

基于HRRP序列的钝头倒角锥目标微动特性分析及参数估计

苏楠 戴奉周* 刘宏伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 合适的弹头结构建模是正确估计弹头参数的基础。该文提出一种描述弹头的钝头倒角锥模型, 该模型将球冠散射中心和倒角散射中心看作是滑动散射中心, 并引入锥体侧面遮挡效应对散射中心位置的影响, 给出散射中心位置变化的一般形式; 接着分析了钝头倒角锥模型各个散射中心的微动特性; 在此基础上, 提出了一种估计目标运动参数和结构参数的非线性优化的方法; 最后, 仿真结果验证了该文模型的正确性及参数估计方法的有效性。

关键词: 目标识别; 钝头倒角锥模型; 遮挡效应; 微动特性; 参数估计

中图分类号: TN958.94

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)07-1751-07

DOI: 10.11999/JEIT180520

Micro-motion Characteristic Analysis and Parameters Estimation for Blunt-nosed Chamfered Cone Based on HRRP Sequence

SU Nan DAI Fengzhou LIU Hongwei

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Appropriate warhead structure modeling is the basis for warhead parameters estimation. In this paper, the warhead is modeled by the blunt-nosed chamfered cone model, which regards the spherical center and the chamfer scattering centers as the sliding centers and takes the influence of the side of the cone into account, the general form of the position of the scattering centers is given based on the model. Then, the micro-motion of the scattering centers in the blunt-nosed chamfered cone model is derived. Based on this, a nonlinear optimization method is proposed to estimate the target's motion parameters and structural parameters. Finally, simulation results verify the correctness of the model and the effectiveness of the parameter estimation method.

Key words: Target recognition; Blunt-nosed chamfered cone; Occlusion effect; Micro-motion characteristic analysis; Parameters estimation

1 引言

空间锥体目标识别是弹道导弹防御系统的重要环节。导弹飞行中段, 弹头与弹体分离后, 通常需要通过自旋稳定来保证再入姿态, 同时在扰动力矩的影响下, 弹头会发生进动或章动, 称之为微动^[1]。由于弹头与诱饵等非弹头目标在形状、质量上有明显差异, 其微动形式和参数具有明显的差异, 可以作为目标识别的依据^[2]。宽带回波由于带宽足够

宽, 能够从1维距离像序列上获得空间锥体目标由于微动引起的散射中心位置变化情况, 用来估计目标的结构和运动参数。

正确估计目标结构参数和运动参数的前提是建立合适的目标回波模型, 而目标结构建模是目标回波建模的基础。弹道导弹弹头最常用的模型为理想的圆锥体, 文献[3-9]都采用的是这种模型。它将锥顶近似为固定点, 忽略了球冠半径。这种模型结构简单, 计算方便, 但随着宽带雷达带宽增加和超分辨算法的应用, 距离分辨率提高, 这种模型不再合适, 文献[10,11]提出钝头平底锥模型, 认为锥顶是与锥体侧面相切的半球结构, 锥顶散射中心是在球冠表面滑动, 但没有给出散射中心位置变化的具体形式。文献[12]根据几何绕射理论(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)模型定义锥顶散射中心位于等效雷达视线与锥顶球心的连线与锥顶球面的交点, 认为锥顶散射中心在雷达视线上的投影为

收稿日期: 2018-05-28; 改回日期: 2019-04-25; 网络出版: 2019-05-06

*通信作者: 戴奉周 fzdai@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61671359), 国家杰出青年科学基金(61525105), 中央高校基本科研业务费(JB180210)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671359), The National Science Foundation for Distinguished Young Scholars (61525105), The Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (JB180210)

锥顶球心的投影加上锥顶球半径的两倍,并给出了散射中心的微多普勒模型。文献[13,14]采用了同样的锥顶散射中心模型,并且考虑了锥体侧面形成的反射中心,认为该散射中心的等效位置为与雷达视线方向相垂直的目标侧面的中点。这两种模型忽略了当锥体侧面遮挡球冠结构时散射中心的位置变化情况。除了球冠结构,某些弹头还会将弹头侧面与底面相交的部分倒圆角,但对这种结构的分析还未见文献。

结合以上工作,本文采用钝头倒角锥模型来描述弹头,考虑到球冠与倒角的半球结构,将球冠散射中心和倒角散射中心看作是滑动散射中心,散射中心的位置变化与球体表面散射中心位置变化类似,同时还引入锥体侧面遮挡效应对散射中心位置的影响,认为在某些视角范围内散射中心不再随着雷达视线俯仰角变化而滑动,给出了不同视角下3个散射中心的位置变化情况;接着分析了钝头倒角锥模型各个散射中心的进动特性。在此基础上,通过正弦曲线拟合的方法估计了目标的运动参数,通过非线性优化的方法获得了目标的结构参数。最后利用电磁仿真数据进行了仿真验证,实验结果验证了模型的正确性和参数估计方法的有效性。

2 钝头倒角锥模型

本文采用钝头倒角锥模型来描述弹头,其中钝头是指锥顶处与圆锥体相切的球冠结构,倒角是指锥体侧面与底面相交的部分倒圆角。钝头倒角锥模型如图1所示。

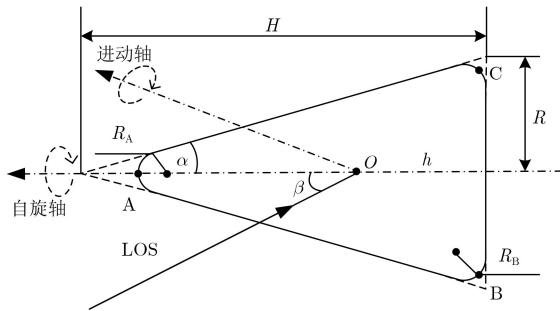


图1 钝头倒角锥模型

图1中, β 为雷达视线LOS与锥体对称轴的夹角, α 为半锥角,球冠为半径为 R_A 的半球,倒角半径为 R_B 。当 $R_B=0$ 时,模型简化为钝头平底锥模型;当 $R_A=0, R_B=0$ 时,模型简化为平底锥模型,所以钝头倒角锥模型是弹头模型的更一般形式。根据文献[7],光滑的平底锥包含3个散射中心,分别是锥顶以及雷达视线与散射中心构成的平面与锥体底面边缘的两个交点。同理,光滑的钝头平底锥也包含3个散射中心,分别为球冠散射中心A和倒角

散射中心B和C。考虑到球冠和倒角的半球结构,当宽带雷达距离分辨率足够高时,散射中心不能再看作是一个固定的点,而是随着雷达视线的变化在球冠表面滑动。

假设 t 时刻球冠球心位置为 $\mathbf{r}_A = (x_A, z_A)^T$,半径为 R_A ,雷达视线的单位矢量为 $\mathbf{n}(t) = (\sin \beta(t), \cos \beta(t))^T$,当雷达视线与锥体中轴夹角 $\beta(t)$ 小于半锥角 α 的余角,即 $\pi/2 - \alpha$ 时,认为球冠散射中心出现在穿过球心的雷达视线与球冠的交点,随着雷达视线的变化而在球冠表面滑动

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{AU}(t) &= \mathbf{r}_A + R_A \cdot \mathbf{n}(t) \\ &= (x_A + R_A \sin \beta(t), z_A + R_A \cos \beta(t))^T \quad (1) \end{aligned}$$

当 $\beta(t)$ 大于半锥角的余角时,穿过球心的雷达视线与球冠不再相交,由于锥体侧面的遮挡效应,认为球冠散射中心不再滑动,而是出现在球冠与锥体侧面的切点

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{AS}(t) &= (x_A + R_A \sin(\pi/2 - \alpha), z_A \\ &\quad + R_A \cos(\pi/2 - \alpha))^T \\ &= (x_A + R_A \cos \alpha, z_A + R_A \sin \alpha)^T \quad (2) \end{aligned}$$

锥底倒角的散射中心也满足上述模型,与球冠散射中心不同的是锥底倒角不仅存在被锥体侧面遮挡的情况,还存在被锥体底面遮挡的情况。直接给出散射中心B和C的位置矢量

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_{BU}(t) &= (x_B + R_B \sin \beta(t), z_B + R_B \cos \beta(t))^T \\ \mathbf{r}_{BS1}(t) &= (x_B + R_B \sin(\pi/2 - \alpha), z_B \\ &\quad + R_B \cos(\pi/2 - \alpha))^T \\ &= (x_B + R_B \cos \alpha, z_B + R_B \sin \alpha)^T \\ \mathbf{r}_{BS2}(t) &= (x_B + R_B \sin \pi, z_B + R_B \cos \pi)^T \\ &= (x_B, z_B - R_B)^T \\ \mathbf{r}_{CS1}(t) &= (x_C + R_C \sin(\pi/2 - \alpha), z_C \\ &\quad + R_C \cos(\pi/2 - \alpha))^T \\ &= (x_C + R_C \cos \alpha, z_C + R_C \sin \alpha)^T \\ \mathbf{r}_{CS2}(t) &= (x_C + R_C \sin \pi, z_C + R_C \cos \pi)^T \\ &= (x_C, z_C - R_C)^T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{r}_{BS1}(t)$ 和 $\mathbf{r}_{CS1}(t)$ 为锥底两个倒角与锥体侧面的切点的位置矢量, $\mathbf{r}_{BS2}(t)$ 和 $\mathbf{r}_{CS2}(t)$ 为锥底两个倒角与锥体底面切点的位置矢量, $\mathbf{r}_{BU}(t)$ 和 $\mathbf{r}_{CU}(t)$ 为锥底两个倒角与雷达视线的交点的位置矢量, $(x_B, z_B)^T, (x_C, z_C)^T$ 为锥底两侧倒角圆心的位置矢量, R_B, R_C 为半径,且 $R_B=R_C$ 。

由之前的分析可知,钝头倒角锥的3个散射中心的位置矢量在不同的 β 角下有不同的形式。表1给出了光滑球冠倒角锥的3个散射中心在不同 β 角下的散射中心位置矢量。

表1 不同β角下的散射中心位置矢量

	视角I 0 < β < α	视角II α < β < π/2 - α	视角III π/2 - α < β < π/2	视角IV π/2 < β < π - α	视角V π - α < β < π
A	$r_{AU}(t)$	$r_{AU}(t)$	$r_{AS}(t)$	$r_{AS}(t)$	-
B	$r_{BS1}(t)$	$r_{BS1}(t)$	$r_{BU}(t)$	$r_{BU}(t)$	$r_{BU}(t)$
C	$r_{CS1}(t)$	-	-	$r_{CS2}(t)$	$r_{CS2}(t)$

由于雷达对弹头的观测通常为迎头观测，而半锥角α通常较小，[α, π/2 - α]范围较大，由表1可知，散射中心A, B可见，坐标分别为 $r_{AU}(t)$ 和 $r_{BS1}(t)$ ，散射中心C被遮挡。

3 钝头倒角锥微动特性分析

由第2节可知，在雷达迎头照射弹头的情况下，可以观测到A, B两个散射中心，其坐标分别为

$$\left. \begin{aligned} r_{AU}(t) &= (x_A + R_A \sin \beta(t), z_A + R_A \cos \beta(t))^T \\ r_{BS1}(t) &= (x_B + R_B \cos \alpha, z_B + R_B \sin \alpha)^T \end{aligned} \right\} (4)$$

雷达视线的单位矢量为 $n(t) = (\sin \beta(t), \cos \beta(t))^T$ ，则散射中心在雷达视线上的投影距离 $R_{AU}(t)$ 和 $R_{BS1}(t)$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} R_{AU}(t) &= r_{AU}^T(t) \cdot n(t) \\ &= x_A \sin \beta(t) + z_A \cos \beta(t) + R_A \\ R_{BS1}(t) &= r_{BS1}^T(t) \cdot n(t) \\ &= x_B \sin \beta(t) + z_B \cos \beta(t) \\ &\quad + R_B \sin(\alpha + \beta(t)) \end{aligned} \right\} (5)$$

由式(5)可知，散射中心在雷达视线上的投影距离随β(t)的变化而变化，而β(t)是由雷达视线方向和锥体中轴指向共同决定的，因此需要先对进动条件下雷达视线方向变化进行分析，再计算散射中心在雷达视线上的投影距离。为了方便建立进动方程，建立如图2所示的坐标系，其中Oxyz是以自旋轴，即锥体中轴为z轴建立的连体坐标系，OXYZ是以进动轴为Z轴建立的参考坐标系，x轴在初始时刻与X轴重合，自旋轴与进动轴的夹角为φ。锥

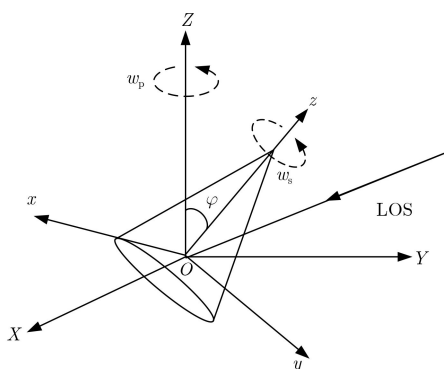


图2 钝头倒角锥进动模型

体以角速度 w_s 绕z轴作自旋运动，同时以角速度 w_p 绕Z轴做锥旋运动。雷达视线LOS在参考坐标系OXYZ中的俯仰角和方位角为(γ, η)。球冠和倒角的球心在Oxyz坐标系中的位置矢量分别为 (x_A, y_A, z_A) 和 (x_B, y_B, z_B) 。

对于光滑的钝头倒角锥，自旋运动不会引起散射中心变化，只需要考虑锥旋运动，则在t时刻，自旋轴在参考坐标系中的坐标为

$$\begin{aligned} r &= R_p(t) n_z \\ &= \begin{bmatrix} \cos(w_p t) \cos \varphi - \sin(w_p t) \cos(w_p t) \sin \varphi \\ \sin(w_p t) \cos \varphi \cos(w_p t) \sin(w_p t) \sin \varphi \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(w_p t) \sin \varphi & \sin(w_p t) \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}^T \end{aligned} (6)$$

其中， $R_p(t)$ 为锥旋矩阵， n_z 为自旋轴在参考坐标系中的坐标。雷达视线LOS在参考坐标系中的坐标为 $n_{LOS} = [\sin \gamma \cos \eta \quad \sin \gamma \sin \eta \quad \cos \gamma]^T$ ，则雷达视线与自旋轴的夹角β(t)为

$$\beta(t) = \arccos(r \cdot n_{LOS}) / \|r\| = a \cos(\cos \varphi \cos \gamma + \sin \varphi \sin \gamma \cos(w_p t - \eta)) (7)$$

将β(t)代入式(5)得到散射中心A和B在雷达视线上的投影分别为

$$\left. \begin{aligned} R_{AU}(t) &= x_A \sin(\arccos(a + b \sin(w_p t - \eta))) \\ &\quad + z_A (a + b \sin(w_p t - \eta)) + R_A \\ R_{BS1}(t) &= (x_B + R_B \cos \alpha) \\ &\quad \cdot \sin(\arccos(a + b \sin(w_p t - \eta))) \\ &\quad + (z_B + R_B \sin \alpha) (a + b \sin(w_p t - \eta)) \end{aligned} \right\} (8)$$

其中， $a = \cos \varphi \cos \gamma$ ， $b = \sin \varphi \sin \gamma$ 。由式(8)可知，散射中心A在雷达视线上的投影距离不再是单纯的正弦曲线，还包含了进动频率的无穷阶分量，散射中心B的投影距离变化也更加复杂。

4 基于HRRP序列的钝头倒角锥参数估计

本节主要分析进动条件下钝头倒角锥模型的参数估计。根据式(8)，待估计的参数包括 $x_A, z_A, x_B, z_B, R_A, R_B, \alpha, \varphi, \gamma, w_p$ 和 η 共11个参数，其中

w_p 和 η 为目标的运动参数, 剩余参数为目标的结构参数。首先根据锥体的性质对式(8)进行化简, 再对目标的参数进行估计。

如图1所示, 锥体高度为 H , 底面半径为 R , 质心到底面的距离为 h , 则 $x_A, z_A, x_B, z_B, \alpha$ 可以用 H, R, h, R_A, R_B 表示

$$\left. \begin{aligned} x_A &= 0 \\ z_A &= H - h - \frac{R_A \sqrt{R^2 + H^2}}{R} \\ x_B &= R - R_B \cot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \operatorname{atan} \left(\frac{R}{H} \right) \right) \\ z_B &= -h + R_B \\ \alpha &= \operatorname{atan} \left(\frac{R}{H} \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8), 得到

$$\left. \begin{aligned} R_{AU}(t) &= \left(H - h - \frac{R_A \sqrt{R^2 + H^2}}{R} \right) \\ &\quad \cdot (a + b \sin(w_p t - \eta)) + R_A \\ R_{BS1}(t) &= \left(R - R_B \cot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \operatorname{atan} \left(\frac{R}{H} \right) \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{R_B H}{\sqrt{R^2 + H^2}} \right) \sin \beta(t) \\ &\quad \left. + \left(-h + R_B + \frac{R_B R}{\sqrt{R^2 + H^2}} \right) \cos \beta(t) \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

其中, $a = \cos \varphi \cos \gamma$, $b = \sin \varphi \sin \gamma$ 。由式(10)可知, 散射中心A在雷达视线上的投影距离可以表示成直流分量和正弦分量的和, 而散射中心B在雷达视线上的投影距离不是标准的正弦函数, 所以可以采用正弦曲线拟合的方法判断距离曲线与散射中心的对应关系。拟合结果中误差较小的为散射中心A在雷达视线上的投影距离 R_{AU} , 误差较大的为散射中心B在雷达视线上的投影距离 R_{BS1} , 同时根据 R_{AU} 的拟合结果也可以获得进动频率 w_p 和雷达视线初始方位角 η 。

由式(10)可知, R_{AU} 和 R_{BS1} 中包含质心到底面的距离 h , 为了方便估计其他参数, 需要将 h 去掉, 得到散射中心A到散射中心B的距离在雷达视线上的投影

$$\begin{aligned} R_{AB} &= R_{AU} - R_{BS1} \\ &= \left(H - R_B - \frac{R_A \sqrt{R^2 + H^2}}{R} - \frac{R_B R}{\sqrt{R^2 + H^2}} \right) \\ &\quad \cdot \cos \beta(t) - \left(R - R_B + \frac{R_B H}{\sqrt{R^2 + H^2}} \right) \\ &\quad \cdot \sin \beta(t) + R_A \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可知, 待估计的结构参数包括 H, R, R_A, R_B, φ 和 γ 6个参数, 理论上可以通过至少6次HRRP测量结果获得6个参数的估计值, 但由于式(11)为非线性方程, 求解难度大, 所以可以采用非线性优化的方法, 如全局最优方法^[15]、稀疏重构方法^[16]、非线性最小二乘方法^[10]等, 这里采用非线性最小二乘方法来估计参数。非线性最小二乘方法可以用来解决包含 m 个测量值和 n 个未知参数($m > n$)的非线性模型问题, 该方法用线性模型参数的连续迭代来近似非线性模型。对于本文来说, 非线性模型式(11)包含 $n=6$ 个未知参数, 需要获得 $m > 6$ 个测量值, 组成超定系统, 找到最优的参数组合使得模型与观测值的残差最小。非线性模型与观测值的残差的表达式为

$$\left. \begin{aligned} f(x, t) &= L(t) - R_{AB} = L(t) - a \cos \beta(t) \\ &\quad - b \sin \beta(t) + R_A \\ x &= [H, R, R_A, R_B, \varphi, \gamma]^T \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中, $a = H - R_B - \frac{R_A \sqrt{R^2 + H^2}}{R} - \frac{R_B R}{\sqrt{R^2 + H^2}}$, $b = R - R_B + \frac{R_B H}{\sqrt{R^2 + H^2}}$, $L(t)$ 为各个时刻通过宽带回波获得的散射中心A到散射中心B的距离在雷达视线上的投影, 由于本文的模型依赖于高精度的距离测量, 而现有雷达带宽无法达到要求, 所以要采用超分辨算法。迭代自适应算法(Iterative Adaptive Approach, IAA)是一种基于加权最小二乘的非参数化方法, 它的基本思想是通过循环迭代求解, 利用上一次迭代的谱估计结果构造协方差矩阵, 并将其逆矩阵作为加权矩阵代入最小二乘中求解, 相比于Capon和幅度与相位估计(Amplitude and Phase Estimation, APES)算法, IAA算法可以获得更高的分辨率, 具体计算方法可以参考文献^[17]。IAA算法能够实现4倍以上的超分辨, 而锥顶和倒角的尺寸通常为cm级, 所以雷达带宽达到1 GHz即可满足高精度距离分辨的要求。

将参数估计问题转化为如式(13)的优化问题

$$\min_x \|f(x, t)\|_2^2 \quad (13)$$

求解非线性最小二乘问题的常用方法有梯度下降法^[18]、Gauss-Newton方法、Levenberg-Marquardt方法^[19]等, 本文选择Levenberg-Marquardt方法。这种方法基于信赖区域理论, 以当前迭代点为中心建立信赖域, 在信赖域中对目标函数进行近似求解, 再根据目标函数值的变化放大或缩小信赖域, 能够避免Gauss-Newton方法存在的函数不收敛的问题, 算法的具体步骤如下:

(1) 给定未知参数集 x 和步长 h 的初始值，通过IAA算法获得散射中心A到散射中心B的距离在雷达视线上的投影的观测值 $L(t)$ ；

(2) 第 k 次迭代中，计算残差 f 及 $\|f(x, t)\|_2^2$ 的雅各比矩阵 J ；

(3) 求解 $(J^T J + \mu I) h = -J^T f$ ，其中 μ 为惩罚因子；

(4) 计算增益比例 $\rho = \frac{F(x_k) - F(x_k + h)}{L(0) - L(h)}$ ，其中 $F(x)$ 为式(14)中的目标函数， $L(k)$ 为目标函数的2次近似函数，若 $\rho > 0$ ，更新 $x_{k+1} = x_k + h$ ，增大 μ ，否则 $x_{k+1} = x_k$ ，减小 μ ；

(5) 判断是否收敛，若不收敛返回步骤(2)，若收敛跳出。

这里采用MATLAB自带的lsqcurvefit函数估计 x 。将之前估计的 w_p 和 η 代入式(12)，并选择合适的初始值进行优化，即可得到参数序列 x 的估计值。初始值可以按照参数的物理含义根据经验选取，如弹头高度通常为0~3 m，进动角范围是5°~15°。

5 仿真与分析

实验采用CST Studio软件生成电磁仿真数据，电磁仿真参数设置如下：信号载频为10 GHz，扫频范围为8~12 GHz，频点间隔为40 MHz，频点数为101个。仿真参数设置如下：目标模型为光滑球冠倒角锥，如图3所示，锥高 $H=2$ m，底面半径 $R=0.4$ m，球冠半径 $R_A=0.1$ m，底部倒角半径 $R_B=0.1$ m，脉冲重复频率PRF=300 Hz，进动频率 $f_p=3$ Hz，进动角 $\varphi=10^\circ$ ，LOS初始俯仰角和方位角为 $[\gamma, \eta] = [40^\circ, 0^\circ]$ 。

通过CST Studio软件生成宽带回波数据，采用超分辨率算法得到目标的1维距离像序列，得到投影距离如图4所示。分别对两条距离曲线进行正弦曲线拟合，误差分别为0.001026和0.00439，所以误差较小的为散射中心A在雷达视线上的投影。通过对散射中心A的投影距离的正弦曲线拟合，可以得到进动频率 $f_p=3.001$ Hz，初始LOS方位角 $\eta=0.0117^\circ$ 。

将估计的 f_p 和 η 代入式(12)，采用非线性最小二乘拟合方法估计目标的各个参数，估计结果如表2所示。作为对比，基于文献[4]的模型对回波进行参数估计，文献[4]的模型可以表示为

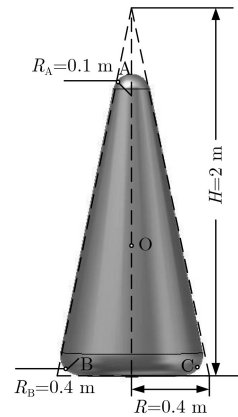


图3 电磁仿真模型

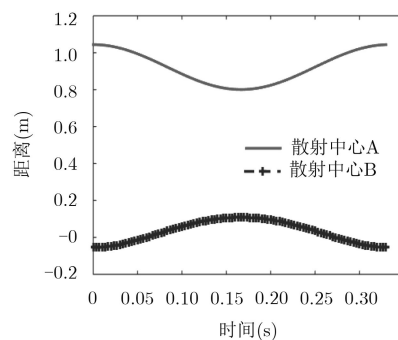


图4 散射中心投影距离

$$R_{AB} = H \cos \beta(t) - R \sin \beta(t) \tag{14}$$

其中， R_{AB} 为散射中心A到散射中心B的距离在雷达视线上的投影。由表2可知，基于本文提出的模型得到的估计值与真实值基本一致，而基于文献[4]模型得到的估计值误差很大，说明文献[4]模型与真实模型失配。

为了验证参数估计方法对噪声的稳健性，本文对信号回波加入高斯白噪声。由于每个散射中心的回波强度不同，将信噪比定义为所有散射中心的回波功率之和与噪声功率的比值。图5为不同信噪比下100次蒙特卡洛实验获得的各个参数的估计误差(估计误差=|估计值-真实值|/真实值)。由图5可知，当信噪比大于15 dB时，目标结构参数和运动参数估计误差小于10%，说明算法具有较高的准确性和稳定性。当信噪比小于15 dB时，估计精度下降，这是由于超分辨率算法无法保证提取到HRRP序列中较弱的散射中心。

表2 目标参数估计结果对比

	$H(m)$	$R(m)$	$R_A(m)$	$R_B(m)$	$\gamma(^{\circ})$	$\varphi(^{\circ})$
真实值	2.0000	0.4000	0.1000	0.1000	40.0000	10.0000
本文模型	2.0384	0.3885	0.0968	0.0952	40.3328	9.9964
文献[4]模型	1.6001	0.5183	0.0000	0.0000	38.3837	8.2801

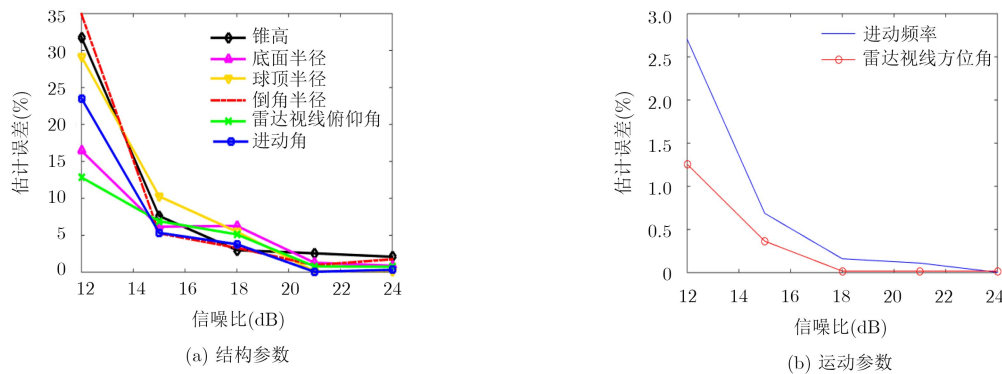


图5 不同信噪比下微动参数估计误差

6 结束语

为了正确估计弹头参数, 本文提出一种新的钝头倒角锥模型来描述弹头, 分析了各个散射中心的微动特性, 给出了目标运动参数和结构参数的估计方法, 并通过CST电磁仿真数据验证了钝头倒角锥模型的正确性和参数估计方法的有效性。文中采用的非线性优化参数估计方法对初值的要求较高, 下一步的工作是在钝头倒角锥模型基础上找到一种对初值不敏感的参数估计方法。

参考文献

- [1] CHEN V C, LI F, HO S S, *et al.* Analysis of micro-Doppler signatures[J]. *IEEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(4): 271–276. doi: [10.1049/ip-rsn:20030743](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20030743).
- [2] 王国雄. 弹头技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
WANG Guoxiong. Warhead Technology[M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 1993.
- [3] 徐少坤, 刘记红, 袁翔宇. 基于HRRP序列的中段目标二维几何特征反演方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(10): 2366–2373. doi: [10.11999/JEIT161303](https://doi.org/10.11999/JEIT161303).
XU Shaokun, LIU Jihong, and YUAN Xiangyu. Two-dimensional geometric feature inversion method for midcourse target based on HRRPs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(10): 2366–2373. doi: [10.11999/JEIT161303](https://doi.org/10.11999/JEIT161303).
- [4] 邵长宇. 基于HRRP序列的空间锥体目标微动参数估计方法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2016.
SHAO Changyu. Research on micro-motion parameters estimation of space cone-shaped targets based on HRRP sequence[D]. [Ph. D. dissertation], Xidian University, 2016.
- [5] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.11999/JEIT141061).
- [6] 赵双, 鲁卫红, 冯存前, 等. 基于窄带雷达网的弹道目标三维进动特征提取[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 98–105. doi: [10.12000/JR15129](https://doi.org/10.12000/JR15129).
ZHAO Shuang, LU Weihong, FENG Cunqian, *et al.* Three-dimensional precession feature extraction of ballistic targets based on narrowband radar network[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 98–105. doi: [10.12000/JR15129](https://doi.org/10.12000/JR15129).
- [7] 韩勋, 杜兰, 刘宏伟. 基于窄带微多普勒调制的锥体目标参数估计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 961–968. doi: [10.11999/JEIT140814](https://doi.org/10.11999/JEIT140814).
HAN Xun, DU Lan, and LIU Hongwei. Parameter estimation of cone-shaped target Based on narrowband micro-Doppler modulation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 961–968. doi: [10.11999/JEIT140814](https://doi.org/10.11999/JEIT140814).
- [8] 张群, 胡健, 罗迎, 等. 微动目标雷达特征提取、成像与识别研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 531–547. doi: [10.12000/JR18049](https://doi.org/10.12000/JR18049).
ZHANG Qun, HU Jian, LUO Ying, *et al.* Research progresses in radar feature extraction, imaging, and recognition of target with micro-motions[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(5): 531–547. doi: [10.12000/JR18049](https://doi.org/10.12000/JR18049).
- [9] 李康乐, 姜卫东, 黎湘. 弹道目标微动特征分析与提取方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 115–118.
LI Kangle, JIANG Weidong, and LI Xiang. Micro-motion feature analysis and extraction methods for ballistic targets[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(1): 115–118.
- [10] 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. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2009.06.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2009.06.014).
HE Sisan, ZHOU Jianxiong, and FU Qiang. Using HRRP sequence to estimate the precession parameters of midcourse target[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(6): 925–929. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2009.06.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2009.06.014).

- [11] 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.
HUANG Peikang, YIN Hongcheng, XU Xiaojian. Radar Target Characteristic[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [12] 邹小海, 艾小锋, 李永祯, 等. 进动圆锥弹头双基地微多普勒特性分析[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 609–615.
ZOU Xiaohai, AI Xiaofeng, LI Yongzhen, *et al.* Bistatic micro-Doppler feature of the precessing cone-shaped warhead[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 609–615.
- [13] QU Quanyou, GUO Kunyi, and SHENG Xinqing. Length estimation of extended targets based on bistatic high resolution range profile[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2015, 24(3): 387–391. doi: [10.15918/j.jbit1004-0579.201524.0316](https://doi.org/10.15918/j.jbit1004-0579.201524.0316).
- [14] 郭琨毅, 牛童瑶, 屈泉酉, 等. 散射中心的时频像特征研究[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 478–485. doi: [10.11999/JEIT150598](https://doi.org/10.11999/JEIT150598).
GUO Kunyi, NIU Tongyao, QU Quanyou, *et al.* Research on signatures of scattering centers shown in time-frequency representation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 478–485. doi: [10.11999/JEIT150598](https://doi.org/10.11999/JEIT150598).
- [15] 宁超, 黄璟, 朱勇, 等. 基于雷达距离像的锥体目标进动参数估计方法[J]. 现代防御技术, 2014, 42(4): 114–118. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2014.04.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2014.04.019).
NING Chao, HUANG Jing, ZHU Yong, *et al.* Precession parameters estimation of cone target based on radar profiles[J]. *Modern Defense Technology*, 2014, 42(4): 114–118. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2014.04.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2014.04.019).
- [16] 罗迎, 龚逸帅, 陈怡君, 等. 基于跟踪脉冲的MIMO雷达多目标微动特征提取[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 575–584. doi: [10.12000/JR18035](https://doi.org/10.12000/JR18035).
LUO Ying, GONG Yishuai, CHEN Yijun, *et al.* Multi-target micro-motion feature extraction based on tracking pulses in MIMO radar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(5): 575–584. doi: [10.12000/JR18035](https://doi.org/10.12000/JR18035).
- [17] YARDIBI T, LI Jian, STOICA P, *et al.* Source localization and sensing: A nonparametric iterative adaptive approach based on weighted least squares[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(1): 425–443. doi: [10.1109/taes.2010.5417172](https://doi.org/10.1109/taes.2010.5417172).
- [18] 孙善丽, 周建江, 夏伟杰. HRRP代价函数优化方法的弹道导弹特征参数提取[J]. 信号处理, 2017, 33(7): 1018–1025. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2017.07.015](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2017.07.015).
SUN Shanli, ZHOU Jianjiang, and XIA Weijie. HRRP cost function optimization method for ballistic missile feature parameter extraction[J]. *Journal of Signal Processing*, 2017, 33(7): 1018–1025. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2017.07.015](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2017.07.015).
- [19] MADSEN K, NIELSEN H B, and TINGLEFF O. Methods for non-linear least squares problems[EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/0e0b2de8102de2bd96058847.html>, 2004.
- 苏楠: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为空间目标识别。
戴奉周: 男, 1978年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为空间目标探测、毫米波雷达探测与成像、高速信号处理(基于FPGA和多核DSP等平台)。
刘宏伟: 男, 1971年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、雷达自动目标识别、认知雷达、协同探测等。