

文章编号 1005-0388(2009)01-0060-05

并行 FDTD-UTD 方法分析机载相控阵天线 *

雷继兆[☆] 梁昌洪 丁伟 张玉

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室,陕西 西安 710071)

摘要 利用时域有限差分法(FDTD)-UTD(一致性几何绕射理论)混和算法分析机载相控阵天线的辐射方向图。将复矢量场作为 FDTD 方法和 UTD 方法的接口, 提出 FDTD-UTD 混和算法解决机载相控阵天线辐射问题。首先利用并行 FDTD 方法通过全波分析得到精确的相控阵的辐射复矢量场, 然后将此结果作为源代入 UTD 算法来预测相控阵受机体的影响。结果表明该方法可以有效地解决机载相控阵辐射分析问题。

关键词 机载相控阵天线;并行 FDTD 算法;UTD;方向图

中图分类号 TN821⁺⁸ 文献标志码 A

Analysis of airborne phased-array antennas using hybrid method of parallel FDTD and UTD

LEI Ji-zhao[☆] LIANG Chang-hong DING Wei ZHANG Yu

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology,
Xidian Univ., Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract A scheme is presented by applying FDTD-UTD algorithm to analyze phased array antennas mounted on airborne platform. The FDTD-UTD hybrid algorithm is presented by using the field vector component as a combination point of the FDTD and the UTD method. Firstly, the parallel FDTD method is utilized to find the field vector component of the phased array antennas, and then these vector components are employed as the source of the UTD method to obtain the disturbed radiation pattern. Numerical results show that the hybrid method not only extends the use of UTD algorithm, but also effectively solves challenging problems of this type.

Key words airborne phased array antenna; parallel FDTD algorithm; UTD; radiation pattern

引言

在飞机军舰等复杂运载平台中,电磁环境复杂,天线的电磁兼容性分析尤其重要。机载相控阵天线的特性分析一直以来就是研究重点。然而它也是个难点。首先,试验和理论研究已经清楚表明,相控阵单元间的耦合作用是不能忽视的^[1],而经典的阵列

理论将一个有限尺寸的相控阵的辐射方向图表示为阵因子和阵元辐射方向图的乘积，忽略了互耦作用，显然是不够准确的。因此，计算考虑互耦的相控阵方向图是进行复杂平台相控阵研究的前提。其次，由于相控阵一般工作频率很高，而飞机等平台尺寸较大。如果单纯用低频算法 FEM/MOM 等进行分析，即使在计算机技术飞速发展的今天，依然存在很

* 收稿日期:2008-05-09. 基金项目:武器装备预研基金项目(No: 9140A07040106DZ01)
万方数据
投稿联系人:雷继兆 E-mail: xdljz2000@163.com 60

大的困难。

针对以上问题,提出 FDTD-UTD 混和算法。首先,FDTD^[2,3]作为一种全波数值方法,对电波传播的各种物理过程隐含于计算过程中,适于精确分析相控阵天线的辐射特性。此外,采用基于 MPI 的并行 FDTD 技术^[4,5],又会进一步增大计算内存从而提高计算精度、缩短计算时间。国外研究者的并行 FDTD 工作大多基于工作站和大型计算机^[6,7],这些平台价格极其昂贵,以 PC 集群为计算平台无需任何额外的投资,也不会受到政策限制,为并行 FDTD 计算提供了强有力硬件基础。其次,UTD^[8~10]作为一种处理电大电磁问题的高频算法,很适于处理飞机等电大问题。该文用 FDTD 方法计算出天线的辐射复矢量场,将此结果作为点源代入 UTD 程序计算该矢量场在通过机身的遮挡、反射、绕射以后的远区效应,就可以解决机载相控阵辐射特性的分析问题。

另一方面,当相控阵天线距离机身比较远时(10 个波长以外),可以忽略机身对于天线口径的影响,这种用矢量场点源来代替相控阵的做法完全可以满足工程计算的需要。

1 UTD 方法计算天线辐射场

平板反射场的 UTD 公式为

$$\mathbf{E}^i(\mathbf{R}_0) = \bar{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{E}^i f(s) \quad (1)$$

式中, \mathbf{E}^i 为反射点处的入射场; $\bar{\mathbf{R}}$ 为并矢反射系数; $f(s)$ 表示扩散因子。具体求解见文献[8]。

平板边缘绕射场的求解公式为

$$\mathbf{E}^d(\mathbf{R}_0) = -\mathbf{E}^i(\mathbf{P}_d) \cdot \bar{\mathbf{D}} \cdot A(s) e^{-jks} \quad (2)$$

式中, \mathbf{E}^i 是绕射点 \mathbf{P}_d 处的入射场; $\bar{\mathbf{D}}$ 是并矢边缘绕射系数; $A(s)$ 是扩散因子。

凸曲面反射场的求解公式为

$$\mathbf{E}^i(\mathbf{R}_0) = \mathbf{E}^i(S_r) \cdot \bar{\mathbf{R}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1^r \rho_2^r}{(\rho_1^r + s^r)(\rho_2^r + s^r)}} e^{jks^r} \quad (3)$$

同样, $\mathbf{E}^i(S_r)$ 为反射点 S_r 处的入射场, $\bar{\mathbf{R}}$ 为并矢反射系数。

凸曲面绕射场的求解公式为

$$\mathbf{E}^d(\mathbf{R}_0) = \mathbf{E}^i(S_{dr}) \cdot \bar{\mathbf{T}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_2^d}{s^d(\rho_2^d + s^d)}} e^{-jks^d} \quad (4)$$

式中, S_{dr} 和 S_{de} 分别为第一、第二绕射点。 $\mathbf{E}^i(S_{dr})$ 为 S_{dr} 处的入射场; $\bar{\mathbf{T}}$ 为并矢绕射系数; s^d 表示 S_{dr} 到场点的距离。公式(1)~(4)中,上标 i 表示入射, r 表示反射, d 表示绕射。

由于文献[8]中已经给出了公式(1)~(4)中各个符号的详细解释以及求解步骤,在此就不再赘述。然而,从上面四个公式可以非常明显地看出,要用 UTD 方法计算天线的辐射场,反射点(或绕射点)处的入射场 \mathbf{E}^i 是必需的。下面介绍用 FDTD 方法得到反射点(或绕射点)处的入射场 \mathbf{E}^i 。

2 FDTD-UTD 混和算法

UTD 算法中,在解决了模型建模、射线寻迹、以及典型部件的反射系数、绕射系数的计算以后^[8],如何得到入射场 \mathbf{E}^i 就成为关键,尤其对于大型的、复杂的相控阵天线。FDTD-UTD 混和算法就是用 FDTD 方法求得天线的复辐射矢量场,作为入射场源代入 UTD 算法,进而求得天线受电大平台影响的辐射特性。计算模型如图 1 所示。

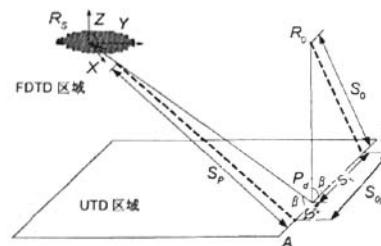


图 1 FDTD-UTD 模型示意图

在 FDTD 区域,求解天线复辐射矢量场。通过惠更斯原理,在计算区域内作一个封闭面,然后由这个面的等效电磁流经过外推来得到辐射场,即近远场外推技术^[2]。辐射场分量求解公式为

$$E_r = 0 \quad (5)$$

$$E_\theta \approx -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r}(L_\theta + \eta_\theta N_\theta) \quad (6)$$

$$E_\phi \approx \frac{jke^{-jkr}}{4\pi r}(L_\phi - \eta_\phi N_\phi) \quad (7)$$

其中, $\eta_\theta = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$, L_θ , L_ϕ , N_θ , N_ϕ 都是位函数,具体推导见文献[2]。值得指出,此处得到的场是球坐标系下的三维矢量场,不能直接代入 UTD 公式计算。在代入 UTD 算法前,需要首先将球坐标下的三维矢量场转化到直角坐标系,如式(8)所示。然后通过坐标平移得到全局直角坐标系下的辐射矢量场。

$$\begin{bmatrix} E_x^i \\ E_y^i \\ E_z^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta\cos\phi & \cos\theta\cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\theta\sin\phi & \cos\theta\sin\phi & \cos\phi \\ \cos\theta & -\sin\theta & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_r \\ E_\theta \\ E_\phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

在 UTD 区域,建立计算目标模型,然后根据天线所在位置进行寻迹。在求解反射场和绕射场时,从 FDTD 区域得到的全局坐标系下矢量场数据中提取反射点和绕射点的入射场 E^i ,代入(1)~(4)等各种 UTD 模型的反射绕射公式中进行计算,就可以得到天线受电大平台影响后的辐射特性。流程图如图 2 所示。

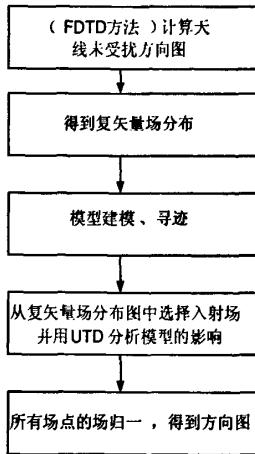


图 2 FDTD-UTD 程序流程图

此外,由于相控阵天线结构精细,为了对其进行精确分析,该文使用基于 MPI 的并行 FDTD 方法进行精细建模分析。

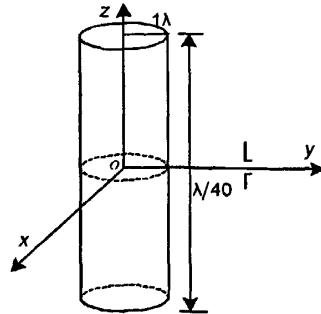
并行计算所使用的 PC 集群配置: 8 台计算机, CPU 2.8GHz, RAM 1.0GB, 1000Mb/s 网卡。

3 算例分析

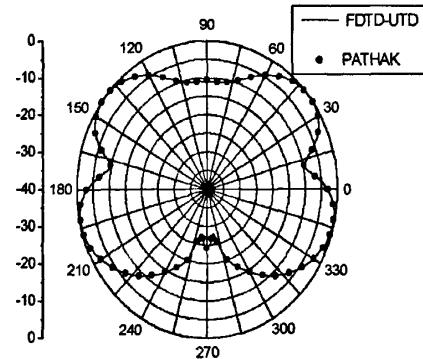
首先为了验证 FDTD-UTD 方法的正确性和有效性,考察了一个圆柱体外对称阵子天线的模型,对称阵子天线与圆柱轴平行放置,如图 3(a)所示,坐标原点在圆柱中心,圆柱高: 40λ ,半径: 1.0λ ,半波对称阵子: 中心位置坐标 $(0.0, 2.0, 0.0)(\lambda)$,场点距坐标源点距离为 1000λ ,先用 FDTD 方法计算了对称阵子的辐射矢量场,再导入 UTD 程序计算受圆柱体的影响情况。图 3(b)为场点在 xoy 面总场方向图。结果与文献[11]所给出的方向图吻合很好。

然后,为了验证并行 FDTD 方法分析相控阵辐射方向图的准确性和有效性。考察了 1 个 41×41 的相控阵天线,相控阵单元为对称阵子,长 0.2λ ,半径为 0.01λ , x 方向和 y 方向的间距分别为 0.3λ 和 0.6λ ,模型示意图如图 4 所示。FDTD 采用的网格剖分 $dx=dy=dz=\lambda/40$, 使用 5 层 UPML, 网格总

量取为 $520 \times 1000 \times 40$ 。为了考虑阵子半径,这里采用共形 FDTD 技术^[12]进行建模。



(a) 圆柱外对称阵子天线示意图



(b) xoy 面总场方向图

图 3

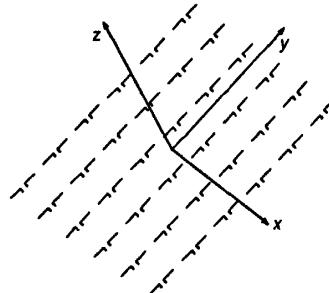


图 4 对称阵子相控阵

计算了最大辐射方向在 $\theta=60^\circ, \varphi=45^\circ$ 的 E_θ 和 E_φ 方向图(图 5),进行了 2000 次迭代运算,耗时 2.5 小时。结果与文献[13]进行了对比,吻合良好。

最后,将这个相控阵加载于某型飞机上,使相控阵工作频率为 2 GHz,距离飞机机身 3.5 m。分别计算了受扰前后的方向图如图 6 和图 7 所示。

从图 6(a)和图 7(a)可以看出,相控阵的方向图在未考虑飞机影响时是上下对称的。而且可以看

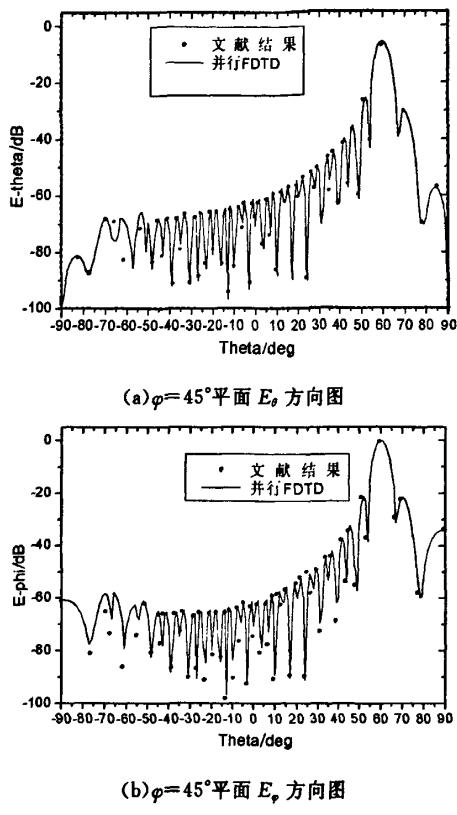


图 5

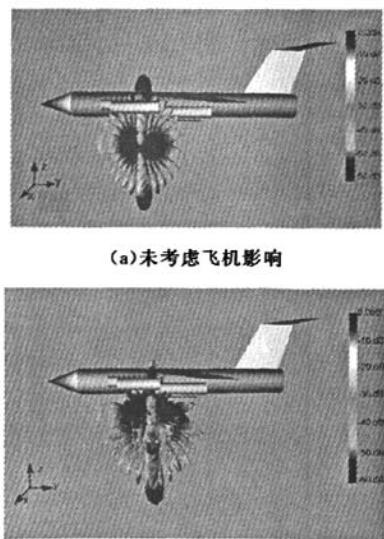
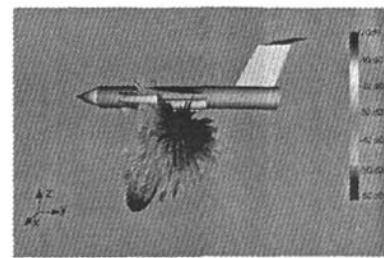


图 6 无相扫方向图



(a) 未考虑飞机影响



(b) 考虑飞机影响

图 7 相扫 15° 方向图

出,相位扫描 15° 比未相扫的相控阵方向图的副瓣要大。图 6(b)和图 7(b)是考虑飞机影响后的方向图,由于机体的遮挡、反射和绕射,可以看出比未考虑飞机影响的方向图发生了很大的改变。由于相控阵天线放置在飞机下侧,由于机身和机翼的遮挡,相控阵向上部空间的辐射场值明显变小,而在飞机下侧,由于机体反射的影响,相控阵辐射场值明显升高了。

4 结 论

针对机载平台相控阵辐射特性分析这一工程难题,提出 FDTD-UTD 混合算法。利用基于 MPI 的并行 FDTD 方法可以对相控阵进行准确分析,但是无法对天线和飞机平台整体分析。而 UTD 是处理电大问题的经典高频算法。因此,通过复矢量场将两种算法结合,可以计算机载相控阵的方向图。数值结果证明了算法的正确性。最后计算了一个实际机载相控阵的方向图,证明了该方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] (美)阿米特,等. 相控阵天线理论与分析[M]. 陆雷,译. 北京:国防工业出版社,1978.
- [2] 葛德彪,同玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 1 版. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [3] 高本庆. 时域有限差分法[M]. 北京:国防工业出版社,

1995.

- [4] 同玉波,葛宁,郑美艳,等. 网络并行 FDTD 方法分析电大目标电磁散射[J]. 电子学报,2003,31(6):821-824.
YAN Yubo, GE Ning, ZHENG Meiyuan, et al. Analysis of large-scale EM scattering problems using the parallel FDTD on a PC cluster system[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(6): 821-824.
- [5] 薛正辉,杨仕明,高本庆,等. FDTD 算法的网络并行运算实现[J]. 电子学报,2003,31(12):1839-1843.
XUE Zhenghui, YANG Shiming, GAO Benqing, et al. A Parallel Implementation Strategy for the FDTD Algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1839-1843.
- [6] UIF Andersson. Time Domain Methods for Maxwell Equation. Doctoral Dissertation[D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2001.
- [7] GUIFFAUT C, MAHDJOUBI K. A parallel FDTD algorithm using the MPI library[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, 43 (2) :94-103.
- [8] 汪茂光. 几何绕射理论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1994.
- [9] 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.
XIANG Tieming, CAO Xiangyu, MA Fengguo, et al. Analysis of the airborne phased array pattern[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(2): 204-207.
- [10] 王萌,梁昌洪,张玉. UTD 结合 MM 计算复杂环境中天线的方向图[J]. 电波科学学报,2007,22(3): 508-512.
WANG Meng, LIANG Changhong, ZHANG Yu. Combining UTD with MM for pattern prediction of the antenna in complex environment[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(3): 508-512.

- [11] PATHAK P H, BURNSIDE W D, MARHEFKA R. A uniform GTD analysis of the diffraction of electromagnetic waves by a smooth convex surface [J]. IEEE Trans, 1980, AP228 (5): 631-642.

- [12] 张玉. 电磁场并行计算[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2006.

- [13] CHOU Hsi-Tseng, HO Hsien-Kwei. Implementation of a Forward-Backward Procedure for the Fast Analysis of Electromagnetic Radiation/Scattering From Two Dimensional Large Phased Arrays[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat, 2004, 52(2): 388-396.



雷继兆 (1983—),男,陕西人。西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生。目前主要从事电磁数值计算,电磁兼容等方面的研究。



梁昌洪 (1943—),男,上海人。西安电子科技大学电子工程学院教授,博士生导师,曾任西安电子科技大学校长、中国电子学会会士、IEEE Senior member。研究方向包括计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等方面。

- 丁伟 (1980—),男,安徽人。西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生。主要从事电磁场数值计算等方面的研究工作。

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>