

文章编号 1005-0388(2007)03-0508-05

# UTD 结合 MM 计算复杂环境中天线的方向图

王萌 梁昌洪 张玉

(西安电子科技大学天线与微波技术国防重点实验室, wangm@mail.xidian.edu.cn, 陕西 西安 710071)

**摘要** 一致性几何绕射理论(UTD)算法中, 天线被等效为一个源点; UTD方法需要根据天线的指向, 得到反射点(绕射点)处的入射场, 从而得到场点处的反射场(绕射场)。然而, 对于某些形状复杂的大型天线(比如八木天线), 将天线中任何一点作为天线的源点都不合适, 将任何一个方向作为天线的指向也都不合适。因此, 可用矩量法(MM)计算天线的电流, 每一小段电流等效为一个电流元, 中心点等效为UTD算法中的源点。这样, 该电流元在反射点(绕射点)的辐射场就很容易得到。将此辐射场作为UTD的入射场, 就可以计算每个电流元在场点处的场。所有场点的场叠加、归一, 即可得到天线的方向图。

**关键词** UTD, MM, 电流元, 方向图

中图分类号 TN011 文献标识码 A

## Combining UTD with MM for pattern prediction of the antenna in complex environment

WANG Meng LIANG Chang-hong ZHANG Yu

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology Xidian Univ,  
wangm@mail.xidian.edu.cn, Xi'an Shaanxi 710071, China)

**Abstract** For the uniform theory of diffraction (UTD), the antenna is equivalent to a source point, and the incident field at the reflected point (diffracted point) is computed according to the direction of the antenna. For some cases, however, this kind of method is not available, because of the point and the direction which is equivalent to the antenna can not be presented while the antenna is very large and complex, such as yagi antenna. To solve the problem, the method combining UTD with moment method (MoM) is presented. MoM is used to compute the electric-current of the antenna. The center point of each electric-current element is equivalent to the source point, and the direction of the current is taken as the source direction. Thus the electric field at the field point can be computed using UTD method.

**Key words** UTD, MM, electric-current element, pattern

## 1 引言

电大尺寸平台上天线的方向图预测一直是电磁兼容研究的一个重要方向。由于尺寸巨大, 单纯依

赖 MM 或者 FDTD 这样的算法已经无法解决问题, 因此必须借助 UTD 等高阶算法。为了使计算速度与精度两个指标都能满足要求, 高低频方法的混和成了近几年研究的热点<sup>[1]</sup>。MM 与 UTD 方法的混

和国外早在 70 年代就有研究<sup>[2]</sup>, 国内也有很多的研究<sup>[3,4]</sup>。其混合方法大多是基于 MM, 采用 UTD 或者其他高频方法修正 MM 中阻抗因子的办法实现混和。这样的混合方法比较复杂, 对于方向图计算, 作者提出一种相对简便的方法, 使得 MM 与 UTD 结合可以计算复杂环境中天线的方向图。这样的混合方法不仅实现比较容易, 而且当天线分段数很多的时候, 还会有一定计算量的优势。

一致性几何绕射理论(UTD)是一种基于射线法的高频近似算法。由于对计算资源要求比较低, 因此在电大目标的计算中广为应用。在 UTD 算法中, 需要用到两个输入参数: 天线的位置与指向。这就是说 UTD 算法中天线等效为一个点源, 并且指向天线的方向。在很多情况下, 这是可以的, 然而如果天线比较大, 那么, 取任何一点作为等效点都不是很合适, 另外如果天线不是线天线, 或者形式比较复杂(比如八木天线), 那么天线的指向也无法确定。为了解决这个问题, 作者采用矩量法计算出天线的电流(或磁流), 将每一段的中心作为 UTD 的源点; 每一段可以看作是一个电流元, 从而计算出反射点或绕射点处的场; 将此场作为 UTD 算法的入射场带入 UTD 算法, 从而求得场点处的辐射场。最后将所有电流元的辐射场叠加所得的总场, 就是天线在空间某一点处的辐射场。这样就实现了 MM 与 UTD 的混和, 可以计算在复杂环境中复杂形式天线的方向图。

## 2 UTD 方法计算天线辐射场

平板反射场的 UTD 公式为

$$\mathbf{E}^r(R_0) = \mathbf{R} \cdot \mathbf{E}^i f(s) \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{E}^i$  为反射点处的入射场,  $\mathbf{R}$  为并矢反射系数,  $f(s)$  表示扩散因子。具体求解见文献[5]。

平板边缘绕射场的求解公式为

$$\mathbf{E}^d(R_0) = -\mathbf{E}^i(P_d) \cdot \mathbf{D} A(s) e^{-jks} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{E}^i$  是绕射点  $P_d$  处的入射场,  $\mathbf{D}$  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<sup>[6]</sup>

$$\mathbf{E}^r(R_0) = \mathbf{E}^i(S_r) \cdot \mathbf{R} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1^r \rho_2^r}{(\rho_1^r + s^r)(\rho_2^r + s^r)}} e^{-jks} \quad (3)$$

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

凸曲面绕射场的求解公式为

万方数据

$$\mathbf{E}^d(R_0) = \mathbf{E}^i(S_{d1}) \cdot \mathbf{T} \sqrt{\frac{\rho_2^d}{s^d(\rho_2^d + s^d)}} e^{-jks} \quad (4)$$

其中,  $S_{d1}$  和  $S_{d2}$  分别为第一、第二绕射点,  $\mathbf{E}^i(S_{d1})$  为  $S_{d1}$  处的入射场,  $\mathbf{T}$  为并矢绕射系数,  $s^d$  表示  $S_{d2}$  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[6]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, 因此, 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。下面作者将以线天线为例, 介绍用 MM 方法求得反射点(或绕射点)处的入射场  $\mathbf{E}^i$ 。

## 3 UTD 结合 MM 方法

为了求解第二节中提出的人射场  $\mathbf{E}^i$ , 采用矩量法, 并结合电流元的辐射场公式来计算。矩量法的基本思想是将一个泛函方程化为矩阵方程, 然后用人们熟知的方法求解矩阵方程。作为一种基本的电磁场数值计算方法, MM 计算天线的电流分布是相当精确的。其实, 对于矩量法而言, 天线与散射体的基本区别只在于源点的位置不同而已, 如果源点在物体上, 则为天线; 如果源点是远离物体的, 则可看成是散射体。

具体以线天线为例, 导线可看成是  $N$  个小段连在一起的, 如图 1 所示, 每个小段的终点确定了在空间的一对端点, 这  $N$  对端点可以看成一个  $N$  端口网络, 而短路所有网络的端口就得到了线状物体。线天线的矩量法解的阻抗矩阵可以表示为<sup>[7]</sup>

$$Z_{mn} = j\omega\mu\Delta l_n\Delta l_m\psi(n,m) + \frac{1}{j\omega\varepsilon} \cdot [ \psi^{++}(n,m) - \psi^{--}(n,m) - \psi^{+-}(n,m) + \psi^{-+}(n,m) ] \quad (5)$$

其中:

$$\psi(m,n) \approx \begin{cases} \frac{e^{-jkR_{mn}}}{4\pi R_{mn}} m = n \\ \frac{1}{2\pi\Delta l_n} \lg\left(\frac{\Delta l_n}{a}\right) - \frac{jk}{4\pi} \quad m \neq n \end{cases}$$

式中,  $R_{mn}$  是从  $n$  到  $m$  的距离,  $\Delta l$  是每一段的长度。

阻抗元素由式(5)得到, 而电压矩阵则由外加场来求得。在散射体  $N$  个点上的电流则通过求解方程(6)求得。

$$[\mathbf{Z}][\mathbf{I}] = [\mathbf{U}] \quad (6)$$

通过解方程(6), 可以确定阵子的电流分布。这

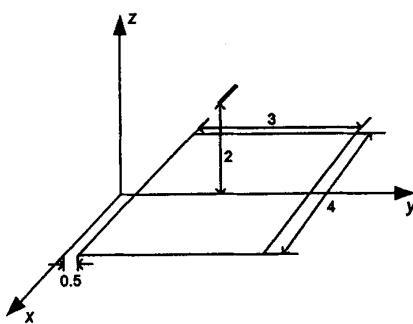


图 1 UTD 结合 MM 算法

样,每一段都可看作是一个电流元。

电流元的辐射场为<sup>[8]</sup>

$$E_r = j\eta \frac{kI\Delta l}{2\pi r} \left[ \frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right] e^{-jkr} \cos\theta \quad (7)$$

$$E_\theta = j\eta \frac{kI\Delta l}{4\pi r} \left[ 1 + \frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right] e^{-jkr} \sin\theta \quad (8)$$

$$E_\phi = 0 \quad (9)$$

公式(7)~(9)中电流  $I$  已经通过矩量法确定,距离  $r$  与角度  $\theta$  都可以通过射线寻迹确定。

图 1 中天线被分为  $N$  段,每一小段的电流已经通过(1)式确定。此时通过公式(7)~(9)得到反射点处的辐射场。值得指出,此处得到的场是一个以电流元中心为原点的球坐标系下的三维矢量场,不能直接代入公式(1)~(4)中直接计算。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全局直角坐标系<sup>[9]</sup>。

通过变换,球坐标系下的矢量场转化为直角坐标下的矢量场,再通过坐标平移,即可得到全局坐标系下坐标点  $P_r$  处的场。这个场就是 UTD 算法的输入场,也就是(1)~(4)中的入射场  $E^i$ 。这样就实现了 UTD 与 MM 的结合。

值得注意的是,此时天线的电流已经通过 MM 方法求得,为何不能直接用矩量法求得反射点(或绕射点)处的场呢?这是因为对于一个大型天线,将天线分为小段进行寻迹可以得到多个反射点(或绕射点),因此,此时需要求解的是对应于此小段电流的反射点(或绕射点)处的入射场  $E^i$ 。

#### 4 计算实例

为了验证方法的有效性,作者将 MM 结合 UTD 方法计算所得的结果与 MM 方法的结果作了万方数据

对比。计算模型如图 1 所示。由于天线倾斜放置可以认为是一种随意的姿态,因此,将  $\lambda/4$  单极子天线倾斜放置于  $yoz$  平面并与  $y$  轴成  $45^\circ$  夹角。天线工作频率 300MHz,其三个主平面方向图与矩量法计算结果的比较见图 2~4。

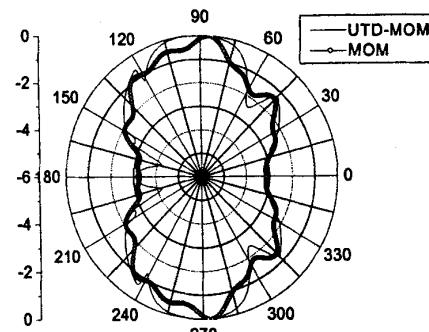


图 2 xoy 面方向图

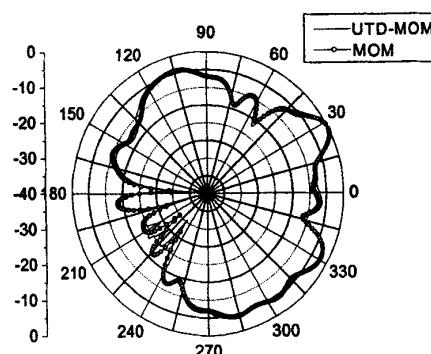


图 3 xoz 面方向图

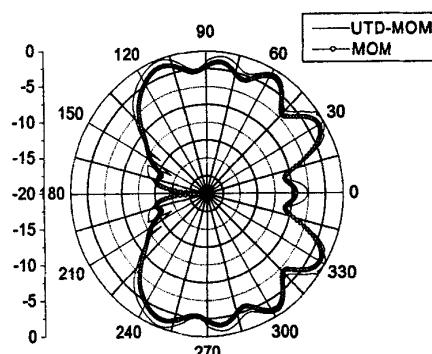


图 4 yoz 面方向图

上一个算例中只有一个板,而一般的模型都是由多个板构成的,因此作者再给出两个平板的算例,以证明本方法的有效性。

同算例 1 一样,天线位于  $yoz$  平面,与  $xoy$  面夹

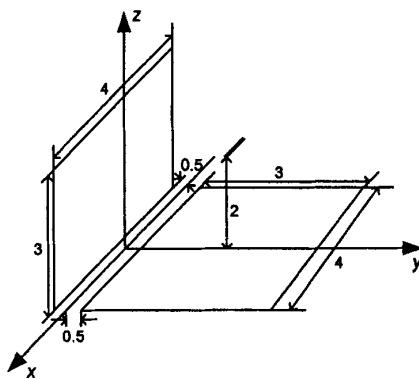


图 5 两个平板的算例

角 45°。天线工作频率 300MHz。三个主截面的方向图如图 6~8 所示。

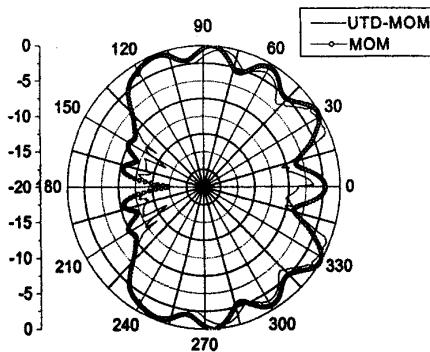


图 6 xoy 面方向图

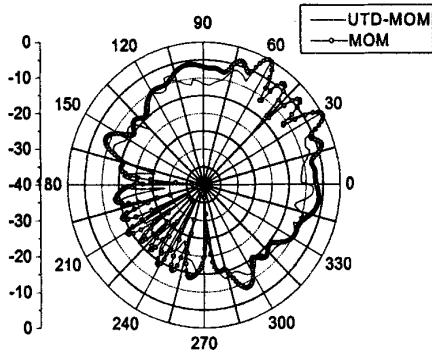


图 7 xoz 面方向图

图 2~4 所示为图 1 中天线的三个面的方向图。在使用纯矩量法计算的时候, 板是采用 RWG 进行剖分的, 纯矩量法的计算结果与 UTD 结合 MM 的方法吻合良好。图 6~8 所示为两个板之间天线倾斜放置时三个平面的方向图。此时, 需要考虑板与板之间的二阶效应, 因此可以与纯 MM 方法的计算结果吻合良好。对于二阶场来说, 难点在于寻迹, 其万方数据

求场思想是与一阶场一样的, 就是多个一阶场的拼装, 因此这里就不做特别介绍了。

某舰载天线模型如图 9 所示。沿舰艇艇身中线的方向为 x 轴; 沿艇身横向为 y 轴, z 轴垂直于舰艇指向天空方向。天线为单极子天线, 所处的位置在舰尾偏 y 轴正方向, 且垂直于舰艇放置。 $xoy$  面为水平面,  $xoz$  面为俯仰面,  $yoz$  面为滚动面, 其水平面、俯仰面、滚动面的方向图如图 10~12 所示。需要注意的是, 这里计算的仅是舰船对天线方向图畸变的影响, 而未考虑舰船所处的环境的影响。

图 10 所示为  $xoy$  面方向图。由于天线所处的位置并不在军舰的中轴线, 因此  $xoy$  面方向图并不对称。在 0° 角附近由于军舰塔楼以及甲板的遮挡效果明显, 因此形成了一片有 30° 角的阴影区。在  $xoz$  面的计算方向图中, 0° 角为天线指向, 90° 方向为船首方向, 270° 为船尾方向。天线位于船尾, 由于中间塔楼的遮挡, 船首方向的场明显比船尾方向的场要小, 这在图 11 中也有明显的反应。图 12 为  $yoz$  面方向图, 0° 角是天线的指向。从图中可看出, 方

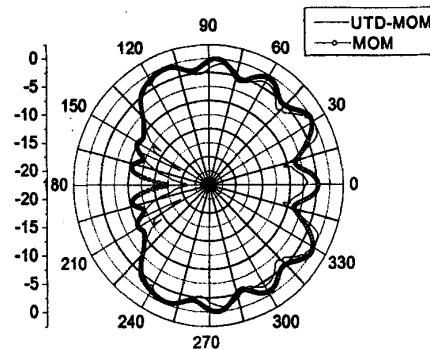


图 8 yoz 面方向图



图 9 舰船计算模型

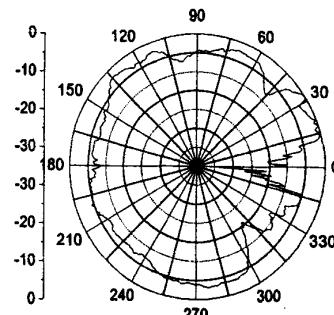


图 10 xoy 面方向图

向图在  $y$  方向上变化并不明显。

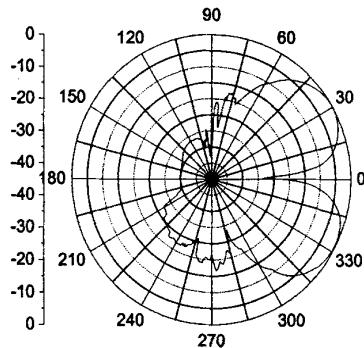


图 11  $xoz$  面方向图

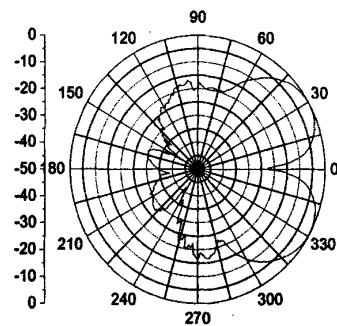


图 12  $yoz$  面方向图

## 5 结论

从上面的例子可以看出, UTD 结合 MM 方法的确是分析复杂环境天线方向图的一种比较有效的方法, 具有现实的工程意义。

## 参考文献

- [1] 王萌, 张玉, 梁昌洪. 有限元法与 UTD 结合计算机载天线方向图 [J]. 电波科学学报, 2005, 20(3): 395-399.  
Wang M, Zhang Y, Liang C H. Analysis of airborne antenna using hybrid method of FEM and UTD [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(3): 395-399.
- [2] GARY A THIELE, THOMAS H NEWHOUSE. A hybrid technique for combining moment methods with the geometrical theory of diffraction [J]. IEEE Trans, 1975, AP-23(1): 62-69.

- [3] 翟会清, 王莉娜, 梁昌洪. 利用 UTD 修正 MOM-PO 混合算法研究 [J]. 电波科学学报, 2003, 18(5): 529-533.  
Zhai H Q, Wang L N, Liang C H. A hybrid method of MoM and PO Modified by UTD [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(5): 529-533.
- [4] 翟会清, 李龙, 梁昌洪. 复杂散射环境中 MOM 与 UTD 混合方法的 PO 扩展 [J]. 电子学报, 2004, 32(6): 915-917.
- [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] PRABHAKAR H PATHAK, WALTER D BURNSIDE and RONALD J MARHEFKA. A Uniform GTD Analysis of the Diffraction of Electromagnetic Waves by a Smooth Convex Surface [J]. IEEE Trans, 1980, on AP-28(5): 631-642.
- [7] 哈林登. 计算电磁场的矩量法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 78-79.
- [8] 魏文元, 宫德明, 陈必森. 天线原理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社.
- [9] 牛中奇, 朱满座, 卢智远, 路宏敏. 电磁场理论基础 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.



王萌 (1980—), 男, 山东人, 现为西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士研究生。主要从事计算电磁学以及电磁兼容分析工作。



梁昌洪 (1943—), 男, 上海人, 教授, 博士导师, 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。



张玉 (1978—), 男, 安徽人, 现为西安电子科技大学电子工程学院讲师。主要从事电磁场数值计算, 并行计算, 电磁兼容分析等方面工作。

## 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](http://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](http://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](http://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>