

大型波导缝隙阵辐射特性的快速分析

张 玉, 梁昌洪

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 针对矩量法分析大型波导缝隙阵时矩阵填充和方程求解速度慢的问题, 本文首先给出了负载均衡的并行计算方案, 解决了阻抗矩阵填充非常慢这一困难, 接着提出了一种新的“缝隙邻居”预条件方法, 因其具有从物理上将基函数之间的近场作用充分考虑到预条件矩阵中的优点, 故可将典型共轭梯度法求解矩量法分析缝隙阵所得矩阵方程的收敛速度提高了约一个数量级, 从而实现了大型缝隙阵列的快速仿真. 数值实例表明本文方法的高效性和准确性.

关键词: 波导缝隙阵; 矩量法; 并行计算; 预条件共轭梯度法

中图分类号: TN823.124 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2005) 09-1623-03

Fast Analysis of Radiation of Large Slotted Waveguide Array

ZHANG Yu, LIANG Chang-hong

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: When the method of moment is employed to analyze large slotted waveguide arrays, filling the impedance matrix and solving the matrix equation are very time consuming. In this paper, a load balancing parallel scheme is first presented to accelerate the filling process. Then, a novel preconditioner - SN (slot neighbour) preconditioner is introduced which boosts the advantage of giving adequate consideration to the near field interaction between basis functions when the preconditioning matrix is generated. Numerical results demonstrate the validity and efficiency of the proposed algorithms and show that the SN preconditioned CG (conjugate gradient) can significantly accelerate the solution by an order of magnitude for large slot arrays.

Key words: slotted waveguide array; method of moment; parallel computation; preconditioned conjugate gradient method

1 引言

波导缝隙天线阵已被广泛地应用于雷达和通讯领域. 随着计算机科技的发展, 波导缝隙天线阵的数值 CAD 设计得以实现. 国内外许多研究者已采用矩量法对缝隙和缝隙阵进行了分析^[1-4]. 然而, 波导缝隙内部和缝隙腔体格林函数的求和特性, 使得矩量法在分析大型缝隙阵时, 矩阵填充速度很慢, 若每个缝隙的长度和偏置均不同, 则对称性无法利用, 这将使得工程上采用矩量法考虑缝隙互耦后进行方向图综合非常不容易实现. 针对这个问题, 本文首先研究 MPI 基础的并行计算技术^[5]加速矩量法矩阵方程构造过程.

另一方面, 对于典型大阵列, 全域基矩量法产生的矩阵规模却不是很大, 研究表明^[6], 并行高斯消去法求解小规模矩阵方程的效率不高. 为了既保持并行矩阵填充的优势, 又避免并行求解矩阵方程的不足, 本文针对全域基矩量法分析缝隙阵提出了一种新的“缝隙邻居”(Slot Neighbour 以下简称 SN)预条件方法来加速 CG 方法求解矩阵方程, 在单机上将求解效率提高了一个数量级.

这种“并行填充”结合“快速求解”的分析方案, 将矩阵填充与矩阵方程求解两个关键的环节高效率地完成, 从而大幅度地缩短了分析时间.

2 矩量法分析

如图 1 所示, 假设有 N_1 根波导, 每根波导上刻 N_2 个裂缝(波导上缝的个数也可以不相等). 任意两个缝间的横向间距及纵向间距用 d_x 和 d_y 表示, 波导壁为理想导体, 波导的内尺寸宽边为 a , 窄边为 b , 波导侧面公共壁厚为 d . 所有缝位于厚度为 t 的同一无穷大理想导体平面上, 缝长为 L_i , 宽为 W_i , 假设所有缝都为窄缝, 即满足 $L_i/W_i > 10$, 缝离波导宽边中心线的偏置为 x_i .

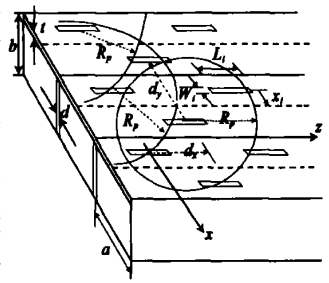


图 1 裂缝阵列坐标系

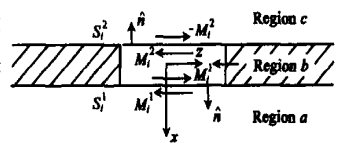


图 2 裂缝示意图

采用矩量法分析时通常把缝隙天线结构分成波导内部区域 a 、腔体 b 和半空间 c 三个区域, 如图 2 所示, M_i^1, M_i^2 分别为下缝隙

口面 S_i^l 和上缝隙口面 S_i^s 上的磁流分布.

对第 i 号缝, 采用全域正弦基函数将 S_i^s 面上的磁流 M_i^s 展开成如下形式:

$$M_i^s = \sum_{s=1}^{N_b} d_{is}^j f_{is}(r), r \in S_i^s, j = 1, 2; i = 1, 2, \dots, N_s \quad (1)$$

式中, $d_{is}^j (s = 1, 2, \dots, N_b)$ 为第 i 个缝上 S_i^s 面上磁流 M_i^s 的展开系数; N_b 为基函数展开个数.

采用伽略金法, 即可得 $N_d N_b \times N_d N_b (N_s = N_1 \times N_2, N_a = 2N_s)$ 的矩阵方程^[4]:

$$\begin{bmatrix} [Z_{11}] & [Z_{12}] & \cdots & [Z_{1N_a}] \\ [Z_{21}] & [Z_{22}] & \cdots & [Z_{2N_a}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [Z_{N_a 1}] & [Z_{N_a 2}] & \cdots & [Z_{N_a N_a}] \end{bmatrix} \cdot [I] = [V] \quad (2)$$

式中 $[Z_{ij}] (i = 1, 2, \dots, N_b; j = 1, 2, \dots, N_b)$ 为 $N_b \times N_b$ 阶子矩阵.

3 并行填充矩阵

由文献[1~4]可知, 波导区域 a 和缝隙腔体区域 b 内的格林函数具有求和特征, 这必将导致前述矩阵方程的构造计算量很大. 数值计算结果表明, 即便是采用 P4 2.0GHz CPU 的 PC 机, 格林函数展开项仅取为 25 项时, 计算 400 单元的波导宽边缝隙阵列构成的矩量法矩阵也需要约 11 分钟. 本节采用信息传递接口 (MPI) 基础的并行计算技术来解决大计算量的问题, 所采用的 MPI 工作网络是由几台具有 2GHz CPU 的 PC 机通过 10/100M 自适应网卡连接起来的普通 WindowsNT 局域网.

3.1 并行矩量法

我们以 4 个进程为例说明并行矩量法的矩阵填充, 如图 3 所示, 按照缝隙区域划分计算任务, 则概括起来并行矩量法有以下步骤: (1) MPI 初始化; (2) 为每个进程分配要计算的缝隙范围; (3) 各个进程计算自己被要求的范围内的

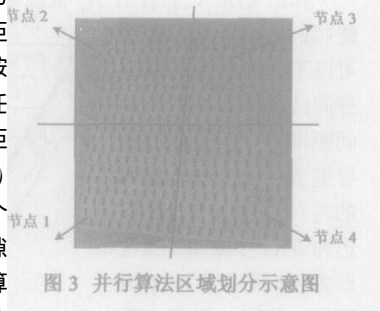


图3 并行算法区域划分示意图

缝隙上下表面基函数与天线阵中所有缝隙上下表面函数相互作用产生的阻抗矩阵元素; (4) 各个进程计算自己被要求的范围内的缝隙对应的激励电压向量元素; (5) 所有进程都将该进程计算的阻抗矩阵、电压矩阵传递给指定进程; (6) 在指定进程内快速求解矩阵方程; (7) 各进程计算部分角域辐射方向图, 传给指定进程输出; (8) MPI 终止.

3.2 并行矩阵填充实例

按照缝隙区域划分任务, 如果把计算区域相等划分, 则各个处理器的计算任务是相同的, 因而负载均衡也就可以得到保障. MPI 并行计算时每一次进行矩阵填充时所用时间 t 的理论模型为:

$$t = (p-1)t_{\text{Comm}} + t_{\text{cal}}, t_{\text{cal}} = T/p \quad (3)$$

式中 P 为 PC 节点的个数, t_{Comm} 为传递数据所用的时间, t_{cal} 为并行计算时间, T 为单机计算时间.

前述普通 PC 机 NT 网络中点对点通信传输 4M 字节数据所需要时间的测试值 $t_{4M} \approx 0.5s$, 一般情况下有 $t_{\text{Comm}} < t_{4M}$, 所以传递时间相对计算时间来说非常少, 故可将计算时间近似为: $t \approx t_{\text{cal}}$, 显然, 矩阵填充时间将随着 CPU 的增多大大减少.

表 1 给出了矩量法分析一个典型的工作频率为 6.8GHz 的 400 单元波导宽边缝隙阵列的矩阵构造用时情况. 该阵列尺寸取为 640mm × 640mm, 缝隙长度为 23.5mm, 缝隙宽度为 4.8mm, 缝隙偏离中心为 4.0mm, 波导宽 31.6mm, 波导高 7.6mm, 波导壁厚为 0.8mm.

由表 1 可见, 在并行 MoM 在矩阵填充时, 由于几乎无需数据传递, 矩阵构造所需的时间随着 PC 个数的增加, 将迅速减少, 2 个 PC 节点可将计算时间节约 49.8%, 接近理想值 50%, 4 个 PC 节点可将计算时间节约 74.8%, 接近理想值 75%, 这与前面

表 1 并行与串行填充矩阵用时比较

名称	节点数	填充时间*	节约比例
MoM	1	11分9秒	0
P MoM	2	5分36秒	49.8%
P MoM	4	2分48秒	74.8%

(* 填充时间包含了数据传递时间; 波导和缝隙区域的格林函数均仅取 25 项来展开.)

4 快速求解矩阵方程

4.1 预条件矩阵的构造

假设 $[P]$ 为 $N_d N_b \times N_d N_b$ 的预条件矩阵, 我们的目标是使得为求 $[I]$ 而求解 $[P][Z][I] = [P][V]$ 比求解 $[Z][I] = [V]$ 的迭代步数要明显减少, 同时要求构造 $[P]$ 的方法要非常高效, 以节省整体计算时间.

以求解 $[P]$ 的第 M 行的非零元素为例, SN 预条件矩阵的构造过程如下:

(1) 首先确定 $Z_{m,m}$ 属于哪个缝隙. 假设 $Z_{m,m}$ 对应于第 n 个缝隙, 如图 1 所示.

(2) 为第 n 个缝隙创建一个邻居列表. 根据 R_p 求出第 n 个缝隙 (包括自身在内) 的所有 K 个邻居缝隙, 由图 1 可知, K 的典型值为 7, 将这些缝隙进行编号 (1, 2, ..., K). R_p 通常取值于 $0.50\lambda_g$ 与 $1.0\lambda_g$ 之间 (λ_g 此处表示波导波长) 以保证 $[Z]$ 的主要信息量可以被考虑到矩阵 $[P]$ 中.

(3) 为这 K 个相邻的缝隙的 $2N_b K$ 个基函数创建一个列表——基函数邻居列表. 也对它们进行依次编号.

(4) 构造一个 $2N_b K \times 1$ 的列向量 $[e_m]$. 如果基函数邻居列表中的第 L 个基函数与全局标号的第 M 个基函数对应, 则将 $[e_m]$ 的第 L 个元素设置为 1, 其他为 0.

(5) 求解下面的矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} [Z_{s_1^1, 1}] & [Z_{s_1^1, 2}] & \cdots & [Z_{s_1^1, K}] \\ [Z_{s_2^1, 1}] & [Z_{s_2^1, 2}] & \cdots & [Z_{s_2^1, K}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [Z_{s_K^1, 1}] & [Z_{s_K^1, 2}] & \cdots & [Z_{s_K^1, K}] \end{bmatrix} [P_m] = [e_m] \quad (4)$$

式中 $[Z_{sp,q}^n]$ 是一个 $2N_b \times 2N_b$ 的子矩阵, 代表了第 n 个缝隙的邻居列表中的第 p 个和第 q 个缝隙上的基函数的作用. 如果它们分别与全局的第 i 个和第 j 个缝隙对应, 则 $[Z_{sp,q}^n]$ 就相当于矩阵 $[Z]$ 中的 $[Z_{2i-1,2j-1}]$, $[Z_{2i-1,2j}]$, $[Z_{2i,2j-1}]$, $[Z_{2i,2j}]$. $[P_m]$ 是待求的 $2N_b K \times 1$ 列向量, 它的元素构成了 $[P]$ 的第 M 行的非零元素.

(6) 求解出 $[P_m]$ 的每一个元素在矩阵 $[P]$ 中对应的列号. 在第三步中创建的基函数邻居列表中, 每一个展开函数都对应于一个整体的编号. 我们假设基函数邻居列表中的第 S 个基函数与全局编号的第 T 个基函数对应, 那么记录列号 T , 行号 m 及 $P_m(S)$.

(7) 重复 $N_a N_b$ 次上述过程, $[P]$ 的所有非零元素都可以被求出.

考虑内存需求, 大概需要存储 $N_a N_b$ 个 $[P]$ 中的非零元素. 应该指出, 在实际编程时, 由于预条件矩阵 $[P]$ 的大多数元素都为 0, 因此在每一步迭代过程中, 可采用稀疏矩阵的相关算法完成预条件矩阵相关乘法运算, 这只需要很少的额外计算量.

4.2 矩阵方程求解实例

将上述 SN 预条件方法与 CG-NORM 迭代法^[7]相结合, 可形成 SN Preconditioned CGN (SN-PCGN) 算法. 下面对矩量法分析两个缝隙阵的矩阵方程进行实例求解. 这两个阵列除单元个数外其它参数均相同, 具体见 3.2.

表 2 给出了 SN-PCGN 方法的迭代步数情况, 通过对比可发现 SN-PCGN 算法与普通 CGN 方法相比, 收敛速度提高大约一个数量级.

表 2 SN-PCGN 算法应用于波导缝隙阵的迭代次数

$N_s = N_1 \times N_2$	未知量	迭代次数		收敛加速
		CG	SN-PCGN	
10×10	600	249	25	9.96
20×20	2400	351	36	9.75

利用 SN-PCGN 算法在 P4 2.0GHz 的 PC 机上花费的求解方程时间由约 3 分钟缩短为约 18 秒, 求解效率提高约 10 倍. 图 4 中具体给出了 CG 迭代残差与迭代步数的关系.

图 5 给出了 3.2 节 400 单元大型缝隙阵的

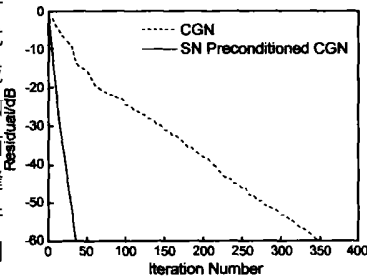


图 4 残差与迭代步数的关系

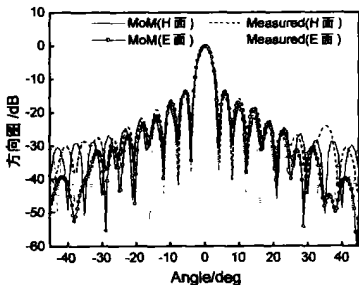


图 5 辐射方向图

辐射方向图, 可见本文方法所得方向图与测试结果吻合良好.

5 结语

本文在 PC 集群中实现了矩量法矩阵的 MPI 并行填充, 结合一种新的 SN 预条件方法实现了大型缝隙阵的快速计算, 为数值优化设计大型缝隙阵提供了切实可行的分析方法.

参考文献:

[1] R W Lyon, A J Sangstar. Efficient moment method analysis of radiating slots in a thick-walled rectangular waveguide[J]. IEE Proceedings Part H: Microwaves Optics and Antennas, 1981, 128(4): 197-205.

[2] S R Rengarajan. Compound radiating slots in a broad wall of a rectangular waveguide[J]. IEEE Trans on AP, 1989, 36(9): 1116-1123.

[3] H Y Yee. The design of large waveguide arrays of shunt slots[J]. IEEE Trans on AP, 1992, 40(7): 775-781.

[4] 李建瀛, 梁昌洪. 矩形波导纵缝阵列的矩量法分析与设计[J]. 电波科学学报, 1998, 13(4): 428-432.

Li Jianying, Liang Changhong. Moment method analysis of rectangular waveguide longitudinal slot arrays[J]. 1998, 13(4): 428-432. (Chinese Source)

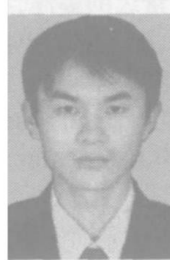
[5] 都志辉. 高性能计算并行编程技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

[6] 张玉, 苏涛, 翟会清, 梁昌洪. PC 群集系统中并行矩量法研究[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1368-1371.

ZHANG Yu, SU Tao, ZHAI Huiqing, LIANG Changhong. Study on applications of parallel MoM on PC clusters[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1368-1371. (Chinese Source)

[7] T K SARKAR, E ARVAS. On a class of finite step iterative methods (Conjugate Directions) for the solution of an operator equation arising in Electromagnetics[J]. IEEE Trans on AP, 1985, 33(10): 1058-1066.

作者简介:



张 玉 男, 1978 年 4 月出生于安徽淮北, 2004 年 6 月于西安电子科技大学获电磁场与微波技术专业工学博士学位. 现工作于西安电子科技大学工程学院, 主要从事电磁兼容、并行电磁计算等研究工作.

E-mail: yuzhang@mail.xidian.edu.cn.



梁昌洪 男, 1943 年 12 月出生于上海, 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师, 中国电子学会会士、IEEE Senior member, 2003 年获首届全国教学名师奖, 研究方向包括计算场论、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等方面.