

一种加快时间步迭代的加窗技术

王生水, 柴舜连, 毛钧杰

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 提出了一种基于时域矩量法 (TD-MOM) 时间步迭代 (MOT) 的加速算法. 通过在时间步迭代上加时间窗, 从而剔除对于当前时间步没有贡献的迭代计算, 达到加速的效果. 仿真结果与一般 MOT 算法非常吻合, 证明方法有效.

关键词: 时域矩量法; 电场积分方程 (EFIE); 时间窗

中图分类号: TN822 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 09-1700-03

Adding A Moving Time-Window to Accelerate the MOT Arithmetic in TD-MOM EFIE

WANG Sheng-shui, CHAI Shun-lian, MAO Jun-jie

(College of Electronic Science and Engineering National Univ. of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A method was presented to accelerate the MOT arithmetic using method of moment in time domain EFIE. Using a moving time window in the MOT method to eliminate the iterative calculation which has no contribution to the present time step in this way, accelerate effect was obtained. The simulation results were the same as to the conventional MOT method which proved that it is an effective method.

Key words time-domain method of moment; electric field integral equation; time-window

1 引言

R. F. Harrington 于 1968 年最先提出的矩量法 (Method of Moment)^[1] 成为数值求解电磁场问题的一种经典而且非常有效的方法. 近几年来, 随着 S. M. Rao 等人提出的 RWG (Rao-Wilton-Glisson) 三角基函数以及建模软件的发展^[2-4], 利用矩量法来解决电磁问题也越来越引起人们的兴趣. 利用矩量法在频域分析问题已有很多文章发表^[5-7], 然而有关时域矩量法的文章却相对较少.

得到目标的时域响应的方法大致可以分为两种: (1) 先得到目标被时谐源激励的频域响应, 然后利用逆傅立叶变换 (Inverse Fourier Transform) 计算得到需要的时域数据; (2) 直接在时域解决问题.

本文结合 RWG 三角基函数和 MOT (Marching on Time) 算法, 利用软件建模, 直接在时域求解电场积分方程 (EFIE), 分析了金属导电平板和导体球的时域电流分布和远区后向散射场的时域响应; 提出了一种利用加时间窗从而缩短迭代时间的方法. 所得结果与文献 [2-3] 比较, 吻合较好, 证明是一种切实可行的加速方法.

2 计算公式推导

S 代表被瞬态电磁脉冲激励的闭或开的良好导体表面, 利用导体表面的边界条件即表面切向电场为零, 得到以下计算公式:

$$\left[\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t^2} + \nabla \phi \right]_{\text{tan}} = \frac{\partial \mathbf{E}_{\text{inc}}^i}{\partial t} \quad \mathbf{r} \in S \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu}{4\pi} \int_S \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t')}{R} ds' \quad (2)$$

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \frac{-1}{4\pi\epsilon} \int_S \frac{\nabla_s' \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}', t')}{R} ds' \quad (3)$$

$$R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \quad (4)$$

$$t = t - R/c \quad (5)$$

μ 和 ϵ 分别代表介质的导电率和导磁率, c 代表自由空间电磁波的传播速度, \mathbf{r} , \mathbf{r}' , \mathbf{E}^i 和 \mathbf{J} 分别代表散射体上的场点、源点、入射电场和感应的未知电流密度.

本文中, 用高斯脉冲平面波代替入射电场, 其定义如下:

$$\mathbf{E}^i(\mathbf{r}, t) = E_0 \frac{4}{T\sqrt{p}} e^{-[4\pi(\alpha - c(t - \mathbf{r} \cdot \mathbf{k})/c)]^2} \quad (6)$$

其中, T 是脉冲宽度, 并且 $E_0 \cdot k = 0$

3 数值离散化计算步骤

3.1 基函数的定义及目标的建模剖分

如图 1 所示, RWG 三角基函数表示如下:

$$f(r) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \rho_n^+, & r \in T_n^+ \\ \frac{l_n}{2A_n^-} \rho_n^-, & r \in T_n^- \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (7)$$

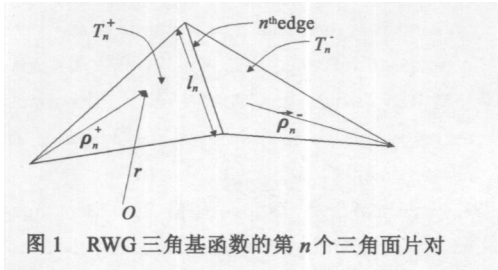


图 1 RWG 三角基函数的第 n 个三角面片对

时间基函数:

$$T_j(t) = \begin{cases} 1 - \frac{|t - t_j|}{\Delta t}, & t_{j-1} \leq t \leq t_{j+1} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (8)$$

其中, l_n 是公共边的长度, A_n^\pm 分别是三角面片 T_n^\pm 的面积, I_n 是待求系数, 表示 $t_j = j \cdot \Delta t$ 时刻垂直于第 n 条边的表面电流值, Δt 是迭代的时间步长. 这样, 电流密度表达式可以写成:

$$J(r, t) \cong \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{N_e} I_{n,j} f_n(r) T_j(t) \quad (9)$$

利用文献 [2] 给出的迭代公式:

$$\frac{l_n}{2(\Delta t)^2} (\rho_m^+ + \rho_m^-) A_{mm} I_{m, i+1} = V_{m, i} - l_n \sum_{j=-\infty}^i \sum_{n=1}^{N_e} I_{n,j} \cdot \left\{ \frac{\rho_m^+ + \rho_m^-}{2(\Delta t)^2} \cdot A_{mn} L T_j(h_{n, i+1}) - 2T_j(h_{n, i}) + T_j(h_{n, i-1}) \right\} + T_j(h_{n, i}) \Phi_{mn}^- - T_j(h_{n, i}) \Phi_{mn}^+ \quad (10)$$

上式中各项的表达式在文献 [2] 中给出. 为了消除晚时响应 (late-time oscillations), 采用了文献 [3] 的方法, 在计算过程中, 对待求系数 $I_{n,j}$ 取均值:

$$\tilde{I}_{n,j} = \frac{1}{4} (\tilde{I}_{n, j-1} + 2I_{n,j} + I_{n, j+1}) \quad (11)$$

对于要求解的目标, 将其表面用三角面片剖分, 如图 2 所示. 平板尺寸: $2m \times 2m$, 剖分三角形 106 个, 未知量 145 个; 球体尺寸: 半径

1m, 剖分三角形 160 个, 未知量 240 个.

3.2 时间窗的确定

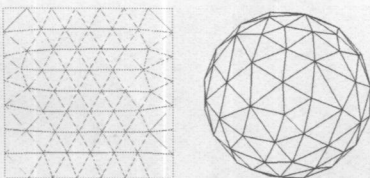


图 2 平板和球表面的三角面片剖分

算法是利用时间步迭代求解, 第 i 时间步的场值仅与第 i 时间步以前的场值有关, 由第 i 时间步以前的时间步计算累加而得. 在本例中, 第 i 时间步以前的某些时间步, 由于时间基函数 (式 (8)) 的限制条件, 对于第 i 时间步的场值没有贡献, 若仍计算这些时间步, 势必会增加计算时间, 而且由于迭代的关系, 计算每个时间步所花费的时间会越来越长. 本文中, 我们通过加一个移动的时间窗, 剔除了那些不必要的计算, 从而缩短了计算时间, 使计算大大加速.

将时间轴用 Δt 等分, 则第 i 时间步可表示为 $t_i = i \cdot \Delta t$ 由式 (8) 限制条件及式 (5) 可知:

$$t_{j-1} \leq t_i - R/c \leq t_{j+1}, \text{ 都除以时间步长 } \Delta t \text{ 得到}$$

$$j-1 \leq i - \frac{R}{c\Delta t} \leq j+1 \quad (12)$$

并整理, 得到一个移动的时间窗:

$$j \in \left[i - 1 - \frac{R}{c\Delta t} \right] \quad (13)$$

这个时间窗内已经包含了所有对第 i 时间步有贡献的场值. 一般地, 这个时间窗所包含的时间步数目远小于最终所求的时间步数, 而且计算单个时间步所用时间不会随着步数的增多而增加.

4 数值计算结果

本文中, $cT = 4m$, $ct_0 = 4m$, 入射场传播方向 $k = -a$, 极化方向 $E_0 = -a$, 参照时间步的稳定性条件 $\Delta t \leq R_{min} / (c\sqrt{2})$, 时间步选取 $\Delta t = R_{min} / (2c)$.

表 1 计算所用时间比较

	未知量	时间步	时间比较	
			不加时间窗	加时间窗
平板	145	350	2466秒	633秒
球	240	250	4858秒	1207秒

这里给出了加时间窗计算得到的平板和球的电流分布和按照一般 MOT 方法计算的结果 (图 3~6 注: 图中所用时间单位 ln 定义为光在自由空间中通过 1 米距离所用的时间), 由图可见, 结果吻合相当好, 而我们给出的方法却使时间大大减少. 我们用 VC++ 编程在同一台计算

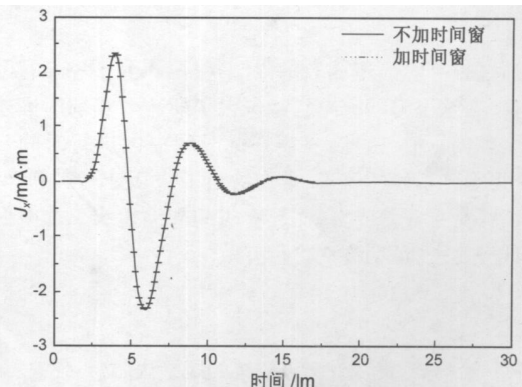


图 3 导电平板中心点的电流分布

机上仿真计算,所用时间如表 1所示:

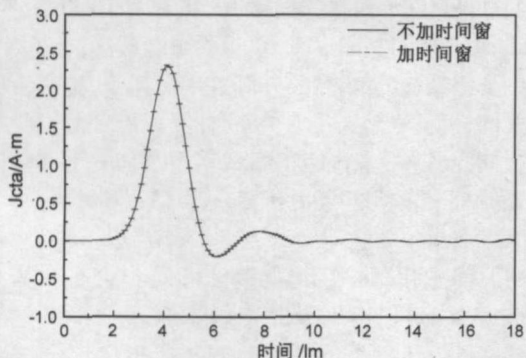


图 4 导体球 ($\theta=90^\circ, \phi=0^\circ$) 的电流分布

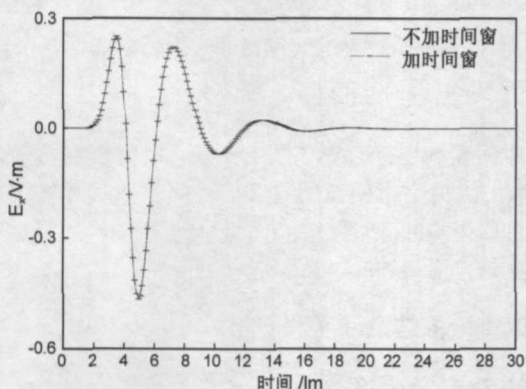


图 5 导电平板的后向散射场

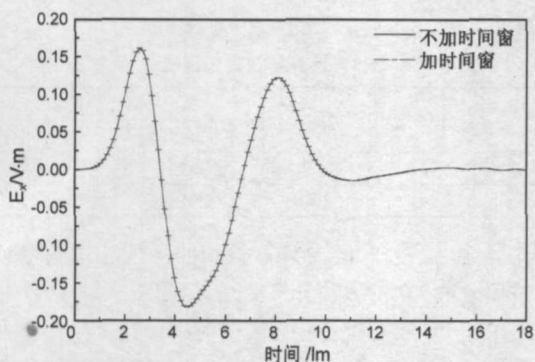


图 6 导体球的后向散射场

5 结论

通过推导时间基函数的限制条件,得到了一个移动的时间窗,在这个时间窗内已经包含了所有对当前时间步计算有贡献的场值。由此,只需在此时间窗内进行时间步迭代,即可得到精确的解答。本文给出了仿真计算实例,两种方法所得结果非常吻合,而计算时间却缩短为不加时间窗时的四分之一,证明方法可行有效。

参考文献:

- [1] R F 哈林登 [美]. 计算电磁场的矩量法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.

R F Harrington Field Computation by Moment Methods [M]. Translated by E J Wang, LY Xiao, et al. Peking National Defence Industry Publishing Company, 1981.

- [2] S M Rao, D R Wilton. Transient scattering by conducting surface of arbitrary shape [J]. IEEE Trans Antennas Propagate 1991, 39: 56-61.
- [3] D A Vechinski, S M Rao. A stable procedure to calculate the transient scattering by conducting surfaces of arbitrary shape [J]. IEEE Trans Antennas Propagate 1992, 40: 661-665.
- [4] D R Wilton, S M Rao, A W Glisson, D H Schaubert et al. Potential integrals for uniform and linear source distributions on polygonal and polyhedral domains [J]. IEEE Trans Antennas Propagate 1984, AP-32(3): 276-281.
- [5] S M Rao, D R Wilton, A W Glisson. Electromagnetic scattering by surface of arbitrary shape [J]. IEEE Trans Antennas Propagate 1982, AP-30(3): 409-418.
- [6] K Umashankar, A Taflov, S M Rao. Electromagnetic scattering by arbitrary shaped three-dimensional homogeneous lossy dielectric objects [J]. IEEE Trans AP, 1986, AP-34(6): 758-766.
- [7] S M Rao, T K Sarkar. An alternative version of the time-domain electric field integral equation for arbitrarily shaped conductors [J]. IEEE Trans Antennas Propagate, 1993, 41(6): 831-834.

作者简介:



王生水 男, 1977年12月生于山东章丘, 现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生, 感兴趣的领域是电磁场数值计算、微波、毫米波天线的设计与分析。

E-mail: luckysw@163.com



柴舜连 男, 1969年生于湖北黄冈, 国防科技大学电子科学与工程学院副教授, 博士。主要从事天线理论研究和计算分析以及电波传播的研究和计算工作。E-mail: slcha@sina.com



毛钧杰 男, 1943年生于湖南长沙, 国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 电子学会高级会员。主要从事毫米波多模复合制导理论研究、天线设计、电波传播的计算及微波教学工作。