

基于低温共烧陶瓷工艺的一种新型层叠式 多层结构的波概念迭代方法研究

冯 鹤[†] 谢拥军 王元源 傅焕展 雷斐然

(西安电子科技大学 ,西安 710071)

(2008 年 7 月 26 日收到 ,2008 年 9 月 16 日收到修改稿)

提出了基于波概念的一种有效迭代方法 ,详细给出了波概念迭代法(wave concept iterative process)理论推导公式 ,并用来处理基于低温共烧陶瓷工艺的新型多层结构计算问题 ,涉及到了混合磁场与电场方程 ,包括基于一种简单形式的匹配负载模拟上的 S 参数提取问题 .利用 matlab 语言编写程序 ,从而确定 S 参数的频率响应 ,并将数值结果与仿真结果进行比较 ,两者呈现出很好的一致性 ,同时验证了波概念迭代法相对于其他算法的优势所在 .

关键词 :波概念迭代法 ,快速傅里叶模式变换 ,低温共烧陶瓷工艺

PACC :4110H ,8120L

1. 引 言

随着微波毫米波集成电路^[1,2]的发展 ,各种电磁分析的数值方法也随之日益发展 .但是大多数传统方法都有着大内存的需求和长时间的计算 ,像目前很常用的矩量法(MOM)^[3,4] ,有限差分法(FDM)^[5,6]和有限元法(FEM)^[7,8]等 .本文从波的概念出发 ,引入一种基于空域结合谱域变换^[9,10]的波概念迭代方法^[11,12] .首先对平面电路^[13,14]的不连续性表面剖分网格^[15] ,在此表面上建立波源和反射波之间的迭代关系 ,采用快速二维傅里叶模式变换^[16] ,避免了基函数和大矩阵的逆转换 ,节省了内存 ,可以有效提高计算速度 .

多层结构中波的传输问题一直以来就是电磁学研究方面的一个重要热门方向 .尽管多层电路结构已经广泛用于数字系统和低频系统 ,射频与微波电路通常都由简单层数的结构所构成 .多层电路结构的采用使得微波电路更加紧凑 ,设计也更为灵活 .本文给出了多层结构的波概念迭代方法^[17,18] ,并用之来分析一种基于低温共烧陶瓷工艺^[19]的新型多层电路特性 .

2. 波概念迭代方法的原理

波概念迭代方法通过界面 Ω 处的电场 E_T 和电流密度 J_T 来引入入射波和反射波 .波概念方程如下 :

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{1}{2\sqrt{Z_{0i}}} (E_{Ti} + Z_{0i} J_{Ti}) , \\ B_i &= \frac{1}{2\sqrt{Z_{0i}}} (E_{Ti} - Z_{0i} J_{Ti}) , \end{aligned} \quad (1)$$

其中 Z_{0i} 是区域 i ($i = 1, 2$) 的特性阻抗 ,由下式给出 :

$$Z_{0i} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_{ri}}} , \quad (2)$$

式中 ϵ_{ri} , μ_{ri} 分别为区域 i 的介电常数和磁导率 . J_{Ti} 是表面切向电流密度 ,定义为

$$J_{Ti} = H_{Ti} \times \hat{n}_i , \quad (3)$$

其中 \hat{n}_i 是垂直于分界面的单位矢量 .

2.1. 空域中的散射算子

迭代方法需要对空气和介质之间的分界面 Ω 剖分网格 ,共分为四类区域 :金属区域 ,介质区域 ,源

[†] E-mail :fenghe0722@yahoo.cn

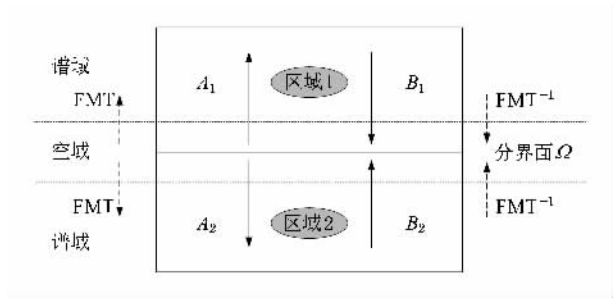


图 1 波概念的定义

区域和集总元件区域.它们可用 H_m, H_d, H_s, H_z 来表示, $H_i (i = \text{metal, dielectric, source, lumped element})$ 为海维赛德单位函数(Heaviside unit step),定义如下:

$$H_i = \begin{cases} 1, & \text{在 } i \text{ 区域内,} \\ 0, & \text{在其他区域,} \end{cases}$$

例如

$$H_m = \begin{cases} 1, & \text{在金属区域内,} \\ 0, & \text{在其他区域.} \end{cases}$$

这样,可表示出每个网格内的边界条件.根据边界条件推导散射算子.

2.1.1. 金属区域(metal)

边界条件 $E_{T1} = E_{T2} = 0$,代入(1)式有

$$\sqrt{Z_{01}}(A_1 + B_1) = \sqrt{Z_{02}}(A_2 + B_2) = 0.$$

所以在金属区域 M 处散射算子有

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -H_m & 0 \\ 0 & -H_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2.1.2. 介质区域(dielectric)

边界条件 $J_1 + J_2 = 0, E_1 = E_2 \neq 0$,代入(1)式,得

$$\frac{1}{\sqrt{Z_{01}}}(A_1 - B_1) + \frac{1}{\sqrt{Z_{02}}}(A_2 - B_2) = 0,$$
$$\sqrt{Z_{01}}(A_1 + B_1) = \sqrt{Z_{02}}(A_2 + B_2).$$

因此在介质区域有

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 - N^2}{1 + N^2} H_d & \frac{2N}{1 + N^2} H_d \\ \frac{2N}{1 + N^2} H_d & -\frac{1 - N^2}{1 + N^2} H_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 $N = \sqrt{\frac{Z_{01}}{Z_{02}}}$.

2.1.3. 源区域(source)

边界条件 $E_1 = E_2 = E_0 - Z_0(J_1 + J_2)$ 其中 Z_0 $= \frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}}$ 是两区域分界面上的等效阻抗,在源区域有

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1 + n_1 - n_2}{1 + n_1 + n_2} H_s & \frac{2m}{1 + n_1 + n_2} H_s \\ \frac{2m}{1 + n_1 + n_2} H_s & \frac{-1 - n_1 + n_2}{1 + n_1 + n_2} H_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_0}{\sqrt{Z_{01}}} H_s \\ \frac{E_0}{\sqrt{Z_{02}}} H_s \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 $n_1 = \frac{Z_0}{Z_{01}}, n_2 = \frac{Z_0}{Z_{02}}, m = \frac{Z_0}{\sqrt{Z_{01} Z_{02}}}, N = \sqrt{\frac{Z_{01}}{Z_{02}}}$.

2.1.4. 集总元件区域(lumped elements)

集总元件所在区域电压可以表示为

$$V_L = \int_0^{L_R} E_x(x, y) \cdot dx.$$

电流 I_L 和表面切向电流密度 J_s 有关:

$$I_L = \int_0^{W_R} J_x(x, y) \cdot dy,$$

其中 L_R, W_R 分别代表集总元件的长度与宽度.

集总元件是相对于波长尺寸很小的元件(所以长宽乘积 $L_R W_R$ 远小于波长),假设 E_x, J_x 在元件区域是均匀分布,则上两式变为

$$V_L = E_x(x, y) \cdot L_R,$$
$$I_L = J_x(x, y) \cdot W_R.$$

于是表面阻抗

$$Z_s = \frac{E_x}{J_x} = \frac{W_R}{L_R} \cdot \frac{V_L}{I_L} = \frac{W_R}{L_R} \cdot Z_L,$$

其中 Z_L 是等效阻抗, $\frac{W_R}{L_R}$ 是形状因子.

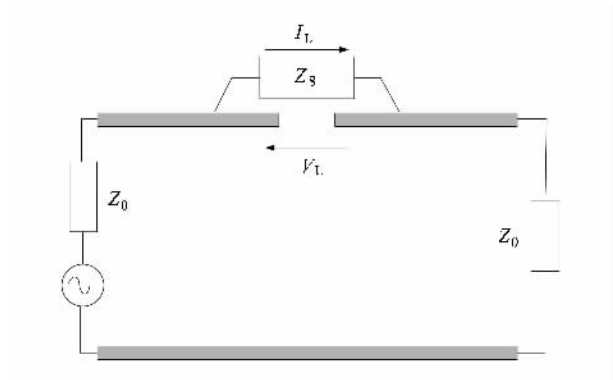


图 2 包含集总元件的有源平面结构的等效电路

边界条件为 $E_1 = E_2 = Z_s \cdot (J_1 + J_2)$,所以在集总元件区域有

$$\begin{aligned}\sqrt{Z_{01}} \cdot (A_1 + B_1) &= \sqrt{Z_{02}} \cdot (A_2 + B_2), \\ \sqrt{Z_{01}} \cdot (A_1 - B_1) &= Z_s \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{Z_{01}}} \cdot (A_1 - B_1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{Z_{02}}} \cdot (A_2 - B_2) \right).\end{aligned}$$

变换和简化后为

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \cdot H_z & \beta \cdot H_z \\ \vartheta \cdot H_z & \rho \cdot H_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中

$$[S] = \begin{bmatrix} -H_m + \frac{1-N^2}{1+N^2}H_d + \frac{-1+n_1-n_2}{1+n_1+n_2}H_s + \alpha \cdot H_z & \frac{2N}{1+N^2}H_d + \frac{2m}{1+n_1+n_2}H_s + \beta \cdot H_z \\ \frac{2N}{1+N^2}H_d + \frac{2m}{1+n_1+n_2}H_s + \vartheta \cdot H_z & -H_m + \frac{N^2-1}{1+N^2}H_d + \frac{-1-n_1+n_2}{1+n_1+n_2}H_s + \rho \cdot H_z \end{bmatrix}. \quad (8)$$

而反射波与入射波在空域之间的联系如下所示：

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_0}{\sqrt{Z_{01}}}H_s \\ \frac{E_0}{\sqrt{Z_{01}}}H_s \end{bmatrix}. \quad (9)$$

2.2. 谱域中的反射系数

通过二维快速傅里叶模式变换得到的谱域波在上下区域发生反射,表达式如下：

$$\begin{bmatrix} A_i^{\text{TE}} \\ A_i^{\text{TM}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_i^{\text{TE}} & 0 \\ 0 & \Gamma_i^{\text{TM}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_i^{\text{TE}} \\ B_i^{\text{TM}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\Gamma_i^\alpha = \frac{1 - Z_{0i} Y_{mn,i}^\alpha \coth(\gamma_{mn,i} h_i)}{1 + Z_{0i} Y_{mn,i}^\alpha \coth(\gamma_{mn,i} h_i)}, \quad (11)$$

$$(\alpha = \text{TE, TM}, i = 1, 2),$$

其中 $Y_{mn,i}^\alpha$ 代表介质区域 i 中第 mn 阶模式的导纳, α 表示 TE 或 TM 模式：

$$Y_{mn,i}^{\text{TE}} = \frac{\gamma_{mn,i}}{j\omega\mu_0}, Y_{mn,i}^{\text{TM}} = \frac{j\omega\epsilon_0\epsilon_{ri}}{\gamma_{mn,i}}, \quad (12)$$

$\gamma_{mn,i}$ 是介质区域 i 的传输常数, h_i 为介质层 i 的厚度：

$$\gamma_{mn,i}^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - k_0^2\epsilon_{ri}, \quad (13)$$

其中 k_0 是自由空间波数.

2.3. 快速傅里叶模式变换与其逆变换

利用二维快速傅里叶模式变换对空域和谐域波

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{Z_s \cdot (-Z_{01} + Z_{02}) - Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_s \cdot (Z_{01} + Z_{02}) + Z_{01} \cdot Z_{02}}, \\ \beta &= \frac{2 \cdot Z_s \cdot \sqrt{Z_{01} \cdot Z_{02}}}{Z_s \cdot (Z_{01} + Z_{02}) + Z_{01} \cdot Z_{02}}, \\ \vartheta &= \frac{2 \cdot Z_s \cdot \sqrt{Z_{01} \cdot Z_{02}}}{Z_s \cdot (Z_{01} + Z_{02}) + Z_{01} \cdot Z_{02}}, \\ \rho &= \frac{-Z_s \cdot (-Z_{01} + Z_{02}) - Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_s \cdot (Z_{01} + Z_{02}) + Z_{01} \cdot Z_{02}}.\end{aligned}$$

综合上述情况可以得出总散射算子 S ,

进行转换,定义如下：

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} A_i^{\text{TE}} \\ A_i^{\text{TM}} \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{ab}{2\rho_{mn}}} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \\ &\times \begin{bmatrix} -\frac{m}{a} & \frac{n}{b} \\ \frac{n}{b} & \frac{m}{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{FFT} \cosir(A_i^x) \\ \text{FFT} \sinco(A_i^y) \end{bmatrix} \quad (14)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} A_i^x \\ A_i^y \end{bmatrix} &= \text{IFFT} \left\{ \sqrt{\frac{ab}{2\rho_{mn}}} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \right. \\ &\times \begin{bmatrix} -\frac{m}{a} & \frac{n}{b} \\ \frac{n}{b} & \frac{m}{a} \end{bmatrix} \left. \begin{bmatrix} A_i^{\text{TE}} \\ A_i^{\text{TM}} \end{bmatrix} \right\}, \quad (15)\end{aligned}$$

其中 $K_{mn} = \sqrt{\frac{ab}{2\rho_{mn}}} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}$, 当 $m, n = 0$,

$\rho_{mn} = 1$; 当 $m, n \neq 0$, $\rho_{mn} = 2$.

2.4. 波概念迭代法流程图

波概念迭代法流程图如图 3 所示。

2.5. 迭代过程

为了初始化迭代过程,首先放置激励源波 E_0 ,由此在各个空域产生了两项波 B_{ix} 和 B_{iy} ,利用快速二维傅里叶模式转换(FMT)分别得到各个区域的谱域波 B_i^{TE} 和 B_i^{TM} .这一转换的数学表达式如下：

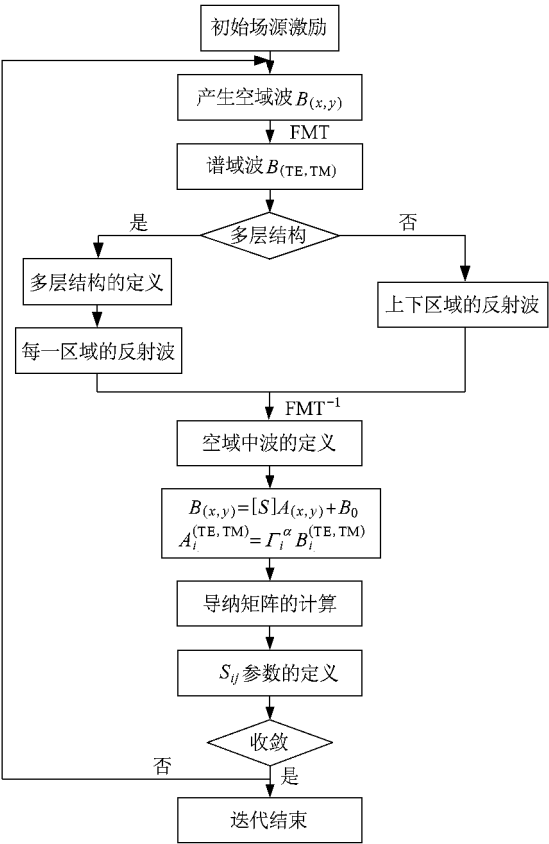


图3 波概念迭代方法的流程图

$$\begin{bmatrix} B_{i,TE} \\ B_{i,TM} \end{bmatrix} = \text{FMT} \begin{bmatrix} B_{i,x} \\ B_{i,y} \end{bmatrix}, i = 1, 2. \quad (16)$$

谱域波 B_i^{TE} 和 B_i^{TM} 在上下两个区域的反射分别得到谱域反射波 A_i^{TE} 和 A_i^{TM} ,由以下关系式表示：

$$\begin{bmatrix} A_i^{\text{TE}} \\ A_i^{\text{TM}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_i^{\text{TE}} & 0 \\ 0 & \Gamma_i^{\text{TM}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_i^{\text{TE}} \\ B_i^{\text{TM}} \end{bmatrix}, i = 1, 2. \quad (17)$$

为了返回到空域,此时需要利用快速二维傅里叶模式逆转换(FMT⁻¹),从而得到 A_{ix} 和 A_{iy} ：

$$\begin{bmatrix} A_{i,x} \\ A_{i,y} \end{bmatrix} = \text{FMT}^{-1} \begin{bmatrix} A_{i,TE} \\ A_{i,TM} \end{bmatrix}, i = 1, 2. \quad (18)$$

空域的波 A_{ix} 和 A_{iy} 构成下一次迭代的入射波,经由分界面 Ω 的反射从而产生两项波 B_{ix} 和 B_{iy} ,参照方程(9),如此进入下一个迭代过程.此过程将会持续 k 步直到电流密度和电场值收敛,此时可以得到迭代 k 步后交界面处的电流密度和电场值为

$$J_i^k = \frac{1}{\sqrt{Z_{0i}}} (A_i^k - B_i^k), \quad (19)$$

$$E_i^k = \sqrt{Z_{0i}} (A_i^k + B_i^k). \quad (20)$$

根据方程(19)和(20)可以确定导纳矩阵,接着便可得到二端口电路的散射参数 S_{ij} ：

$$[S] = [1 - [Y]] [1 + [Y]]^{-1}, \quad (21)$$

其中导纳矩阵定义如下：

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}, Y_{ij} = \frac{J_i}{E_j} \Big|_{E_i=0}. \quad (22)$$

2.6. 多层结构的分析

现在来考虑多层结构的情况,其一般模型如图4所示.

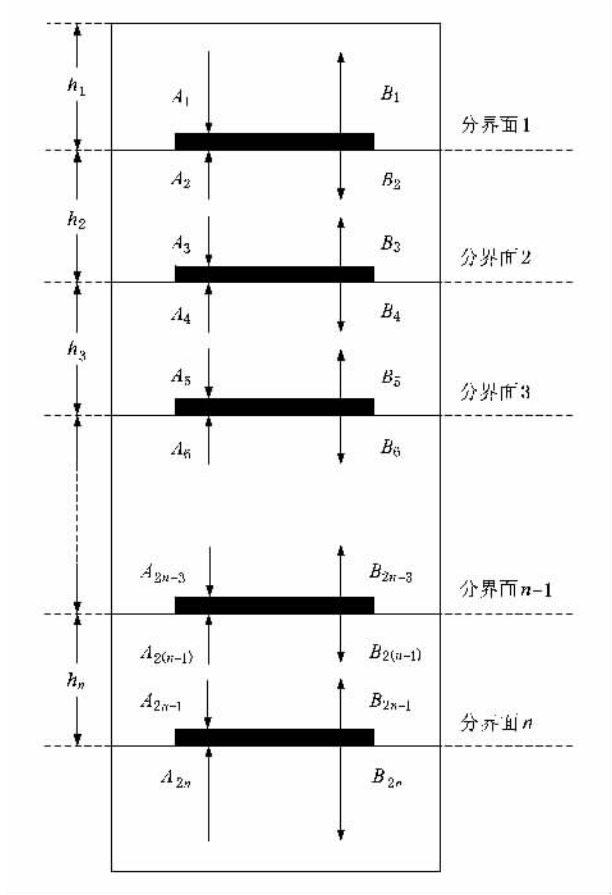


图4 多层结构

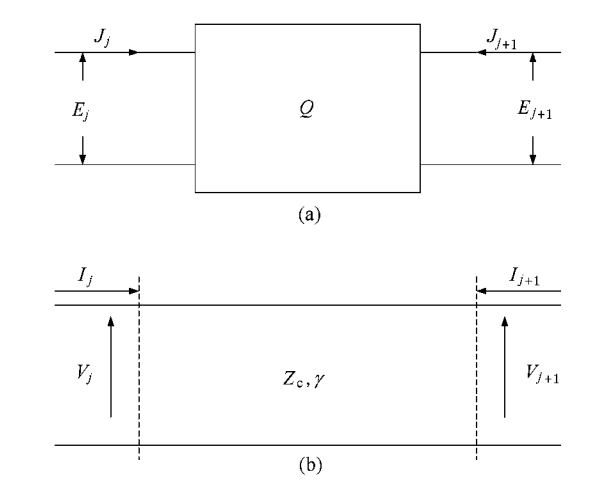


图5 (a)电模型 (b)传输线理论中的等效电路

在某一 j 层分界面处,波 (A_j, B_j) 和 (A_{j+1}, B_{j+1}) 之间的关系可利用传输线理论分析,其电模型

与等效电路如图 5 所示.
最终可得传输线的散射矩阵,表示如下:

$$S = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} (Z_c^2 - Z_{0,j}Z_{0,j+1}) \operatorname{sh}(\gamma h_{j+1}) & 2Z_c \sqrt{Z_{0,j}Z_{0,j+1}} \\ Z_c \sqrt{Z_{0,j}Z_{0,j+1}} & (Z_c^2 - Z_{0,j}Z_{0,j+1}) \operatorname{sh}(\gamma h_{j+1}) \end{pmatrix}, \quad (23)$$

其中

$$\Delta = 2Z_c \sqrt{Z_{0,j}Z_{0,j+1}} \operatorname{ch}(\gamma h_{j+1}) + (Z_c^2 + Z_{0,j}Z_{0,j+1}) \operatorname{sh}(\gamma h_{j+1}),$$

Z_c 是传输线阻抗, $Z_{0,j}$ 是第 j 层的特性阻抗, γ 是线的传输常数.

2.7. 计算优势的分析

FMT 和 FMT^{-1} 的引入是连接空域和谱域的纽带.采用快速傅里叶模式变换,避免了基函数的选取和大矩阵的逆转换,节省了内存,可以有效提高计算速度.相比较而言,矩量法是随着微带电路平面金属所占面积的增加而计算复杂度增加,波概念迭代法却不会有计算复杂度方面的较大改变.

下面通过对波概念迭代法的循环次数和计算复杂度与矩量法作比较,以证明使用 WCIP 可在一些条件下大大减少计算复杂度.我们假定 P 为网格数, N 为迭代次数,其中 K 是金属部分占总面积的百分比.

- 1)空域的计算复杂度 : P ;
- 2)快速傅里叶模式变换的计算复杂度 : $\log_2 P$;
- 3)谱域的计算复杂度 : P .

所以总的计算复杂度为 $N_T = N(4P + 12P \ln P)$ 对应矩量法的计算复杂度 $(KP^3)/3$. 我们知道数学上当满足 $N_T = N(4P + 12P \ln P) < (KP^3)/3$ 时,迭代法会比矩量法更加有效.下面通过图 (a) (b) (c) 给出直观的比较.

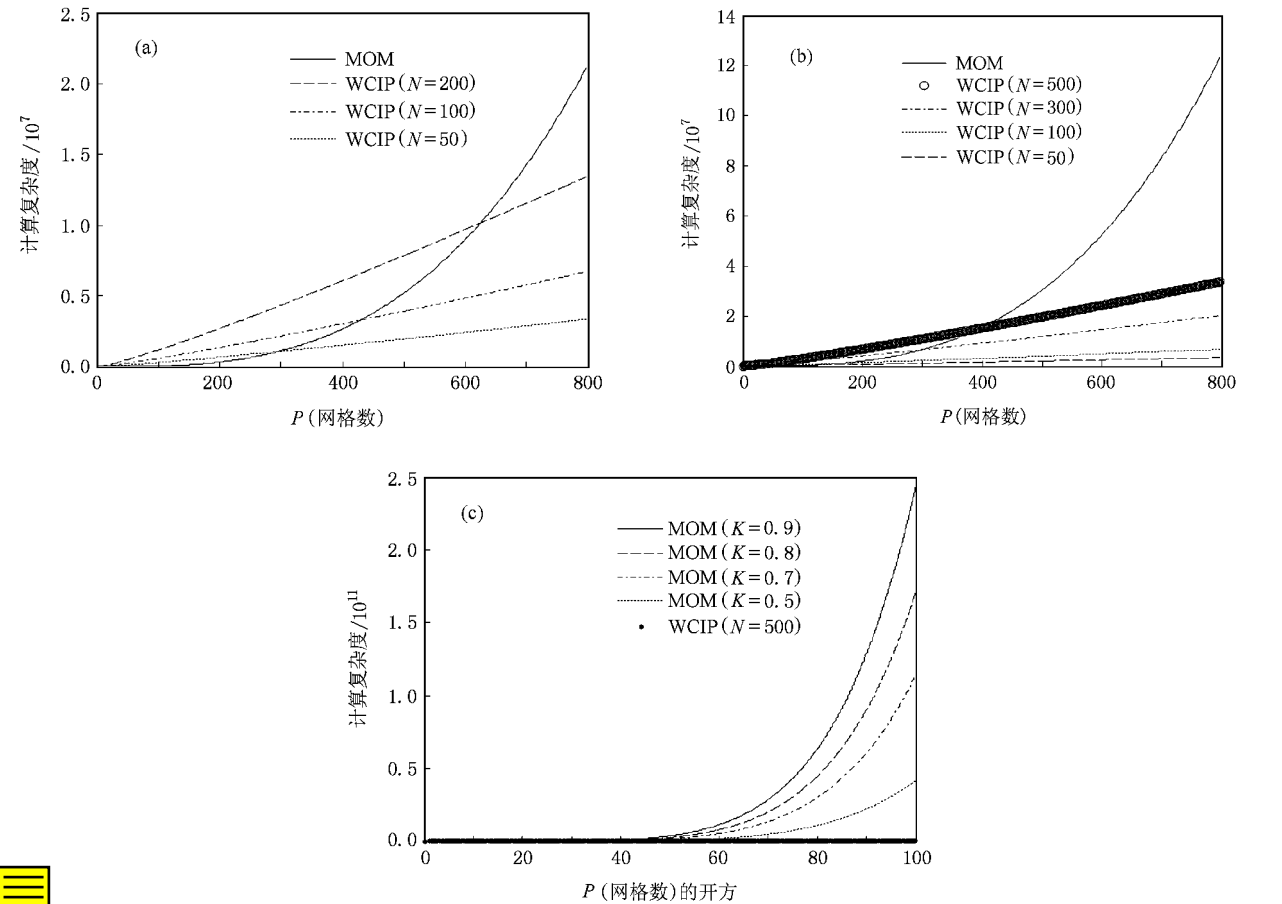


图 6 波概念迭代法和矩量法计算复杂度对比 (a) $K=0.5$ (b) $K=0.9$ (c) $n=500$

从图 6 可以得到, 网格数目越多, 即电路结构越复杂, 波概念迭代法越显示出其优势, 金属网格部分占总网格数比例较大时, 波概念迭代法更有优势; 从对应于 50×50 cell 大小开始, 迭代步数总在 500 以下收敛, 因此在迭代为 500 步时, 波概念迭代法始终优于矩量法。

3. 波概念迭代法的应用

3.1. 低温共烧陶瓷 LTCC 技术

现代移动通信的迅猛发展对滤波器提出了更高的要求, 在工作频率不断提高的同时, 器件的体积却越来越小. 为了能在器件小型化的同时降低其损耗, 获得更高的品质因素, 就需要寻求新的材料和技术. 在众多的微波介质材料中, 低温共烧陶瓷工艺因为具备高耐湿性, 高耐温性, 高热传导率, 低介质损耗以及高电导率材料的使用和制造工艺简单, 成本低廉等特点, 使其在高频中的应用越来越广泛. 多层结构加之高介电常数材料的使用, 能有效缩小滤波器的体积.

3.2. 一种新式 LTCC 层叠式多层带通滤波器

本文所研究的新式多层结构尺寸为 $19.9 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$, 滤波器由八层金属图案构成. 滤波器

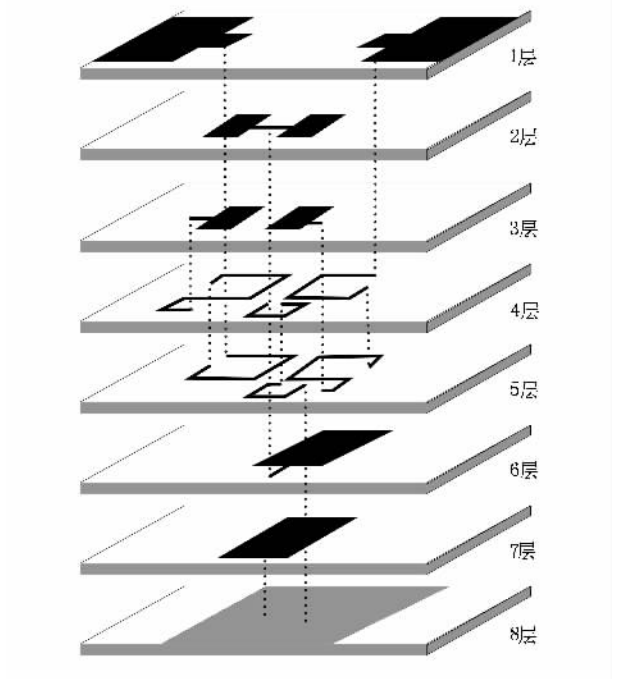


图 7 一种新型多层 LTCC 带通滤波器结构

介质材料采用 Ferro 材料, 其相对介电常数 $\epsilon_r = 5.9$, 每层介质层的厚度为 0.1 mm , 内部金属层材料选用银, 其厚度为 0.007 mm , 金属通孔直径 $150 \mu\text{m}$. 具体结构如图 7 所示.

LTCC 层叠式多层带通滤波器采用集总元件电感 L 和电容 C 设计而成, 中心频率 1.25 GHz , 其等效电路原理图见图 8, 各电感和电容元件参数如下: $L_1 = 20.7442 \text{ nH}$, $L_2 = 2.3140 \text{ nH}$, $L_3 = 110 \text{ nH}$; $C_1 = 0.8140 \text{ pf}$, $C_2 = 7.2974 \text{ pf}$, $C_3 = 0.2 \text{ pf}$. 滤波器利用耦合电感 L_3 和耦合电容 C_3 在带外高端产生一个传输零点, 传输零点所在的频率为 3.2 GHz .

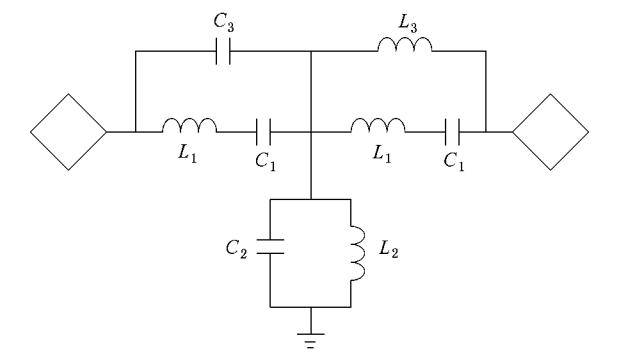


图 8 LTCC 层叠式多层带通滤波器的等效电路原理

3.3. 结果分析

为了证明我们的理论, 运用波概念迭代法编程对此新型 LTCC 层叠式多层带通滤波器进行计算. 编程计算结果与仿真软件(Ansoft HFSS)结果比照如图 9 和图 10 所示, 两者显示出很好的一致性.

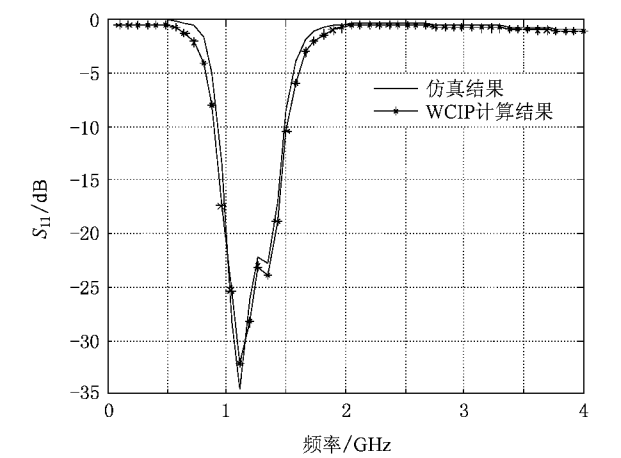


图 9 S_{11} 的频率响应

最后将 WCIP 与仿真软件的内存与计算速度进

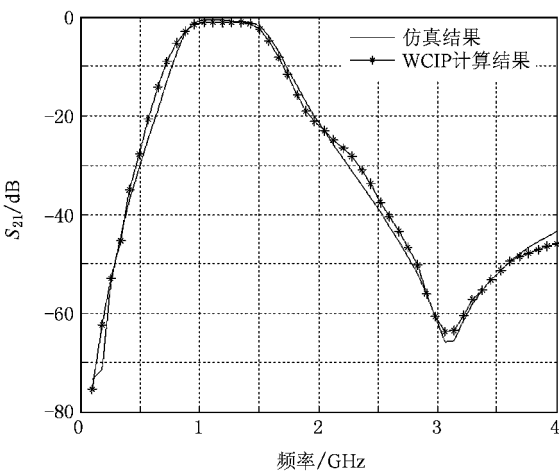


图 10 S_{21} 的频率响应

行比较 ,如表 1 所示 .

表 1 WCIP 与仿真软件的计算优势比较

	WCIP	Ansoft HFSS
剖分网格数目	64 × 64	36529
计算时间/min	12.27	20.04
内存/MHz	29	317

4. 结 论

本文从波的概念出发 ,引入一种基于空域结合谱域变换的迭代算法 .由于采用快速二维傅里叶模式变换 ,避免了基函数和大矩阵的逆转换 ,节省内存从而有效提高计算速度 .基于此迭代法编程对一种新型 LTCC 层叠式多层带通滤波器进行分析 ,编程计算结果与仿真软件结果两者之间显示出很好的一致性 .

[1] He C H ,Geng B ,He B P ,Yao Y J ,Li Y H ,Peng H L ,Lin D S ,Zhou H ,Chen Y S 2004 *Acta Phys . Sin .* **53** 194(in Chinese)[贺朝会、耿冰、何宝平、姚育娟、李永宏、彭宏论、林东生、周辉、陈雨生 2004 物理学报 **53** 194]

[2] Itoh T 1986 Ed. New York : Wiley 133—155

[3] R F Harrington 1993 *Field computation by moment method* IEEE Press , New York

[4] Wang R , Guo L X , Qin S T , Wu Z S 2008 *Acta Phys . Sin .* **57** 3473 (in Chinese)[王蕊、郭立新、秦三团、吴振森 2008 物理学报 **57** 3473]

[5] Sheen D M , Abouzahra S M D , Kong J A 1990 *IEEE Trans . Microwave Theory Tech .* **8** 849

[6] Yang G J , Kong F M , Li K , Mei L M 2007 *Acta Phys . Sin .* **56** 4252 (in Chinese)[杨光杰、孔凡敏、李康、梅良模 2007 物理学报 **56** 4252]

[7] J Jin 1993 *The finite element method in electromagnetics*. John Wiley & Sons , New York

[8] Du Q Z ,Yang H Z 2003 *Acta Phys . Sin .* **52** 2010 (in Chinese) [杜启振、杨慧珠 2003 物理学报 **52** 2010]

[9] Fang D G , Yang J J , Se M , Delisle G Y 1988 *IEE Proc . H* **35** 297

[10] Chow Y L , Yang J J , Fang D G , Howard G E 1991 *IEEE Trans . MTT*. **139** (3) 588

[11] Kaddour M , Gharsallah A , Mami A , Baudrand H 2004 *Journal of Microwaves and Optoelectronics* **3** (4) 16

[12] Baudrand H , N 'Gongo R S 1999 *Recent Research Developments in Microwave Theory and Techniques , Transworld Research Network , Kerala , India* **1** 187

[13] Sboui N , Gharsallah A , Gharbi A , Baudrand H 2001 *IEE Proc . A . licroiz . A ilenrius Propug* **14** (3) 209

[14] Baudrand H , Bajon D 2002 *Int . J . Numer . ,Model . Electron . Netw . Devices Fields* **15** 23

[15] Mami A , Zairi Z , Gharsallah A , Baudrand H 2004 *Wiley Periodicals , Inc . Int J RF and Microwave CAE* **14** 404

[16] Trabelsi H , Gharsallah A , Baudrand H 2003 *Wiley Periodicals , Inc . Int J RF and Microwave CAE* **13** 269

[17] Akatimagool S , Bajon D , Baudrand H 2001 *IEEE MTT-S Proc . Int . Microw . Symp . Dig .* **3** 1941

[18] Kaddour M , Mami A , Gharsallah A *et al* 2003 *Journal of Microwaves and Optoelectronics* **3** (1) 39

[19] Wing Yan Leung , Kwok-Keung M. Cheng , Wu K L 2002 *IEEE Trans . Microwave Theory Tech .* **12** (7) 240

Analysis of a new kind of LTCC cascade multilayer structure by wave concept iterative process

Feng He[†] Xie Yong-Jun Wang Yuan-Yuan Fu Huan-Zhan Lei Fei-Ran

(*Department of Electronics Engineering , Xidian University , Xi 'an 710071 , China*)

(Received 26 July 2008 ; revised manuscript received 16 September 2008)

Abstract

In this paper , an efficient new method named wave concept iterative process (WCIP) based on transformation between space domain and spectral domain is introduced. The derived WCIP theory formulation is presented in detail. A new kind of LTCC multilayer structure is analyzed using the iterative method. The approach involves the mixed magnetic and electric field equation and S parameter extraction technique based on a simple form of matched load simulation. The whole process is illustrated by MATLAB programming , so that frequency response of S parameter is determined. The numerical results are compared with the simulation results and good agreement shows the validity and usefulness of the iterative method given in this paper.

Keywords : wave concept iterative process , fast Fourier mode transformation , low temperature Co-fired ceramic

PACC : 4110H , 8120L

[†] E-mail : fenghe0722@ yahoo. cn