

基于弹跳射线法的机载天线仿真分析

李腾飞, 朱婷婷, 王英浩, 庄 伟

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 提出了基于表面电流法的弹跳射线法, 并利用对比基于接收球算法的射线追踪法和矩量法的计算结果来验证算法的计算精确性, 然后采用基于表面电流法的弹跳射线法分析某型号直升飞机机载天线, 对比不同位置处天线的方向图变化, 分析变化原因, 为实际飞机天线布局设计提供参考。

[关键词] 天线布局, 电磁仿真, 弹跳射线法

[中图分类号] TN973.2 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2020)03-0038-05

Simulation Analysis of Airborne Antenna Using the Shooting and Bouncing Ray Technique

Li Tengfei, Zhu Tingting, Wang Yinghao, Zhuang Wei

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: This paper proposes the Shooting and Bounce Ray Method based on the surface current method, and verifies the calculation accuracy of the algorithm by comparing the calculation results of the ray tracing method based on the receiving ball algorithm and the method of moments. Then, the shooting and bouncing method based on the surface current method is used to simulate the airborne antenna of a certain type of helicopter. Comparison of the antenna pattern changes at different locations and analysis of the causes of the pattern changes can provide a reference for the actual aircraft antenna layout design.

Key words: antenna layout, electromagnetic simulation, shooting and bouncing ray method

目前飞机上安装了大量的电子设备, 并配备了大量的机载天线。由于飞机的机头、机身以及机翼都是金属材料, 故天线的方向图会因遮挡发生变化, 这增加了天线布局设计的难度。在早期天线布局设计中, 一般通过缩小模型试验或飞行试验来验证天线的布局, 但是该种测试需要耗费大量的人力、物力, 而且需要很长的测试时间。

随着计算机技术的不断发展, 开始采用电磁仿真软件分析机载天线的布局问题。但在计算复杂的机载天线系统目标时, 仍需要耗费大量的计算资源。本文采用基于表面电流法的弹跳射线法既节省计算资源, 又保证了计算精度。文中采用此方法分析某型号直升飞机的机载天线布局情况, 通过分析摆放位置对天线方向图的影响来为天线布置提供参考^[1]。

1 算法分析

电磁仿真技术中数值计算方法至少可以分为全波算法和高频近似法两种。全波算法如矩量法, 因计算精度高而被广泛应用于电磁散射问题研究, 但是其计算时间太长且计算量需求太大, 不适合用来分析大尺寸目标计算。例如在求解一个有 10 万个未知数的问题时, 要生成并存储一个含 10^{10} 个单精度复杂类型的元素的矩阵, 应用迭代法时其计算复杂度为 $O(N_{\text{iter}} 10^{10})$ ^[2-3]。高频近似法由于消耗资源低并具有较好的精度而被广泛地用来解决电大尺寸目标计算问题。最常见的为弹跳射线法^[4]。

在弹跳射线法中, 计算远区空间场可以采用接收球法以及表面电流法。接收球算法着眼于接收点处

解决问题,是一个以接收点为球心、具有规定半径(或为缓冲半径)的球,如果一条射线与接收球相交,那么该射线对接收信号的有贡献^[5],然后采用几何光学法计算空间的场分布,接收球算法虽然计算速度较快,但计算精度较低.表面电流法基于射线追踪,该法认为在射线发生反射的点会生成感应电磁流,将该感应电磁流作为二次辐射源向外辐射射线.重复此步骤,最终确定出射射线,结合几何光学法和物理光学法准确的计算辐射源所在空间的场分布,进一步的提高计算精度.基于表面电流法的弹跳射线法的实现步骤可以分为三个阶段:射线的路径追踪、射线的场强追踪、远区散射场的计算^[6].

1.1 射线的路径追踪

将均匀入射的平面波视为一组密集的平行射线管射向散射体,每条射线管都由一条带有参考点 (x_0, y_0, z_0) 以及方向矢量 (s_x, s_y, s_z) 来表示,那么沿着这条光线的任何点 (x_1, y_1, z_1) 都可以被描述为:

$$(x_1, y_1, z_1) = (x_0, y_0, z_0) + (s_x, s_y, s_z)t. \quad (1)$$

式中, t 为时间变量,且 $t>0$.入射光线的方向矢量 (s_x, s_y, s_z) 由下式给出:

$$s_x = -\sin \theta^q \cos \phi^q, s_y = -\sin \theta^q \sin \phi^q, s_z = -\cos \theta^q. \quad (2)$$

式(2)中 q 为入射方向,将式(2)代入式(1)可得:

$$\frac{x-x_0}{\sin \theta^q \cos \phi^q} = \frac{y-y_0}{\sin \theta^q \sin \phi^q} = \frac{z-z_0}{\cos \phi^q}. \quad (3)$$

确定了入射方程,还需要散射体的表面形状方程来确定入射线与散射体表面的交点,假设散射体的表面形状方程为:

$$f(x, y, z) = 0. \quad (4)$$

将式(3)和(4)组成方程组,求得交点.

已知射线管的入射方向和位置,可确定入射平面波的起点和方向,生成相应射线管.然后射线在散射体上不断反射.在散射体碰撞点发生反射时,表面电流法认为射线在该碰撞点处产生了感应电磁流,并以该处形成的感应电磁流作为二次辐射源,向外发生入射波.重复此步骤,该算法认为入射射线管在散射体上不断反射得到一系列反射点和出射射线.

1.2 射线的场强追踪

确定了射线的路径,便可确定沿射线的场振幅了.在几何光学中,电场遵循:

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}_{i+1}, \mathbf{y}_{i+1}, \mathbf{z}_{i+1}) = D_i \cdot (\bar{\Gamma})_i \cdot \mathbf{E}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i, \mathbf{z}_i) \cdot e^{-jP}. \quad (5)$$

式中, $P = k_0[(x_{i+1}-x_i)^2 + (y_{i+1}-y_i)^2 + (z_{i+1}-z_i)^2]^{1/2}$ 为射线传播路径产生的相位变化, k_0 为视察方向. D_i 为射线从第 (i) 次到第 $(i+1)$ 次中扩展的发散因子. $(\bar{\Gamma})_i$ 为第 (i) 次反射点处的平面反射系数矩阵. $\mathbf{E}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i, \mathbf{z}_i)$ 为点 $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 处的入射场.

1.3 远区散射场的计算

通过射线的路径追踪和场强追踪,得到射线的路径轨迹和射线场强.假设只有一束射线射向物体,这束射线经过不停的弹跳,最终到达出射面产生散射场.通过考虑射线管的波前曲率、大小和形状来计算射出面的后向散射场.重复这个过程求解出该条射线管的出射场,则总散射场应该为每个单独的射线管的散射场的总和.

采用物理光学法进行物理光学积分计算远区散射场.首先,在射线反射处产生等效磁电流 \mathbf{K}_s ,形成二次源向外辐射,此时的后向散射场可通过物理光学积分进行求解.

设某一个入射射线管面积为 $\Delta x_0 \Delta y_0$,其入射方向向量为 (s_x, s_y, s_z) ,则:

$$\begin{bmatrix} A_\theta \\ A_\phi \end{bmatrix} = \frac{jk_0}{2\pi} \sum_{\text{all rays}} \begin{bmatrix} E_x(x_i, y_i) \cos \phi^i + E_y(x_i, y_i) \sin \phi^i \\ -E_x(x_i, y_i) \sin \phi^i \cos \phi^i + E_y(x_i, y_i) \cos \phi^i \cos \theta^i \end{bmatrix} \cdot e^{+jk_0(s_x x_i + s_y y_i)} (\Delta x_i \Delta y_i) I_i. \quad (6)$$

式中, $I_i = \frac{1}{(\Delta x_i \Delta y_i)} \iint e^{jk_0[(u-s_x)x + (v-s_y)y]} dx dy$, $u = \sin \theta^i \cos \phi^i$, $v = \sin \theta^i \sin \phi^i$, $(\Delta x_i \Delta y_i)$ 为出射射线管的面积,可通过入射射线管面积 $\Delta x_0 \Delta y_0$ 以及射线管的发散因子 D_i 得出:

$$(\Delta x_i \Delta y_i) = \left[\prod_{i=1}^N |D_i| \right]^{-2} \left(\frac{\cos \theta^i}{\cos \theta_2} \right) (\Delta x_0 \Delta y_0). \quad (7)$$

式中, N 指射线在腔体内一共发生的反射次数, θ^i 指入射波入射时与腔口面的夹角, θ_2 为对应的出射射线与腔口面的夹角^[6-7].

以上为基于表面电流法的弹跳射线法的三个基本步骤.

2 算例分析

本文通过一个简单的案例来表明弹跳射线法的计算精度和计算时间. 如图 1 所示, 建立一个角锥反射器模型. 分别在 XOY 面、 XOZ 面和 YOZ 面各建立一对长宽均为 5 m 的金属板, 在金属板中心处即点 (2.5, 2.5, 2.5) 处, 设立一个短偶极子天线源.

本文借助商用电磁仿真软件 XGTD、Rainbow Studio 进行分析. 分别采用矩量法、基于表面电流法的弹跳射线法以及基于接收球算法的射线追踪法来仿真计算. 仿真频率为 300 MHz, 图 2 给出了仿真后三种算法的二维辐射方向图结果.

图 2 虚线为基于表面电流法的弹跳射线法、点线为矩量法、实线为基于接收球算法的射线追踪法. 从图中可以看出, 采用本文算法的计算结果与矩量法的结果较为接近. 而基于接收球算法的射线追踪法的结果则相差较大, 因为 YOZ 平面的金属板会影响到接收球算法采用的接收半径, 所以在 180° 到 360° 之间, 精度较低.

如图 3 所示, 为仿真后的三维辐射方向图, 其中图 3(a) 是采用基于表面电流法的弹跳射线法, 图 3(b) 是采用全波矩量法.

从三维辐射方向图中可以看出, 本文采用的算法计算出的结果与矩量法的结果基本吻合, 计算精度较基于接收球算法的射线追踪技术高.

在内存使用量和计算时间上, 本文也进行了相关测试. 如图 4 所示, 给出了矩量法和本文算法的计算内存使用量数据对比图. 如图 5 所示, 为矩量法和本文算法的计算时间数据统计图. 本文采用的仿真电脑参数: CPU 为英特尔 XeonE5-2640 2.4GHz; 内存为三星 DDR4 2133MHz 16G; 硬盘为 ATA ST2000DM001-1ER1 (2000 GB); 操作系统为 window 7 专业版.

由图 4 可知, 随着计算频率的增加, 矩量法的内存使用量呈指数增长趋势, 在将频率增加到 800 MHz 时, 本文所采用的计算机已不能计算. 本文采用的算法的内存使用量基本趋于稳定, 呈线性变化趋势.

从统计图 5 可知, 随着计算频率的增加, 矩量法的计算时间增加幅度太大, 超过了十倍; 而本文所采用的算法随着计算频率的增加只是呈现出稳定增长.

综上所述, 本文采用的基于表面电流法的弹跳射线法既保证了计算结果的准确性, 又大大节约了计算资源, 提高了计算效率.

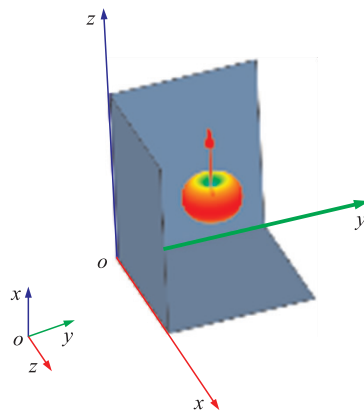


图 1 简单验证模型图

Fig. 1 Simple verification model diagram

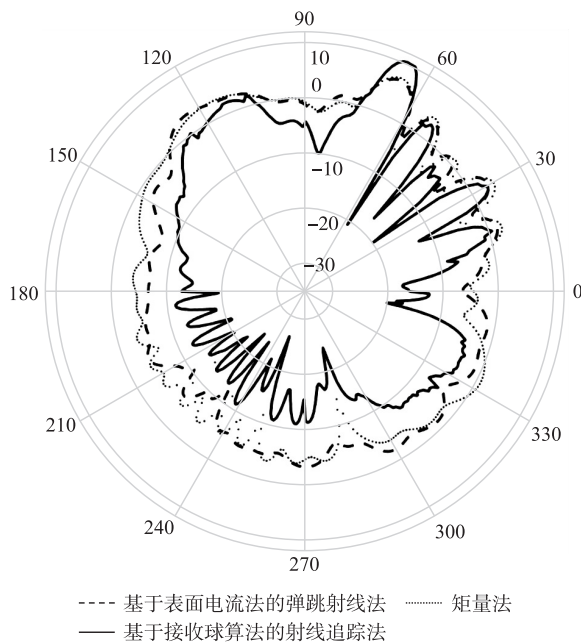
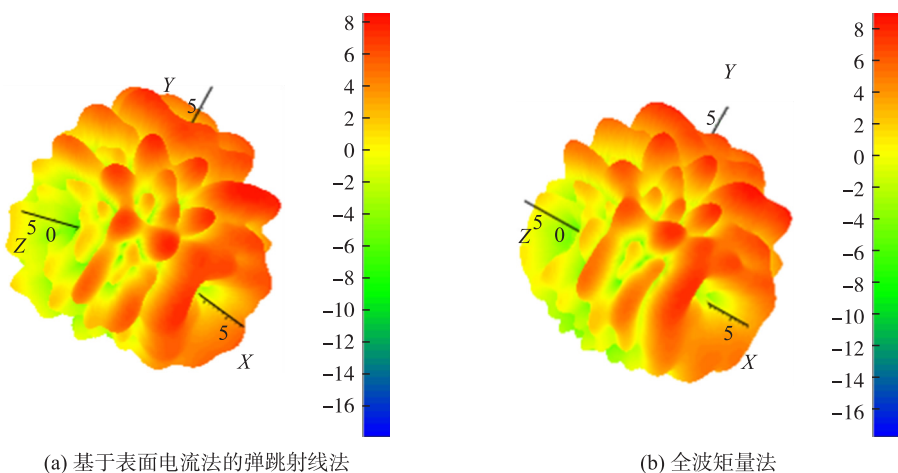


图 2 天线辐射方向图

Fig. 2 Radiation pattern by antenna



(a) 基于表面电流法的弹跳射线法

(b) 全波矩量法

图3 辐射方向图

Fig. 3 Radiation pattern

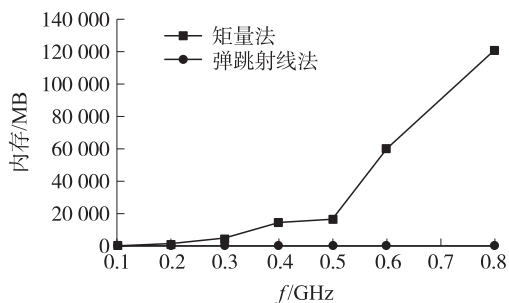


图4 计算内存数据图

Fig. 4 Calculation data graph

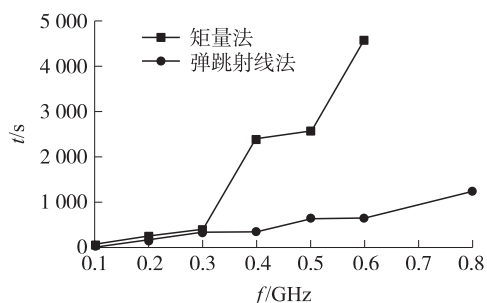


图5 计算时间数据图

Fig. 5 Calculation time data graph

3 仿真案例

采用本文提出的基于表面电流法的弹跳射线法来研究机载天线随其摆放位置不同的电磁特性变化. 图6为某型号直升飞机模型, 飞机长15.3 m, 宽2 m, 高4 m, 螺旋桨长14 m, 宽0.5 m. 采用短偶极子天线源, 将天线分别放置于该直升飞机的机舱头部、机舱前部、机舱顶部以及机舱的尾部处进行分析(仿真时将该直升飞机模型默认为理想导体).

如图7所示, 给出了算法中的射线路径轨迹, 黑色阴影表示为射线追踪中追踪的第一条路径轨迹. 由图可见, 因为机体的遮挡影响, 天线的辐射方向图发生畸变. 图7(a)和图7(b)因受到螺旋桨的影响较小, 其天线的远场方向图畸变较小, 天线的辐射方向图基本完整. 图7(c)因摆放于中部螺旋桨的正下方, 图7(c)的辐射方向图畸变最厉害, 这将极大地影响该处的天线收发性能. 图7(d)的天线辐射方向图也发生了较大的畸变, 主要是因为该处既会被飞机的中部螺旋桨遮挡也会受尾部螺旋桨的影响.

综上所述, 天线设计和布局时应根据天线的性能充分考虑上述情况的影响, 尤其是要着重考虑飞机的螺旋桨影响.

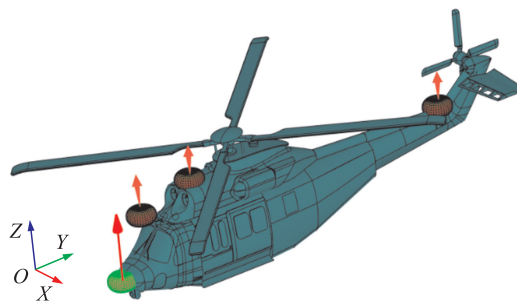


图6 某型号直升飞机模型

Fig. 6 A certain type of helicopter model

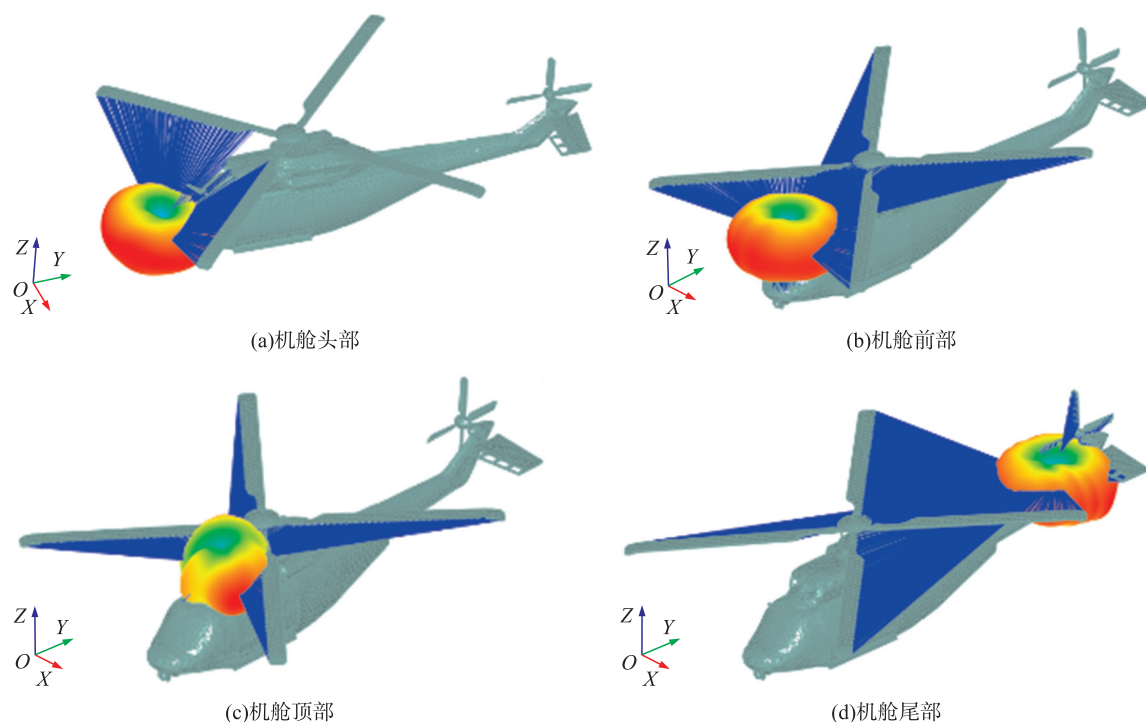


图 7 射线轨迹示意图

Fig. 7 Diagram of ray trajectory

4 结论

本文采用的基于表面电流法的弹跳射线法在保证计算精度的情况下又节约了计算资源,这为实际工程设计提供了极大的便利. 运用此方法,本文对某型号直升飞机的机载天线进行了分析,不同位置对其辐射方向有不同影响,其中机体的螺旋桨对天线辐射方向图有很大的影响,故在天线布局设计中应重点考虑,从而保证机载天线的工作性能完好.

[参考文献] (References)

- [1] 赵闯,崔英男. 基于 HFSS 的机载天线方向图研究[J]. 航空科学技术,2014(11):46-49.
- [2] 马俊成,张佳芬. 基于快速多极子算法的电磁散射计算加速性能研究[J]. 现代制造技术与装备,2015(1):16-18.
- [3] 林晨. 机载天线设计及天线系统布局研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [4] YANG W,KEE C Y,WANG C F. Novel extension of SBR-PO method for solving electrically large and complex electromagnetic scattering problem in half-space[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2017:1-10.
- [5] 梅琼. 基于射线跟踪法的微蜂窝小区电波传播特性的研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2004.
- [6] 吴志威,徐乐. 腔体目标的 SBR 算法研究[C]//2019 年全国微波毫米波会议论文集(上册). 广州:中国电子学会,2019.
- [7] LING H,CHOU R,LEE S W. Shooting and bouncing rays:calculating RCS of an arbitrary cavity[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. Philadelphia:IEEE,2003.

[责任编辑:陈 庆]