

文章编号: 1000-6893(2004)04-0385-04

# 用矩量法研究直升机高频天线电磁特性的旋翼调制效应

牛臻弋, 徐金平

(东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

## On Helicopter Rotor-blade Modulation of HF Antenna Electromagnetic Behavior Using Method of Moments

NIU Zhen-yi, XU Jin-ping

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**摘要:** 基于面元模型的矩量法与快速多极子方法结合分析了直升机机载高频通信天线电磁特性的旋翼调制效应。通过三维计算机辅助实体建模技术, 建立了一个尺度与真实直升机相当的仿真模型, 实现了机体表面网格的自动剖分。应用准静态法和 FFT 技术, 计算分析了旋转桨叶对天线辐射场幅度和频率的调制效应, 还分析了桨叶旋转对天线输入导纳和互导纳的影响。计算结果表明, 旋转桨叶对直升机机载天线辐射场产生了显著的影响。本方法亦适用于其它类型的直升机和其它具有旋转桨叶的载体上天线电磁特性的分析。

**关键词:** 直升机; 旋翼调制效应; 三维 CAD 建模; 线天线; 电磁辐射; 矩量法; 快速多极子方法; 准静态法  
**中图分类号:** O441.4; V243.4 **文献标识码:** A

**Abstract:** The effects of helicopter rotor-blade modulation on the electromagnetic behavior of HF antennas mounted on the airframe are analyzed by method of moments (MoM) with fast multipole method (FMM) based on a surface patch model. By 3D computer aided modeling, a full size model is constructed and the surface meshing of the model is accomplished automatically. Based on these techniques, the modulation effects of rotating blades on the magnitude and frequency of the antenna radiation field are calculated by the quasi-stationary method in combination with fast Fourier transform (FFT) algorithm. Furthermore, the variation of the input admittance and mutual admittance of the antennas are analyzed when the blades rotate. The computed results show that the antenna radiation field is interfered severely by the rotating blades. These techniques can also be used to the investigations on the electromagnetic behavior of antennas mounted on other types of helicopters and platforms with rotating blades.

**Key words:** helicopter; rotor-blade modulation; 3D computer aided modeling; line antenna; electromagnetic radiation; method of moments; fast multipole method; quasi-stationary method

直升机通信系统中广泛采用不同形式的线天线, 如单极天线、鞭天线、环天线等。为了保证直升机全天候飞行的安全性, 要求通信系统具备非常高的稳定性和可靠性。当多个天线安装在同一载体上时, 由于天线与载体之间以及天线和天线之间的电磁耦合, 孤立天线原有电磁特性会发生显著改变, 从而影响相应电子系统功能的正常发挥。对于直升机而言, 由于大型高速旋转桨叶的存在, 将对机体上各种天线的电磁特性产生显著影响, 而且因 Doppler 效应对通信信号产生的调制会严重干扰正常通信的进行, 甚至可能使信道发生阻塞进而导致通信链接中断, 这将严重影响直升机正常任务的执行甚至对飞行安全构成极大威胁, 因此对直升机旋翼调制效应进行研究具有重要应用价值。近十年来, 关于直升机上 HF/VHF

天线的电磁特性及旋翼调制 (RBM, rotor-blade modulation) 效应影响等方面研究在国际上引起了广泛关注<sup>[1~8]</sup>, 而国内在这方面的研究工作尚未见报道。本文应用基于面元模型的矩量法结合快速多极子方法 (FMM)<sup>[9]</sup> 对直升机机载高频通信天线电磁特性的 RBM 效应进行了分析。

## 1 基本原理

### (1) EFIE 矩量法

一般理想导体的散射电场可表示为

$$E_S(\mathbf{r}) = -\frac{j\omega\mu}{4} \int_S \bar{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') dS' \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为角频率;  $\mathbf{J}(\mathbf{r})$  为表面感应电流;  $S$  为理想导体表面; 自由空间电场并矢格林函数  $\bar{G}$  的表达式为

$$\bar{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \left[ \bar{\Gamma} - \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \right] g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (2)$$

式中:  $\bar{\Gamma}$  为单位张量;  $k$  为自由空间波数;  $k =$

$\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ ; 自由空间标量格林函数  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}/|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|$ 。

由理想导体表面边界条件  $\hat{n} \times (\mathbf{E}_s(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_i(\mathbf{r})) = 0$ , 可得理想导体表面电场积分方程

$$\hat{n} \cdot \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) = \frac{j\mu}{4} \int_S \hat{n} \cdot \overline{\overline{\mathbf{G}}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') dS \quad (3)$$

其中:  $\hat{n}$  为表面上外法向单位矢量;  $\hat{t}$  为表面上单位切向矢量;  $\mathbf{E}_i(\mathbf{r})$  为入射电场。

用基函数  $f_n(\mathbf{r})$  将  $\mathbf{J}(\mathbf{r})$  展开, 根据 Galerkin 法, 对上式两侧加权求内积, 可得矩阵方程

$$\sum_{j=1}^N Z_{ij} I_j = V_i \quad (4)$$

其中:  $Z_{ij}$  和  $V_i$  可由下式分别给出

$$Z_{ij} = \int_S f_i(\mathbf{r}) \cdot \overline{\overline{\mathbf{G}}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot f_j(\mathbf{r}') dS dS \quad (5)$$

$$V_i = - \frac{j4}{k_0} \int_S f_i(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) dS \quad (6)$$

### (2) 快速多极子方法

应用 FMM 求解问题时, 首先需将所涉及的未知元进行分组, 并将分组区分为相邻组和非相邻组, 然后对其中相邻组的矩阵阻抗元素直接进行运算, 对非相邻组的矩阵阻抗元素中的格林函数应用加法原理<sup>[10]</sup>展开, 并进一步分解为组之间的转换和从组中心到组内元素的扩散。经过上述变换, 可有效减少矩量法阻抗矩阵元素计算中矩阵矢量积的数目和对存储空间的需求。

### (3) 旋翼调制效应

旋翼旋转状态下天线电磁特性可采用准静态法<sup>[11]</sup>进行研究。当旋翼旋转角速率远小于电磁波传播角速率时, 可忽略旋转桨叶与电磁波的相对运动, 在任一时刻上将旋转桨叶看作“冻结”在旋转轨迹上, 即以在一系列采样时刻  $t_1, t_2, \dots, t_N$  上, 在给定观察点  $\mathbf{r}_S$  处, 驻定的载体上天线辐射场采样值所构成的离散时域序列  $E_{\phi, S}(\mathbf{r}_S, t_1), E_{\phi, S}(\mathbf{r}_S, t_2), \dots, E_{\phi, S}(\mathbf{r}_S, t_N)$  来模拟旋翼旋转状态下该天线的动态电磁特性。

旋翼的周期性转动会引起辐射信号以角速率  $\omega = N_b \omega_r$  周期性变化, 其中  $N_b$  为桨叶数目,  $\omega_r$  为旋翼旋转角速率。为进一步研究旋翼调制而产生的频率调制效应, 在给定观察点处, 对单位周期内辐射场进行  $N$  点采样, 然后对离散时域采样序列做 FFT 变换

$$A_{\phi, S}(\mathbf{r}_S, n) = \sum_{k=0}^{N-1} E_{\phi, S}(\mathbf{r}_S, t_k) \exp[-jkn(2\pi/N)] \quad (7)$$

即可得到分布在  $\pm n \omega$  上的 Doppler 频谱。

## 2 计算结果与分析

### (1) 直升机几何模型的建立

图 1 是一个采用专用 CAD 软件仿照法国“海豚”直升机建立的三维实体模型和它的表面网格剖分效果。全机长约 14m, 高约 3.3m, 翼展约 12m。参照文献[3, 4], 在机上共安装了 3 根通信天线, 天线 1 是 HF 环形天线(几何结构如图 2 所示), 天线 2 是 HF 鞭天线(长 1.38m, 安装于机体对称面上, 向后倾斜 30°), 天线 3 是 VHF 倒 L 形天线(长 0.5m, 在中心点处 90°弯折)。

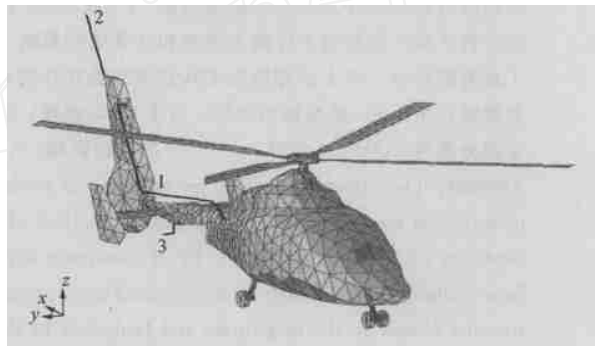


图 1 直升机实体模型与表面网格剖分效果

Fig. 1 The full size helicopter model and its surface meshes

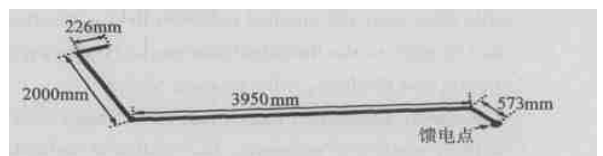


图 2 天线 1 几何构造及尺寸

Fig. 2 Geometry of the loop antenna 1

直升机表面网格剖分的全局边长为 0.4m, 允许最大曲率误差为 0.1。全局边长定义为在直角坐标系的 3 个轴向上, 网格划分的最大长度。机体网格剖分数为 1 986, 旋翼网格剖分数为 542。

目前, 大部分直升机桨叶材料已由全金属结构过渡到复合材料<sup>[12]</sup>, 实际建模时应采用阻抗边界条件的矩量法。本文主要考察全金属结构的旋翼调制效应。

### (2) 静态直升机天线电磁特性

图 3 给出了天线 1 工作在 30MHz, 旋翼旋转角为 67.5°(与球坐标参量  $\theta$  对应) 时三维归一化远区辐射场图。由图可直观地看出, 此时机体左侧有明显的通信盲区。图 4 给出了机体表面归一化电流强度分布。可见, 在天线 1 附近的机体表面有很强的感应电流分布。

计算中, 未知元总数为 3 837。计算平台为配

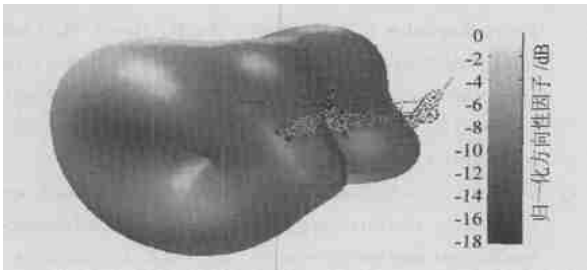


图 3 三维远区辐射场方向性图 ( $f = 30\text{MHz}$ )

Fig. 3 Normalized 3D radiation pattern



图 4 机体表面归一化电流强度 ( $f = 30\text{MHz}$ )

Fig. 4 Induced surface current on the helicopter model

有两个 Intel Xeon 2.8G CPU 和 4G RAM 的 DELL 工作站。采用传统 MoM 计算上述问题时,矩阵填充时间 16 min;最小留数误差设定为  $10^{-5}$  时,采用 GMRES 方法迭代 317 步,耗时 6.5min;计算 3 784 个场点耗时 2.5min;最大内存消耗 562M。采用 FMM 结合 MoM 计算上述问题时,非空分组数为 6,矩阵填充时间 14min;误差设定为  $10^{-5}$  时,迭代 317 步,耗时 8min;计算 3 784 个场点耗时 2.5min;最大内存消耗 464M。由此可见,FMM 可有效加速矩量法矩阵元素的计算,降低存储空间的需求。

(3) RBM 效应对天线电磁特性的影响

对天线远区辐射场在旋翼旋转角为  $0^\circ \sim 90^\circ$  间进行 16 点采样,采样间隔  $5.625^\circ$ 。图 5 (a), (b), (c) 分别给出了接收天线为极化、极化和圆极化情况下,天线 1 辐射场 ( $f = 30\text{MHz}$ ) 的调制电平分布 ( $20\lg|E_{\max}| - 20\lg|E_{\min}|$ )。图 6 表示了图 5 中极坐标方向到直角坐标的映射关系。由图 5 可看出旋翼旋转时不同方位上天线 1 远区辐射场幅值变化的剧烈程度,可见当接收天线为圆极化工作时,RBM 效应影响较小。

图 7 给出了旋翼旋转状态下,天线 1 工作在 30MHz 时的输入导纳以及天线 2,3 的互导纳变化情况。由图可见,由于机体表面电流主要集中在天线 1 附近(图 4),所以旋翼旋转对此时天线 1

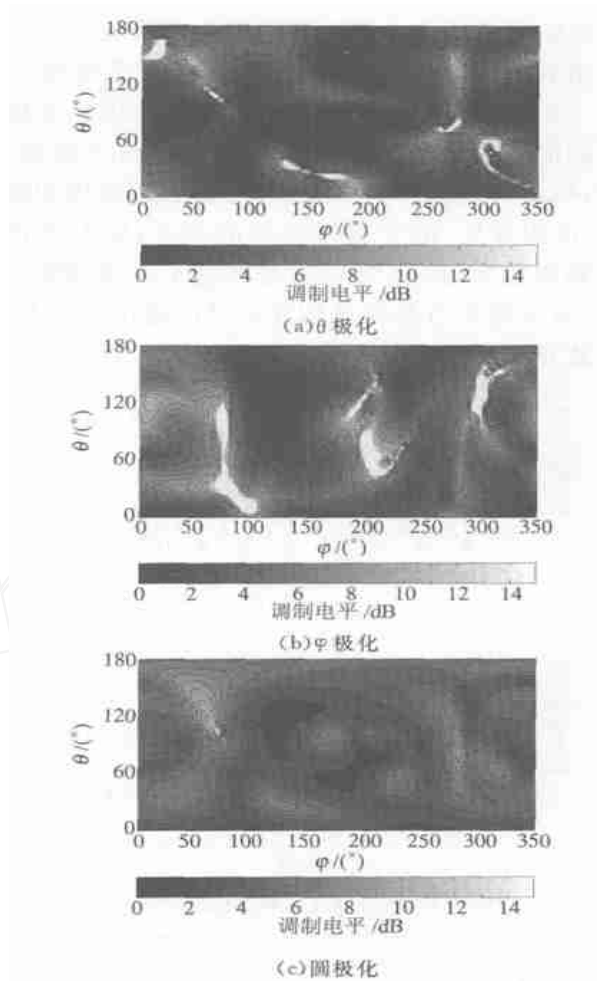


图 5 旋翼旋转状态下天线 1 远场调制电平分布 ( $f = 30\text{MHz}$ )

Fig. 5 Contour plot of the modulation levels

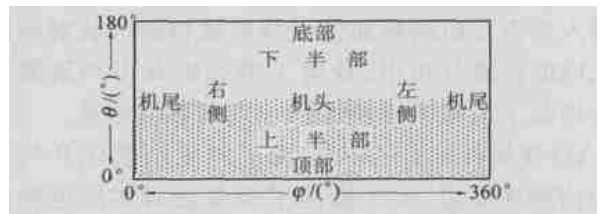


图 6 极坐标方向到直角坐标的映射

Fig. 6 The mapping of polar coordinate directions about the helicopter onto the Cartesian coordinate system

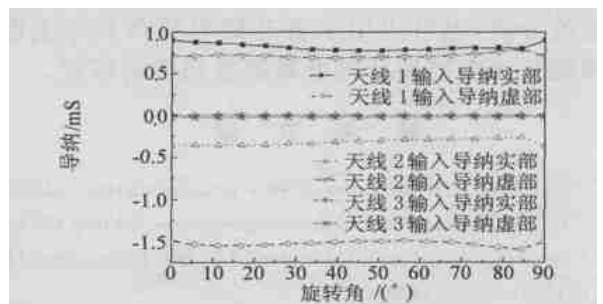


图 7 旋翼旋转状态下天线 1 输入导纳和天线 2,3 的互导纳的变化情况 ( $f = 30\text{MHz}$ )

Fig. 7 Input admittance of antenna 1 and mutual admittance of antennas 2 and 3 versus blades rotating angle

输入导纳和天线 2,3 间互导纳影响不明显。

图 8 (a), (b) 分别给出了在一任选观察点 ( $60^\circ, 180^\circ$ ) 处对辐射场采样序列进行 FFT 变换后得到的电场  $\theta$  分量和  $\varphi$  分量的 Doppler 频谱。图中, 频谱中心频率为天线工作角频率, 谱线间隔  $4\omega_r$ 。由图可见, 由于旋转桨叶的存在, 辐射场产生了频谱扩展, 在  $\omega_0 \pm 4n\omega_r$  处产生了一系列噪声分量, 这些噪声分量将迭加在正常的通信信号上, 会干扰正常通信。

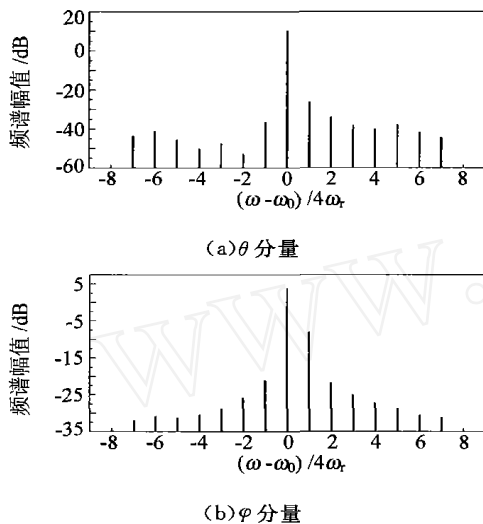


图 8 Doppler 效应对辐射场的影响

Fig. 8 Doppler effect on the radiation field

### 3 结 论

将基于面元模型的矩量法和快速多极子方法引入到直升机高频通信天线电磁特性的旋翼调制效应的仿真分析中, 获得了静态情况下和旋翼旋转情况下天线电磁特性的一系列数值结果。三维 CAD 建模技术的引入实现了对复杂载体几何结构的精确模拟, 大大提高了矩量法对实际电磁问题的求解能力。快速多极子方法的采用有效提高了问题求解的效率。本方法同样适用于其它类型的直升机和其它具有旋转桨叶的载体上天线电磁特性的分析, 也可应用于直升机等复杂载体上电子系统天线布局设计等电磁兼容问题的研究。

### 参 考 文 献

- [1] Cox J W R. Corroboration of a moment-method calculation of the maximum mutual coupling between two HF antennas mounted on a helicopter [J]. IEE Proceedings-H, 1993, 140(2): 113 - 120.
- [2] Andrew W V, Balanis C A, Tirkas P A, *et al.* Finite-difference time-domain analysis of HF antennas on helicopter airframes [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1997, 39(2): 100 - 113.

- [3] Georgakopoulos S V, Balanis C A, Birtcher C R. Cosite interference between wire antennas on helicopter structures and rotor modulation effects: FDTD versus measurements [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1999, 41(3): 221 - 233.
- [4] Birtcher C R, Balanis C A, DeCarlo D. Rotor-blade modulation on antenna amplitude pattern and polarization: predictions and measurements [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1999, 41(4): 384 - 393.
- [5] Richie J E, Barrett T J. VHF helicopter antennas that incorporate the airframe and reduce rotor modulation [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2000, 42(3): 298 - 302.
- [6] Han D H, Polycarpou A C, Balanis C A. Ground effects for VHF/ HF antennas on helicopter airframes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(3): 402 - 412.
- [7] Polycarpou A C, Balanis C A, Stefanov A. Helicopter rotor-blade modulation of antenna radiation characteristics [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(5): 688 - 696.
- [8] Richie J E, Joda T. HF antennas for NVIS applications mounted to helicopters with tandem main rotor blades [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(2): 444 - 448.
- [9] Engheta N, Murphy W D, Rokhlin V, *et al.* The fast multiple method (FMM) for electromagnetic scattering problems [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1992, 40(6): 634 - 641.
- [10] Harrington R F. Time harmonic electromagnetics [M]. USA: Mchill Press, 1960.
- [11] van Bladel J. Electromagnetic fields in the presence of rotating bodies [J]. Proc IEEE, 1976, 64: 301 - 318.
- [12] 倪先平, 蔡汝鸿, 曹喜金, 等. 直升机技术发展现状与展望 [J]. 航空学报, 2003, 24(1): 15 - 20.  
(Ni X P, Cai R H, Cao X J, *et al.* Present situation and prospects of helicopter technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(1): 15 - 20.)

#### 作者简介:



牛臻弋(1975 - ) 男, 河南洛阳人, 东南大学毫米波国家重点实验室博士研究生, 主要研究方向: 计算电磁学, 天线与电磁散射, 电磁兼容。E-mail: nzy@seu.edu.cn, 联系电话: 025-83795401。



徐金平(1962 - ) 男, 江苏张家港人, 东南大学毫米波国家重点实验室教授, 博士生导师, 主要研究方向: 计算电磁学, 天线与电磁散射, 毫米波理论与技术, 电磁兼容。E-mail: jpxu@seu.edu.cn, 联系电话: 025-83795401。

(责任编辑: 李泓洁)