

雷达目标旋转部件的微 Doppler 效应

李金梁^① 王雪松^① 刘阳^① 刘进^① 孟刚^② 王涛^①

^①(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

^②(试验物理与计算数学实验室 北京 100076)

摘要: 目标的微动特征与目标属性密切相关, 可作为目标识别的重要特征。对旋转部件, 该文建立了具有空域时变特性的点散射模型。基于此模型, 分析了由目标的旋转部件引起的微 Doppler 效应, 对含有旋转部件的目标回波的时频特性进行了理论推导, 并利用外场实测数据, 得到了雷达目标回波的时频图, 与理论推导的结果十分吻合, 验证了理论推导的正确性。在此基础上, 提出了一种基于短时傅里叶变换的目标微动参数提取方法, 利用实测数据对目标的微运动参数提取进行了尝试, 得到了很好的结果, 为 PD 雷达的目标特征提取与识别提供了理论指导。

关键词: 雷达目标识别; 微运动; 微多普勒; 旋转部件; 时频特性

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)03-0583-05

Micro-Doppler Effect of Rotation Structure on Radar Targets

Li Jin-liang^① Wang Xue-song^① Liu Yang^① Liu Jin^① Meng gang^② Wang Tao^①

^①(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(The National Key Laboratory of Computational Mathematics & Experimental Physics, Beijing 100076, China)

Abstract: Micro-dynamics characteristics are related to target's structures and can be used for target classification. Rotation structure of target is modeled as a sum of directional point scatterers. With the directional point scatter model, the micro-Doppler effect induced by rotation structure is analyzed. Then the joint time-frequency characteristics of radar echoes from targets which include rotation structure are investigated, and verified by real radar data. Finally, an extraction method of micro-motion characteristics, such as rotation frequency, is presented, and it is attempted to extract micro-dynamics characteristics, and the results are satisfactory.

Key words: Radar target identification; Micro-dynamics; Micro-Doppler; Rotation structure; Time-frequency characteristics

1 引言

当目标上各点的运动状态完全相同时, 目标的运动可以看成质点运动。对于大多数目标来说, 目标上各点的运动状态通常并不相同, 目标的运动状态可以用目标质心的运动特性和目标上各点相对质心的运动特性来描述, 例如舰船目标中机械扫描雷达的转动、直升机桨片的转动、行驶车辆的车轮转动等。相对于目标质心运动而言, 目标上各点围绕某点的转动或部件相对于物体质心的机械振动、旋转等运动通常被称为微运动(micro-motion 或 micro-dynamic)。目标的微运动特性与其结构、质量分布、初始状态和受力状态密切相关, 它可以作为目标识别的重要特征量。

在雷达探测中, 目标整体(通常可以用质心代替)相对于雷达视线的径向运动会产生频率调制, 这就是雷达研究领域广为人知的多普勒效应。目标上各点相对于目

标质心的运动会产生附加的频率调制, 相对于目标主体引起的多普勒效应, 这个频率调制效应通常被称为微多普勒效应。微多普勒效应的分析和提取技术是最近几年研究的热点。Chen 在他的一系列文章里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^[1-4]; Greneker 等人详细分析了微多普勒分析技术在直升机类目标微运动特征提取和目标识别中的应用^[5]; Li Junfei, Ling Hao 中提出了一种飞机目标三维运动特征的特征提取方法, 并利用外场实测数据进行了试验; 试验结果表明, 其提取的飞机横滚向特征与机载姿态传感器获取的飞机微运动信息吻合得很好^[6]; Sparr 等人利用美国海军的 APY-6 雷达获取的 SAR 数据提取了地面振动的角反射器的微运动特征^[7]。国内的陈行勇等就微多普勒特征提取和参数估计等方面进行了深入的研究^[8-10]。

以前的文献都是假设旋转散射点为理想的点散射模型, 没有考虑转动部件对回波的时频特性的幅度调制作用, 但在实际过程中, 旋转部件的旋转不仅会对回波的相位产生调制作用, 还会对回波的幅度产生调制。本文考虑了旋转部件的

2007-11-26 收到, 2008-07-14 改回

国家 973 计划安全重大基础研究(6136002)和国家自然科学基金(60672033)资助课题

旋转对回波幅度的调制作用,分析了旋转部件旋转所引入的微 Doppler 效应,得到了含有旋转部件的目标回波的时频分布的表达式。结合外场的实测数据,分析了旋转部件引入的微 Doppler 效应,得到的结果与理论分析的结果一致,对利用微 Doppler 信息提取目标的微动参数进行了尝试,取得了不错的结果,并且通过时频图中曲线的能量变化提取出了旋转部件的方向图,可以提示目标的结构信息。

2 旋转部件的微 Doppler 特性分析

在本文中,为了便于对目标的微 Doppler 特性进行分析,对雷达目标建模采用点散射模型,与以前文献所不同的是本文中的散射点的散射具有方向性,而不是各向同性的散射点,随着目标的旋转,散射点的散射具有空域时变特性。

2.1 目标旋转引起的微 Doppler

不失一般性,假设旋转部件有 N 个旋转散射点,以第 n 个散射点 P_n 对应的旋转中心 O_n 为坐标原点,以散射点 P_n 旋转所成的平面为 xoy 平面,建立坐标系如图 1 所示。散射点 P_n 以旋转半径 r_n 和角频率 ω_n 围绕旋转中心 O_n 旋转。雷达在坐标系中的位置为 $(R_{T,n}, \alpha_{T,n}, \beta_{T,n})$, 其中 $R_{T,n}$ 为雷达到旋转中心 O_n 的距离, $\alpha_{T,n}, \beta_{T,n}$ 分别为雷达在坐标系中的方位角和俯仰角。在 τ 时刻,雷达到第 n 个散射点的距离为 $R_n(\tau)$, 雷达与散射点 P_n 的连线与 xoy 平面的夹角为 $\beta_n(\tau)$ 。由于一般 $R_0 \gg r$, 所以可以近似认为 $\beta_n(\tau)$ 为一常数,等于 $\beta_{T,n}$ 。假设 $P(t)$ 为雷达发射信号,在慢时间 τ 时刻雷达接收的旋转运动目标回波信号

$$s(t, \tau) = \sum_{n=1}^N A_n(\beta_{T,n}, \theta_n(\tau) - \alpha_{T,n}) p\left(t - \frac{2R_n(\tau)}{c}\right) \quad (1)$$

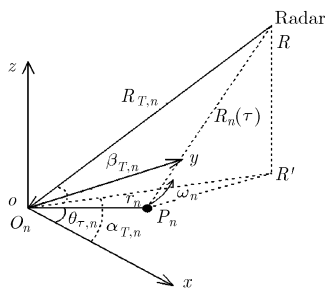


图1 雷达与旋转部件几何关系示意图

其中 $A_n(\beta_{T,n}, \theta_n(\tau) - \alpha_{T,n})$ 是旋转散射点 P_n 在 τ 时刻在雷达所在方向 $(\alpha_{T,n}, \beta_{T,n})$ 的散射强度, $\theta_n(\tau)$ 为 τ 时刻第 n 个旋转散射点与旋转中心的连线与 x 轴所成的角度,忽略 $R_n(\tau)$ 的变化对散射强度的影响,可以认为散射点的强度只与雷达视线相对于旋转散射点的角度有关,为了方便推导,简记为 $A_n(\tau)$ 。由空间几何关系可得

$$\begin{aligned} R_n(\tau) &\approx R_{T,n} - \cos \beta_{T,n} r_n \cos[\theta_n(\tau) - \alpha_{T,n}] \\ &= R_{T,n} - \cos \beta_{T,n} r_n \cos(\omega_n \tau + \theta_{0,n} - \alpha_{T,n}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\theta_{0,n}$ 为第 n 个旋转散射点与旋转中心的连线在相干处理

的初始时刻与 x 轴所成的角度。

假设雷达的发射信号为正弦信号波形,则第 n 个旋转散射点基带回波信号的相位分别为

$$\phi_n(\tau) = \frac{4\pi}{\lambda} (R_{T,n} - \cos \beta_{T,n} r_n \cos(\omega_n \tau + \theta_{0,n} - \alpha_{T,n})) \quad (3)$$

由目标旋转引起的多普勒频率为

$$f_{d,n} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_n(\tau)}{d\tau} = \frac{2r_n \omega_n \cos \beta_{T,n}}{\lambda} \sin(\omega_n \tau + \theta_{0,n} - \alpha_{T,n}) \quad (4)$$

式(4)最大值出现在 $\omega_n \tau + \theta_{0,n} - \alpha_{T,n} = [(2m-1)/2]\pi, m=1, 2, 3, \dots$, 即旋转半径 r_n 与雷达视线垂直的时候,多普勒频率的最大值为 $(2r_n \omega_n \cos \beta_{T,n})/\lambda$, 回波的多普勒随 τ 作正弦调制,其周期等于旋转点 P_n 对应的转动周期 $2\pi/\omega_n$ 。

2.2 旋转目标回波的时频特性

为了对旋转部件的微 Doppler 特性作分析,通常采用时频分析的手段,如短时傅里叶变换, Wigner-Ville 分布, Gabor 变换等各种时频分析工具。本文采用短时傅里叶变换对旋转部件的回波进行时频分析,以分析由于目标旋转而引入的微 Doppler 特性。

由 N 个旋转散射点合成的旋转体总的回波为

$$\begin{aligned} y(\tau) &= \sum_{n=1}^N A_n(\tau) \exp(-j\phi_n(\tau)) \\ &= \sum_{n=1}^N A_n(\tau) \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} R_{T,n}\right] \\ &\quad \cdot \exp\left[j\frac{4\pi}{\lambda} \cos \beta_{T,n} r_n \cos(\omega_n \tau + \theta_{0,n} - \alpha_{T,n})\right] \end{aligned} \quad (5)$$

对回波信号进行短时傅里叶变换

$$Y(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [y(t) \gamma^*(t - \tau)] e^{-j2\pi ft} dt \quad (6)$$

其中 $\gamma(t)$ 为短时傅里叶变换的窗函数,不妨取为矩形窗,窗的宽度为 $\Delta\tau$, 即 $\gamma(t) = (1/\Delta\tau) \text{rect}(t/\Delta\tau)$, 如果 $\Delta\tau$ 满足 $r_n \omega_n \Delta\tau \sin(\theta_{0,n} + \omega_n \tau) \gg \lambda$, $\omega_n \Delta\tau \ll 2\pi$, 那么根据相位驻定定理,对式(5)进行短时傅里叶变换的结果可近似为

$$|Y(\tau, f)| \approx \sum_{n=1}^N A_n(\tau) \sqrt{\frac{2\pi}{|f'|(\tau)} \frac{1}{\Delta\tau}} \text{rect}\left[\frac{f - f_n(\tau)}{|f'|(\tau)|\Delta\tau}\right] \quad (7)$$

其中 $f_n(\tau) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_n(t)}{dt} = f_D + \frac{2r_n \omega_n \cos \beta_{T,n}}{\lambda} \sin(\omega_n t + \theta_{0,n} - \alpha_{T,n})$, $f_D = 2V/\lambda$ 。需要说明的是,为了追求时间分辨率,短时傅里叶变换的 $\Delta\tau$ 一般取得很短,基于相位驻定定理推导的近似结果将不再那么准确,不过以上近似对于反映时频图中曲线的形状及强度变化还是足够的。

由式(7)可知,目标的旋转会引入微多普勒效应,回波信号的时频谱的峰值点所形成的曲线为正弦曲线,集中在 f_D 上下, $f_{d,n}(\tau)$ 起伏的周期与转动周期相同,通过时频谱上 $f_{d,n}(\tau)$ 的周期,可以估计目标的转动周期。旋转部件的幅度调制,只会对回波信号时频图的灰度产生影响,对于时频图中曲线的形状和位置不会产生影响。

一般情况,各旋转散射点的旋转中心是相同的,记为 O ,所有旋转散射点在同一个平面内旋转,不同散射点的旋转角速度也相同,记为 ω ,即对不同旋转散射点建立的坐标系是

相同的, 雷达在此坐标系下的位置为 (R, α, β) , 各个旋转散射点所不同的在于其散射点的强度 A_n , 旋转半径 r_n 及初始角度 $\theta_{0,n}$, 所以式(7)可以简化为

$$|Y(\tau, f)| \approx \sum_{n=1}^N A_n(\tau) \sqrt{\frac{2\pi}{|f'(\tau)|}} \frac{1}{\Delta\tau} \text{rect}\left(\frac{f - f_n(\tau)}{|f'(\tau)|\Delta\tau}\right) \quad (8)$$

其中 $f_n(\tau) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_n(t)}{dt} = f_D + \frac{2r_n\omega_n \cos\beta}{\lambda} \sin(\omega t + \theta_{0,n} - \alpha)$ 。

从中可以看出, 第 n 个散射点的强度 $A_n(\tau)$ 将对时频谱上曲线的灰度产生周期性调制。

图 2 给出了旋转目标回波时频图的仿真结果, 目标为图 3(b)所示的两点源目标, 转动周期为 5s, 图 2(a)为各向同性散射点的回波时频图, 图 2(b)为考虑了旋转对幅度的调制作用后的回波的时频图, 假设散射点的方向图为 $|\sin(\theta)|$, 通过两幅图的对比可以看出, 时频图中曲线的形状没有发生变化, 不过线的明暗变化不同。图 2(b)中, 当曲线的位置接近零频位置时, 曲线比较弱。图 2(c)为目标同时有宏观运动, 又有旋转部件的转动时的情况, 可以看出时频图中的曲线较图 2(b)整体移动, 移动的距离刚好是宏观运动引入的多普勒频率。

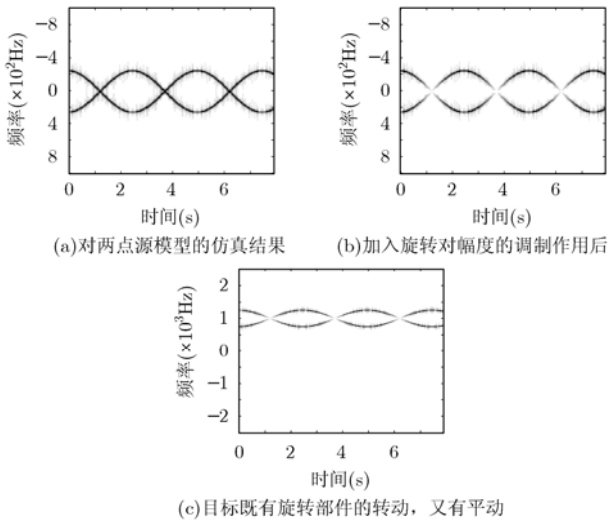


图 2 旋转部件回波多普勒谱的仿真结果

3 基于实测数据的微动目标特征提取

3.1 实测数据测量条件说明

为了验证理论分析的结果, 设计了一个简单的旋转体目标, 如图 3(b) 所示。利用 PD 体制的毫米波雷达, 在外场条件下对该旋转体的多普勒特性进行了测量。图 3 所示分别为角反射器, 旋转体, 外场的测量环境的图片。

雷达的具体参数见表 1。旋转部件的中心位置固定, 旋转部件在两端各具有一个四象限角反射器, 角反射器的最大理论 RCS 为 6.55m^2 , 两个角反射器的旋转半径相同记为 r , 转动角速度为 ω , 可以将旋转点简化为两点源模型, 两散射点的强度可以认为相同。由于毫米波雷达的作用距离有限,

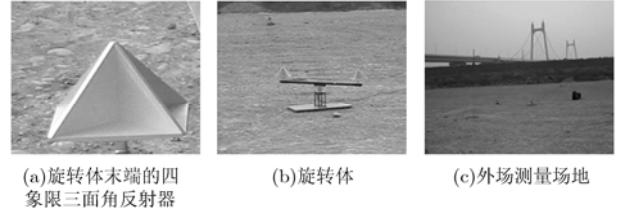


图 3 外场测量实验条件说明

表 1 测量雷达的具体参数

波长	脉冲宽度	PRF	采样频率
8mm	100ns	50kHz	100MHz

在实验中, 雷达与目标的离为 160m 左右, 已经能够很好地满足远场测量的条件。

由于两个散射点位于同一个杆的两端, 所以 $\theta_{0,1} = \pi - \theta_{0,2} = \theta_0$ 。那么 $\theta_1(\tau) = \theta_0 + \omega\tau$, $\theta_2(\tau) = \pi - \theta_{\tau,1} = \pi - \theta_0 + \omega\tau$, 代入式(8)可得, 旋转体的时频谱的理论值为

$$|Y(\tau, f)| = A_1(\tau) \sqrt{\frac{2\pi}{|f'(\tau)|}} \frac{1}{\Delta\tau} \text{rect}\left(\frac{f - f(\tau)}{|f'(\tau)|\Delta\tau}\right) + A_2(\tau) \sqrt{\frac{2\pi}{|f'(\tau)|}} \frac{1}{\Delta\tau} \text{rect}\left(\frac{f + f(\tau)}{|f'(\tau)|\Delta\tau}\right) \quad (9)$$

其中 $f_n(\tau) = \frac{2r\omega \cos\beta}{\lambda} \sin(\omega t + \theta_{0,1} - \alpha)$ 。

将旋转体置于不同的位置, 进行了多次测量, 每次测量的时间大约为 1s。图 4 给出了由雷达实测数据得到的旋转体回波的时频图。其中, 图 4(a)为旋转体不转动时, 回波信号的时频图, 从中可以看出, 旋转体不转动时, 回波的能量主要集中在零频附近, 图 4(b)为旋转体转动时, 目标回波的时频图, 图 4(d)为基于短时傅里叶变换的边缘特性提取的微多普勒谱的强度随时间的变化曲线, 图 4(c)为对图 4(b)利用 Hough 变换检测正弦曲线的参数估计结果, 图 4(d)中曲线的起伏对应图 4(b)中时频图中正弦曲线的能量变化, 实线和虚线分别对应图 4(b)图中的两条正弦曲线的强度, 图 4(d)中曲线的峰值点对应图 4(b)中时频图中正弦曲线能量比较大的部分。由图 4(b)可以看出, 旋转体的时频图形状为两条正弦曲线, 通过 Hough 变换的参数估计结果发现, 对两条正弦曲线估计得到的参数估计结果可以证明: 两条正弦曲线振幅相等, 周期相同, 相位差 180° , 与式(9)的理论分析结果相符。从图 4(d)还可以看出散射点的方向性对时频谱中峰值强度的调制作用, 即图 4(d)中的正弦曲线的强度呈现比较强烈的起伏, 可以通过微 Doppler 强度的变化估计旋转散射体的结构。本文中所采用的旋转体两端的强散射点由四象限三面角反射器构成, 从图 4(d)可以看出 4 个比较宽的峰值, 这是因为当雷达视线位于垂直两平面的中线附近时, 三面角反射器的散射占主要分量, 由三面角的反射特性可知, 当雷达视线位于垂直两平面的中线时, 散射强度最大, 峰的宽度较宽, 理论的半功率波束宽度为 40° 。从图 4(d)还可以看到, 在 4

个比较宽的峰之间存着比较尖锐的峰值,这是因为当雷达视线与某垂直平面的夹角接近零时,二面角的散射占主要分量,由二面角的特性可知,当雷达视线与二平面的交线垂直时,二面角的散射最大,峰点比较尖锐。由于当微多普勒接近零频时,两条正弦曲线离的比较近,并且地杂波也将对曲线的强度产生影响,所以对曲线强度的估计结果并不是很理想,但从中还是可以看出旋转部件的一些结构信息。

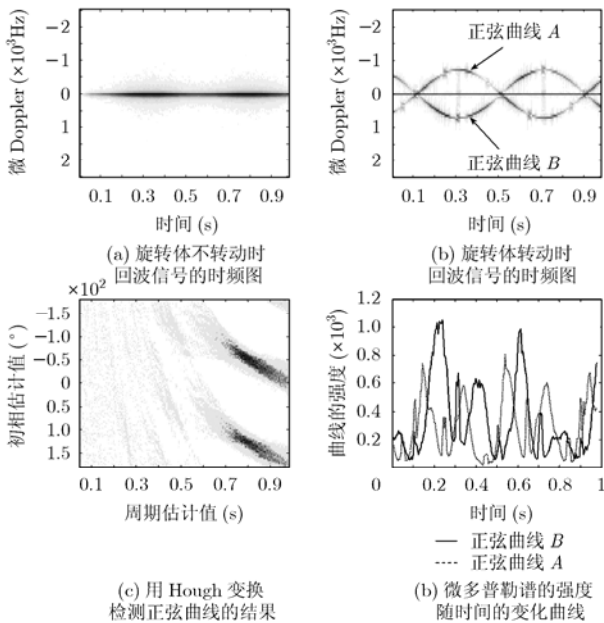


图4 旋转体实测数据的分析结果

3.2 旋转体微动参数提取

对 PD 雷达回波作短时傅里叶变换,通过时频图中正弦曲线的周期性可以估计旋转部件的转速,并且通过微多普勒的最大值可以估计旋转散射点的等效转动半径 $r \cos \beta$,由雷达波束的指向和一定的先验知识可以得到转动半径 r 的估计。这些信息对于目标的识别具有很大的意义。表 2 中给出了在多个不同地点测量下利用时频图对旋转体运动参数的估计结果。

由于实验中对真实转速的测量是在 15s 至 1 min 的时间内人为记数取平均,而雷达测量的时间大约为 1s,由于电压不稳等因素导致旋转体的转速不稳定,所以上述对于转速的估计,误差未超过 10%,是令人满意的。本文采用过零检测和 Hough 变换的方法对旋转周期进行估计,二者的估计结果大致相符,这是因为图 4(b)的信噪比比较高,当时频图信噪比或信杂比降低后,Hough 变换对于参数的估计结果将优于过零检测。

旋转体半径的真实值为 0.4m,雷达距离旋转体的距离约为 160m,雷达距离旋转体的高度大约为 30m,得到的等效半径 $r \cos \beta$ 为 39cm,由表 2 可以看出,旋转的估计值与真实值存在一定的偏差,这是因为多普勒域的分辨力比较差,

导致时频图中正弦曲线的线宽比较大。多普勒域可以达到的分辨力与短时傅里叶变换选取的窗口长度有关,在本文中选取 0.02 s,对应的多普勒分辨率为 50Hz,通过窗口宽度及窗的类型的优化还可以得到更好的估计结果。采用更好的时频分析手段也有望对估计的精度有所提高。

表 2 旋转部件运动参数估计结果

试验序号	1	2	3	4	5	6
转速真实值 (转/min)	81.3	80	75.7	77	81	78
转速估计值 (转/min)	85.7	76.9	75.9	77.9	88	77
过零检测						
最大多普勒(Hz)	800	750	750	750	800	800
等效半径(m)	0.36	0.37	0.38	0.37	0.35	0.40
Hough 变换						
转速估计值 (转/min)	83.4	77	74.5	76.25	86.2	77.4
最大多普勒(Hz)	825	725	725	725	825	800
等效半径(m)	0.38	0.36	0.37	0.36	0.37	0.39

4 结束语

目标的微运动包括很多种形式,如旋转,翻滚,振动等,它来自于目标本身或内部构造的旋转和振动。利用微 Doppler 信息估计目标的微运动参数,可望改进雷达目标的识别和分类性能。本文研究了由旋转部件引入的微 Doppler,并推导了含有旋转部件目标回波的时频特性,为利用微 Doppler 提取目标的微动信息提供了一种途径,为了证实理论推导的结果,利用毫米波 PD 雷达对旋转体的多普勒特性进行了测量,得到的结论与理论推导吻合,并且证实了利用微 Doppler 提取旋转运动参数的可行性。本文还只是对旋转部件的微 Doppler 特性进行了分析和推导,对于目标的振动等其它形式的微运动的分析以及微运动在成像领域的应用等问题有待在下一步工作中开展。

参考文献

- [1] Chen V C, Li F, and Ho S S, *et al.* Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study. *IEEE Trans. on AES*, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] Chen V C, Li F, and Ho S S, *et al.* Analysis of micro-Doppler signatures. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2003, 150(4): 271-276.
- [3] Chen V C. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics: A review. *Proc. of SPIE*, 2003, Vol. 5102: 240-249.
- [4] Chen V C. Analysis of radar micro-Doppler signature with

- time-frequency transform. Proceedings of the 10th IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing, Pocano, PA, 2000: 463-466.
- [5] Greneker G and Geisheimer J. Extraction of micro-Doppler data from vehicle targets at X-band frequencies. Proc. of SPIE, 2001, Vol.4374: 1-9.
- [6] Li Junfei, Ling Hao, and Chen V C. An algorithm to detect the presence of 3D target motion from ISAR data. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2003, 14(1): 223-240.
- [7] Sparr T and Krane B. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR. *IEE Proc.-Radar, Sonar and Navig.*, 2003, 150(4): 277-283.
- [8] 陈行勇, 刘永祥, 黎湘等. 雷达目标微多普勒特征提取. 信号处理, 2007, 23(2): 222-226.
Chen Hang-yong, Liu Yong-xiang, and Li Xiang, *et al.* Extraction of micro-Doppler signatures for radar target. *Signal Processing*, 2007, 23(2): 222-226.
- [9] 陈行勇, 黎湘, 郭桂蓉等. 基于旋翼微动雷达特征的空中目标识别. 系统工程与电子技术, 2006, 28(2): 372-375.
Chen Hang-yong, Li Xiang, and Guo Gui-rong, *et al.* Identification of airtarget based on the micromotion radar signatures of blades. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(2): 372-375.
- [10] 陈行勇, 刘永祥, 黎湘等. 微多普勒分析与参数估计. 红外与毫米波学报, 2006, 25(5): 360-363.
Chen Hang-yong, Liu Yong-xiang, and Li Xiang, *et al.* Analysis of micro-Doppler and parameters estimation. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, 25(5): 360-363.
- 李金梁: 男, 1982 年生, 博士, 从事无源干扰、极化信息处理方面的研究.
- 王雪松: 男, 1972 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达极化信息处理、弹道导弹攻防对抗电子战等领域的研究.