

## 直升机旋翼微多普勒特性分析

陈 鹏,郝士琦,赵楠翔,周建国

- (1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院),安徽合肥 230037;
2. 解放军电子工程学院 安徽省电子制约技术重点实验室,安徽 合肥 230037)

**摘 要:**近年来,对微多普勒效应的研究为目标的精确识别提供了一种新的途径,其在对直升机探测、分类和识别领域有着重要的应用前景。采用物理光学模型计算了直升机旋翼的雷达散射截面,改进了直升机旋翼回波的微多普勒模型。并基于该模型,分别计算了不同形状以及转速的双叶片、三叶片直升机旋翼的探测回波信号,利用短时傅里叶变换时频分析方法分析了微多普勒特征。研究结果表明,不同的直升机旋翼叶片数量、长度以及转速对直升机旋翼微多普勒的曲线形状、幅度以及周期产生不同的影响,为下一步对直升机的微多普勒识别提供了参考和借鉴。

**关键词:**直升机识别; 微多普勒; 直升机旋翼; 分析识别

**中图分类号:** TN95    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3259-06

## Micro-doppler analysis of helicopter's rotor blades

Chen Peng, Hao Shiqi, Zhao Nanxiang, Zhou Jianguo

- (1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (Electronic Engineering Institute), Hefei 230037, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Recently, the research of micro-Doppler effect provides a new approach for accurate target identification, which possess an important application prospect of helicopter detection, classification and recognition. In this paper, the radar scattering cross section was predicted with the physical optics method, and micro-Doppler model of a helicopter rotor blade was modified. Based on the model, the echo signal of double blades and three blades with different shape and rotating speed was calculated and micro-Doppler effect was analyzed with STFT. The results show that different quantity, height and rotating speed have different influence on the curve shape, amplitude and period of the micro-Doppler, and some reference for helicopter identification by micro-Doppler is provided.

**Key words:** helicopter identification; micro-Doppler; helicopter's rotor blades; analysis and identification

收稿日期:2013-04-20; 修订日期:2013-05-10

基金项目:国家自然科学基金(61271353);安徽省自然科学基金资助项目(1308085QF123)

作者简介:陈鹏(1988-),男,硕士生,主要从事激光探测方面的研究。Email:xurunpeng@yeah.net

导师简介:郝士琦(1963-),女,教授,博士生导师,主要从事激光探测、光通信方面的研究。Email:liu\_hsq@126.com

## 0 引言

目标的微动特征是指目标或目标部分结构的振动、旋转等小幅的非刚体运动<sup>[1-3]</sup>。目标的这种微小运动会使雷达回波中引入一个频率调制,并会在目标的多普勒频率偏移上产生一个边带,对于这种由于微小运动产生的调制称为微多普勒现象(MD)<sup>[1-5]</sup>。近年来,学者们将微多普勒技术与雷达目标识别结合,发展了基于微多普勒分析的目标识别技术<sup>[6]</sup>,为目标识别提供了新方法、新思路。

一直以来,国内外学者对目标的微多普勒研究十分关注。Victor C Chen 教授提出了微多普勒这个概念,深入研究了微多普勒的产生原理,并建立了微动的数学模型<sup>[2]</sup>。国内对微多普勒效应的研究起步较晚,刘增东等利用 Michelson-Morley 动态干涉技术,建立了一套基于 Doppler 频移原理的调制器<sup>[7]</sup>。张海洋,杨彦玲等基于激光相干雷达从不同角度分析了振动物体产生的多普勒和微多普勒效应,对基于微多普勒效应在目标识别方面的研究起到了积极的作用<sup>[8-9]</sup>。目前直升机旋翼特征对微多普勒影响的研究国内外开展的工作还较少。王维、陈行勇等研究了直升机旋翼的个数对微多普勒的影响<sup>[6,10]</sup>,但是并没有考虑直升机旋翼的雷达散射截面(RCS)对微多普勒的影响,也没有进一步讨论直升机叶片形状以及叶片转速对微多普勒的影响。

文中采用物理光学法(PO)<sup>[11]</sup>计算了直升机旋翼叶片的雷达散射截面,构建了直升机旋翼的探测回波模型,并基于该模型,分别对不同叶片数,叶片形状以及叶片转速的直升机旋翼的微多普勒进行了仿真和数值分析,为直升机旋翼微多普勒的目标特征参数的选取提供了依据。

## 1 探测回波模型

### 1.1 叶片雷达横截面计算

PO 法是一种计算任意三维物体雷达截面积的方法<sup>[12]</sup>。该方法假设目标被照射部分的表面可看成平面,从而求得表面电流近似值的一种技术。

直升机旋翼叶片可以看作是长为  $a$ , 宽为  $b$  的矩形板。其磁向量势可以表示为<sup>[11]</sup>:

$$A = \frac{\mu}{2\pi Z_0} \frac{e^{-jkR_s}}{R_s} \hat{\phi} \times \hat{n} ab \cdot$$

$$\frac{\sin(ksin\theta\cos\phi)}{ak\sin\theta\cos\phi} \cdot \frac{\sin(ksin\theta\cos\phi)}{bk\sin\theta\cos\phi} \quad (1)$$

式中: $z_0$  为自由空间阻抗。在远场, $\hat{\theta}$ 极化散射场为:

$$E_s = -j\omega(\hat{\theta} \cdot A) \quad (2)$$

图 1 为载波频率  $f_0=5$  GHz 时,长度  $a=6$  m,宽度  $b=0.2$  m 的旋翼叶片的雷达散射截面示意图。由图可见,固定方位角  $\varphi$ ,随着俯仰角  $\theta$  的增大,旋翼叶片 RCS 振荡递增,在  $\theta=0^\circ$  附近达到最大值后随着俯仰角  $\theta$  的进一步增大,又呈现振荡递减趋势。固定俯仰角  $\theta$ ,旋翼叶片 RCS 随方位角  $\varphi$  变化波动,在  $\varphi=90^\circ$  和  $270^\circ$  时分别达到最大值。

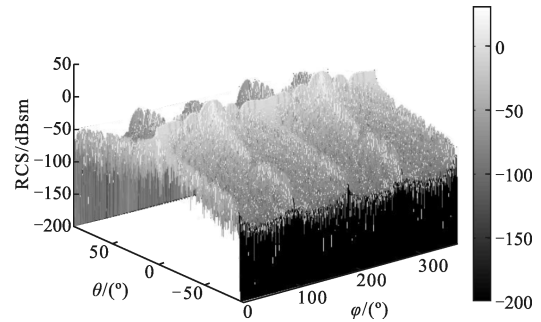


图 1 旋翼叶片 RCS

Fig.1 RCS of rotating rotor blade

### 1.2 探测回波模型

图 2 为雷达与旋翼的位置关系示意图,其中旋翼上点  $P$  到接收机的距离  $R_p$  为:

$$R_p(t) = [R_0^2 + l_p^2 + 2l_p R_0 \cos(\varphi_0 + \Omega t)]^{1/2} \cong R_0 + l_p \cos \varphi_0 \cos \Omega t + l_p \sin \varphi_0 \sin \Omega t \quad (3)$$

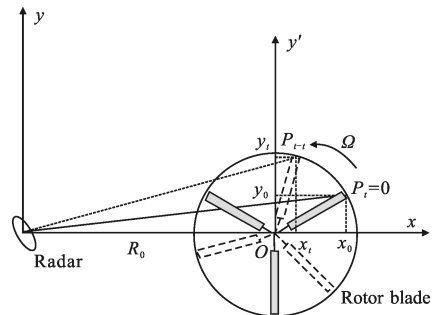


图 2 雷达与旋翼的位置关系

Fig.2 Location of radar and rotating rotor blade

旋翼的回波信号可表示为<sup>[12]</sup>:

$$s_c(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s_{L_k}(t) = L \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + Z_0 \sin \beta] \right\}$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} \text{sinc} \left[ \frac{4\pi}{\lambda} \frac{L}{2} \cos\beta \cos \left( \Omega t + \varphi_0 + \frac{k \cdot 2\pi}{N} \right) \right] \cdot \exp[-j\Phi_k(t)]$$

$$\Phi_k(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{L}{2} \cos\beta \cos \left( \Omega t + \varphi_0 + \frac{k \cdot 2\pi}{N} \right) \quad (4)$$

式中:  $k=0, 1, 2 \cdots N-1, N$  为直升机旋翼叶片个数。

图 3 给出了直升机叶片的分解示意图。如图所示将直升机叶片看作是由多个单元组成的矩形平板, 每个单元指向雷达的仰角和方位角为  $\{(\varphi_1, \theta_1) \cdots (\varphi_n, \theta_n)\}$ , 每个单元相对于雷达探测波的 RCS 为  $\sigma_{n,m}(t)$ , 相对于雷达的距离为  $R_{n,m}(t)$ , 则旋翼的雷达回波可以表示为:

$$s_B(t) = \sum_{k=1}^{n_p} \sum_{n=1}^{N_B} \sum_{m=1}^{N_F} \sqrt{\sigma_{n,m}(t)} \cdot \text{rect} \left\{ t - k\Delta T - \frac{2R_{n,m}(t)}{c} \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi f_c - \frac{2R_{n,m}(t)}{c} \right\} \quad (5)$$

式中:  $N_B$  为叶片数量;  $N_F$  为每个叶片上的小平面数量;  $n_p$  为雷达探测时间内总的脉冲数量。

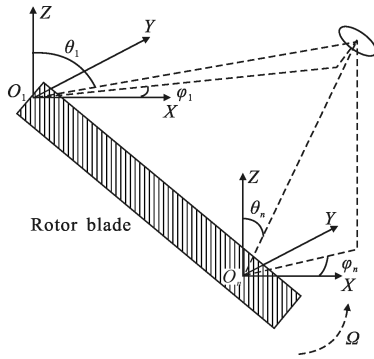


图 3 叶片分解小面元示意图

Fig.3 Facets of rotating rotor

在回波信号中, 相位信息决定信号的瞬时频率, 旋翼中第  $k$  个叶片的微多普勒频率  $f_{D,k}$  可以从对公式(4)中的  $\Phi_k(t)$  求得, 即

$$f_{D,k} = \frac{L}{\lambda} \Omega \cos\beta \cdot \left[ -\sin \left( \varphi_0 + \frac{k \cdot 2\pi}{N} \right) \sin\Omega t + \cos \left( \varphi_0 + \frac{k \cdot 2\pi}{N} \right) \cos\Omega t \right] \quad (6)$$

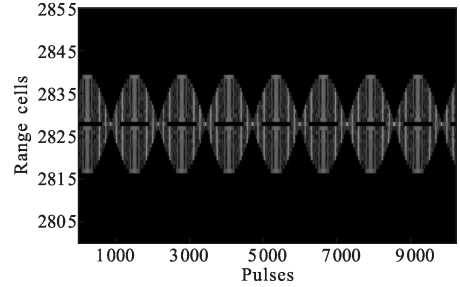
式中: 微多普勒频率的振幅  $A = \frac{L}{\lambda} \Omega \cos\beta$ , 相位  $\varphi = \Omega \cdot t + \varphi_0 + \frac{k \cdot 2\pi}{N}$ 。

## 2 仿真与分析

### 2.1 叶片数量对微多普勒频率的影响

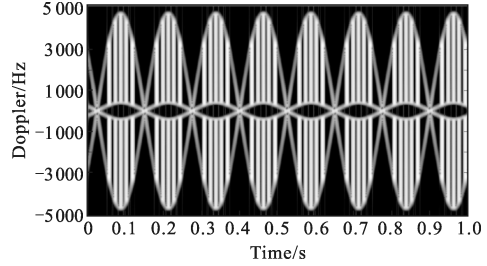
通过公式(6)可知, 旋转速度为  $\Omega$  调制的微多普勒频率是由两个类正弦曲线组成的, 其曲线幅度为  $\frac{L}{\lambda} \Omega \cos\beta$ 。

设雷达位置为  $(x=1000 \text{ m}, y=0 \text{ m}, z=1000 \text{ m})$ , 旋翼位置为  $(x=0 \text{ m}, y=0 \text{ m}, z=0 \text{ m})$ , 载波频率  $f_0=5 \text{ GHz}$ , 叶片长度  $a=6 \text{ m}$ , 叶片宽度  $W=0.2 \text{ m}$ , 转速  $\Omega_1=4 \times 2\pi \text{ rad/s}$ , 令  $N_F=60$ , 根据公式(5), 分别对两叶片和三叶片旋翼的微多普勒进行仿真, 仿真结果如图 4、图 5 所示。



(a) 距离单元

(a) Range profiles

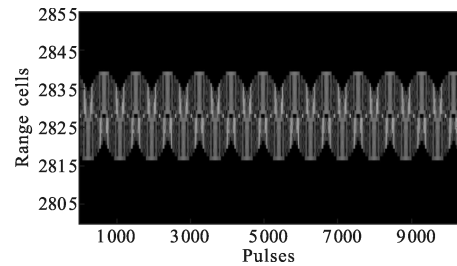


(b) 短时傅里叶变换

(b) STFT

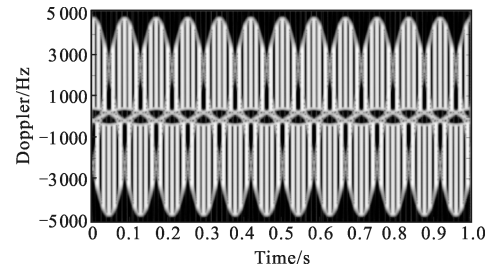
图 4 两叶片旋翼回波

Fig.4 Echo of rotating double-blade rotor



(a) 距离单元

(a) Range profiles



(b) 短时傅里叶变换

(b) STFT

图 5 三叶片旋翼回波

Fig.5 Echo of rotating three-blade rotor

在图 4(a)距离单元中,曲线中最大值和最小值同时出现,也就是叶片之间的微多普勒相差 $\frac{\pi}{2}$ 相位,在图 4(b)短时傅里叶变换中可见,频率曲线形状也呈上下对称;在图 5(a)距离单元中,曲线中最大值和最小值交错出现,在图 5(b)短时傅里叶变换中可见,频率曲线形状也呈上下对称,观察图中频率为 0 附近的类正弦曲线可以发现,在一条曲线的频率周期内有 6 个极值点。

由该节可知,直升机旋翼的叶片数对旋翼的微多普勒曲线形状影响较大。从旋翼微多普勒中类正弦曲线的相位关系可以判断出直升机旋翼的叶片个数,由公式(6)可得,令  $N$  为直升机旋翼个数,则曲线之间的相位差为 $\frac{k \cdot 2\pi}{N}$ , $k=1,2,\dots,N$ 。若存在两条曲线的相位差为 $\frac{\pi}{2}$ ,叶片数为偶数,若不存在两 1 631 条曲线的相位差为 $\frac{\pi}{2}$ ,叶片数为奇数。所以,直升机旋翼的叶片数为直升机微多普勒探测的特征量。

## 2.2 叶片形状对微多普勒频率的影响

根据公式(1)可以得出,叶片的雷达散射截面与叶片的长度和宽度有关。从公式(6)可知,雷达回波频率的幅度与叶片的长度有关。

设雷达位置为( $x=1\ 000\text{ m}$ , $y=0\text{ m}$ , $z=1\ 000\text{ m}$ ),旋翼位置为( $x=0\text{ m}$ , $y=0\text{ m}$ , $z=0\text{ m}$ ),载波频率 $f_0=5\text{ GHz}$ ,叶片个数 $N=2$ ,转速 $\Omega_1=4 \times 2\pi\text{ rad/s}$ ,令 $N_F=60$ ,根据公式(6),分别对叶片长度 $a_1=7\text{ m}$ 宽度 $b_1=0.2\text{ m}$ 和叶片长度 $a_2=6\text{ m}$ 宽度 $b_2=0.4\text{ m}$ 旋翼的微多普勒进行仿真,仿真结果如图 6、图 7 所示。

在图 6(a)中,距离最大值为 2 842 m,最小值为 2 815 m;在图 4(a)中,距离最大值为 2 839 m,最小值为 2 817 m。联系图 6(b)与图 4(b)可知,长度为 7 m 的叶片微多普勒的最大值为 410 Hz,长度为 6 m 的叶片微多普勒的最大值为 450 Hz,微多普勒比为 $450/410=1.0976$ 。由于叶片的形状改变会对叶片的雷达散射截面产生影响,所以叶片长度与微多普勒不是绝对正比关系,但是仍可以看出,微多普勒比与叶片长度比 $3.5/3=1.1667$ 较为近似。联系图 7 与图 4 可以发现,在只改变叶片的宽度的条件下,旋翼的微多普勒变化不明显。

由该节可知,直升机旋翼的叶片长度与微多普勒的幅度有关。当直升机旋翼转速不变,探测波的波长、

仰角一定的条件下,雷达回波频率的幅度与直升机旋翼的长度成正比。所以,直升机旋翼的叶片长度可以作为直升机微多普勒识别过程中的一个特征量。

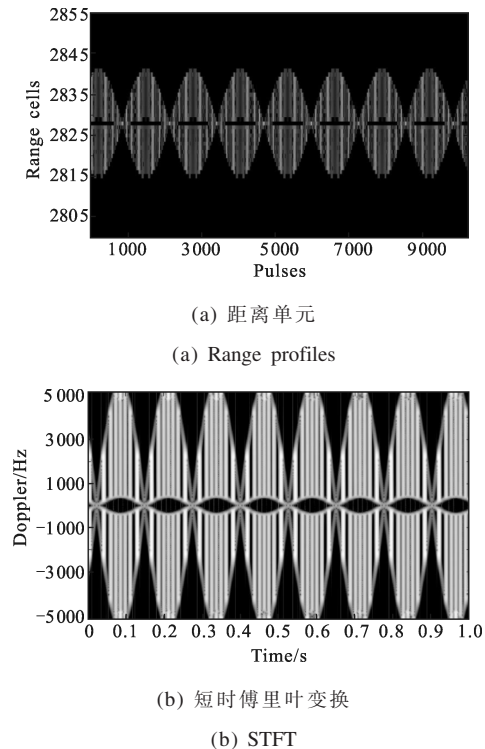


图 6 长度为 7 m 宽度为 0.2 m 的叶片旋翼回波

Fig.6 Echo of rotating rotor with width is 7 m and length is 0.2 m

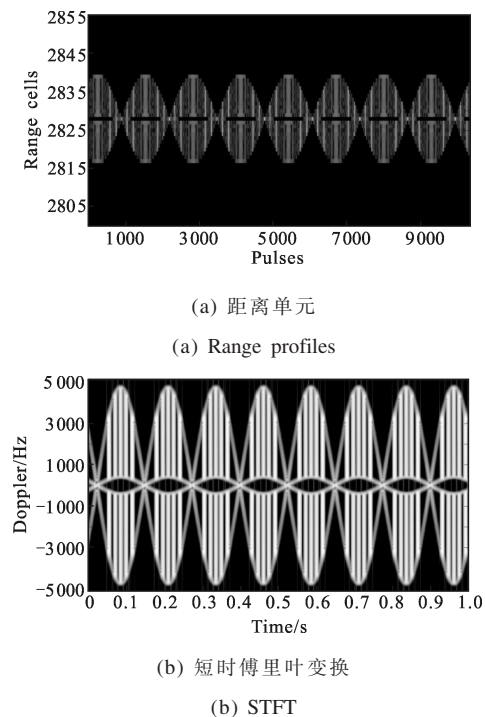


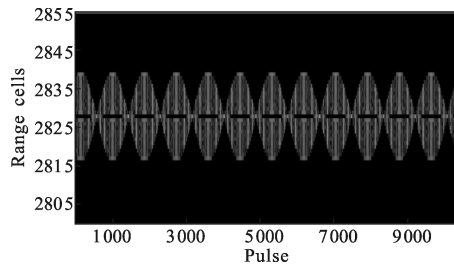
图 7 长度为 6 m 宽度为 0.4 m 的叶片旋翼回波

Fig.7 Echo of rotating rotor with width 6 m and length 0.4 m

### 2.3 叶片转速对微多普勒频率的影响

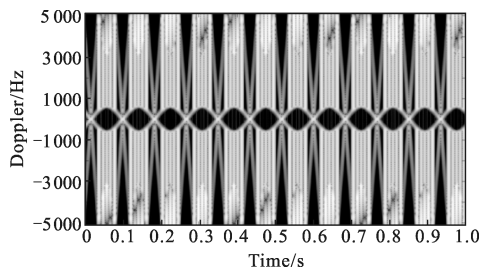
根据公式(6)可以得出,叶片转速与雷达回波频率的幅度和相位有关。

设雷达位置为( $x=1\ 000\text{ m}, y=0\text{ m}, z=1\ 000\text{ m}$ ),旋翼位置为( $x=0\text{ m}, y=0\text{ m}, z=0\text{ m}$ ),载波频率  $f_0=5\text{ GHz}$ ,叶片个数  $N=2$ ,叶片长度  $a=6\text{ m}$ ,叶片宽度  $W=0.2\text{ m}$ ,令  $N_f=60$ ,根据公式(6),对叶片长度转速  $\Omega_2=6\times 2\pi\text{ rad/s}$ 旋翼的微多普勒进行仿真,仿真结果如图 8 所示。



(a) 距离单元

(a) Range profiles



(b) 短时傅里叶变换

(b) STFT

图 8 直升机旋翼回波( $\Omega_2=6\times 2\pi\text{ rad/s}$ )

Fig.8 Echo of rotating rotor( $\Omega_2=6\times 2\pi\text{ rad/s}$ )

在图 8(a)中,1 s 内曲线有 12 个最大值,可以将频率近似为  $f_1=12\text{ Hz}$ ;在图 4(a)中,1 s 内曲线有 8 个最大值,可以将频率近似为  $f_2=8\text{ Hz}$ ,则频率比  $\frac{f_1}{f_2}=\frac{12}{8}$  等于叶片转速反比  $\Omega_1/\Omega_2=6\times 2\pi/4\times 2\pi$ 。在图 8(b)中,微多普勒周期与距离单元周期相同,微多普勒幅度最大值为 611 Hz,联系图 4(b)可知,微多普勒幅度最大之比之比为  $611/410=1.4902$ ,与叶片转速成正比。

从该节可知,直升机的叶片转速对旋翼的微多普勒幅度和周期都有影响。在幅度上,当直升机旋翼叶片长度不变,探测波的波长、仰角一定的条件下,雷达回波频率的幅度与直升机旋翼的转速成正比。在相位上,每个叶片回波的周期为  $T=\frac{2\pi}{\Omega}$ 。所以,直升机旋翼的叶片转速为直升机微多普勒识别过程中

的一个重要特征量。

### 3 结 论

文中利用物理光学(PO)模型,计算了直升机旋翼叶片的雷达截面积,改进了直升机旋翼探测回波模型,并基于该模型对不同叶片个数、叶片形状以及叶片转速的直升机旋翼回波进行仿真,分析不同叶片个数、叶片形状以及叶片转速对直升机旋翼回波微多普勒的影响。研究结果表明:

(1) 在探测波的载波波长一定的条件下,不同的旋翼叶片个数、转速以及长度决定探测回波微多普勒频率。

(2) 旋翼回波微多普勒曲线形状与旋翼的叶片数量有关,通过每个叶片之间的相位差可以判断旋翼叶片的奇偶。

(3) 直升机旋翼的叶片长度与旋翼回波微多普勒幅度有关,且当直升机旋翼转速不变,探测波的波长、仰角一定的条件下,雷达回波频率的幅度与直升机旋翼的长度成正比。

(4) 在幅度上,当直升机旋翼叶片长度不变,探测波的波长、仰角一定的条件下,雷达回波频率的幅度与直升机旋翼的转速成正比。

综上所述,直升机旋翼叶片的叶片数量、叶片长度以及叶片转速对雷达微多普勒有较为显著的影响,可以作为直升机微多普勒特征量。文中的结果对于直升机微多普勒探测的研究有一定的参考价值。

### 参 考 文 献:

- [1] Chen V C, Li F Y, 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.
- [2] Chen V C. Analysis of radar micro-doppler signature with time-frequency transform [C]//Proc Statistical Signal and Array Processing, 2000: 463-466.
- [3] Chen V C, Li F Y. Analysis of Micro-Doppler signatures[J]. *IEE Proc Radar Sonar Navig*, 2003, 150(4): 271-276.
- [4] Chen V C. Time-Frequency signatures of Micro-Doppler phenomenon for feature extraction [C]//Proceedings of SPIE in Wavelet Applications VII, 2000: 220-226.
- [5] Sparr T, Krane B. Micro-Doppler analysis of vibrating targets

- in SAR [J]. *Radar Sonar and Navigation*, 2003, 150 (4): 277–283.
- [6] Wang wei. The research of the target recognition techniques based on the Micro-doppler features of the aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Engineering, 2012. (in Chinese)  
王维. 基于微多普勒特征的空中目标识别技术研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [7] Liu Zengdong, Feng Weiwei, Liu Meijuan, et al. New type of Doppler modulating technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 557–559. (in Chinese)  
刘增东, 凤巍巍, 刘美娟, 等. 一种新型的多普勒调制技术[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 557–559.
- [8] Zhang Haiyang, Zhao Changming, Yang Suhui. The methods of decreasing the phase noise influence in Micro-Doppler laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(5): 754–757. (in Chinese)  
张海洋, 赵长明, 杨苏辉. 激光微多普勒探测系统中降低相位噪声影响的方法研究 [J]. 光子学报, 2011, 40(5): 754–757.
- [9] Yang Yanling, Li Yanchao, Gao Long, et al. Numerical simulation of balanced heterodyne detection for coherent lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1919–1922. (in Chinese)  
杨彦玲, 李彦超, 高龙, 等. 相干激光雷达平衡外差探测方法的数值仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1919–1922.
- [10] Chen Hangyong, Wang Yi, Chen Haijian. Micro-Doppler analysis and simulation of a helicopter target [J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2009, 11 (6): 26–28. (in Chinese)  
陈行勇, 王祎, 陈海坚. 直升机目标微多普勒分析和仿真[J]. 电子信息对抗技术, 2009, 11(6): 26–28.
- [11] Rassem R, Mahafza. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB [M]. 2nd ed. England: Chapman and Hall/CRC, 2008.
- [12] Chen V C. The Micro-Doppler Effect in Radar [M]. Boston: Artech House, 2011.