

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

姚汉英* 孙文峰 马晓岩
(空军预警学院 武汉 430019)

摘要: 弹道目标特征参数估计是进行目标识别的基础。针对缺少先验参数信息时锥柱组合类弹头目标进动和结构参数联合估计难题,该文提出一种基于高分辨距离像序列实现锥柱体目标进动和结构参数联合估计新方法。以旋转对称锥柱体目标为研究对象,基于静态电磁散射数据,结合目标运动模型仿真生成了目标高分辨距离像序列,分析了4个观测区域内锥柱体目标的1维距离像特性。研究了常见雷达观测视角内锥柱体各散射中心的1维距离像序列变化规律,建立了序列中散射中心间的相对位置变化的极值与目标参数之间的关系式,据此完成了锥柱体目标进动和结构参数的联合估计。最后,仿真实验结果验证了文中方法的有效性和适应性。

关键词: 目标识别; 高分辨距离像序列; 锥柱体目标; 参数估计; 电磁散射数据; 相对位置

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)03-0537-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00978

Precession and Structure Parameters Estimation of Cone-cylinder Target Based on the HRRPs

Yao Han-ying Sun Wen-feng Ma Xiao-yan
(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Feature parameters estimation for ballistic targets is the basis of target recognition. Because of the difficulty to estimate the precession and structure parameters of a cone-cylinder target jointly without prior knowledge of parameters, a new method for the cone-cylinder target's precession and structure parameters estimation is proposed based on High Range Resolution Profile sequences (HRRPs). The HRRPs of the rotary symmetrical cone-cylinder target are simulated and analyzed in four attitude angle regions respectively based on static electromagnetic scattering data. The trace of each scatter in the HRRPs is researched in the common radar viewing aspect, and the relationship between the extreme value of three scattering centers' relative positions in the HRRPs and the target's parameters is built, then the precession and structure parameters are estimated simultaneously. Finally, the estimation results of feature parameters show that the proposed method is effective and adaptive.

Key words: Target recognition; High Range Resolution Profile sequences (HRRPs); Cone-cylinder target; Parameters estimation; Electromagnetic scattering data; Relative positions

1 引言

为实现对弹道目标进行实时成像和属性识别,宽带雷达体制越来越多地应用于弹道导弹防御系统^[1],而在弹道目标2维成像算法还尚处于探索的阶段,其高分辨距离像是一种重要的识别特征^[2]。目标单幅高分辨距离像反映了目标丰富的径向空间结构信息,而受弹道中段弹头进动的影响^[3,4],其多幅连续距离像构成的1维距离像序列则包含着目标的进动调制信息,因此,基于弹道目标的1维距离像序列可以实现目标进动及结构参数估计,如何在未知参数信息的条件下实现进动和结构参数的联合估计

是弹头目标特征提取领域的难题。

基于高分辨距离像序列的目标特征提取及识别方法的研究,国内外学者均有所涉及。文献[5]和文献[6]利用序列高分辨距离像分别对空中和海上目标进行分类与识别;Marple^[7]阐述了微动目标时间、空间和频率3维特征空间的概念,将微多普勒、距离像序列和ISAR像分别与时间-频率像、时间-距离像和距离-多普勒像对应,将距离像序列与微动特性联系起来,文献[8]利用时间-距离像的距离和差值序列提取目标不同散射点的摆动参数。美国海军研究实验室Chen^[9,10]首次将微多普勒概念引入雷达探测领域,并系统研究了微运动和微多普勒现象,对刚体目标的旋转所产生的微多普勒进行了理论分析与研究。基于1维距离像序列的弹道目标微动特征参

2012-07-25 收到, 2012-12-04 改回

*通信作者: 姚汉英 yhy282930@163.com

数估计问题,国内目前均是假设弹头为锥体,且通常需要已知目标结构参数^[11-13],文献[14]和文献[15]本质上都是利用雷达观测视角的变化来进行目标的特征提取,文献[16]在特定视角范围内,基于锥体目标顶部散射中心及底部边缘对称分布散射中心的时间-距离像实现了目标进动特征和结构特征的联合估计,但考虑到雷达部署位置及探测性能的影响,实际中要在该视角范围内实现弹道目标的有效探测很难。

弹头目标多为旋转对称目标,且像美国“民兵-III”和俄罗斯“白杨-M”等型号导弹弹头为锥柱组合体,其中间锥柱结合部分存在不连续环,这时主要散射特性不仅仅限于弹头顶部和底部边缘,中间的不连续环也会产生较强的散射。基于此,本文以旋转对称锥柱体目标为研究对象,基于静态电磁散射数据仿真分析了不同姿态角范围内锥柱体目标的1维距离像特性,在常见的弹道目标雷达观测视角范围内,结合各散射中心间相对位置变化的极值信息提出了锥柱体目标进动和结构参数联合估计新方法,最后通过电磁散射数据验证了该方法的有效性。

2 锥柱体目标运动模型

在弹道飞行中段,弹道目标的运动主要包括目标质心的高速轨道运动和目标自身的自旋、锥旋、进动和章动等微运动。中段弹道目标一般在大气层外近地空间飞行,假设不考虑目标飞行过程中空气动力作用以及其它天体对目标运动的影响,即只考虑地球引力作用,这时可将其视为二体运动,目标轨道运动示意图如图1(a)所示。弹道平面内弹道目标任意时刻的弹道参数可以通过关机点参数并结合弹道方程进行求解,具体过程参考文献[17],限于篇幅,这里不再复述。通过求解弹道方程获取弹道目标任一时刻在地心坐标系下的位置矢量,结合雷达在地心坐标系中的位置,可得弹道中段任一时刻雷达相对弹道目标的位置矢量 \mathbf{p} 。

弹头在弹道中段惯性飞行时,会存在自旋和锥旋运动,其合成即产生目标的进动,描述其主要参数有进动角、锥旋频率和自旋频率。其中,地心坐标系下进动轴的方向矢量 \mathbf{q} 可由再入点的弹道倾角来决定。若弹头为旋转对称锥柱体,以目标质心为原点建立弹道中段锥柱体目标进动模型如图1(b)所示。图中目标进动轴为 Oz 轴,进动轴与雷达视线确定的平面为 yOz 平面,再根据右手定则建立 $Oxyz$ 参考坐标系。设 $Ox'y'z'$ 为弹体坐标系,弹头绕其对称轴 Oz' 以角速度 ω_s 做自旋运动,同时 Oz' 绕轴 Oz 以角速度 ω_p 锥旋,进动角为 θ_p , ϑ 为雷达视线相对弹道目标进动轴的夹角,其值可依据 \mathbf{p} 和 \mathbf{q} 求得

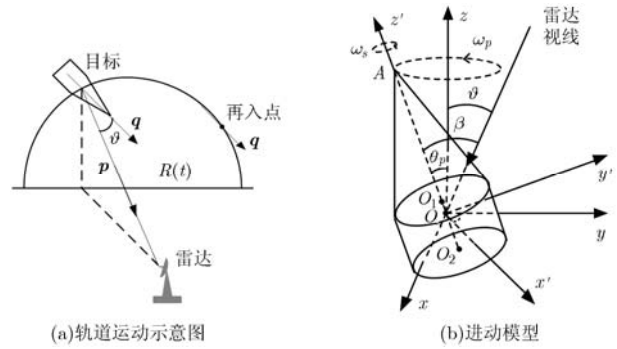


图1 锥柱体目标运动模型

$$\vartheta = \arccos\left(\frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}}{|\mathbf{p}| \cdot |\mathbf{q}|}\right) \quad (1)$$

式中 $|\cdot|$ 表示对矢量进行取模运算。

图1(b)中 β 即为旋转对称目标相对于雷达视线的姿态角,设 t 时刻锥体轴线在固定坐标系中的相位角为 $\varphi_p = \omega_p t + \varphi_{p0}$, φ_{p0} 为零时刻弹头顶部轨迹的圆心到弹头顶部连线与 x 轴的夹角,则 t 时刻锥体轴线的矢量 $\mathbf{r}_1 = [\sin\theta_p \cos\varphi_p, \sin\theta_p \sin\varphi_p, \cos\theta_p]^T$,雷达波入射的反方向的单位矢量可表示为 $\mathbf{r}_2 = [0, \sin\vartheta, \cos\vartheta]^T$,则 β 可表示为

$$\cos\beta = \frac{\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1| \cdot |\mathbf{r}_2|} = \cos\theta_p \cos\vartheta + \sin\theta_p \sin\vartheta \sin\varphi_p \quad (2)$$

由式(2)可知,当 $\sin\varphi_p = 1$ 时, β 有极小值 $\beta_{\min} = |\vartheta - \theta_p|$,当 $\sin\varphi_p = -1$ 时, β 有极大值 $\beta_{\max} = \vartheta + \theta_p$,弹道目标进动将造成 β 的振荡,进动角频率 ω_p 决定了 β 的振荡频率,振荡范围为 $[|\vartheta - \theta_p|, \vartheta + \theta_p]$ 。

3 锥柱体目标的1维距离像分析

图2显示了CAD软件建立的锥柱体目标模型观测视角示意图,图中 R 为柱底半径, α 为半锥角, O 为目标质心,也是目标进动时锥旋轴与自旋轴的交点。对于锥柱体目标而言,除特定视角下的锥面、柱面和底面的强散射外,其等效点散射中心主要由目标顶部点散射中心 A 、电磁波入射方向与目标旋转对称轴所构成的平面与锥柱结合处不连续环形边缘及底部边缘的交点来确定,即图中所示的 B, C, B' 和 C' ,这些边缘点散射中心随着目标进动在边缘环上滑动^[18]。考虑遮挡效应的影响,依据姿态角 β 在 $[0, \pi]$ 范围内可观测的主要点散射中心的不同,可将其分成4个观测区域:(1)区域I($0 \leq \beta < \alpha$):可观测的点散射中心为 B', A, B 和 C ;(2)区域II($\alpha \leq \beta < \pi/2$):可观测的点散射中心为 A, B 和 C ;(3)区域III($\pi/2 < \beta \leq \pi - \alpha$):可观测的点散射中心为 A, B, C 和 C' ;(4)区域IV($\pi - \alpha < \beta \leq \pi$):可观测的点散射中心为 B, C 和 C' 。

对上述锥柱体目标模型进行电磁仿真计算,结

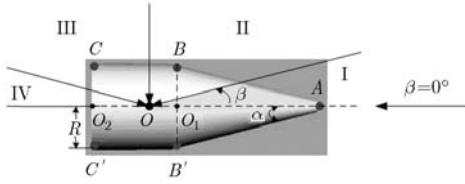


图 2 锥柱体目标观测示意图

合目标进动模型以合成目标的 1 维距离像序列。目标模型参数设置如下： $|O_1O_2|=1\text{ m}$ ， $|OO_1|=0.2\text{ m}$ ， $|O_2A|=3\text{ m}$ ， $R=0.5\text{ m}$ ，锥体顶部曲率半径 $r=0.075\text{ m}$ ，目标进动频率为 0.5 Hz 。基于计算数据进行回波仿真时，雷达中心频率为 9 GHz ，带宽为 2 GHz ，频率间隔为 10 MHz ，姿态角为 $0^\circ\sim 180^\circ$ ，取样间隔为 0.1° ，信噪比 $\text{SNR}=20\text{ dB}$ 。4 个观测区域内仿真时平均视线角和进动角分别设置为：区域 I ($\vartheta=7^\circ, \theta_p=5^\circ$)，区域 II ($\vartheta=45^\circ, \theta_p=10^\circ$)，区域 III ($\vartheta=130^\circ, \theta_p=10^\circ$)，区域 IV ($\vartheta=165^\circ, \theta_p=10^\circ$)，需说明一点的是由于区域 IV 的视角范围较小，且当姿态角接近 180° 时，底面反射渐显，散射强度很强会导致其它散射中心在图中不可见，故选择该区域的视角范围时部分超出了前述规定的姿态角范围，但不影响后续对该观测区域散射特性的分析。

图 3 所示为上述各区域设定的姿态角下电磁仿真数据合成得到的 1 维距离像序列。各散射中心的散射强度差异较大，为便于观测，对 1 维距离像幅

度做了取对数预处理。生成 1 维距离像时统一以目标质心为参考点，即图中距离均为相对参考点的距离，相对距离的表示与雷达视线有关，故在图 3(a)和图 3(b)中散射中心 A 的距离为负值，而在图 3(c)和图 3(d)中则变成了正值，另外，为了方便显示，图 3(a)、图 3(b)与图 3(c)、图 3(d)的纵坐标尺度不同。通过比较分析图 3 中 4 幅图像，可得出以下结论：(1)各区域可观测的点散射中心数目与前述分析一致；(2)顶部点散射中心的 1 维距离像序列呈正弦规律变化，而边缘点散射中心的 1 维距离像序列则偏离正弦规律变化；(3)相对区域 I 和区域 IV 而言，视线角位于区域 II 和区域 III 时点散射中心间散射强度差异小，投影距离可区分性大，1 维距离像序列连续性好，利于目标特征的提取。

综合考虑雷达探测性能和上述各个区域内目标散射特性的影响，本文在此主要研究观测视角范围在区域 II 内时，如何利用锥柱体目标上可见的 3 个点散射中心 1 维距离像序列进行目标的进动和结构参数提取，考虑到在区域 II 内姿态角分别为 $\pi/2 - \alpha$ 和 $\pi/2$ 时存在较强的锥面和柱面强散射，导致点散射中心回波强度较弱不利于散射中心位置的获取，且姿态角越接近 $\pi/2$ 时，点散射中心 B 与 C 的可区分性越小，故在此将区域 II 的范围可进一步缩小为 $\alpha \leq \beta \leq \pi/2 - \alpha$ ，考虑姿态角的振荡特性，则可得视线角范围为 $\alpha + \theta_p \leq \vartheta \leq \pi/2 - \alpha - \theta_p$ ，在此视线角

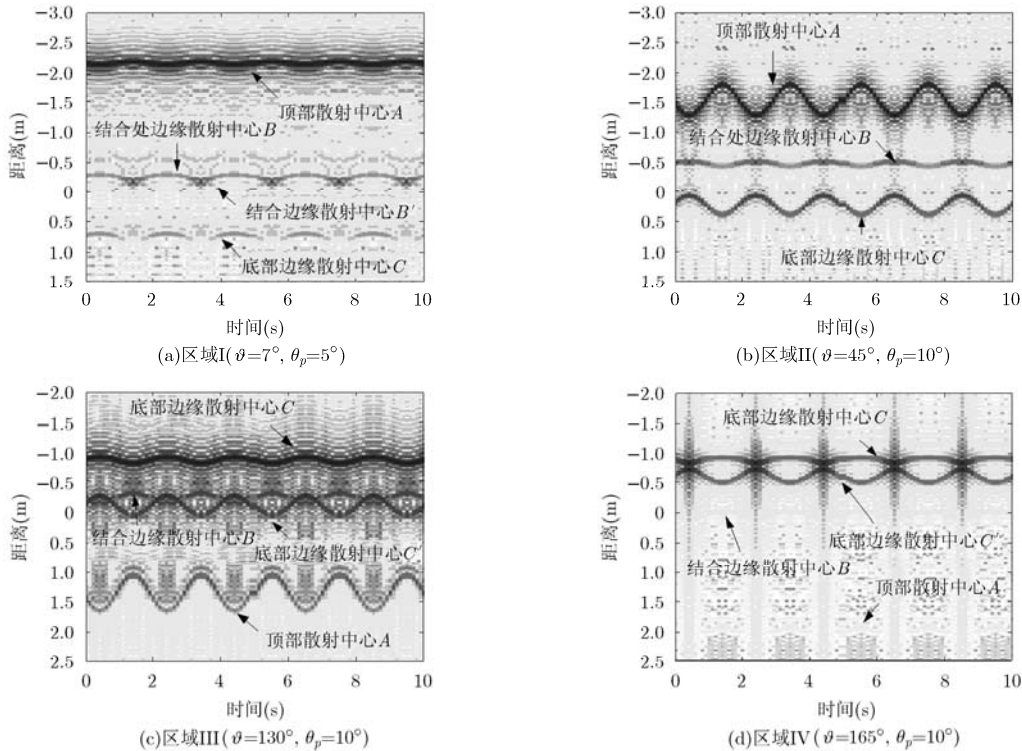


图 3 不同观测区域内 1 维距离像序列

范围内锥柱体目标主要存在 A 、 B 和 C 3 个点散射中心。由于地基雷达采用窄宽带交替模式工作，且弹道目标相对地基雷达距离较远，故假设目标的轨道运动已被补偿，短时间内观测平均视线角不变，设某一时刻雷达到目标质心的距离为 L ，参考距离为 L_0 ，对接收的线性调频信号进行解线频调处理，可得该时刻目标的 1 维距离像，由图 2 的目标观测模型， A 、 B 和 C 3 个点散射中心与参考点间的距离在雷达视线上的投影可分别表示为

$$L_A(t) = L - L_0 - |OA| \cos \beta(t) \quad (3)$$

$$L_B(t) = L - L_0 - R \sin \beta(t) - |OO_1| \cos \beta(t) \quad (4)$$

$$L_C(t) = L - L_0 - R \sin \beta(t) + |OO_2| \cos \beta(t) \quad (5)$$

由式(2)可知，受目标进动的影响， $\cos \beta(t)$ 服从正弦规律变化，从上述相对距离投影公式可以看出，各散射中心相对投影距离变化的周期一致，均为姿态角的变化周期(即进动周期)，顶部散射中心 A 的距离像序列呈正弦规律变化，而边缘点散射中心 B 和 C 呈偏离正弦规律变化，与上述仿真结果一致。

4 基于 1 维距离像序列的目标微动及结构参数提取

上述模型涉及到未知的进动参数为进动周期 $T_p = 2\pi/\omega_p$ 和进动角 θ_p ；描述锥柱体的未知结构参数为半锥角 α ，柱底半径 R ，柱体高度 $|O_1O_2|$ ，锥体高度 $|O_2A|$ 和质心相对顶点的位置 $|OA|$ 。基于 1 维距离像序列对目标进动周期的估计报道比较多，本文利用的是散射中心间相对位置信息进行特征提取，与进动周期关系不大，故文中对其的提取方法不再复述^[11,13]。下面主要考虑在上述分析的区域 II 姿态角范围内，如何利用 3 个点散射中心之间相对位置的极值信息，进行锥柱体目标的进动和结构参数提取。散射中心的位置信息可以基于状态空间模型(State Space Model, SSM)的方法来提取，SSM 算法是一种超分辨率算法，具有良好的抗噪性能和参数估计精度，可以用来有效地提取散射中心幅度和相位延迟等信息^[19]。

由式(3)、式(4)和式(5)可得散射中心 A 、 B 与 B 、 C 之间的在雷达视线上的相对距离投影变化分别为

$$\begin{aligned} L_{AB}(t) &= |O_1A| \cos \beta(t) - R \sin \beta(t) \\ &= |AB| \cos [\alpha + \beta(t)] \end{aligned} \quad (6)$$

$$L_{BC}(t) = |BC| \cos \beta(t) \quad (7)$$

若取目标的质心为参考点，即 $L=L_0$ ，则姿态角分别取 $\beta_{\max} = \vartheta + \theta_p$ 和 $\beta_{\min} = \vartheta - \theta_p$ 时，对应散射中心 A 距参考点的距离在雷达视线上的投影分别有极大值 $L_{A_{\max}} = -|OA| \cos(\vartheta + \theta_p)$ 和极小值 $L_{A_{\min}} = -|OA|$

$\cdot \cos(\vartheta - \theta_p)$ ，此时对应各散射中心在雷达视线上的相对距离投影分别有极小值 $L_{AB_{\min}} = |AB| \cos(\alpha + \vartheta + \theta_p)$ ， $L_{BC_{\min}} = |BC| \cos(\vartheta + \theta_p)$ 和极大值 $L_{AB_{\max}} = |AB| \cos(\alpha + \vartheta - \theta_p)$ ， $L_{BC_{\max}} = |BC| \cos(\vartheta - \theta_p)$ ，可得

$$\left. \begin{aligned} L_{AB_{\max}} + L_{AB_{\min}} &= 2|AB| \cos(\alpha + \vartheta) \cos \theta_p \\ L_{AB_{\max}} - L_{AB_{\min}} &= 2|AB| \sin(\alpha + \vartheta) \sin \theta_p \\ L_{BC_{\max}} + L_{BC_{\min}} &= 2|BC| \cos \vartheta \cos \theta_p \\ L_{BC_{\max}} - L_{BC_{\min}} &= 2|BC| \sin \vartheta \sin \theta_p \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由上述各散射中心间相对距离投影的极值关系，可得

$$\frac{\tan(\alpha + \vartheta)}{\tan \vartheta} = \frac{\lambda_{B-}}{\lambda_{B+}} \quad (9)$$

其中 $\lambda_{B+} = \frac{L_{AB_{\max}} + L_{AB_{\min}}}{L_{BC_{\max}} + L_{BC_{\min}}}$ ， $\lambda_{B-} = \frac{L_{AB_{\max}} - L_{AB_{\min}}}{L_{BC_{\max}} - L_{BC_{\min}}}$ 。

由式(9)可以通过 2 维搜索的方式，对 α 和 ϑ 的数值进行粗估计，考虑到粗估计值 $\tilde{\alpha}$ 和 $\tilde{\vartheta}$ 比较敏感于等式右边的比值，可以通过在比值临近范围内进行多次搜索取均值的方式以减小粗估计误差。

令锥柱体结构中 $\frac{|BC|}{|AB|} = \rho$ ， ρ 反映了锥柱体目

标的结构信息， ρ 的估计值可表示为

$$\hat{\rho} = \begin{cases} \eta_c / \lambda_{B+}, & \tilde{\vartheta} < \vartheta_0 \\ \sqrt{\frac{\eta_c \eta_s}{\lambda_{B+} \lambda_{B-}}}, & \vartheta_0 \leq \tilde{\vartheta} \leq \vartheta_1 \\ \eta_s / \lambda_{B-}, & \tilde{\vartheta} > \vartheta_1 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中， ϑ_0 和 ϑ_1 即用来区分视线角范围的两个阈值， λ_{B+} 和 λ_{B-} 可通过散射中心间相对距离投影大小来进行估计，而 $\eta_c = \frac{\cos(\tilde{\alpha} + \tilde{\vartheta})}{\cos \tilde{\vartheta}}$ ， $\eta_s = \frac{\sin(\tilde{\alpha} + \tilde{\vartheta})}{\sin \tilde{\vartheta}}$ 和 $\sqrt{\eta_s \eta_c}$ 相当于对 3 种表达式中单纯由 λ_{B+} 和 λ_{B-} 估计的 $\hat{\rho}$ 进行修正，在此将其称作修正因子，且有 $\eta_c < 1$ ， $\eta_s > 1$ ，当修正因子趋近于 1 时，即单纯由 λ_{B+} 和 λ_{B-} 估计得到的 $\hat{\rho}$ 越接近真实值。

图 4 所示在 α 分别为 5° 、 10° 和 15° 时，3 类修正因子随视线角的变化情况。可以看出，在视线角处于不同范围时，各个修正因子的取值也不尽相同，选取最接近于 1 的修正因子表达式用作对 ρ 的估计，可保证 ρ 的估计精度。依据粗估计得到的 $\tilde{\alpha}$ 可以选择阈值 ϑ_0 和 ϑ_1 ，再由粗估计值 $\tilde{\vartheta}$ 选择对应的修正因子表达式即可实现 ρ 较准确估计值，如 $\tilde{\alpha} = 10^\circ$ ， $\tilde{\vartheta} = 60^\circ$ ，依据图 4，若保证 ρ 估计的相对误差在 10% 以内，阈值可取为 $\vartheta_0 = 25^\circ$ 和 $\vartheta_1 = 55^\circ$ ，再由式(10)，选择修正因子 η_s 可实现 ρ 的高精度估计，这时，相比其它修正因子， η_s 也是最接近于 1 的。

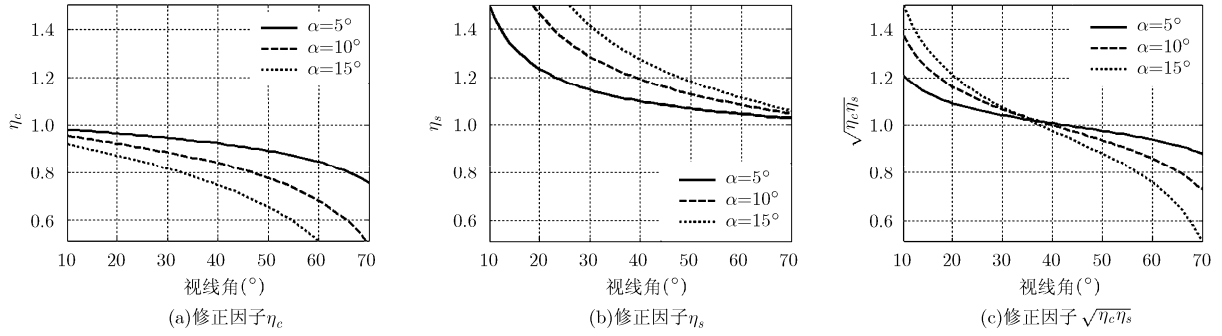


图 4 修正因子随视线角的变化情况

根据估计得到的 $\hat{\rho}$ 值，由式(8)的关系式，雷达观测的视线角 ϑ 可进一步精确估计为

$$\hat{\vartheta} = \arcsin \sqrt{(k_c^2 - 1) / (k_c^2 - k_s^2)} \quad (11)$$

式中 $k_c = \hat{\rho} \lambda_{B+}$, $k_s = \hat{\rho} \lambda_{B-}$ ，利用估计值 $\hat{\vartheta}$ ，半锥角 α 的精确估计值为

$$\hat{\alpha} = \arccos(k_c \cos \hat{\vartheta}) - \hat{\vartheta} \text{ 或 } \hat{\alpha} = \arcsin(k_s \sin \hat{\vartheta}) - \hat{\vartheta} \quad (12)$$

由精确估计值 $\hat{\vartheta}$ 和 $\hat{\alpha}$ ，进动角 θ_p 可估计为

$$\hat{\theta}_p = \arctan \left[\cot(\hat{\alpha} + \hat{\vartheta}) \cdot \frac{L_{AB \max} - L_{AB \min}}{L_{AB \max} + L_{AB \min}} \right] \quad (13)$$

目标的尺寸信息 $|AB|$ 可估计为

$$|AB| = \frac{L_{AB \max} + L_{AB \min}}{2 \cos(\hat{\alpha} + \hat{\vartheta}) \cos \hat{\theta}_p} \quad (14)$$

求出 $|AB|$ 后，进而可以求出 $|BC| = \rho |AB|$, $\hat{R} = |AB| \cdot \sin \hat{\alpha}$, $|O_2A| = |AB| \cdot \cos \hat{\alpha}$ ，这些尺寸信息即可表征锥柱体目标的结构信息。

此外，由顶部散射中心 A 相对参考点投影距离的极大极小值，结合估计得到的视线角和进动角，进而可估计出目标质心的相对位置 $|OA|$ 。

$$|OA| = \frac{L_{A \max} - L_{A \min}}{2 \sin \hat{\vartheta} \sin \hat{\theta}_p} \quad (15)$$

至此，通过在区域 II 观测视角内目标各散射中心的 1 维距离像序列完成了本节开始所述的锥柱体目标的进动和结构参数的估计，具体估计流程如图 5 所示。

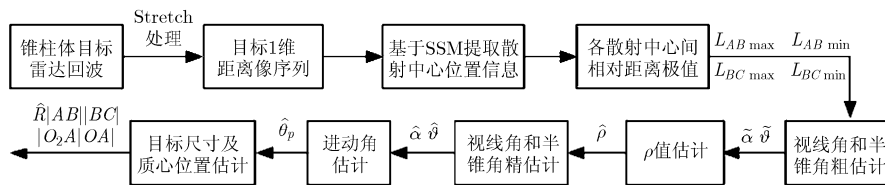


图 5 锥柱体目标进动和结构参数估计流程图

5 仿真与分析

弹道目标运动仿真参数设置如下：导弹关机点位于东经 138.1° ，北纬 51.5° ，离地球表面高度为 180 km，关机点速度为 6.5 km/s，落点坐标位置为西经 114.6° ，北纬 37.9° ，再入点高度为 100 km，雷达位于西经 133.0° ，北纬 40.2° ，锥柱体目标进动频率为 0.5 Hz，进动角为 10° 。仿真得弹道中段弹头目标相对雷达的实时姿态角序列如图 6 所示，图中反映了实时姿态角围绕雷达平均视线角振荡，左上角曲线为短时间内姿态角的变化情况，可见其具有明显的周期性。锥柱体目标模型仍采用图 2 中的 CAD 模型，则 $\alpha = 14.04^\circ$ ，不考虑面散射中心的影响，则本文讨论的可用于特征提取的姿态角范围为 $14^\circ \sim 76^\circ$ ，由图 6 可知这一姿态角范围覆盖了弹道

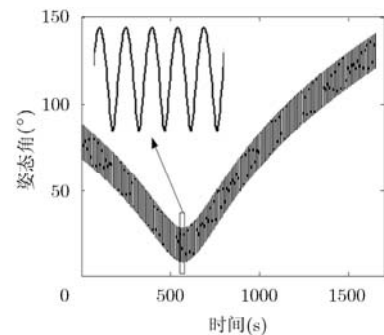


图 6 目标姿态角变化序列

目标接近 60% 的探测时段，且是对弹道目标探测的关键时段。而要实现区域 III 内对弹道目标长时间有效探测和特征提取，则需要雷达部署在发射点附近甚至于后方，且雷达探测距离足够远，这实际上

是很难做到的^[20], 因此研究观测视角在区域 II 内弹道目标特征提取问题更具实际意义。

锥柱体目标模型参数和雷达体制参数与第 3 节设置相同, 图 7 分别显示了图 6 探测时段内 500~510 s, 750~760 s 和 900~910 s 内的 1 维距离像序列, 其对应的平均视线角分别为 20.54°, 39.70° 和 61.63°, 3 个时间段的 1 维距离像序列对应的视线角观测范围均在文中描述的区域 II 内, 随着视线角的增大, 1 维距离像长度逐渐减小, 即散射中心在雷达视线上的投影距离间距越来越小。当散射中心 A 的距离为极小值时, 对应散射中心 B 和 C 的投影距离为极大值, 依据前文分析, 此时对应 $L_{AB\max}$ 和 $L_{BC\max}$; 反之, 当散射中心 A 的距离为极大值时, 对应散射中心 B 和 C 的投影距离为极小值, 此时对应 $L_{AB\min}$ 和 $L_{BC\min}$ 。

对图 7 中每个时间段的 1 维距离像序列 5 个周期内应用 SSM 算法分别提取散射中心 A, B 和 C 的极大值和极小值位置信息, 并进行平均得到各个时间段散射中心平均极值位置如表 1 所示。

表 1 散射中心平均极值位置

时间段(s)	散射中心平均极大值 (m)			散射中心平均极小值 (m)		
	A	B	C	A	B	C
500~510	-1.92	-0.28	0.71	-2.17	-0.42	0.45
750~760	-1.45	-0.42	0.45	-1.92	-0.51	0.14
900~910	-0.72	-0.51	0.12	-1.37	-0.55	-0.21

得到的各散射中心的极值位置信息后, 经多次粗估计得 3 个时间段内的视线角和半锥角平均值分别为: 500~510 s 时 $\tilde{\vartheta} = 24.47^\circ, \tilde{\alpha} = 11.73^\circ$; 750~760 s 时 $\tilde{\vartheta} = 41.96^\circ, \tilde{\alpha} = 10.49^\circ$; 900~910 s 时 $\tilde{\vartheta} = 59.33^\circ, \tilde{\alpha} = 12.69^\circ$ 。可见 2 维搜索得到的粗估计值与真实值间的误差较大, 取 $\vartheta_0 = 25^\circ$ 和 $\vartheta_1 = 55^\circ$, 利用式(10)~式(15), 估计目标的特征参数并取平均得

到 3 个时间段内进动及结构参数估计值及误差如表 2 所示, 从表中可以看出视线角和半锥角的估计精度较粗估计的结果有了明显的提高, 但较其他参数而言, 其误差较大, 这是因为视线角取的是平均视线角, 锥柱体建模时顶部存在较小的曲率半径, 因此视线角和半锥角用于比较的真实值选取时有一定的随机性。表中 900~910 s 时间段内参数的估计精度要低于其它两个时间段, 这是由于此时对应视线角大, 散射中心间可区分度变小, 极值间相对位置误差增大导致的。从总体上看, 表中角度估计误差在 1.0° 以内, 目标尺寸估计误差在 0.15 m 以内, 说明本文方法可以有效提取锥柱体目标的进动及结构参数。在同等条件下文献[16]对锥体目标角度估计误差在 0.5° 以内, 目标尺寸估计误差在 0.05 m 以内, 相比较而言, 本文方法估计精度要偏低, 这是因为文献[16]直接利用获取的散射中心相对位置信息进行参数估计, 而本文先通过散射中心间相对位置信息修正估计得到 ρ , 进而实现进动和结构参数的估计, 这样 ρ 的估计误差会以误差积累的形式影响后续参数的估计精度, 且文献[16]中实验室基于理论仿真数据, 而本文是基于电磁计算数据, 电磁仿真时目标模型及计算误差也会对后续参数估计精度产生影响。

表 2 特征参数估计值及误差

特征参数	时间段					
	500~510 s		750~760 s		900~910 s	
	估计值	误差	估计值	误差	估计值	误差
$\vartheta(^{\circ})$	20.89	0.35	40.23	0.53	60.70	-0.93
$\alpha(^{\circ})$	13.26	-0.78	13.07	-0.97	14.88	0.84
$\theta_p(^{\circ})$	9.69	-0.31	9.71	-0.29	9.22	-0.78
$ O_2A $ (m)	2.02	0.02	2.02	0.02	2.14	0.14
$ BC $ (m)	1.01	0.01	1.01	0.01	1.03	0.03
R (m)	0.48	-0.02	0.47	-0.03	0.57	0.07
$ OA $ (m)	2.11	-0.09	2.16	-0.04	2.31	0.11

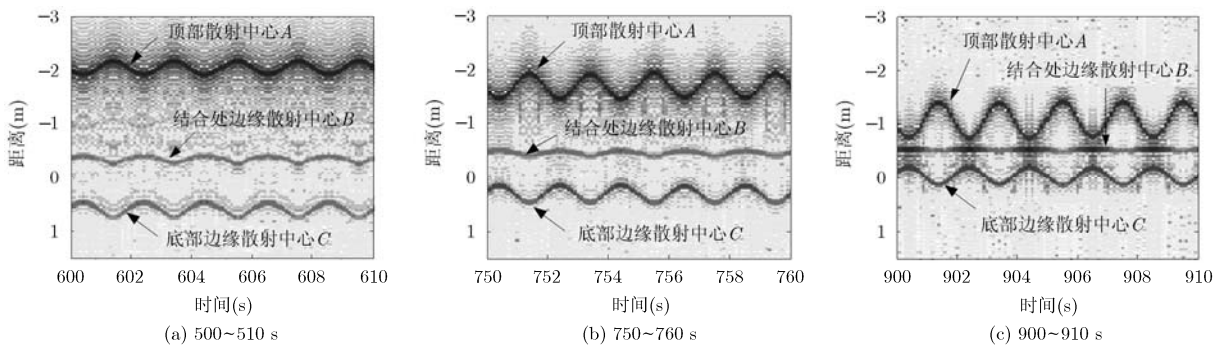


图 7 不同时间段锥柱体目标 1 维距离像序列

最后,对文中所提的修正因子对参数估计结果的影响做一简要分析。表3列出了不同修正因子表达式对参数估计结果的影响。图8所示为750~760 s时对式(11)采用不同的修正因子表达式,估计得到锥柱体目标尺寸结构示意图。图中实线、虚线和点划线分别对应修正因子 $\sqrt{\eta_s \eta_c}$, η_c 和 η_s 估计得到的参数进行目标尺寸反演的结果,圆点、星号和圆圈分别对应其质心的位置。对比锥柱体目标的真实尺寸信息,从表3和图8可以看出,在750~760 s内平均视线角接近 40° 的情况下,采用式(11)中带有修正因子 $\sqrt{\eta_s \eta_c}$ 的表达式对目标参数的提取精度是最高的,而采用修正因子为 η_c 和 η_s 的表达式会分别产生目标尺寸的偏小和偏大估计,因此依据不同的视线角选取对应的修正因子表达式估计 ρ ,进而估计目标的特征参数是很有必要的。

表3 不同修正因子表达式对参数估计的影响

特征参数	$\sqrt{\eta_s \eta_c}$ 表达式	η_c 表达式	η_s 表达式
$\vartheta(^{\circ})$	40.23	34.62	46.18
$\alpha(^{\circ})$	13.07	12.97	12.63
$\theta_p(^{\circ})$	9.71	11.84	7.91
$ O_2A $ (m)	2.02	1.80	2.32
$ BC $ (m)	1.01	0.94	1.11
R (m)	0.47	0.42	0.52
$ OA $ (m)	2.12	2.02	2.38

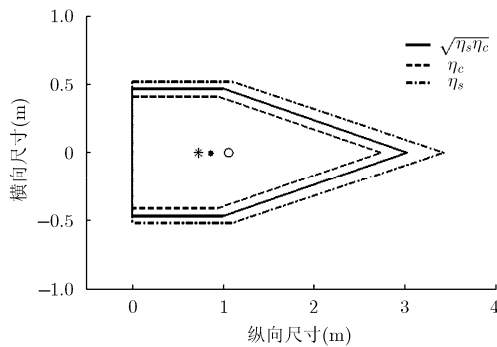


图8 不同修正因子对应的目标尺寸反演结果

6 结束语

本文基于电磁散射数据分析了锥柱体弹头目标在4个不同观测区域内的1维距离像特性,包括散射中心的强度和位置变化规律等,在常见弹道目标的探测视角范围内,基于点散射中心间相对位置的极值变化信息,提出了一种锥柱体目标的进动及结构参数联合估计的方法。仿真实验在弹道目标运动的3个时间段(对应文中区域II的姿态角范围)实现

了其进动和结构参数的联合估计,验证了文中方法的有效性,在信噪比为20 dB时,存在电磁仿真模型和计算误差时,获得了较高的参数估计精度。最后,分析了文中提出的不同修正因子表达式对估计结果的影响情况。下一步将分析不同信噪比时利用本文方法对锥柱体目标各参数估计精度的影响。

参考文献

- [1] Camp W W, Mayhan J T, and O'Donnell R M. Wideband radar for ballistic missile defense and range-Doppler imaging of satellites[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000, 12(2): 267-280.
- [2] Clark M E. High range resolution techniques for ballistic missile targets[C]. *High Resolution Radar and Sonar, IEE Colloquium*, Cowes, UK, 1999: 6/1-6/13.
- [3] 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.
- [4] Liu L H, McLernon D, Ghogho M, et al. Ballistic missile detection via micro-Doppler frequency estimation from radar return[J]. *Digital Signal Processing*, 2012, 22(1): 87-95.
- [5] Shui Peng-lang, Xu Shu-wen, and Liu Hong-wei. Range-spread target detection using consecutive HRRPs[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 647-665.
- [6] Pilcher C M. Maritime automatic target recognition using high resolution radar range profiles and classifier combination[D]. Southern Methodist University, 2009.
- [7] Marple L. Sharpening techniques for sensor feature enhancement[OL]. 2005, http://www.vissta.ncsu.edu/workshop/presentations/Marple/Marple_afosr05.ppt.
- [8] 贺峰, 刘承兰, 朱国富, 等. 基于距离和差值序列的复杂运动目标微动特征提取[J]. *电子学报*, 2012, 40(3): 422-428. He Feng, Liu Cheng-lan, Zhu Guo-fu, et al. Micro-motion signature extraction of targets with complex motions based on summation and difference sequence of ranges[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(3): 422-428.
- [9] Chen V C. Micro-Doppler effect in radar phenomenon, model, and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [10] Chen V C. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics: a review[C]. *Proceedings of SPIE on Independent Component Analysis, Wavelets, and Neural Networks*, Orlando, USA, 2003: 240-249.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 颜维, 孙文峰, 钱李昌, 等. 基于一维像序列的弹道中段目标进动特征提取[J]. 空军雷达学院学报, 2011, 25(2): 87-90.
Yan Wei, Sun Wen-feng, Qian Li-chang, *et al.*. Precession feature extraction of ballistic mid-course target based on HRRP sequences[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2011, 25(2): 87-90.
- [14] 艾小锋, 李永祯, 赵锋, 等. 基于多视角一维距离像序列的进动目标的特征提取[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2846-2851.
Ai Xiao-feng, Li Yong-zhen, Zhao Feng, *et al.*. Feature extraction of precession targets using multi-aspect observed HRRP sequences[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(12): 2846-2851.
- [15] 雷腾, 刘进忙, 杨少春, 等. 基于三站一维距离像融合的弹道目标特征提取方法研究[J]. 宇航学报, 2012, 33(2): 228-234.
Lei Teng, Liu Jin-mang, Yang Shao-chun, *et al.*. Study on feature extraction method of ballistic target based on three-station range profiles[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(2): 228-234.
- [16] 艾小锋, 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.
- [17] 张毅, 肖龙旭, 王顺宏. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999: 173-199.
Zhang Yi, Xiao Long-xu, and Wang Shun-hong. *Ballistics of Ballistic Missile*[M]. Changsha: Press of National University of Defense Technology, 1999: 173-199.
- [18] 马梁, 刘进, 王涛, 等. 旋转对称目标滑动型散射中心的微 Doppler 特性[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(5): 605-616.
Ma Liang, Liu Jin, Wang Tao, *et al.*. Micro-Doppler characteristics of sliding-type scattering center on rotationally symmetric target[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2011, 41(5): 605-616.
- [19] Naishadham K and Piou J E. A robust state space model for the characterization of extended returns in radar target signatures[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(6): 1742-1751.
- [20] 马梁. 弹道中段目标微动特性及综合识别方法[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2011.
- 姚汉英: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为雷达成像与目标识别.
- 孙文峰: 男, 1970 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像与目标识别.
- 马晓岩: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达目标检测与现代信号处理.