

TDPO 及其并行算法在电磁散射中的应用

杨凌霞, 葛德彪, 姜彦南

(西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 为分析电大尺寸金属目标瞬态电磁特性, 首先由逆傅里叶变换导出时域物理光学表达式, 并对内存估计作了详细讨论。在此基础上, 实现了基于网络并行平台 MPI 的 TDPO 并行算法, 以解决利用 TDPO 计算超电大尺寸目标时计算时间长和由于内存限制单个微机不能计算的问题。测试了 PC 集群系统中并行 TDPO 算法的并行加速比。数值结果表明, N 个性能相同的微机并行计算所需时间约为单机的 $1/N$, 大大提高了计算效率。

关键词: 时域物理光学; 并行算法; 超电大尺寸目标; 电磁散射

中图分类号: TN 011 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2007)S1-0128-04

An application of TDPO and its Parallel algorithm to the analysis of electromagnetic scattering

YANG Ling-xia, GE De-biao, JIANG Yan-nan

(School of Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: The Time Domain Physical Optics (TDPO) approach is developed for the analysis of transient scattering by electrically large PEC objects. The development is based on the inverse Fourier transformation of the frequency domain physical optical expression. The estimation of required computer memory is discussed. Too much time and prohibitive computation resources are needed for the analysis of electromagnetic characteristics of electrically ultra-large objects. To overcome this drawback, a parallel algorithm that combines TDPO and MPI function is presented. Numerical results show that the speed-up ratio is approximately equal to N , where N is the number of processors, illustrating the high efficiency and good performance of the parallel TDPO.

Key Words: time domain physical optics; parallel algorithm; electrically ultra-large objects; electromagnetic scattering

超宽带雷达和微波、毫米波雷达的广泛应用, 使得对电大尺寸目标宽频带时域特性的研究受到广泛重视。物理光学近似是分析电大尺寸目标频域电磁特性的高效方法之一。然而, 在时域只有有限的关于瞬态或脉冲激励的物理光学分析见于报道。早期的时域物理光学 (TDPO) 近似是先得到目标被时谐源激励的频域响应, 然后利用逆傅里叶变换得到所需的时域数据^[1]。直到 1994 年 Sun 用傅里叶级数展开得到了真正意义上的 TDPO 方法^[2]。然而对于超电大尺寸目标, 如毫米波雷达工作条件下的目标 (飞机、舰船等), 其特征尺寸约数千个波长, 在现有普通微机的计算条件下, 不但计算时间长, 甚至单台微机根本无法计算。

为分析超电大尺寸目标的瞬态电磁特性, 首先由逆傅里叶变换导出时域物理光学表达式, 直接在时域求解物理光学积分, 推导过程思路清晰简单易懂。同时对 TDPO 方法的内存估计作了详细讨论。其次, 实现了结合网络并行平台 MPI 基于区域分解的 TDPO 并行算法, 将该算法应用于超电大尺寸目标电磁特性的分析。与其他方法结果的比较说明该方法的有效性。文中算例的数值结果说明, 这种方法提高了 TDPO 的计算速度, 实现了原来单机无法完成的任务。

收稿日期: 2007-06-09

基金项目: 西安电子科技大学研究生创新基金资助 (创 05023)

作者简介: 杨凌霞 (1979-), 女, 西安电子科技大学博士研究生。

1 时域物理光学方法

1.1 基本公式

物理光学法(PO)是一种高频近似方法。它用散射体表面的感应电流取代散射体本身作为散射场源,然后对表面感应电流积分而求得散射场。对于理想导体,目标表面的物理光学电流近似为

$$\mathbf{J}_s(\mathbf{r}', \omega) \approx \mathbf{J}_s^{\text{PO}}(\mathbf{r}', \omega) = \begin{cases} 2\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}^{\text{inc}}(\mathbf{r}', \omega), & \text{照明区,} \\ 0, & \text{阴影区,} \end{cases} \quad (1)$$

这里 $\mathbf{H}^{\text{inc}}(\mathbf{r}', \omega)$ 为入射磁场, $\hat{\mathbf{n}}'$ 为 \mathbf{r}' 处面元法向单位矢量。则观察点散射场为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s(\mathbf{r}, \omega) &= jkZ_0 \left(e^{-jkr} / (4\pi r) \right) \times \iint_s \hat{\mathbf{r}} \times \left[\hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{J}_s^{\text{PO}}(\mathbf{r}', \omega) \right] e^{jk\cdot\mathbf{r}'} ds', \\ \mathbf{H}^s(\mathbf{r}, \omega) &= -jk \left(e^{-jkr} / (4\pi r) \right) \times \iint_s \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{J}_s^{\text{PO}}(\mathbf{r}', \omega) e^{jk\cdot\mathbf{r}'} ds'. \end{aligned} \quad (2)$$

对式(2)进行傅里叶逆变换,可得时域远区散射场为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s(\mathbf{r}, t) &= (Z_0 / (4\pi rc)) \times \iint_{s'} \hat{\mathbf{r}} \times \left[\hat{\mathbf{r}} \times \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{J}_s^{\text{PO}}(\mathbf{r}', t - \tau) \right] ds', \\ \mathbf{H}^s(\mathbf{r}, t) &= -(1 / (4\pi rc)) \times \iint_{s'} \hat{\mathbf{r}} \times \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{J}_s^{\text{PO}}(\mathbf{r}', t - \tau) ds'. \end{aligned} \quad (3)$$

同理,表面电流密度 \mathbf{J}_s^{PO} 的时域形式为

$$\mathbf{J}_s^{\text{PO}}(\mathbf{r}', t) = 2\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}^{\text{inc}}(\mathbf{r}', t), \quad (4)$$

代入式(3)得

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{E}^s(\mathbf{r}, t) &= \frac{Z_0}{4\pi rc} \iint_{s'} \hat{\mathbf{r}} \times \left[\hat{\mathbf{r}} \times \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{J}_s^{\text{PO}}(\mathbf{r}', t - \tau_1) \right] ds' = \\ &\quad \frac{Z_0}{4\pi rc} \iint_{s'} \hat{\mathbf{r}} \times \left[\hat{\mathbf{r}} \times \frac{\partial}{\partial t} (2\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}^{\text{inc}}(\mathbf{r}', t - \tau_1 - \tau_2)) \right] ds', \\ \mathbf{H}^s(\mathbf{r}, t) &= -\frac{1}{4\pi rc} \iint_{s'} \hat{\mathbf{r}} \times \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{J}_s^{\text{PO}}(\mathbf{r}', t - \tau_1) ds' = \\ &\quad -\frac{1}{4\pi rc} \iint_{s'} \hat{\mathbf{r}} \times \frac{\partial}{\partial t} (2\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}^{\text{inc}}(\mathbf{r}', t - \tau_1 - \tau_2)) ds'. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

其中 $\tau_1 = r/c - \hat{\mathbf{k}}_s \cdot \mathbf{r}'/c$ 为积分点到远区观察点的时间延迟, $\tau_2 = \hat{\mathbf{k}}_i \cdot (\mathbf{r}' - \mathbf{r}_{\text{ref}})/c$ 为源点到积分点的时延。从式(5)可以看出,用TDPO方法计算散射场时,对整个散射体的积分仅涉及到表面照明区上具有时间延迟的入射场,而与其他点的相互作用无关,计算简单,物理概念明确。

1.2 内存估算

TDPO方法的突出特点是内存需求很小。由式(5)可见,对整个散射体的面积分仅涉及具有时间延迟的入射场,而与表面上其他点的相互作用无关。假设目标表面被离散成 N 个面元,则TDPO方法只需要存储表面上 N 个面元的信息,如果考虑到目标有一部分处于阴影区,则只需存储小于 N 个面元的信息;而时域电场积分方程、时域迭代方法等由于考虑了各面元间的相互耦合作用,则需要存储约 N^2 个面元的信息;对于采用体剖分的FDTD方法,则要存储整个计算区域内元胞的信息。

TDPO方法计算时需记录每个面元的法矢量、面积、入射磁场和时间延迟。若每个变量用单精度数表示(占4个字节),目标表面被离散成 N 个面元,则该方法所需内存约为

$$N \times \frac{6\text{磁场(大小、方向)}+3\text{法向量}+1\text{面积}+2\text{时间延迟}}{\text{面元}} \times 4 \frac{\text{Bytes}}{\text{变量}} = 48N \text{ Bytes}。$$

2 基于网络并行平台 MPI 的 TDPO 并行算法

尽管 TDPO 方法内存需求少, 计算速度快, 但对于超电大尺寸的目标, 表面按照最大边不超过 $1/10$ 波长来划分三角形(局部需要细化), 仍有很大的计算量, 需要过长的计算时间。另一方面, 由于 TDPO 方法是独立求得每个面元上感应电磁流对观察点的贡献, 然后进行累加, 不考虑面元间的相互作用。因此便于把总的积分面元分成数个区域进行计算, 最后进行数据合并实现并行处理。基于这种思想, 将并行算法应用到超电大尺寸目标的电磁分析中, 构造了基于 MPI 网络平台^[3,4]的 TDPO 并行算法, 从而克服了 TDPO 方法分析超电大尺寸目标时计算量大, 计算时间过长的难题。

用 MPI 实现 TDPO 并行计算时, 首先将计算区域(积分面元)分割成几个子域, 为各个进程分配计算任务, 并由 0 进程广播出去。然后各进程在给定的计算范围内, 按照一般的 TDPO 方法进行计算。在这一过程中, 由于计算任务被多个进程分担, 所以计算总时间大大缩短。当各个进程计算完毕后, 0 进程将各个进程计算结果收集并合并数据。其程序流程如图 1 所示。另外, 由于 TDPO 方法不考虑面元之间的相互作用, 即各个面元的计算是相互独立的, 因此在计算各面元对观察点贡献时, 各进程之间不需要数据通讯, 只是各个计算区域计算完成后, 才需要进行数据交换、汇总。假设用 N 个进程, 理论上可以将计算时间缩短到大约为原来计算时间的 $1/N$ 。对于超电大尺寸的目标, 这个时间的缩短是非常有意义的。

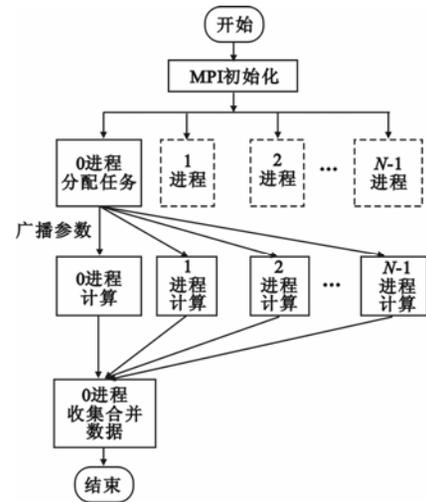


图 1 并行 TDPO 程序流程图

3 数值结果与分析

为验证上述算法正确性, 首先给出金属球锥后向 RCS。该模型(图 2 所示)由球冠加上单锥旋转对称构成。锥半角 $\alpha = 7^\circ$, 球半径为 0.0749m, 锥部分长为 0.6051m, 整个球锥长为 0.6891m。外形控制方程为

$$\left. \begin{aligned} y &= 0.1228(x + 0.6051)\cos\phi, \\ z &= 0.1228(x + 0.6051)\sin\phi, \end{aligned} \right\} -0.6051 < x \leq 0 \text{ 且 } -\pi < \phi < \pi, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} y &= 0.0749\sqrt{1 - \left(\frac{x - 0.0091}{0.0749}\right)^2} \cos\phi, \\ z &= 0.0749\sqrt{1 - \left(\frac{x - 0.0091}{0.0749}\right)^2} \sin\phi, \end{aligned} \right\} 0 < x < 0.0840 \text{ 且 } -\pi < \phi < \pi. \quad (7)$$

平面高斯脉冲如图 2 所示入射, 后向接收, 带宽为 0~10GHz。图 2 分别给出了串行和并行 TDPO 计算的单站 RCS; 作为比较还给出了 FDTD 计算结果, 由图可见三者吻合。

作为 TDPO 及其并行算法的应用实例, 笔者给出了某卫星单站 RCS 的算例, 如图 3 所示。入射波采用平面调制高斯脉冲, 带宽为 50~60GHz, 脉宽 $\tau = 0.12\text{ns}$ 。卫星简化模型见图 4, 其主体长方体物件约为 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$, 太阳能帆板近似看成是导体材料, 每个展开后总长约 10m, 宽 1.5m。整个卫星被离散成 6450 万个三角面元, 所需内存为 2.88Gbit, 超过了内存 2Gbit 的 PC 机的承受能力。本例将计算任务分配到两台 PC 机(主频 2.66GHz, 内存 2Gbit)上, 解决了单台微机无法解决的问题。

4 并行 TDPO 加速比分析

加速比测试中用了 4 台微机, 性能指标为主频 2.66GHz, 内存 512Mbit。局域网传输速度为 100Mbit/s, 操作系统为 WINXP, 消息传递的网络平台为 MPI。计算目标仍为图 4 的卫星模型, 入射波为 C 波段 (4~8GHz), 脉宽 $\tau = 0.5 \text{ ns}$, 其他参数同上。经测试, TDPO 并行程序的加速比如表 1 所示。可见, 并行网络中采用不同数目 (N) 的主机可以将计算时间缩短, 大约为原来计算时间的 $1/N$, 基本上可以达到理想加速比 (N) 的效果, 极大地节省了计算时间。

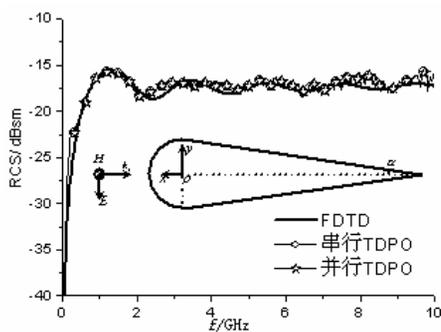


图 2 金属球锥单站 RCS

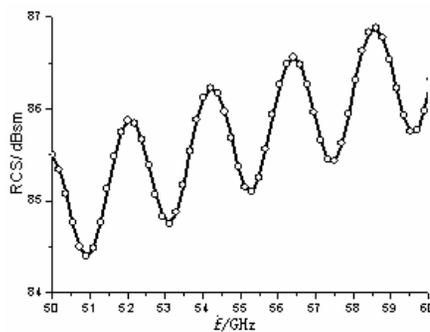


图 3 某卫星单站 RCS

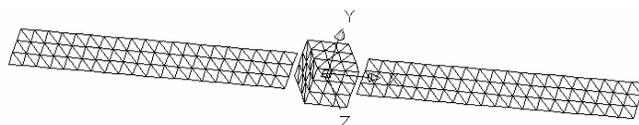


图 4 卫星简化模型

表 1 TDPO 并行程序性能测试表

参与计算的计算机	计算时间/s	加速比	理想加速比
1 号 (串行)	3293.188	1.00	1.0
1 号和 2 号	1646.595	2.00	2.0
1、2 号和 3 号	1107.16	2.97	3.0
1、2、3 号和 4 号	830.56	3.965	4.0

5 结论

为分析超电大尺寸目标的瞬态电磁特性, 首先由逆傅里叶变换导出时域物理光学表达式, 直接在时域求解电大目标电磁特性。其次, 实现了基于 MPI 平台的 TDPO 并行算法, 并将该算法应用于超电大尺寸目标电磁特性的分析。提高了 TDPO 的计算速度, 并且使原来无法在单机上实现的计算成为可能。

参考文献

- [1] Kennaugh E M, Moffatt D L. Transient and Impulse Response Approximation[J]. Proc IEEE, 1965, 53(8): 893-901.
- [2] Sun E Y, Rusch W V T. Time-domain Physical-optics[J]. IEEE Trans on Antenna Propagat., 1994, 42(1): 9-15.
- [3] 都志辉, 高性能计算并行编程技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.
- [4] 张玉, 王楠, 梁昌洪. PC 群集 MPI 并行矩量法分析复杂平台多天线的特性[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 478-482.