

空间目标进动特性及在雷达识别中的应用<sup>\*</sup>

刘永祥 黎 湘 庄钊文

国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 国防重点实验室, 长沙 410073

**摘要** 针对弹道导弹防御系统中弹头目标的自旋特性,建立了锥体目标的进动数学模型,并基于进动参数推导出反映目标质量特性的特征量.通过对锥体目标 RCS 回波数据进行多项式拟合来估计进动参数,以此为弹道导弹目标雷达识别提供可靠的技术途径.实验结果表明在低信噪比、考虑目标平动条件下算法能够有效估计出目标的章动角.

**关键词** 导弹防御 雷达目标识别 空间进动 参数估计

纵观弹道导弹防御技术的发展史,自20世纪60年代开始,导弹防御研究热点几经调整,从开始集中于再入段“大气过滤”,后研究天基助推段拦截,到现在的大气层外中段拦截,如何有效解决目标识别技术一直是核心问题之一<sup>[1]</sup>.即使目前技术最先进的美国国家导弹防御系统(NMD),其有效性的最大疑问也是对来袭弹头的识别问题<sup>[2]</sup>.

弹道导弹中段防御系统是当前研究热点,由于其潜在威胁目标群在大气层外近似真空的环境下以大致相同的速度作惯性飞行,并且来袭导弹通常会采用各种先进突防手段,这给防御系统实现真假目标识别带来了极大的技术难题,已成为防御系统的主要技术瓶颈<sup>[3]</sup>.地基雷达在弹道导弹中段防御系统目标识别中起着重要支撑作用<sup>[3]</sup>,能够确定目标的结构与尺寸、表面材料、弹头进动与滚动速率,甚至质量等,其中进动是自旋弹头特有的运动特性.美国曾专门开展 Firefly 飞行试验来研究进动特性<sup>[4]</sup>.本文主要针对弹头与假目标/诱饵之间固有的质量差异特性,通过建立锥体目标进动参数与反映目标质量特性的特征量之间的对应关系,使得利用雷达散射截面(RCS)回波数据估计进动参数转化为对目标质量特性的分析,以此实现雷达对真假目标的识别.实验结果表明估计算法在低信噪比、考

虑目标平动条件下也能够有效估计出目标的进动参数.

## 1 锥体目标的进动数学模型

考虑锥体目标,底半径为  $R$ ,半锥角为  $\alpha$ ,  $O$  为目标质心(见图1),其轴向惯量、横向惯量和自旋速率分别为  $I_z$ ,  $I_t$ , 和  $\omega_z$ .锥体自起旋到进入规则进动的过程十分复杂,但可以假定在极短的时间内对锥体施加一撞击力矩  $\tau$ ,形成既定的横向角速率为  $\omega_t$ ,也就形成了初始章动角  $\theta$ ,初始进动角速率  $\Omega$  和进动周期  $T$ <sup>[5]</sup>.

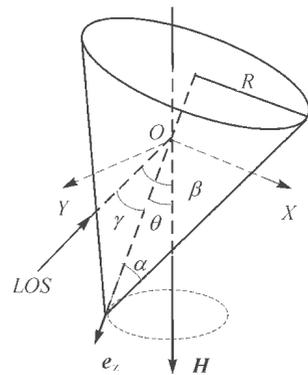


图1 锥体目标进动示意图

2003-10-21 收稿, 2004-04-26 收修改稿

<sup>\*</sup> 国防预研项目(批准号: 4130304-01)和国家杰出青年科学基金(批准号: 60025102)资助项目

运用角动量定理得到锥体横向姿态运动  $Q = \int \tau dt = I_1 \omega_1 - 0 = I_1 \omega_1$ , 其中  $Q$  为冲量矩. 则锥体总角动量大小  $H = \sqrt{I_1^2 \omega_1^2 + I_z^2 \omega_z^2}$ , 且保持空间定向. 锥体对称轴  $e_z$  与  $H$  的夹角即为章动角  $\theta$ , 锥体对称轴  $e_z$  绕角动量  $H$  旋转一周的时间为进动周期  $T^{[6]}$ .

根据定义, 有

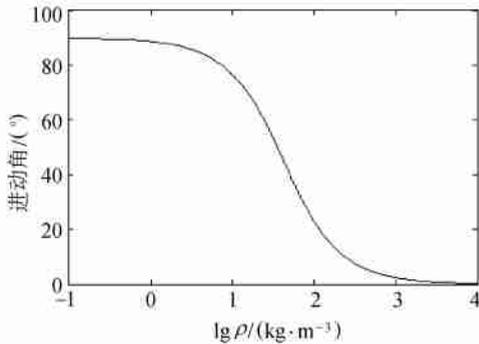
$$\begin{cases} \theta = \arccos\left(\frac{H \cdot e_z}{H}\right) = \arccos\left(\frac{I_z \omega_z}{H}\right) \\ = \arctan\left(\frac{I_1 \omega_1}{I_z \omega_z}\right) = \arctan\left(\frac{Q}{I_z \omega_z}\right) \\ T = \frac{2\pi}{\Omega} = \frac{2\pi I_1}{H} = \frac{2\pi I_1}{\sqrt{Q^2 + (I_z \omega_z)^2}} \end{cases} \quad (1)$$

在不考虑弹头质心运动的情况下, 雷达视线 LOS (line of sight) 和锥体对称轴  $e_z$  的夹角即为目标视线角

$$\gamma = \arccos[\sin\theta \sin\beta \cos(2\pi t/T) + \cos\theta \cos\beta], \quad (2)$$

其中  $\beta$  为雷达视线 LOS 与空间定向角动量  $H$  之间的夹角, 也称平均视线角.

假设均质锥体的密度为  $\rho$ , 根据转动惯量定义  $I = \int_V r^2 dm = \int_V \rho r^2 dV = \rho \int_V r^2 dV$ , 分别以  $Z$  轴和  $X$  (或  $Y$  轴) 为固定轴计算轴向转动惯量和横向



转动惯量为

$$\begin{aligned} I_z &= \frac{1}{10} \pi \rho R^5 \cot(\alpha), \\ I_x = I_y &= \frac{1}{80} \pi \rho R^5 \cot^3(\alpha) + \frac{1}{20} \pi \rho R^5 \cot(\alpha), \end{aligned} \quad (3)$$

代入(1)式得

$$\begin{cases} \theta = \arctan\left(\frac{10Q \tan(\alpha)}{\pi \rho R^5 \omega_z}\right) \\ T = \frac{\frac{1}{40} \pi^2 \rho R^5 \cot^3(\alpha) + \frac{1}{10} \pi^2 \rho R^5 \cot(\alpha)}{\sqrt{Q^2 + \left(\frac{1}{10} \pi \rho R^5 \omega_z \cot(\alpha)\right)^2}} \end{cases} \quad (4)$$

由(4)式可以看出, 在弹道导弹飞行中段过程中, 自旋弹头作周期性运动, 且运动参数和目标的诸多本征参数相关. 对于弹道导弹中段的真假弹头识别, 弹头状气球诱饵在结构尺寸上通常和弹头类似, 通过成像等措施难以有效区分, 但在(4)式的进动参数表达式中, 当参数  $\omega_z, Q, R, \alpha$  相同时, 空间进动参数与目标的密度有紧密联系, 如图 2 考虑到弹头与诱饵之间存在着固有的质量差异, 如果能够估计出弹头类目标的进动参数, 根据对应的质量特性, 可以区分弹头和弹头状诱饵, 实现真假目标有效识别.

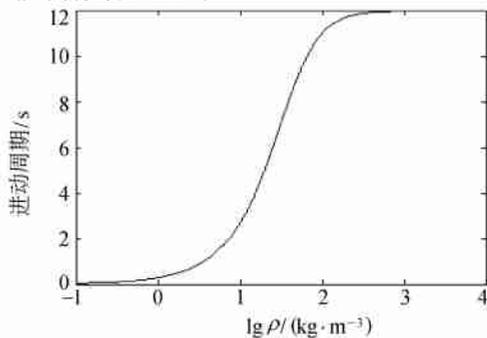


图 2 进动参数和锥体密度 ( $\rho$ ) 的关系

为寻求进动参数和目标本征参数 (密度或质量) 之间更明确的关系, 引入特征量  $\lambda = \frac{Q}{\rho R^5}$ , 代入(4)式. 消掉  $\omega_z$ , 得

$$\lambda = \frac{\sin\theta}{T} \left( \frac{\pi^2}{40} \cot^3 \alpha + \frac{\pi^2}{10} \cot \alpha \right). \quad (5)$$

(5)式中建立了  $\lambda$  和进动参数的关系, 由于相

同尺寸的真假弹头在密度上会有几个量级的差别, 因此可以将  $\lambda$  作为“特征量”来区分结构相似的真假弹头目标. 式中变量  $\alpha$  可以通过多种途径获得, 如高分辨成像、先验知识等. 则问题的关键就归结为如何获取目标的进动参数.

## 2 基于目标 RCS 回波的进动参数估计

由美国的 Firefly 飞行试验可知<sup>[4]</sup>, 当雷达视线和锥体侧面垂直或接近于垂直时, 由于镜面反射, 雷达回波信号比较强, 此时根据雷达回波中的周期性信号能够探测到目标的进动. 电磁散射仿真也表明, 当雷达视线和锥体侧面垂直或接近于垂直, 且章动角不太大时, 回波信号较强, 周期性明显, 而且 RCS 序列随姿态角的变化曲线比较平滑, 可以对回波信号进行多项式建模. 由于锥体是旋转对称体, 用雷达视线和锥体对称轴线的夹角  $\gamma$  即可以描述锥体相对雷达波的姿态角.

为简化参数估计过程, 可作对雷达观测过程作如下假设:

- (1) 锥体目标每一个姿态角对应一个确定的 RCS 值;
- (2) 只考虑目标的姿态运动, 暂不考虑质心运动;
- (3) 雷达视线垂直于锥面或接近于垂直锥面.

基于上述假定, 可确定进动参数估计流程如下:

Step 1 以一定姿态角范围下的目标 RCS 数据作为模板, 利用多项式拟合得  $RCS\_PL(\gamma) = \sum_{i=0}^m a_i \gamma^i$ , 其中,  $\gamma$  为姿态角,  $a_i$  为拟合系数,  $m$  为多项式的阶数, 本文中  $m=7$ ,  $RCS\_PL$  为目标 RCS 随姿态角的拟合函数.

Step 2 设雷达采样间隔为  $\Delta$ , 根据锥体目标进动数学模型得目标的姿态角序列

$$\gamma_j = \arccos[2\pi \sin\theta \sin\beta \cos((t_0 + j\Delta)/T) + \cos\theta \cos\beta]. \quad (6)$$

Step 3 构造模板与 RCS 序列误差平方和  $L = \sum_{j=1}^n [RCS\_PL(\gamma_j) - RCS\_SA(j)]^2$ , 其中,  $RCS\_SA(j)$  为 RCS 采样值,  $n$  为采样点数.

Step 4 求取使得  $L$  最小的  $\theta$  和  $\beta$ .

## 3 进动参数估计实验结果

仿真实验中, 设锥体目标半锥角为  $10.30^\circ$ , 雷达工作频率为 420MHz, 根据雷达观测模型假定, 可设目标的姿态角  $\gamma$  范围选取在  $65^\circ \sim 95^\circ$ , 图 3 给出了一定姿态角范围内 RCS 数据的多项式拟合结果. 图 4 给出了该目标在某种进动状态下的 RCS 回波数据(半个周期). 表 1 给出了对不同进动状态的参数估计结果.

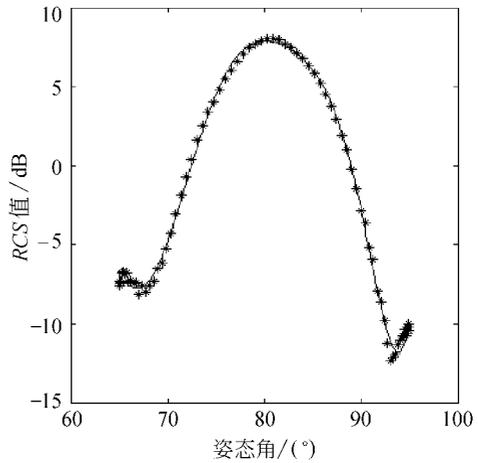


图 3 目标 RCS 数据的多项式拟合

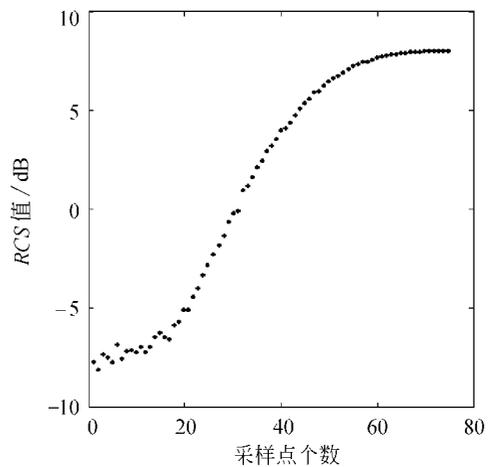


图 4 某进动状态下的目标 RCS 序列

表 1 不同进动状态下的参数估计结果

实验次数	真实值	估计值
1	$\beta=80^\circ \quad \theta=4^\circ$	$\beta=79.91^\circ \quad \theta=4.10^\circ$
2	$\beta=78^\circ \quad \theta=4^\circ$	$\beta=78.04^\circ \quad \theta=3.94^\circ$
3	$\beta=74^\circ \quad \theta=6^\circ$	$\beta=73.99^\circ \quad \theta=6.01^\circ$
4	$\beta=78^\circ \quad \theta=12^\circ$	$\beta=77.91^\circ \quad \theta=12.10^\circ$

在实际的参数估计过程中, 目标 RCS 回波受噪声的影响, 验证算法在不同信噪比条件下的估计精度是评价算法优劣的重要条件, 表 2 给出了不同信噪比条件下的估计结果, 可以看出, 在信噪比不低于 5 dB 的情况下能够较为精确的估计出章动角。

表 2 不同信噪比下的进行参数估计结果

实验次数	SNR(dB)	真实值	估计值
1	34	$\beta=78^\circ \quad \theta=4^\circ$	$\beta=77.95^\circ \quad \theta=4.05^\circ$
		$\beta=78^\circ \quad \theta=12^\circ$	$\beta=77.96^\circ \quad \theta=12.06^\circ$
		$\beta=78^\circ \quad \theta=4^\circ$	$\beta=77.93^\circ \quad \theta=4.12^\circ$
2	22	$\beta=78^\circ \quad \theta=12^\circ$	$\beta=77.97^\circ \quad \theta=12.05^\circ$
		$\beta=78^\circ \quad \theta=4^\circ$	$\beta=77.62^\circ \quad \theta=3.87^\circ$
3	12	$\beta=78^\circ \quad \theta=12^\circ$	$\beta=78.37^\circ \quad \theta=12.05^\circ$
		$\beta=78^\circ \quad \theta=4^\circ$	$\beta=78.82^\circ \quad \theta=4.33^\circ$
4	5	$\beta=78^\circ \quad \theta=12^\circ$	$\beta=77.57^\circ \quad \theta=11.34^\circ$

进动参数估计算法中的假设(2)只考虑目标的姿态运动, 不考虑质心运动. 实际的雷达观测过程中, 雷达视线角的变化不仅与进动这一微观运动有关, 而且与质心的运动有关, 主要体现为平均视线角随目标的弹道飞行而变化, 则(6)式转化为

$$\gamma_j = \arccos[\sin\theta\sin\beta(t)\cos(2\pi(t_0 + \Delta t)/T) + \cos\theta\cos\beta(t)] \quad (7)$$

设目标在雷达观测坐标系中的坐标为  $r(t)$ , 其空间定向角动量为  $H$ , 则  $\beta(t) = \arccos\left(\frac{(r(t) \cdot H)}{|r(t)| \cdot H}\right)$ . 在仿真实验中,  $\beta$  在  $75^\circ$  左右变化, 实验结果如表 3, 可以看出考虑质心运动时, 该算法仍然可有效估计出章动角。

表 3 考虑质心运动时的进动参数估计结果

实验次数	真实值	估计值
1	$\theta=4^\circ$	$\theta=3.90^\circ$
2	$\theta=6^\circ$	$\theta=6.01^\circ$
3	$\theta=10^\circ$	$\theta=10.01^\circ$

进动参数估计算法中的假设(3)在实际观测过程中并不总是成立, 因此需要扩大模板的姿态角范围. 由于锥体目标的全姿态 RCS 回波变化剧烈, 多项式拟合会引起较大误差, 须借助于不等距样条拟合, 从实验结果看, 由于问题归结为大动态范围内的最优化搜索, 容易陷入局部最优. 实际上, 由于弹道导弹的射程以及再入攻角决定了角动量  $H$  的方向<sup>[7]</sup>, 所以根据预测的弹着点和导弹的先验知识可估计角动量  $H$  的方向, 结合雷达的观测方向就可确定  $\beta$  的范围, 降低优化搜索范围。

## 4 结束语

本文研究了锥体目标的进动数学模型, 得出了目标进动参数和特征量  $\lambda$  之间的关系, 为通过估计目标进动参数识别真假弹头提供了理论基础. 本文提出的基于多项式拟合的章动角估计算法, 在低信噪比和考虑质心运动情况下, 可以有效估计出章动角。

## 参 考 文 献

- 张光义, 等. 空间探测相控阵雷达. 北京: 科学出版社, 2001. 69~71
- 塞勒斯, 等. NMD 与反制 NMD. 北京: 国防大学出版社, 2001. 97~129
- 黄培康. 反导弹系统中的目标识别技术. 战略防御, 1981, (5): 1
- Schultz K, et al. Range Doppler laser for midcourse discrimination; The Firefly Experiments. 2nd Annual AIAA SDIO Interceptor Technology Conference. New Mexico; Albuquerque, 1993. 2653
- 以光衡. 陀螺理论与应用. 北京: 航空航天大学出版社, 1990. 117~122
- 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997. 157~160
- Hanson F, et al. Discriminating interceptor technology program laser radar. SPIE Conference on Laser Radar Technology and Application IV. Florida; Orlando, 1999. 372