

微进动弹道导弹目标雷达特征提取

陈行勇 黎 湘 郭桂蓉 姜 斌

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要 该文总结了弹道导弹目标雷达识别的研究现状,引入微进动和微RCS的概念,推导了进动锥体目标对雷达波的姿态角计算公式,分析了微RCS和姿态角的关系,使用进动锥体目标的微RCS序列估计目标进动参数和惯量比。以惯量比为特征,提出了识别弹头和诱饵的方法。最后给出了仿真结果。

关键词 弹道导弹, 微进动, 微 RCS, 惯量

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-0643-04

Radar Feature Extraction of Micro-precession Ballistic Missile Warhead

Chen Hang-yong Li Xiang Guo Gui-rong Jiang Bin

(Research Institute of Space Electronics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract In this paper, the development of radar identification of ballistic missile warhead is summarized. Conceptions of micro-precession and micro-RCS are introduced. The aspect angle expression of a precession target is derived, and the relationship between micro-RCS and aspect angle is analyzed. Then the precession parameters and inertia ratio are estimated with micro-RCS. Inertia ratio is then used to discriminate warheads and decoys. Finally, a simulation result is provided.

Key words Ballistic missile, Micro-precession, Micro-RCS, Inertia

1 引言

弹道导弹中段防御是当前研究热点,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。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,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。文献[1]研究了进动目标的雷达成像,文献[2,3]研究了弹道导弹弹头的激光雷达特征,建立了关于弹头几何参数和运动参数的距离-多普勒特征的近似模型。

由于锥形目标自旋定向时,易受扰动而产生进动运动,进动是自旋弹头特有的运动特性。弹道导弹再入段的进动属于微动(micro-motion)^[4,5]。目标或目标构件在径向相对雷达的小幅(相对于雷达的径向距离)非匀速运动统称为微动。微动目标的 RCS 随时间变化称为微 RCS,目标的微 RCS 与目标的几何参数和运动状态有关。微多普勒和微 RCS 分别从信号的频率和功率描述了微动目标的雷达特征。若弹道导弹释放的锥形弹头目标和诱饵形状相同,表面材料的电磁散射特

性相同,则利用高分辨距离像提取电磁特征和结构特征难以识别。弹道导弹真弹头纵向惯量与横向惯量比值较大,而诱饵质量纵向惯量与横向惯量比值较小,利用锥形弹头和诱饵的质量分布差异,提取目标的纵横惯量比作为特征,为识别此类目标提供了新的途径^[6]。

进动锥体目标的 RCS 随姿态角变化就表现为随时间变化,目标的微 RCS 包含了目标进动信息,通过将微 RCS 转换为 RCS 姿态角序列可估计进动角。文献[6]使用多项式拟合和样条拟合将微 RCS 转换成姿态角序列,估计进动角。该方法由于要在不同进动角,入射角和 RCS 时间序列起始时刻三重循环搜索最优匹配进动角,计算量很大,且由于 RCS 时间序列具有周期性,该方法有可能得不到唯一解,算法不够稳定,本文采用锥体目标 RCS 关于姿态角的近似解析关系式,利用微 RCS 的极值和 RCS 姿态角序列的关系,提出了一种新的估计锥体目标的进动角和提取惯量比特征的方法。

2 进动锥形弹头目标的雷达姿态分析

根据弹道导弹的进攻技术可知,弹头再入时一般要求零攻角,即再入前弹头的指向与再入速度方向一致,因此释放弹头时,通常利用自旋保持空间定向以便满足再入要求。根据刚体姿态动力学的知识,刚体自旋时如果有横向干扰(弹头和诱饵被释放过程中不可避免会受到干扰),刚体将产生进动。如图 1 所示,高为 L , 半锥角为 $\alpha(0 < \alpha < \pi/2)$, 侧面

散射均匀的锥体目标轴线绕进动轴 z 轴以角速度 ω 进动, 进动周期为 T , 进动角为 $\theta (0 \leq \theta \leq \pi/2)$, 同时绕自身轴线以角速度 Ω 自旋, 频率为 f_z 。如图 2 所示, 弹头目标对地基雷达为远场目标, 雷达发射信号近似为与 yo_z 平面平行的平行波, 设雷达波与进动轴夹角为 γ , 雷达波 oo_5 与对称轴夹角即姿态角为 $\beta (0 \leq \beta \leq \pi)$ 。设进动轴和自旋轴共面, 且锥顶在进动轴上, $t=0$ 时刻锥体轴线位于 xoz 平面, 将 $\overline{oo_1}$ 长度归一化即 $\|\overline{oo_1}\|=1$, 则 t 时刻锥体轴线向量 $\mathbf{r}_1 = \overline{oo_1} = (\sin\theta \cos\omega t, \sin\theta \sin\omega t, \cos\theta)$, 雷达波入射向量 $\mathbf{r}_2 = \overline{oo_5} = (0, -\sin\gamma, \cos\gamma)$, 则有

$$\cos\beta = \frac{\|\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2\|}{\|\mathbf{r}_1\| \|\mathbf{r}_2\|} = \cos\theta \cos\gamma - \sin\theta \sin\gamma \sin\omega t \quad (1)$$

以锥体轴线位于 xoz 平面内开始计时, 姿态角 β 随时间变化规律为

$$\beta = a \cos(\cos\theta \cos\gamma - \sin\theta \sin\gamma \sin\omega t) \quad (2)$$

设 $0 \leq |\theta - \gamma| \leq |\theta + \gamma| \leq \pi$, 对上式求导可得:

$$\beta' = \frac{d\beta}{dt} = \frac{\omega \sin\theta \sin\gamma \cos\omega t}{\sqrt{1 - (\cos\theta \cos\gamma - \sin\theta \sin\gamma \sin\omega t)^2}} \quad (3)$$

令 $\beta' = 0$ 可得 β 的极大值和极小值为 $\theta + \gamma$ 和 $|\theta - \gamma|$ 。令 $\beta_{\max} = \max\{\beta(t)\}$, $\beta_{\min} = \min\{\beta(t)\}$, 则

$$\theta = \begin{cases} (\beta_{\max} + \beta_{\min})/2, & \theta \geq \gamma \\ (\beta_{\max} - \beta_{\min})/2, & \theta \leq \gamma \end{cases} \quad (4)$$

$$\gamma = \begin{cases} (\beta_{\max} - \beta_{\min})/2, & \theta \geq \gamma \\ (\beta_{\max} + \beta_{\min})/2, & \theta \leq \gamma \end{cases} \quad (5)$$

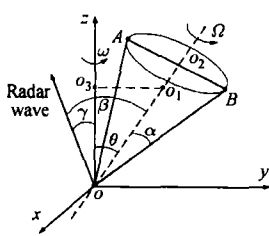


图 1 锥体目标的进动

Fig.1 Precession of cone

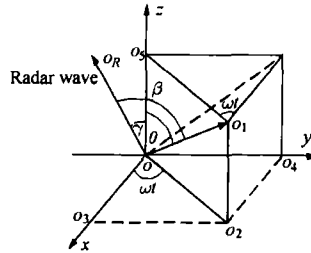


图 2 进动锥体目标的姿态角

Fig.2 Aspect angle of precession cone

3 基于微 RCS 的微进动弹道导弹特征提取

3.1 锥体目标的 RCS

设 λ 为入射波波长, 截头圆锥上下底面半径为 z_1 和 z_2 ($z_1 < z_2$), 在线性极化时, 截头圆锥的 RCS 计算公式为^[7]

$$\sigma_{\text{frustum}}(\beta) = \begin{cases} \frac{\lambda z_2 \tan^2 \alpha \tan^2(\beta + \alpha)}{8\pi \sin \beta}, & \beta \in (0, \pi), \beta \neq \pi/2 - \alpha \\ \frac{8\pi (z_2^{3/2} - z_1^{3/2})^2 \sin \alpha}{9\lambda \cos^4 \alpha}, & \beta = \pi/2 - \alpha \end{cases} \quad (6)$$

取 $z_1 = 0$, 并令 $z_2 = L \tan \alpha$, 得锥体 RCS 与姿态角的关系为

$$\sigma_{\text{cone}}(\beta) = \begin{cases} \frac{\lambda L \tan^2 \alpha}{8\pi \sin \beta} \tan^2(\beta + \alpha), & \beta \in (0, \pi), \beta \neq \pi/2 - \alpha \\ \frac{8\pi L^3 \tan^4 \alpha}{9\lambda \cos^3 \alpha}, & \beta = \pi/2 - \alpha \end{cases} \quad (7)$$

锥体 RCS 全姿态角曲线如图 3 所示, σ_{cone} 曲线在 $(0, \pi/2 - \alpha)$ 上有一极小值。令 $d\sigma_{\text{cone}}/d\beta|_{\beta=\beta_0} = 0$ 得

$$4 \tan \beta_0 = \sin[2(\beta_0 + \alpha)], \quad \beta_0 \in (0, \pi/2 - \alpha) \quad (8)$$

仿真计算表明, $\alpha \in [0, \pi/12]$ 时, $\beta_0 \approx 0.8\alpha$ 。

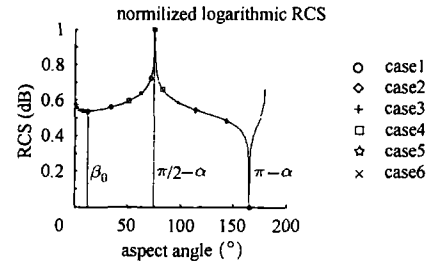


图 3 微 RCS 与姿态角的关系

Fig.3 Micro-RCS vs aspect angle

3.2 基于微 RCS 的进动参数估计

微进动锥体目标的微 RCS 为锥体目标进动时目标 RCS 随时间变化关系, 由式(2)和式(7)可知, 微 RCS 为

$$\sigma_{\text{micro}}(t) = \begin{cases} \frac{\lambda L \tan^2 \alpha \tan^2(a \cos(\cos\theta \cos\gamma - \sin\theta \sin\gamma \sin\omega t) + \alpha)}{8\pi \sin(a \cos(\cos\theta \cos\gamma - \sin\theta \sin\gamma \sin\omega t))}, & a \cos(\cos\theta \cos\gamma - \sin\theta \sin\gamma \sin\omega t) \neq 0, \pi/2 - \alpha \\ \frac{8\pi L^3 \tan^4 \alpha}{9\lambda \cos^3 \alpha}, & a \cos(\cos\theta \cos\gamma - \sin\theta \sin\gamma \sin\omega t) = \pi/2 - \alpha \end{cases} \quad (9)$$

由以上分析可知, 将目标一周期的微 RCS 序列转换成 RCS 姿态角序列, 可估计出目标的进动参数, 进而提取纵横惯量比特征, 识别真弹头和诱饵。实际雷达探测目标时一般迎着锥顶照射锥体目标, 且锥形弹头和诱饵的半锥角一般较小, α 一般取 $5^\circ \sim 15^\circ$, 因此可认为锥体目标进动时姿态角 $\beta < \pi - \alpha$, 即 $0 < \beta_{\min} \leq \beta_{\max} \leq \pi - \alpha$ 。假设已通过高分辨二维成像方法估计出目标的结构参数 L 和 α , 微进动目标一周期的离散微 RCS 为 $\sigma_{\text{micro}}(n) (0 \leq n \leq N-1)$, $\gamma \geq \theta$, 对照图 3, 对微进动目标的微 RCS 的极值可分以下 6 种情况讨论。

(1) $\beta_0 \leq |\theta - \gamma| \leq \theta + \gamma < \pi/2 - \alpha$ (图 3 Case1) 目标 RCS 一周期内有一峰值和谷值, 如图 4(a)。

$$\left. \begin{aligned} \beta_{\max} &= \left\{ x \mid \sigma_{\text{cone}}(x) = \max_n \{\sigma_{\text{micro}}(n)\}, \beta_0 \leq x < \pi/2 - \alpha \right\} \\ \beta_{\min} &= \left\{ x \mid \sigma_{\text{cone}}(x) = \min_n \{\sigma_{\text{micro}}(n)\}, \beta_0 \leq x < \pi/2 - \alpha \right\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

(2) $\pi/2 - \alpha < |\theta - \gamma| \leq \theta + \gamma \leq \pi - \alpha$ (图 3 case2)

目标微 RCS 一周期内有一峰值和谷值, 如图 4(b)。

$$\left. \begin{aligned} \beta_{\max} &= \left\{ x \mid \sigma_{\text{cone}}(x) = \min_n \{ \sigma_{\text{micro}}(n) \}, \pi/2 - \alpha < x \leq \pi - \alpha \right\} \\ \beta_{\min} &= \left\{ x \mid \sigma_{\text{cone}}(x) = \max_n \{ \sigma_{\text{micro}}(n) \}, \pi/2 - \alpha < x \leq \pi - \alpha \right\} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(3) $0 < |\theta - \gamma| \leq \theta + \gamma \leq \beta_0$ (图 3 case3) 目标微 RCS 一周期内有一峰值和谷值, 如图 4(c)。

$$\left. \begin{aligned} \beta_{\max} &= \left\{ x \mid \sigma_{\text{cone}}(x) = \min_n \{ \sigma_{\text{micro}}(n) \}, 0 < x \leq \beta_0 \right\} \\ \beta_{\min} &= \left\{ x \mid \sigma_{\text{cone}}(x) = \max_n \{ \sigma_{\text{micro}}(n) \}, 0 < x \leq \beta_0 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(4) $\beta_0 \leq |\theta - \gamma| < \pi/2 - \alpha < \theta + \gamma \leq \pi - \alpha$ (图 3 case4) 目标微 RCS 一周期内将至多出现两个谷值和两个等值峰值, 设谷值为 $\sigma_{\min 1}$ 和 $\sigma_{\min 2}$ ($\sigma_{\min 1} \leq \sigma_{\min 2}$), 如图 4(d), 若 $\beta_{\max 1}$, $\beta_{\max 2}$, $\beta_{\min 1}$ 和 $\beta_{\min 2}$ 满足

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{cone}}(\beta_{\max 1}) &= \sigma_{\min 2}, & \pi/2 - \alpha < \beta_{\max 1} \leq \pi - \alpha \\ \sigma_{\text{cone}}(\beta_{\min 1}) &= \sigma_{\min 1}, & \beta_0 \leq \beta_{\min 1} < \pi/2 - \alpha \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{cone}}(\beta_{\max 2}) &= \sigma_{\min 1}, & \pi/2 - \alpha < \beta_{\max 2} \leq \pi - \alpha \\ \sigma_{\text{cone}}(\beta_{\min 2}) &= \sigma_{\min 2}, & \beta_0 \leq \beta_{\min 2} < \pi/2 - \alpha \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

因为 σ_{cone} 在 $\beta \in (\pi/2 - \alpha, \pi - \alpha)$ 时的变化率大于 $\beta \in (\beta_0, \pi/2 - \alpha)$ 时的变化率; 若 $|\pi/2 - \alpha - \beta_{\max 1}| \leq |\pi/2 - \alpha - \beta_{\min 1}|$, 则 $\beta_{\max} = \beta_{\max 1}$, $\beta_{\min} = \beta_{\min 1}$; 否则, $\beta_{\max} = \beta_{\max 2}$, $\beta_{\min} = \beta_{\min 2}$ 。

(5) $0 < |\theta - \gamma| \leq \beta_0 < \theta + \gamma < \pi/2 - \alpha$ (图 3 case5) 目标微 RCS 一周期内将至多出现两个峰值和两个等值谷值, 设峰值为 $\sigma_{\max 1}$ 和 $\sigma_{\max 2}$ ($\sigma_{\max 1} \leq \sigma_{\max 2}$), 如图 4(e)所示, 则 $\beta_{\max 1}$, $\beta_{\max 2}$, $\beta_{\min 1}$ 和 $\beta_{\min 2}$ 满足

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{cone}}(\beta_{\max 1}) &= \sigma_{\max 1}, & \beta_0 \leq \beta_{\max 1} < \pi/2 - \alpha \\ \sigma_{\text{cone}}(\beta_{\min 1}) &= \sigma_{\max 2}, & 0 < \beta_{\min 1} \leq \beta_0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{cone}}(\beta_{\max 2}) &= \sigma_{\max 2}, & \beta_0 \leq \beta_{\max 2} < \pi/2 - \alpha \\ \sigma_{\text{cone}}(\beta_{\min 2}) &= \sigma_{\max 1}, & 0 < \beta_{\min 2} \leq \beta_0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

因为 σ_{cone} 在 $\beta \in (0, \beta_0)$ 时的变化率大于 $\beta \in (\beta_0, \pi/2 - \alpha)$ 时的变化率; 若 $|\beta_{\max 2} - \beta_0| \geq |\beta_{\min 2} - \beta_0|$, 则 $\beta_{\max} = \beta_{\max 2}$, $\beta_{\min} = \beta_{\min 2}$; 否则, $\beta_{\max} = \beta_{\max 1}$, $\beta_{\min} = \beta_{\min 1}$ 。

(6) $0 < |\theta - \gamma| \leq \beta_0 < \pi/2 - \alpha < \theta + \gamma \leq \pi - \alpha$ (图 3 case6) 微 RCS 一周期内将至多出现 3 个峰值和 3 个谷值, 且有两个峰值相等, 两个谷值相等, 如图 4(f)所示, 设峰值为 $\sigma_{\max 1} \leq \sigma_{\max 2} = \sigma_{\max 3}$, 谷值为 $\sigma_{\min 1} = \sigma_{\min 2} \leq \sigma_{\min 3}$, 则 $\beta_{\max}$ 和 $\beta_{\min}$ 满足

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{cone}}(\beta_{\max}) &= \sigma_{\min 3}, & \pi/2 - \alpha < \beta_{\max} \leq \pi - \alpha \\ \sigma_{\text{cone}}(\beta_{\min}) &= \sigma_{\max 1}, & 0 < \beta_{\min} \leq \beta_0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

基于微 RCS 的进动角 θ 估计步骤如下:

(1) 对一周期的微 RCS 进行峰值和谷值检测, 设其个数分别为 M_1 和 M_2 ;

(2) 若 $M_1 = M_2 = 1$, 由进动角和方位角取值范围先验信息选择式(10)~式(12)和式(4)估计 θ ;

(3) 若 $M_1 = M_2 = 2$, 分两种情况:

(a) 两峰值相等, 由式(13)和式(14)估计 θ ;

(b) 两谷值相等, 由式(15)和式(16)估计 θ ;

(4) 若 $M_1 = M_2 = 3$, 由式(17)估计 θ 。

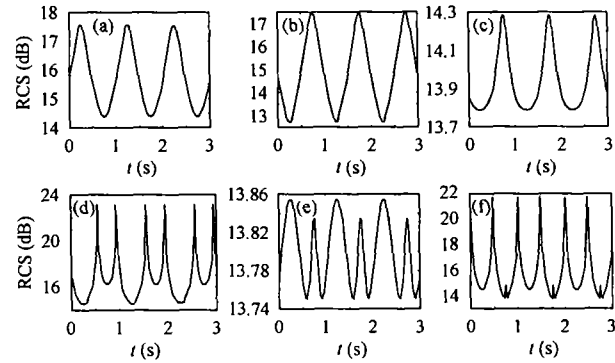


图 4 不同进动状态下的对数微 RCS

Fig.4 Logarithmic micro-RCS with different precession parameters

3.3 基于微 RCS 的特征提取

导弹释放形状和真弹头相似的诱饵后, 形成包含真假目标的威胁目标群。以大致相同的速度在大致相同的弹道上飞行, 难以利用轨迹和速度上的差别来区分各目标。由于弹头顶部是密度较小的碳素材料以及引信等, 其主要载荷(战斗部和姿态控制器)则集中于底部, 与同样质量的均质锥体诱饵相比, 弹头的纵向惯量必然加大, 而横向惯量减小, 弹头目标和诱饵的纵横惯量比差异可用来识别真假目标, 进动锥体惯量比为^[7]

$$\rho = \cos \theta / (f_z T) \quad (18)$$

自旋频率 f_z 一般为 3Hz, 对回波信号或微 RCS 进行周期性检测, 估计出进动周期后, 由 3.2 节的方法估计出进动角 θ 后, 就可提取惯量比作为特征识别真假弹头。

4 仿真计算

取 $\alpha = 10^\circ$, $\omega = 2\pi \text{ rad/s}$, $L = 1 \text{ m}$, 锥形目标惯量比 $\rho = 0.3$, 进动周期 $T = 1 \text{ s}$, $f = 1 \text{ GHz}$, $f_z = 3 \text{ Hz}$, 首先进动目标的 RCS 时间序列由式(9)产生, 对微 RCS 序列加信噪比为 SNR 的高斯白噪声, 然后假设已知进动角和方位角取值范围, 由 3.2 节中步骤估计目标的进动角。在姿态角和进动角不同的情况对进动角 θ 的估计结果如图 5 所示。

设弹头和诱饵表面材料电磁特性相同。对锥形真弹头, 取 $\alpha = 10^\circ$, $\omega = 2\pi \text{ rad/s}$, $L = 1 \text{ m}$, 锥形诱饵结构参数设置和弹头相同, 弹头惯量比 $\rho_{\text{BM}} = 0.3$, 进动周期 $T_{\text{BM}} = 0.8 \text{ s}$, 诱饵惯量比 $\rho_{\text{Decoy}} = 0.01$, 进动周期 $T_{\text{Decoy}} = 24 \text{ s}$, $f = 1 \text{ GHz}$, $f_z = 3 \text{ Hz}$, 对微 RCS 序列加信噪比为 SNR 的高斯白噪声, 假设进动角已估计出, 图 6 给出了本文方法估计的惯量比 ρ 结果。

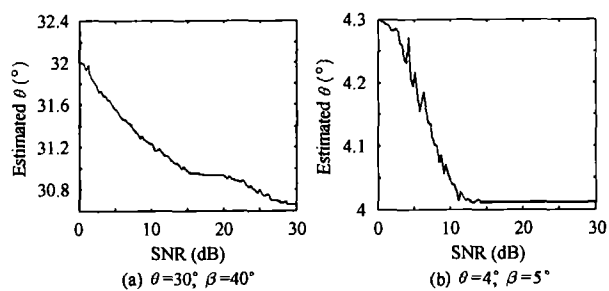


图5 进动角估计

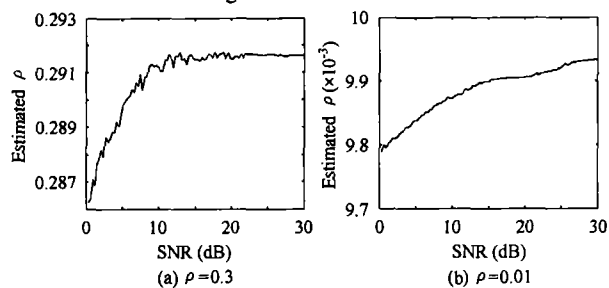
Fig.5 Estimation of θ 

图6 惯量比估计

Fig.6 Estimation of ρ

5 结束语

对弹道导弹目标威胁群区分真假弹头是雷达目标识别的一个难点。弹头目标和诱饵外形尺寸和散射特性相近,由于质量分布存在差异,在进动周期相同时,真弹头定向能力更强,进动角更小,这种进动特性是由目标固有的惯量比特征决定的。本文针对进动平底锥目标,通过分析微 RCS 特征,提出了新的估计进动参数,提取惯量比特征的方法。应当指出,弹头目标还有球面锥的形状,并且弹头目标还存在接收机等其它结构,因此本文使用规则的旋转体模型与实际目标

结构相比存在一定的误差,这有待以后研究对其回波建模和微动雷达特征提取。

参考文献

- [1] Lammers Yve H W, Mavr R A. Doppler imaging based on radar target precession. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29(1): 166 – 173.
- [2] Bankman I. Model of laser radar signatures of ballistic missile warheads. *SPIE*, 1999, 3699: 133 – 137.
- [3] Schultg k, Davidson S, Stein A, *et al.*. Range doppler laser radar for midcourse discrimination: the firefly experiments. *AIAA-93-2653*.
- [4] Chen V C. Micro-Doppler effect of micromotion dynamics: a review. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5102: 240 – 249.
- [5] Chen V C, Li F. Analysis of micro-Doppler signatures. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2003, 150(4): 271 – 276.
- [6] 刘永祥. 导弹防御系统中的雷达目标综合识别研究. [博士论文], 长沙: 国防科技大学, 2004 年 6 月.
- [7] Bassem R M. *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab*. USA Florida: CRC Press, 2000: 106 – 108.

陈行勇: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为自动目标识别与模糊工程.

黎湘: 男, 1967 年生, 教授, 研究方向为非线性信号处理、雷达目标识别.

郭桂蓉: 男, 1937 年生, 中国工程院院士, 研究方向为自动目标识别与模糊工程.

姜斌: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理.