

运动直升机旋翼的微多普勒特性分析

陈 鹏,郝士琦,胡以华,李 政

- (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. 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: 激光雷达由于其极高的探测灵敏度,使其在探测过程中具有明显的微多普勒效应。目前,对直升机旋翼微多普勒的研究大部分是在直升机处于悬停状态的基础上,但是在实际情况中直升机是在做各种运动。利用 PO 法对直升机旋翼叶片的 RCS 进行了计算,建立了直升机旋翼回波的微多普勒模型。并基于该模型,以 AH-64 武装直升机为例,分别对作直线运动和俯仰运动的直升机旋翼的微多普勒效应进行了仿真和数值分析。研究表明,通过对直升机旋翼的距离单元曲线以及微多普勒频谱的分析可以初步判断直升机的运动状态,为下一步运动直升机的微多普勒识别提供了参考和借鉴。

关键词: 微多普勒; 直升机; 运动状态; 分析识别

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0118-04

Micro-Doppler analysis of moving helicopter's rotor blades

Chen Peng, Hao Shiqi, Hu Yihua, Li Zheng

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

Abstract: Because of laser radar having extremely high detection sensitivity, the micro-Doppler effect is obvious in laser radar detection process. At present, the study of micro-Doppler of rotor blades is almost based on the hovering helicopter, however, helicopters are taking various motion in the actual condition. In this paper, the RCS of a helicopter rotor was calculated, and a micro-Doppler model of a helicopter rotor was established. Based on the model, taking the AH-64 armed helicopter for example, the micro-Doppler effect of the rotor blades in radar detection process was simulated and calculated, of which was taking the uniform linear moving and the face upward moving. The results show that the motion state of the helicopter can be judged primarily through analyzing the range profiles of the distance and the frequency spectrum of the micro-Doppler effect of a helicopter's blades in radar detection process, which provides some reference for moving helicopter identification by micro-Doppler.

Key words: micro-Doppler; helicopter; motion state; analysis and identification

收稿日期:2014-05-03; 修订日期:2014-06-10

基金项目:国家自然科学基金(61271353);安徽省自然科学基金(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,主要从事激光、通信方面的研究。Email:liu_hsq@126.com

0 引 言

近年来,学者们通过研究发现,自然界中各种目标在运动的同时,本身都存在着微小的振动或转动^[1-3];而在雷达探测过程中,这种微小的振动或者转动会在雷达回波中产生微多普勒效应。相比微波雷达而言,激光雷达具有极高的探测灵敏度,使其在探测过程中具有明显的微多普勒效应。

一直以来,国内外学者对直升机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^[2]。王维研究了直升机旋转部件的物理特性及雷达回波微多普勒^[6]。但是,目前对直升机旋翼的微多普勒探测大部分是在假设直升机处于悬停状态,而对运动的直升机旋翼的微多普勒分析相对较少,如孙洋等对悬停状态直升机的旋转部分进行了微多普勒分析^[7],姜成昊等对直升机在直线运动过程中的旋翼微多普勒进行了分析但没有考虑俯仰角的变化^[8]。但是,在现实情况下直升机在做各种飞行动作,例如俯仰运动、水平运动等。

为了解决实际探测中,由于直升机运动而导致的测量数值抖动,无法快速识别直升机运动状态等问题,文中构建了双直升机旋翼的探测回波模型,并基于该模型,以典型的 AH-64 阿帕奇武装直升机为目标,分别对作直线运动和俯仰运动的直升机旋翼微多普勒进行了仿真,并利用时频分析方法进行了数值分析,为运动直升机的旋翼微多普勒的目标特征参数的选取提供依据。

1 RCS 模型

PO 法是一种计算任意三维物体雷达截面积的方法^[12]。它是一种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。

文中将直升机旋翼近似为矩形小板从而得到直升机旋翼的 RCS 如图 1 所示。

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

定俯仰角 θ ,旋翼叶片 RCS 随方位角 φ 变化波动,在 $\varphi=90^\circ$ 和 270° 时分别达到最大值。

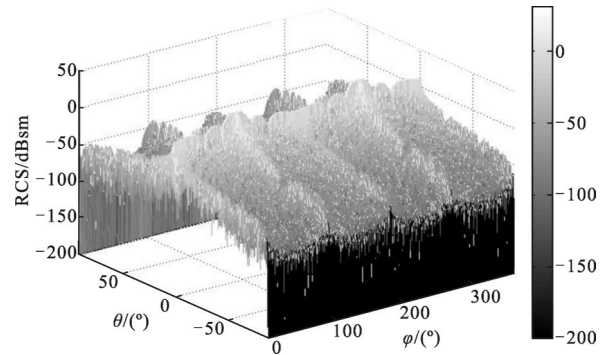


图 1 旋翼叶片 RCS

Fig.1 RCS of rotating rotor blade

2 探测回波模型

2.1 距离单元模型

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:

$$R_p(t)=[R_0^2+l_p^2+2l_pR_0\cos(\varphi_0+\Omega t)]^{1/2}\cong R_0+l_p\cos\varphi_0\cos\Omega t+l_p\sin\varphi_0\sin\Omega t \quad (1)$$

式中: R_0 为雷达到旋翼中心的距离; l_p 为旋翼上 P 点到旋翼中心的距离; φ_0 为初始相位角; Ω 为旋翼转速。

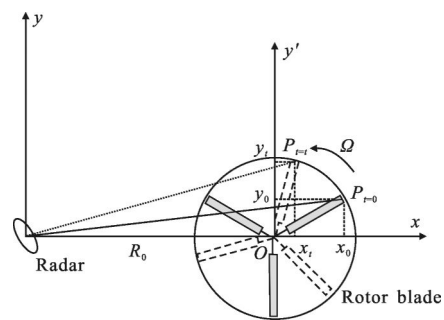


图 2 雷达与旋翼的位置关系

Fig.2 Position of radar and rotor blades

将直升机叶片看作是由多个单元组成的矩形平板,旋翼的回波信号可表示为^[9]:

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

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; $\sigma_{n,m}(t)$ 为每

个单元相对于雷达探测波的 RCS; $R_{n,m}(t)$ 为相对于雷达的距离。

2.2 微多普勒分析

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(2)中的 $\Phi_k(t)$ 求导得出, 即

$$f_{D,k} = \frac{L}{\lambda} \Omega \cos \beta \cdot \left[-\sin \left(\varphi_0 + \frac{k \cdot 2\pi}{N} \right) \sin \Omega t + \cos \left(\varphi_0 + \frac{k \cdot 2\pi}{N} \right) \right] \cos \Omega t \quad (3)$$

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

使用窄窗函数的傅里叶变换习惯称为短时傅里叶变换(STFT), 它是加窗傅里叶变换的一种形式。加窗傅里叶变换最早由 Gabor 于 1946 年提出^[10]。给定一个时间宽度很短的窗函数 $\eta(t)$, 让窗滑动, 则信号 $z(t)$ 的短时傅里叶变换(STFT)定义为^[11]:

$$\text{STFT}_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t') \eta^*(t' - t) e^{-j2\pi f t'} dt' \quad (4)$$

2.3 直升机的运动模型

假设直升机的运动状态为匀速直线运动和俯仰运动。图 3 为直升机运动过程中旋翼的运动状态示意图。当 $t=0$ 时, 旋翼中心位置为 o , 直升机沿 y 轴作速度为 v 的直线运动, 并作旋转速率为 Φ 的俯仰运动, 当 $t=t$ 时, 旋翼中心为 o' , 旋翼与雷达的位置关系如图 3 所示。

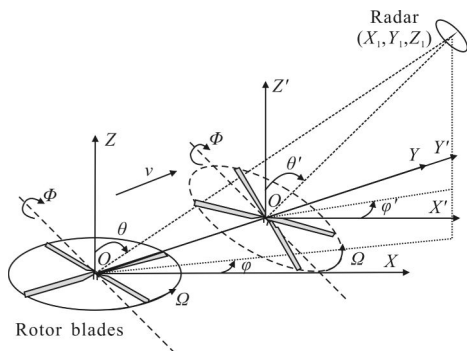


图 3 直升机运动过程中雷达与旋翼的位置关系

Fig.3 Position of radar and rotor blades of moving helicopter

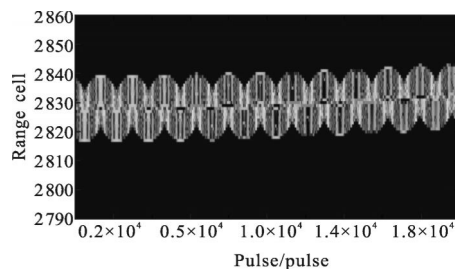
3 仿真与分析

3.1 直线运动

AH-64 武装直升机的主要微动部件为直升机主旋翼、尾部旋翼和直升机发动机运转导致的机身

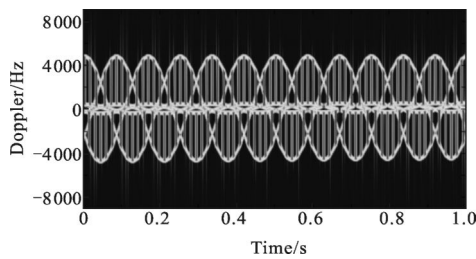
振动。由于直升机尾部旋翼与直升机主旋翼相比直径很小, 并且在激光雷达从直升机正面入射时, 直升机尾部旋翼旋转平面与激光雷达入射光束几乎平行, 所以在激光雷达探测回波中, 直升机尾部旋翼所产生的激光雷达微多普勒效应相对很小。所以, 文中在对 AH-64 武装直升机目标的激光雷达微多普勒效应进行仿真时, 只考虑其主旋翼的激光雷达微多普勒效应。

设直升机航速为 288 km/h, 即 80 m/s 作直线匀速运动, 直升机旋翼直径 14 m, 雷达位置为 $(x=500 \text{ m}, y=0 \text{ m}, z=500 \text{ m})$, 旋翼位置为 $(x=0 \text{ m}, y=0 \text{ m}, z=0 \text{ m})$, 载波频率 $f_0=5 \text{ GHz}$, 叶片数 $N=4$, 叶片长度 $a=7.215 \text{ m}$, 叶片宽度 $W=0.2 \text{ m}$, 转速 $\Omega_1=4 \times 2\pi \text{ rad/s}$, 根据公式(1), 对叶片旋翼的微多普勒进行仿真, 结果如图 4 所示。



(a) 距离单元

(a) Range profiles



(b) 短时傅里叶变换

(b) STFT

图 4 共轴式直升机旋翼微多普勒

Fig.4 Micro-Doppler of coaxial helicopter's rotor blades

由图 4(a)可知, 直升机旋翼距离单元是由四条类正弦曲线组成, 当 $t=0$ 时, 曲线中心位置约为 1 414 m, 即 $2 \times \sqrt{500^2 + 500^2} \approx 1 414 \text{ m}$, 当 $t=1 \text{ m}$ 时, 曲线中心位置约为 1 423 m, 所以速度 $v = \sqrt{(1 423/2)^2 - 500^2 + 500^2} \approx 80 \text{ m/s}$, 与仿真设定的参数相一致。图 4(b)可知, 由于直升机在做直线运动靠近雷达的过程中, 旋翼与雷达的滚转角逐渐减小, 直升机旋翼的微多普勒曲

线中心逐渐增大,即微多普勒频率逐渐增大。

3.2 俯仰运动

设直升机角速度为 $\pi/4\text{r/s}$ 作匀速仰动,直升机旋翼直径 14 m,雷达位置为 $(x=500\text{ m}, y=0\text{ m}, z=500\text{ m})$,旋翼位置为 $(x=0\text{ m}, y=0\text{ m}, z=0\text{ m})$,载波频率 $f_0=5\text{ GHz}$,叶片数 $N=4$,叶片长度 $a=7.215\text{ m}$,叶片宽度 $W=0.2\text{ m}$,转速 $\Omega_1=4\times 2\pi\text{ rad/s}$,根据公式(1),对叶片旋翼的微多普勒进行仿真,结果如图 5 所示。

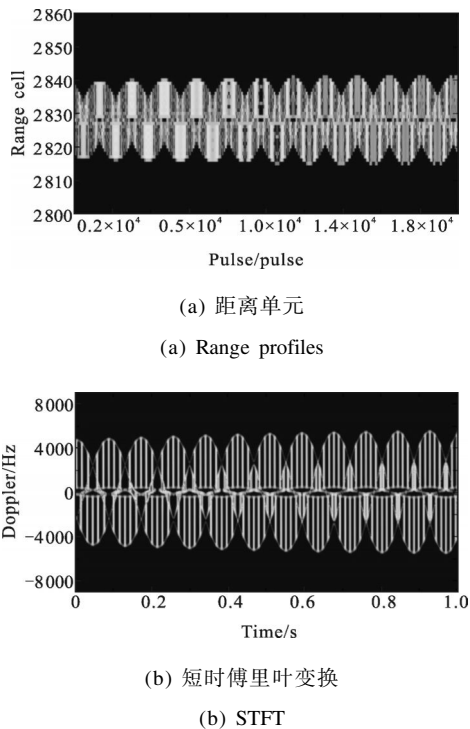


图 5 横列式直升机旋翼微多普勒

Fig.5 Micro-Doppler of horizontal-modal helicopter's rotor blades

由图 5(a)可知,直升机旋翼距离单元是由四条类正弦曲线组成,当 $t=0$ 时,曲线的振幅约为 21 m,当 $t=1\text{ m}$ 时,曲线振幅约为 28 m,所以直升机运动的角速度 $\Phi=\arccos(21/28)\approx 0.727\text{ r/s}$,与仿真设定的参数相一致。图 5(b)可知,当 $t=0$ 时,直升机微多普勒曲线极值约为 4 560 Hz,当 $t=1\text{ m}$ 时,曲线极值约为 6 000 Hz,所以直升机运动的角速度为 $\Phi=\arccos(4560/6000)\approx 0.7075\text{ r/s}$,与仿真设定的参数相一致。

4 结论

文中建立了直升机旋翼的距离单元模型,并基于该模型分别对作匀速直线运动和作匀速俯仰运动的直升机旋翼回波进行了仿真,利用短时傅里叶方

法对仿真数据进行了微多普勒分析。

研究表明:通过对直升机旋翼的距离单元和微多普勒的分析可以对直升机的运动状态进行初步判断。直升机的直线运动可以由直升机旋翼距离单元曲线的中心位置的变化量确定,并且直升机的直线运动对直升机的微多普勒频率的中心位置有一定的影响。直升机的俯仰运动可以由直升机旋翼的距离单元曲线和微多普勒频率曲线的振幅变化量来确定。

综上所述,通过分析直升机旋翼的微多普勒可以初步判断翼直升机的运动状态,为运动直升机的微多普勒识别提供了参考和借鉴。

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]. *IEE Proc Radar Sonar Navig*, 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 Technology, 2012. (in Chinese)
- [7] Sun Yang, Yuan Shuai, Wu Qing, et al. Laser coherent detection on Micro-Doppler effect of rotational target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1055-1058. (in Chinese)
- [8] Jiang Chenghao, Yang Jinhua, Gao Feng, et al. Study and simulation of vibrating target's motion states based on Doppler lidar [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(8):858-861. (in Chinese)
- [9] Chen V C. The Micro-Doppler Effect in Radar [M]. Boston: Artech House, 2011.
- [10] Gabor D. Theory of communication [J]. *IEE*, 1946, 93: 429-457.
- [11] Ge Zhexue, Chen Zhongsheng. Matlab Time-Frequency Analysis Technology and Its Application [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2005.