

文章编号 1005-0388(2006)05-0666-04

电大尺寸导体附近线天线的辐射方向图研究*

黄伟芳 刘其中 周斌

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, thunderbirdd@126.com, 陕西 西安 710071)

摘要 采用一致性几何绕射理论分析了电大尺寸导体对其附近的对称振子天线辐射方向图的影响, 计算了在三种不同环境下的天线方向图, 结果与软件(FEKO)仿真结果吻合良好。为分析工程中复杂的电大尺寸目标, 提供了重要的参考依据。

关键词 一致性几何绕射理论, 电大尺寸导体, 辐射方向图

中图分类号 TN823 文献标识码 A

Radiation patterns of wire antenna near electrically large conductor

HUANG Wei-fang LIU Qi-zhong ZHOU Bin

(National Laboratory of Antennas and Microwave Technology,
Xidian University, thunderbirdd@126.com, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract The radiation patterns of a wire antenna near an electrically large conductor is analyzed by using UTD theory. Under three different circumstances, the patterns of the antenna are computed and the results are in good agreement with those from the FEKO software. The analysis conclusions may be seen as an important reference for engineering application.

Key words UTD, electrically large conductor, radiation patterns

1 引言

一致性几何绕射理论(UTD)是 20 世纪 70 年代孔杰荣和帕萨克(Kouyoumjian and Pathak)以及刘易斯和博埃兹马(Lewis and Boersma)在凯勒(J. B. Keller)几何绕射理论(GTD)基础上提出的。它采用经典的射线方法, 具有物理概念清楚、简单易算的特点, 能够准确地解决复杂系统的辐射和散射问题, 并且克服了 GTD 在几何阴影边界两侧失效的缺点, 从而使总场处处连续。对于电大尺寸物体, 矩量法、FDTD 及其它计算方法由于耗时、耗资源而难于求解, 而 UTD 是非常有效的方法。国外自 20 世纪 70 年代末, 采用 UTD 对电大尺寸导体散射场有过大量报道^[8~14]。国内从 80 年代初开始对 UTD 也有过一些报道, 但多局限于如圆柱、平板等简单部件的一次射线寻迹或计算^[2~7]。本文结合实际工程,

利用 UTD 分析计算了电大尺寸的单个平板、单个抛物面以及平板加抛物面对其附近的对称振子天线辐射方向图的影响, 并与商用电磁软件 FEKO 的计算结果进行了比较, 吻合良好, 且计算时间远远少于商用软件分析所需的时间, 充分验证了该方法的有效性和准确性, 对于分析更加复杂的电大尺寸导体系统的散射问题具有重要的现实意义。

2 理论分析

一致性几何绕射理论(UTD)^[1]的绕射系数是通过平面波在理想导电劈上的绕射和理想导电圆柱上的绕射两个典型问题的解推广的, 在利用 UTD 分析电大尺寸导体附近的线天线辐射方向特性时, 首先应将线天线等效为点源, 然后将电大尺寸导体

分解成许多能利用 UTD 求解的典型部件的组合,最后将各部分场叠加得到总场。

2.1 直射场

直射射线就是从源点 S 到场点 P 的没有受到阻挡的射线,因此只要在源点 S 和场点 P 之间没有障碍,空间的媒质又是均匀和各向同性的,则连接 S 点和 P 点的直线段就是唯一的一条直接射线。入射场可表示为

$$\mathbf{E}^i(r) = \mathbf{E}^i(r_0) \sqrt{\left(\frac{\rho_1^i}{\rho_1^i + s^i}\right)\left(\frac{\rho_2^i}{\rho_2^i + s^i}\right)} e^{-jks^i} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{E}^i(r_0)$ 是 $s^i=0$ 处的场强, s^i 代表沿入射射线的距离, ρ_1^i 和 ρ_2^i 代表入射波阵面的两个主曲率半径。

2.2 反射场

设 Q_R 是物体上的反射点, $\mathbf{E}^i(Q_R)$ 是反射点 Q_R 处的入射场, s 是反射点到场点的距离, ρ_1^r , ρ_2^r 是反射面两主曲率半径, $[R]$ 是反射系数矩阵。对入射线、反射线分别采用图 1 所示的射线基坐标系,则:

$$\mathbf{E}^r(P) = \mathbf{E}^i(Q_R) \cdot \mathbf{R} \sqrt{\rho_1^r \rho_2^r / (\rho_1^r + s)(\rho_2^r + s)} e^{-jks} \quad (2)$$

在射线基坐标系下, $[R]$ 简化为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_h & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$= -\hat{r}\hat{r} + \hat{\varphi}\hat{\varphi} = \hat{e}_\parallel^i \hat{e}_\parallel^r R_h + \hat{e}_\perp^i \hat{e}_\perp^r R_s \quad (3)$$

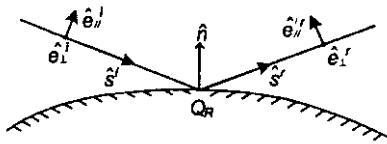


图 1 反射射线基坐标系

2.3 边缘绕射场

如图 2 所示,当电磁波向导电边缘入射时,在边缘产生边缘绕射场。此绕射场必须采用 UTD 来计算。

采用射线基坐标系,可得场点 P 的边缘绕射场为:

$$\mathbf{E}^{ed}(P) = \mathbf{E}^i(Q) \cdot \mathbf{D} \sqrt{\rho_c / (s(s + \rho_c))} e^{-jks} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{E}^i(Q)$ 是 Q 点的入射场, ρ_c 是反射射线波前两主曲率半径之差

$$\rho_c = \frac{1}{\rho_e^i} - \hat{n}_e(\hat{s}' - \hat{s})/\rho_e \sin^2 \gamma \quad (5)$$

ρ_e^i 是入射波阵面在 $\hat{s}' - \hat{t}$ 平面上的曲率半径; \mathbf{D} 是边缘绕射系数^[1]。

2.4 表面绕射场^[8]

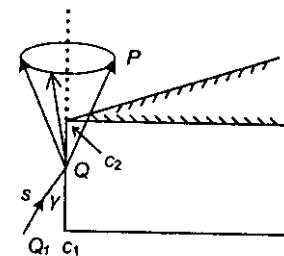


图 2 边缘射线场示意图

如图 3 所示,当入射线掠入射曲面时,在曲面上传播的表面绕射射线称为表面射线。在曲面上 Q_1 点和 Q_2 点之间表面射线的路程是 Q_1 点和 Q_2 点之间的短程线。表面绕射场表示为

$$\mathbf{E}^{sd}(P_s) = \mathbf{E}^i(Q_1) \cdot \mathbf{T}(Q_1, Q_2) \sqrt{\rho_2^d/s^d} \cdot (s^d + \rho_2^d) e^{-jks^d} \quad (6)$$

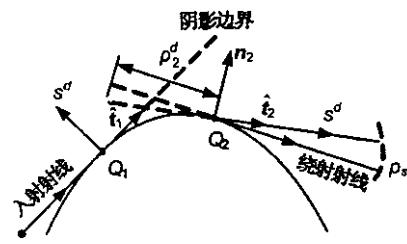


图 3 表面绕射场示意图

并矢传输函数 $\mathbf{T}(Q_1, Q_2)$ 是用来说明 Q_1 点表面射线场的发射, Q_1 点和 Q_2 点之间表面射线场的衰减,以及 Q_2 点表面射线场的绕射量的。

$$\mathbf{T}(Q_1, Q_2) = \hat{b}_1 \hat{b}_2 T_s + \hat{n}_1 \hat{n}_2 T_h$$

式中,

$$T_{s,h} = - \left[\sqrt{m(Q_1)m(Q_2)} \right] \sqrt{\frac{2}{k}} \left\{ \frac{e^{-j(\pi/4)}}{2\sqrt{\pi}\xi^d} [1 - F(X^d)] + \hat{P}_{s,h}(\xi^d) \right\} \left[\sqrt{\frac{d\eta(Q_1)}{d\eta(Q_2)}} e^{-jkt} \right] \quad (7)$$

其中, $F(\sigma)$ 是过渡函数, $\hat{P}_{s,h}(\delta)$ 是 Pekeris Carot 函数, 两个函数可以采用数值方法近似求得。

$$\xi^d = \int_{Q_1}^{Q_2} dt' \frac{m(t')}{\rho_g(t')}, m(Q) = \left[\frac{k\rho_g(Q)}{2} \right]^{1/3},$$

$$t = \int_{Q_1}^{Q_2} dt', X_d = \frac{kL^d(\xi^d)^2}{zm(Q)m(Q_2)}, L^d = s_0,$$

$$\sqrt{\frac{d\eta(Q_1)}{d\eta(Q_2)}} = \sqrt{\frac{s_0}{S_0 + t}}, \rho_2^d = s_0 + t$$

s^d 为 Q_2 点到场点的距离, s_0 为源点到 Q_1 点的距离, $\rho_g(Q)$ 表示在由 $\hat{s}' - \hat{t}$ 组成的入射平面内曲面在 Q 点的曲率半径。

2.5 总场

上述各分量场是在各自射线基坐标系下的表达式,求解总场时,首先应定义一个统一的直角坐标系,把各分量射线场分解为用直角坐标系表示的场分量,并转化到统一坐标系下,然后再进行叠加求和,即:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \delta_i \begin{bmatrix} E_x^i \\ E_y^i \\ E_z^i \end{bmatrix} + \delta_r \begin{bmatrix} E_x^r \\ E_y^r \\ E_z^r \end{bmatrix} + \delta_{ed} \begin{bmatrix} E_x^{ed} \\ E_y^{ed} \\ E_z^{ed} \end{bmatrix} + \delta_{sd} \begin{bmatrix} E_x^{sd} \\ E_y^{sd} \\ E_z^{sd} \end{bmatrix}$$

式中 δ 为遮挡判断因子, E^i 为直达场, E^r 为反射场, E^{ed} 为边缘绕射场, E^{sd} 为表面绕射场。

3 数值算例

首先分析了在距离电大尺寸金属平板 0.5m 处的半波振子的辐射问题, 平板边长为 1m, 频率为 3GHz, 如图 4 所示, 相比理想半波振子的 8 字形 E 面方向图, 显然金属平板对天线影响较大。与商用电磁分析软件 FEKO 的 MoM 结果吻合良好。

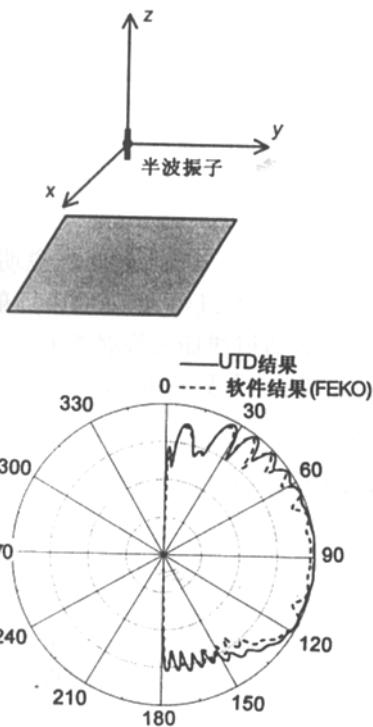


图 4 平板上方放置半波振子及 E 面方向图

其次, 分析了电大尺寸旋转抛物面附近半波振子的辐射问题, 抛物面口径为 1.2m, 高度为 0.1m, 半波振子的中心坐标是(0.2, 0.3, -1)m, 工作频率是 3GHz, 见图 5, 与商用电磁分析软件 FEKO 的 MoM 结果吻合良好。

最后, 分析了在旋转抛物面和平板都存在的情

况下半波振子的辐射问题, 抛物面与平板的结构同上, 半波振子的中心坐标为(0.2, 0.3, -1)m, 工作频率为 3GHz, 见图 6, 与商用电磁分析软件 FEKO 的 MoM 结果基本吻合。

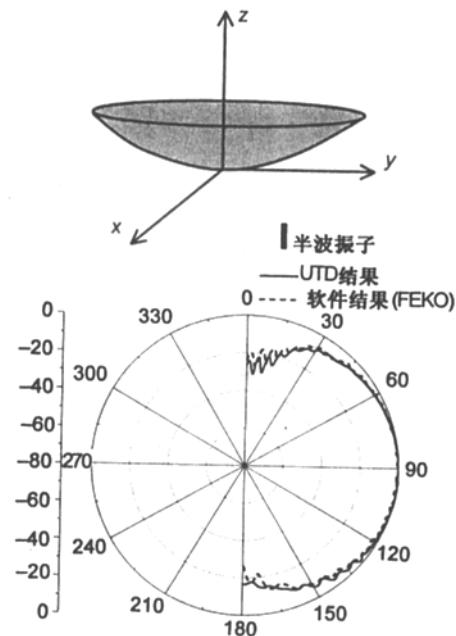


图 5 旋转抛物面下方放置半波振子及 E 面方向图

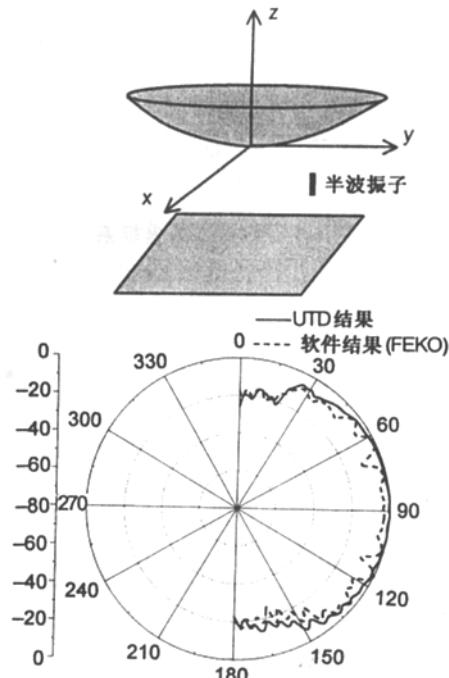


图 6 旋转抛物面和平板之间放置半波振子及 E 面方向图

表 1 中给出了计算时间和软件计算时间的对

比,显然,所用方法的计算时间明显少于软件计算时间,在分析更加复杂的电大尺寸目标问题中,具有重要的实用价值。以上计算均在 Pentium 4, 1.4GHz, 512M 内存计算机上完成。

表 1 计算时间对比

计算时间对比	情况 1	情况 2	情况 3
文中程序	1.361	1.411	2.494
软件	24.936	3669.166	34717.552

4 结论

结合工程实际,采用一致性几何绕射理论,以对称振子天线为例,分析了不同电大尺寸导体对其附近的天线辐射方向特性的影响,并且通过与软件分析结果的对比,验证了计算结果的准确性和有效性,极大地节省了存储资源与计算时间,为进一步分析复杂电大尺寸导体的散射问题提供了参考,具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 汪茂光. 几何绕射理论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1994.
- [2] 曹祥玉,项铁铭,马凤国,等. 机载天线辐射方向图研究[J]. 微波学报,2002,18(1):15~19.
- [3] 项铁铭,曹祥玉,马凤国,等. 机载相控阵天线辐射方向图的分析[J]. 电波科学学报,2002,17(2):204~207.
- T M Xiang, X Y Cao, F G Ma, et al.. Analysis of the airborne phased array pattern[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(2): 204~207.
- [4] 宗卫华,梁昌洪,曹祥玉,等. 圆锥体和圆柱体的几何绕射理论绕射线寻迹[J]. 西安电子科技大学学报,2002,29(4):482~485.
- [5] 梁昌洪,崔斌,宗卫华. 费马原理确定柱面和锥面反射点的解析表达式[J]. 电波科学学报,2004,19(2):153~156.
- C H Liang, B Cui, W H Zong. Analytical formulas for reflection ray tracing on the cylinder and cone base on the Fermat principle[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(2): 153~156.
- [6] 刘其中. GTD 中绕射线的寻迹[J]. 西安电子科技大学学报,1991,18(3):45~53.
- [7] 柴舜连,姚德森,毛钧杰. 导弹头共形阵的射线寻迹及 UTD 参数计算[J]. 微波学报,1997, 13(4): 363~368.
- [8] P H Pathak, R J Marhefka. A Uniform GTD Analysis

of the Diffraction of Electromagnetic Waves by a Smooth Convex Surface[J]. IEEE Trans. AP, 1980, 28(5): 631~642.

- [9] P H Pathak, W D Burnside, R G Kouyoumjian. A Uniform GTD Solution for the radiation from Sources on a Convex Surface[J]. IEEE Trans. AP, 1981, 29(4): 609~622.
- [10] J L Volakis. A uniform geometrical theory diffraction for an imperfectly conducting half-plane[J]. IEEE Trans. AP, 1986, 34(2): 172~180.
- [11] J D Cashman. Comments on A Uniform Theory of Diffraction for an Edge in a perfectly Conducting Surface[J]. IEEE Trans. AP, 1977, 25: 447~451.
- [12] W D Burnside, M C Gilreath, R J Marhefka, et al.. A study of KC-135 aircraft antenna patterns [J]. IEEE Trans. AP, 1975, 23(5): 309~316.
- [13] C L Yu, W D Burnside, M C Gilreath. Volume-tric pattern analysis of airborne antennas [J]. IEEE Trans. AP, 1978, 26(11): 623~641.
- [14] W D Burnside, N Wang, E Pelton. Near-Field Pattern Analysis of Airborne Antennas [J]. IEEE Trans. AP, 1980, 28(5): 318~327.



黄伟芳 (1982—),男,福建人,西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室。研究方向为电磁散射及电磁兼容等。



刘其中 (1938—),男,重庆人,西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室教授、博士生导师。在国内外刊物上发表论文 100 多篇,主要研究方向为天线数值计算与 CAD, 宽带小型化天线和智能天线、电磁散射以及电磁兼容等。



周斌 (1978—),男,陕西人,西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为天线数值计算、短波超短波宽带小型化天线研究、电磁散射及电磁兼容等。

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>