

任意形状导体与线天线组合目标的瞬态特性分析

李 颖 周东明 任 猛 刘 锋 何建国

(国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 本文采用微分形式的时域电场积分方程(TDEFIE)时间步进算法(MOT)对任意形状导体与线天线组合目标的电磁瞬态特性进行了分析。针对组合目标的复杂特性, 使用细金属带状线模拟线天线, 采用统一的 RWG 基函数表示表面电流分布, 采用三阶内插时间基函数并通过恰当的时间步长选取对该问题进行分析求解。同时给出了线面连接处单元的剖分方法, 基函数的设置, 线面连接处电源激励模型的添加以及输入阻抗计算方法, 最后给出了验证算法的数值结果。

关键词: 时域电场积分方程, 时间步进算法, RWG 基函数, 瞬态特性

Transient Analysis of Arbitrary Shaped Conductor and Wire Composite Object

LI Ying, ZHOU Dong-ming, REN Meng, LIU Feng, HE Jian-guo

(College of Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The transient response of the arbitrary shaped conductor and wire composite object is analyzed by the time-domain integral equation (TDEFIE). And the marching-on in time (MOT) method is used to solve the TDEFIE. During the solution, the wire antenna is modeled as a thin strip. And the surface of the conductor and wire are modeled by planar triangular patches. The surface current is represented by RWG spatial basic function and the third-order Lagrange interpolating temporal basis function. The segmentation methods for the patches near the attachment point are introduced. The voltage model on the junction is defined. And the method for calculating input impedance is presented. Numerical results show the efficiency of the presented solution.

Key words: Time domain electric field integral equation (TDEFIE), Marching-on in time (MOT), RWG basic function, Transient response

引 言

在分析复杂目标电磁特性时, 例如飞行器、舰艇、雷达系统等, 经常要处理导体与线天线相连的结构, 准确分析这类目标的电磁特性具有重要的工程意义。时域积分方程方法是获得这种目标时域电磁散射、辐射特性的一种有效方法。同频域方法相比, 在时域求解目标的电磁特性不仅可以直观地揭示目标与电磁波作用的机理, 而且通过少量计算就可以获得目标的宽频带信息, 这在宽带电磁问题、瞬态电磁问题的分析中具有独特的优势。

在时域积分方程的求解中, 一般采用基于 RWG 基函数的时间步进 (MOT) 迭代算法^[1,2]。但对于线、面, 线、体的组合问题, 如导体与天线相互连

接的目标, 很难用单一的空间基函数来表示其表面的电流分布情况。分析这类问题, 通常的解决方案是对天线, 连接点和导体表面分别构造基函数, 如在文献[3]中, 分别采用了线基函数、面基函数和线面结合基函数三种基函数来处理, 这必然导致了分析和计算的复杂性。特别是连接节点处新的基函数的引入, 使得理论公式和数值求解都更加难于实现。文献[4]中, 介绍了将细线天线用细金属条带来模拟的方案, 在后续的研究中, 不断有研究者将这种方法应用于矩量法 (MOM) 分析线面互连的问题中^[5-7], 得到了较为理想的频域结果。

本文采用微分形式的 TDEFIE, 使用细金属带状线模拟线天线, 采用统一的 RWG 基函数和三阶内插时间基函数表示表面电流空间时间分布, 应用

* 收稿日期: 2008-03-05

MOT 算法对任意形状导体和线天线组合目标进行了求解。并研究了线面连接处单元的剖分方法, 基函数的设置, 线面连接处电源激励模型的添加以及输入阻抗计算方法等问题, 最后给出了一些数值结果以验证算法的有效性。

1 理论与公式

1.1 时域电场积分方程

假设表面为 S 的理想封闭导体置于介电常数为 ϵ_0 , 磁导率为 μ_0 的自由空间中, 该导体在入射电场 $\{E'(r, t), H'(r, t)\}$ 的照射下激励起表面感应电流 $J(r, t)$ 。假设入射波在 $t=0$ 时刻后才触及导体, 因此当 $t < 0$ 时, $J(r, t) = 0$ 。感应电流 $J(r, t)$ 产生的散射场 $E'(r, t)$ 为:

$$E'(r, t) = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \Phi \quad (1)$$

其中, $A(r, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \frac{J(r', t)}{R} dS'$ 为矢量位函数,

$\Phi(r, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma(r', t)}{R} dS'$ 为标量位函数。

$R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ 代表场点 \mathbf{r} 到源点 \mathbf{r}' 间的距离。

根据理想导体表面的电场边界条件可得:

$$[E'(r, t) + E^*(r, t)]|_{\text{tan}} = 0 \quad r \in S \quad (2)$$

其中, 下标 tan 表示沿表面的切向方向。将(1)式代入(2)式中, 可得到时域电场积分方程公式:

$$\begin{aligned} E'_{\text{tan}}(r, t) = & \left[\frac{\partial}{\partial t} \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S dS' \frac{J(r', \tau)}{R} - \right. \\ & \left. \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \nabla \int_S dS' \int_0^t d\tau \frac{\nabla' J(r', \tau)}{R} \right]_{\text{tan}} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\tau = t - R/c$ 表示波传播延迟时间, c 为光速。

(3)式中的时间积分在计算上带来了复杂性, 为消除电荷的时间积累, 对式(3)进行时间微分, 得到微分形式的时域电场积分方程(TDEFIE)^[2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} E'_{\text{tan}}(r, t) = & \left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S dS' \frac{J(r', \tau)}{R} - \right. \\ & \left. \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \nabla \int_S dS' \frac{\nabla' J(r', \tau)}{R} \right]_{\text{tan}} \end{aligned} \quad (4)$$

1.2 隐式 MOT 算法^[2]

利用 MOT 算法来求解时域积分方程, 首先要

将表面电流 $J(r, t)$ 用时间基函数 $T(t)$ 和空间基函数 $S_n(r)$ 分别展开为:

$$J(r, t) \equiv \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{n=1}^{N_s} I_{n,i} T_i(t) S_n(r) \quad (5)$$

其中, N_t , N_s 分别为时间采样和空间采样数; $I_{n,i}$ 为待求解的电流系数; $T_i(t) = T(t - i\Delta t)$, Δt 为时间采样步长。将表面电流的级数表达式(5)带入(4)式, 并在空间上作 Galerki 测试, 在时刻 $t_j = j\Delta t$ 作点匹配, 可得如下形式的矩阵方程组:

$$\mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{I}_j = \mathbf{V}_j - \sum_{l=1}^{j-1} \mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{I}_{j-l} \quad (j=1, 2, \dots, N_t) \quad (6)$$

其中: \mathbf{I}_j 是第 j 时刻电流系数向量 $I_{n,j}$, $n=1, \dots, N_s$ 。 $\mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{I}_{j-l}$ 表示 t_{j-l} 时刻电流的辐射场在时刻 t_j 的测试结果。 \mathbf{Z}_l 矩阵元素表达如下:

$$\mathbf{Z}_{l,mn} = \left\langle S_m(r), -\frac{\partial}{\partial t} E_{n,j-l}^*(r, t) \Big|_{\text{tan}} \right\rangle \Big|_{t=t_j} \quad (7)$$

\mathbf{V}_j 表示 t_j 时刻的激励源向量, 其向量元素为:

$$\mathbf{V}_{j,m} = \left\langle S_m(r), \frac{\partial}{\partial t} E^*(r, t) \Big|_{\text{tan}} \right\rangle \Big|_{t=t_j} \quad (8)$$

方程(6)构成了经典 MOT 算法的基础, t_j 时刻的未知电流系数 I_j 可以由先前时刻的已知电流系数 I_{j-l} , $l=1, \dots, j-1$ 求得, 因此方程式(6)中所有时刻的电流系数都可以迭代求解。

1.3 线天线建模和电流的空时离散

对于线天线的建模, 通常采用线基函数、面基函数和线面结合基函数三种基函数来处理, 这导致了分析和计算的复杂性, 且这种方法通用性差, 不易与其他的加速算法(如PWT)结合。本文通过对线天线进行条带等效, 可以对任意形状导体和线天线的组合目标进行统一的三角形网格剖分, 并用 RWG 基函数描述组合目标的表面电流分布。

对于电小尺寸的圆柱形细金属导线, 当导线直径 r 远小于波长时, 其电磁特性可用一窄金属条带来等效^[4,5], 导线半径 a 和条带宽度 s 之间的关系为: $a \approx 0.25s$ 。这一关系可由单位长度的金属导线和金属条带的电容相等的条件得到。这种等效变换, 使得分析线、面连接的问题转化为面、面连接的问题,

进而可以采用统一的空间基函数来描述组合目标的表面电流分布。

面基函数选择定义在三角面元对上的RWG基函数^[1], 时间基函数采用^[8]三阶内插多项式。

1.4 线面连接单元的剖分与基函数的定义

当线天线加载于任意形状导体表面时,首先要对载体和天线表面进行三角形单元划分,然后需要对已剖分好的载体表面与天线连接处附近的三角形进行重新划分。

在采用MOT算法求解时域积分方程的过程中,往往会产生晚时不稳定现象,而空间和时间离散误差是导致这种现象的重要原因之一,这就要求在对目标进行空时离散时所划分的单元要尽量规则一致(尺寸和形状一致)。

由于线天线的半径通常较小,等效后的金属条带宽度相对于导体表面三角形剖分单元的边长来说也很小,因此,在对线面连接处附近的三角形进行重新划分时,要选取恰当的划分原则,使得重新剖分的单元在连接处附近的局部范围内达到规则和一致,以减小空间的离散误差。文献[5]和文献[7]给出了比较详细的线面连接单元的处理方法,本文中沿用以上文献[5]中的剖分原则,这是由于该文中提出的剖分方案使得剖分结果更加规则,当然这会增加计算的单元个数,但一般连接点数目很少,所以这种计算量的增加是可以接受的。

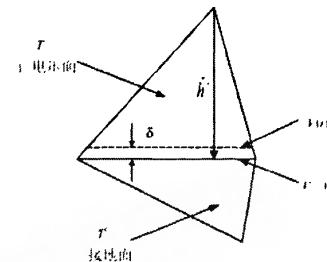
当细天线模拟为金属条带后,便将线面连接结构转化为面面连接结构,则在连接处出现三个或多个三角形单元共用一条公共边的情况。文献[6,9]给出了任意数量的无限薄金属面相连接时RWG基函数和未知量选取方法。根据RWG基函数的定义,这一公共边可定义m个RWG基函数,但根据电流连续性方程,其中只有m-1基函数是独立的,因此只需要m-1基函数和未知量即可描述这一公共边上的电流分布。

1.5 线面连接处馈源的设置

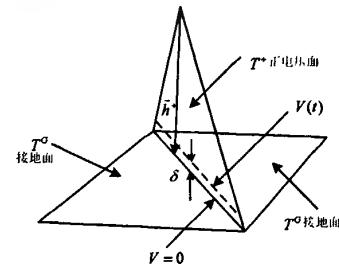
对于同轴馈电的激励形式,可以采用Delta函数馈电模型。馈电源加载于连接处靠近公共边的一条很窄的缝隙上,如图1所示。则除了缝隙处,目标

表面切向电场处处为零,缝隙内的电场可表示为:

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r}, t) = \frac{V(t)}{\delta} \mathbf{h}^+ \quad (9)$$



(a) Delta函数缝隙馈电模型



(b) 多面连接时Delta函数馈电模型
图1 Delta函数缝隙电压源馈电模型

对于(8)式的电压分量,只有对应公共边基函数的单元存在电压值,其他为零,即:

$$\mathbf{V}_{j,m} = \left\langle \mathbf{S}_m(\mathbf{r}), \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}'(\mathbf{r}, t) \right\rangle \Big|_{t=t_j} = I_m \frac{\partial}{\partial t} V(t) \Big|_{t=t_j} \quad (10)$$

当三个三角形单元共用一条公共边时,这一馈电模型对应着两个RWG基函数。因此,在计算馈电处输入阻抗时,流过公共边的电流应为两个基函数对应的电流的叠加。则馈电处对应频率f的输入阻抗计算公式为:

$$Z_m(f) = \frac{V(f)}{I_m(J_1 + J_2)} \quad (11)$$

其中,V(f)为激励电压经过逆傅立叶变换得到的对应频率f的电压值;I_m为公共边边长;J₁和J₂为求得的公共边处面电流密度经过逆傅立叶变换得到的对应频率f的电流密度值。

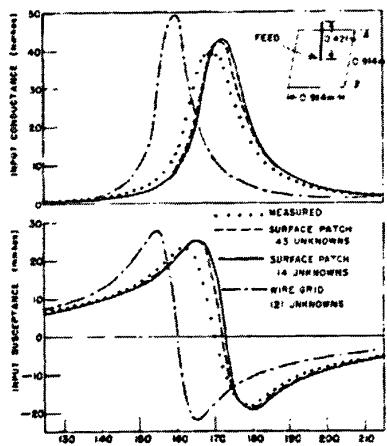
2 数值结果

设置激励源为调制的高斯脉冲,其电压表达式如下:

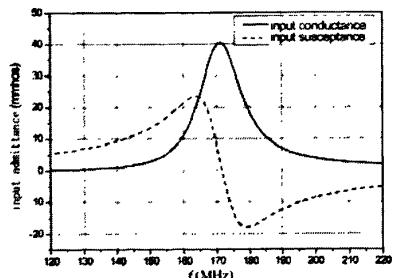
$$V(t) = V_0 \cos(2\pi f_0(t-t_p)) \exp(-(t-t_p)^2/2\sigma^2) \quad (12)$$

其中: V_0 为电压脉冲幅度; f_0 为中心频率; σ 定义为频域带宽, $t_p = 3\sigma s$ 。

算例 1: 计算尺寸为 $0.914m \times 0.914m$ 的导体平板上单极天线的输入导纳。天线半径为 $0.0008m$, 等效为金属条带后条带宽度为 $0.0032m$, 天线长度为 $0.412m$, 位于导体平板中心处。激励源中心频率为 $178MHz$, 带宽为 $160MHz$, 加在线面连接处。图 2(b)为本文方法计算所得到的天线的输入导纳, 与(a)中文献[10]给出的测量值比较吻合, 证明了本文方案的有效性。



(a) 文献计算结果

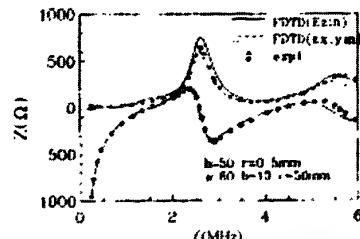


(b) 本文计算结果

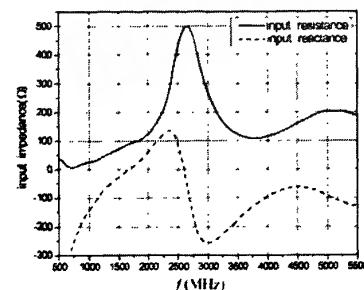
图 2 导体平板上单极天线的输入阻抗

算例 2: 金属盒上的单极天线的输入阻抗。导体盒尺寸为 $60 \times 10 \times 50mm^3$, 单极天线半径 $r=0.5mm$, 长度 $50mm$, 等效条带宽度 $2mm$, 置于导体盒顶面中心处。激励源采用调制的高斯脉冲, 中心频率为 $3000MHz$, 带宽为 $6000MHz$, 加在线面连接处。图 3(b)为本文方法计算所得到的天线的输入阻抗, 与

(a) 中文献[11]给出的值比较吻合。



(a) 文献计算结果



(b) 本文计算结果

图 3 金属盒上的单极天线的输入阻抗

3 结束语

本文采用微分形式的 TDEFIE, 使用细金属带状线模拟线天线, 采用统一的 RWG 基函数和三阶内插时间基函数表示表面电流空间时间分布, 应用隐式 MOT 算法对任意形状导体和线天线组合目标进行了分析求解。并研究了线面连接处单元的剖分方法, 基函数的设置, 线面连接处电源激励模型的添加以及输入阻抗计算方法等问题。通过与其他途径的数据对比证明了等效后方案所得的 MOT 数值结果的有效性。同时, 本文的方法通用性强, 并且更容易与快速算法相结合来分析电大尺寸目标的辐射和散射问题。

参 考 文 献

- [1] S.M.Rao, Donald R. Wilton. Transient Scattering by Conducting Surfaces of Arbitrary Shape [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1991, 39(1), 56-61
- [2] Rao S M, Sarkar T K. Transient analysis of electromagnetic scattering from wire structures utilizing an implicit time-domain integral equation technique [J]. Microw. Opt. Technol. Lett., 1998, 17(1), 66-69
- [3] Kemal Aygün, B. Shanker, A. Arif Ergin, Eric

- Michielssen. A two-level plane wave time-domain algorithm for fast analysis of EMC/EMI problems [J]. IEEE Trans. on EMC, 2002, 44(1), 152-164
- [4] King R. W. The Theory of Linear Antenna [M]. Boston, MA: Harvard Univ. Press, 1956
- [5] James C. G. Matthews and Greg G. Cook. An Efficient Method for Attaching Thin Wire Monopoles to Surfaces Modeled Using Triangular Patch Segmentation [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2003, 51(7), 1623-1629
- [6] 董健, 等. 任意形状线、面、体组成导体目标的电磁建模[J]. 电子学报, 2005, 33(9), 1656-1659
- [7] 阙肖峰, 等. 复杂金属载体上线天线的MOM分析[J]. 微波学报, 2006, 22(5), 16-21
- [8] Manara, G A Monorchio, and R Reggiannini. A space-time discretization criteriton for a stable time-marching solution of the electric field integral equation [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1997, 45(3), 527-532
- [9] Makarov S. Mom antenna simulation with matlab: RWG basic functions [J]. IEEE Antenna & Propagation Mag, 2001, 43(10), 100-107.
- [10] E. H. Newman. Electromagnetic Modeling of Composite Wire and Surface Geometries [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1978, 26(6), 784-789
- [11] Reymond Luebbers, Li Chen. FDTD calculation of radiation patterns, impedance, and gain for a monopole antenna on a conducting box [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1992, 40(12), 1577-1583

李颖女, 1979年生, 现为中国科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生。主要从事电磁计算方面的研究工作。

E-mail: yingzi_nudp@yahoo.cn

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>