动态桨叶 RCS 特性的实验研究

蒙志君 吕明云 武 哲

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 在微波暗室中测量了金属平板桨叶动态模型的高频雷达散射截面 RCS(Radar Cross Section),并通过快速傅立叶变换 FFT(Fast Fourier Transform)得到相应的频谱图;详细分析了时域和频域 RCS 随桨叶片数、雷达波入射方向、入射频率、极化状态和桨叶转速等因素的变化. 实验结果表明主要特征是时域 RCS 呈周期性起伏,频谱图因前行桨叶与后行桨叶散射有差别而不对称,且频谱宽度反映了多普勒效应. 取得的结果与已有文献的计算分析一致,对直升机的探测和识别具有重要的参考价值.

关 键 词: 动态桨叶; 雷达散射截面(RCS); RCS 频谱

中图分类号: TN 974

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)09-1003-04

Experimental investigation on RCS characteristics of rotating blades

Meng Zhijun Lü Mingyun Wu Zhe

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The high frequency backscattering by rotating skew-plated metal blades was investigated experimentally. RCS(radar cross section) was measured in an anechoic chamber. The RCS spectra, relating to Doppler effect, was obtained by FFT(fast Fourier transform) from time-domain signature. The effects on RCS characteristics of blade number, angle of incidence, frequency, polarization, and rotating velocity were also analyzed. The main characteristics are the periodic fluctuating of time-domain RCS and the asymmetric of RCS spectrum. The latter is due to the difference between the scattering by advancing blades and retreating blades. The results agree well with the computational analysis of previous literatures, and may do some help in helicopter detection and identification.

Key words: rotating blades; radar cross section (RCS); RCS spectrum

对直升机目标的探测方法研究是近年目标散射特性的热门课题之一. 当直升机处于低空慢速或悬停状态时,机身及其它非旋转部件的回波常淹没于强大的海地杂波之中,而以较高速度旋转的主旋翼因桨叶旋转作用产生调制回波而成为目标散射的主要特征[1-2]. 所以,研究动态桨叶的雷达散射截面 RCS(Radar Cross Section)特性非常必要,这是基于旋翼回波信号探测直升机的基础.

动态桨叶的 RCS 研究归结于旋转目标的散射特性. 国外对旋转目标散射特性的研究始于上世纪 70 年代. 1976 年,Van Bladel 提出准静态方法,成为此后分析方法的基础[3]. 1979 年,Lahaie 等最先将准静态法应用于物理光学理论计算旋转的理想导体平板的散射场[4]. 此后,物理绕射理论、等效电磁流法等均用于计算旋翼准静态散射场[5-10]. 其中,文献[8]首次对真实直升机旋翼系统(含桨毂和桨叶)进行较为精确的实体建模和网格划分,计算分析了远近场 RCS 特性,是目前最为全面的计算分析. 国内相关研究还很少,文献[10]也是计算分析,并部分重复了国外的工作.

然而,由于动态旋翼 RCS 实验测量的难度较大,诸多文献中少有详细的实验研究情况,仅文献[5,7]进行了测试实验,但对实验结果并未给出完整的特性分析. 文献[11]中提到了美国陆军导

收稿日期: 2005-11-30

作者简介: 蒙志君(1982-),男,湖北监利人,博士生,amengzj@ase.buaa.edu.cn.

弹司令部和乔治亚工学院曾实施的一项测量研究计划,对改进后的西科斯基 S-55 成功进行了外场 RCS 测量,测试中主要观察了直升机的多普勒雷达信号,但文章主要是介绍性的,未有详细的实验曲线及结果分析.

本文致力于动态桨叶单站 RCS 的实验测试,设计并加工了桨叶实验件,在微波暗室中测试了各参数下的动态桨叶 RCS,并通过快速傅立叶变换 FFT(Fast Fourier Transform)得到相应的频谱图. 着重研究了时域图和频谱图的主要特征及各参数的影响,并得到了有意义的结论.

1 实验内容及数据处理

1.1 实验内容

制作了若干金属平板桨叶作为模型,尺寸均为 240 mm×60 mm,桨尖距轴心为 270 mm,桨根距轴心 30 mm. 加工的连接件用于与已有的电机轴相连,并可连接 2 片或 3 片桨叶,而且能调节桨叶倾角(即叶片迎角). 电机功率一定时桨叶倾角会影响转速,实验中均设置为 20°,使转速稳定.

在微波暗室中进行了测试,背景电平低于 −35 dBm^2. 测试期间桨毂部分用吸波材料覆盖,如图 1 所示. 测试波段为 X 波段,极化、频率、入射角、桨叶数及转速均有变化,表 1 列出了 5 组具有代表性的参数,并与后面的实验结果相对应.

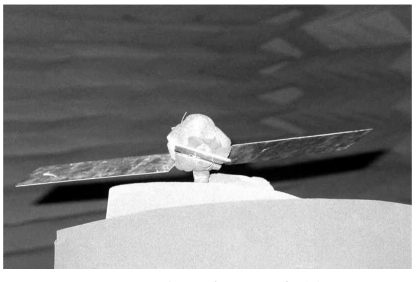


图 1 暗室中测试实景

表 1 5 组 RCS 测试的参数设置

组号	M/片	P	θ/(°)	f/GHz	n/(r·min^{-1})	T_r/ms	F_{dmax}/Hz
1	3	H-H	30	9	225	267	331
2	3	H-H	30	9	315	191	462
3	3	H-H	0	9	225	267	382
4	3	H-H	0	12	225	267	510
5	2	V-V	30	9	270	222	396

注:M 表示桨叶片数;P 表示极化状态;θ 为入射角;f 为入射频率;n 为转速;T_r 为旋转周期;F_{dmax} 为最大多谱勒频率.

目标相对于观察点有相对径向运动,所以产生多普勒效应,接收到的信号频率将发生变化. 前行桨叶朝向接收雷达转动,产生正的多普勒频移,后行桨叶反之. 最大多普勒频率由下式决定[12]:

$$F_{dmax} = 2R\omega\cos\theta/\lambda \tag{1}$$

其中,R 为桨尖到轴心的距离;ω 为桨叶角频率(rad/s),$\omega = 2\pi n/60$,n 为桨叶转速;θ 为入射方向与桨叶平面的夹角,本实验中入射方向均位于桨叶平面上方;λ 为入射波长.

测试中时域信号采样满足 Nyquist 采样定理的条件[13]:

$$T_S \leqslant 1/(2F_{dmax}) \tag{2}$$

才能将数据通过离散 Fourier 变换不失真的将时域信号转换为频域信号. 表 1 中所示最大多普勒频率为 510 Hz,所需最低采样周期为 0.98 ms. 实验测试时,设置采样时间为 1.918 1 s,采样点数为 6 401,故采样周期 T_S 为 0.3 ms 时能满足所有转速时的采样要求.

1.2 数据处理

实验测试时域信号含电场相位信息,与定标球在相应频率下的回波幅度相比,即为含相位信息的复散射场$\sqrt{\sigma}$,RCS 幅度(分贝值,dBm^2)为

$$\sigma_{dBm^2} = 20\lg|\sqrt{\sigma}| \tag{3}$$

对$\sqrt{\sigma}$作 FFT 变换可得到相应的频域信号[8,14]. 采样周期为 T_S,则离散化的时域信号为$\sqrt{\sigma_n}$,$n=0,1,2,\cdots,6\,400$. 经谱点数为 N(N 为 2 的整数次幂)的 FFT 变换得到对应的傅立叶系数$\sqrt{\Sigma_k}$,$k=0,1,2,\cdots,N-1$. 每个 k 相应的 RCS 幅度为 $20\lg|\sqrt{\Sigma_k}|$,而 k 相应的数字频率为

$$\omega_k = 2\pi k/N \tag{4}$$

转换为模拟频率后,最终得到相应的多普勒频移

$$f(k) = k/(NT_S) \tag{5}$$

由上述推导可得 RCS 幅度与 $f(k)$ 的频谱图,最后将 0 频率部分转换到频谱中心即可得到最终的频谱图. $\sqrt{\sigma}$ 为复数信号,故其频谱图并不一定是关于基频对称的.

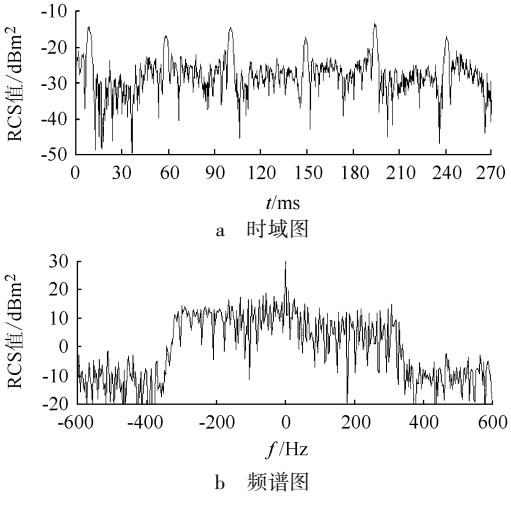
2 实验结果及分析

实验中测量了不同桨叶数、转速、入射频率、入射角及不同转速下的动态桨叶后向散射场,并借助 FFT 转换得到 RCS 频谱图. 图 2 ~ 图 6 分别给出了对应于表 1 中 5 组数据的时域和频域曲线. 时域图中的 $t=0$ 时刻具有随机性,因为测试中是待桨叶转动达到稳定状态后开始采样的;另一方面,采样时间为 1.918 1 s,期间桨叶旋转了多个周期,但时域图中仅给出 1 个周期内的 RCS 起伏曲线.

2.1 时域 RCS 特性分析

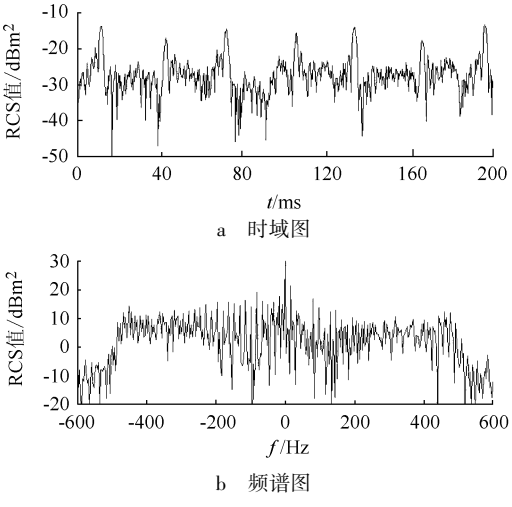
时域图的主要特征是RCS对时间呈周期性

起伏,周期为 T_r/M(T_r 为桨叶旋转周期). 对于 3 片桨叶,每隔 $T_r/3$(相当于旋转 120°)下一片桨叶将取代前一片桨叶的位置. 但图 4 和图 5 所示为特殊情形,其周期为 $T_r/6$,是因为此时入射波与桨叶平面平行,对于 3 片桨叶而言每旋转 60°出现相同的散射特征.



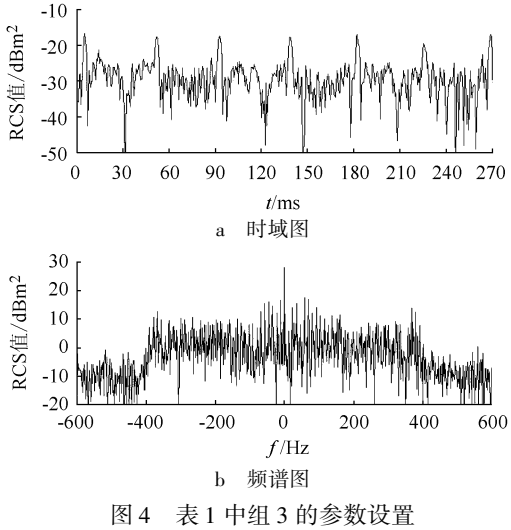
a　时域图　　b　频谱图

图 2　表 1 中组 1 的参数设置



a　时域图　　b　频谱图

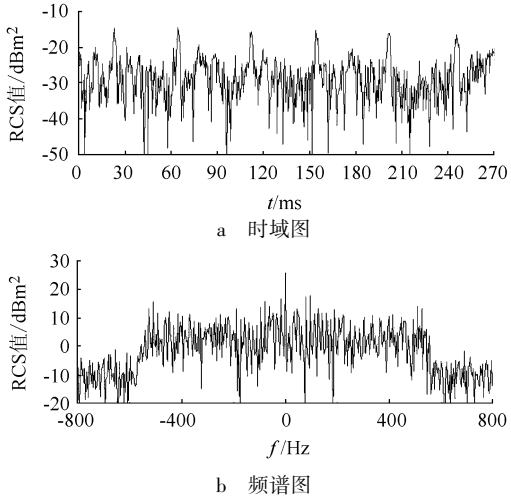
图 3　表 1 中组 2 的参数设置



a　时域图　　b　频谱图

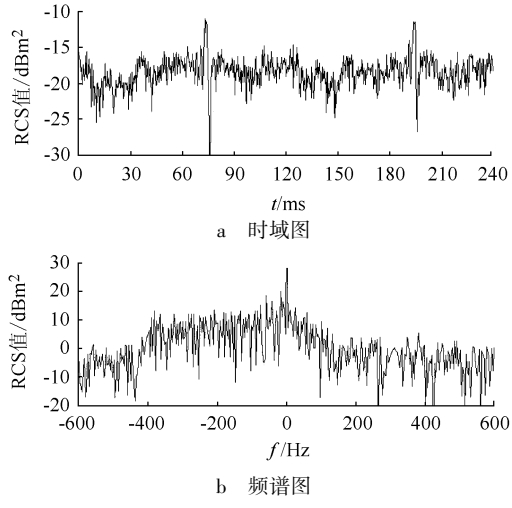
图 4　表 1 中组 3 的参数设置

各参数对时域图均有影响. 由于桨叶速度远低于光速,旋转角频率远低于入射波角频率,基于准静态法[3],入射角、入射频率、极化状态的影响与静态 RCS 是一致的.



a　时域图　　b　频谱图

图 5　表 1 中组 4 的参数设置



a　时域图　　b　频谱图

图 6　表 1 中组 5 的参数设置

入射角增大时,对于散射最强的某片桨叶更趋近于法向入射,RCS 增大(图 2 与图 4);入射频率增大时,散射也变强了(图 4 与图 5);极化状态显著地影响 RCS, 因为本实验中为平板模型,边缘绕射有较大的散射贡献,比较图 2 与图 6,相同入射状态下 2 片桨叶散射强于 3 片桨叶,表明极化状态是主要因素,垂直极化时的散射强于水平极化.

转速只是影响了时域图的周期,而不改变 RCS 幅度,从图 2 和图 3 可以看出,两条时域 RCS 曲线完全是一致的,仅时间坐标体现出周期不同.

2.2　频域 RCS 特性分析

频谱图的主要特征为:①入射角不为 0°时频谱关于基频不对称,不对称的程度取决于入射角和桨叶倾角;②频谱体现了多普勒效应,总频宽为最大多普勒频率的两倍.

频谱的幅度由式(4)确定,各频谱图中 RCS

幅度均远高于时域图中RCS值,这是由于采样较密,应当重点关注相对值的大小. 在频谱图0频率两边分别为正多普勒频率区(前行桨叶)和负多普勒频率区(后行桨叶). 当入射角为0°时,前行桨叶和后行桨叶的散射贡献是相同的,所以频谱关于0频率对称(图4和图5);当入射角不为0°时(如图2、图3和图6),频谱不对称,且负频率区幅度比正频率区高,说明后行桨叶的散射贡献强于前行桨叶. 图7从物理意义上示意了原因是桨叶倾角导致雷达波实际入射方向不同. 实验中桨叶倾角为20°,则30°入射时与前行桨叶(图7中桨叶1)的实际夹角为10°,而与后行桨叶实际夹角为50°,后者更趋近于法向入射,桨叶的散射更强,所以导致了负频率区RCS幅度高于正频率区.

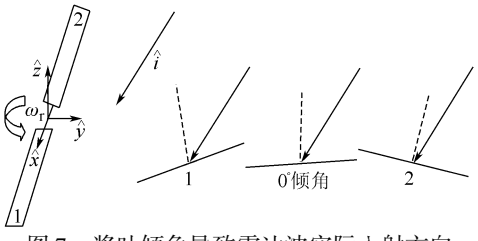


图7 桨叶倾角导致雷达波实际入射方向差异的示意图

频宽是最大多普勒频率的两倍,则根据式(1),其分别与转速、入射频率及入射角的余弦成正比,图2~图6的频谱宽度与式(1)计算所得值吻合很好,也验证了时域转换的正确性及物理意义.

3 结 论

1) 动态RCS时域特征主要是RCS关于时间呈周期性起伏,周期为 T_r/M,RCS幅度受入射角、入射频率、极化状态等参数的影响与静态是一致的,转速只是改变了起伏周期;

2) 入射角不为0°时动态RCS频谱关于基频不对称,这是由于桨叶倾斜导致了前行桨叶和后行桨叶的散射场存在差别,且不对称程度取决于这一差别的大小,其显著的受到雷达波入射方向、桨叶倾角及雷达波极化状态等因素的影响;

3) 动态RCS频谱体现了多普勒效应,频谱的宽度为最大多普勒频率的两倍,与转速、雷达波入射频率及入射角度的余弦成正比.

参考文献 (References)

[1] Rotander C E, von Sydow H. Classification of helicopters by the L/N-quoutient [C] // Radar 97. [S. l.]: IEE Publication, 1997: 629-633

[2] 汤子跃, 蒋兴舟, 王永良. 机载预警雷达对海上悬停直升机的探测 [J]. 海军工程大学学报, 2000(1): 8-13
Tang Ziyue, Jiang Xingzhou, Wang Yongliang. AEW radar detection of hovering helicopter at sea [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2000(1): 8-13 (in Chinese)

[3] Bladel J V. Electromagnetic fields in the presence of rotating bodies [J]. Proc IEEE, 1976, 64(3): 301-318

[4] Lahaie I J, Sengupta D L. Scattering of electromagnectic waves by a slowly rotating rectangular metal plate [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1979, AP-27(1): 40-46

[5] Yang T L, Bor S S. Comparison of monostatic Doppler and radar cross-section spectra by rotating multiple skew-plated metal fan blades [J]. Int J Electronics, 1992, 72(4): 659-668

[6] Sun Y S, Myung N H. Analysis of electromagnetic scattering by a rotating rotor with flat blades [C]// ICCS '94 Conference Proceedings. Singapore: IEEE, 1994: 1044-1048

[7] Tardy I, Piau G P, Chabrat P, et al. Computational and experimental analysis of the scattering by rotating fans [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1996, 44(10): 1414-1421

[8] Pouliguen P, Lucas L, Muller F, et al. Calculation and analysis of electromagnetic scattering by helicopter rotating blades [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2002, 50(10): 1396-1408

[9] Pouliguen P, Damiens J F, Moulinet R. Radar signatures of helicopter rotors in great bistatism [C]//Antennas and Propagation Society International Symposium 2003. [S. l.]: IEEE, 2003: 536-539

[10] 曹祥玉, 梁昌洪, 宗卫华. 旋转螺旋桨叶片调制效应分析 [J]. 电子学报, 2002, 30(10): 1390-1392
Cao Xiangyu, Liang Changhong, Zong Weihua. Modulating effect analysis by rotating skew-plated metal fans [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(10): 1390-1392 (in Chinese)

[11] Bullard B D, Dowdy P C. Pulse Doppler signature of a rotary-wing aircraft [J]. IEEE AES Systems Magzine, 1991(5): 28-30

[12] 毛士艺. 脉冲多普勒雷达 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 3-4
Mao Shiyi. Pulse Doppler radar [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990: 3-4 (in Chinese)

[13] 郑方,徐明星. 信号处理原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
Zheng Fang, Xu Mingxing. Principle of signature processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003 (in Chinese)

[14] Kaman E W, Heck B S. 应用Web和Matlab的信号与系统基础[M]. 高强译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 240-269
Kaman E W, Heck B S. Basis of signature and system using web and matlab [M]. Translated by Gao Qiang. Beijing: Electronic Industry Press, 2002: 240-269 (in Chinese)

(责任编辑:彭 微)