

基于时间-距离像分布的锥体目标进动与结构特征提取

艾小锋* 邹小海 李永祯 赵 锋 肖顺平

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: 多特征综合利用是弹道目标识别的发展趋势。现有研究报道中, 弹头进动特征提取通常假设某些结构特征已知, 而结构特征提取通常又需要已知某些进动特征, 这一学术僵局目前尚未有效突破。论文以旋转对称锥形弹头为研究对象, 详细分析了各散射中心 1 维距离像位置与参考相位中心距离变化规律, 基于时间-距离像分布, 结合散射中心运动规律和几何关系, 实现了进动特征(进动频率、进动角、初始相位角以及视线角)和结构特征(锥体高度、底面半径、质心到底面的距离)的联合提取, 同时还估计出了质心与雷达的距离, 仿真结果证明了算法的有效性和适应性。

关键词: 高分辨距离像; 锥形弹头; 特征提取; 广义 Hough 变换; 微动

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)09-2083-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00097

Feature Extraction of Precession and Structure of Cone-shaped Object Based on Time-HRRP Distribution

Ai Xiao-feng Zou Xiao-hai Li Yong-zhen Zhao Feng Xiao Shun-ping

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Utilizing multi-feature for ballistic target recognition is a trend in the ballistic missile defense field. In the published literatures, the structure feature extraction of ballistic targets need know some precession parameters, while the precession feature extraction need know some structure parameters, which makes a deadlock in the feature extraction of ballistic targets. Firstly, this paper analyzes the trace of each scatter in the time-High Range Resolution Profile (HRRP) distribution of the cone-shaped warhead in detail. Then, based on the time-HRRP distribution and combining the trace and geometry relation of each scatter, the precession feature, including the precession frequency, precession angle, initial phase angle and the angle between the precession axis and the Line Of Sight (LOS), and the structure feature, including the target height, radius of the undersurface, distance between the centroid and undersurface, and the distance between the centroid and radar, are extracted jointly. Finally, the simulation results are given for validating the proposed algorithms.

Key words: High Range Resolution Profile (HRRP); Cone-shaped warhead; Feature extraction; Generalized Hough Transform (GHT); Micro-motion

1 引言

弹道导弹攻防对抗中目标特征提取与识别是防御的关键, 目前研究弹道目标特征主要包括: 结构特征(形状、尺寸等)、弹道运动特征和微动特征。随着弹道导弹攻防对抗的不断发展, 利用单一的特征来区分真假目标已经不能满足对抗的需求, 多种特征综合利用成为弹道目标识别的发展趋势^[1]。目标的结构特征主要通过高分辨雷达技术获得, 包括 1 维距离像^[2-5]、2 维 ISAR 像^[6,7], 3 维 ISAR 像^[8-10]。其中通过 2 维 ISAR 和 3 维 ISAR 获取目标结构特

征(物理尺寸)通常需要知道目标的微动特征, 如进动速度、进动角等。近年来微动特征用于目标识别成为研究的热点, 微动特征获取的方法主要有基于微动目标的微多普勒分析^[11,12]、RCS 序列^[13,14]、1 维距离像序列^[3,4]等。现有微动特征提取的方法通常假设某些结构参数已知, 如半锥角、长度等。可见目标微动特征和结构特征的提取构成了一个循环难题, 但是尚未见有效解决方法报道。文献[3]研究了基于 1 维距离像序列的弹道目标微动特征提取方法, 仍将散射中心的运动近似为正弦运动, 这在实际中通常不能满足, 且没有考虑散射中心的可观测性, 这使得其理论意义远大于实际意义。

实际中, 弹道导弹类目标多为旋转对称目标,

2011-01-27 收到, 2011-06-03 改回

国家自然科学基金青年科学基金(60802078)资助课题

*通信作者: 艾小锋 anxifu2001@163.com

其散射特性具有特殊性^[15]。文献[16]通过暗室测量数据研究了旋转对称锥体目标的微动特性,目标锥旋和自旋时,锥顶散射中心的运动近似为稳定的正弦运动,而底面边缘散射中心呈非正弦运动,所得结论对旋转对称目标的特征提取与识别具有指导意义,但是并未进一步分析如何利用这一特性。另外,底面边缘两个散射中心具有对称性,从下文分析可以看出,在两个散射中心同时可观测、可分辨条件下,对目标特征提取具有重要作用,但是至今无相关研究报道。

本文正是基于此,分析了旋转对称锥体目标的1维距离像特性,基于时间-距离像分布,提出了目标进动与结构特征联合提取方法,最后通过仿真实验证明了本文理论分析的正确性。

2 进动目标1维距离像特性分析

对于旋转对称的锥体目标,如图1所示,高频照射条件对应的散射特性主要由锥体顶点A以及入射场方向与锥体对称轴构成的平面与底面边缘的两个交点B、C确定^[15],设锥高为 h ,底面半径为 l ,半锥角为 α 。雷达视线在 XOZ 平面内,且与进动轴夹角为 γ (即视线角,观测时间内近似不变),雷达到质心 O 的距离为 R ,进动角为 θ ,进动角速度为 ω ,初始时刻 OA 在 XOY 平面的投影与 OX 轴夹角为 ϕ_0 ,质心 O 到锥体底面中心 O' 的距离为 b (取负表示质心在锥体底面圆心之上,取正表示质心在锥体底面圆心之下,通常情况下目标质心应在底面圆心之上,故文中采用负值进行仿真),雷达视线与锥体对称轴夹角 β 。

3个散射中心同时可见的范围为 $\beta \in (0, \alpha) \cup (\pi/2, \pi - \alpha)$,而 β 的取值范围由视线角 γ 和进动角 θ 确定,下面进行深入分析。根据几何关系易得雷达视线与对称轴夹角 β 满足

$$\cos \beta = \cos \theta \cos \gamma + \sin \gamma \sin \theta \cos(\omega t + \phi_0) \quad (1)$$

则有雷达视线与对称轴夹角的最大值 β_{\max} 和最小值 β_{\min} 分别满足

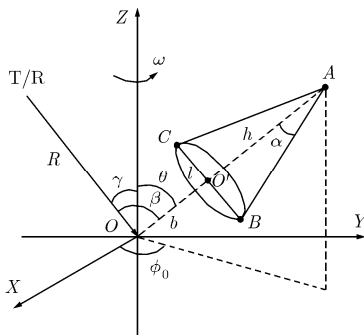


图1 旋转对称目标几何示意图

$$\left. \begin{aligned} \cos \beta_{\min} &= \cos(\gamma - \theta) \\ \cos \beta_{\max} &= \cos(\gamma + \theta) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

如果要求3个散射中心始终同时可见,则存在如下两种情况

$$\left. \begin{aligned} |\gamma - \theta| > 0 \\ \gamma + \theta < \alpha \end{aligned} \right\} \text{或者} \left. \begin{aligned} |\gamma - \theta| > \pi/2 \\ \gamma + \theta < \pi - \alpha \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

通常条件下,半锥角和进动角均较小,因此对于第1种情况, γ 和 β 的取值范围很小;对于第2种情况, γ 和 β 的取值范围较大,因此本文着重考虑该条件下的目标特征提取问题。

t 时刻,散射中心A到雷达的距离为

$$R_A \approx R - (h + b) \cos \theta \cos \gamma - (h + b) \sin \gamma \sin \theta \cos(\omega t + \phi_0) \quad (4)$$

散射中心B和C到雷达的距离分别为

$$R_B \approx R - b [\cos \theta \cos \gamma + \sin \gamma \sin \theta \cos(\omega t + \phi_0)] + l \sqrt{1 - [\cos \theta \cos \gamma + \sin \gamma \sin \theta \cos(\omega t + \phi_0)]^2} \quad (5)$$

$$R_C \approx R - b [\cos \theta \cos \gamma + \sin \gamma \sin \theta \cos(\omega t + \phi_0)] - l \sqrt{1 - [\cos \theta \cos \gamma + \sin \gamma \sin \theta \cos(\omega t + \phi_0)]^2} \quad (6)$$

可见锥体顶点到雷达的距离将随着目标的进动而呈正弦规律变化,锥体底面的两个散射中心到雷达的距离将随着进动呈偏离正弦规律变化。

设雷达采用线性调频信号并通过stretch处理获得1维距离像,参考距离为 R_0 ,本文假定目标平动已被补偿,仅考虑目标的进动,则可得3个散射中心A、B、C与参考点间的距离分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_A &= (R - b \cos \beta - h \cos \beta) - R_0 \\ \Delta R_B &= (R - b \cos \beta + l \sin \beta) - R_0 \\ \Delta R_C &= (R - b \cos \beta - l \sin \beta) - R_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

因此锥体顶点散射中心1维距离像与参考点的距离随着进动呈正弦规律变化,而底面两个边缘散射中心1维距离像与参考点的距离偏离正弦规律变化,通过连续的观测,将获得1维距离像按时间排列构成了时间-距离像分布图,下面将给出仿真结果。仿真参数设置如下:如图1所示, $h = 2.5$ m, $l = 0.5$ m, $b = -0.5$ m,进动频率为2 Hz,初始相位角为 0° ,脉冲重复频率为300 Hz,脉冲数为600,在不同的进动角和视线角条件下获得的时间-距离像分布图如图2所示。

从图2可以看出锥体目标顶点散射中心1维距离像与参考点的距离随目标进动呈正弦规律变化,而底面边缘散射中心1维距离像与参考点的距离偏离了正弦规律,与理论分析相符。对于进动角和视

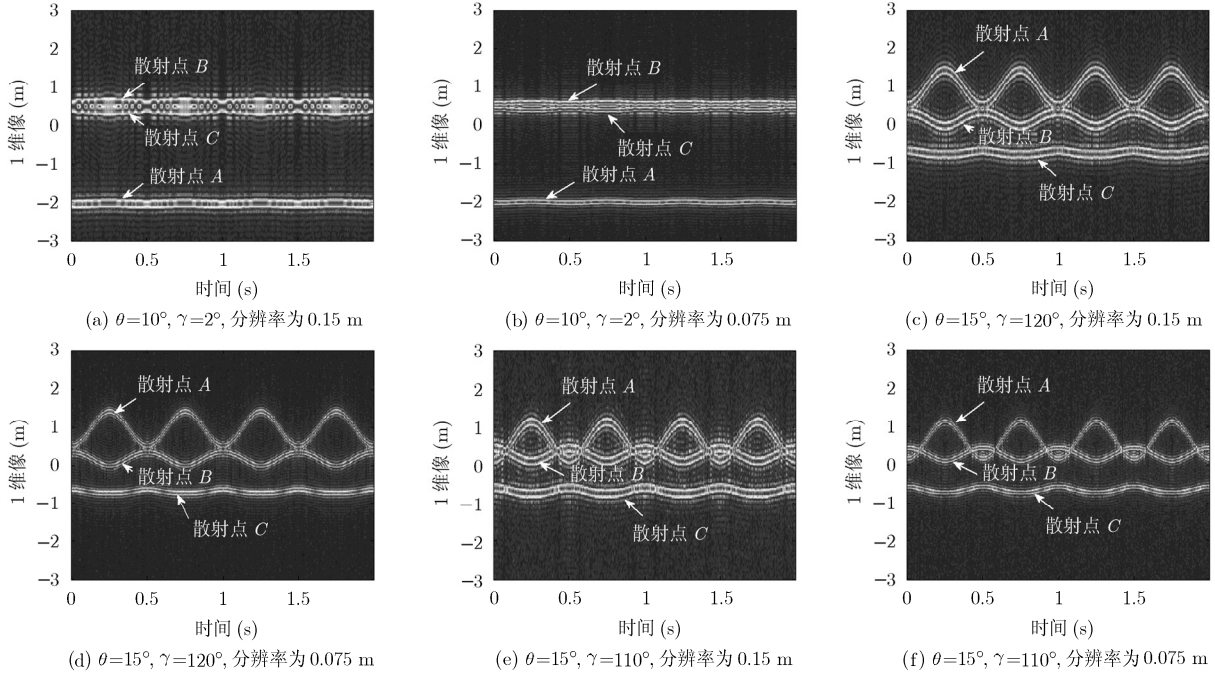


图2 时间-距离像分布

线角较小时，见图 2(a)，图 2(b)，此时满足 3 个散射中心同时可观测的条件，散射中心偏离参考点的距离变化非常不明显，且 B、C 散射中心很难分辨，不利于特征提取，另外底面边缘散射中心 C 与散射中心 B 相比，散射中心 C 更靠近散射中心 A；而对于大于 90° 的视线角，见图 2(c)–2(f)，散射中心 A 偏离参考点的距离变化明显，且 B、C 散射中心不难分辨，有利于目标特征提取，但其变化规律的提取要求高的分辨率。底面边缘散射中心 C 与散射中心 B 相比，散射中心 B 更靠近散射中心 A，该特性可用于散射中心的位置相关。

因此，在时间-距离像分布中，可通过正弦曲线检测方法获得散射中心 A 的相关参数，而散射中心 B、C 的相关参数获取较为困难；视线角大于 90° 时，3 个散射中心位置关系明显，在确定了散射中心 A 的位置后，B、C 两个散射中心位置可以确定；同时利用散射中心 A 的运动规律与散射中心 B、C 位置有利于提取目标的进动与结构特征。

3 基于时间-距离像分布的目标进动与结构特征提取

从前一节的理论模型可以看出，未知参数有锥体高度 h ，底面半径 l ，质心到底面的距离 b ，质心到雷达的距离 R ，进动角速度 ω ，初始相位角 ϕ_0 ，进动角 θ ，视线角 γ 。下面将基于时间-距离像分布，结合 3 个散射中心位置之间的关系，给出进动和结构特征的联合提取新方法。

3.1 基于广义 Hough 变换的参数估计

将式(4)代入式(7)，可得散射中心 A 对应的 1 维距离像位置与参考点之间的距离表示为

$$\Delta R_A = d_A + l_A \cos(\omega t + \phi_0) \quad (8)$$

$$l_A = -(h + b) \sin \gamma \sin \theta \quad (9)$$

$$d_A = R - R_0 - (h + b) \cos \theta \cos \gamma \quad (10)$$

其中 $(d_A, l_A, \omega, \phi_0)$ 在参数空间中分别对应于距离、幅度、频率和相位。

对应参数估计问题归结为在 $(t, \Delta R_A)$ 时间-距离像分布平面内检测正弦曲线，广义 Hough 变换 (Generalized Hough Transform, GHT) 能有效检测图像平面内的任意曲线^[7]，因此可以采用广义 Hough 变换获得参数 $(d_A, l_A, \omega, \phi_0)$ 的估计值 $(\hat{d}_A, \hat{l}_A, \hat{\omega}, \hat{\phi}_0)$ ，其中直接获得进动频率和初始相位信息，而 \hat{d}_A, \hat{l}_A 中包含了待估计的特征参数，下一节将结合底面边缘两个散射中心位置之间的关系，推导相关参数的估计方法。

3.2 目标进动和结构特征提取

通过上一节参数估计获得了 ΔR_A 的变化曲线，则散射中心 A 对应的距离最大值和最小值可分别估计为

$$\left. \begin{aligned} R_A(\beta_{\max}) &= R_0 + \min(\Delta R_A) \\ R_A(\beta_{\min}) &= R_0 + \max(\Delta R_A) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

散射中心 A 对应的距离最大值和最小值分别对应着最小视线角和最大视线角，那么通过散射中心 A 对应的距离最大值和最小值这一时刻的 1 维距离

像,采用 ESPRIT 超分辨方法^[18]可提取 B 和 C 散射中心对应的位置,分别记为 $R_B(\beta_{\min}), R_B(\beta_{\max}), R_C(\beta_{\min}), R_C(\beta_{\max})$, 则可获得如下的 6 个方程:

$$\left. \begin{aligned} R_A(\beta_{\max}) &= R - b \cos \beta_{\max} - h \cos \beta_{\max} \\ R_A(\beta_{\min}) &= R - b \cos \beta_{\min} - h \cos \beta_{\min} \\ R_B(\beta_{\max}) &= R - b \cos \beta_{\max} + l \sin \beta_{\max} \\ R_B(\beta_{\min}) &= R - b \cos \beta_{\min} + l \sin \beta_{\min} \\ R_C(\beta_{\max}) &= R - b \cos \beta_{\max} - l \sin \beta_{\max} \\ R_C(\beta_{\min}) &= R - b \cos \beta_{\min} - l \sin \beta_{\min} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

从而可得目标高度和底面半径估计值为

$$\left. \begin{aligned} \hat{h} &= \sqrt{\frac{l_2^2 h_1^2 - l_1^2 h_2^2}{l_2^2 - l_1^2}} \\ \hat{l} &= \sqrt{\frac{h_2^2 l_1^2 - h_1^2 l_2^2}{h_2^2 - h_1^2}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中 $l_1 = \frac{1}{2}[R_B(\beta_{\min}) - R_C(\beta_{\min})]$, $h_1 = \frac{1}{2}[R_B(\beta_{\min}) + R_C(\beta_{\min})]$, $l_2 = \frac{1}{2}[R_B(\beta_{\max}) - R_C(\beta_{\max})] - R_A(\beta_{\min})$, $h_2 = \frac{1}{2}[R_B(\beta_{\max}) + R_C(\beta_{\max})] - R_A(\beta_{\max})$, 可利用式(12)分别获得。

进而可得最大视线角和最小视线角估计值

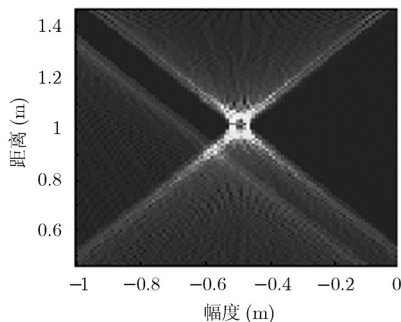
$$\left. \begin{aligned} \hat{\beta}_{\min} &= \arccos(h_1/\hat{h}) \\ \hat{\beta}_{\max} &= \arccos(h_2/\hat{h}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

进动角和视线角的估计值可表示为

$$\left. \begin{aligned} \hat{\gamma} &= \frac{1}{2}(\hat{\beta}_{\max} + \hat{\beta}_{\min}) \\ \hat{\theta} &= \frac{1}{2}(\hat{\beta}_{\max} - \hat{\beta}_{\min}) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

将已获得的参数代入式(9)和式(10)可得质心位置参数

$$\left. \begin{aligned} \hat{b} &= -\hat{h} - \frac{\hat{l}_A}{\sin \hat{\gamma} \sin \hat{\theta}} \\ \hat{R} &= R_0 + (\hat{h} + \hat{b}) \cos \hat{\theta} \cos \hat{\gamma} + \hat{d}_A \end{aligned} \right\} \quad (16)$$



至此,获得锥体目标的进动和结构特征联合提取的新方法,其流程图如图 3 所示。

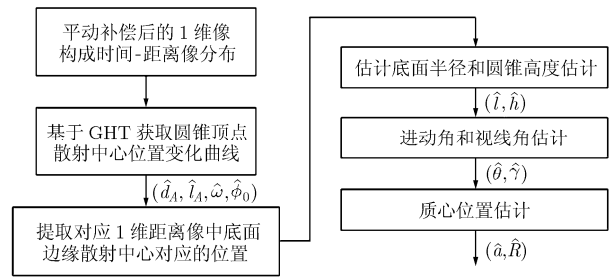


图 3 进动与结构特征联合提取算法流程图

4 仿真实验与结果分析

仿真设置参数如下: $h = 2.5 \text{ m}$, $l = 0.5 \text{ m}$, $b = -0.5 \text{ m}$, $\theta = 15^\circ$, $\gamma = 120^\circ$, $\phi_0 = 0^\circ$, 质心与雷达的距离为 100 km , 参考距离为 100 m , 信噪比为 10 dB 时, 载频为 10 GHz , 信号带宽为 2 GHz , 脉冲重复频率为 300 Hz , 脉冲数为 600 。时间-距离像分布如图 2(d)所示,基于广义 Hough 检测散射中心 A 位置变化曲线所得参数空间如图 4 所示,从图中可以看出明显的峰值,采用峰值检测法获得对应参数即为估计的参数 $(-0.9759, -0.46, 2, 0)$, 便获得了进动周期和初始相位角分别为 2 Hz 和 0° 。

取散射中心 A 位置取最大值和最小值时刻的 1 维距离像,并采用 ESPRIT 方法获得散射中心位置如表 1 所示。由于观测了多个周期,共获得了 4 组值,通过式(12),式(13)得到的锥体高度和半径估计值共有 16 个值,最终结果通过求平均获得锥体高度和半径分别为 2.5547 m 和 0.5044 m , 相对误差分别为 2.2% 和 0.9% ;进动角和视线角估计值为 14.7785° 和 119.6636° , 相对误差分别为 1.5% 和 0.3% ;质心与锥体底面圆心的距离为 -0.4794 m , 相对误差为 4.1% ;质心与雷达距离估计为 99999.98 m , 误差很小。可见本文所提方法能有效提取目标进动和结构特征。

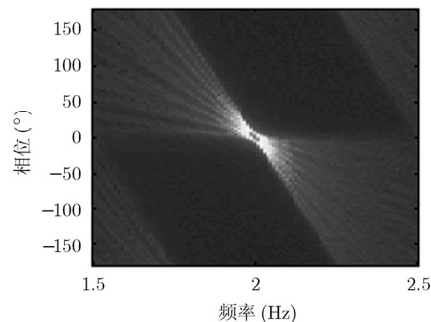


图 4 广义 Hough 变换参数空间

表 1 散射中心对应位置

最大值对应散射中心位置(m)			最小值对应散射中心位置(m)		
A	B	C	A	B	C
1.425	0	-0.720	0.525	0.360	-0.615
1.425	0	-0.720	0.525	0.360	-0.615
1.425	0	-0.720	0.525	0.345	-0.615
1.440	0	-0.720	0.525	0.36	-0.63

以上述参数仿真不同信噪比下参数估计均方误差如表 2 所示。

表 2 不同信噪比下参数估计均方误差

SNR(dB)	0	5	10	15	20
l (m)	0.007	0.007	0.004	0.002	0.001
h (m)	0.063	0.047	0.055	0.042	0.041
ω (Hz)	0	0	0	0	0
ϕ_0 ($^\circ$)	0	0	0	0	0
θ ($^\circ$)	0.463	0.32	0.222	0.215	0.208
γ ($^\circ$)	1.357	0.363	0.337	0.253	0.218
R (m)	0.23	0.03	0.02	0.01	0.01
b (m)	0.048	0.032	0.021	0.020	0.021

从表 2 可以看出随着信噪比增加，参数估计均方误差总体呈减小趋势，同时可以看出在较低信噪比条件下，本文所提方法也能高精度提取目标进动和结构特征。其中进动频率和初始相位角始终稳定，原因在于广义 Hough 变换具有很强的抗噪性能，而目标质心与底面圆心的距离估计精度稍低，原因在其估计方法中用到了其它估计参数，估计误差产生了积累影响。

信噪比为 15 dB，进动角变化范围 $6^\circ \sim 15^\circ$ ，间隔 0.5° ，视线角变化范围 $110^\circ \sim 155^\circ$ ，间隔 2° ，其余参数同上，参数估计误差分布如图 5 所示。其中图 5(a)为目标底面半径估计误差分布，平均误差为 0.01 m，且误差分布的标准差为 0.01；图 5(b)为目标高度估计误差分布，平均误差为 0.05 m，且误差分布的标准差为 0.06；图 5(c)为目标质心距离底面的距离估计误差分布，平均误差为 0.06 m，且误差分布的标准差为 0.05；图 5(d)为目标质心距离雷达的距离估计误差分布，平均误差为 0.04 m，且误差分布的标准差为 0.46；图 5(e)为目标进动频率估计误差分布，平均误差为 0.0001 Hz，且误差分布的标准差为 0.0001；图 5(f)为目标进动初始相位角估计误差分布，平均误差为 0.63° ，且误差分布的标准差

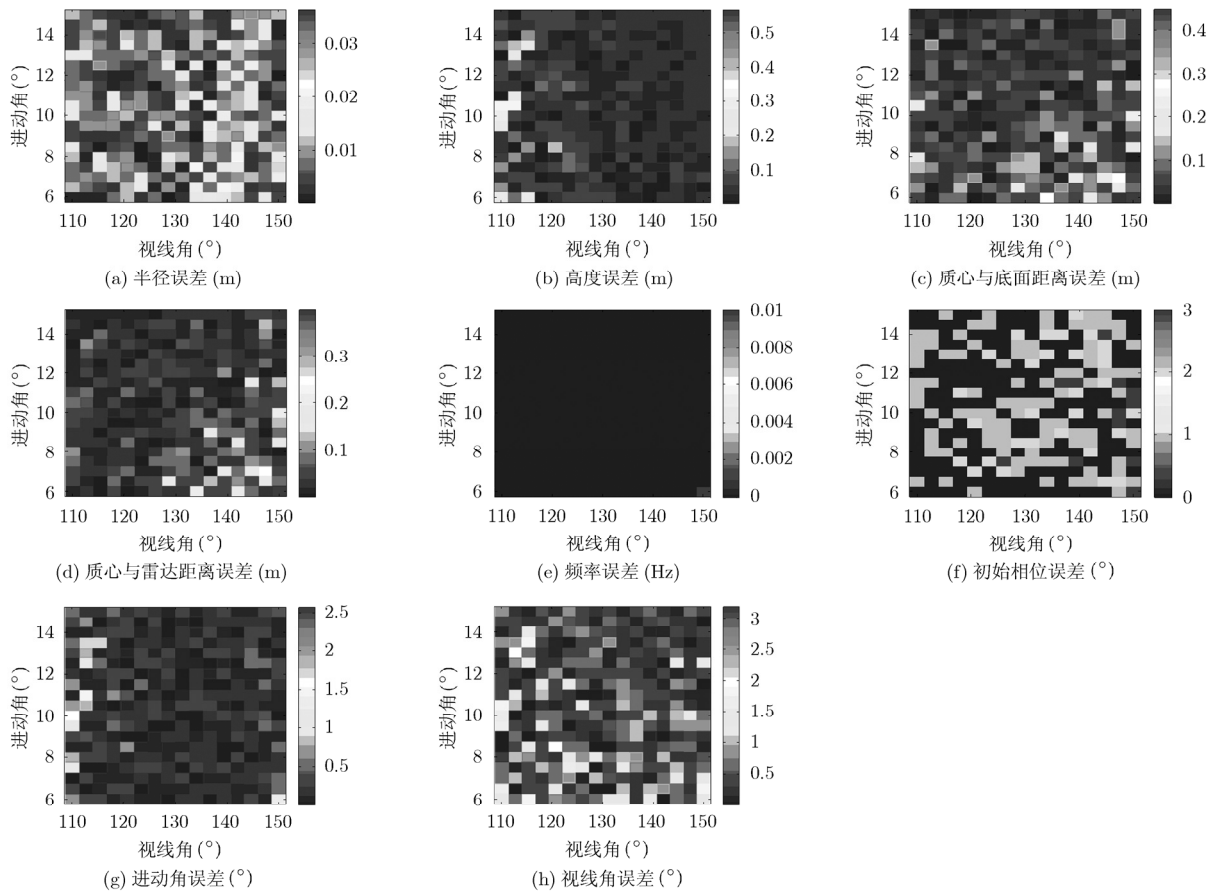


图 5 不同进动角和视线角条件下参数估计误差

为 0.81; 图 5(g)为目标进动角估计误差分布, 平均误差为 0.24°, 且误差分布的标准差为 0.03; 图 5(h)为雷达视线角估计误差分布, 平均误差为 0.54°, 且误差分布的标准差为 0.46。总体来看, 在目标散射中心连续可观测条件下, 本文所提方法能适应不同的参数条件, 均能高精度提取目标进动和结构特征。

5 结束语

本文以锥体弹头目标为研究对象, 详细分析了各散射中心位置变化规律, 锥顶散射中心运动规律为正弦曲线, 而底面边缘散射中心随观测视角的变化而滑动, 偏离了正弦规律。基于时间-距离像分布和各散射中心的位置关系, 实现了进动锥体弹头目标进动和结构特征联合提取, 对该类目标的识别具有重要参考意义。大量仿真结果表明, 在目标散射中心连续可观测、可分辨条件下, 本文所提方法能适应不同的参数, 提取目标进动和结构特征。下一步将开展暗室测量实验, 用实测数据验证本文所提方法; 另外在散射中心不连续出现时的特征提取也是亟待研究的内容。

参考文献

- [1] 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], 国防科技大学, 2004.
 - [2] 毕莉, 赵锋, 高勋章, 等. 基于一维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 precessional target's dimension estimation based on HRRPs [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(8): 1825-1830.
 - [3] 朱玉鹏, 王宏强, 黎湘, 等. 基于一维距离像序列的空间弹道目标微动特征提取[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 1133-1140.
Zhu Yu-peng, Wang Hong-qiang, Li Xiang, et al. Micro-motion feature extraction of spatial ballistic target based on HRRP Dynamic Sequence[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(3): 1133-1140.
 - [4] 贺思三, 周剑雄, 付强. 利用一维距离像序列估计弹道中段目标进动参数[J]. 信号处理, 2009, 25(6): 925-929.
He Si-san, Zhou Jian-xiong, and Fu Qiang. Using HRRP sequence to estimate the precession parameters of midcourse target[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(6): 925-929.
 - [5] Jacobs S P and O'Sullivan J A. Automatic target using sequences high resolution range-profiles recognition of radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 26(2): 364-382.
 - [6] 刘进, 王雪松, 李文臣, 等. 基于进动的旋转对称弹头雷达成像方法[J]. 信号处理, 2009, 25(9): 1333-1337.
Liu Jin, Wang Xue-song, Li Wen-chen, et al. Radar imaging method of revolution warhead based on precession[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(9): 1333-1337.
 - [7] 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.
 - [8] Mayhan J T, Burrows M L, and Cuomo K M. High resolution 3D "snapshot" ISAR imaging and feature extraction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(2): 630-631.
 - [9] Bai Xue-ru, Xing Meng-dao, Zhou Feng, et al. High-resolution three-dimensional imaging of spinning space debris[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2352-2362.
 - [10] Bai Xue-ru, Zhou Feng, Xing Meng-dao, et al. Scaling the 3-D image of spinning space debris via bistatic inverse synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(3): 430-434.
 - [11] Chen V C and Ling Hao. Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis[M]. London: Artech House, 2002: 162-200.
 - [12] Gao Hong-wei, Xie Liang-gui, Wen Shu-liang, et al. Micro-Doppler signature extraction from ballistic target with micro-motions[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1969-1982.
 - [13] 金文彬, 刘永祥, 任双桥, 等. 锥体目标空间进动特性分析及其参数提取[J]. 宇航学报, 2004, 25(4): 408-410.
Jin Wen-bin, Liu Yong-xiang, Ren Shuang-qiao, et al. Character analyzing of spatial precession for cone and its parameter extracting[J]. *Journal of Astronautics*, 2004, 25(4): 408-410.
 - [14] 陈行勇, 黎湘, 郭桂蓉, 等. 微进动弹道导弹目标雷达特征提取[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(4): 643-646.
Chen Hang-yong, Li Xiang, Guo Gui-rong, et al. Radar feature extraction of micro-precession ballistic missile warhead[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(4): 643-646.
 - [15] 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: 86-95.
 - [16] 刘进, 王雪松, 马梁, 等. 空间进动目标动态散射特性的实验研究[J]. 航空学报, 2010, 31(5): 1014-1023.
Liu Jin, Wang Xue-song, Ma Liang, et al. Experiment study on dynamics scattering properties of space precession target[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(5): 1014-1023.
 - [17] Zhang Qun, Yeo Tat-soon, Tan Hwee-siang, et al. Imaging of a moving target with rotating parts based on the hough transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 291-299.
 - [18] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 135-140.
- 艾小锋: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为雷达目标成像与特征提取研究、弹道导弹攻防对抗等。
邹小海: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为雷达建模与仿真等。
李永祯: 男, 1977年生, 博士, 副研究员, 研究方向为雷达极化信息处理、电子战建模与仿真、目标检测与识别等。
赵 锋: 男, 1978年生, 博士, 讲师, 研究方向为电子信息系统建模仿真与评估、弹道导弹攻防对抗。
肖顺平: 男, 1964年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达系统理论。