

基于固定实镜像平面波展开的快速多极子方法计算微带结构问题

李 磊, 谢拥军

(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: 将快速多极子算法应用于微带结构的一个关键技术是将矩量法中描述远区单元相互作用的 Green 函数用加法定理进行平面波展开. 本文提出用固定实镜像方法拟合微带结构谱域 Green 函数进行平面波展开, 对比目前常用的复镜像闭式平面波展开方法, 该方法具有展开收敛性好, 物理概念清晰, Green 函数宽频插值方便等特点. 计算实例表明了该方法的有效性和可靠性.

关键词: 快速多极子方法; 加法定理; 格林函数; 固定实镜像

中图分类号: TN821.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2153-04

An Efficient Algorithm for Analyzing Microstrip Structures Using Fast-Multipole Algorithm Combined with Fixed Real-Image Simulated Method

LI Lei, XIE Yong-jun

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

Abstract: The Discrete Complex Image Method (DCIM) is usually used to evaluate the Sommerfeld integrals for the spatial domain Green's function. To solve large scale problems, the far-zone interactions in the Method of Moments (MoM) can be simplified using a far field approximation with the plane wave expansion. Therefore, the combination of DCIM and Fast Multipole Method (FMM) could not achieve high efficiency due to the poor convergence of the addition theorem. An efficient algorithm combining FMM and Fixed Real-Image Simulated Method (FRISM) is presented to analyze microstrip structures. The fixed image locations lead to fast and convenient computations comparing with complex image such that can be used for wide-band applications. The accuracy and efficiency of the novel method are verified by numerical examples.

Key words: FMM; addition theorem; Green's function; FRISM

1 引言

随着电磁场理论和技术的快速发展, 微波集成电路 (MIC 和 MMIC) 和微带天线中, 越来越多地应用了平面分层介质结构, 分层介质结构问题的求解因此日益受到研究人员的重视. 这类问题的标准解法是建立分层介质结构的积分方程, 然后用矩量法 (MoM) 求解, 空域混合位积分方程 (MPIE) 与电场积分方程 (EFIE)、磁场积分方程 (MFIE) 和混合积分方程 (CFIE) 相比积分内核的奇异性较弱, 因而受到广泛的重视和应用^[1]. 在该方法中通常采用数值积分计算非常棘手的 Sommerfeld 积分 (SI), 非常耗时, 是空域矩量法的主要计算瓶颈. Chow, Fang^[2]等研究者提出采用离散复镜像方法 (DCIT) 来获取单层微带结构空域闭式格林函数, Aksun 等研究者将其复镜像技术的应用范围继续扩展, 文献[3]给出了利用 DCIT 技术计算两层介质微带结构空域格林函数的方法, 文献[4]进一步给出了当源分别为水平电偶极子 (HED)、水平磁偶极子 (HMD)、垂直电偶极子 (VED)、垂直磁偶极子 (VMD) 任意层介质微带结构的闭式格林函数; 有效的解决了空域矩量法中 SI 积分的难题.

然而随着现代电子通信工作频率的不断提高, 微带结构器件的工作频率达到毫米波级. 对复杂电大尺寸微带结构进行仿真, 所需未知量数目 N 较大. 传统的矩量法计算需要 $O(N^2)$ 的数量级的存储量, $O(N^3)$ 的浮点运算量, 已不适于大型问题的仿真. 1989 年, V. Rokhlin 提出了处理二维声波散射问题, 求解赫姆霍兹方程的高效方法即 FMM^[5], 其后的几年中, FMM 被广泛的应用于二维、三维目标的电磁散射分析中^[6,7]. 快速多极子方法 (FMM) 是积分方程稀疏化的一种高效方法, 把它应用于复杂电大尺寸物体分析, 不但大大加速了矩阵和矢量的计算, 同时也大大降低了存储量; 使两者都降为 $O(N^{1.5})$ 的数量级. 多层多极子算法 (MLFMA) 更可以进一步地使两者降为 $O(N \log N)$. 近些年, 研究者将 FMM 应用于微波毫米波集成电路的分析中^[8-12], 然而, 由于 FMM 依赖于格林函数, 因此将其推广到微带问题的分析存在一定困难. 其中的一种 FMM 方法^[8]是将格林函数表示成快速收敛的最陡积分, 然后计算积分的 Hankel 变换. 这种技术仅对薄的分层媒质有效. 另一种方法是将 FMM 与 DCIM 结合^[9-12]. 其中文献[9]和[10]处理二维静电问题, 通过在复镜像位置处添加镜像, 进行等效运算. 这种 FMM 方法, 镜像位置不同, 转移量是不同的.

收稿日期: 2005-01-27; 修回日期: 2005-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 60201002)

文献[11]考虑了二维和三维的情况,但由于在 DCIM 方法中提取了表面波项,因此实际操作起来比较复杂。Feng Ling 在文献[12]提出 MLFMA 与 DCIM 的混合方法,并用于分析微带天线的辐射问题,此文将原始源和镜像源编在同一组,不同镜像,可以保持转移量不变。然而,本文作者通过研究发现,由于 DCIM 技术得出的复镜像系数的 b_l 非唯一性,且为复数;会严重影响 FMM 平面波展开时加法定理收敛性和稳定性^[13]。

为了解决上述问题;本文提出用固定实镜像方法^[14,15] (FRISM)拟合微带结构谱域 Green 函数进行平面波展开,该方法具有展开收敛性好,物理概念清晰,宽频插值方便等特点。计算实例表明采用 FRISM 技术拟合出的微带结构谱域 Green 函数精度符合要求, FMM 平面波展开时加法定理收敛性和稳定性得到了较好的改善。

2 基本原理及公式

2.1 微带结构格林函数

考虑如图 1 所示的微带结构,利用等效传输线方程和 Sommerfeld 恒等式可以得到其空域格林函数为:

考虑如图 1 所示的微带结构,利用等效传输线方程和 Sommerfeld 恒等式可以得到其空域格林函数为:

$$G_{\text{A}}^{\text{xx}} = \frac{\mu_0}{4} \left[\frac{e^{-jk_0 r_0}}{n_0} + \frac{1}{j2k_0} R_{\text{TE}} e^{-jk_0(z+z')} \cdot H_0^{(2)}(k) k dk \right]$$

$$G_{\text{q}} = \frac{1}{4} \left[\frac{e^{-jk_0 r_0}}{n_0} + \frac{1}{j2k_0} (R_{\text{TE}} + R_{\text{q}}) e^{-jk_0(z+z')} \cdot H_0^{(2)}(k) k dk \right]$$

$$R_{\text{TE}} = - \frac{r_{10}^{\text{TE}} + e^{-j2k_{z1}h}}{1 + r_{10}^{\text{TE}} e^{-j2k_{z1}h}}$$

$$R_{\text{q}} = - \frac{2k_{z0}^2(1 - e^{-j2k_{z1}h})}{(k_{z1} + k_{z0})(k_{z1} + jk_{z0})(1 + r_{10}^{\text{TE}} e^{-j2k_{z1}h})(1 - r_{10}^{\text{TM}} e^{-j2k_{z1}h})}$$

$$r_{10}^{\text{TE}} = \frac{k_{z1} - k_{z0}}{k_{z1} + k_{z0}}, \quad r_{10}^{\text{TM}} = \frac{k_{z1} - jk_{z0}}{k_{z1} + jk_{z0}}$$

$$k_{z0}^2 + k^2 = k_0^2, \quad k_{z1}^2 + k^2 = k_0^2$$

2.2 FRISM 法拟合微带结构谱域 Green 函数

与 DCIM 方法类似,首先仍然是将准动态项($k_0 \neq 0, k_{z0}$ k_{z1})提出:

$$R_{\text{TE}} - R_{\text{TB}} = -e^{-j2k_{z0}h} \quad R_{\text{q}} - R_{\text{q0}} = \frac{K(1 - e^{-j2k_{z0}h})}{1 - Ke^{-j2k_{z0}h}}$$

此时格林函数可以分成两部分表示为:

$$G_{\text{A}}^{\text{xx}} = G_{\text{A0}}^{\text{xx}} + \frac{\mu_0}{4} \frac{1}{j2k_0} (R_{\text{TE}} - R_{\text{TB}}) e^{-jk_0(z+z')} \cdot H_0^{(2)}(k) k dk \quad (1a)$$

$$G_{\text{q}} = G_{\text{q0}} + \frac{1}{4} \frac{1}{j2k_0} (R_{\text{TE}} + R_{\text{q}} - R_{\text{TB}} - R_{\text{q0}}) e^{-jk_0(z+z')} \cdot H_0^{(2)}(k) k dk \quad (1b)$$

其中:

$$G_{\text{A0}}^{\text{xx}} = \frac{\mu_0}{4} \left[\frac{e^{-jk_0 r_0}}{n_0} - \frac{e^{-jk_0 r_0}}{r_0} \right] \quad (2a)$$

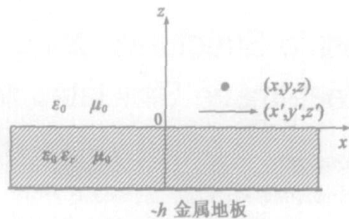


图 1 单层介质微带结构示意图

$$G_{\text{q0}} = \frac{1}{4} \left[\frac{e^{-jk_0 r_0}}{n_0} + K \frac{e^{-jk_0 r_0}}{r_0} + \sum_{n=1}^{\infty} K^{n-1} (K^2 - 1) \frac{e^{-jk_0 r_n}}{r_n} \right] \quad (2b)$$

$$r_0 = \sqrt{z^2 + (z+z+2h)^2} \quad r_0 = \sqrt{z^2 + (z+z)^2} \quad (2c)$$

$$r_n = \sqrt{z^2 + (z+z+2nh)^2} \quad R_{\text{q0}} = K(1 - e^{-j4k_{z0}h}) (1 + Ke^{-j2k_{z0}h}) \quad (2d)$$

将式(2b)中的无穷项用泰勒级数展开。(为了便于下一步实镜像的提取此时多展开一项,得到 G_{q0} 的形式与复镜像时有所不同):

$$G_{\text{q0}} = \frac{1}{4} \left[\frac{e^{-jk_0 r_0}}{n_0} + K \frac{e^{-jk_0 r_0}}{r_0} + (K^2 - 1) \frac{e^{-jk_0 r_1}}{r_1} - \frac{K(K^2 - 1)e^{-jk_0 r_2}}{r_2} - K^2 \frac{e^{-jk_0 r_3}}{r_3} \right]$$

令 $F_1 = R_{\text{TE}} - R_{\text{TB}}, F_2 = R_{\text{TE}} + R_{\text{q}} - R_{\text{TB}} - R_{\text{q0}}$, 对其进行指数拟合:

$$F_1 = a_{x1} e^{-j2k_{z0}h} + a_{x2} e^{-j4k_{z0}h} + a_{x3} e^{-j6k_{z0}h} + a_{x4} e^{-j8k_{z0}h} \quad (3a)$$

$$F_2 = a_{q1} e^{-j2k_{z0}h} + a_{q2} e^{-j4k_{z0}h} + a_{q3} e^{-j6k_{z0}h} + a_{q4} e^{-j8k_{z0}h} \quad (3b)$$

注意与 DCIM 技术利用 Prony, GPOF 方法提取出复镜像距离的方式(这种提取不具备唯一性)不同, Frism 方法将指数展开项中的镜像距离固定为实数。单层、双层微带结构取 4 项实镜像如图 2 所示。单层时: $b_1 = -2h; b_2 = -4h; b_3 = -6h; b_4 = -8h$; 双层时: $b_1 = -(h_2 - h_1); b_2 = -(h_2 + h_1); b_3 = -2h_2; b_4 = -(3h_1 + h_2)$ 。这些镜像位置的选取和基板厚度相关,是原始源与基板、金属地板相互作用后的等效表示,具有明确的物理意义。拟合时在积分路径按照中点定理采集取样点,然后求解 4 元方程组即可。由于式(3)中的 b_l 固定,求解 4 元方程组后得到 a_i 的在很宽的频率范围内具有平坦的曲线特性,这样的曲线十分利于格林函数的宽频插值运算^[15]。

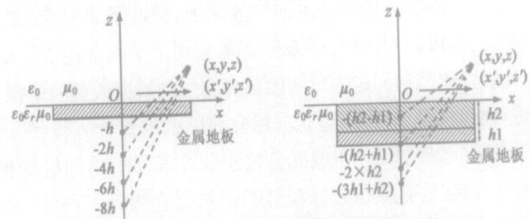


图 2 固定实镜像单层双层微带结构实镜像点示意图

2.3 基于固定实镜像平面波展开的快速多极子方法

快速多极子方法被广泛应用于 PEC 和各种介质的电磁散射计算,而加法定理是快速多极子方法的基础,其原始形式如下:

$$\frac{e^{-jk|\mathbf{X} + \mathbf{d}|}}{4|\mathbf{X} + \mathbf{d}|} = \sum_{l=0}^{\infty} (-1)^l (2l+1) j_l(kd) h_l^{(2)}(kX) P_l(\hat{\mathbf{d}} \cdot \hat{\mathbf{X}}) \quad (4)$$

其中 $\hat{\mathbf{d}}$ 为 \mathbf{d} 的单位矢量, $\hat{\mathbf{X}}$ 为 \mathbf{X} 的单位矢量, j_l 是一阶球 Bessel 函数, $h_l^{(2)}$ 是二阶球 Hankel 函数, P_l 是 Legendre 多项式,其约束条件为 $d < X$ 。其几何关系见图 3。

式(4)精确成立的条件是 l 从 0 取到 ∞ 的和,实际应用时我们可以根据误差要求选取 l 的上限 L ,此时 L 称为无穷求和的截断项数,又称为多极子模式数。应用平面波展开公式:

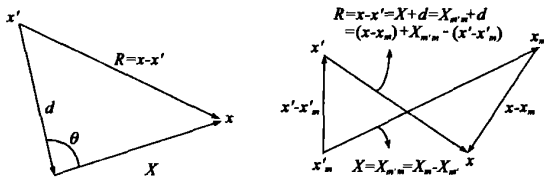


图 3 (a) 加法定理的各量的几何关系;(b) 应用到 FMM 中各量的几何关系

$$4 (-j)^{l_i} j_l(kd) P_l(\cos \theta) = \iint_{\Omega} e^{-jkR} P_l(\cos \theta) d^2 \mathbf{R} \quad (5)$$

把式(5)带入式(4)得

$$\frac{e^{-jk|X+d|}}{4|X+d|} = \frac{-jk}{4} \frac{1}{4} \iint d^2 \mathbf{R} e^{-jk \cdot d} (-j)^l (2l+1) \cdot h_l^{(2)}(kX) P_l(\cos \theta)$$

合适的多级子模式数 L 和高斯积分所需点数 l_i 是快速计算的关键问题。J. M. Song 的论文^[7], 给出自由空间 $l_i = L$ 时的半经验公式

$$\text{对于 } \text{Err} < 1.0E-1 \quad L(kD) = kD + \ln(kD + 1), \quad kX < L$$

$$\text{对于 } \text{Err} < 1.0E-3 \quad L(kD) = kD + 3\ln(kD + 1), \quad kX < L$$

) , $kX < L$

$$\text{对于 } \text{Err} < 1.0E-6 \quad L(kD) = kD + 5\ln(kD + 1), \quad kX < L$$

) , $kX < L$

其中 $D = 1/k$, 是各个组里最大的 d 值。

2001 年新加坡的 L W Li 等研究者提出了选取 $l_i = L$ 的情况下的半经验公式^[16], 给出了多级子模式数 L 和所需积分点数 l_i 的经验公式。

$$L = kD \quad \text{or} \quad L = kD - 0.5\ln(kD + 1)$$

$$L_i = kD + \ln(kD + 1) \quad \text{or} \quad L_i = kD + 2\ln(kD + 1)$$

)

利用镜像技术 (DCIT, FRISM), 可以将微带结构的空域格林函数写成如下闭式:

$$G_{\text{Axx}} = \sum_{i=0}^{N_a} \frac{d_i^A}{4 R_i^A} e^{-jkR_i^A} \quad G_q = \sum_{i=0}^{N_q} \frac{d_i^q}{4 R_i^q} e^{-jkR_i^q}$$

式中 $R_i^A = |r - (r + 2b_i^A)|$, $R_i^q = |r - (r + 2b_i^q)|$, 且 d_i^A , b_i^A , d_i^q , b_i^q 是由镜像方法确定的相关系数; N_a , N_q 是其镜像数。

本文作者已在文献[13]中研究发现, 由于 DCIM 技术得出的复镜像系数 b_i 的非唯一性, 且为复数; 会严重影响 FMM 平面波展开时加法定理收敛性和稳定性; 而 FRISM 得出的实镜像系数 b_i 固定且为实数, 对 FMM 平面波展开时加法定理几乎没有影响, 这些将在下节数值结果中得到证明。

为了利用 FMM, 首先将整个微带结构分组, 并用 $G_m (m = 1, 2, \dots, M)$ 来表示。 r_i 表示场点, 其所在组的中心为 r_m , r_j 表示源点, 其所在组中心为 r_m , 于是有:

$$r_{ij} = r_i - (r_j + 2b_i) = (r_i - r_m) + (r_m - r_m) + (r_m - r_j) - 2b_i = r_{im} + r_{mm} - r_{jm} - 2b_i, \quad b_i = b_i^A \text{ or } b_i^q$$

采用加法定理, 可将空域格林函数分别写为:

$$G(r_i, r_j) = \frac{k}{j16} \sum_{p=0}^{N_c} a_p e^{jk \cdot 2b_p} \mathbf{x} e^{-jk \cdot (r_{im} - r_{jm})} T_L(\mathbf{k} \cdot \mathbf{X}_{m,m}) d^2 \mathbf{R}$$

$$T_L(\mathbf{k} \cdot \mathbf{X}_{m,m}) = \sum_{l=0}^L (-j)^l (2l+1) h_l^{(2)}(kX_{m,m}) P_l(\cos \theta_{m,m})$$

带入由 Mosig 提出的 MPIE 广义阻抗矩阵即可求解。

3 计算实例

3.1 格林函数拟合

为了验证 FRISM 法拟合微带结构谱域 Green 函数的有效性, 本文通过 $r = 2.17, h = 1\text{mm}, f = 3\text{GHz}$ 的微带线谱域拟合情况进行证明。图 4 为其空域格林函数拟合情况, 左图为 G_q 幅度值拟合情况, 右图为 G_{Axx} 幅度值拟合情况。观察图 4 可知, 采用 FRISM 拟合微带结构谱域格林函数的情况较好, 符合计算要求。

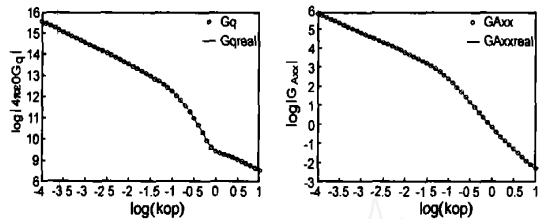


图 4 $\epsilon_r=2.17, h=1\text{mm}, f=3\text{GHz}$ 微带线的拟合情况

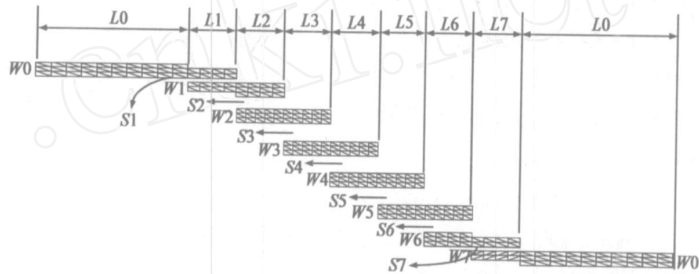


图 5 7 阶耦合滤波器三角形剖分示意图

其中, $W_0=W_2=W_3=W_4=W_5=W_6=0.635\text{mm}, W_1=W_7=0.413\text{mm}$
 $L_1=2.59\text{mm}, L_2=L_8=2.59\text{mm}, L_3=L_7=2.50\text{mm}, L_4=L_5=L_6=2.49\text{mm};$
 $S_1=S_7=0.127\text{mm}, S_3=S_4=S_5=0.635\text{mm}, S_2=S_6=0.413\text{mm}$

3.2 采用 FRISM 进行平面波展开时的收敛性分析

采用文献[12]的处理方法, 取 $d = 0.25 \lambda_0, X = 5 \sim 10 \lambda_0$ 对上例进行平面波展开分析, 可以获得表 1 数据。通过观察可知, 实镜像方法 (Frism) 结合快速多极子 (FMM) 在多层微带结构格林函数的平面波展开所需 l_i 和多级子模式数 L 与在自由空间中情况相差无几, 仍然可以利用原来自由空间多级子模式数 L 和所需积分点数 l_i 的半经验公式。其本质在于固定的实镜像距离 b_i 不含复数项, 从而避免了复镜像收敛较慢的缺点。

表 1 相同精度所需 L 和 l_i 比较

$L = 8$	$1e-1$	$1e-2$	$1e-3$
自由空间 (如图 4)	9	11	12
微带结构 (如图 4)	10	11	13

3.3 具体算例验证

为了验证实镜像方法 (Frism) 结合快速多极子 (FMM) 的有效性, 下面以 7 阶耦合滤波器的计算予以验证。其工作频率 $f = 9.5 \sim 10.5 \text{GHz}$, $r = 10, h = 0.635\text{mm}$; 采用三角形剖分 (具体参数见图 5), 使用 RWG 基函数; 分别采用矩量法 (MOM) 和快速多极子方法 (FMM) 计算其 S 参数。数值结果 (见图 6) 证明了实镜像方法 (Frism) 结合快速多极子 (FMM) 的有效性。

此外为了证明 Frism 算法的有效性,我们给出了求解矩形微带贴片天线算例时,CG算法每步迭代时间和未知数 N 的对应关系.如图 7 所示,实验结果表明 Frism 算法可以有效地将计算复杂度降为 $O(N^{1.5})$ 的数量级.

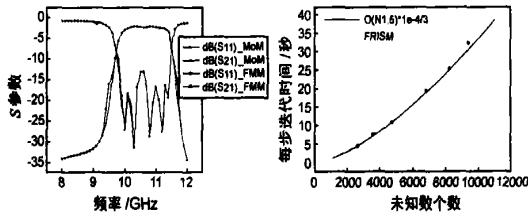


图 6 7阶耦合滤波器不同方法求得的 S 参数对比

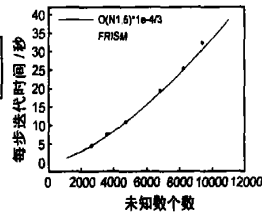


图 7 Frism 算法计算复杂度验证

4 结论

对非常耗时的 Sommerfeld 积分 (SI) 进行数值积分计算,是空域矩量法微带结构问题计算的主要瓶颈;离散复镜像 (DC-IT) 适用于普通矩量法运算,有效解决了这一问题.但是采用快速多极子方法计算微带结构问题时,离散复镜像方法给出的复镜像距离严重影响平面波展开时加法定理的收敛性,不利于快速运算.本文提出固定实镜像方法 (FRISM) 拟合微带结构谱域 Green 函数进行平面波展开,可以解决上述问题,数值实验表明该方法的有效性和可靠性.

参考文献:

- [1] Mbsig J R. Arbitrarily shaped microstrip structures and their analysis with a mixed potential integral equation[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1988, 36(2): 314 - 323.
- [2] Chow YL, Yang J J, Fang D G, et al. A closed-form spatial Green's function for the thick microstrip substrate[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1980, 39(3): 393 - 397.
- [3] Aksun M I, Mittra R. Derivation of closed-form Green's functions for a general microstrip Geometry[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1992, 40(11): 2055 - 2062.
- [4] Dural G, Aksun M I. Closed-form Green's functions for general sources and stratified media[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1995, 43(7): 1545 - 1552.
- [5] Coifman R, Rokhlin V, Wandzura S. The fast multipole method for the wave equation: a pedestrian prescription[J]. IEEE Antennas Propagate Magazine, 1993, 35(6): 7 - 12.
- [6] Song J M, Lu C C, Chew W C. Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects[J]. IEEE Trans Antennas Propagate, 1997, 45(10): 1488 - 1493.
- [7] Song J M, Chew W C. Error analysis for the truncation of multipole expansion of vector Green's function[A]. Proc of Antennas and Propagation Society International Symposium[C]. Orlando, FL, USA: IEEE, 1999. 628 - 631.
- [8] Zhao J S, Chew W C, Lu C C, et al. Thin-stratified medium fast multipole algorithm for solving microstrip structures[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1998, 46(4):

395 - 403.

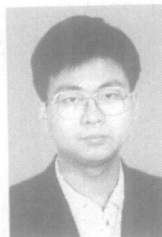
- [9] Jandhyala V, Michielssen E, Mittra R. Multipole-accelerated capacitance computation for 3-D structures in a stratified dielectric medium using a closed form Green's function[J]. International Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering, 1995, 5(5): 68 - 78.
- [10] Gurel L, Aksun M I. Electromagnetic scattering solution of conducting strips in layered media using the fast multipole method[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1996, 6(8): 277 - 279.
- [11] Macdonald P A, Itoh T. Fast simulation of microstrip structures using the fast multipole method[J]. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 1996, 9(9): 345 - 357.
- [12] Feng Ling, Song J M, JIAN M J. Multilevel fast multipole algorithm for analysis of large-scale microstrip structures[J]. IEEE Microwave Guided Wave Letters, 1999, 9(12): 508 - 510.
- [13] LI Lei, ZHANG Yu, XIE Yong-jun. On the accuracy of the plane wave expansions of Green's function for MMIC[A]. Proc of Antennas and Propagation Society International Symposium[C]. Monterey, CA, USA: IEEE, 2004. 2788 - 2791.
- [14] Torbian A, Chow Y L. Simulated image method for green's function of multilayer media[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(9): 1777 - 1781.
- [15] Chow Y L, Wan C T. 3D Green's functions of microstrip separated into simpler terms-behavior, mutual interaction, and formulas of the terms[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(8): 1483 - 1491.
- [16] LI J Y, LI L W, Ooi B L, et al. On the accuracy of the addition theorem for a scalar green's function used in the FMM[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2001, 31(12): 439 - 442.

作者简介:



李磊 男, 1980 年 9 月出生于安徽淮南, 博士研究生, 主要研究兴趣: 计算电磁学、微波毫米波集成电路设计.

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



谢拥军 男, 1969 年 5 月出生于陕西西安, 教授, 博士生导师, 主要从事计算电磁学、微波通信等领域的研究. E-mail: yjxie@xidian.edu.cn.