

## 使用 AIM 快速计算微带阵列的电特性

贺秀莲<sup>①</sup> 高文军<sup>①</sup> 纪奕才<sup>②</sup> 雷宏<sup>①</sup> 龚书喜<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

<sup>②</sup>(西安电子科技大学天线与电磁散射研究所 西安 710071)

**摘要:** 巨大的存储量和计算量通常使得矩量法无法分析大型微带阵列天线的电特性, 而自适应积分方法(AIM)能够大大减少矩量法需要的存储量和计算量。该文使用 AIM 计算了微带贴片阵列的散射特性和微带阵列天线的辐射特性。计算结果显示: AIM 能够以较少的存储量快速得到微带阵列的电特性。

**关键词:** 微带阵列; 自适应积分方法(AIM); 离散复镜像方法; 快速傅里叶变换

**中图分类号:** TN823

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)01-0238-03

## Fast Computation of Electrical Property of Microstrip Array with AIM

He Xiu-lian<sup>①</sup> Gao Wen-jun<sup>①</sup> Ji Yi-cai<sup>②</sup> Lei Hong<sup>①</sup> Gong Shu-xi<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Research Inst. of Antennas and EM Scattering, Xidian Univ, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Large memory and computation time requirement always make the electrical property of microstrip array can not be evaluated with MOM, however, Adaptive Integral Method (AIM) can reduce memory and computation time greatly. Scattering of microstrip patch array and radiation of microstrip antenna array are computed with AIM, and computation results show that electrical property of microstrip antenna can be obtained fast with less memory with AIM.

**Key words:** Microstrip array; Adaptive Integral Method(AIM); DCIM; Fast Fourier Transform(FFT)

### 1 引言

微带天线是一种重量轻、剖面低易于集成的新型天线, 已经广泛应用于移动通信、机载天线等领域。格林函数是使用矩量法计算微带天线的一个棘手问题, 离散复镜像方法(DCIM)<sup>[1, 2]</sup>解决了微带天线格林函数的求解问题。使用矩量法能够快速求解小型微带天线问题, 但是在使用矩量法<sup>[3]</sup>计算大型微带阵列天线时需要很长的时间和较多的计算机内存, 是分析设计微带阵列天线的障碍, 研究加快微带阵列天线计算速度的快速算法是很有意义的工作。

Wang<sup>[4]</sup>使用 BCG-FFT 方法计算了微带阵列天线的特性。在这种方法中, 格林函数的卷积特性使得使用快速傅里叶变换能加快矩阵矢量相乘的速度, 从而提高使用矩量法分析微带阵列天线的速度。但是 FFT 需要使用均匀的网格来划分待求目标, 当待求目标不规则时, 就需要使用 AIM 来分析。矩量法矩阵填充需要的存储量是  $O(N^2)$ , 矩阵求逆需要的计算量是  $O(N^3)$ , 而 AIM 需要的存储量是  $O(N \log N)$ , 每次矩阵矢量相乘的运算量是  $O(N \log N)$ , 因此使用 AIM 可以减少所需的存储量和计算量。本文将自适应积分算法与基于混合位积分方程的空间域矩量法相结合, 快速地计算了大型微带贴片阵列的散射特性和大型微带阵列天线的辐射

特性。

### 2 理论分析

(1)混合位积分方程(MPIE) 本文采用 MPIE 来分析微带贴片天线的特性, 假设入射平面波  $\mathbf{E}^i$  照射在微带贴片天线上, 使用金属表面切向电场为零的边界条件可以得到:

$$-\hat{n} \times [\mathbf{E}^i(\mathbf{r}) + \mathbf{E}^r(\mathbf{r})] = \hat{n} \times \left[ -j\omega\mu_0 \mathbf{A}(\mathbf{r}) + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla \Phi(\mathbf{r}) \right],$$

$\mathbf{r}$ 在 $S$ 上

(1)

其中  $\mathbf{E}^r$  是移去贴片之后接地介质板产生的反射场,  $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ ,  $\Phi(\mathbf{r})$  分别是矢量位和标量位。

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \int_S \bar{G}^A(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') ds'$$
(2)

$$\Phi(\mathbf{r}) = \int_S G^\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \nabla' \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') ds'$$
(3)

式中  $\mathbf{J}$  是贴片上的未知电流,  $\bar{G}^A$  和  $G^\Phi$  分别是矢量位和标量位的空间域格林函数。

(2)格林函数 空间域格林函数  $G^{A,\Phi}$  是通过频谱格林函数  $\tilde{G}^{A,\Phi}$  求汉科尔反变换得到的:

$$G^{A,\Phi}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{G}^{A,\Phi}(k_\rho, z, z') H_0^{(2)}(k_\rho |\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}'|) k_\rho dk_\rho$$
(4)

式(4)含有计算较为耗时的索末菲尔德积分, 使用 DCIM<sup>[1, 2]</sup>, 能够快速求出空间域格林函数。DCIM 首先从频谱格林函数中去除表面波分量, 通过 GPOF<sup>[5]</sup>方法使用指数函数表示剩余的分量。随后使用索末菲尔德恒等式得到空间域格林函数<sup>[1, 2]</sup>。

(3)AIM 算法 使用矩量法求式(1)时, 首先把微带贴片划分成三角形面元, 然后使用 RWG 基函数  $\mathbf{f}_n(\mathbf{r}')$  [6]表示贴片上的电流分布, 最后使用伽略金法得到阻抗矩阵方程  $[Z][I]=[V]$ 。其中, 阻抗矩阵元素可以表示为

$$Z_{mn} = -j\omega\mu_0 \int_{S_m} \int_{S_n} \left[ \mathbf{f}_m(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{f}_n(\mathbf{r}') G_{xx}^A(\mathbf{r}, \mathbf{r}') - \frac{1}{k_0^2} (\nabla \cdot \mathbf{f}_m(\mathbf{r})) (\nabla' \cdot \mathbf{f}_n(\mathbf{r}')) G^\varphi(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \right] ds' ds \quad (5)$$

在使用 AIM 加速矩阵矢量相乘速度之前, 使用一个矩形包围微带结构, 该矩形上均匀地分布着  $N_x \times N_y$  个栅格点, 随后用环绕在基函数中心的  $(M+1)^2$  个栅格点上的  $\delta$  函数的线性组合来近似表示  $\mathbf{f}_n(\mathbf{r}')$  和  $\nabla' \cdot \mathbf{f}_n(\mathbf{r}')$  [7]。如果用  $\psi_n(\mathbf{r}')$  表示  $\mathbf{f}_n(\mathbf{r}')$ , 则有

$$\psi_n(\mathbf{r}') = \sum_{q=1}^{(M+1)^2} \delta(x-x'_{nq}) \delta(y-y'_{nq}) [A_{nq}^x \hat{x} + A_{nq}^y \hat{y}] \quad (6)$$

其中  $\mathbf{r}'_{nq}$  是  $(M+1)^2$  个栅格点的位置矢量。

若令  $\psi_n^d(\mathbf{r}) = \nabla \cdot \mathbf{f}_n(\mathbf{r}')$ , 则有

$$\psi_n^d(\mathbf{r}) = \sum_{q=1}^{(M+1)^2} \delta(x-x'_{nq}) \delta(y-y'_{nq}) A_{nq}^d \quad (7)$$

求出对应的展开系数  $A_{nq}^{x,y}$   $A_{nq}^d$  [7]以后, 式(5)中的矩阵元素可以改写为

$$Z_{mn}^{\text{far}} = -j\omega\mu_0 \sum_{u=1}^{(M+1)^2} \sum_{v=1}^{(M+1)^2} [(A_{mu}^x A_{nv}^x + A_{mu}^y A_{nv}^y) G_{xx}^A(\vec{r}_u, \vec{r}'_v) - \frac{1}{k_0^2} A_{mu}^d A_{nv}^d G^\varphi(\vec{r}_u, \vec{r}'_v)] \quad (8)$$

当检验函数和基函数距离很远时, 式(8)中的  $Z_{mn}^{\text{far}}$  能够准确地表示式(5)中的矩阵元素  $Z_{mn}$ 。如果用矩阵表示, 可以得到远区矩阵  $[Z]^{\text{far}}$

$$[Z]^{\text{far}} = -j\omega\mu_0 \left\{ [A_x][G_{xx}^A][A_x]^T + [A_y][G_{xx}^A][A_y]^T - \frac{1}{k_0^2} [A_d][G^\varphi][A_d]^T \right\} \quad (9)$$

其中  $[A_x]$ ,  $[A_y]$ ,  $[A_d]$  是每一行仅含有  $(M+1)^2$  个元素的稀疏矩阵。当检验函数和基函数距离很近时,  $Z_{mn}^{\text{far}}$  不能够准确地表示矩阵元素  $Z_{mn}$ , 引入近区矩阵  $[Z]^{\text{near}}$ , 把阻抗矩阵分为两部分, 可得

$$[V] = [Z][I] = [Z]^{\text{near}}[I] + [Z]^{\text{far}}[I] \quad (10)$$

采用迭代方法求解上述矩阵方程, 同时利用格林函数  $[G_{xx}^A]$ ,  $[G^\varphi]$  的卷积特性, 使用 FFT 来加速上式右边第 2 项的矩阵矢量相乘的速度。

$$[Z]^{\text{far}}[I] = -j\omega\mu_0 \left\{ [A_x] \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}(G) \mathcal{F}([A_x]^T [I]) \right\} + [A_y] \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}(G) \mathcal{F}([A_y]^T [I]) \right\} - \frac{1}{k_0^2} [A_d] \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}(G) \mathcal{F}([A_d]^T [I]) \right\} \right\} \quad (11)$$

其中  $\mathcal{F}(\cdot)$  指的是傅里叶变换[8]。因为  $[Z]^{\text{near}}$  是稀疏矩阵, 所以占很少的内存, 与电流矢量相乘也需要较少的计算量。快

速傅里叶变换所需要的存储量是  $O(N_{\text{grid}})$ , 其中  $N_{\text{grid}}$  是 AIM 栅格点的数目。每次傅里叶变换需要的运算量是  $O(N_{\text{grid}} \log N_{\text{grid}})$ 。因此采用 AIM 后, 极大地减小了传统矩量法阻抗矩阵需要的存储量, 并且降低了矩阵矢量相乘的计算量, 使得我们可以求解电大尺寸的微带阵列的特性。

### 3 数值结果

本文研究计算微带阵列天线电特性的快速算法, 首先研究 AIM 在分析微带贴片阵列散射特性中的应用。图 1 是位于无限大接地介质板上的有限个微带贴片阵列。贴片的长度  $L = 36.6\text{mm}$ , 宽度  $W = 26\text{mm}$ , 贴片横向和纵向的间距  $a = b = 55.517\text{mm}$ 。介质的相对介电常数  $\epsilon_r = 2.17$ , 介质的厚度  $d = 1.58\text{mm}$ , 工作频率 3.7GHz。分别使用 AIM 方法和矩量法计算  $3 \times 3$ ,  $7 \times 7$ ,  $11 \times 11$  微带贴片阵列的单站散射,  $\theta$  从  $0^\circ \sim 90^\circ$  变化,  $\varphi = 0^\circ$ , 入射电场强度  $E = 1\text{V/m}$ 。作者使用 Fortran 语言编制文中的计算程序。

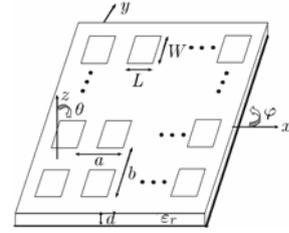


图 1 无限大接地介质板上的微带贴片阵列的结构图

从表 1 和表 2 看出使用 AIM 方法需要的存储量和计算时间都远小于矩量法需要的存储量和计算时间。而且阵列的尺寸越大, 节省的存储量和计算时间越多。比如在计算  $3 \times 3$  阵列时, AIM 需要的存储量和计算时间分别是矩量法的 10.6%, 52.4%; 在计算  $11 \times 11$  阵列时, AIM 需要的存储量和计算时间分别是矩量法的 0.79%, 14.6%。尤其是在计算大型阵列的时候, 由于存储量的限制, 矩量法已无法使用, 但能使用 AIM 正确的计算待求问题。图 2-图 4 给出了微带贴片阵列的 RCS 计算结果, 与文献[9]吻合良好。

表 1 矩量法需要的存储量和计算时间

阵列尺寸	矩阵元素个数	所需内存 (Mb)	每次迭代时间(s)
3×3	3,017,169	23.02	0.42
7×7	20,766,249	158.43	3.28
11×11	126,630,009	966.11	32.68

表 2 AIM 需要的存储量和计算时间

阵列尺寸	求 A 的时间(s)	近区元素个数	所需内存 (Mb)	每次迭代时间(s)
3×3	1.656	319,773	2.44	0.22
7×7	1.343375	749,119	5.72	1.55
11×11	14.51538	1,010,013	7.7	4.78

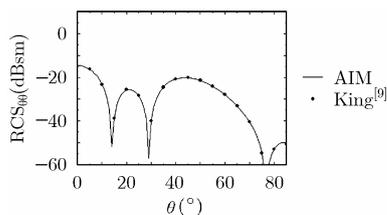


图 2 3×3 微带阵列的单站散射图

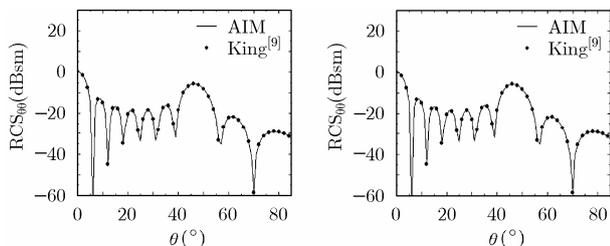
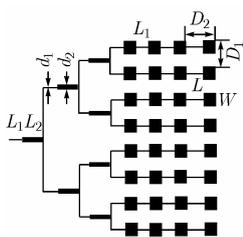
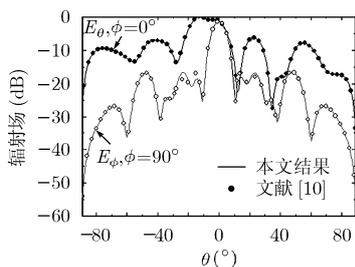


图 3 7×7 微带阵列的单站散射图

图 4 11×11 微带阵列的单站散射图

下面采用 AIM 方法计算一个  $8 \times 4$  元微带天线阵列的辐射特性。天线的结构如图 5 所示, 其中各个参数分别为  $L=10.08\text{mm}$ ,  $W=11.79\text{mm}$ ,  $L_1=12.32\text{mm}$ ,  $L_2=18.48\text{mm}$ ,  $d_1=1.3\text{mm}$ ,  $d_2=3.93\text{mm}$ ,  $D_1=23.58\text{mm}$ ,  $D_2=22.40\text{mm}$ , 介质的厚度为  $1.59\text{mm}$ , 相对介电常数为  $2.2$ , 工作频率为  $9.42\text{GHz}$ 。计算时将整个天线划分为  $6607$  个三角形面元, 需要  $8724$  个未知数, 传统矩量法求解时需要  $580.7\text{Mb}$  内存, 而采用 AIM 方法计算时, 有  $1455095$  个近区元素需要  $11.1\text{Mb}$  内存, 仅为传统矩量法所需内存量的  $1.9\%$ ; 矩量法每次的迭代时间为  $13.87\text{s}$ , 而 AIM 方法每次迭代时间仅为  $2.68\text{s}$ 。图 6 给出了  $\phi=0^\circ$  和  $\phi=90^\circ$  两个面上的辐射方向图, 从图中可以看出, 本文计算结果与文献[10]的计算结果吻合良好。

图 5  $8 \times 4$  元微带天线阵列的结构示意图图 6  $8 \times 4$  微带天线阵列的辐射方向图

#### 4 结束语

本文使用 AIM 算法计算了微带结构的散射和辐射问题, 数值计算结果表明, AIM 方法有效地减小了求解阻抗矩阵所需的计算机内存量, 并且 FFT 的使用极大地提高了阻抗矩阵方程的求解速度。因此 AIM 方法能够快速精确地求解电大尺寸的微带结构的辐射问题和散射问题, 同时 AIM 方法

也适用于其他电大尺寸问题的数值求解。

#### 参考文献

- [1] Liu Y. Application of DCIM to MPIE-MOM analysis of 3-D PEC objects in multilayered media. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2002, 50(2): 157-161.
- [2] He Xiulian, Gong Shuxi, and Liu Qizhong. Fast computation of multilayered microstrip antennas. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 45(1): 85-88.
- [3] 哈林登著. 王尔杰译. 计算电磁场的矩量法. 北京: 国防工业出版社, 1981, 第 1-3 章.
- [4] Wang Chao-fu, Ling Feng, and Jin Jian-ming. A fast full-wave analysis of scattering and radiation from large finite arrays of microstrip antennas. *IEEE Trans. on AP*, 1998, 46(10): 1467-1474.
- [5] Hua Yingbo and Sarkar T K. Generalized pencil-of-function method for extracting poles of an EM system from its transient response. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1989, 37(2): 229-234.
- [6] Rao S M, Wilton D R, and Glisson A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Trans. on AP*, 1982, 30(3): 409-418.
- [7] Bleszynski E, Bleszynski M, and Jaroszewicz T. AIM: adaptive integral method for solving large-scale electromagnetic scattering and radiation problems. *Radio Sci.*, 1996, 31(5): 1225-1251.
- [8] 张彦仲, 沈乃汉. 快速傅里叶变换及沃尔什变换. 北京: 航空工业出版社, 1989 年 8 月第一版, 第 2-3 章.
- [9] King A S and Bow W J. Scattering from a finite array of microstrip patches. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 1992, 40(7): 770-774.
- [10] Ling Feng, Wang Chao-fu, and Jin Jian-ming. An efficient algorithm for analyzing large-scale microstrip structures using adaptive integral method combined with discrete complex-image method. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2000, 48(5): 832-839.

贺秀莲: 女, 1977 年生, 助理研究员, 研究方向为电磁场数值计算、电大目标散射分析、宽频带微带天线、波导缝隙阵天线.

高文军: 男, 1973 年生, 副研究员, 研究方向为雷达天线及其馈线、电磁场数值计算等.

纪奕才: 男, 1974 年生, 副教授, 研究方向为电磁场数值计算、宽带小型化通信天线等.

雷宏: 男, 1963 年生, 研究员, 研究方向为高分辨率合成孔径雷达系统及相关天线技术.

龚书喜: 男, 1957 年生, 教授、博士生导师, 研究方向为电磁散射、天线 RCS 减缩、飞行器隐身技术等.