

应用网络理论分析一维微带光子带隙滤波器

李斌，张玉，梁昌洪

(西安电子科技大学 天线与微波技术重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要：为了有效分析一类一维微光子带隙(PBG)滤波器的电磁特性, 应用微波网络理论对PBG单元阻抗变化范围、周期个数对PBG滤波器的传输特性的影响进行了分析。分析表明, 只要PBG结构单元中特性阻抗按一定规律变化, 其整体结构均会呈现带隙特性。

关键词：微波网络理论; 微带结构; 光子带隙滤波器

中图分类号: TN011 文献标识码: A 文章编号: 1001-2400(2005)04-0508-05

The analysis of one dimensional microstrip photonic bandgap filters by using the network theory

LI Bin, ZHANG Yu, LIANG Chang-hong

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

Abstract: The Network Theory is employed to analyze a type of 1D microstrip PBG filter structure, and a detailed analysis is made to study the influence of the variation of characteristic impedance and the periodic number on the transmission characters. Finally it is concluded that the Microstrip filter structure will have Stop-Band properties only if the characteristic impedance regularly varies along the length of the cell.

Key Words: network theory; microstrip structures; photonic bandgap filter

光子晶体, 又叫光子带隙(PBG)^[1]材料, 其应用范围从可见光、红外到微波、毫米波甚至声波、水波频段。光子晶体在微波、毫米波频段的应用有光子晶体波导、光子带隙滤波器和光子晶体天线等。光子带隙微带滤波器最初是采用衬底打孔的方法形成周期性结构^[2], 从而获得带隙特性; 后来发现只需在微带接地面上腐蚀出周期结构^[3,4]也可得到相同的特性。

随着微波集成电路的快速发展, 对介质板打孔或对接地板底面进行腐蚀制作PBG结构在实现MMIC封装时存在着比较大的问题, 腐蚀地板必须离任何金属板足够远以保证腐蚀方案能起到作用, 这样不仅增大了体积, 而且工艺比较复杂。因而, 研究微带传输线的形状变化而不进行地板的腐蚀, 能比较好的解决这一难题。近来, 利用微带线阻抗的周期性变化制作的滤波器已有报道^[5], 对已报道的结构进行研究分析, 发现微带线的阻抗只要成非均匀周期变化, 就可实现带隙, 利用这一特性制作的一维PBG滤波器不仅具有良好的阻带特性, 而且结构简单、易于实现、便于集成。根据这类PBG的结构特性, 应用网络法的理论对其进行理论分析, 给出理论计算的传输系数曲线。

1 网络理论与PBG滤波器

这里研究了一维微带的PBG结构滤波器, 可以被看成由多个PBG结构单元级联形成的线性二端口网络, 其PBG结构单元是由特性阻抗呈非均匀变化的传输线构成, 见图1。

对于PBG结构中的每一个单元结构, 可以看成是由有限段不同特性阻抗传输线级联形成的二端口网络。每个单元采用ABCD矩阵进行计算, 均匀传输线的ABCD矩阵^[6]可以写为

收稿日期: 2004-08-30

基金项目: 973 重大项目基金资助(00300113); 天线与微波技术重点实验室基金资助项目(51437010205DZ0101)

作者简介: 李斌(1978-), 男, 西安电子科技大学博士研究生。

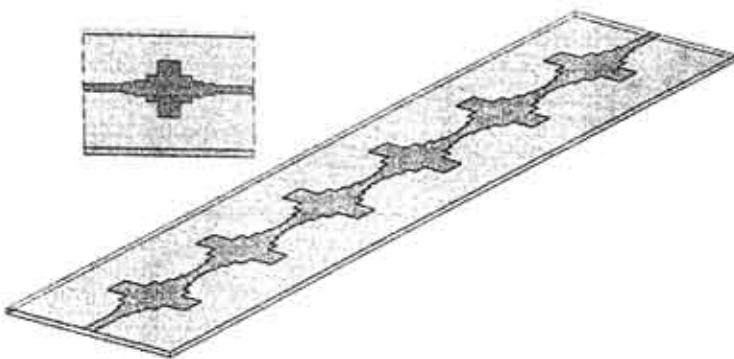


图1 PBG结构滤波器

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta l & j Z \sin \beta l \\ j Y \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 β 为相位常数, Z 为特性阻抗, Y 为特性导纳, l 为传输线的物理长度.

由于单元中的非均匀传输线可以看成有限段不同特性阻抗均匀传输线的级联, 因此根据 ABCD 矩阵的级联性质, 非均匀传输线的 ABCD 矩阵可以写为有限个均匀传输线的 ABCD 矩阵的联乘形式:

$$\begin{bmatrix} A_{cl} & B_{cl} \\ C_{cl} & D_{cl} \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix}. \quad (2)$$

对于一维的微带 PBG 滤波器, 是由一定数目的单元组成的, 如图 2 所示.

继续应用 ABCD 矩阵的性质, 整体滤波器的 ABCD 矩阵也可看成每一单元的 ABCD 矩阵的联乘形式:

$$\begin{bmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} A_{ci} & B_{ci} \\ C_{ci} & D_{ci} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

根据上式可计算出整体的 PBG 滤波器的 ABCD 矩阵. 在频域中反射系数 $R_w(w)$ 和传输系数 $T_w(w)$ 与 ABCD 矩阵的关系^[7,8] 为

$$R_w(w) = (A_T + B_T/Z_0 - C_T Z_0 - D_T)/(A_T + B_T/Z_0 + C_T Z_0 + D_T), \quad (4)$$

$$T_w(w) = 2/(A_T + B_T/Z_0 + C_T Z_0 + D_T), \quad (5)$$

其中 Z_0 为参考特性阻抗, 在滤波器中一般采用 50Ω .

根据这一思路, 可认为这类 PBG 结构的单元可由任意的非均匀传输线构成, 其特性阻抗^[9] 可被表达为

$$Z_c = Z_c(0) \cdot f(x), \quad 0 \leq x \leq L, \quad (6)$$

$$\beta(x, w) = (w/c) \cdot g(x), \quad 0 \leq x \leq L, \quad (7)$$

其中 $f(x)$ 和 $g(x)$ 是任意的沿非均匀传输线连续变化的正值函数.

提出的 PBG 结构如表 1 所示. $a_1 \sim a_6$ 是几种典型的特性阻抗呈非均匀变化的微带线滤波器, 其中 a_1, a_2, a_3, a_4 的特性阻抗呈阶梯渐变, a_5 呈正弦渐变, a_6 呈指数渐变.

2 PBG 结构特性分析

PBG 滤波器的中心频率决定于周期结构的每个周期单元长度的大小. 对于一维结构, 即单元长度 L 为导波波长 λ_g 的 $1/2^{[10]}$.

$$L = \lambda_g/2. \quad (8)$$

当 PBG 滤波器阻带中心频率确定, 这类 PBG 滤波器的滤波性能则主要决定于周期结构单元数和单元中特性阻抗变化的最大比值 $K = Z_{cmax}/Z_{cmin}$, 应用网络法研究了这两个因素对 PBG 滤波器性能的影响, 计算结果如图 3, 图 4 所示.

可以看到随着单元数的增加, 滤波器的性能逐步提高. 带隙的变化仅是随着 PBG 结构的单元数目的增

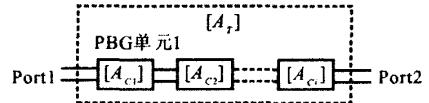


图2 PBG结构滤波器等效网络

多,而增加带隙的深度,对阻带的宽度基本没有影响,但是单元数的增加同时也增加了整个滤波器的体积.

表1 6种由特性阻抗呈非均匀变化的传输线构成的PBG滤波器

编 号	单元结构	PBG滤波器
a_1		
a_2		
a_3		
a_4		
a_5		
a_6		

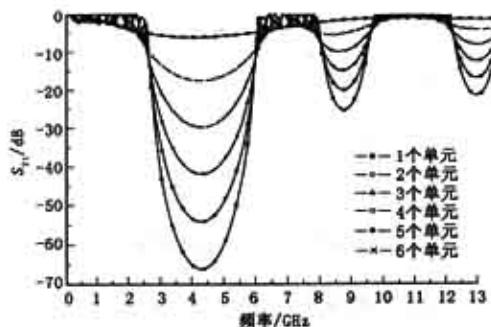


图3 单元数目对PBG滤波器特性的影响

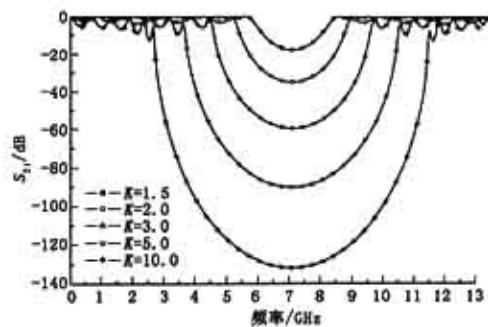
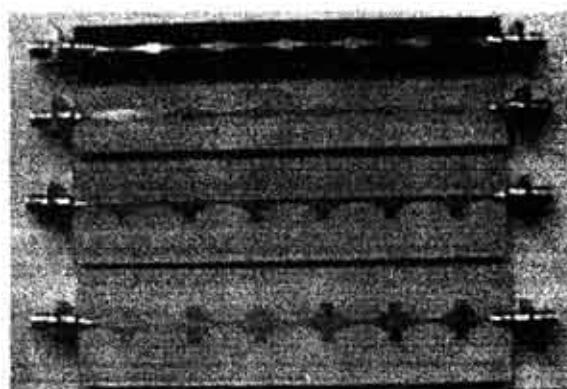


图4 单元中特性阻抗变化的最大比值K对PBG滤波器性能的影响

同时由图4还可看出,随着增大K值,滤波器的性能也会逐步提高,带隙变宽,阻带加深,但随着K值的增大,滤波器带内波纹变大,同时K值的增大使高阻线相对于低阻线必须非常细,例如,在敷铜板介质材料为聚四氟乙烯,其相对介电常数为2.9,厚度为0.8 mm的板材上,令高阻值为 $Z_{cmax} = 100 \Omega$,低阻值为 $Z_{cmin} = 10 \Omega$,此时 $K = Z_{cmax}/Z_{cmin} = 10$,高阻线线宽为0.5215 mm,低阻线线宽为15.30 mm,最粗处为最细处的30倍,一般工艺不容易实现.在兼顾实际加工及滤波性能要求的条件下,单元数选择6个,K值不大于8比较适宜.



3 计算结果与实测数据

图5 滤波器的实物照片

为了验证文中方法的正确性与有效性,在PBG结构选取了结构相对简单的 a_1, a_2, a_3, a_4 几种PBG滤波器进行了仿真和加工.所设计的PBG滤波器的带隙中心频率为4.5 GHz左右,敷铜板介质材料为聚四氟乙烯,其介电常数为2.9,厚度为0.8 mm.其电路板的尺

寸为: $130 \times 10, 130 \times 20, 130 \times 25, 130 \times 26$, 其单位为 mm. 需要说明的是 a_4 结构采用的是介电常数为 2.55, 厚度为 1.2 mm 的敷铜板, 所以中心频率偏大一些. 图 5 为几种滤波器的实物照片.

将 PBG 滤波器两端采用 SMA 连接头连接. 用 HP 8719ES 矢量网络分析仪测量了它们的传输系数曲线, 并和应用微波网络理论计算的结果及应用全波仿真软件的结果进行了比较.

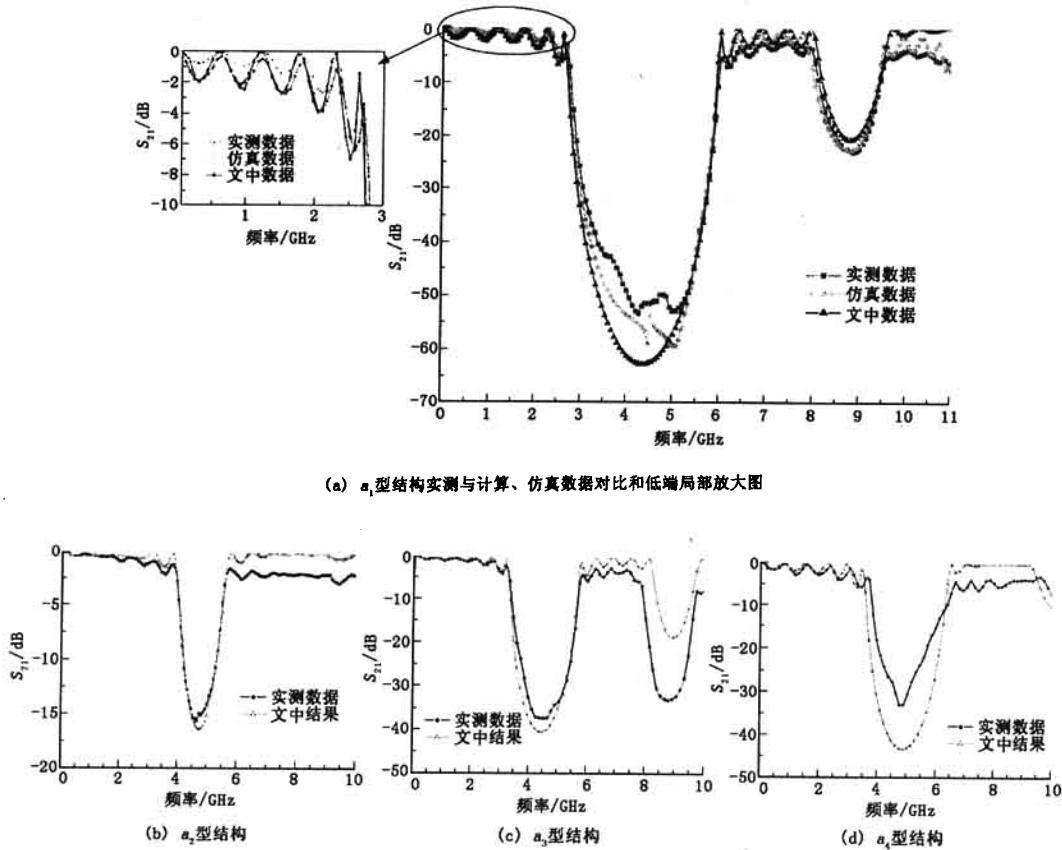


图 6 实测与计算、仿真数据对比和低端局部放大图

图 6 为 4 种结构的实测数据与文中方法计算结果的对比图. 应用网络法计算此类一维微带 PBG 结构和应用全波仿真都能和实测数据相吻合, 需要说明的是, 所采用的介质材料在高频的损耗比较大, 所以曲线后段的高频部分没有明显的回到通带上, 但在低频端, 如图 6(a)所示, 它比应用全波仿真软件计算更加接近实测曲线.

应用微波网络理论的 ABCD 矩阵去分析这一类 PBG 结构, 为 PBG 滤波器的设计提供了巨大的方便, 特别是对于一些比较复杂的 PBG 结构, 例如: 满足特殊函数曲线变化的非均匀传输线构成的 PBG 单元, 多级 PBG 结构的级联情况. 应用全波仿真的方法分析, 由于对 PBG 结构按频率进行划分的网格数量巨大, 计算时间较长; 应用 FDTD 方法时, 由于这种结构属于多谐振结构, 其计算周期较长, 达到稳定状态的时间比较长. 因此应用网络理论的 ABCD 矩阵去分析这一类 PBG 结构相对以上两种方法将更快捷、更方便.

4 结论

应用微波网络理论的 ABCD 矩阵对一类新的一维微带 PBG 滤波器结构进行分析, 得出这类一维微带 PBG 结构滤波器的带隙特性来源于微带线的非均匀渐变, 只要以微带线的特性阻抗有非均匀变化的传输线作为单元, 就会呈现带隙现象, 并分析了单元数目及最大最小阻抗比 K 对带隙特性的影响. 给出的微波网络理论分析结果与实际测量结果吻合较好, 而且大大节省了计算时间, 为快速分析此类 PBG 结构创造了条件, 也为今后的 PBG 滤波器的综合提供了基础.

参考文献:

- [1] Yablonov I E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid 2 State Physics and Electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] Radisic V, Qian Y, Itoh T. Broadband Power Amplifier Using Dielectric Photonic Bandgap Structure[J]. IEEE Microwave Guide Wave Lett, 1998, 8(1): 13-14.
- [3] Radisic V, Qian Y X, Cocciali R, et al. Novel 2D Photonic Bandgap Structure for Microstrip Lines[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1998, 8(2): 692-711.
- [4] Song Jian, Zhang Yu, Liang Changhong. Analysis of PBC Structures in Microstrip by Modified Locally Conformal FDTD[J]. Journal of Xidian University, 2004, 31(5): 678-681.
- [5] Nesić D, Nesić A. Band Stop Microstrip PBG Filter with Sinusoidal Variation of the Characteristic Impedance and Without Etching in the Ground Plane[J]. Microwave Opt Technol Lett, 2001, 29(6): 418-420.
- [6] Lu Ke. An Efficient Method for Analysis of Arbitrary Nonuniform Transmission Lines[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(1): 9-14.
- [7] 梁昌洪. 计算微波[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985.
- [8] 吴万春, 梁昌洪. 微波网络及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [9] Ma Jinping, Jiao Yongchang, Mao Naihong, et al. On the Optimal Design of Frequency Selective Surfaces with Circular Ring Elements[J]. Journal of Xidian University, 1999, 26(6): 767-770.
- [10] Kim T, Seo C. A Novel Photonic Band-gap Structure for Low-pass Filter of Wide Stop-band[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 2000, 10(1): 13-15.

(编辑: 齐淑娟)

(上接第496页)

由于 Leica 最大采样频率的限制以及采样周期的不确定, 只能与实验结果中的幅度信息相比较。考虑到实验时现场微小风荷等因素的影响, 仿真结果略小于实验结果是合理的, 两者较好地吻合, 从而证明了仿真分析的有效性。

LT50m 模型中 Stewart 平台与舱体的质量比为 0.257, 舱体响应幅值与馈源定位精度要求在同一数量级(毫米级), 可见, 为了减小舱体的响应还需要降低质量比或者采用其他振动控制方式降低舱体的响应。在建造 LT500m 原型之前, 使用上述分析方法可以设计出合适的质量比。

5 结 论

将悬索结构的非线性有限元分析与 Stewart 平台机构的多体系统动力学分析有机地结合在一起, 找到了一种分析二级运动系统耦合动力学问题的有效方法, 并应用于 LT50m 模型的实际分析中, 为 LT500m 原型馈源运动调整系统两级质量比的设计提供了合理的分析手段。

参考文献:

- [1] Duan B Y. A New Design Project of the Line Feed Structure for Large Spherical Radio Telescope and Its Nonlinear Dynamic Analysis[J]. Int J Mechatronics, 1999, 9(1): 53-64.
- [2] 仇原鹰, 段宝岩, 魏 强, 等. Stewart 平台对大型射电望远镜反作用力的研究[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(3): 415-420.
- [3] 仇原鹰, 魏 强, 段宝岩. 大型射电望远镜馈源舱对 Stewart 平台扰动的响应[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(5): 698-702.
- [4] Qiu Y Y, Duan B Y, Wei Q. Optimal Distribution of the Cable Tensions and Structural Vibration Control of the Cable-cabin Flexible Structure[J]. Structure Engineering and Mechanics, 2002, 14(1): 39-56.
- [5] Dasgupta B, Mtruthunjaya T S. A Newton-Euler Formulation for the Inverse Dynamics of the Stewart Platform[J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(8): 1135-1152.
- [6] 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [7] 洪嘉振, 于 清. 柔性多体系统动力学的递推建模与算法[J]. 中国机械工程, 2000, 11(6): 611-616.
- [8] Sun Xin, Duan Baoyan. Extreme Working Position of the Huge Flexible Stewart Platform[J]. Journal of Xidian University, 2001, 28(2): 168-172.

(编辑: 郭 华)

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>