

## 基于窄带测距信息的空间目标微动特征检测与估计

马梁 王雪松 李永祯 刘进

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要:** 微动目标被线性调频信号照射时, 由于距离-多普勒耦合效应, 微多普勒的存在会使得目标测量距离发生偏差。该文以匀速转动目标为例, 从理论上证明了这种测距偏差随时间呈正弦规律变化, 并且可以被跟踪雷达所观测。在此基础上, 针对窄带跟踪雷达系统, 提出了一种目标微动特征检测与参数估计的新方法, 以空间目标精密跟踪雷达的典型参数为依据, 设计了仿真实验和暗室动态测量实验, 分析结果证明了该文的观点以及检测与估计方法的有效性。

**关键词:** 窄带跟踪雷达; 微动目标检测; 距离-多普勒耦合; 线性调频信号

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)10-2348-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01572

## Detection and Estimation for the Character of Micro-Motion Based on the Narrowband Tracing Information

Ma Liang Wang Xue-song Li Yong-zhen Liu Jin

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

**Abstract:** Due to the range-Doppler coupling effect of the LFM signal, the micro-Doppler caused by the micro-motion targets will also bring the bias detection range. Take the even rotational speed target as an example, the change of this bias detection range with time obeys the sinusoid, and this bias is large enough for the narrowband tracking radar. A new detection and estimation algorithm for the character of micro-motion based on the narrowband tracking information is proposed in this paper. The simulation result and the dynamic measure date of precession target in microwave anechoic chamber, which are designed according to the typical parameters of the tracking radar for the special targets, validate the conclusion of this paper and the effectiveness of detection and estimation algorithm.

**Key words:** Narrowband tracking radar; Micro-motion target detection; Range-Doppler coupling; LFM signal

### 1 引言

弹道中段时间长、目标运动简单, 被认为是弹道导弹识别、拦截的关键阶段。在中段, 由于不受空气阻力的影响和弹箭分离与诱饵释放时不可避免的横向干扰, 弹头和诱饵在飞行过程中存在不同形式的微动<sup>[1]</sup>。弹头的进动频率一般为亚赫兹的量级, 而对于诱饵和其它碎片, 一般没有采取姿态控制方式, 目标会呈现翻滚等随机的运动方式。其翻滚频率可达十几甚至几十赫兹<sup>[2]</sup>。弹头和诱饵在微运动特性上的差异为空间非合作目标探测与识别提供了一条可行的途径, 也成为了弹道中段目标识别研究的热点领域之一。

文献[3,4]比较全面地分析了刚体和非刚体目标

的微运动特点和微运动特征提取方法, 为空间目标的微运动分析与识别建立了数学基础; 在国内, 国防科技大学、中国航天科工集团、西安电子科技大学等多家研究小组围绕空间目标微动特征提取开展了深入的工作, 主要包括基于目标回波的微多普勒分析<sup>[5,6]</sup>和基于目标雷达特性(RCS, 一维距离像等)的二次特征提取<sup>[7,8]</sup>等, 但需要指出的是, 微运动和微多普勒的概念最初来源于相干激光雷达, 地基防御雷达在什么条件下可以检测出来袭目标的微运动信息目前在国内外尚无共识, 关于这方面的分析还未见到公开报道。

线性调频信号由于具有脉冲压缩和使用简便等优点而被广泛运用于雷达和声纳, 这种信号的一个显著特点就是具有很强的距离-多普勒耦合效应。在导弹攻防对抗条件下, 为了实现 3000~4000 km 的作用距离, 发射脉冲宽度增加到了毫秒量级, 引起距离-多普勒耦合系数成数量级增大<sup>[9]</sup>。当这种形式

2009-12-08 收到, 2010-03-16 改回

国家自然科学基金重点项目(60736006)和国家自然科学基金面上项目(60875019) 资助课题

通信作者: 马梁 aquila\_free@163.com

的线性调频信号对微动目标进行照射时, 由于微多普勒的存在, 将会使雷达的测量距离发生偏差, 这种偏差的大小甚至和雷达的距离分辨力相当, 可以被窄带跟踪雷达所观测到, 从而可以作为空间目标微动特征检测和参数估计的依据。

经分析可知, 振动、旋转、锥旋等微运动造成的目标径向距离变化都可统一为余弦形式, 在较短的观测时间内, 可近似用匀速转动模型表征。本文首先比较了目标做匀加速直线运动和匀加速叠加匀速转动这两种不同运动时, 雷达测量距离随时间变化规律的差异, 指出匀速转动引起的测距偏差可达若干个距离分辨单元。在此基础上, 提出了基于窄带测距信息的空间目标微动特征检测流程和参数估计新方法, 依据典型参数, 对检测概率和参数估计性能进行了仿真分析。最后, 利用微动目标暗室动态测量实验的数据进一步验证了本文的观点和参数估计算法。

## 2 信号模型

当雷达发射线性调频信号时, 由于存在距离-多普勒耦合效应, 雷达对目标的测量距离  $R_{\text{meas}}$  可以表示为<sup>[9]</sup>

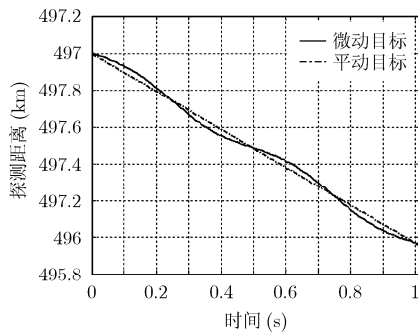
$$R_{\text{meas}} = R_n - v_n \Delta t + \tilde{R} \quad (1)$$

其中  $R_n$  为第  $n$  个脉冲起始时刻时目标的真实距离,  $v_n$  为第  $n$  个脉冲起始时刻时目标的径向速度,  $\tilde{R}$  为由于噪声存在而引起的测量误差。  $\Delta t = f_0 \tau / B$  为距离-多普勒耦合系数, 它是线性调频信号独有的特性, 与目标运动状态无关。  $f_0$  为雷达的载频,  $\tau$  为脉冲宽度,  $B$  为线性调频脉冲的调制带宽。

根据雷达信号相关理论, 在只考虑平稳高斯白噪声的影响时, 距离测量误差  $\tilde{R}$  可以认为服从零均值的高斯分布, 其最小均方误差为<sup>[10]</sup>

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{3}}{\pi B \sqrt{2(S/N)}} \cdot \frac{c}{2} \quad (2)$$

其中  $c$  为真空中光速,  $S/N$  为信噪比。



(a) 探测距离随时间变化曲线

### 2.1 目标做匀加速直线运动

当目标做匀加速直线运动时, 目标距离  $R_n$  和速度  $v_n$  可表示为

$$\left. \begin{aligned} R_n &= R_1 - v_1 \cdot nT_r - 1/2 \cdot a(nT_r)^2 \\ V_n &= v_1 + a \cdot nT_r \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中  $R_1$ ,  $v_1$  为脉冲串中第 1 个脉冲起始时刻时目标的位置和速度,  $n$  为脉冲数,  $T_r$  为脉冲重复周期。

将式(3)代入式(1)可得目标做匀加速直线运动时, 距离测量值随脉冲数  $n$  (时间) 的变化规律为

$$R_{\text{meas}}^a = R_1 - v_1 \Delta t - (v_1 + a \Delta t) \cdot nT_r - \frac{a}{2} (nT_r)^2 + \tilde{R} \quad (4)$$

由式(4)可见, 目标做匀加速运动时, 其距离测量值随时间呈二次函数规律变化, 当加速度不大时, 近似为线性变化。图 1(a)中的虚线给出了目标运动速度 1000 m/s, 加速度 10 m/s<sup>2</sup> 时, 距离测量值  $R_{\text{meas}}^a$  随时间变化的曲线。

### 2.2 目标做匀加速直线叠加匀速转动

当目标相对于雷达做匀加速直线运动的同时叠加了匀速转动, 目标距离  $R_n$  和速度  $v_n$  可表示为

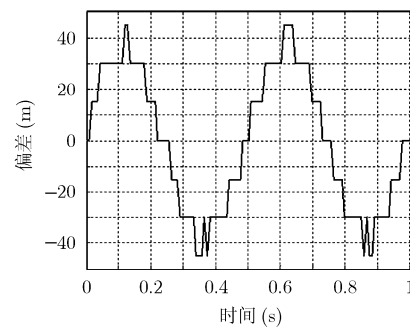
$$\left. \begin{aligned} R_n &= R_1 - v_1 \cdot nT_r - 1/2 \cdot a(nT_r)^2 - R_\omega \cos(\phi_1 + \omega nT_p) \\ V_n &= v_1 + a \cdot nT_r - \omega \sin(\phi_1 + \omega nT_p) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中  $R_\omega$  为转动半径,  $\omega$  为转动速度,  $\phi_1$  为脉冲串中第 1 个脉冲起始时刻时目标转过的角度。

同理, 将式(5)代入式(1)可得目标做匀加速运动叠加匀速转动时, 距离测量值随脉冲数  $n$  (时间) 的变化规律为

$$\begin{aligned} R_{\text{meas}}^\omega &= R_{\text{meas}}^a - R_\omega \cos(\phi_1 + \omega nT_p) \\ &\quad + R_\omega \omega \sin(\phi_1 + \omega nT_p) \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可见, 当目标做匀速转动时, 其距离测量值和仅有平动时相比, 将产生正弦规律的偏差, 偏差的大小由线性调频信号的参数和目标的运动参数共同决定。



(b) 偏差随时间变化曲线

图 1 两种运动目标探测距离随时间变化曲线

图 1(a)中的实线给出了目标质心运动速度 1000 m/s, 加速度 10 m/s<sup>2</sup>, 转动半径  $R_\omega = 1$  m, 转速  $\omega = 4\pi$  rad/s, 雷达载频  $f_0 = 10$  GHz, 脉宽  $\tau = 3$  ms, 带宽  $B = 10$  MHz 时, 目标探测距离  $R_{\text{meas}}^\omega$  随时间变化的曲线。将上述参数代入式(6)中可计算出由转动引起的测距偏差可达  $\pm 37.7$  m, 而此时的距离分辨单元为 15 m, 因此, 这种转动引起的偏差可以被跟踪雷达所观测到, 以作为目标微动特征检测的依据。图 1(b)给出了两种不同运动形式的目标距离测量值之差随时间的变化关系曲线。

### 3 目标微动特征的检测与估计

对中段目标而言, 不进行机动时, 目标质心加速度为地球引力加速度  $g$ , 在数秒内, 目标相对于地心转过的角度极小, 因此, 可认为目标质心加速度的方向和大小都未发生变化, 近似做匀加速直线运动。而振动、旋转、锥旋等微运动造成的目标径向距离变化则可统一为余弦形式, 因此可近似用 2.2 节所提到的匀速转动模型描述。

#### 3.1 微动特征检测

通过第 2 节分析可以看出, 当目标进行匀加速直线运动时, 其跟踪距离随时间呈二次函数规律变化。而当目标在平动的基础上叠加匀速转动时, 跟踪距离将出现正弦规律的偏差, 因此, 对目标微动特征的检测可按照以下步骤进行。

假设待处理时间  $T$  内雷达共发射了  $N$  个线性调频脉冲, 则

步骤 1 记录时间  $T$  内, 目标的跟踪距离序列  $R(n)$ ,  $0 \leq n \leq N-1$ ;

步骤 2 对  $R(n)$  按照二次多项式的形式进行最小二乘拟合, 得到系数  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ ;

步骤 3 由系数  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  获得  $\hat{R}(n) = a_1(nT_r)^2 + a_2(nT_r) + a_3$ ;

步骤 4 定义  $R'(n)$  为  $R(n)$  和  $\hat{R}(n)$  的差序列, 即  $R'(n) = R(n) - \hat{R}(n)$ ;

则目标微动特征的检测问题就转化为如下的二元假设检验问题:

$$\left. \begin{aligned} H_0 : R'(n) &= \tilde{R}(n) \\ H_1 : R'(n) &= A_\omega \sin(\omega n T_p + \phi_\omega) + \tilde{R}(n) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

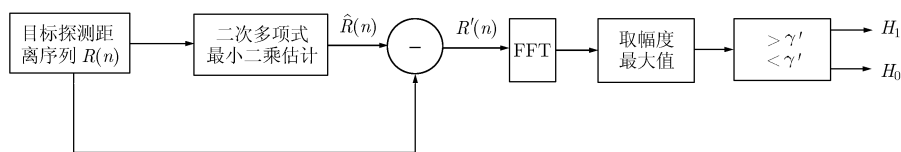


图 2 基于窄带测距信息的目标微动特征检测流程

其中  $H_0$  假设目标做匀加速直线运动,  $H_1$  假设目标做匀加速直线运动叠加匀速转动;  $\tilde{R}(n)$  服从零均值的高斯分布, 其方差  $\sigma_R^2$  由式(2)表征,  $A_\omega = R_\omega \sqrt{1 + (\omega \cdot \Delta t)^2}$ ,  $\tan(\phi_1 - \phi_\omega) = 1/(\omega \cdot \Delta t)$ 。

根据估计和检测的相关理论<sup>[11]</sup>, 幅度、频率、初相都未知的正弦信号的检验统计量可表示为

$$\max I(f) > \sigma_R^2 \cdot \ln \gamma \quad (8)$$

判  $H_1$  成立。其中  $\max I(f)$  表示信号周期图的峰值。

记虚警概率为  $P_{fa}$ , 则  $\gamma = \frac{N/2 - 1}{P_{fa}}$ 。而检测概率可表示为<sup>[11]</sup>

$$P_d = Q_{\chi^2_2 \left( \frac{NA_\omega^2}{2\sigma_R^2} \right)} \left( 2 \ln \frac{N/2 - 1}{P_{fa}} \right) \quad (9)$$

其中  $\chi^2_2 \left( \frac{NA_\omega^2}{2\sigma_R^2} \right)$  指具有 2 个自由度和非中心参量为  $\frac{NA_\omega^2}{2\sigma_R^2}$  的非中心 chi 平方分布,  $Q_{\chi^2_2(\lambda)}(x)$  指  $\chi^2_2(\lambda)$  随机变量超过  $x$  的概率。由式(9)可见, 目标的旋转半径和旋转速度越大, 距离测量误差越小, 检测概率越高。同时, 参与检测的点数  $N$  越大, 目标的检测概率越高。

综上所述, 基于窄带测距信息的目标微动特征检测的具体流程如图 2 所示, 图中  $\gamma'$  为式(8)中不等式右端部分, 即  $\gamma' = \sigma_R^2 \cdot \ln \gamma$ 。

由前面的分析可以看出, 基于窄带测距信息的目标微动特征检测首先需要目标建立稳定跟踪, 因此, 不妨令检测时的最小信噪比  $\text{SNR}_{\text{min}} = 13$  dB<sup>[9]</sup>, 则由式(2)可得  $\sigma_R = 1.31$  m。若  $P_{fa} = 10^{-12}$ 、 $N = 480$  时, 由式(9)可以算出,  $R_\omega \sqrt{1 + (\omega \cdot \Delta t)^2} > 0.8$  时, 目标的微动特征检测概率大于 90%,  $R_\omega \sqrt{1 + (\omega \cdot \Delta t)^2} > 1$  时, 目标的微动特征检测概率趋近于 1。对一般的空间目标而言, 其旋转速度在亚赫兹到十几赫兹的量级, 而旋转半径大都在 0.5 m 以上, 若取目标旋转速度 0.2 Hz, 旋转半径 0.5 m, 雷达载频  $f_0 = 10$  GHz, 脉宽  $\tau = 1.5$  ms, 带宽  $B = 10$  MHz, 此时  $R_\omega \sqrt{1 + \omega^2} \approx 1.07$ , 检测概率趋近于 1。可见, 在导弹攻防对抗条件下, 在对目标稳定跟踪后, 按照本文提出的方法, 可以实现极高概率的微动目标检测。

### 3.2 微动特征估计

在对微动目标正确检测的基础上, 亦可完成对其旋转半径和旋转速度的参数估计, 式(8)取最大值时的频率  $f_0$  即为目标旋转速度的估计值  $\hat{f}$ , 而  $A_\omega$  的估计值  $\hat{A}_\omega$  则可以表示为<sup>[11]</sup>

$$\hat{A}_\omega = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \tag{10}$$

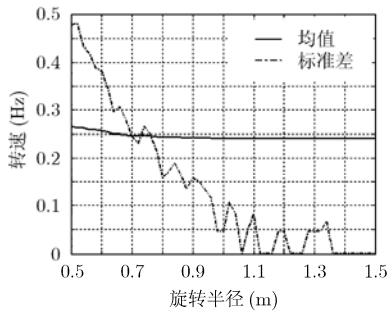
其中  $\alpha_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} R'(n) \cos(2\pi \hat{f} n)$ ,  $\alpha_2 = (2/N) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} R'(n) \sin(2\pi \hat{f} n)$ .

由式(10), 目标的旋转半径估计值可写为

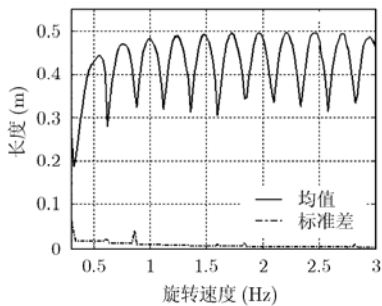
$$\hat{R}_\omega = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} / \sqrt{1 + (2\pi \hat{f} \Delta t)^2} \tag{11}$$

图 3 为旋转半径和旋转速度估计值随目标微动参数的变化规律的仿真结果。其中雷达载频  $f_0 = 10 \text{ GHz}$ , 脉宽  $\tau = 1.5 \text{ ms}$ , 带宽  $B = 10 \text{ MHz}$ , 脉冲重复周期  $\text{PRI} = 8.5 \text{ ms}$ , 虚警概率为  $10^{-12}$ ; 目标距雷达的初始距离  $R_1 = 500 \text{ km}$ , 目标速度  $v_0 = 4000 \text{ m/s}$ , 加速度  $a = 10 \text{ m/s}^2$ , 对 4.08 s 内的 480 个脉冲进行参数估计。

图 3(a)给出了旋转速度为 0.24 Hz 时, 转速估计的均值和标准差随旋转半径的变化规律。可以看出, 目标旋转半径越大, 对其转速的估计性能越高。图 3 (b)给出了旋转半径为 0.5 m 时, 旋转半径估计值  $\hat{R}_\omega$  的均值和标准差随旋转速度的变化规律, 由图可见, 随着旋转速度的增大, 旋转半径的估计值并未收敛于其真值, 而是发生了振荡性的变化, 这是



(a) 旋转速度估计值统计量



(b) 旋转半径估计值统计量

图 3 参数估计统计量与目标微动参数的关系

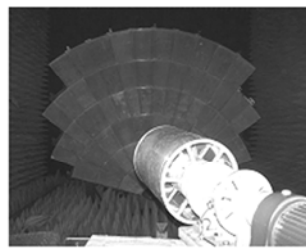
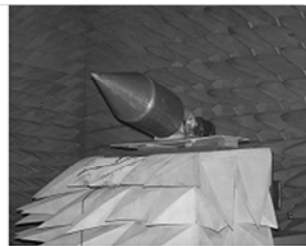


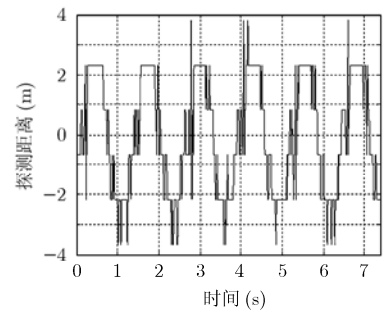
图 4 动态测量实验暗室环境

由于旋转速度的估计值  $\hat{f}$  只能是  $1/T_{\text{total}}$  的整数倍, 目标的真实转速偏离  $1/T_{\text{total}}$  整数倍越多,  $\hat{f}$  的估计误差越大, 从而旋转半径  $\hat{R}_\omega$  的估计误差也就越大。当对旋转速度遍历时, 也就发生了如图 3(b)中的振荡现象。

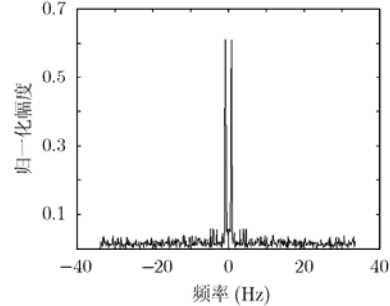
### 4 暗室实测数据验证

在理论分析和仿真实验的基础上, 设计了空间进动目标的暗室测量实验, 实验场景如图 4 所示。目标体为作者所在的课题组自主设计开发的目标进动模拟实验平台。发射信号载频  $10 \text{ GHz}$ , 脉宽  $\tau = 1.5 \text{ ms}$ , 带宽  $B = 10 \text{ MHz}$ , 脉冲重复周期  $\text{PRI} = 14 \text{ ms}$ ; 目标距测量设备约  $15 \text{ m}$ , 进动轴与雷达视线的夹角为  $90^\circ$ , 参与检测和估计的脉冲数为 500 个, 检测积累时间约  $7 \text{ s}$ 。

图 5 给出了表 1 中实验 1 条件下的实测数据处理结果, 图 5(a)为跟踪距离  $R(n)$  随时间变化的曲线, 可以看出, 当目标进动时, 其探测距离变化约为  $\pm 3 \text{ m}$ , 远远超出了目标真实位置的改变。由于目标未进行平动, 因此可直接对  $R(n)$  做 DFT 以估计其进动频率, 得到结果如图 5(b)所示, 表 1 则给出了不同实验条件下转动频率和转动半径的估计结果, 可以看出, 本文提出的参数估计方法能够较准确估计出目标的微动频率和转动半径。需要指出的是, 由于暗室测量的噪声很小, 表 1 中的估计结果都是在高信噪比条件下得到的, 因此, 在转动半径和转动速度都不大的情况下, 同样可以实现参数估计。



(a) 跟踪距离



(b) DFT 结果

图 5 实验 1 估计结果

表 1 微动参数估计结果

实验编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
转动半径(m)	0.28	0.28	0.28	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09
进动频率(Hz)	0.82	0.52	0.26	0.82	0.52	0.26	0.82	0.52	0.26
半径估计值(m)	0.30	0.26	0.23	0.11	0.12	0.13	0.08	0.07	0.13
频率估计值(Hz)	0.81	0.52	0.26	0.83	0.55	0.28	0.81	0.55	0.28

## 5 结论

本文以空间微动目标检测为背景,研究了基于窄带跟踪距离的微动目标检测与微动参数估计新方法。首先比较了目标做匀加速直线运动和匀加速叠加匀加速转动时,跟踪距离随时间的变化规律,指出当目标做匀速转动时,跟踪距离产生正弦规律的偏差,这种偏差的大小和窄带距离分辨单元相当,可以被雷达所观测到。在此基础上,提出了空间微动目标的检测流程和微动参数估计方法,根据空间目标精密跟踪雷达的典型参数设计了仿真实验,实验结果表明,在信噪比大于 13 dB 的情况下,典型微动目标的检测概率趋近于 1。最后,利用微动目标暗室动态测量数据进一步验证了本文的观点和参数估计方法。本文的研究成果对于空间目标的检测、跟踪和识别,微多普勒分析与特征提取等方面具有借鉴意义。

## 参考文献

- [1] 庄钊文,刘永祥,黎湘. 目标微动特性研究进展[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 520-525.  
Zhuang Zhao-wen, Liu Yong-xiang, and Li Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 520-525.
- [2] 王涛. 弹道中段目标极化域特征提取与识别[D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2006.  
Wang Tao. Feature extraction and recognition of targets in ballistic midcourse in polarization-domain [D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2006.
- [3] Chen V C, Li F, and Ho S S, *et al.* Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [4] Chen V C, Li F, Ho S S, and Wechsler H. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. *IEEE Proceedings Radar Sonar Navigation*, 2003, 150(4): 271-276.
- [5] 刘进, 马梁, 王雪松, 王国玉. 微多普勒的参数化估计方法[J]. 信号处理, 2009, 25(11): 1759-1765.

- [6] Liu Jin, Ma Liang, Wang Xue-song, and Wang Guo-yu. Extraction method of micro-Doppler based on TFD-Hough transform[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(11): 1759-1765.
- [7] Sun Hui-xia and Liu Zheng. Micro-Doppler feature extraction for ballistic missile warhead[C]. International Conference on Information and Automation Proceedings, Zhangjiajie, China, June 20-23, 2008: 1333-1336.
- [8] 胡杰民, 付耀文, 黎湘. 空间锥体目标进动周期估计[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2849-2853.  
Hu Jie-min, Fu Yao-wen, and Li Xiang. Precession cycle estimation of cone-shaped spatial target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(12): 2849-2853.
- [9] 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 HRRR sequence to estimate the precession parameters of midcourse target[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(6): 925-929.
- [10] 赵峰. 弹道导弹防御跟踪制导雷达跟踪技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2007.  
Zhao Feng. Study on detection techniques of tracking and guiding radars in ballistic missile defense [D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2007.
- [11] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 64-72.  
Lin Mao-yong and Ke You-an. The Theory of Radar Signals[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984: 64-72.
- [12] Steven M key. Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume II: Detection Theory [M]. New Jersey: Prentice Hall Press, 1998: 261-271, 279-296.
- 马梁: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像技术、空间目标识别等。
- 王雪松: 男, 1972年生, 教授, 博士生导师, 从事雷达极化信息处理、雷达电子战等领域的研究。
- 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。