标的 HRRPs 呈周期性变化，目标散射中心径向投影位置、目标的径向投影尺寸都会发生规律性变化，可为目标 2 维尺寸特征提取提供新的依据。

## 3 基于 HRRPs 的 2 维尺寸特征反演方法

HRRPs 中蕴含了目标的几何结构信息，可为目标识别提供重要依据<sup>[14]</sup>。最简单的方式是从 HRRPs 中提取目标的径向尺寸，但考虑到目标的径向尺寸敏感于目标姿态，不能直观反应目标的真实尺寸，因此，需考虑提取更能直观反映目标本质属性的 2 维尺寸特征作为目标识别的依据。

### 3.1 进动锥体目标径向尺寸与 2 维几何特征的映射关系

弹道中段防御雷达通常为前视雷达，观测目标的平均视线角一般不超过  $90^\circ$ 。另外，中段目标本身还具有以下两个特点：(1)进动角较小，一般不超过  $10^\circ$ ；(2)等效半锥角  $\varphi_0$  较小，一般满足  $\varphi_0 \in [5^\circ, 20^\circ]$ 。

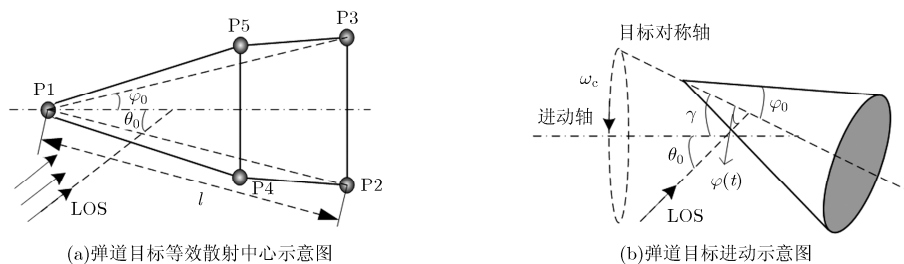


图 1 典型弹道目标等效散射中心及进动示意图

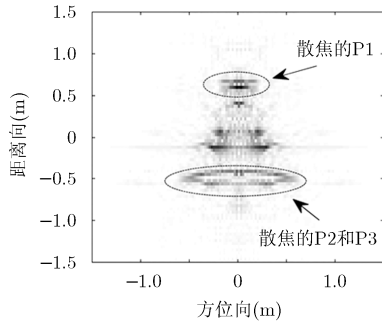


图 2 进动目标的 ISAR 成像结果

由此可见，中段目标在飞行过程中姿态角变化范围较大，在实际观测过程中，在不同照射角下，目标的 3 个等效散射中心的相对位置可能会发生变化，有时可能被遮挡，有时会出现镜面散射现象，导致 P2 和 P3 两个散射中心变成一个展布式的镜面散射中心<sup>[13]</sup>。图 3 根据是否出现遮挡和镜面散射现象，将雷达对锥体模型的观测区间划分成了 5 个区间，

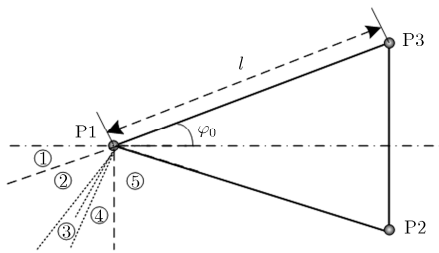


图 3 电磁波照射锥体目标示意图

各区间内目标的等效散射中心位置不同，目标进动过程中的 HRRPs、径向尺寸序列等均会发生变化。

图 4 给出了某锥台体进动目标(图 1 所示模型)在几个典型观测视线角下的 HRRPs，可以看出，由于镜面散射和遮挡效应，目标在不同观测条件下的 HRRPs 有明显区别。为了反演目标的 2 维尺寸，下面先根据锥体目标的几何结构，分析不同照射区内目标径向投影尺寸的变化情况。

(1)当  $\theta_0 - \gamma \leq \varphi_0$ ， $\varphi_0 \leq \theta_0 + \gamma < \pi/2 - \varphi_0$  时，雷达视线在区间①和区间②之间变化，目标的径向投影尺寸为

$$\left. \begin{aligned} d_r &= l \cos(\varphi_0 - \gamma \cos \omega_c t - \theta_0), \quad \gamma \cos \omega_c t + \theta_0 \leq \varphi_0 \\ d_r &= l \cos(\varphi_0 + \gamma \cos \omega_c t + \theta_0), \quad \gamma \cos \omega_c t + \theta_0 > \varphi_0 \end{aligned} \right\} (2)$$

(2)当  $\theta_0 - \gamma > \varphi_0$ ， $\theta_0 + \gamma < \pi/2 - \varphi_0$  时，雷达视线在区间②内，目标的径向投影尺寸为

$$d_r = l \cos(\varphi_0 + \gamma \cos \omega_c t + \theta_0) \quad (3)$$

(3)当  $\varphi_0 < \theta_0 - \gamma < \pi/2 - \varphi_0$ ， $\pi/2 - \varphi_0 \leq \theta_0 + \gamma < \pi/2$  时，雷达视线在区间②，区间③，区间④之间变化，目标径向投影尺寸为

$$d_r = l \cdot |\cos(\varphi_0 + \gamma \cos \omega_c t + \theta_0)| \quad (4)$$

(4)当  $\theta_0 - \gamma \geq \pi/2 - \varphi_0$ ， $\theta_0 + \gamma \leq \pi/2$  时，雷达视线在区间④内，目标的径向投影尺寸为

$$d_r = -l \cos(\varphi_0 + \gamma \cos \omega_c t + \theta_0) \quad (5)$$

(5)当  $\pi/2 - \varphi_0 < \theta_0 - \gamma < \pi/2$ ， $\theta_0 + \gamma \geq \pi/2$  时，

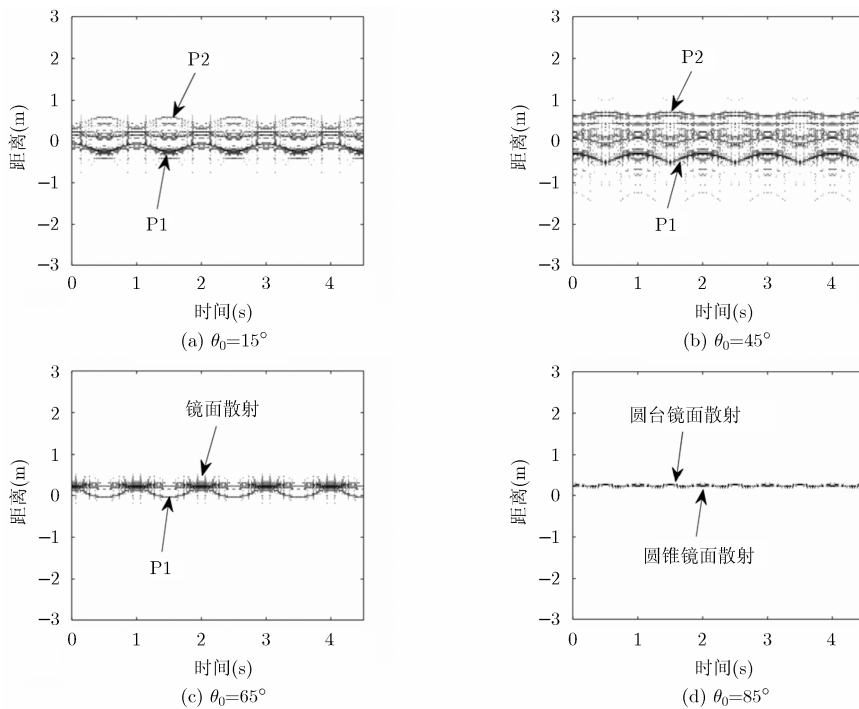


图 4 某锥台体进动目标在不同观测视线角下的 HRRPs

雷达视线在区间④和区间⑤之间变化，目标的径向投影尺寸为

$$\left. \begin{aligned} d_r &= -l \cos(\varphi_0 + \gamma \cos \omega_c t + \theta_0), \\ &\quad \gamma \cos \omega_c t + \theta_0 < \pi/2 \\ d_r &= 2l \sin \varphi_0 \sin(\gamma \cos \omega_c t + \theta_0), \\ &\quad \pi/2 \leq \gamma \cos \omega_c t + \theta_0 < \pi/2 + \varphi_0 \\ d_r &= -l \cos(\varphi_0 + \gamma \cos \omega_c t + \theta_0), \\ &\quad \gamma \cos \omega_c t + \theta_0 \geq \pi/2 + \varphi_0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

需要注意的是，上述分析中没有考虑  $\theta_0 + \gamma \leq \pi - \varphi_0$  时的情形，因为对于弹道中段防御雷达，实际观测过程中很难出现这种情况。从上述分析可知，目标进动过程中的径向投影尺寸与目标的 2 维几何特征  $(l, \varphi_0)$  有关，也呈周期性变化。图 5 给出了仿真圆锥体目标在不同观测区间上的径向长度变化曲线，其中目标母线长度为 1.9 m，半锥角为  $18.44^\circ$ ，进动角为  $10^\circ$ ，进动周期为 1 s。

### 3.2 基于径向尺寸序列反演目标 2 维尺寸特征反演方法

在对中段目标观测的过程中，参数  $l, \varphi_0, \omega_c, \gamma$  及  $\theta_0$  均为未知量，记参数矢量  $\mathbf{K} = (l, \varphi_0, \omega_c, \gamma, \theta_0)^T$ ，其中  $l, \varphi_0$  为待估计的 2 维尺寸特征， $\omega_c, \gamma$  代表了目标的进动特征， $\theta_0$  代表了目标运动方向与雷达视线的相对关系。一般情况下，可利用最大似然方法完成对参数矢量  $\mathbf{K}$  的估计，从而确定目标的尺寸、进动特征。但是，多参量的最大似然估计通常难以实现，不仅计算量大，而且容易陷入局部最优值。实

际处理时，在估计目标的 2 维几何特征之前，可先利用雷达对目标的轨道跟踪数据估计得到  $\theta_0$ ，利用目标的微多普勒、RCS 或 HRRPs 估计得到  $\gamma$ <sup>[15,16]</sup>，以便降低目标 2 维尺寸特征反演的计算量。基于现有的雷达跟踪精度和进动角估计技术， $\theta_0$  和  $\gamma$  的估计误差均较小，因此，在下文分析中，假设  $\theta_0$  和  $\gamma$  是已知的。

根据进动锥体目标径向尺寸与目标 2 维几何特征之间的映射关系，利用最大似然方法可估计  $(l, \varphi_0)$ 。实际反演过程中，只利用径向尺寸的极值即可估计出  $(l, \varphi_0)$ 。定义目标的 2 维几何特征到其径向尺寸极大值和极小值的映射为  $g_i : (l, \varphi_0) \rightarrow (d_{r,\max}, d_{r,\min})$ ，下标  $i$  表示 3.1 节分析的第  $i$  种情况，则

$$g_1 : (l, \varphi_0) \rightarrow (d_{r,\max}, d_{r,\min}) : \begin{cases} d_{r,\max} = l \\ d_{r,\min} = l \cos(\varphi_0 + \gamma + \theta_0) \end{cases} \quad (7)$$

$$g_2 : (l, \varphi_0) \rightarrow (d_{r,\max}, d_{r,\min}) : \begin{cases} d_{r,\max} = l \cos(\varphi_0 - \gamma + \theta_0) \\ d_{r,\min} = l \cos(\varphi_0 + \gamma + \theta_0) \end{cases} \quad (8)$$

$$g_3 : (l, \varphi_0) \rightarrow (d_{r,\max}, d_{r,\min}) : \begin{cases} d_{r,\max} = \max(l \cos(\varphi_0 - \gamma + \theta_0), \\ \quad -l \cos(\varphi_0 + \gamma + \theta_0)) \\ d_{r,\min} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

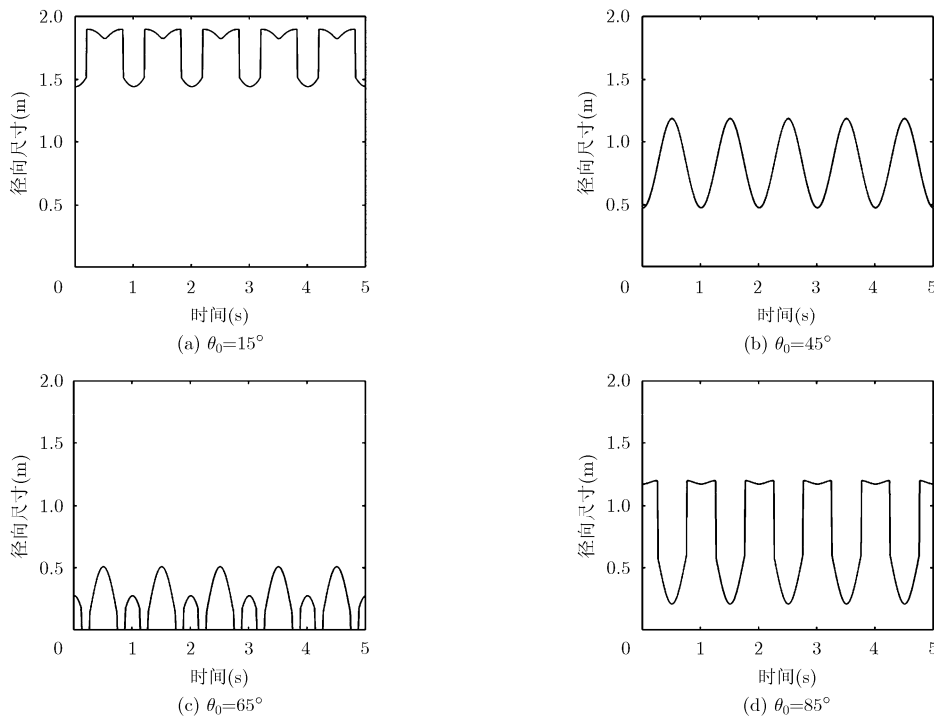


图 5 仿真锥体目标径向长度随时间的变化关系曲线

$$g_4 : (l, \varphi_0) \rightarrow (d_{r,\max}, d_{r,\min}) : \begin{cases} d_{r,\max} = -l \cos(\varphi_0 + \gamma + \theta_0) \\ d_{r,\min} = -l \cos(\varphi_0 - \gamma + \theta_0) \end{cases} \quad (10)$$

$$g_5 : (l, \varphi_0) \rightarrow (d_{r,\max}, d_{r,\min}) : \begin{cases} d_{r,\max} = 2l \sin \varphi_0 \\ d_{r,\min} = -l \cos(\varphi_0 - \gamma + \theta_0) \end{cases} \quad (11)$$

记  $a = d_{r,\min}/d_{r,\max}$ , 当目标姿态变化为 3.1 节的情况(1), (2), (4), (5)时, 目标的 2 维几何特征与  $d_{r,\min}$  和  $d_{r,\max}$  的关系分别为

$$g_1^{-1} : (d_{r,\max}, d_{r,\min}) \rightarrow (\hat{l}, \hat{\varphi}_0) : \begin{cases} \hat{\varphi}_0 = \cos^{-1}(a) - \gamma - \theta_0 \\ \hat{l} = d_{r,\max} \end{cases} \quad (12)$$

$$g_2^{-1} : (d_{r,\max}, d_{r,\min}) \rightarrow (\hat{l}, \hat{\varphi}_0) : \begin{cases} \hat{\varphi}_0 = \tan^{-1} \left( \frac{1-a}{1+a} \cot \gamma \right) - \theta_0 \\ \hat{l} = \frac{d_{r,\max}}{\cos(\hat{\varphi}_0 + \theta_0 - \gamma)} \end{cases} \quad (13)$$

$$g_4^{-1} : (d_{r,\max}, d_{r,\min}) \rightarrow (\hat{l}, \hat{\varphi}_0) : \begin{cases} \hat{\varphi}_0 = \pi - \tan^{-1} \left( \frac{1-a}{1+a} \cot \gamma \right) - \theta_0 \\ \hat{l} = -\frac{d_{r,\max}}{\cos(\hat{\varphi}_0 + \theta_0 + \gamma)} \end{cases} \quad (14)$$

$$g_5^{-1} : (d_{r,\max}, d_{r,\min}) \rightarrow (l, \varphi_0) : \begin{cases} \hat{\varphi}_0 = \tan^{-1} \left( \frac{\cos(\theta_0 - \gamma)}{\sin(\theta_0 - \gamma) - 2a} \right) \\ \hat{l} = \frac{d_{r,\max}}{2 \sin(\hat{\varphi}_0)} \end{cases} \quad (15)$$

综合分析, 基于 HRRPs 反演中段目标 2 维几何特征的步骤如下:

步骤 1 确定雷达的平均视线角  $\theta_0$  和进动角  $\gamma$ , 确定目标进动过程中的姿态变化区间;

步骤 2 利用 FFT-超分辨综合方法<sup>[10]</sup>从目标的 HRRPs 中估计目标的径向尺寸变化序列;

步骤 3 利用非线性拟合方法对目标的径向尺寸变化序列进行拟合;

步骤 4 从拟合曲线中估计不同周期内目标的最大和最小径向尺寸:

$$\left. \begin{aligned} \hat{d}_{ri,\max} &= d_{r,\max} + \Delta d_{ri,\max} \\ \hat{d}_{ri,\min} &= d_{r,\min} + \Delta d_{ri,\min} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

其中,  $\Delta d_{ri,\max}$  和  $\Delta d_{ri,\min}$  分别是第  $i$  个进动周期内目标径向尺寸极大值和极小值的估计误差;

步骤 5 根据步骤 1 确定的变化区间确定  $\hat{d}_{ri,\max}$  和  $\hat{d}_{ri,\min}$  到 2 维几何特征的映射关系  $g_i^{-1} : (d_{r,\min}, d_{r,\max}) \rightarrow (\hat{l}_i, \hat{\varphi}_{0i})$ , 利用  $\hat{d}_{ri,\max}$  和  $\hat{d}_{ri,\min}$  估计  $(\hat{l}_i, \hat{\varphi}_{0i})$ ;

步骤 6 依次计算得到  $N$  个进动周期内的 2 维几何特征估计值  $\{(\hat{l}_1, \hat{\varphi}_{01}), (\hat{l}_2, \hat{\varphi}_{02}), \dots, (\hat{l}_N, \hat{\varphi}_{0N})\}$ , 对各次估计值求平均得到目标的 2 维几何特征估计:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\varphi}_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\varphi}_{0i} \\ \hat{l} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{l}_i \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

特别地, 对于 3.1 节中的第(3)种情况, 雷达照射方向近似垂直于目标锥面, 目标的电磁散射主要由镜面散射中心构成, 目标的径向尺寸变化不明显, 利用最大和最小径向投影尺寸估计目标的 2 维几何特征时, 将带来较大误差。当电磁波垂直于锥面时, 目标的径向尺寸最小, 可先估计出目标的半锥角, 然后根据式(13)中母线长度与径向尺寸的线性关系, 利用最小二乘法估计目标的母线长度。即

$$g_3^{-1} : (d_{r,\min}, d_{r,\max}) \rightarrow (\hat{l}, \hat{\varphi}_0) : \begin{cases} \hat{\varphi}_0 = \frac{\pi}{2} - \text{mean} \{ \psi(t_m) \}_{d_r(t_m) \leq \zeta \cdot d_{r,\max}} \\ \hat{l} = \text{pinv}(\tilde{\psi}) \cdot \mathbf{d}_r \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $\zeta$  为设定的门限值, 用于判断雷达视线是否垂直于目标锥面;  $\psi(t_m)$  表示径向距离为  $d_r(t_m)$  时的目标姿态角,  $\mathbf{d}_r = [d_r(t_1) \ d_r(t_2) \ \dots \ d_r(t_N)]^T$ ,  $\tilde{\psi} = [\cos(\varphi_0 + \psi(t_1)) \ \cos(\varphi_0 + \psi(t_2)) \ \dots \ \cos(\varphi_0 + \psi(t_N))]$ ,  $\text{pinv}(\cdot)$  表示矩阵伪逆。

## 4 仿真实验及分析

### 4.1 电磁计算数据验证分析

利用电磁计算的数据进行分析, 目标为圆锥体模型, 底面半径为 0.6 m, 高 1.8 m, 对应母线长度约为 1.9 m, 半锥角为 18.44°。对平均视线角为 20°~90°情况下, 每间隔 5°设置一种进动场景, 利用电磁计算数据合成目标进动时的回波数据, 在回波数据中添加高斯白噪声, 信噪比设为 20 dB。目标进动周期为 1 s, 进动角为 10°, 雷达观测时间为 5 s。基于合成的数据, 利于本文方法反演目标的 2 维几何特征, 结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 雷达平均视线角在 20°~90°范围内变化时, 反演得到的 2 维几何特征与真实值吻合较好, 估计误差较小, 只有在雷达视线近似垂

直于目标锥面时，估计误差较大，但最大误差仍在 15% 以内。

在相同条件下，图 7 给出了平均视线角为 50° 时，进动锥体目标 2 维几何特征反演性能随进动角的变化曲线。可以看出，2 维几何特征的估计误差随进动角的变大而变小，这是因为所提方法实质是利用目标姿态的变化来反演 2 维几何特征，进动角较小时，进动过程中目标的姿态变化范围较小，目标的径向尺寸变化不够明显，不利于基于径向长度序列的 2 维几何特征反演。

实际上，在估计目标的进动角时通常存在误差（现有研究成果显示，误差一般较小），进动角估计误差将对目标的 2 维几何特征反演造成影响。图 8 给出了进动角为 8°、平均视线角为 50° 时，目标 2 维几何特征随进动角估计结果的变化曲线。可以看出，目标母线长度和半锥角的反演误差随进动角估计误差变大而变大；当估计的进动角大于真实值时，母线长度估计值与真实值之间的误差相对较小，且变化缓慢。因此，在实际应用时，若无法准确得知目标的进动角，可根据经验将目标的进动角适当设大一些。

### 4.2 暗室测量数据验证分析

利用暗室测量数据合成进动目标回波数据进行分析，目标模型如图 1 所示。假设雷达 PRF 为 100 Hz，观测时间为 5 s，目标的进动周期为 1 s，进动

角为 10°，对平均视线角为 20°~90° 情况下目标的 2 维几何特征进行反演，每间隔 5° 步进一次。图 9 给出了平均视线角为 50° 和 70° 时目标的 HRRP 序列和径向尺寸反演结果。可以看出，目标的 HRRP 序列和径向尺寸均呈周期性变化，由于存在野值，径向尺寸反演结果并不是光滑的曲线，可对其进行非线性拟合，用拟合后的数据反演目标的 2 维几何特征。

图 10 给出了雷达观测平均视线角在 20°~90° 之间变化时，暗室目标的 2 维几何特征反演结果。不难看出，平均视线角在 20°~80° 之间变化时，反演结果较为准确；由于目标并不是真正的锥体结构，当平均视线角大于 80° 时，目标尾部台体结构的镜面散射和腔体散射（暗室测量模型尾部为空腔体结构）影响了目标的 HRRP，不利于目标径向尺寸的提取，进而导致目标的 2 维几何特征反演结果误差较大。

### 5 结束语

雷达成像能够获得目标的 HRRP 和 ISAR 图像，可为目标识别提供重要依据。雷达成像和弹头成像欺骗式干扰已成为弹道目标识别领域的两个主要研究方向。由于 HRRP 和 ISAR 图像均敏感于目标姿态，直接用于目标识别时需要建立大量的匹配模板，实用性不强，因此，在获得目标的 HRRP 或 ISAR 图像后，往往需要进一步处理提取可反映目标本质属性的物理特征作为目标识别的依据。几何结

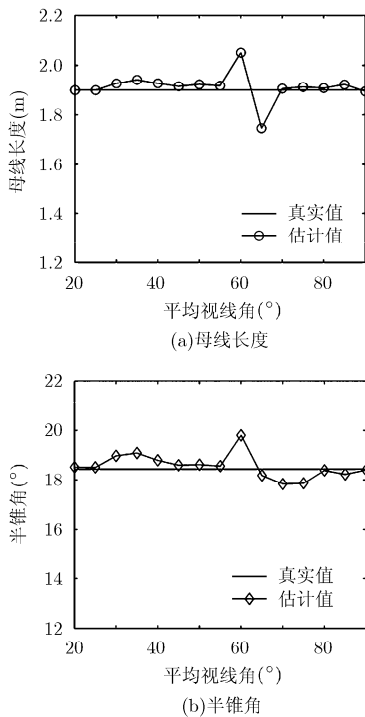


图 6 不同平均视线角下目标 2 维几何特征反演结果

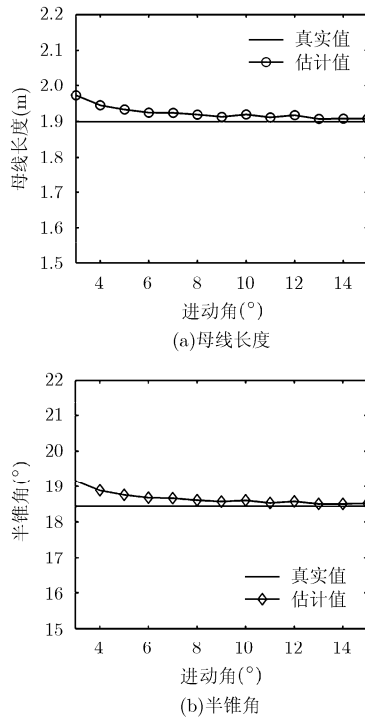


图 7 不同进动角下目标 2 维几何特征反演结果

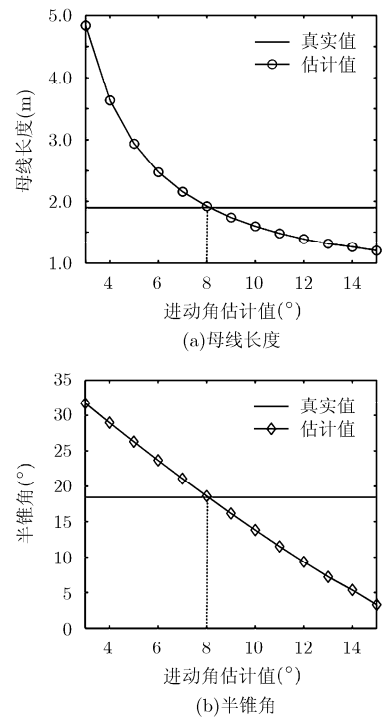


图 8 不同进动角估计值下目标 2 维几何特征反演结果

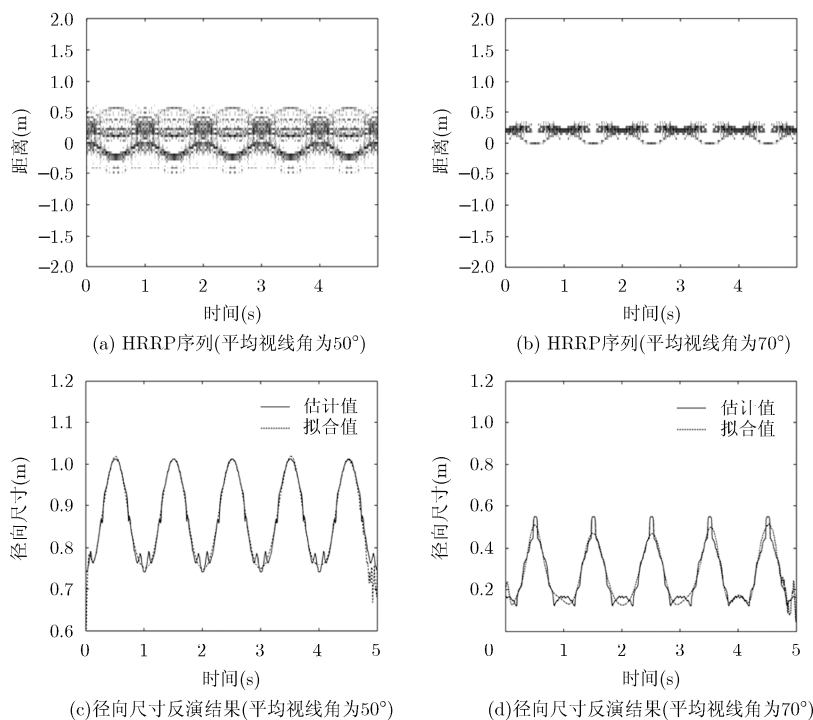


图 9 暗室进动目标的HRRP序列及径向尺寸反演结果

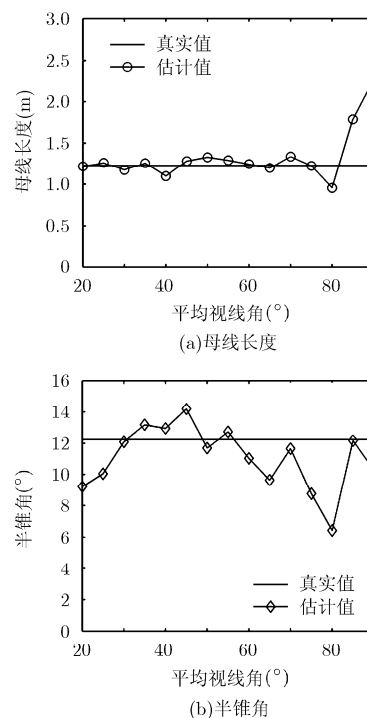


图 10 不同平均视角下暗室目标2维几何特征反演结果

构特征是弹道目标最直观的物理特征，也是表征弹头威力的重要参数，反演弹道目标几何特征可为弹道目标识别和弹头成像欺骗式干扰效果评估提供客观依据。

在弹道导弹实际飞行过程中，由于微动等原因，通常难以获得高质量的弹头目标 ISAR 图像，利用 ISAR 图像反演弹头目标的 2 维几何特征往往难以实现。目标的 HRRPs 获取相对简单，只需对雷达回波进行脉冲压缩即可得到，弹道中段目标的 HRRPs 反映了蕴含了其几何特征和微动特征信息，可为目标的 2 维几何特征反演提供依据。本文针对弹道中段目标的特殊形体结构，以母线长度和半锥角表征其 2 维几何特征，提出了一种基于 HRRP 序列的弹道中段目标 2 维几何特征反演方法，并进行了仿真验证。本文的研究成果不仅可应用于弹道目标识别，同时可为弹头成像欺骗式干扰效果评估提供技术途径。

### 参考文献

- [1] 张平定, 孙佳佳, 童创明, 等. 弹道中段目标雷达综合识别研究[J]. 微波学报, 2015, 31(2): 20-23. doi: 10.14183/j.cnki.1005-6122.201502005.  
ZHANG Pingding, SUN Jiajia, TONG Chuangming, et al. Integrated target recognition of ballistic midcourse target[J]. *Journal of Microwaves*, 2015, 31(2): 20-23. doi: 10.14183/j.cnki.1005-6122.201502005.
- [2] 冯存前, 李靖卿, 贺思三, 等. 组网雷达中弹道目标微动特征提取与识别综述[J]. 雷达学报, 2015, 4(6): 609-620. doi: 10.12000/JR15084.  
FENG Cunqian, LI Jingqing, HE Sisan, et al. Micro-Doppler feature extraction and recognition based on Netted Radar for ballistic targets[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(6): 609-620. doi: 10.12000/JR15084.
- [3] 张国亮, 杨春玲, 王瞰来. 基于优化概率神经网络和红外多光谱融合的大气层外空间弹道目标识别[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(4): 896-902. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00623.  
ZHANG Guoliang, YANG Chunling, and WANG Jianlai. Discrimination of exo-atmospheric targets based on optimization of probabilistic neural network and IR multispectral fusion[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(4): 896-902. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00623.
- [4] 句彦伟, 张仕元. 反导系统与目标识别技术发展综述[J]. 现代雷达, 2016, 38(4): 8-14. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.002.  
JU Yanwei and ZHANG Shiyuan. Overview of development for anti-missile system and target recognition technique[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(4): 8-14. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.002.
- [5] 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.

- [6] DELANCEY W P and WARD W W. Radar development at Lincoln laboratory: An overview of the first fifty years[J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 2000, 12(2): 147-166.
- [7] LAMINAS W Z and GROMETSTEIN A A. Overview of the Lincoln laboratory ballistic missile defense program[J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(1): 9-32.
- [8] 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. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00097.  
AI Xiaofeng, ZOU Xiaohai, LI Yongzhen, *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. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00097.
- [9] 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. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00978.  
YAO Hanying, SUN Wenfeng, and MA Xiaoyan. Precession and structure parameters estimation of cone-cylinder target based on the HRRPs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 537-544. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00978.
- [10] 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.
- [11] 束长勇, 陈世春, 吴洪涛, 等. 基于 ISAR 像序列的锥体目标进动及结构参数估计[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(5): 1078-1084. doi: 10.11999/JEIT141061.  
SHU Changyong, CHEN Shichun, WU Hongqian, *et al.* Precession and structure parameters estimation of precession cone target based on ISAR image sequence[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(5): 1078-1084. doi: 10.11999/JEIT141061.
- [12] 徐少坤, 刘记红, 袁翔宇, 等. 基于 ISAR 图像的中段目标 2 维几何特征反演方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(2): 339-345. doi: 10.11999/JEIT140338.
- XU Shaokun, LIU Jihong, YUAN Xiangyu, *et al.* Two-dimensional geometric feature inversion method for midcourse target based on ISAR image[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(2): 339-345. doi: 10.11999/JEIT140338.
- [13] 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. doi: 10.1007/s11431-012-4864-z.
- [14] 李新潮, 李槟槟, 胡军红, 等. 基于 HRRP 的弹道目标特征提取技术综述[J]. *现代防御技术*, 2015, 43(5): 142-150. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2015.05.024.  
LI Xinchao, LI Binbin, HU Junhong, *et al.* Review for feature extraction of ballistic targets based on HRRP[J]. *Modern Defense Technology*, 2015, 43(5): 142-150. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2015.05.024.
- [15] LEI P, SUN J P, WANG J, *et al.* Micro-motion parameter estimation of free rigid targets based on radar micro-Doppler [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(10): 3776-3786. doi: 10.1109/TGRS.2012.2185244.
- [16] 李靖卿, 冯存前, 龙戈农, 等. 基于多站微多普勒融合的弹道目标特征提取[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(7): 1549-1554. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.07.1.  
LI Jingqing, FENG Cunqian, LONG Genong, *et al.* Feature extraction of ballistic targets based on multistatic micro-Doppler fusion[J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2016, 38(7): 1549-1554. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.07.1.
- 徐少坤: 男, 1983年生, 博士, 工程师, 研究方向为雷达目标特性、宽带雷达对抗试验评估等。
- 刘记红: 女, 1983年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为雷达信号处理、电磁信号采集与分析。
- 袁翔宇: 男, 1974年生, 高级工程师, 研究方向为雷达及雷达对抗。