

# FDTD 并行算法研究: 电和磁本构参数 均为各向异性情形

杨利霞<sup>1</sup>, 葛德彪<sup>1</sup>, 魏 兵<sup>1</sup>, 郑奎松<sup>1</sup>, 葛 宁<sup>2</sup>

(1 西安电子科技大学物理系, 陕西西安 710071; 2 清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 研究并实现了三维电与磁本构参数均为各向异性介质时的时域有限差分 (AN-FDTD) 并行算法。根据电磁各向异性介质时域有限差分 (AN-FDTD) 迭代式, 电场和磁场某一节点场值的计算均涉及到其周围邻近 28 个场分量节点值。详细分析了该情况下各向异性介质时域有限差分 (AN-FDTD) 并行算法中的数据通讯规律。通过采用相邻子域重叠半个网格的区域划分方式, 传递分界面两边相关节点的场值, 实现了局域网内各节点机的协同并行计算。数值计算结果表明了该算法和程序的正确性。

**关键词:** 各向异性介质; 各向同性介质; 并行算法; 时域有限差分 (FDTD) 方法

**中图分类号:** TN011.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 09-1703-05

## A Study of FDTD Parallel Algorithm for Anisotropic Media with Dyadic Permittivity and Permeability

YANG Lixia<sup>1</sup>, GE Debiao<sup>1</sup>, WEI Bing<sup>1</sup>, ZHENG Kuisong<sup>1</sup>, GE Ning<sup>2</sup>

(1 Dept. of Physics Xi'an University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2 Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 China)

**Abstract** A three-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) parallel algorithm for an anisotropic media (AN-FDTD parallel algorithm) is presented with dyadic permittivity and permeability on a distributed network by using the message passing module. According to the FDTD formulation of an isotropic medium, 28 nodes are involved when the electric or magnetic field component at one node is calculated. The FDTD iterative computation at each sub-domain can be progressing successfully providing the field component values of interrelated nodes near the sub-domain interface communicate appropriately. The distribution of 28 related nodes is indicated and the way of message passing for field components between sub-domains in AN-FDTD parallel computing are analyzed in details. The numerical results show the feasibility of presented scheme.

**Key words** an isotropic medium; dyadic permittivity and permeability parallel algorithm; finite-difference time-domain (FDTD) method

## 1 引言

近年来, 各向异性介质由于其微波电路和雷达吸波等方面的广泛和潜在应用得到关注。目前研究其电磁特性的数值方法主要有: 矩量法 (MOM)<sup>[1]</sup>, 时域有限差分 (FDTD)<sup>[2-4]</sup> 法等, 其中 FDTD 方法可以计算复杂形体和复杂介质的电磁散射, 是一种计算含各向异性介质目标电磁散射的良好方法。各向异性介质 FDTD (AN-FDTD) 和各向同性介质 FDTD (ISO-FDTD) 相比计算复杂度高, 所需内存量大, 计算耗时更长。并行计算是克服这一困难的有效途

径。

并行算法已进行了大量的研究<sup>[5-7]</sup>。最近几年, 许多学者将其与 FDTD 方法相结合成功地用于电磁场计算和仿真<sup>[8-11]</sup>。但已有文献都是 ISO-FDTD 的并行算法, 对于 AN-FDTD 并行算法的研究尚未见报道。另外, 关于各向异性介质的电磁分析, 通常考虑其电 (或磁) 参数为各向异性, 而磁 (或电) 参数为各向同性情形。本文详细分析了介质的电和磁本构参数均为各向异性情形下, 计算区域分割后的数据通讯规律, 研究并实现了并行 FDTD 算法。算例表明了本文方法的正确性。

## 2 电和磁本构参数均为各向异性时的 FDTD 迭代公式

各向异性介质中的 Maxwell 旋度方程为

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t - J_m = -\mu \cdot \partial H / \partial t - \sigma_m \cdot H \quad (1)$$

$$\nabla \times H = \partial D / \partial t + J = \epsilon \cdot \partial E / \partial t + \sigma \cdot E \quad (2)$$

其中  $\mu$ ,  $\epsilon$ ,  $\sigma$ ,  $\sigma_m$  为介质本构参数矩阵. 将式 (2) 对时间的导数取差分近似, 并整理得

$$E^{n+1} = (\epsilon / \Delta t + \sigma / 2)^{-1} \cdot (\epsilon / \Delta t - \sigma / 2) \cdot E^n + (\epsilon / \Delta t + \sigma / 2)^{-1} \cdot (\nabla \times H)^{n+0.5} \quad (3)$$

对式 (1) 作同样处理得到

$$H^{n+0.5} = (\mu / \Delta t + \sigma_m / 2)^{-1} \cdot (\mu / \Delta t - \sigma_m / 2) \cdot H^{n-0.5} + (\mu / \Delta t + \sigma_m / 2)^{-1} \cdot (\nabla \times E)^n \quad (4)$$

以上二式给出电磁场分量在时域逐步推进的计算. 采用 Yee 元胞为离散单元, 并令

$$\begin{aligned} (\epsilon / \Delta t + \sigma / 2)^{-1} \cdot (\epsilon / \Delta t - \sigma / 2) &= v \\ (\epsilon / \Delta t + \sigma / 2)^{-1} &= k \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} (\mu / \Delta t + \sigma_m / 2)^{-1} \cdot (\mu / \Delta t - \sigma_m / 2) &= v_m \\ (\mu / \Delta t + \sigma_m / 2)^{-1} &= k_m \end{aligned} \quad (6)$$

于是式 (3) 的  $E_z$  分量的 FDTD 迭代式为

$$\begin{aligned} E_z |_{i,j,k+0.5}^{n+1} &= [K_{31} \cdot (\partial H_x / \partial y |_{i,j,k+0.5}^{n+0.5} - \partial H_y / \partial z |_{i,j,k+0.5}^{n+0.5}) + K_{32} \cdot \\ &\quad \cdot (\partial H_x / \partial z |_{i,j,k+0.5}^{n+0.5} - \partial H_z / \partial x |_{i,j,k+0.5}^{n+0.5}) \\ &\quad + K_{33} \cdot (\partial H_y / \partial x |_{i,j,k+0.5}^{n+0.5} - \partial H_x / \partial y |_{i,j,k+0.5}^{n+0.5})] \\ &\quad + [v_{11} E_x |_{i,j,k+0.5}^n + v_{12} E_y |_{i,j,k+0.5}^n + v_{13} E_z |_{i,j,k+0.5}^n] \end{aligned} \quad (7)$$

以及式 (4) 中  $H_y$  分量的 FDTD 迭代式为

$$\begin{aligned} H_y |_{i+0.5,j,k+0.5}^{n+0.5} &= -[K_{m21} \cdot (\partial E_z / \partial y |_{i+0.5,j,k+0.5}^n \\ &\quad - \partial E_y / \partial z |_{i+0.5,j,k+0.5}^n) + K_{m22} \cdot \\ &\quad \cdot (\partial E_x / \partial z |_{i+0.5,j,k+0.5}^n - \partial E_z / \partial x |_{i+0.5,j,k+0.5}^n) \\ &\quad + K_{m23} \cdot (\partial E_y / \partial x |_{i+0.5,j,k+0.5}^n \\ &\quad - \partial E_x / \partial y |_{i+0.5,j,k+0.5}^n)] + (v_{m21} H_x |_{i+0.5,j,k+0.5}^{n-0.5} \\ &\quad + v_{m22} H_y |_{i+0.5,j,k+0.5}^{n-0.5} + v_{m23} H_z |_{i+0.5,j,k+0.5}^{n-0.5}) \end{aligned} \quad (8)$$

其他分量有类似形式. 注意到式 (7) 和式 (8) 离散后右端电场及磁场分量节点的位置并不正好位于 Yee 元胞上各分量节点处, 这时可采用空间线性插值过渡到各自节点处, 具体见文献 [12].

分析所得 FDTD 迭代公式表明, 对于各向异性介质 FDTD, 在计算  $E_z^{n+1}(i, j, k+0.5)$  时将涉及该节点邻近 28 个场分量节点, 如图 1 所示 (见下页). 这 28 个节点的分布沿  $z$  轴方向分为 5 层, 相邻两层之间间距为  $\Delta z / 2$ . 在常规 ISO-FDTD 情况,  $E_z^{n+1}(i, j, k+0.5)$  的计算只涉及  $z = (k+0.5)\Delta z$  层面上环绕  $E_z(i, j, k+0.5)$  的 4 个磁场分量节点. 但在 AN-FDTD 情况, 还涉及  $z = (k+1)\Delta z$  及  $z = k\Delta z$  层面上的 4 个电场分量和 4 个磁场分量节点, 以及  $z = (k+1.5)\Delta z$  及  $z = (k-0.5)\Delta z$  层面上的 4 个磁场分量节点, 总共

涉及 28 个邻近电磁场分量节点. 与此相似, 磁场分量  $H_y^{n+0.5}(i+0.5, j, k+0.5)$  的计算同样也牵涉到它周围 28 个电磁场分量节点, 如图 2 所示 (见下页). 显然, AN-FDTD 的迭代计算要比 ISO-FDTD 复杂得多. 同时表明, AN-FDTD 的迭代计算也具有局域性, 利用这一特性可以将计算区域划分为若干子域, 实行并行计算.

## 3 并行计算的子域划分及数据通讯规律分析

### 3.1 计算区域中子域的划分

在 AN-FDTD 中, 我们将整个计算区域分成两部分, 一部分是包含散射目标的各向异性介质区, 另一部分是目标区以外的各向同性介质区 (一般为真空). 将各向异性介质区置于连接边界以内几个网格处. 这样划分的好处是: 在各向同性介质区用 ISO-FDTD 进行计算, 而在各向异性介质区用 AN-FDTD 迭代式进行计算; 并且吸收边界、外推边界和连接边界都在各向同性介质区内. 因而, AN-FDTD 并行计算中连接边界、输出边界和吸收边界的处理可以运用 ISO-FDTD 并行计算同样方法来处理 [8].

并行 FDTD 计算区域的子域划分可以沿某一坐标轴进行, 也可以沿两个或三个坐标轴进行, 例如, 划分为  $1 \times 2 \times 2$  或  $2 \times 2 \times 2$  个子域. 在子域划分时采取如下约定 [9]: 子域分界面选择在切向电场节点所在处, 在子域界面上仅有电场切向分量和磁场法向分量; 相邻子域有 0.5 个网格的重叠; 子域编号沿坐标轴正向递增, 分界面上电磁场各分量的计算都在坐标轴的正向编号大的子域里进行. 根据上述约定, 并按照下述方式进行数据交换, 就可以保证各子域的迭代计算正确进行.

### 3.2 计算电场分量时的数据通讯规律分析

首先分析子域沿一个坐标轴进行分割的情况. 设沿  $y$  轴划分子域, 子域分界面平行于  $xOz$  面. 分界面上为电场切向分量  $E_z$  和  $E_x$ , 磁场法向分量  $H_y$ , 它们的计算都在右子域中进行. 在并行 AN-FDTD 中, 子域界面上和子域界面附近电场节点的计算分为以下几种情形:

(1) 分界面上的电场切向分量  $E_x$ ,  $E_z$  节点. 参照图 1, 它们的计算需要用到左子域中距分界面 0.5 个网格的电磁场分量节点值.

(2) 分界面附近距离距子域分界面 0.5 个网格的电场法向分量  $E_y$  节点. 参照图 2 根据对偶原理将图中  $H$  和  $E$  符号交换可得计算  $E_y$  时与其相关的 28 个节点图示. 因此, 距子域分界面右 (左) 面 0.5 个网格  $E_y$  节点的计算也要用到左 (或右) 面子域中距分界面 0.5 个网格的电磁场分量节点值, 其中左子域 0.5 个网格的  $E_y$  节点的计算还用到分界面上的电磁场各分量节点值.

如上所述, 为了保证右子域电场分量的计算, 需要将左侧子域中距子域分界面 0.5 个网格的电磁场分量传递给右子域. 同时, 为了保证左子域电场分量的计算还需要将右子域中距子域分界面 0.5 个网格内 (包括分界面上) 的

电磁场分量传递给左子域. 这是由于左子域中距分界面 0.5 个网格处电场法向分量  $E_y$  的计算还涉及到右子域中的电磁场分量节点值. 这一点与各向同性介质时不同, 并行 ISO-FDTD 不考虑后一情形.

### 3.3 计算磁场分量时的数据通讯规律分析

先分析子域沿  $y$  轴进行分割的情况. 这时分界面上为电场切向分量  $E_z, E_x$  和磁场法向分量  $H_y$ , 它们的计算都在右子域中进行. 子域界面上和子域界面附近磁场节点的计算分以下几种情形:

(1) 分界面上的磁场法向分量  $H_y$  节点. 参照图 2 它的计算需要用到左侧子域中距分界面 1 个网格内的电磁场分量节点值.

(2) 分界面附近距离距子域分界面 0.5 个网格的磁场切向分量  $H_x, H_z$  节点. 参照图 1 并根据对偶原理, 将图中  $E$  和  $H$  符号交换, 可得计算  $H_x$  时与其相关的 28 个节点图示. 因此, 距子域分界面 0.5 个网格  $H_x$  节点的计算需要用到分界面上的电磁场分量节点值.

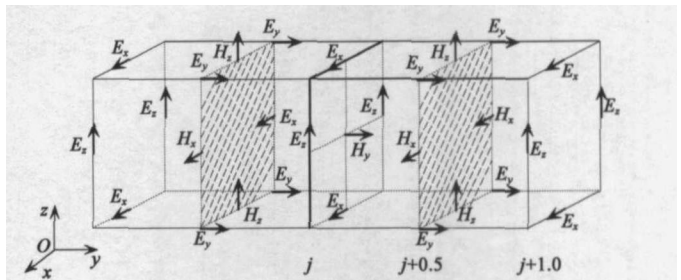


图 2 ANI-FDTD 中计算  $H_y^{n+0.5}(i+0.5j, k+0.5)$  时所需的邻近场分量节点

### 4 程序验证

根据上述电磁本构参数均为各向异性的 ANI-FDTD 及区域分解后的并行计算方法, 编写了相应程序. 由于目前公开文献上尚无此类算例, 以下给出两个算例作为本文方法的验证.

算例 1 单轴晶体二氧化钛球的双站 RCS 设球的半径为  $a$   $ka = 0.5$  其中  $k = 2\pi/\lambda$  为真空中波数, 所用波长  $\lambda = 0.03\text{m}$  二氧化钛球的相对介电系数张量的主对角线元素为  $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 5.913$   $\epsilon_{33} = 7.197$  非主对角线元素均为零.

设平面波为沿  $z$  轴入射, 电场沿  $x$  方向极化, 即  $E_i = \hat{e}_x \exp(ikz)$ , 求其双站 RCS 用本文所述 ANI-FDTD 并行计算, 区域分解为  $2 \times 2 \times 2$  个子域. 得到  $xoz$  (E 面) 和  $yoZ$  (H 面) 面上散

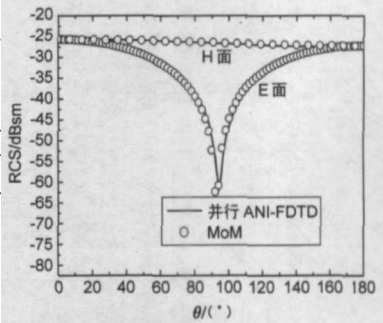


图 3 各向异性介质球的双站 RCS

射场双站 RCS 如图 3 图中实线为并行计算结果. 作为比较, 圆圈为矩量法 (MoM) 结果. 由图可见两者符合很好.

算例 2 双轴各向异性介质板有金属衬底时的单站 RCS 设介质板及金属衬底的尺寸分别为  $12\text{cm} \times 15\text{cm} \times 1.5\text{cm}$  和  $12\text{cm} \times 15\text{cm} \times 3.0\text{cm}$ , 主轴设为  $z$  轴, 主系和实验室系重合. 并行计算时区域分解为  $2 \times 2 \times 1$  个子域. 四台微机计算. 计算取空间和时间间隔为  $\delta = 0.15\text{cm}$   $\Delta t = \delta/2c$  程序运行总时间步为 800 球坐标系下的入射角为  $\theta = 0^\circ$   $\varphi = 0^\circ$ , 散射角  $\theta_s = 180^\circ$   $\varphi_s = 180^\circ$  (后向散射), 入射波为高斯脉冲  $E_i(t) = \exp[-4\pi(t-t_0)^2/\tau^2]$ , 其中  $t = 60\Delta t$   $t_0 = 0.81$  介质板的介电系数和磁导系数分别为

$$\epsilon = \epsilon_0 \begin{bmatrix} 3.250 & 0.217 & 0.375 \\ 0.217 & 2.438 & 0.758 \\ 0.375 & 0.758 & 3.313 \end{bmatrix}$$

$$\mu = \mu_0 \begin{bmatrix} 1.250 & 0.217 & 0.375 \\ 0.217 & 1.438 & 0.758 \\ 0.375 & 0.758 & 1.313 \end{bmatrix}$$

用 ANI-FDTD 并行计算得到后向 RCS 结果如图 4 所示.

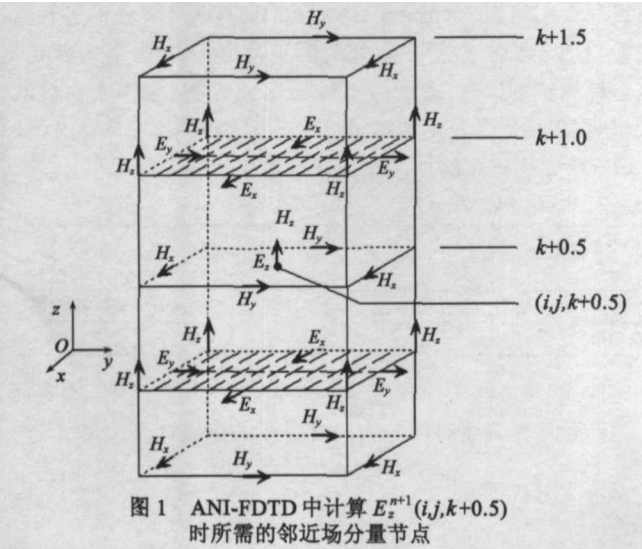


图 1 ANI-FDTD 中计算  $E_z^{n+1}(i, j, k+0.5)$  时所需的邻近场分量节点

如上所述, 为了保证左右两子域磁场分量的计算, 需要将左子域中距子域分界面 1 个网格内的电磁场分量传递给右子域. 同时, 还需要将子域分界面上的电磁场分量传递给左子域.

总之, ANI-FDTD 并行计算时需要将左子域中距子域分界面 1 个网格内的电磁场分量传递给右子域. 同时将右子域中距分界面 0.5 个网格内 (包括分界面上) 的电磁场分量传递给左子域, 就可以保证左右两子域电磁场各分量迭代的顺利进行. 上述数据传递规律同样适用于沿其他两坐标轴进行子域分割的情况.

如果子域划分是沿着两个或三个坐标轴进行, 这时不仅要在沿坐标轴相邻的子域之间进行电磁场分量的数据交换, 还要考虑斜对角方向相邻子域之间的数据交换. 这是由于 ANI-FDTD 中图 1 和图 2 所示 28 个相关节点的缘故.

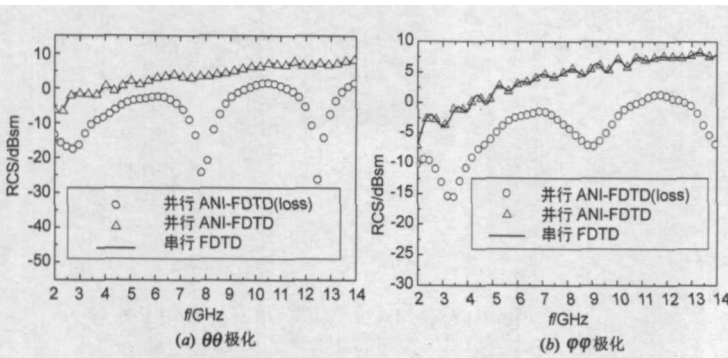


图 4 有金属衬底的各向异性介质板后向 RCS

其中(a)为  $\theta\theta$ 极化, (b)为  $\phi\phi$ 极化. 图中实线为 ANI-FDTD 串行计算结果, 三角形为并行计算结果, 两者一致. 另外, 作为比较, 还用并行程序计算了当此介质板为有耗情况下的后向散射. 设介质的电导率和磁导率张量分别为

$$\sigma = \begin{bmatrix} 0.3250 & 0.217 & 0.0375 \\ 0.0217 & 0.2438 & 0.0758 \\ 0.0375 & 0.0758 & 0.3313 \end{bmatrix} \text{ s/m}$$

$$\sigma_m = \begin{bmatrix} 0.1250 & 0.0217 & 0.0375 \\ 0.0217 & 0.1438 & 0.0758 \\ 0.0375 & 0.0758 & 0.1313 \end{bmatrix} \Omega/\text{m}$$

计算结果如图 4 中圆圈所示, 结果表明介质的损耗降低

表 1 ANI-FDTD 并行程序性能测试表

参与计算的计算机	1号 (串行)				1号、2号和3号			1号、2号、3号和4号		
	计算时间 (s)	计算时间 (s)	加速比	并行效率	计算时间 (s)	加速比	并行效率	计算时间 (s)	加速比	并行效率
结果	8026.21	4638.91	1.71	86.5%	3249.48	2.47	82.3%	2531.63	3.17	79.3%

从表 1 中的测试数据可以看出, 两台计算机的并行效率达到 86.5%, 随着参与计算的 PC 机 (或子域个数) 的增加, 并行效率有下降的趋势. 影响并行计算加速比的主要原因有以下几个方面: ①子域间数据通讯总量的大小. ②网络通讯性能的好坏. ③同步并行算法中同步原语的应用, 因为程序调用每个同步原语的执行时间相当于一组上百个数对的加法执行时间. ④负载平衡问题, 是指每个子域的计算量应与参与并行计算的 CPU 的性能达到相对平衡, 否则会在并行计算时间上造成额外地开销. 并行计算中的数据通讯时间主要来源于上述 ①至 ③的贡献, 另外, 表 1 中加速比及并行效率的测试数据同时也反映了并行计算中数据通讯时间的开销. 也就是说, 随着数据通讯时间占总计算时间的份额的增加, 会降低并行计算的加速比及并行效率.

### 6 结论

研究并实现了电磁本构参数均为各向异性情况下的三维 ANI-FDTD 网络并行算法. 分析了各向异性介质情况下 FDTD 迭代式, 讨论了 FDTD 并行计算时各子域间的数据通讯规律. 数值计算结果表明了所述数据通讯规律的正

了目标的 RCS

### 5 并行 ANI-FDTD 程序的加速比分析

设  $t_p$  是用  $p$  个处理器求解某一问题所需时间,  $t_1$  是用单处理器求解同一问题所需时间. 定义  $p$  个处理器的加速比为

$$S_p = t_1 / t_p \tag{9}$$

并行效率为

$$E_p = (S_p / p) \times 100\% \tag{10}$$

显然当  $S_p = p$  时并行算法有理想的加速比, 此时并行效率  $E_p = 100\%$ .

下面进行加速比的测试. 测试中共用了四台微机, 编号分别为 1 号机、2 号机、3 号机和 4 号机. 性能指标: 主频分别为 1.6GHz、1.7GHz、2.66GHz 和 2.66GHz. 内存均为 512Mb. 局域网的传输速率为 100Mbps. 操作系统为 Windows 2000. 消息传递的网络平台为 PVM. 计算目标为一块有金属衬底各向异性有耗介质板, 介质板和金属衬底的尺寸大小均为 36cm × 30cm × 6cm. FDTD 计算中的各种参数与上节算例 2 相同, 计算时间步为 400 步. 当用 2 台或 3 台计算机测试时, 采用沿  $x$  轴分区的方案, 当用 4 台计算机时, 采用沿  $x$  及  $y$  轴同时进行分区的方案. 经测试, ANI-FDTD 并行程序的加速比和并行效率如表 1 所示.

确性. 本文方法可应用于含有各向异性介质, 且介质电与磁参数均为张量时的电大尺寸目标的电磁计算.

### 参考文献:

[1] R. D. Gaglia, P. L. E. Uslenghi, R. S. Zich, Moment method with isoparametric elements for three-dimensional anisotropic scatterers [J]. Proc IEEE, 1989, 77: 750-760.

[2] J. Schneider, R. Luebbers, Application of FDTD to anisotropic materials [J]. IEEE AP-S International Symposium Digest, 1994, 3: 1422-1425.

[3] J. Schneider, S. Hudson, The finite-difference time-domain method applied to anisotropic material [J]. IEEE Trans Antenna and Propagation, 1993, AP-41(7): 994-999.

[4] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.

GE De-biao, YAN Yu-bo. Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves [M]. Xi'an Xidian University Press, 2005 (in Chinese).

[5] 李晓梅, 蒋增荣. 并行算法 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1992.

- LI Xiaomei, JIANG Zengrong. Parallel Algorithm [M]. Changsha: Hunan Science and Technique Press, 1992. (in Chinese)
- [6] W Barry, A Michael. Parallel programming techniques and applications using networked workstations and parallel computers[M]. Australia: Pearson Education, Inc, 1999.
- [7] 孙家旭, 张林波, 迟学斌. 网络并行计算与分布式编程环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1966
- SUN Jia-xu, ZHANG Lin-bo, CHIXue-bin. Parallel Computing and Distributive Program Environment[M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese)
- [8] C Guiffaut, K Mahdjoubi. A parallel FDTD algorithm using the MPI library [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, AP-43(2): 94-103.
- [9] 闫玉波, 葛宁, 郑美艳, 葛德彪, 田春明. 网络并行 FDTD 方法分析电大目标电磁散射 [J]. 电子学报, 2003, 31(6): 821-824
- YAN Yu-bo, GE Ning, ZHENG Meiyang, GE Debiao, TIAN Chunming. Analysis of large-scale EM scattering problems using the parallel FDTD on a PC cluster system [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(6): 821-824. (in Chinese)
- [10] 薛正辉, 杨仕明, 高本庆, 张泽杰. FDTD 算法的网络并行运算实现 [J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1839-1843
- XUE Zhenghui, YANG Shiming, GAO Benqing, ZHANG Zhejie. A parallel implementation strategy for the FDTD algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1839-1843. (in Chinese)
- [11] T Luciano. E Alessandra. Grid computing for electromagnetics[M]. Boston, London: Artech House, 2004.
- [12] 魏兵. 各向异性介质电磁散射及参数反演研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003
- WEI Bing. Study of electromagnetic scattering and reconstruction for anisotropic media [D]. Xi'an Xidian University, 2003. (in Chinese)

#### 作者简介:



杨利霞 男, 1975 年生, 西安电子科技大学无线电物理专业博士研究生。现主要从事电磁场数值计算, 复杂介质的电磁散射, 网络并行算法等方面的研究工作。

E-mail: Lixiyang@yeah.net



葛德彪 男, 1938 年生, 西安电子科技大学物理系教授、博士生导师, 中国电子学会会士。主要研究方向为电磁散射和逆散射、电磁场理论及计算电磁学。