

飞机发动机旋转叶片的散射谱特征

冯孝斌 黄培康

(目标与环境电磁散射辐射国防科技重点实验室 北京 100854)

摘要: 飞机发动机旋转叶片引起的周期性运动部件调制(PMPM)影响目标多普勒频率跟踪精度,同时也为目标识别提供了重要特征信息。该文基于旋转叶片组电磁散射计算模型和实验测量数据,重点分析了“PMPM 频谱包络调制”现象的形成原因。结果表明:与叶片倾斜角一样,扭角也是影响 PMPM 频谱分布的重要因素。

关键词: 目标识别, 叶片, 扭角, 调制

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)06-0939-04

Scattering Spectrum Signature of Rotating Blades for Aircraft Engine

Feng Xiao-bin Huang Pei-kang

(National Electromagnetic Scattering Laboratory, P.O.X 142-207, Beijing 100854, China)

Abstract The moving parts of an aircraft, such as rotor blades, propeller blades, and jet engine compressor and turbine blades, cause a periodic modulation on the radar return signals. Though this periodic modulation can sometimes effect the Doppler tracking of the target, it can also provide important information for target identification as a radar signature. The phenomenon of the spectrum envelope modulation is analyzed in terms of electromagnetic scattering computation and experimental results of rotating blades. The results show that the blade twist is one of the important factor that impacting the spectrum distribution.

Key words Target recognition, Blade, Twist, Modulation

1 引言

目标内部运动部件,如直升机旋翼和尾桨叶片、螺旋桨桨叶以及喷气式飞机的压缩机和涡轮机叶片等,对雷达回波产生的周期性运动部件调制(Periodically Moving Parts Modulation, PMPM)导致回波能量频谱扩散,使回波频谱中出现一系列等间隔的离散调制分量。一方面,这些 PMPM 分量作为“目标噪声”影响多普勒频率跟踪精度;另一方面,由于与目标结构特征之间存在明确对应关系, PMPM 特征可作为目标识别的有效特征^[1]。

PMPM 频谱分布受叶片结构等因素影响变化很大。Bell^[2]从参数模型出发,证明 PMPM 频谱呈不对称分布的现象不能仅归于幅度调制所致,相位调制在其中也起重要作用。文献[3-5]基于电磁散射模型计算了飞机旋转叶片雷达回波,并在此基础上分析认为: PMPM 频谱分布于机体多普勒频率分量两侧,但受叶片倾斜角影响,其正、负两个边带在幅度上是不对称的。Gardner^[6]在对飞机目标雷达回波实测数据进行分析时发现:在某些姿态下出现了 PMPM 频谱分量幅度呈 sinc(x) 包络状,并不对称分布于机体多普勒频率分量一侧

的现象。PMPM 频谱分布的这一特征在其它文献中没有被提及和解释。为揭示该现象,本文在对飞机旋转叶片建立电磁散射计算模型和对两台风扇目标进行实验测量基础上,通过分析叶片扭角对 PMPM 频谱分布的影响,解释了该现象的成因。

2 旋转叶片电磁散射计算模型

对飞机旋转叶片建立电磁散射模型,获取叶片仿真数据是从电磁散射机理上分析和认识 PMPM 特征的重要手段。起初,飞机叶片被简化为均匀、线性的刚性天线^[3,7]。Martin^[4]注意到叶片倾斜角对 PMPM 分量在频率轴上的分布影响显著,通过引入修正项改进了这一简化模型。Yang^[5]将旋转叶片看作倾斜角为 φ 的斜置平板,并基于物理光学法(PO)和等效流法(MEC)给出了该平板叶片模型的电磁散射计算公式。Tardy^[8]则进一步将每一叶片看作由多个具有不同倾斜角的小平板首尾相连而成。针对旋转过程中的电磁散射计算问题,Bladel^[9]提出了“准静态”方法,该方法认为:当叶片旋转变角频率远低于入射波角频率时,在每一离散计算时刻,各叶片状态都可被看作是“冻结的”。

设由 M 个叶片构成旋转叶片组如图 1 所示。其中，每一叶片均为纯导体，由 N 个具有不同倾斜角的小平板首尾相连而成。其中，第 m 个叶片上第 n 块小平板 t 时刻的散射电场为

$$\boldsymbol{E}_{mn}^s(t) = \boldsymbol{E}_{mn}^{po}(t) + \boldsymbol{E}_{mn}^d(t) \tag{1}$$

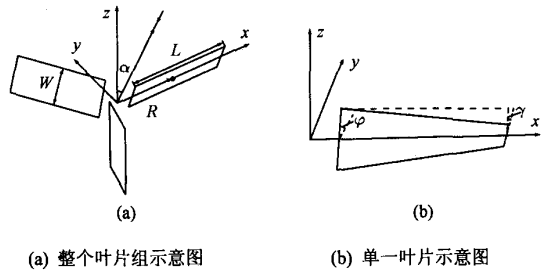


图 1 旋转叶片组示意图

式中 $\boldsymbol{E}_{mn}^{po}(t)$ 为表面引起的散射电场矢量，可由物理光学法计算^[8]； $\boldsymbol{E}_{mn}^d(t)$ 为边缘引起的散射电场矢量，可由等效流法^[8,10]计算。旋转叶片组 t 时刻的总散射电场为各小平板散射电场矢量之和，即

$$\boldsymbol{E}^s(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \boldsymbol{E}_{mn}^s(t) \tag{2}$$

为便于分析，将散射回波表示为如下形式：

$$u(t) = 2\sqrt{\pi r(t)} \frac{\boldsymbol{E}^s(t) \cdot \boldsymbol{e}_s}{E^i} \tag{3}$$

式中， $\boldsymbol{e}_s$ 为接收天线电场极化方向， $r(t)$ 为 t 时刻目标至雷达距离， E^i 为入射电场强度。

3 实验测量

除建立电磁散射模型外，还对旋转运动状态下的风扇进行了实际测量。测试工作在微波暗室完成，雷达工作于连续波模式，其载频为 18GHz。待测目标为两台风扇，其中一台风扇叶片倾斜角为 $\varphi = 20^\circ$ ，无扭角；另一台风扇叶片倾斜角为 $\varphi = 44^\circ$ ，扭角约为 $\gamma = 35^\circ$ ，风扇叶片其它主要结构参数见表 1。

目标分别置于转台之上，使叶片旋转平面与水平面呈垂

表 1 风扇叶片主要结构参数

结构参数	风扇 1(无扭角)		风扇 2(有扭角)	
叶片中心距旋转中心距离(m)	0.107		0.167	
叶片数	3		3	
叶片长度(m)	0.186		0.295	
叶片宽度(m)	最小	最大	最小	最大
	0.03	0.06	0.03	0.05
叶片转速(r/s)	13		23	

直状态，设转台角度 0° 对应于叶片旋转平面与雷达入射波束之间夹角 90° 状态。转台每转动一次，叶片旋转平面与雷达入射波束夹角增加 1° ，并记录一次回波数据。在 200ms 观测时间内共记录了 801 点经过背景对消和标定后的目标回波样本数，对该记录回波进行快速傅里叶变换即可得到旋转风扇的 PMPM 频谱，分别如图 3 和图 5 所示。

4 数据结果及分析

设由 3 叶片组成的旋转叶片组如图 1 所示。其中，叶片宽为 $W = 0.05\text{m}$ ，其余参数取值同表 1 中无扭角叶片风扇结构参数值。设雷达入射波束与叶片旋转平面法线方向夹角即雷达波束入射角为 $\alpha = 12^\circ$ ，雷达工作频率为 18GHz。根据第 2 节所建立旋转叶片电磁散射模型，可计算出该无扭角叶片组后向散射回波，经傅里叶变换，得到其频谱如图 2 所示。图 3 为无扭角叶片风扇实测回波频谱。分析图 2 和图 3 中的频谱分布，可得出以下结论：(1)PMPM 频谱分量由一系列孤立等间隔的线谱组成，且每相邻两根谱线之间的频率间隔等于叶片数 N_b 与叶片转速 f_{rot} 之积，即 $f_p = N_b \cdot f_{\text{rot}}$ ；(2)由向前运动叶片引起的正 PMPM 频谱分量和向后运动叶片引起的负 PMPM 频谱分量分别位于机体多普勒频率分量两侧，并且受叶片倾斜角影响，正 PMPM 频谱分量幅度大于负 PMPM 频谱分量幅度。

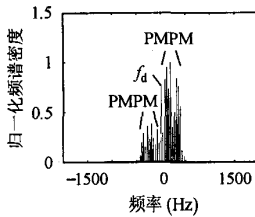


图 2 无扭角叶片风扇仿真回波频谱

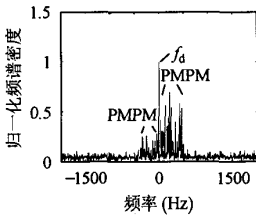


图 3 无扭角叶片风扇实测回波频谱

为产生向前推进动力和使叶片各处受力均衡，飞机叶片除具有倾斜角外，还必须有一定的扭角。一般来说，直升机旋翼叶片的倾斜角约为 10° ，扭角约为 5° ；螺旋桨叶片的倾斜角在 30° 至 60° 范围内变化，扭角约为 30° ^[4]。因此，在旋转叶片组 PMPM 频谱分布分析中还应考虑扭角的影响。参照表 1 中有扭角叶片风扇尺寸，改设叶片各结构参数值如下：叶片中心距旋转中心 $R = 0.167\text{m}$ ，叶片长度 $L = 0.295\text{m}$ ，宽 $W = 0.05\text{m}$ ，倾斜角 $\varphi = 44^\circ$ ，扭角 $\gamma = 35^\circ$ 。设转速 $f_{\text{rot}} = 23$ 转/s，雷达波束入射角为 $\alpha = 25^\circ$ 。计算该旋转叶片组散射回波，并对其做傅里叶变换，得到如图 4 所示有扭角叶片风扇回波频谱。图 5 为有扭角叶片风扇实测回波频谱。比较图 4、图 5 与图 2、图 3 中的频谱分布发现：与图 2、图 3 中 PMPM 频谱分量分别位于机体多普勒频率分量两侧显著不同，图 4、

图5中的PMPM频谱分量不对称分布于机体多普勒频率分量一侧。为方便提及, 将PMPM频谱的这种分布称为“PMPM频谱包络调制”现象。Gardner^[6]在对飞机目标实测回波进行分析时首先观察到这一现象, 并提出可用 $\text{sinc}(x)$ 描述其不对称分布包络形状, 但没解释该PMPM频谱不对称分布形成原因。

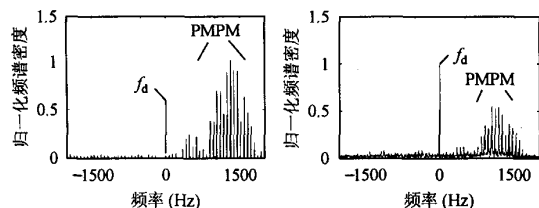


图4 有扭角叶片风扇
仿真回波频谱

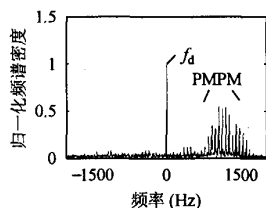


图5 有扭角叶片风扇
实测回波频谱

由于有扭角叶片可以被合理地近似为多个具有不同倾斜角的小平板首尾相连而成, 因此, 平板是分析有扭角叶片电磁散射的基本单元。图6显示了一典型平板 RCS 随雷达波束入射方向与平板法线方向夹角即雷达波束入射角的变化曲线, 该曲线表明: 当雷达波束入射角接近 0° 时, 平板 RCS 骤然增强, 比其它雷达波束入射角下的 RCS 几乎高出20dB。这意味着: 当某一时刻雷达波束入射方向与有扭角叶片上某一小平板法线方向夹角接近 0° 时, 此时该小平板所散射电磁波能量将显著强于叶片上其它区域所散射电磁波能量。图7证实了这一分析, 该图显示了有扭角叶片绕旋转中心转动一周叶片上不同位置散射回波幅度。由于受扭角影响, 叶片上各小平板倾斜角互不相同, 因此, 从图7中可以看出, 叶片上不同位置在不同旋转角度下的散射回波幅度相差悬殊。其中离叶片旋转中心约0.2m处即第 n_l 块小平板在旋转角度约 270° 附近的散射回波幅度要比叶片上其它位置在任意旋转角度下的散射回波幅度高至少20dB。

由于相对于叶片上第 n_l 块小平板在旋转角度约 270° 附近的散射回波而言, 叶片上其它位置在任意旋转角度下的散射回波均很小, 因此, 它们对总散射回波的贡献可忽略。据

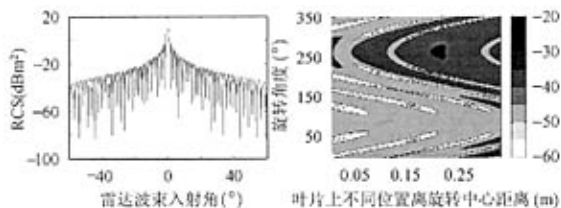


图6 典型平板 RCS 随雷达
波束入射角变化曲线

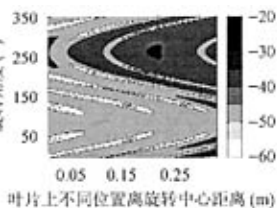


图7 有扭角叶片绕旋转中心
转动一周叶片上不同位置的
散射回波幅度

此, 可以合理地将旋转叶片组电磁散射模型简化为以下形式:

$$E^s = \begin{cases} E_{mn_l}^s(t), & \text{第 } m \text{ 叶片上第 } n_l \text{ 块小平板发生强散射时} \\ 0, & \text{其他时刻} \end{cases} \quad (4)$$

由于各叶片外形结构完全相同, 所以, 各叶片发生局部强散射区域和所处旋转角度也应完全相同, 因此, 应有 $p_{1n_l} = p_{2n_l} = \dots = p_{Mn_l} = p_{n_l} = 2k \sin \alpha \cos \theta$, 其中, $\theta = 2\pi f_{\text{rot}} t + \theta_m$ 为各叶片发生局部强散射时所处旋转角度, f_{rot} 为叶片转速, θ_m 为各叶片初始旋转角度, α 为雷达波束入射角, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为雷达工作波长; $R_{1n_l} = R_{2n_l} = \dots = R_{Mn_l} = R_{n_l}$, 其中, R_{n_l} 为叶片上第 n_l 块小平板距旋转中心距离。据此, 还可将公式(4)进一步表示为如下形式:

$$E^s(t) = e^{-jk_0 r(t)} e^{j p_{n_l} R_{n_l}} E_{\text{rest}}^s(t) \quad (5)$$

式中 $E_{\text{rest}}^s(t)$ 在第 n_l 块小平板发生强散射时, 为除去因子项 $e^{-jk_0 r(t)} e^{j p_{n_l} R_{n_l}}$ 以外的所有剩余项; 在其它时刻为0。

上式清楚表明当叶片上第 n_l 块小平板发生强散射时, 在总散射回波中除叶片组随机体一起运动引起的多普勒频移相位项 $e^{-jk_0 r(t)}$ 外, 还多出另外一项相位项 $e^{j p_{n_l} R_{n_l}}$ 。正是这一相位项导致 PMPM 频谱分量不对称分布于机体多普勒频率分量一侧, 并使“PMPM 频谱包络调制”现象发生。根据式(5), 此时 PMPM 频谱分量在频率轴上相对于机体多普勒频率分量不对称分布位置可由下式确定:

$$f_{d_bias} = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial (p_{n_l} R_{n_l})}{\partial t} = -\frac{4\pi f_{\text{rot}} R_{n_l} \sin \alpha \sin(2\pi f_{\text{rot}} t_p)}{\lambda} \quad (6)$$

将仿真计算中各参数取值代入上式, 可以算出 $f_{d_bias} = 1462.1\text{Hz}$ 。这一计算结果与图4所示 PMPM 频谱分量不对称分布位置一致。

上述分析表明: 受扭角影响, 叶片上各部分在不同旋转角度下向各方向散射电磁波的能力相差悬殊, 特别是当雷达波束入射方向与叶片上某局部小区域法线方向夹角接近 0° 时, 该小区域相对于叶片上其它区域将形成局部强散射, 从而导致“PMPM 频谱包络调制”现象发生。

5 结束语

为产生向前推进动力和使叶片各处受力均衡, 飞机叶片除具有倾斜角外, 还必须有一定的扭角。受扭角影响, 叶片上各部分散射电磁波的能力相差悬殊, 特别是当雷达波束入射方向与叶片上某局部小区域法线方向夹角接近 0° 时, 该小

区域相对于叶片上其它区域将形成局部强散射,并导致“PMPM 频谱包络调制”现象发生。因此,与叶片倾斜角一样,扭角也是影响飞机旋转叶片散射回波特征和 PMPM 频谱分布的重要因素。

参 考 文 献

- [1] Skolnik M I. Radar Handbook. New York: McGraw-Hill, 1970.
 - [2] Bell M R, Grubbs R A. JEM modeling and measurement for radar target identification. *IEEE Trans. on AES*, 1993, 29(1): 73 – 87.
 - [3] Martin J, Mulgrew B. Analysis of the theoretical radar return signal from aircraft propeller blades. IEEE International Radar Conference, Washington DC (USA), 1990: 569 – 572.
 - [4] Martin J, Mulgrew B. Analysis of the effects of blade pitch on the radar return signal from rotating aircraft blades. IEEE International Radar Conference, London(UK), 1992: 446 – 449.
 - [5] Yang S Y, Yeh S M. Electromagnetic backscattering from aircraft propeller blades. *IEEE Trans. on Magnetics*, 1997, 33(2): 1432 – 1435.
 - [6] Hynes R, Gardner R E. Doppler spectra of S band and X band signals. Supplement to *IEEE Trans. on AES*, 1967, 3(6): 356 – 365.
 - [7] Misiurewicz J, Kulpa K, Czekala Z. Analysis of recorded helicopter echo. Proc. IEE Radar'97, Edinburgh(UK), 1997: 449 – 451.
 - [8] Tardy I, Piau G P, Chabrat P, Rouch J. Computational and experimental analysis of the scattering by rotating fans. *IEEE Trans. on AP*, 1996, 44(10): 1414 – 1421.
 - [9] Bladel J V. Electromagnetic fields in the presence of rotating bodies. *Proc. IEEE*, 1976, 64(3): 301 – 318.
 - [10] Michaeli A. Elimination of infinities in equivalent edge currents, part I: fringe current components. *IEEE Trans. on AP*, 1986, 34(7): 912 – 918.
- 冯孝斌: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为雷达目标识别、信号处理、模式识别等。
- 黄培康: 男, 1935 年生, 研究员, 研究方向为雷达信号处理、目标识别、导航、制导与控制等。