

## FDTD结合最小二乘拟合法分析PBG滤波结构

李斌 张玉 梁昌洪

(西安电子科技大学天线与微波国家重点实验室 西安 710071)

**摘要** 为了能应用FDTD方法快速有效地分析各种PBG滤波结构电磁特性,该文应用FDTD结合最小二乘拟合法对两类新型PBG滤波结构进行了具体分析,给出了FDTD结合最小二乘拟合法计算的最小迭代步数和如何选出谐振段去除振荡原则,最后通过数值仿真结果,表明该方法能有效减少FDTD的迭代步数,节省计算时间,特别适用于大周期和复杂的PBG滤波结构分析。

**关键词** FDTD, 最小二乘拟合法, PBG滤波结构

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-0757-03

## Analysis of Microstrip PBG Filter Structures Using FDTD with Least Square Fitting Method

Li Bin Zhang Yu Liang Chang-hong

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

**Abstract** In this paper, the FDTD with least square fitting method is used to calculate the S parameters of PBG filter structures, Furthermore, the least square fitting method is employed combined with FDTD to reduce the iterative steps. To show the accuracy of the method, a simulated result is given in the latter part of the paper and various comparisons are made for such a demonstration.

**Key words** FDTD, Least square fitting method, PBG filter structures

### 1 引言

众所周知,最初光子带隙(PBG)<sup>[1]</sup>被应用于光学频段,近几年,被广泛应用于微波、毫米波频段,在微带天线和滤波器设计方面已经取得巨大进展<sup>[2,3]</sup>。但是应用解析的方法分析这类结构并不总是可行的,因此,数值方法是一个良好的补充。近来,有限时域差分法被广泛地应用于各种PBG滤波结构的分析中<sup>[4,5]</sup>。

通常, PBG滤波结构属于多谐振结构,此类结构使得电磁场能量在结构中较长时间的振荡。将FDTD方法应用于分析这类PBG滤波结构时发现,如果没有足够多的迭代步数,计算出来的S参数曲线会有比较大的振荡,显然这些振荡并不能被有效地移除,虽然更多的迭代步数能使其减小,但同时计算时间将大大增加。本文中应用最小二乘拟合法结合FDTD算法可以有效地移除这种由于PBG谐振结构而产生的振荡。

本文阐述了FDTD结合最小二乘拟合的原理,通过实例对其性能进行了详细研究。最后,给出的实例数值结果表明,

最小二乘拟合结合FDTD算法的正确性与有效性。

### 2 结合最小二乘拟合(LSF)的FDTD方法(FDTD-LSF)

在应用FDTD-LSF方法时,其中有两个问题是必须引起注意的,如图1所示。第一,如何确定在FDTD计算中,何时提取S参数和LSF方法估算S参数所需的FDTD的迭代最小时间步。第二,如何选出谐振段应用LSF方法去除振荡。

如图2所示,电磁波信号是由端口1传输到端口2,仅以微带PBG滤波结构为例,结构中的阻抗不连续性使得部分信号在沿线传输时发生了多次反射。FDTD计算的总时间步应为波由端口1传输到端口2,再由端口2反射回端口1,如此多次反复,其物理谐振效应才能够消除,从而提取的电路参数才比较准确。

如果传输线的长度为 $L_x$ , FDTD网格沿 $x$ 方向尺寸为 $\Delta x$ , 假设 $C\Delta t = \Delta x / CFL$ 是保证数值稳定条件,其中 $CFL = \sqrt{1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2 + 1/\Delta z^2}$ , 因此,提取参数的时间步应

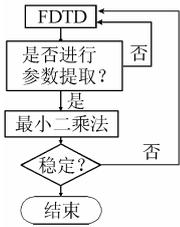


图1 FDTD-LSF方法流程图

Fig.1 Flow chart of FDTD-LSF method

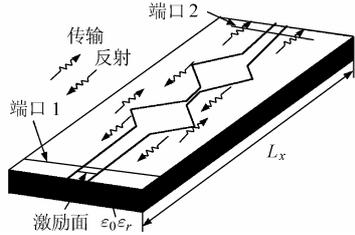


图2 传输与反射

Fig.2 Transmission and reflection

该是  $T$  的倍数, 而  $T$  的表达式如式(1)所示:

$$T \approx \text{INT}(\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \cdot \text{CFL} \cdot L_x / \Delta x) \quad (1)$$

根据网络理论  $S_{11}$  为端口1的散射参数, 频率阻带可以根据  $S_{11}$  随频率变化的程度被自动选择, 可以用差分格式表示导数  $\partial |S_{11}| / \partial f$ , 如式(2)所示:

$$\frac{\partial |S_{11}|}{\partial f} \approx \frac{\Delta |S_{11}|}{\Delta f} = \left| \frac{|S_{11,i+1}| - |S_{11,i}|}{\Delta f} \right| \quad (2)$$

这里的  $S_{11,i+1}$  是  $S_{11}$  在  $(i+1)$  频率采样点的值,  $\Delta f$  为频率采样点的间隔。因此可以简单认为当等式(2) $>10$ 时, 频率阻带的起点或终点对应为第  $(i+1)$  个频率点。值得注意的是当移除  $S_{21}$  的抖动时, 我们用  $S_{11}$  来区别出阻带频谱, 这是由于激励一般多选在端口1附近, 因此在相同时间间隔时, 端口1的电压波包含了更多的信息。

### 3 数值结果

以新型微带 PBG 滤波结构和 PBG 介质波导滤波结构为例, 运用 FDTD 结合最小二乘拟合法对其电磁特性进行分析。

#### 3.1 新型微带 PBG 滤波结构

此种微带PBG滤波结构<sup>[6]</sup>具有两大特征: (1)它仅有一个带隙; (2)不需要在接地板上腐蚀孔。这种滤波器的单元结构的特性阻抗是随着微带线宽度变化而正弦变化的, 它的变量仅仅是微带线的宽度, 如图3所示。滤波器总体结构是由单元周期排列组成, 而每一个单元结构的特性阻抗  $Z_c$  是沿单元

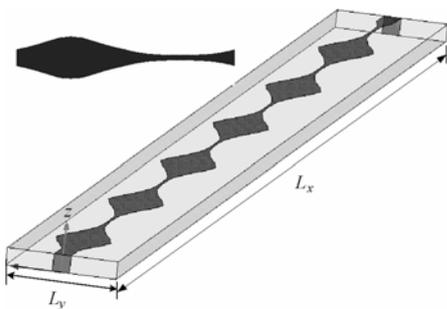


图3 新型微带 PBG 滤波结构模型

Fig.3 the shape of one cell and the model of microstrip PBG structure

的相对位置  $(P/L_x)$  的正弦函数, 其中  $L_x$  是单元长度,  $P$  为沿单元的位置。

此处选取单元结构的特性阻抗  $(Z_{C_{\min}}, Z_{C_{\max}})$  为  $(25\Omega, 100\Omega)$ , 相对介电常数为  $\epsilon_r = 2.2$ , 介质板的厚度为  $0.508\text{mm}$ , 从而得到  $50\Omega$  微带线的宽度  $W_{Z_c} = 1.5\text{mm}$ 。相应地,  $W_{Z_{C_{\max}}} = 0.4\text{mm}$ ,  $W_{Z_{C_{\min}}} = 3.8\text{mm}$ , 其由6个单元组成, 每个单元长度  $L$  为  $20.0\text{mm}$ , 微带板的总长度  $L_x = 128.0\text{mm}$ , 宽度  $L_y = 8.0\text{mm}$ 。

再考虑介质层厚度, 本例选取  $\Delta x = \Delta y = 0.2\text{mm}$ ,  $\Delta z = 0.254\text{mm}$ , 采用具有  $20\text{GHz}$  带宽的高斯脉冲源激励和 UPML 截断计算区域, 计算时保证 S 参数的电压提取端口距离 UPML 内边界 10 个网格以上, 则最终选取的总计算区域为:  $80 \times 640 \times 36$ , FDTD 计算模型如图4所示。在本例中对于  $50\Omega$  传输线有效介电常数为  $\epsilon_{\text{eff}} \approx 1.85$ , 从而可近似认为  $\text{CFL} = \sqrt{3.0}$ ,  $T \approx \text{INT}(\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \cdot \text{CFL} \cdot L_x / \Delta x) \approx 3015$ , 为了方便起见, 我们可设置  $T = 3500$ 。

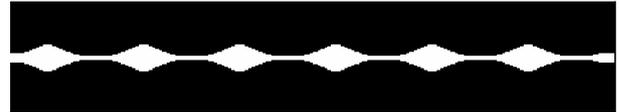


图4 FDTD 微带线计算模型

Fig.4 FDTD calculation model of the microstrip line

由图5可知, 这种PBG结构在  $3.5\text{GHz} - 7.2\text{GHz}$  之间具有明显的带隙。需要指出的是, 为了比较准确获得参数, 仿真这个具有谐振特性的PBG结构, 大约要 40000 次迭代才能获得光滑的  $S_{21}$  曲线, 单机计算则大概需要 62h, 而采用本文的方法得到同样的结果仅需要 21500 次迭代, 大约耗时 34h。

#### 3.2 新型 PBG 介质波导滤波结构

此种波导 PBG 滤波结构是将光子晶体结构引入到矩形金属波导, 因为光子晶体具有频率带隙, 所以这种结构填充介质的波导就是一个滤波器, 具有很好的阻带特性, 而且带宽较大, 其结构如图6所示。

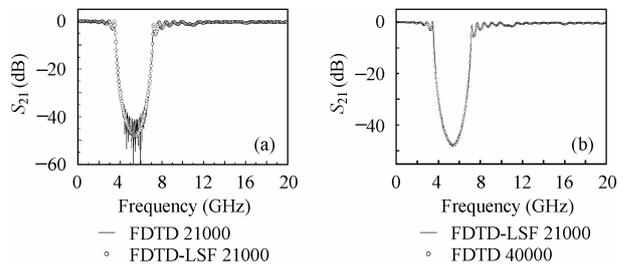


图5 (a)  $|S_{21}|$  (FDTD 和 FDTD-LSF 迭代 21000 步数据)

(b)  $|S_{21}|$  (FDTD 迭代 40000 步与 FDTD-LSF 迭代 21000 步数据)

Fig.5 (a)  $|S_{21}|$  (FDTD and FDTD-LSF both performed 21000 times iteration)

(b) FDTD and FDTD-LSF performed 40000 and 21000 times

iteration, respectively)

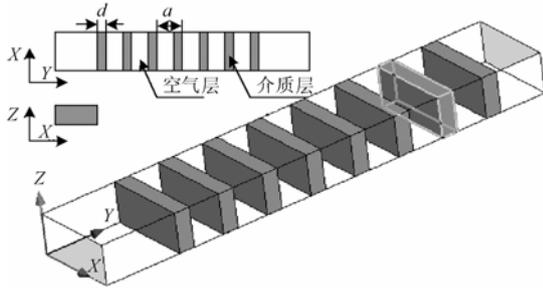


图 6 PBG 介质波导滤波结构模型

Fig.6 The model of dielectric layers PBG filter structures in waveguide

PBG 介质波导滤波结构基本设计公式<sup>[7]</sup>为

$$\epsilon_{\text{eff}} = (d/a) \epsilon_r + (1 - d/a) \quad (3)$$

$$\lambda_g = (\lambda / \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}) / \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_c)^2} \quad (4)$$

$$a = \lambda_g / 2 \quad (5)$$

其中  $d$  和  $a$  如图 6 所示,  $\epsilon_r$  和  $\epsilon_{\text{eff}}$  分别为介质的相对介电常数和 PBG 结构的有效介电常数,  $\lambda$  与  $\lambda_g$  分别为 PBG 结构形成的阻带中心频率对应的真空中波长和相应的波导波长,  $\lambda_c$  为矩形波导  $\text{TE}_{10}$  模对应的截止波长。利用上述的设计公式, 设计了阻带中心频率约为 12GHz 的 PBG 结构, 矩形波导的横向截面尺寸为  $22\text{mm} \times 10\text{mm}$ ,  $\epsilon_r = 2.2$ ,  $d = 5\text{mm}$ ,  $a = 12\text{mm}$ ,  $d/a = 0.417$ , 沿波导纵向设置 15 个周期。最终选取的总计算区域为:  $12 \times 12 \times 300$ , FDTD 计算模型如图 7 所示。在本例中经过计算, 我们可设置  $T = 2500$ 。

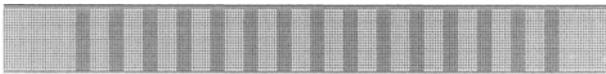


图 7 FDTD 介质波导计算模型

Fig.7 FDTD calculation model of the dielectric waveguide

由图 8 可知, 这种 PBG 结构在 10GHz - 13.5GHz 之间具有明显的带隙。由比较本方法迭代 10000 步和直接 FDTD 方法迭代 100000 步所提取的  $S_{21}$  参数曲线, 可以看出采用本文方法, 可极大缩短计算时间, 提高计算效率。实际工程应用时所采用的 PBG 结构大都周期数比较多, 单元结构比较

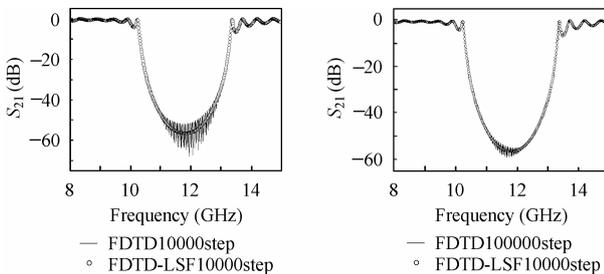


图 8 (a)  $|S_{21}|$  (FDTD 和 FDTD-LSF 迭代 10000 步数据)

(b)  $|S_{21}|$  (FDTD 迭代 100000 步与 FDTD-LSF 迭代 10000 步数据)

Fig.8 (a)  $|S_{21}|$  (FDTD and FDTD-LSF both performed

10000 times iteration) (b)  $|S_{21}|$  (FDTD and FDTD-LSF

performed 100000 and 10000 times iteration, respectively)

复杂, 端口特性要求较高, 应用 FDTD 直接对其进行仿真分析, 则耗时比较长。而本文方法正是在对周期数比较多, 结构比较复杂的 PBG 滤波结构分析中, 特别是单周期  $T$  耗时较长, 其电磁波在结构中振荡次数较多时, 具有更好的效果。

#### 4 结束语

本文利用 FDTD 计算了两类新型 PBG 滤波结构的 S 参数特性, 结合最小二乘拟合法去除阻带 S 参数的振荡, 减少迭代步数, 可以有效节约计算时间, 数值结果表明这一方法的准确性和有效性以及在周期数比较多, 结构比较复杂 PBG 滤波结构分析作用更大。从而能得出应用 FDTD-LSF 方法可有效解决 FDTD 仿真谐振 PBG 滤波结构耗时过长的问题。

#### 参考文献

- [1] Yablonovitch. E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(20): 2059 - 2062.
- [2] Rumsey I, Picket-May M, Kelly P K. Photonic band gap structures used as filters in microstrip circuits. *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, 1998, 8(10): 336 - 338.
- [3] Zee Iluz, Reuven Shavit, Reuven Bauer. Microstrip antenna phased array with electromagnetic bandgap substrate. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2004 52(6): 1446 - 1453.
- [4] Anaya M, Marcotegui J A, Lopetegi T, G.Laso M A, Sorolla. M. Analysis of new periodic structures in microstrip by FDTD. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Barcelona, Spain, September 2000: 11 - 14.
- [5] 宋健, 张玉, 梁昌洪. 共形 FDTD 分析圆形光子带隙微带结构. *西安电子科技大学学报*, 2004, 31(5): 678 - 681.
- [6] Nestic D, Nestic A. Band stop microstrip PBG filter with sinusoidal variation of the characteristic impedance and without etching in the ground plane. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2001, 29(6): 418 - 420.
- [7] 闫敦豹, 袁乃昌, 付云起. 基于 FDTD 的波导介质层 PBG 结构的研究. *电子与信息学报*, 2004, 26(1): 118 - 123.

李 斌: 男 1978 年生, 博士生, 从事光子晶体、多路耦合器等方面的研究。

张 玉: 男 1978 年生, 博士, 研究方向为电磁场数值计算、电磁兼容、并行计算等方面研究。

梁昌洪: 男 1943 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE Senior member, 研究方向为计算场论、计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等。