

基于多视角一维距离像序列的进动目标特征提取

艾小锋* 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: 该文研究了利用多视角观测 1 维距离像序列联合提取弹道目标进动角和真实长度的方法。以锥形弹头为例, 详细分析了目标进动条件下 1 维距离像长度随视角的变化规律, 指出该规律通常情况下可近似为正弦曲线; 基于此建立了多视角雷达目标观测模型, 提出了基于多视角 1 维距离像序列目标进动角和真实长度的联合提取新方法, 并分析了雷达布站对特征提取精度的影响。最后通过计算机仿真证明了算法的有效性和适应性。

关键词: 特征提取; 弹道目标; 高分辨距离像; 多视角观测

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)12-2846-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00360

Feature Extraction of Precession Targets Using Multi-aspect Observed HRRP Sequences

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

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

Abstract: A novel algorithm for feature extraction of the precession angle and real length of the ballistic target using multi-aspect observed High Range Resolution Profile (HRRP) sequences is proposed. Taking the cone-shaped ballistic target into consideration, this paper analyzes the HRRP length when the target is precessing and indicates that the sequence of HRRP lengths can be approximate to a sinusoid function. Then, the model of multi-aspect observation is introduced and a novel algorithm, which is based on the multi-aspect observed HRRP sequences, is proposed to estimate the precession angle and real target length jointly. Afterwards, the effect of the radars' distribution on the estimated errors is discussed. Finally, the simulation results are given for validating the proposed algorithms.

Key words: Feature extraction; Ballistic target; High Range Resolution Profile (HRRP); Multi-aspect observation

1 引言

弹道导弹攻防对抗中目标特征提取与有效识别是防御的关键, 其中目标长度和微动特征是两项重要特征。目标的长度信息是真假目标鉴别最直观、最重要依据之一。真假目标的长度存在差别: 弹头长度大多在 1-3 m 之间, 母舱的长度一般大于弹头, 简单转发式有源诱饵往往只形成单个尖锋, 其长度很小, 碎片的长度一般也小于弹头长度。因此, 采用长度信息识别目标是国内外研究者公认的有效手段。通常情况下只能获得 1 维距离像长度, 它反映了目标在雷达视线上的投影长度, 但是该长度易受目标姿态影响^[1]。对于空间目标, 平动、自旋以及进动均会引起 1 维距离像长度的变化, 直接利用 1 维距离像长度来判断目标长度需要长时间的观测。文献[2]通过假定进动角已知, 采用最大似然法估计了目标真实长度, 但事实上, 进动角在实际中通常难

以准确获得。

为保持在大气层外飞行的稳定性, 弹头通常采用自旋稳定控制方式; 诱饵释放以及弹箭分离时, 弹头目标可能产生进动, 自旋、进动等运动形式构成了弹头目标的微动特性。而诱饵、碎片等由于不存在姿态控制, 通常处于翻滚状态。由此可以通过微动特性来鉴别目标类型。近年来, 微动特征用于弹道目标识别成为研究的热点, 微动特征获取的方法主要有微多普勒分析、RCS 序列分析、1 维距离像序列分析等^[3-6]。现有报道中, 弹道目标的进动频率估计方法较多, 如时频分析、自相关等, 且估计精度较高, 但是进动角的提取通常需要已知目标某些结构参数^[3], 如目标长度、半锥角等, 限制了上述方法的实用性。

另外, 多视角观测信息融合有利于目标特征提取和识别, 因此备受关注^[7-12]。文献[7-9]研究了基于多视角 1 维距离像目标识别问题, 指出同时利用多视角 1 维距离像有利于目标识别; 文献[10]研究了多视角 ISAR 成像参数估计问题; 文献[11,12]研究

2011-04-14 收到, 2011-09-02 改回

国家自然科学基金青年科学基金(60802078, 61101180)资助课题

*通信作者: 艾小锋 anxifu2001@163.com

了多视角微多普勒对目标识别的意义，初步结论显示，多视角微多普勒能提供互补和冗余信息，同样有利于目标特征提取和识别。

正是基于上述考虑，本文通过研究表明，利用多视角观测的 1 维距离像序列可以同时提取进动目标的进动角和真实长度特征。论文安排如下：第 2 节以锥体目标为例，详细分析了目标 1 维距离像长度随目标进动的变化规律，指出该规律可用目标轴向长度在雷达视线上的投影形成的正弦曲线近似；第 3 节建立了多视角观测模型并提出了基于多视角 1 维距离像序列的特征提取新方法；第 4 节通过计算机仿真验证了本文方法的有效性。

2 进动目标 1 维距离像的长度特性

以旋转对称的锥体目标为例，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^[6]。设锥高为 l ，底面半径为 r ，半锥角为 α 。建立如图所示的直角坐标系 $OXYZ$ ，第 i 部雷达视线的俯仰角和方位角分别为 γ_i, φ_i ，雷达到坐标原点 O 的距离为 R_i 。目标轴线的初始方位为 ϕ_0 ，进动角为 γ ，进动角速度为 ω 。坐标原点 O 与锥体底面中心 O' 的距离为 b ，雷达视线与锥体对称轴夹角 β 。

由几何关系得目标轴线与雷达视线夹角 β 随时间变化，可表示为

$$\cos \beta(t) = \cos \gamma \cos \gamma_i + \sin \gamma \sin \gamma_i \cos(\omega t + \phi_0 - \varphi_i) \quad (1)$$

其中 t 为时间，该角度随目标进动而呈周期变化。

远场条件下，散射中心 A 到雷达的距离近似为

$$R_A \approx R - (l + b) \cos \beta(t) \quad (2)$$

散射中心 B 和 C 到雷达的距离分别为

$$R_B \approx R - b \cos \beta(t) + r \sin \beta(t) \quad (3)$$

$$R_C \approx R - b \cos \beta(t) - r \sin \beta(t) \quad (4)$$

考虑遮挡效应，雷达所观测的目标长度，即目

标 1 维距离像长度理论值近似为

$$L_{\text{HRRP}} \approx \begin{cases} l \cos \beta(t) + r \sin \beta(t), & \beta(t) < \alpha \\ l \cos \beta(t) - r \sin \beta(t), & \alpha \leq \beta(t) \leq \pi/2 - \alpha \\ -l \cos \beta(t) + r \sin \beta(t), & \pi/2 - \alpha < \beta(t) \leq \pi - \alpha \\ 2r \sin \beta(t), & \pi - \alpha < \beta(t) \end{cases} \quad (5)$$

另一方面，目标轴线在雷达视线上的投影长度可表示为

$$L_1 \approx \begin{cases} l \cos \beta(t), & \beta(t) < \pi/2 \\ -l \cos \beta(t), & \beta(t) \geq \pi/2 \end{cases} \quad (6)$$

对比式(5)和式(6)可以看出，对于细长锥体目标， $l \gg r$ ，除在 $\pi - \alpha < \beta(t)$ 外，两者的差值均较小，因此可以用目标轴线投影长度近似表示真实目标投影长度。因此，将锥体目标近似为目标轴线线状目标，雷达 i 观测的目标投影长度(即 1 维距离像长度理论值)为

$$l_i \approx |l \cos \gamma \cos \gamma_i + l \sin \gamma \sin \gamma_i \cos(\omega t + \phi_0 - \varphi_i)| \quad (7)$$

可以看出各雷达所观测的 1 维距离像长度为正弦信号加一直流分量，其中参数为目标长度 l ，进动角 γ ，进动角速度 ω ，初始相位角 ϕ_0 ，雷达 i 对应的方位 φ_i 和俯仰角 γ_i ，共 6 个参数，单部雷达难以完全估计。对于获得的 1 维距离像长度序列，通过曲线拟合或曲线检测等方法最多可以获得 4 个参数，即 $l \cos \gamma \cos \gamma_i$ ， $l \sin \gamma \sin \gamma_i$ ， ω ， $(\phi_0 - \varphi_i)$ ，其中 $l \cos \gamma \cos \gamma_i$ 和 $l \sin \gamma \sin \gamma_i$ 包含了目标长度和进动角两个重要特征，只有知道雷达视线俯仰角才能获取该特征，实际中这些参数是相关的，仅通过单部雷达难以同时获取；但是如果存在另一部雷达 j 同时观测，则又可以获得两个参数 $l \cos \gamma \cos \gamma_j$ 和 $l \sin \gamma \sin \gamma_j$ ，联合两部雷达的估计结果得到 4 个方程，因此可以求解目标进动参数和目标长度，下一节进行详细分析。

3 多视角观测进动目标的特征提取

广义 Hough 变换 (Generalized Hough Transform, GHT) 具有检测任意曲线的能力，且具有抗噪能力，即使曲线出现不连续也具有良好的性能，因此广泛应用曲线检测。广义 Hough 变换在雷达信号和数据处理应用也很广泛，文献[13,14]采用 GHT 在时间-距离像分布图中成功提取了目标微动特征。对于获得的进动目标 1 维距离像长度序列，服从正弦曲线规律，考虑到目标运动引起 1 维距离像的起伏，提取的长度可能起伏和断续，因此本文

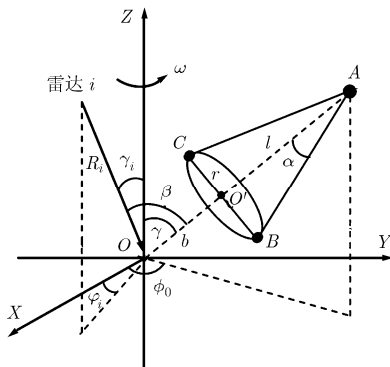


图 1 旋转对称目标几何示意图

引入 GHT, 从各雷达观测的 1 维距离像长度序列中分别提取 4 个参数, 再将参数进行组合求解进动角和目标真实长度。

第 i 部雷达要提取的曲线方程在长度-时间域 (l_i, t) 可表示为

$$l_i = l_{i,1} + l_{i,2} \cos(\omega t + \phi_i) \quad (8)$$

其中 l_i 为观测的 1 维像长度序列, $l_{i,1} = l \cos \gamma \cos \gamma_i$, $l_{i,2} = l \sin \gamma \sin \gamma_i$, $\phi_i = (\phi_0 - \varphi_i)$ 。

即通过式(8)可将曲线上任意一点 (l_i, t) 映射到 4 维参数空间 $(l_{i,1}, l_{i,2}, \omega, \phi_i)$, 则基于 GHT 的参数估计过程描述如下:

- (1) 根据 1 维像长度曲线确定参数空间 $(l_{i,1}, l_{i,2}, \omega, \phi_i)$;
- (2) 根据取值范围及参数估计精度要求将参数空间离散化, 并构建 4 维零矩阵;
- (3) 取曲线上一点 (l_i, t) , 通过式(8)将其映射为参数空间 $(l_{i,1}, l_{i,2}, \omega, \phi_i)$ 中的某些取值, 对应位置矩阵元素加 1;
- (4) 重复步骤(3), 直到遍历曲线所有点;
- (5) 在参数空间对应矩阵中搜索峰值, 峰值对应坐标即为参数估计值。

假设两部雷达 i, j 均通过 GHT 获得对应的参数, 则可以构建如下的参数方程组

$$\left. \begin{aligned} l \cos \gamma \cos \gamma_i &= l_{i,1} \\ l \sin \gamma \sin \gamma_i &= l_{i,2} \\ l \cos \gamma \cos \gamma_j &= l_{j,1} \\ l \sin \gamma \sin \gamma_j &= l_{j,2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 $l_{i,1}, l_{i,2}, l_{j,1}, l_{j,2}$ 为雷达 i 和 j 分别获得的相应参数估计值。

需要说明的是广义 Hough 变换的计算量与参数空间维数和取值范围有关, 实际中进动速度 ω 可以通过窄带回波分析获得^[4,5], 从而减少参数空间维数, 减少运算量。另外参数估计的精度与 1 维像长度估计精度有关, 信噪比较高时 1 维距离像长度精度较高, 参数估计的精度也较高。

由式(9)可得目标长度估计值为

$$\tilde{l}_{i,j} = \sqrt{(l_{i,2}^2 l_{j,1}^2 - l_{i,1}^2 l_{j,2}^2) \left(\frac{1}{l_{i,2}^2 - l_{j,2}^2} + \frac{1}{l_{j,1}^2 - l_{i,1}^2} \right)} \quad (10)$$

进动角估计值为

$$\tilde{\gamma}_{i,j} = a \sin \sqrt{\frac{l_{i,2}^2 - l_{j,2}^2}{l_{i,2}^2 + l_{j,1}^2 - l_{i,1}^2 - l_{j,2}^2}} \quad (11)$$

通常条件下弹道目标进动角小于 90° , 求解结果也只考虑该情况。

目标长度和进动角估计均方误差分别为

$$\sigma_l^2 = \frac{1}{l^2} \left\{ (l_{i,1}^2 + l_{j,1}^2) \left[\frac{(l_{i,2}^2 l_{j,1}^2 - l_{i,1}^2 l_{j,2}^2)}{(l_{i,2}^2 - l_{j,2}^2)^2} - \left(\frac{1}{(l_{i,2}^2 - l_{j,2}^2)} - \frac{1}{(l_{i,1}^2 - l_{j,1}^2)} \right) \right]^2 + (l_{i,2}^2 + l_{j,2}^2) \left[\frac{(l_{i,2}^2 l_{j,1}^2 - l_{i,1}^2 l_{j,2}^2)}{(l_{i,2}^2 - l_{j,2}^2)^2} - \left(\frac{1}{(l_{i,2}^2 - l_{j,2}^2)} - \frac{1}{(l_{i,1}^2 - l_{j,1}^2)} \right) \right]^2 \right\} \sigma_{ij}^2 \quad (12)$$

$$\sigma_\gamma^2 = \frac{tg^2 \gamma}{(l_{i,2}^2 - l_{j,2}^2)^2} \left[(l_{i,1}^2 + l_{j,1}^2) + \frac{(l_{i,2}^2 + l_{j,2}^2)(l_{i,1}^2 - l_{j,1}^2)^2}{(l_{i,2}^2 - l_{j,2}^2)^2} \right] \sigma_{ij}^2 \quad (13)$$

其中 $\sigma_l^2, \sigma_\gamma^2$ 目标长度和进动角估计均方误差, 且假设 $l_{i,1}, l_{i,2}, l_{j,1}, l_{j,2}$ 的均方误差均为 σ_{ij}^2 。可以看出目标长度越长, 长度估计误差越小; 而进动角越大, 角度估计误差越大。

为评价两部雷达视线俯仰角之间的关系对估计精度的影响, 定义如下参数

$$\delta_{ij} = \left| l_{i,2}^2 l_{j,1}^2 - l_{i,1}^2 l_{j,2}^2 \right| = l^4 \sin^2 \gamma \cos^2 \gamma \left| \sin(\gamma_i - \gamma_j) \sin(\gamma_i + \gamma_j) \right| \quad (14)$$

为评价因子, 可以看出该因子既能反映两部雷达视线俯仰角之差又能反映两者之和的影响, 下一节将通过仿真来验证。

至此, 便获得了多视角观测进动目标特征提取新方法, 其计算流程如图 2 所示。

4 仿真与分析

为验证本文提出的方法, 假定 1 锥体目标, 参数为 $l = 3 \text{ m}, r = 0.5 \text{ m}, \omega = 4\pi \text{ rad/s}, \phi_0 = 0^\circ, \gamma = 10^\circ$ 。目标散射中心系数均为 1 m^2 , 散射中心位置采用文献[6]描述的位置模型。雷达信号带宽为 2 GHz, 载频 10 GHz, 脉宽 500 μs , 脉冲重复频率为 200 Hz, 观测时间 2 s, 信噪比为 15 dB。雷达 1 俯仰角和方位角分别为 10° 和 0° , 雷达 2 俯仰角和方位角分别为 60° 和 30° , 两部雷达获得的 1 维距离像序列和 1 维距离像长度序列如图 3 所示, 其中图 3(a) 为雷达 1 的 1 维距离像序列, 由于遮挡效应, 锥体

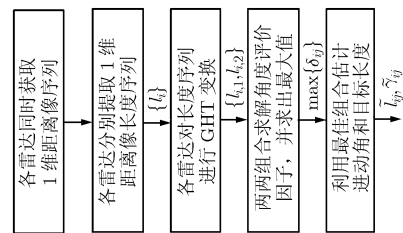


图 2 多视角观测进动目标特征提取流程

底面散射中心数目在 1 和 2 间交替，图 3(b)为雷达 2 的 1 维距离像序列，由于遮挡效应，锥体底面散射中心数目为 1，图 3(c)为两部雷达获得的 1 维距离像长度序列，本文采用常规的门限检测法^[15]，可以看出雷达 2 提取的 1 维像长度序列比较接近正弦规律，而雷达 1 观测的 1 维距离像长度序列部分接近正弦规律。对 1 维像长度序列进行 GHT 变换后，对所得的参数空间进行峰值检测获得所需参数分别为 $l_{1,1} = 2.8295$, $l_{1,2} = 0.1505$, $l_{2,1} = 1.0572$, $l_{2,2} = 0.5112$ ，代入式(10)和式(11)计算目标的进动角和目标长度分别为 10.5435° 和 2.9933 m，相对误差分别为 5.44% 和 0.67%，精度较高。

图 4 给出了不同目标长度条件下的目标长度和进动角估计结果；图 5 给出了不同进动角条件下的参数估计结果。对比真实值和估计值可以发现：目标长度越长，长度进动角估计误差越小；进动角越

大，长度估计误差越小，进动角估计误差越大。同时可以看出本文提出的方法能适应不同的参数条件，在目标较短和进动较小时也能高精度地提取进动角和目标长度。

为分析两部雷达视线方位角对特征提取的影响，设定一部雷达俯仰角和方位角分别为 60° 和 0° ，另一部雷达俯仰角为 30° ，而方位角取值为 $0^\circ \sim 350^\circ$ ，不同方位角下特征提取结果如图 6 所示，可以看出随着方位角的变化，长度和进动角估计值有规律地在真实值上下波动，但误差范围很小，可认为是一种平稳过程，认为两部雷达方位角对参数估计的精度影响不大，可以忽略。

为分析两部雷达视线俯仰角对特征提取的影响，设定两部雷达方位角为 0° ，俯仰角为 $0^\circ \sim 150^\circ$ 的离散值，图 7 给出了两部雷达在不同俯仰角配对条件的特征提取结果。图 7(a)为目标长度估计误差

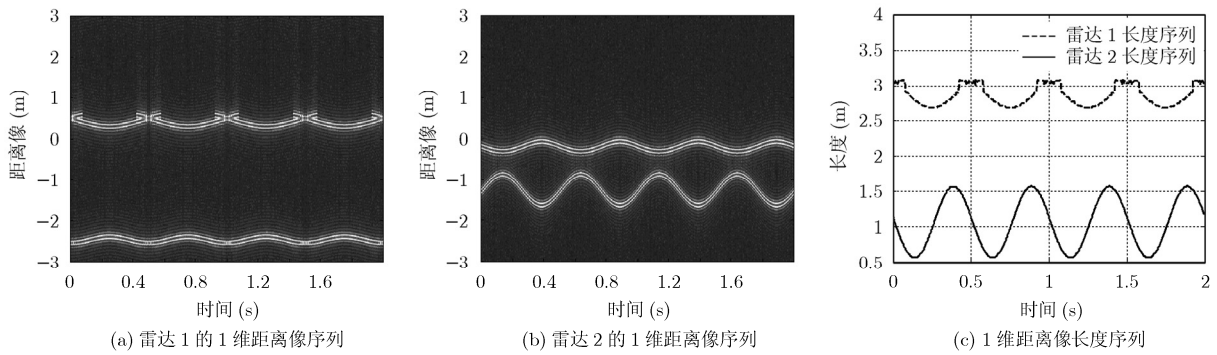


图 3 1 维距离像及其长度序列

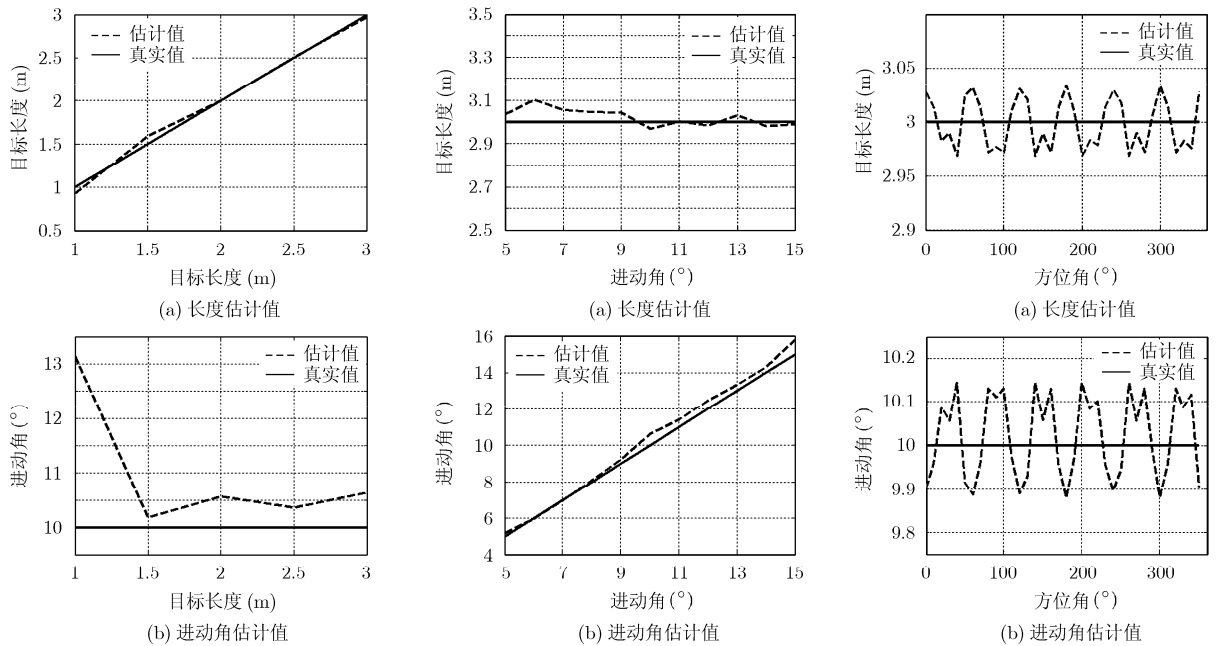


图 4 不同目标长度参数估计结果

图 5 不同进动角参数估计结果

图 6 不同方位角下参数估计结果

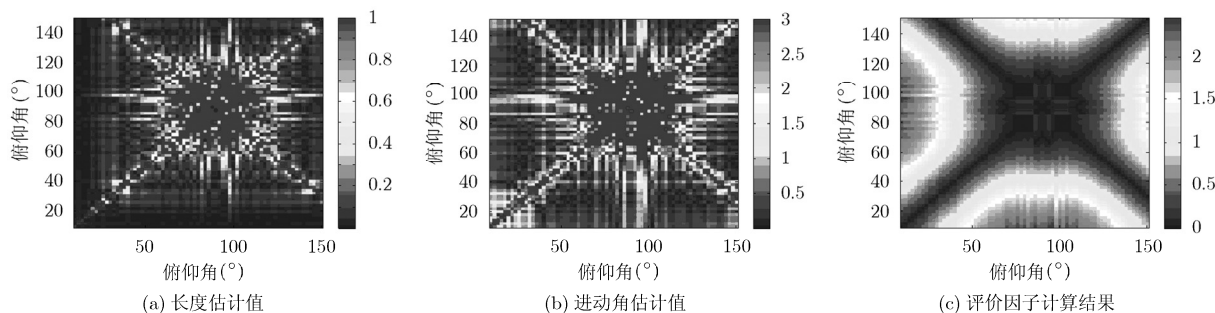


图7 不同俯仰角下参数估计结果

绝对值，并将误差大于1的值置为1；图7(b)为进动角估计误差绝对值，并将误差大于3的值置为3；图7(c)为评价因子计算结果。可以看出目标长度和进动角估计结果与误差分布基本一致，并且可以看出估计误差与评价因子的对应关系：评价因子越大对应特征提取精度越高，反之精度越低，评价因子取0时，精度最差。另外，俯仰角接近 90° 时，由于观测的目标散射中心位置接近，提取的1维距离像长度会出现较大起伏，因此精度较低。

从上述参数中将俯仰角分别为 30° 、 60° 、 70° 的雷达GHT变换后的参数提取出来，并假定为3部雷达(编号1, 2, 3)同时观测结果。3部雷达两两组合特征提取误差如表1所示，可以看出雷达1, 3组合的精度最高，1, 2组合次之，2, 3组合最差，而对应的评价因子逐渐减小，因此可选择最大评价因子对应的组合特征提取结果作为最终结果。实际中仅两部雷达可能无法很好地满足俯仰角条件，应采用多部雷达同时观测，通过计算评价因子来选择最佳组合进行求解。需要注意的是，实际应用中多个评价因子相差可能很少，则可以采用多种组合分别求解最后取平均的方法获得目标的特征量。

表1 不同雷达组合参数估计结果

雷达组合	长度误差(m)	角度误差($^\circ$)	评价因子
雷达1, 2组合	0.0086	0.5811	1.2929
雷达1, 3组合	0.004	0.5265	1.5486
雷达2, 3组合	0.0582	0.76	0.2490

5 结束语

本文基于多视角观测1维距离像序列提出了弹道目标的进动角度和真实长度特征联合提取新方法，仿真结果验证了该方法的有效性；分析了雷达布站对特征提取精度的影响，指出两部雷达相对方位角对精度影响较小可以忽略，而相对俯仰角对精度影响较大，可采用分散的多部雷达同时观测，通

过计算各种组合的评价因子来选择最佳组合提取目标特征，所得结论对多视角观测弹道目标特征提取的实际应用具有参考意义。

需要指出的是，1维距离像长度的精度将影响目标特征提取精度，为保证1维距离像长度的高精度，可采用超分辨率方法，如ESPRIT, MUSIC等^[16]。另外，弹道攻防对抗中仅获得目标长度还是不够的，目标细微的结构特征将进一步提高目标识别的正确性，下一步将研究利用多视角观测获取目标细微结构特征的方法。

参考文献

- [1] Liao Xue-jun, Bao Zheng, and Xing Meng-dao. On the aspect sensitivity of high resolution range profiles and its reduction methods[C]. IEEE Radar Conference 2000, Alexandria, USA, May 7-12, 2000: 310-315.
- [2] 毕莉, 赵锋, 高勋章, 等. 基于1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] 贺思三, 周剑雄, 付强. 利用1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.
- [4] Liu Y X, Li X, and Zhuang Z W. Estimation of micro-motion parameters based on micro-Doppler[J]. *IET Signal Processing*, 2010, 4(3): 213-217.
- [5] 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.
- [6] 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 procession target[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(5): 1014-1023.
- [7] Vespe M, Baker C, and Griffiths H. Radar target classification using multiple perspectives[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2007, 1(4): 300-307.
- [8] Zhu F, Zhang X-D, Hu Y-F, *et al.*. Nonstationary hidden markov models for multiaspect discriminative feature extraction from radar targets[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(5): 2203-2214.
- [9] Liao X, Runkle P, Jiao Y, *et al.*. Identification of ground targets from sequential hrr radar signatures[C]. 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Salt Lake City, UT, May 7-11, 2001: 2897-2900.
- [10] Ye Chun-mao, Xu Jia, Peng Ying-ning, *et al.*. Key parameter estimation for radar rotating object imaging with multi-aspect observations[J]. *Science China: Information Sciences*, 2010, 53(8): 1641-1652.
- [11] Smith G E, Woodbridge K, Baker C J, *et al.*. Multistatic micro-Doppler radar signatures of personnel targets[J]. *IET Signal Processing*, 2010, 4(3): 224-233.
- [12] Smith G E, Woodbridge K, and Baker C J. Multi-perspective micro-Doppler signature classification[C]. IET International Conference on Radar Systems, Edinburgh, UK, Oct. 15-18, 2007: 46-51.
- [13] 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.
- [14] Wu Xiao-fang, Wang Xue-song, and Lu Huan-zhang. Motion feature extraction for stepped frequency radar based on Hough transform[J]. *IEE Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(1): 17-27.
- [15] Liao Kuo and Yang Wan-lin. Extraction of radar target length based on high resolution range profile[C]. International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE 2010), Wuhan, China, June 25-27, 2010: 956-959.
- [16] Kim K T and Kim H T. One-dimensional scattering centre extraction for efficient radar target classification[J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar & Navigation*, 1999, 146(3): 147-158.
- 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、弹道导弹攻防对抗等。
- 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、弹道导弹攻防对抗等。
- 肖顺平：男，1964年生，博士，教授，研究方向为雷达系统理论。