

文章编号: 1672-2892(2010)06-0669-04

## 复杂环境中短波天线的 MoM/FDTD 混合法分析

周波, 郝晓军, 郑星

(63892 部队, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 利用电磁场数值计算方法中的矩量法/时域有限差分(MoM/FDTD)混合方法, 分析了复杂环境中短波天线的电磁辐射性能, 建立了短波双极天线的自由空间模型。采用矩量法和时域有限差分法相结合, 对其模型进行仿真计算, 并将计算结果和已有的文献进行比较, 验证了混合方法计算结果的可行性、准确性。总结了该模型对短波天线远区场影响的有益经验, 为改善短波天线性能提供了设计参考。

**关键词:** 矩量法; 时域有限差分法; 混合方法; 短波天线

**中图分类号:** TN822<sup>+</sup>.3

**文献标识码:** A

## Analysis of MoM/FDTD hybrid technique on shortwave antenna in complex environment

ZHOU Bo, HAO XIAO-Jun, ZHENG Xing

(Unit 63892, Luoyang Henan 471003, China)

**Abstract:** This paper adopts the Method of Moment/ Finite Difference Time Domain(MoM/FDTD) hybrid technique in computational electromagnetism for analyzing the problems of shortwave antenna in complex environment. The models of shortwave dipole antenna in free space and on the ground are built, and the numerical simulation of the models is programmed with the hybrid technique. The comparison between the computing result by the hybrid technique and the result in the reference demonstrates the validation of the technique. Some good experiences are presented for improving shortwave antenna.

**Key words:** Method of Moment; Finite Difference Time Domain; hybrid technique; shortwave antenna

短波天线是短波通信系统中的关键设备之一, 但短波天线<sup>[1]</sup>与地面及任意散射体之间存在着耦合等问题, 从而给天线设计和使用带来一定的难度。随着计算机技术的发展, 数值方法在天线问题的处理中得到广泛应用。1996年, 由 Keith A L 等最早提出 MoM/FDTD<sup>[2]</sup>, 他采用两者相结合的方法, 解决 UHF/VHF 电磁波在复杂地形中的传播问题。Huang Zhu 等人研究了各向异性地面上复杂天线问题<sup>[3]</sup>, 建立了探地雷达受地面影响分析的模型, 得到了比较满意的结果。

目前, 国内在 MoM/FDTD 混合法方面的研究开展得不多, 在现有的中文文献中, 分析天线的数值计算还很少。总体来看, 国内外对这种频域 MoM 和 FDTD 进行混合的方法取得一些进展, 但这种混合法在短波天线中的应用还较少。本文结合 MoM 和 FDTD 各自的优点, 建立混合法模型, 对复杂环境中短波天线的电磁辐射性能进行分析。

### 1 混合法分析

#### 1.1 混合法原理

在混合法中, FDTD 和 MoM 法是 2 种截然不同的数值计算方法: FDTD 是一种直接离散时域偏微分方程进行迭代的方法<sup>[4]</sup>; MoM 是一种由微分或积分方程求解矩量方程的方法<sup>[5]</sup>。对具体问题, 如果使用单一的方法来求解, 虽然能够解决, 但效果往往不是太好, 要么精确度不高, 要么效率较低。如果能根据问题的特征, 利用这 2 种方法各自的优势来互补, 能够得到兼顾效率和精确度的求解方法。

MoM/FDTD 混合法可以解决很多实际电磁场问题，下面结合地面天线说明这种混合方法的求解过程。

在天线周围设置闭合面  $S$ ，以  $S$  面为界把整个天线系统的几何结构分为 2 个子结构，如图 1 所示。其中， $S$  面以内为天线，即内问题； $S$  面以外为地面和周围建筑物，也就是外问题。

内问题(天线结构)包含原有天线、 $S$  面内原来的场和  $S$  面外的零场。根据等效原理，除了天线上的激励源，还需要在  $S$  面设置表面电流  $-J_s$  和表面磁流  $-M_s$ ：

$$J_s = \hat{n} \times H \quad (1)$$

$$M_s = E \times \hat{n} \quad (2)$$

同理，外问题(地面结构)含有原来地面的几何结构、 $S$  面外原来的场和  $S$  面内的零场。除此之外，也需要在  $S$  面上设置表面电流  $J_s$  和表面磁流  $M_s$ ，其中  $E, H$  是内问题中沿  $S$  上的电场和磁场。假设天线和地面没有接触，以便于惠更斯面与空气及地面的分界面处不产生边界。

1.2 矩量法

将待研究天线(如双极天线)的表面划分为图 2 所示的三角。

文献[6]将拥有公共边的每对三角构成相应的 RWG(Rao-Wilton- Glisson)面元，如图 2(a)所示。其中一个三角标以正号，另一个标以负号。面元被赋以矢量基函数为：

$$f_j(\mathbf{r}) = \begin{cases} (l_j / 2A^+) \rho_j^+(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \text{ 在 } T_j^+ \text{ 内} \\ (l_j / 2A^-) \rho_j^-(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \text{ 在 } T_j^- \text{ 内} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $l_j$  是公共边的长度； $A^\pm$  是三角  $T_j^\pm$  的面积；矢量  $\rho_j^+$  从正三角形的自由顶点指向观察点  $\mathbf{r}$ ；矢量  $\rho_j^-$  从观察点  $\mathbf{r}$  指向负三角形的自由顶点。将基函数式(3)代入式(4)系统方程：

$$[Z][I] = [V]$$

式中： $[Z]$ 是阻抗矩阵； $[I]$ 是电流激励向量； $[V]$ 是电压向量。

根据等效原理，内问题只负责惠更斯面内的矩量法计算，由式(3)求解，得到天线上的电流分布，就可以很容易计算出惠更斯面内的  $E$  和  $H$ ，利用式(1)和式(2)就可得到混合法所用到的等效电流和磁流。

1.3 时域有限差分法

地面或周围建筑物位于惠更斯面外，可以很方便地用 FDTD 进行建模仿真<sup>[7]</sup>，如图 3 所示，为 FDTD 计算区域。根据等效原理，FDTD 计算时被惠更斯面包围的天线不存在。而 FDTD 计算中的源由 MoM 计算天线求得的在惠更斯面上的等效电流和等效磁流提供。选择合适的介电常数、电导率等媒质参数，对地面底部区域用吸收边界条件进行设置。

由 FDTD 计算出惠更斯面外的地面或周围建筑物影响下的稳态场分布，进而求出惠更斯面上场，就可实现混合法中外问题的迭代。

1.4 等效电磁流计算

天线和地面结构间的场信息是通过表面电流和表面磁流进行交换的。在每次迭代结束时，对惠更斯面上切向电场和切向磁场进行采样，然后计算出最终的电流结果。

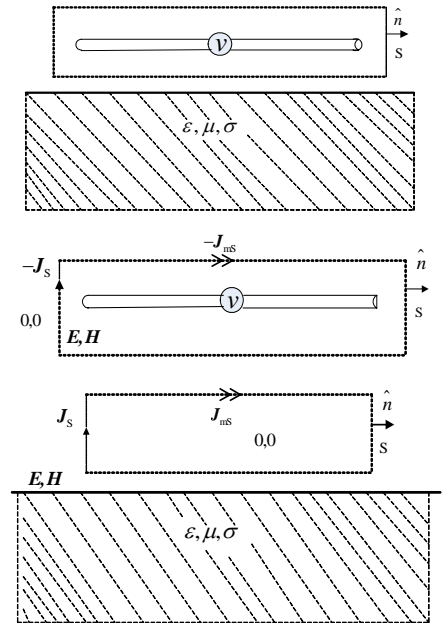


Fig.1 Inner and external problems  
图 1 内问题和外问题

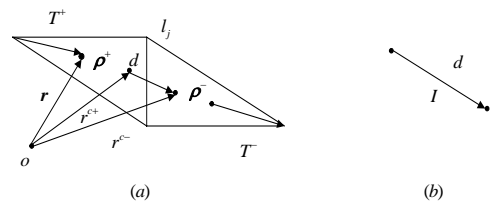


Fig.2 Triangular element surface of RWG  
图 2 RWG 三角面元

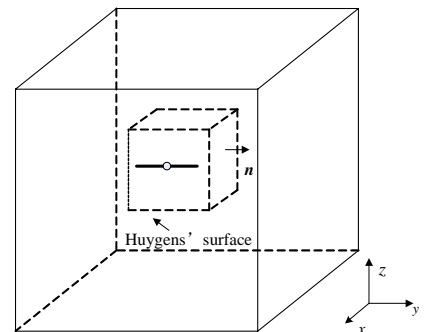


Fig.3 FDTD computation zone  
图 3 FDTD 计算区域

以上研究了 2 种方法的混合过程, 图 4 以图 1 为模型得出混合方法的求解步骤。按照这几个步骤, 就可以更新 2 个子结构中的等效电流、等效磁流和场。由于天线和地面之间的相互影响, 等效电流在一次次的迭代中产生了变化, 且随着迭代的进行, 精确度也随之提高了。通过比较每次迭代后得到的场和表面电流即可验证其收敛性, 也可通过检查内问题和外问题中每一个结构中零场是否为零来检验其收敛性。

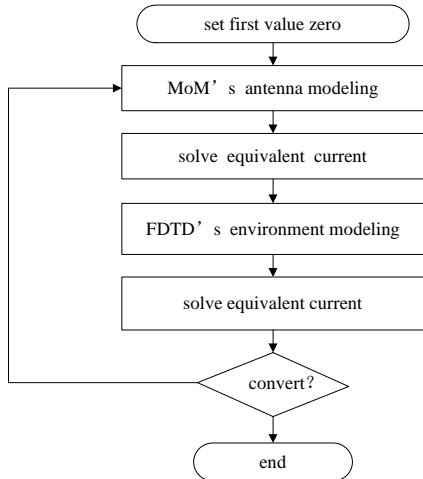


Fig.4 Process of hybrid technique  
图 4 混合法步骤框图

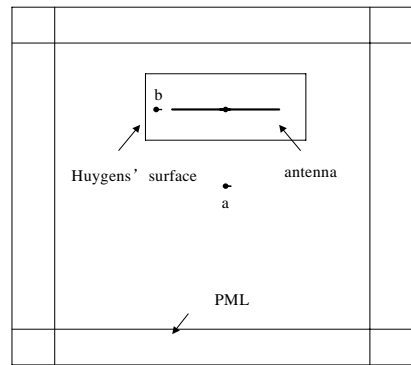


Fig.5 Model of free space  
图 5 自由空间模型

## 2 模型实例及验证

为了验证此方法的可行性, 首先考虑自由空间中的水平对称振子天线, 即双极天线。计算模型如图 5 所示。

将对称振子天线放置在 FDTD 计算区域, 这种最基本的天线用 FDTD 方法就可以模拟惠更斯面内外的结构。用混合法计算时, 由于惠更斯面外为自由空间, 所以只需要进行一次循环迭代, 就可以得到精确的结果。通过比较迭代结束时天线表面的电流分布或者场分布的结果是否收敛, 或者检查 FDTD 计算的惠更斯面内零场是否为零, 都可以初步检验所得结果的精确性。

图 6 显示了距离偶极子中心 0.8 m 时, 单独用 FDTD<sup>[8]</sup>计算和用 FDTD/MoM 混合计算得到的 a 点的  $E_x$  场。结果表明这 2 种方法惊人的一致。

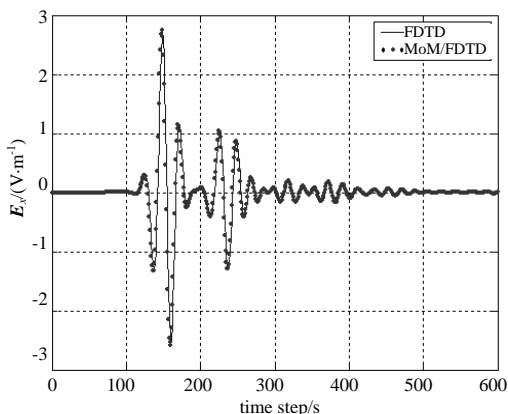


Fig.6  $E_x$  of point a  
图 6 a 点电场

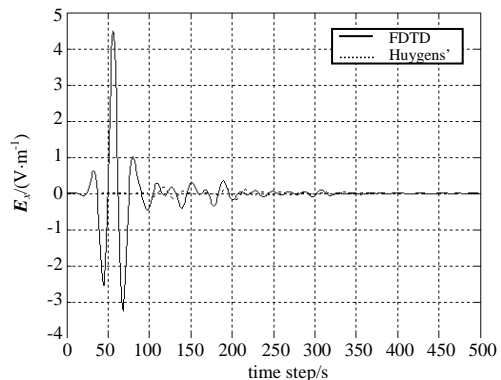


Fig.7  $E_x$  of point b  
图 7 b 点电场

图 7 计算了图 5 中 FDTD 区域 b 点的电场  $E_x$ , 实线是用 FDTD 单独计算出的实际场。虚线只是惠更斯电流的辐射场。因为此点位于惠更斯面内, 所以应该为 0, 而结果也的确接近于 0。

图 8、图 9 示出了用混合法计算出的归一化方向图, 与矩量法计算的结果基本吻合。

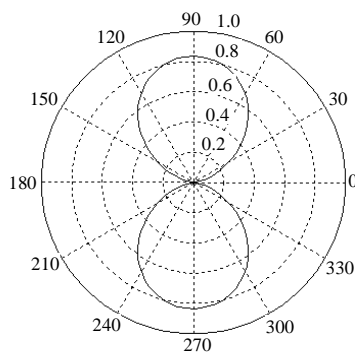


Fig.8 E-plane  
图8 E面方向图

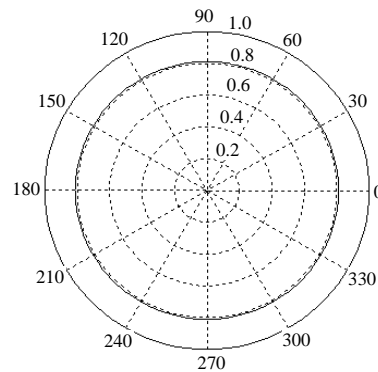


Fig.9 H-plane  
图9 H面方向图

从以上分析可以看出,在自由空间中,混合法计算天线所得的结果与FDTD和MoM的结果一致。初步证明了这种混合法的可行性和正确性。

### 3 结论

文章研究了一种存在于复杂环境中短波天线的混合方法。此方法可用2种不同数值方法来对一个复杂结构的不同方面进行建模。大多数短波天线系统数值建模中,对天线的模拟通常是比较薄弱的,所以这种混合方法大大增强了实际的短波天线建模,还可以模拟分析其他频段天线在地面或更加复杂环境下的散射、辐射特性。

#### 参考文献:

- [1] 陈文汉,赖富林,王沛. 无线电短波天线的倾斜地面架设新技术[J]. 信息与电子工程, 2007,5(5):382-384. (CHEN Wen-Han, LAI Fu-Lin, WANG Pei. A New Technology of Setting up Shortwave Antenna on Gradient Ground[J]. Information and Electronic Engineering, 2007,5(5):382-384.)
- [2] Keith A L, Breakall J K, Zmyslo J. A hybrid MoM/FDTD approach to UHF/VHF propagation problems[C]// IEEE Ant. and Prop. Society International Symposium. Baltimore:[s.n.], 1996:358-361.
- [3] Huang Zhu, Denarest K R, Plunb R G. An FDTD/MoM hybrid Technique for modeling complex antennas in the presence of heterogeneous ground[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1999,37(6):2692-2698.
- [4] 葛德彪, 闰玉波. 电磁波时域有限差分法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002. (GE De-biao, YAN Yu-bo. Electr. Wave Finite Difference Time Domain[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002.)
- [5] Harrington R F. 计算电磁场的矩量法[M]. 王尔杰, 译. 北京:国防工业出版社, 1981. (Harrington R F. Moment Method in Computation Electromagnetic[M]. Translated by WANG Er-jie. Beijing: Defense Industry Press, 1981.)
- [6] 张玉. 电磁场并行计算[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2006. (ZHANG Yu. Electromagnetic Parallel Computation[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006:39-41.)
- [7] 李响, 杨明武, 王伟吉, 等. 时域有限差分法电磁建模系统的研究与设计[J]. 信息与电子工程, 2005,3(4):257-260. (LI Xiang, YANG Ming-wu, WANG Wei-ji, et al. Study of FDTD Electromagnetism Modeling System[J]. Information and Electronic Engineer[J]. 2005,3(4):257-260.)
- [8] 赵亚敏, 许家栋. 应用UPML的FDTD法计算平面微带电路[J]. 信息与电子工程, 2009,7(5):405-408. (ZHAO Ya-min, XU Jia-dong. UPML absorbing boundary condition of the FDTD for planar microstrip circuits[J]. Information and Electronic Engineer, 2009,7(5):405-408.)

#### 作者简介:



周波(1982-),男,河南省南阳市人,硕士,研究方向为通信、雷达与电子对抗.email: zhoubo1001@126.com.

郝晓军(1978-),男,西安市人,博士,研究方向为雷达与电子对抗.

郑星(1978-),男,西安市人,硕士,研究方向为雷达与电子对抗.