

旋转螺旋桨叶片调制效应分析

曹祥玉, 梁昌洪, 宗卫华

(西安电子科技大学, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文根据准静态法的特点, 利用物理光学法、物理绕射理论和等效电磁流法, 分析了飞机旋转螺旋桨叶片的散射特性. 计算了雷达接收螺旋桨散射回波信号的时域及频域响应, 并分析了它的调制效应, 此结果可用于雷达目标信号识别.

关键词: 物理光学法; 物理绕射理论; 等效电磁流法; 准静态法; 旋转螺旋桨; 散射场

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 09-1390-03

Modulating Effect Analysis by Rotating Skew-Plated Metal Fans

CAO Xiang-yu, LIANG Chang-hong, ZONG Wei-hua

(Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: In this paper, the high frequency backscatter field of the rotating skew-plated metal fans are investigated based on PO/PTD (physical optics/physical theory of diffraction) and the method of equivalent currents (MEC), in conjunction with the quasi-stationary method. The time and frequency responses of echo signal are calculated. The modulating effect by the echo signal of rotating skew-plated metal fans is analysis. These results can be used in the target identification.

Key words: PO; PTD; MEC; the quasi-stationary method; rotating screw; scatter field

1 引言

飞机螺旋桨旋转叶片对雷达电磁波的调制效应是近年来雷达信号处理和目标散射特性研究的新课题. 处于定向运动和旋转状态的目标均可视为动态目标. 当目标处于定向运动状态时, 如果在相对观察方向有径向速度, 则存在 Doppler 效应, 即回波信号存在相位调制; 当目标处于旋转运动状态时, 则回波信号通常既存在相位调制又存在振幅调制. 旋转物体的电磁散射特性早在八十年代国外已有研究, 但难以得到精确解, 然而在某些条件下可以有效解决这一问题. 本文根据准静态法, 利用物理绕射理论, 首先分析了螺旋桨叶片单站散射场的时域特性, 通过 FFT 变换得到其频域特性, 进而分析了螺旋桨调制效应及其在雷达目标识别中的应用.

2 数学模型

螺旋桨旋转叶片可用图 1 模型简化, 建立两套坐标系: 固定坐标系 (X, Y, Z) 或 (r, θ, φ) , 旋转坐标系 (X', Y', Z') 或 (r', θ', φ') . θ_k 为叶片扭角; a_1 旋转叶片内边缘到旋转轴的距离; a_2 旋转叶片外边缘到转轴的距离; b 叶片宽度. $\psi_m = \frac{2\pi(m-1)}{M}$, M 为叶片总数, $m = 1, \dots, M$. 叶片以角速度 $\Omega = 2\pi f_{rot}$ 绕 Z 轴旋转. 假设 $t = 0$ 时刻, $\psi_m = \frac{2\pi(m-1)}{M}$, 则 t 时刻, $\psi_m = 2\pi f_{rot} \cdot t + \frac{2\pi(m-1)}{M}$.

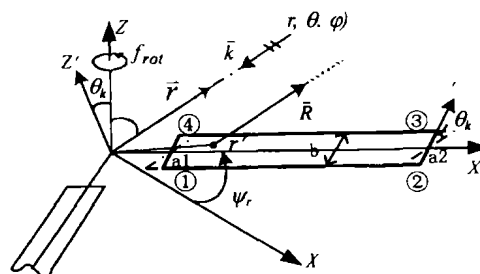


图 1 旋转螺旋桨叶片简化模型

3 散射场分析

准静态法采用离散时间序列, 在每一离散时间点假设射体是静止的, 根据电磁场理论计算此时散射场. 若已知目标运动规律, 则根据上述思路, 可求出运动目标受雷达波照射下的散射场. 准静态法要求 (1) 目标运动速度远小于光速, $v \ll c$; (2) 目标旋转角频率远小于入射波频率, 即 $\Omega \ll \omega_0$.

为计算方便, 令入射电磁场分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^i(\mathbf{r}') &= \hat{e} \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}') \exp(j\omega_0 t); \\ \mathbf{H}^i(\mathbf{r}') &= \mathbf{k} \times \mathbf{E}^i(\mathbf{r}') / z_0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中: z_0 ——自由空间波阻抗, k ——传播常数, $k = 2\pi/\lambda$, 其方向沿 $-\hat{r}$, \hat{r} 为远场方向. 根据物理光学理论, 螺旋桨叶片感应物理光学电流产生的散射场为:

收稿日期: 2001-06-25; 修回日期: 2002-01-26

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69871021; N. 69931030)

$$E_{po}^s(\mathbf{r}) = [jkz_0/(4\pi)] \int_{s'} \hat{\mathbf{R}} \times \hat{\mathbf{R}} \times [2\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}'(\mathbf{r}')] \frac{\exp(-jkR)}{R} ds' \quad (2)$$

其中: $\hat{\mathbf{n}}'$ ——螺旋桨叶片 \mathbf{r}' 点的面法向矢量, $\hat{\mathbf{n}}' = \hat{\mathbf{z}}' = \sin\psi_m \sin\theta_k \hat{\mathbf{x}} - \cos\psi_m \sin\theta_k \hat{\mathbf{y}} + \cos\theta_k \hat{\mathbf{z}}$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}' &= x'\hat{\mathbf{x}}' + y'\hat{\mathbf{y}}' = (x' \cos\psi_m - y' \sin\psi_m \cos\theta_k) \hat{\mathbf{x}} \\ &\quad + (x' \sin\psi_m + y' \cos\psi_m \cos\theta_k) \hat{\mathbf{y}} + (y' \sin\theta_k) \hat{\mathbf{z}} \\ ds' &= dx' dy' \quad x': |a1 \sim a2| \quad y': |-b/2 \sim b/2|, a1, a2, \\ &b \text{——叶片尺寸, 见图 1} \end{aligned}$$

因为 $\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$, 在远场条件下 $|\mathbf{r}| \gg |\mathbf{r}'|$, 所以

$$|\mathbf{R}| \approx |\mathbf{r}|, \frac{\exp(-jkR)}{R} \approx \frac{\exp(-jkR)}{r} \exp(jk\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}') \quad (3)$$

将式(3)代入(2), 由于 r 与积分域无关, 故可以移到积分外面. 由式(2)整理可得螺旋桨叶片表面物理光学场为:

$$\begin{aligned} E_{po}^s(\mathbf{r}) &= [jkz_0 \exp(-jkr)/(4\pi r)] \iint_{s'} \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{r}} \times [2\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}'(\mathbf{r}')] \\ &\quad \cdot \frac{\exp(jk\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}')}{r} ds' \\ &= [jk \exp(-jkr)/(4\pi r)] \iint_{s'} \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{r}} \times [2\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{k} \times \hat{\mathbf{e}}] \\ &\quad \cdot \frac{\exp(j2k\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}')}{r} ds' \quad (4) \end{aligned}$$

在表达式(4)中, 因为 $\hat{\mathbf{n}}'$ 、 \mathbf{r}' 都与 ψ_m 有关, 而 ψ_m 又是时间的函数. 因此表面物理光学场的幅度和相位都是时间的函数.

根据物理绕射理论, 叶片边缘散射场为:

$$\begin{aligned} E_d^s(\mathbf{r}) &= (jkz_0/(4\pi)) \oint_{\Gamma} [\hat{\mathbf{R}} \times \hat{\mathbf{R}} \times \tilde{\mathbf{I}}_t^s(l') \hat{\mathbf{l}} + (1/z_0) \hat{\mathbf{R}} \\ &\quad \times \tilde{\mathbf{M}}_t^s(l') \hat{\mathbf{l}}] \frac{\exp(-jkR)}{R} dl' \quad (5) \end{aligned}$$

$\tilde{\mathbf{I}}_t^s(l')$ 、 $\tilde{\mathbf{M}}_t^s(l')$ 分别是 Ufimtsev 型边缘等效电流和磁流.

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{I}}_t^s(l') &= - \frac{\sqrt{8\pi} \exp(-j\pi/4) \hat{\mathbf{l}} \cdot \mathbf{E}'(\mathbf{r}'; l')}{z_0 \sqrt{k} \sqrt{\sin\beta \sin\beta'}} \cdot \{ D_{\alpha}^k(\varphi, \varphi'; \beta', \beta) - D_{\alpha}^p(\varphi, \varphi'; \beta', \beta) \} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{M}}_t^s(l') &= - \frac{\sqrt{8\pi} \exp(-j\pi/4) \hat{\mathbf{l}} \cdot \mathbf{E}'(\mathbf{r}'; l')}{z_0 \sqrt{k} \sqrt{\sin\beta \sin\beta'}} \cdot \{ D_{\alpha}^k(\varphi, \varphi'; \beta', \beta) - D_{\alpha}^p(\varphi, \varphi'; \beta', \beta) \} \quad (7) \end{aligned}$$

其中 $D_{\alpha, h}^k(\varphi, \varphi'; \beta', \beta)$ 、 $D_{\alpha, h}^p(\varphi, \varphi'; \beta', \beta)$ 分别为软硬边界绕射系数, 对平板绕射

$$D_{\alpha, h}^k(\varphi, \varphi'; \beta', \beta) = \frac{\exp(-j\pi/4)}{2\sqrt{2\pi k \sin\beta \sin\beta'}} \cdot \left[\frac{1}{-\cos\left(\frac{\varphi - \varphi'}{2}\right)} \mp \frac{1}{-\cos\left(\frac{\varphi + \varphi'}{2}\right)} \right] \quad (8)$$

$$D_{\alpha, h}^p(\varphi, \varphi'; \beta', \beta) = \frac{\exp(-j\pi/4)}{2\sqrt{2\pi k \sin\beta \sin\beta'}} \cdot \left[\tan\left(\frac{\varphi - \varphi'}{2}\right) \mp \tan\left(\frac{\varphi + \varphi'}{2}\right) \right] \quad (9)$$

对单站雷达满足 $\varphi = \varphi'$, $\beta = \pi - \beta'$, 将式(8)、(9)代入式(6)、(7), 并化简得:

$$\tilde{\mathbf{I}}_t^s(l') = - \frac{\sqrt{8\pi} \exp(-j\pi/4) \hat{\mathbf{l}} \cdot \mathbf{E}'(\mathbf{r}'; l')}{z_0 \sqrt{k} \sqrt{\sin\beta \sin\beta'}} \frac{1}{2\sqrt{-2\pi k \sin^2\beta}}$$

$$\cdot \left\{ 1 - \frac{1 - \sin\varphi}{\cos\varphi} \right\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{M}}_t^s(l') &= - \frac{\sqrt{8\pi} \exp(-j\pi/4) \hat{\mathbf{l}} \cdot \mathbf{E}'(\mathbf{r}'; l')}{z_0 \sqrt{k} \sqrt{\sin\beta \sin\beta'}} \frac{1}{2\sqrt{-2\pi k \sin^2\beta}} \\ &\quad \cdot \left\{ 1 + \frac{1 - \sin\varphi}{\cos\varphi} \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

其中: $\beta = \cos^{-1}(\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\mathbf{t}}_1)$, $\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{\hat{\mathbf{s}} \cdot (\hat{\mathbf{n}}' \times \hat{\mathbf{t}}_1)}{|\hat{\mathbf{s}} - (\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\mathbf{n}}') \hat{\mathbf{n}}'|}\right)$ (证明见附录), $\hat{\mathbf{s}}$ ——边缘入射线方向单位矢量, $\hat{\mathbf{t}}_1$ ——边缘围线方向单位矢量.

将式(3)、(10)、(11)代入(5), 得旋转螺旋桨叶片边缘散射场:

$$\begin{aligned} E_d^s(\mathbf{r}) &= (jkz_0 \exp(-jkr)/(4\pi r)) \oint_{\Gamma} [\hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{r}} \times \tilde{\mathbf{I}}_t^s(l') \hat{\mathbf{l}} \\ &\quad + (1/z_0) \hat{\mathbf{R}} \times \tilde{\mathbf{M}}_t^s(l') \hat{\mathbf{l}}] \exp(-jk\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}') dl' \quad (12) \end{aligned}$$

同样分析可知, 边缘散射场 $E_d^s(\mathbf{r})$ 的幅度和相位也是时间的函数.

综合式(4)和(12), 可得在任意时刻, 螺旋桨叶片散射总场:

$$\mathbf{E}_s = \sum_{m=1}^M [E_{pom}^s(\mathbf{r}) + \sum_{n=1}^4 E_{dnn}^s(\mathbf{r})] \quad (13)$$

其中, m 表示螺旋桨的叶片数, n 表示每一叶片的边数. E_{pom}^s 、 E_{dnn}^s 分别表示螺旋桨第 m 个叶片的 PO 散射场及第 m 个叶片第 n 个边的 PTD 绕射场. 因此总散射场 \mathbf{E}_s 的幅度和相位也是时间的函数.

4 计算结果及应用

当探测雷达发射频率 $f_c = 3\text{GHz}$, 螺旋桨旋转频率 $f_r = 1075$ 转/分, 叶片扭角 $\theta_k = 15^\circ$, 叶片尺寸 $b = 0.3\text{m}$, $a1 = 0.2\text{m}$, $a2 = 2.25\text{m}$, 螺旋桨叶片数 $M = 3$, 螺旋桨相对天线位置 $R = 10\text{m}$, $\theta = 30^\circ$, $\varphi = 40^\circ$ 时, 计算得 θ — θ 极化情况下螺旋桨散射场随时间变化如图 2. 若雷达发射脉冲重复频率 10^4 , 发射脉冲宽度 10^5 , 则雷达接收回波信号随时间变化如 3.

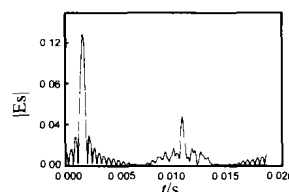


图 2 螺旋桨旋转叶片散射场

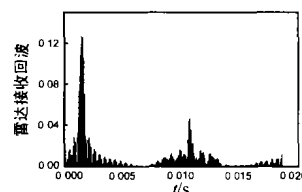


图 3 雷达接收旋转螺旋桨回波信号

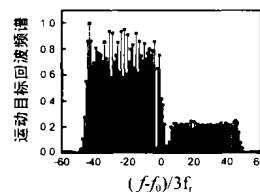


图 4 雷达接收旋转螺旋桨回波频谱

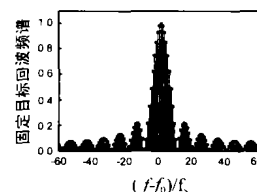


图 5 雷达接收固定目标回波频谱

图 2 所示是旋转螺旋桨散射场一个周期波形图, 旋转螺旋桨的散射场不仅与螺旋桨的几何参数和物理参数: 叶片的扭角、尺寸、形状、旋转频率等有关, 又与收发雷达波的参数: 波形、极化等有关; 同时还与目标相对与雷达的姿态角有关. 从计算结果可以看出, 随时间变化旋转螺旋桨散射场呈现出一定的周期性, 周期 $T_r = 1/(Mf_r)$, 其中 M 是螺旋桨的叶片数 (计算实例中 $M = 3$). 而对于固定目标, 当观察方向确定以后, 散射场随时间是一定值, 由此可以判定固定目标和运动目标. 图 3 为雷达接收旋转螺旋桨回波时域波形, 它是用发射脉冲对散射信号抽样得到的, 是雷达接收时域信号. 对雷达接收的时域信号进行快速付氏变换, 得旋转螺旋桨回波频谱如图 4, 我们知道, 固定目标回波频谱包络是 sinc 函数, 频谱间隔是发射脉冲重复频率 $f_s = 1/T_s$, 如图 5 所示. 对比图 4、图 5 可以明显看出, 旋转螺旋桨回波频谱包络受到调制, 而且谱线的间隔为 Mf_r . 综上所述, 由于旋转螺旋桨的周期性运动, 使得探测目标散射场的幅度和相位受到周期性调制, 同时接收到的回波频谱包络也受到调制. 根据这一特点, 在目标识别中可以区分固定目标和运动目标, 并从中提取运动目标的特征信息.

5 结束语

由于现代战术环境的不断演变和作战对象自身的不断完善, 现代电子战对雷达提出的要求也越来越高, 不仅要求雷达能探测目标的存在并测定其方位信息, 而且还要能判明目标的情况, 即对目标进行识别. 飞机的螺旋桨、发动机旋转叶片或直升机旋翼的调制效应由于不受飞机姿态影响, 因而其调制谱线可以作为目标的特征谱线, 该特征谱线包含有旋转部件的转动速度、几何对称性、几何结构、旋转部件的大小等物理信息, 如果从飞机的雷达回波中得到精确的旋转体调制谱线, 则可以从中提取目标的特征物理信息, 则对雷达目标识别非常有意义.

附录:

如图 1B, 假设: \hat{s} 边缘入射线方向单位矢量, \hat{t}_1 边缘围线方向单位矢量, \hat{n}' 螺旋桨叶片面法向矢量. 则与边缘切线方向垂直矢量 $\hat{t}_2 = \hat{n}' \times \hat{t}_1$. 在 $(\hat{t}_1, \hat{t}_2, \hat{n}')$ 组成的三维坐标系中,

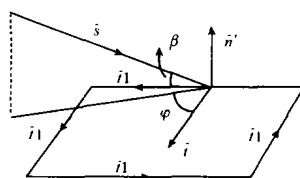


图 1B

$$\hat{s} = (\hat{s} \cdot \hat{t}_1) \hat{t}_1 + (\hat{s} \cdot \hat{t}_2) \hat{t}_2 + (\hat{s} \cdot \hat{n}') \hat{n}'$$

$$\text{则 } \hat{s} \text{ 在 } \hat{t}_1 \hat{t}_2 \text{ 面上的投影 } \hat{s}_t = \hat{s} - (\hat{s} \cdot \hat{n}') \hat{n}'$$

$$\hat{s}_t \cdot \hat{t}_2 = (\hat{s} - (\hat{s} \cdot \hat{n}') \hat{n}') \cdot \hat{t}_2 = \hat{s} \cdot \hat{t}_2 = |\hat{s}_t| |\hat{t}_2| \cos \varphi$$

$$\text{所以: } \varphi = \cos^{-1} \left(\frac{\hat{s} \cdot \hat{t}_2}{|\hat{s}_t| |\hat{t}_2|} \right) = \cos^{-1} \left[\frac{\hat{s} \cdot (\hat{n}' \times \hat{t}_1)}{|\hat{s} - (\hat{s} \cdot \hat{n}') \hat{n}'|} \right]$$

参考文献:

- [1] 陈保辉. 雷达目标反射特性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [2] 许小剑, 黄培康. 防空雷达中的目标识别 [J]. 系统工程与电子技术, 1996, (5): 48-62.
- [3] Isabelle Tardy, Gerard-Pascal Piau, Pierre Chabrat, Jacques Rouch. Computational and experimental analysis of the scattering by rotating fans [J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 1996, 44(10): 141-148.
- [4] Craig R Birtcher, Constantine A Balanis, Dennis Decarlo. Rotor-blade modulation on antenna amplitude pattern and polarization: Predictions and Measurements [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1999, 41(4): 384-393.

作者简介:



曹祥玉 女, 1964 年 3 月出生于西安, 教授, 博士, 曾获国家科技进步三等奖, 现在西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士后流动站, 研究方向: 电磁场数值计算, 电磁兼容、电磁散射与逆散射.



梁昌洪 男, 1943 年 12 月出生于上海市, 西安电子科技大学校长, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE Senior Member, 研究方向包括计算场论、计算微波、微波网络理论、近代数据处理、电磁散射与逆散射.