

文章编号: 1001- 2486(2010) 01- 0063- 05

## 并行时域自适应算法在电大目标瞬态散射中的应用\*

王文举, 周东明, 李颖, 何建国, 刘培国  
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 基于电磁场时域积分方程(TDIE)数值技术计算复杂目标的瞬态散射特性, 其计算量和内存需求大, 采用时域自适应算法(TDAIM)降低了TDIE的计算规模。在研究TDAIM并行算法的基础上, 开发了基于.NET Remoting的电磁场分布式数值计算方案。数值结果表明, 该方案显著提高了TDAIM的计算效率, 为解决电大目标瞬态电磁散射问题提供了一条有效途径。

**关键词:** 时域积分方程方法; 时域自适应算法; 分布式计算

**中图分类号:** TN95      **文献标识码:** A

## Application of the Parallel Time Domain Adaptive Integral Method to Transient Scattering from Electrically Large Objects

WANG Wen-ju, ZHOU Dong-ming, LI Ying, HE Jian-guo, LIU Pei-guo

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

**Abstract:** The high computational complexity and large memory requirements will be encountered when the transient responses from electrically large complex objects are considered using time domain integral equation (TDIE) numerical technique. Time domain adaptive integral method (TDAIM) is employed for reducing the computational scale of TDIE. The parallel technology was researched and the distributed electromagnetic computation based on .NET Remoting was implemented. Results show that the parallel scheme is effective for improving computational efficiency and solving the large scale electromagnetic problem.

**Key words:** time domain integral equation; time domain adaptive integral method; distributed computation

通过计算目标的瞬态特性, 不仅可以获得目标的宽频带信息, 而且可以精确地描述入射脉冲与目标作用的物理过程, 判断目标形体对入射信号的反射强度。因此, 研究目标的瞬态特性对高分辨雷达、目标识别以及隐身飞行器的设计都具有重要意义。时域积分方程法常用来解决瞬态电磁场问题, 在运用时间步进算法(Marching on in Time, MOT)<sup>[1-2]</sup>求解时域积分方程时, 计算量成了限制该方法应用的瓶颈。Ali E. Yilmaz等提出一种用时域自适应算法(TDAIM)加速时间步进算法的方法<sup>[3-4]</sup>, 该方法使用FFT加速计算采用辅助格点电流近似后的广义阻抗矩阵与格点电流向量的乘积。对于类平面结构, TDAIM可将经典MOT的计算量和存储量减少到 $O(N_t N_s \lg^2 N_s)$ 和 $O(N_s^2)$ ; 对于通常的面结构, TDAIM的计算量和存储量分别为 $O(N_t N_s^2 \lg^2 N_s)$ 和 $O(N_s^2)$ 。

.Net Remoting可以使运行在本地计算机上的计算对象与运行在远程计算机上的计算对象通过网络交互、通信, 本机应用程序进程中只需访问远程对象的代理即可进行远程对象的调用, 如同访问本地对象一般。具体的网络交互操作细节由代理对象与远程序列对象完成。本文基于.Net Remoting开发了时域自适应的一种并行方法, 不仅提高了计算效率, 而且并行处理时每台成员机被占用的存储量仅为串行方法的 $1/P$ ( $P$ 为工作站数), 从而可以解决大规模的电磁问题。

## 1 时域自适应串行算法

实施TD- AIM方法之前, 首先需要构建一个包含整个求解目标的长方体, 如图1所示, 对该长方体进行

\* 收稿日期: 2009- 05- 21

作者简介: 王文举(1979-), 男, 博士生。

均匀剖分得到一系列规则网格点。设在  $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$  方向上规则网格点间距分别为  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , 本文假定三个方向的格点间距均为  $\Delta s$ 。经典的 MOT 算法公式为<sup>[5]</sup>

$$\mathbf{Z}_0 \mathbf{I}_j = \mathbf{V}_j - \sum_{i=1}^j \mathbf{Z}_i \mathbf{I}_{j-i} = \mathbf{V}_j^{inc} - \mathbf{V}_j^{scat}, \quad j = 1, \dots, N_t \quad (1)$$

每一时间步  $j$ , 都需要计算  $\mathbf{V}_j^{scat}$ ,  $\mathbf{V}_j^{scat}$  仅与过去时刻电流值有关, 可以划分为远场电流基函数贡献和近场电流基函数贡献两部分, 近场部分使用基本 MOT 计算, 远场部分使用 FFT 计算, 以电场积分方程为例<sup>[3]</sup>:

$$\mathbf{V}_j^{scat} = \mathbf{V}_j^{scat, near} + \mathbf{V}_j^{scat, far} = \sum_{i=1}^j \mathbf{Z}_i^{near} \mathbf{I}_{j-i} + \sum_{i=1}^j \mathbf{Z}_i^{FFT} \mathbf{I}_{j-i} \quad (2)$$

$$\mathbf{Z}_i^{FFT} = \begin{bmatrix} \Lambda_x^T & & & \\ & \Lambda_y^T & & \\ & & \Lambda_z^T & \\ & & & \Lambda_{\phi}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G}_i^A \Lambda_x \\ \mathbf{G}_i^A \Lambda_y \\ \mathbf{G}_i^A \Lambda_z \\ \mathbf{G}_i^{\phi} \Lambda_{\phi} \end{bmatrix} + \Lambda_{\phi}^T \mathbf{G}_i^{\phi} \Lambda_{\phi} \quad (3)$$

其中,  $\Lambda_x, \Lambda_y, \Lambda_z, \Lambda_{\phi}$  是空间基函数投射矩阵,  $T$  代表矩阵转置,  $\mathbf{G}_i^A, \mathbf{G}_i^{\phi}$  表示转移矩阵。通过引入规则网格点, 并展开原始基函数电流, 建立基于空间规则网格上的点电流分布, 使原始基函数电流和规则网格点电流产生的远区场等效。如图 2 所示, 设  $M$  为展开阶数, 表示由  $(M+1)^3$  个规则网格点组成的一个小立方体作为一个展开单元, 根据原始基函数与这一系列小立方体中心的距离, 将其投射到距其最近的展开单元中, 原始基函数用辅助格点点源的线性组合来替代。映射矩阵(即辅助点源的系数)采用多级矩展开方式求得<sup>[6]</sup>。

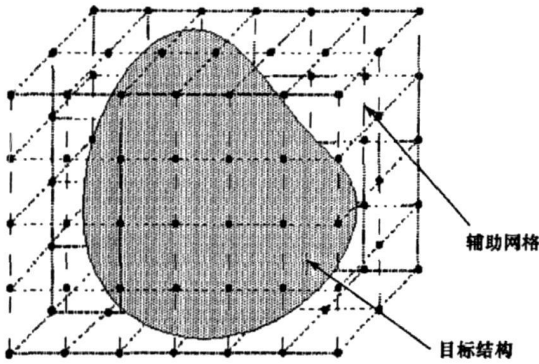


图 1 目标与辅助网格示意图  
Fig. 1 Target and the Cartesian grid

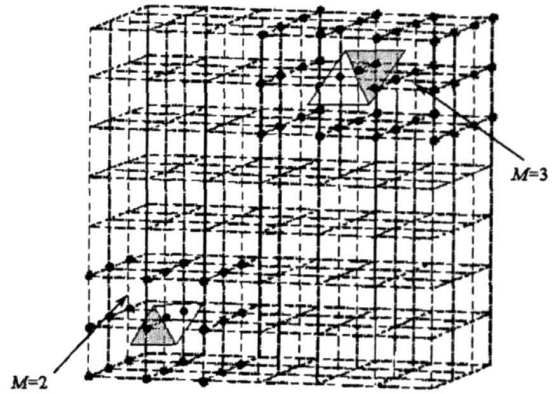


图 2 原始基函数与辅助格点点源对应关系  
Fig. 2 The basis functions and the expansion box

在每一个时间步, 目标表面上所有基函数电流通过投射求得规则网格点上的等效点电流值, 矢量势和标量势函数即可使用规则网格点源近似求解。

$$G_i^A(\mathbf{u}, \mathbf{u}') = \frac{\mu_0}{4\pi|\mathbf{r}_u - \mathbf{r}_{u'}|} \cdot \frac{\partial^2 T(i\Delta t - |\mathbf{r}_u - \mathbf{r}_{u'}|/c)}{\partial t^2}, \quad G_i^{\phi}(\mathbf{u}, \mathbf{u}') = \frac{1}{\epsilon} \frac{T(i\Delta t - |\mathbf{r}_u - \mathbf{r}_{u'}|/c)}{4\pi|\mathbf{r}_u - \mathbf{r}_{u'}|} \quad (4)$$

通过选择规则的网格点, 各点电流空间的距离满足一定的规律性, 因此在求解点电流之间相互作用时, 转移矩阵  $G_i^A(\mathbf{u}, \mathbf{u}')$  和  $G_i^{\phi}(\mathbf{u}, \mathbf{u}')$  都是 Toeplitz 分块矩阵<sup>[3-4]</sup>, 只需求出第一个格点  $\mathbf{u}_1$  和其他所有格点的相互作用, 就可以求出矩阵  $G_i^A(\mathbf{u}, \mathbf{u}')$  和  $G_i^{\phi}(\mathbf{u}, \mathbf{u}')$ 。式(2)中  $\mathbf{Z}_i^{FFT} \mathbf{I}_{j-i}$  的求解, 可根据 Toeplitz 分块矩阵的性质, 将 Toeplitz 分块矩阵拓展为循环矩阵, 循环矩阵和向量的乘法可以用卷积形式, 借助 FFT 和 IFFT 快速求解, 并且循环矩阵只需存储第一行数据, 因此提高了计算速度, 降低了存储量。

$\mathbf{Z}^{FFT}$  只适用于计算基函数对为远区元素的相互作用, 对于基函数对  $(m, n)$  为近区元素的情况, 其准确度不能满足要求, 因此需要直接计算  $\mathbf{Z}_{mn}$  并对  $\mathbf{Z}^{FFT}(m, n)$  的近区影响进行修正。

$$\mathbf{Z}_{j-i}^{near}(k, k') = \begin{cases} 0, & R_{k, k'} > \forall \Delta s \\ \mathbf{Z}_{j-i}(k, k') - \mathbf{Z}_{j-i}^{FFT}(k, k'), & R_{k, k'} \leq \forall \Delta s \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $Z_{j-i}(k, k')$  通过 MOT 求出,  $1 \leq j \leq 6$ 。  $R_{k, k'}$  表示场点的空间基函数  $k$  与源点的空间基函数  $k'$  分别所对应的展开单元  $C_k$  和  $C_{k'}$  中规则网格点之间的最小距离, 其定义如下<sup>[3]</sup>:

$$R_{k, k'} = \min_{u \in C_k, u' \in C_{k'}} \|r_u - r_{u'}\|_{\infty} = \min_{u \in C_k, u' \in C_{k'}} \max(|x_u - x_{u'}|, |y_u - y_{u'}|, |z_u - z_{u'}|) \quad (6)$$

## 2 并行算法的设计与分析

串行 TDAIM 算法的计算量主要集中在三个部分: 一是投射和插值的计算, 二是规则网格点标量势和矢量势的计算, 三是近场修正。投射、插值以及标量势和矢量势的计算都涉及全部的规则网格点, 如果采用并行计算, 其网格点的划分以及相互间的通信都很复杂, 因此针对投射矩阵、转移矩阵、近场修正三个部分进行并行计算。为了形象地描述计算过程, 如图 1 所示, 在目标所占的空间域建立的三维辅助直角坐标网格, 可以看成  $N_x \times N_y$  个柱子(柱子即平行  $z$  轴的线段), 每个柱子上有  $N_z$  个格点。每个柱子上的格点以及柱子之间的转移矩阵满足 Toeplitz 分块矩阵。针对计算转移矩阵, 本文以柱子为单位进行划分, 每个成员机负责部分柱子的转移矩阵。针对投射矩阵和近场修正, 以内边基函数为目标划分。算法实现步骤如下:

(1) 主机向成员机发布信息, 包括规则网格点信息、分组信息、内边基函数信息, 以及每个成员机负责的柱子范围和内边基函数的范围。

(2) 成员机收到信息后, 求出所有时间步本成员机所负责的柱子上的格点和第一个格点相互作用的转移矩阵, 并且把每个时间步、每个柱子上格点的转移矩阵进行 FFT 变换。计算完毕, 将转移矩阵 FFT 变换后的结果发送给主机。

(3) 主机接收每个时间步、每个柱子上转移矩阵 FFT 变换后的数据, 按时间步和柱子顺序写入硬盘。

(4) 成员机针对所负责的内边基函数, 求解每个内边基函数所对应的投射矩阵, 将投射矩阵发送给主机。

(5) 主机收到所有的投射矩阵, 把所有的内边基函数电流(初始电流系数为 0) 投射成规则网格点电流, 并对每个柱子上的规则网格点电流进行 FFT 变换。主机叠加求解历史时刻  $Z_i^{\text{FFT}} I_{j-i}$ 。

(6) 成员机对所负责的内边基函数进行近场修正计算,  $Z_i^{\text{near}} I_{j-i}$  结果发送给主机。

(7) 主机求解出下一步内边基函数电流系数, 发送给成员机。主机叠加求解历史时刻  $Z_i^{\text{FFT}} I_{j-i}$ , 成员机求解  $Z_i^{\text{near}} I_{j-i}$ , 循环下去求得所有的电流系数。

从上述并行设计方案中可以看出, 如果平均分配任务, 并行处理过程中各个处理器所需要的内存空间仅为串行算法的  $1/P$ , 计算量也为串行算法的  $1/P$ 。

## 3 .NET Remoting 分布式计算

并行计算首先要设计好并行的算法和通信模式<sup>[7-9]</sup>, 由于在局域网中进行并行计算, 所以采用主从式并行模式, 即由一个主机负责任务的分发和结果的归约, 将子任务分配到每个成员机上计算。图 3 为并行方法网络结构图, 图中组件功能如下:

(1) ServerLoader 用于加载提供可远程调用的对象, 指定调用使用的网络协议(局域网内一般使用 TCP 协议)和端口, 以便于在局域网中被调用, 然后侦听来自主机的请求, 在成员机上处理此请求并返回结果。即每个成员机都必须运行 ServerLoader 程序, 以向外界声明可被调用的对象(即 Remote- AIM. dll 中的对象)。

(2) Remote- AIM 是 .NET Remoting 中的实际被调用的远程对象, 被置于每个成员机上。它继承自 System. MarshalByRefObject, 这样的派生对象从来都不用离开它的应用域, 主机就可以通过代理对象调用远程对象的方法。它有三个方法分别用来计算转移矩阵、映射矩阵和近场修正。

(3) 主进程是并行线程分配与治理程序, 如: 任务池创建、任务分配、线程创建、同步线程、汇聚结果等。它包括以下几个对象: Computer- ArrayList、Agent- AIM、线程方法类、线程类等。Computer- ArrayList 即任务的数据结构, 包括成员机的 IP、Port、计算区间等; Agent- AIM 代理用于获取远程对象; 线程方法

类用于实现线程构造函数中 ThreadStart 委托指向的方法。图 4 为这几个对象的序列图,当远程对象的计算转移矩阵、映射矩阵和近场修正等方法被主机程序调用时,此要求即被发送到远程机器的 ServerLoader 对象,然后成员机的对象就会计算结果,最后将结果返回给主机。

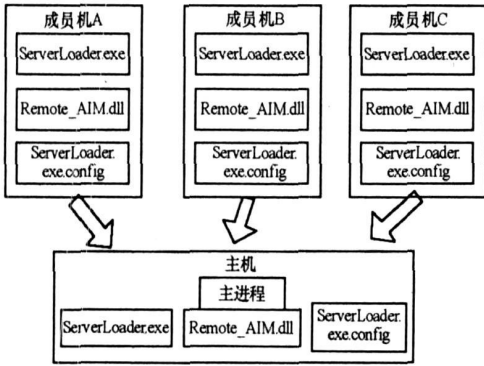


图 3 并行TDAIM 网络结构示意图  
Fig. 3 Parallel-TDAIM network structure

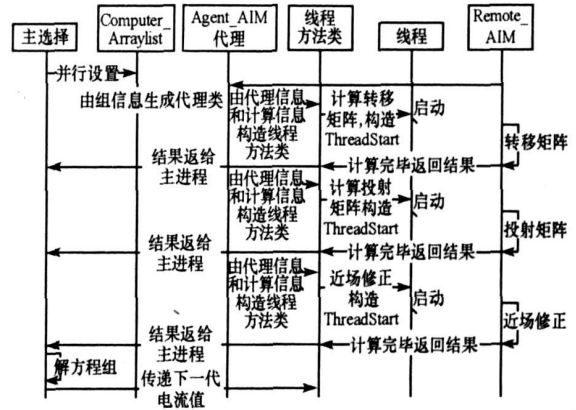


图 4 并行TDAIM 对象序列图  
Fig. 4 Parallel-TDAIM sequence diagram

### 4 验证测试

算例 1: 计算目标为一金属球锥体,其轴向沿 + Z 方向,球直径为 1.0m,圆锥轴线长度为 4.0m,采用 Gauss 脉冲平面波作为激励源。图 5(a) 为三角面元剖分后球锥模型,生成 2132 个三角面元,共需求解 3202 个未知数。采用串行 TDAIM 算法耗时约 5h,在局域网中 2 台电脑上分布式计算,采用并行算法耗时约 3h。图 5(b) 为时域抽取的该结构在 500MHz 频点时的 RCS, Parallel-TDAIM 算法计算结果与 MOM 结果吻合较好。

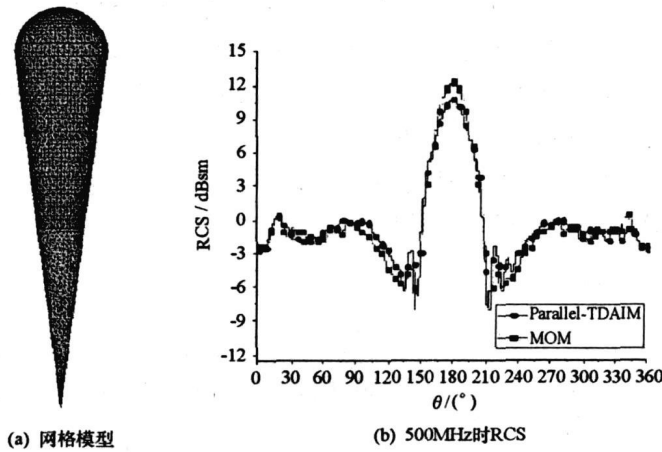


图 5 球锥网格模型及 500MHz 时 RCS  
Fig. 5 Grid model and RCS of 500MHz

算例 2: 计算目标为某型号舰船,其等尺寸简化模型如图 6 所示:舰体长 135m,宽 16m,高 25m,剖分该结构的三角面元数为 13 728 个,共需要计算 20 592 个未知数。激励源为调制 Gauss 脉冲,中心频率 30MHz,带宽 20MHz,从船头入射。时间步长为 4ns,求解 180 个时间步。计算资源为实验室局域网中的普通电脑,表 1 为不同节点数计算时间情况。图 6(a)~(d) 为 4 个不同时刻采样的目标表面电流瞬态分布情况,显示的是电流的  $\hat{x}$  方向分量(对  $\hat{x}$  分量取绝对值和对数值),可以形象地看出脉冲掠过舰船时,在舰船上感应出的电流极化方向分量峰值的流动。

表 1 计算舰船模型散射时资源使用情况

Tab. 1 The used resources of ship model scattering calculation

未知数	迭代次数	节点数	时间(s)
20 592	180	4	20 106
20 592	180	8	11 574

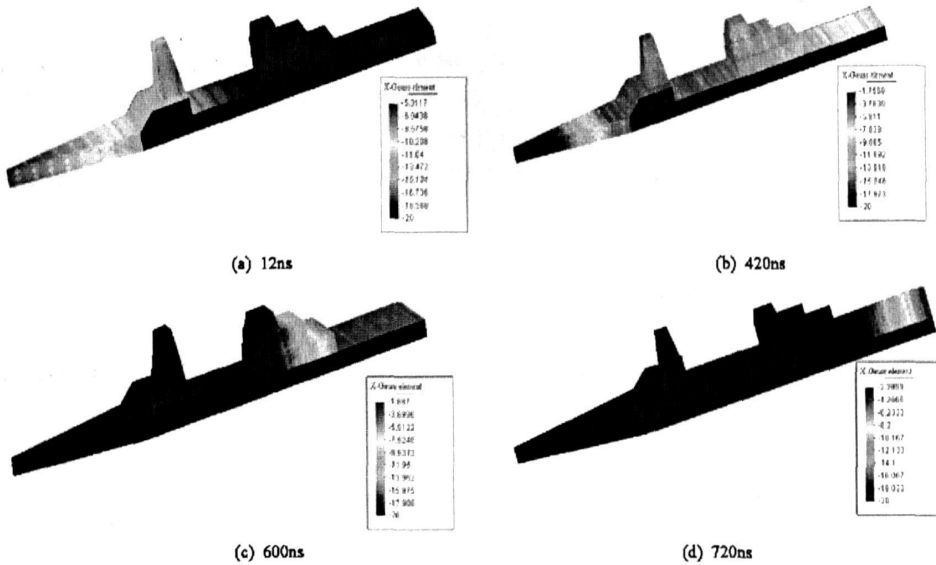


图 6 舰船表面各时刻电流分布

Fig. 6 Ship surface current distribution

## 5 结论

以时域自适应算法为核心, 在 .NET 开发平台上使用 C# 开发语言编程实现快速电磁仿真软件, 并且利用 .NET Remoting 的优势, 实现软件的分布式并行计算, 充分利用现有的网络计算资源, 高效解决工程实际问题。试验结果得出: 并行计算解决了串行方法不能解决的电大尺寸复杂目标电磁散射问题中大计算量和大存储量问题, 并行处理时每台成员机被占用的存储量仅为串行方法的  $1/P$  ( $P$  为工作站数)。

## 参考文献:

- [1] Pisharody G, Weile D S. Robust Solution of Time-domain Integral Equations Using Loop-tree Decomposition and Bandlimited Extrapolation [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2005, 53(6): 2089–2098.
- [2] Wildman R A, Pisharody G, Weile D S, et al. An Accurate Scheme for the Solution of the Time-domain Integral Equations of Electromagnetics Using Higher Order Vector Bases and Bandlimited Extrapolation [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2004, 52(11): 2973–2983.
- [3] Yilmaz A E, Jin J M, Michielssen E. Time Domain Adaptive Integral Method for Surface Integral Equations [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2004, 52(10): 2089–2098.
- [4] Yilmaz A E, Weile D S, Jin J M, et al. A Hierarchical FFT Algorithm for the Fast Analysis of Transient Electromagnetic Scattering Phenomena [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 2002, 50(7): 971–982.
- [5] 周东明. 时域电场积分方程中的奇异提取技术 [J]. 国防科技大学学报, 2006(6): 43–46.
- [6] Bleszynski E, Bleszynski M, Jaroszewicz T. AIM: Adaptive Integral Method for Solving Large scale Electromagnetic Scattering and Radiation Problems [J]. Radio Science, 1996, 31(5): 1225–1251.
- [7] Barnaly T. .NET 分布式编程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [8] MacDonald M. .NET 分布式应用程序 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.