

机载通信天线辐射特性分析

高军, 曹祥玉, 刘涛

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 采用一致性几何绕射理论分析了某型航空飞行器机体对其上安装的通讯线天线辐射方向图的影响, 给出了航空飞行器散射模型建立的原则和方法, 对安装在飞机表面的通信线天线阴影区散射场计算公式进行了详细的分析推导, 设计了机载通信线天线辐射方向图计算软件, 可快速准确计算机载天线辐射方向图。以通信常用单极子天线为例, 计算了机体表面不同安装位置线天线受载机影响辐射方向图, 该结果对机载天线安装位置优化有指导意义。

关键词: 单极子天线; 一致性几何绕射理论; 辐射方向图; 航空飞行器

中图分类号: TN821.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2008)04-0754-05

Analysis of the radiation characteristic of the airborn communication antenna

GAO Jun, CAO Xiang-yu, LIU Tao

(Telecommunication Eng. Inst., Air Force Eng. Univ., Xi'an 710077, China)

Abstract: The Uniform Geometrical Theory of Diffraction (UTD) is presented to analyze an airborne antenna radiation pattern. The method for setting the scatter model of an aircraft is put forward. The computation formula for the radiation field of the airborne communication antenna in the shadow region is carefully investigated. The computer program of the radiation pattern of an airborne communication antenna is designed. The airborne antenna radiation pattern can be computed rapidly and accurately. Taking the dipole antenna as an example, the radiation pattern of the antenna in different locations on the airborne surface is computed. The results presented in this paper can be used to study the optimization of the airborne antenna disposition.

Key Words: dipole antenna; UTD; radiation pattern; aircraft

对于机载天线, 机身、机翼、进气道、起落架等机体上所有凸体都有可能对它产生散射作用, 引起天线辐射方向图畸变。研究机载天线辐射方向图变化情况, 可以直观、清晰地看出这些散射体对天线的影响。为减少散射体对天线辐射特性的影响, 确保天线性能的正常发挥, 优化天线在载机上的安装位置已成为工程设计的一个重要环节。对于飞机这样的大型散射体, 国外在 20 世纪 70 年代已开始研究^[1~4]、预测天线受机体影响后的辐射方向图, 开发了相应的分析预测软件^[2], 如 ATACAP 软件, 并已应用于实际工程。国内在这方面仍处于探索研究阶段, 而实际工程中, 天线在载机上的安装大多依靠工程经验, 然后进行试飞试验, 这样常常导致人力、物力的极大浪费。笔者采用一致性几何绕射理论, 着重对机载通信单极子天线在阴影区的绕射场进行了详细的分析, 给出了阴影区绕射场计算公式, 设计了机载天线辐射方向图分析预测软件, 以工程实际安装的载机天线为例, 采用该软件可计算安装在载机不同位置的天线辐射方向图, 并以此为依据优化天线在载机上的安装位置, 指导工程实践, 从而缩短研制周期, 节省经费, 大大提高效费比。

收稿日期: 2007-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助(60671001); 陕西省自然科学基础研究资助(2005F21); 西安市火炬攻关资助(GG06020)

作者简介: 高军(1962-), 男, 副教授, E-mail: xiangyucaokdy@163.com.

1 理论分析

一致性几何绕射理论(UTD)是20世纪70年代Pathak等在Keller导出的GTD基本算式(绕射系数)的基础上发展的^[5,6],该算法克服了GTD的缺点,较好地解决了电磁波在阴影边界上的不连续问题,使UTD在几何光学阴影边界过渡区有效,在阴影边界过渡区以外与GTD算法一致。对于源在曲面上的情况,也作了较为成功的研究,从而使其更具工程实用价值。根据UTD理论,曲面绕射场的计算又分为源在曲面上和源在曲面外两种不同情形。机载设备中的通讯天线大多采用线天线,比如单极子天线、刀形天线、V形天线等,这些天线都是直接安装在机体表面,属于源在曲面上的问题。关于亮区场的分析、计算已有文献报道,笔者着重分析、计算绕射场。

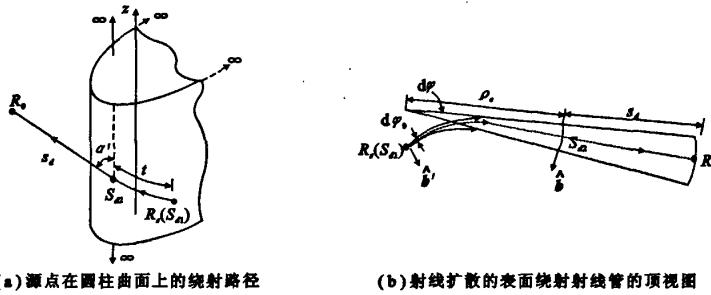


图1 源点在圆柱曲面上的绕射

根据UTD理论,对于源在曲面上的问题,绕射射线路径如图1所示,天线位于曲面上 R_s 点,接收点 R_0 处于阴影区,则接收点处 R_0 的绕射场为

$$dE_e(R_0|R_s) = dP_e(R_s) \cdot \bar{T}_e(R_s|S_{d2}) \left(\frac{\rho_c}{s_d(\rho_c + s_d)} \right)^{1/2} \exp(-jk s_d) , \quad (1)$$

式中 \bar{T}_e 为并矢绕射系数; R_s 及 S_{d2} 为源点和绕射点; k 为传播常数; ρ_c 为焦散距离; s_d 为第2个绕射点 S_{d2} 到场点 R_0 的距离; $dP_e(R_s)$ 为源点处天线等效场,对通信中常用的单极子天线考虑机体表面影响,天线等效源 $dP_e(R_s) = (1 - \cos(kL)) / \sin(kL)$ 。

$$\bar{T}_e(R_s|S_{d2}) = \frac{-jkZ_0}{4\pi} [\hat{n}'\hat{n}T_5(R_s)H + \hat{n}'\hat{b}T_6(R_s)S] \exp(-jkt) \left(\frac{d\varphi_0}{d\eta(S_{d2})} \right)^{1/2} \left[\frac{\rho_g(S_{d2})}{\rho_g(R_s)} \right]^{1/6} , \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_5(R_s) = 1 , \\ T_6(R_s) = T(R_s)\rho_g(R_s) , \end{cases} \quad (3)$$

$$T(R_s) = \frac{\sin(2\alpha')}{2} \left(\frac{1}{R_2(R_s)} - \frac{1}{R_1(R_s)} \right) , \quad R_1(R_s) \geq R_2(R_s) , \quad (4)$$

$$\rho_g(R_s) = \left(\frac{\cos^2 \alpha'}{R_1(R_s)} + \frac{\sin^2 \alpha'}{R_2(R_s)} \right)^{-1} , \quad (5)$$

式中自由空间特性阻抗 $Z_0 = 120\pi$; $\rho_g(R_s), \rho_g(S_{d2})$ 分别为源点和绕射点的曲率半径; $d\eta(S_{d2}) = \rho_c d\varphi$ 为 S_{d2} 点处表面射线管的宽度; $T_5(R_s), T_6(R_s)$ 为点 R_s 处的“扭矩因子”; $R_1(R_s)$ 及 $R_2(R_s)$ 为 R_s 点曲面的主曲率半径; α' 为绕射路径上任一绕射点处的切线矢量 \hat{t}' 与主方向 \hat{r}_2 之间的夹角。 \hat{n}' 及 \hat{n} 为源点和绕射点外法向单位矢量, \hat{b}' 及 \hat{b} 为源点和绕射点副法向单位矢量($\hat{b}' = \hat{t}' \times \hat{n}', \hat{b} = \hat{t} \times \hat{n}$)。

分析可知,对于圆柱: $\left(\frac{d\varphi_0}{d\eta(S_{d2})} \right)^{1/2} = \left(\frac{d\varphi_0}{\rho_c d\varphi} \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{\rho_c} \right)^{1/2}, \quad \rho_c = t,$

$$\rho_g(t') = \frac{a}{\sin^2(\alpha')} , \quad t = \int_{R_s}^{S_{d2}} dt' , \quad (7)$$

式中 a 为圆柱的半径; t 为曲面上绕射线弧长(短程线)。由于在整条绕射路径 ρ_g 均为常数,所以

$$[\rho_g(S_{d2}) / (\rho_g(R_s))]^{1/6} = 1 . \quad (8)$$

所以,方程(1)简化为

$$dE_e(R_0 | R_s) = dP_e(R_s) \cdot \left\{ \frac{-jkZ_0}{4\pi} [\hat{n}' \hat{n} T_5(R_s) H + \hat{n}' \hat{b} T_6(R_s) S] \exp(-jkt) \left(\frac{1}{\rho_e}\right)^{1/2} \right\}. \quad (9)$$

$$\left(\frac{\rho_e}{s_d(\rho_e + s_d)}\right)^{1/2} \exp(-jks_d),$$

$$H = g(\xi) \quad , \quad S = \frac{-j}{m(R_s)} \tilde{g}(\xi) \quad , \quad (10)$$

这里 $\xi = \int_{R_s}^{s_d} \frac{m(t')}{\rho_g(t')} dt'$; $m(R_s) = \left[\frac{k\rho_g(R_s)}{2} \right]^{1/3}$; $g(\xi)$ 和 $\tilde{g}(\xi)$ 分别代表声学的硬和软型福克函数

$$g(\xi) = \frac{1}{\pi^{1/2} \int_{\exp[-j2\pi/3]}^{\infty} d\tau \frac{\exp(-j\tau\xi)}{W_2(\tau)}} \quad , \quad \tilde{g}(\xi) = \frac{1}{\pi^{1/2} \int_{\exp[-j2\pi/3]}^{\infty} d\tau \frac{\exp(-j\tau\xi)}{W_2(\tau)}} \quad , \quad (11)$$

其中 $W_2(\tau)$ 是福克型艾利函数, $W_2(\tau) = \frac{1}{\pi^{1/2}} \int_{\exp[j2\pi/3]}^{\infty} dt \exp(\tau t - t^3/3)$, $W'_2(\tau)$ 表示 $W_2(\tau)$ 对 τ 的导数.

由于 ξ 积分表达式中 $m(t')$ 和 $\rho_g(t')$ 均为常数, 所以对圆柱曲面有

$$T_6(S_{d1}) = \frac{\sin(2\alpha')}{2a} \cdot \frac{a}{(\sin \alpha')^2} = \frac{\sin(2\alpha')}{2(\sin \alpha')^2} \quad , \quad (12)$$

$$\xi = (m/\rho_g) \cdot t \quad . \quad (13)$$

2 等效模型

对飞机这样一个电大尺寸物体, 在利用 UTD 分析机载天线装机后辐射特性时, 首先应建立等效模型. 采用部件分解法建立等效模型, 即将载机分解成许多能够利用 UTD 求解的典型部件的组合. 图 2 所示为某载机实际结构示意图, 采用部件分解法, 机头、机尾等效为半椭圆, 机身等效为圆柱, 机翼、尾翼、垂尾等效为有限平板, 进气道等效为空心圆筒, 这样, 图 2 所示载机等效模型如图 3.



图 2 某载机示意图

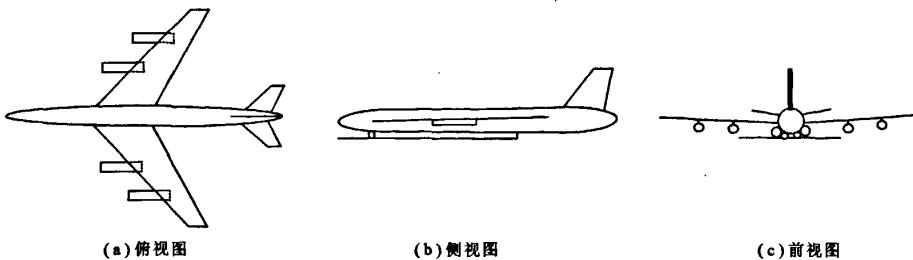


图 3 UTD 分析载机等效模型

根据 UTD 理论,计算载机对天线辐射方向图的影响就归结为上述各部件散射场之和,即

$$E = \sum_{i=1}^n \delta_i E_i , \quad (14)$$

其中 E_i 为各类射线场值(包括直射,一阶、二阶反射场,一阶、二阶绕射场,反射-绕射,绕射-反射等所有二阶场,在机身腹部还包括三阶场的影响); n 为飞机分解组件的总个数; δ_i 为射线遮挡因子.

3 算法验证

根据 UTD 理论,设计了机载天线辐射方向图预测软件,软件设计流程如图 4 所示. 以图 5(a)所示圆柱单极子天线和图 6(a)所示平板单极子天线辐射方向图计算为例,验证算法模块,计算结果分别如图 5(b)和 6(b),与 Ansoft 软件及文献[7]FDTD 结果相吻合,证明上述理论分析和计算方法正确.

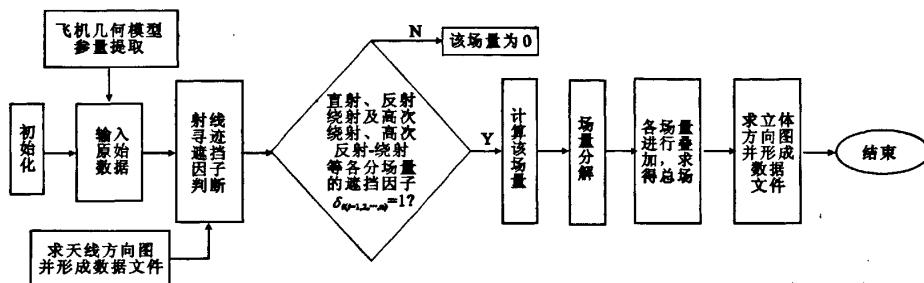
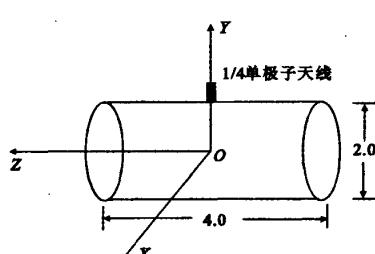
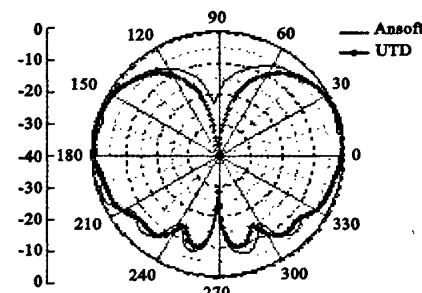


图 4 软件流程图

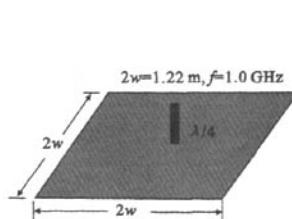


(a) 圆柱单极子天线结构示意图

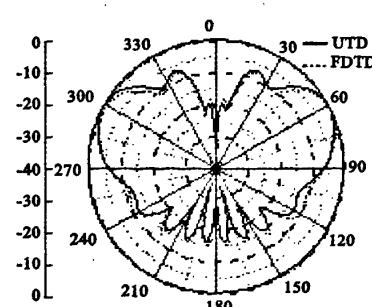


(b) 圆柱单极子天线方向图

图 5 圆柱上单极子天线结构模型及其辐射方向图



(a) 金属平板天线结构示意图



(b) 金属平板上单极子天线方向图

图 6 金属平板天线结构及其辐射方向图

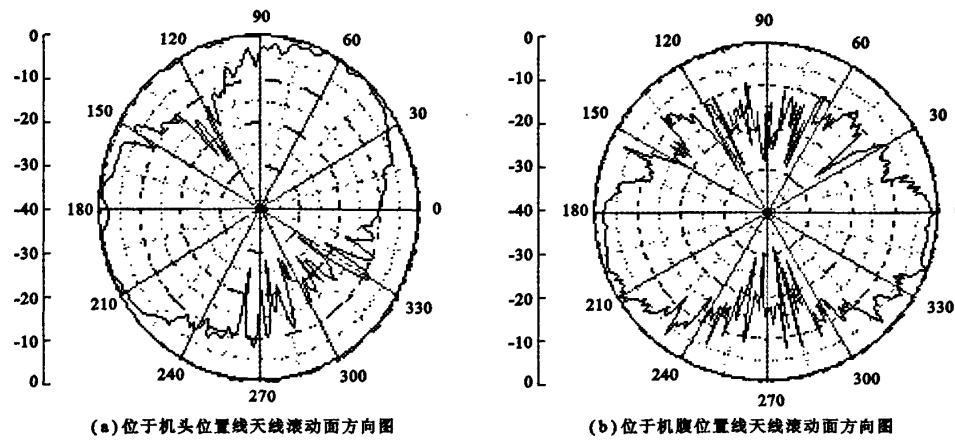


图7 单极子天线受载机影响辐射方向图

4 计算结果

以某航空机为例,分析计算了机载天线装机前后辐射方向图的变化情况。图7(a)为安装在飞机头部的通讯单极子天线受机体影响滚动面方向图。图7(b)为该天线位于机腹时受机体影响的辐射方向图,对比可以明显看出:位于机头的天线方向图稍有倾斜,而机腹部的天线除了受机身影响外,主要是机翼的影响使得方向图畸变严重,因此不同安装位置天线辐射方向图受机体影响不同。采用上述分析方法及设计的程序,不仅可以快速计算不同安装部位天线的辐射方向图,比较不同安装位置天线受机体影响情况,而且还可以进一步优化天线安装位置,为工程设计提供参考。

5 结束语

根据一致性几何绕射理论,笔者分析了载机对其上安装的线天线辐射方向图的影响,以机载通讯中常用的单极子天线为例,计算了在载机上不同安装位置天线的辐射方向图,由此图形可直观看出机体对天线辐射特性的影响,为机载多天线配置优化研究和系统电磁兼容性预测奠定了基础,并为实际工程天线的架设和安装提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Kouyoumjian R G, Pathak P H. A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface[J]. Proceeding of IEEE, 1974, 62(11): 1448-1461.
- [2] Burnside W D, Gilreath M C, Marhefka R J, et al. A Study of KC-135 Aircraft Antenna Patterns[J]. IEEE Trans on Antennas Propaga, 1975, 23(5): 309-316.
- [3] Yu C L, Burnside W D, Gilreath M C. Volumetric Pattern Analysis of Airborne Antennas[J]. IEEE Trans on Antennas Propaga, 1978, 26(11): 623-641.
- [4] Burnside W D, Wang N, Pelton E. Near-field Pattern Analysis of Airborne Antennas[J]. IEEE Trans on Antennas Propaga, 1980, 28(5): 318-327.
- [5] 汪茂光. 几何绕射理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [6] Pathak P H, Wang N, Burnside W D, et al. A Uniform GTD Solution for the Radiation from Sources on a Smooth Convex Surface[J]. IEEE Trans on Antennas Propaga, 1981, 29(4): 609-621.
- [7] Cao Xiangyu, Luk K M, Liang Changhong. The Analysis of Cylindrical Patch Antenna Fed with Coaxial Probe Using FDTD[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 37(6): 406-408.

(编辑:郭华)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>