

# 一种展宽电磁带隙结构的带隙带宽的新方法

张丰敏, 杜正伟, 王 嵩, 龚 克

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 本文通过对电磁带隙(EBG)结构等效电路的分析, 研究了展宽其带隙带宽的方法, 提出了一种新型的实现方法——组合单元法. 以金属贴片表面螺旋电感的 EBG 结构为例, 验证了该方法的有效性和正确性. 为解决 EBG 结构存在的带隙带宽较窄的问题提供了一种新的思路.

**关键词:** 电磁带隙结构; 微波电路; 微波滤波器; 带宽

**中图分类号:** TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 6A-074-04

## A Novel Method to Broaden the Bandwidth of EBG Structures

ZHANG Feng-min, DU Zheng-wei, WANG Qiang, GONG Ke

(Department of Electronic Engineering, State Key Laboratory on Microwave and Digital Communications, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** The equivalent circuit model for electromagnetic band-gap structure(EBG) is analyzed in this paper, and also the methods of broadening the bandwidth of band-gap are studied. A novel method, which is called "United Cells Method", to broaden the bandwidth of band-gap of EBG structure is proposed. The correction and validity are confirmed, by the results of software-simulations and experiments, using mushroom-like EBG structure with spiracle inductance on patches. This method gives a novel mind to broaden the bandwidth of EBG structures.

**Key words:** electromagnetic band-gap structure(EBG); microwave circuit; microwave filter; bandwidth

### 1 引言

在过去的十多年里, 材料光学的发展取得了突破性的进展, 科学家们提出了一种新型的材料——光子晶体(Photonic Crystal)<sup>[1]</sup>. 光子晶体是一种人造的、具有一定周期性的结构, 可以阻止特定频率范围内的光波在其中传播, 也就是存在着光子带隙(Photonic Band-Gap)现象, 简称 PBG. 在上个世纪 80 年代末, 美国科学家 Yablonovitch 教授首次在实验室环境下制得了光子晶体<sup>[1]</sup>, 并且在 6.5GHz 的频段上观察到了一个带宽超过 2GHz 的电磁带隙, 从此光子晶体受到了许多学者的关注.

光子带隙这一概念源于光学领域, 目前其研究范围已涉及光波、电磁波、声波等领域. 在微波频段的光子带隙结构又被称为电磁带隙结构(Electromagnetic Band-Gap Structure), 简称 EBG 结构. EBG 结构的特性使其在微波领域中有着巨大的应用价值, 近 10 多年来引起了微波界的极大兴趣和关注. 由于 EBG 结构在一定频带内能够抑制表面波、回波和谐波, 改善功率效率, 提高品质因素等, 因而可以广泛应用于微波工程领域, 如高 Q 谐振器<sup>[2]</sup>、高隔离度平面滤波器<sup>[3]</sup>、功分器<sup>[4]</sup>、功率放大

器<sup>[5]</sup>、高速电路<sup>[6]</sup>、天线<sup>[7]</sup>、吸波材料<sup>[8]</sup>等. EBG 结构易于制备, 发展非常迅速, 目前已经进入实用化阶段. 但是 EBG 结构由于受其自身电特性的限制, 往往带隙的带宽较窄, 这在一定程度上限制了应用. 为此, 关于如何展宽 EBG 结构的带隙带宽, 是目前广泛关注的一个问题.

对于如何展宽 EBG 结构的带隙带宽这个问题, 目前已有研究人员做了一些探讨, 可以通过变参数<sup>[9]</sup>、数字加窗函数<sup>[10]</sup>、多层结构<sup>[11]</sup>等方式来实现其展宽带宽的目的. 本文将从组合的思想出发, 提出一种展宽电磁带隙结构的带隙带宽的新方法.

在文中, 通过对典型的 EBG 结构——蘑菇形(Mushroom-like)<sup>[12]</sup> EBG 结构的等效电路进行分析, 同时借鉴了金属贴片的表面螺旋电感<sup>[13]</sup>对带隙特性产生的影响, 即通过调节金属贴片的表面螺旋电感的匝数来调节等效电感, 进而调节其带隙特性. 在一定频率范围内, 通过调节表面螺旋电感的匝数, 可实现各种频率的带隙.

基于此, 作者研究了影响 EBG 结构的带隙带宽的各种因素, 提出了一种新方法——组合单元法, 就是把多种具有不同带隙特性的 EBG 结构子单元组合在一起, 实现展宽带隙带宽的目的. 以“金属贴片螺旋电感-

收稿日期: 2007-06-11; 修回日期: 2007-10-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No. 2007CB310605); 国家自然科学基金(No. 60496318); 清华—高通联合研究计划

蘑菇形 EBG 结构”为例,设置螺旋的不同匝数以得到具有不同带隙频率的子单元结构.仿真结果和实测结果均验证了组合单元法的有效性和正确性,这为解决 EBG 结构存在的带隙带宽较窄的问题提供了新的思路.本文中的仿真均采用商业电磁场仿真软件 Zealand \ IE3D 10.0 进行.

## 2 典型 EBG 结构的原理和等效电路

蘑菇形 EBG 结构是一种非常典型的 EBG 结构,它主要由金属贴片、通孔、介质基板和地组成,其结构和等效电路如图 1 所示.

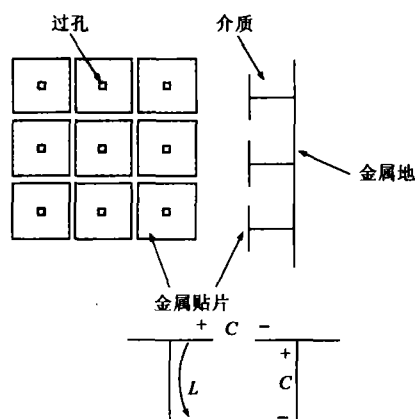


图 1 蘑菇形 EBG 结构及其等效电路示意图

蘑菇形 EBG 结构的周期比波长小得多,所以我们可以用集总参数波阻抗来分析它.当电磁波在 EBG 结构中传播时,金属表面上会产生感应电流,电流从一个金属贴片经过通孔流到地,就等效为电感;电荷在金属贴片和地之间以及相邻贴片的边缘之间积累,就等效为电容,这样就可以用简单的 LC 等效电路来表示<sup>[12]</sup>,其中  $L$ 、 $C$  分别为等效电感和等效电容.

在这个等效电路模型中,EBG 结构的表面阻抗为

$$Z_{\text{surface}} = j\omega L / (1 - \omega^2 LC) \quad (1)$$

带隙的中心频率为  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ,也就是在这个中心频率附近,EBG 结构的表面呈现高阻特性,阻止了该频率范围内的电磁波的传播.等效电感  $L$  和等效电容  $C$  与介质参数(介电常数和介质厚度)、金属贴片结构参数(贴片尺寸和贴片间距)、过孔参数(过孔位置和过孔半径)以及螺旋电感(线宽和匝数)等有关.

等效电感  $L$  和等效电容  $C$  的近似解析表达式分别为<sup>[14]</sup>

$$L = \mu_0 h \left\{ \frac{1}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{p + \sqrt{p^2 - d^2}}{d} \right) + 1.301825 \right] \right\} \quad (2)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 w}{\pi} \text{ch}^{-1}(p/g) + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w'}{\pi} \text{ch}^{-1} \left\{ \frac{\text{sh}[\pi(w' + g)/4h]}{\text{sh}(\pi g/4h)} \right\} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w}{\pi} \left[ \frac{\pi^2 h}{2w} \ln \left( \frac{p + \sqrt{p^2 - d^2}}{d} \right) \right] \quad (3)$$

上式中  $\mu_0$  为真空中的磁导率,  $\epsilon_0$  为真空中介电常数,  $\epsilon_r$  是介质基板的相对介电常数;  $w$  是金属贴片的边长,  $g$  为相邻金属贴片的间距,  $p$  为 EBG 单元的周期,  $d$  是金属过孔的直径,  $h$  是介质基板的厚度.

## 3 组合单元法展宽带隙带宽

文献[13]给出了在蘑菇形 EBG 结构的金属贴片上引入螺旋电感的结构,可通过调节金属贴片的表面螺旋电感的匝数来调节等效电感  $L$ ,进而能产生不同频率范围的带隙.图 2 所示为单个金属贴片上螺旋线宽为  $D$ 、匝数为 0.8 的螺旋电感.

鉴于这种现象,在这里提出一种展宽带隙带宽的新方法——组合单元法:即把多个具有不同带隙特性的子单元结构组合在一起,得到多个子带隙;在特定的带宽判定标准下,如果这些不同的子带隙首尾相连,就能得到较宽的带隙,即达到了展宽 EBG 结构的带隙带宽的目的.

图 3 的仿真结果给出了 4 种不同(除了螺旋匝数,其余参数均一致)的 EBG 结构的不同带隙频率特性,其螺旋电感的匝数分别为 0.2、0.5、0.7 和 0.9.

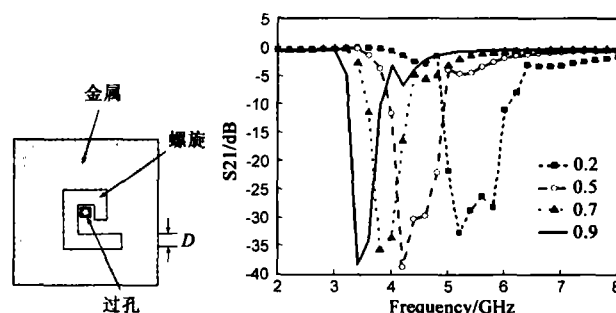


图 2 金属贴片螺旋电感 图 3 不同螺旋匝数对应的带隙特性的仿真结果

本文采用如参考文献[15]中所述的悬置微带法来仿真和测量蘑菇形 EBG 结构的频带特性.其参数如下:金属贴片的边长  $W = 6\text{mm}$ ,金属贴片间距  $G = 0.6\text{mm}$ ,螺旋电感线宽  $D = 0.6\text{mm}$ ,金属贴片与地之间介质的相对介电常数  $\epsilon_1$  为 2.65,厚度  $T_1$  为 0.8mm,支撑介质的相对介电常数  $\epsilon_2$  为 2.65,厚度  $T_2$  为 0.8mm,过孔半径  $R$  为 0.2mm,50Ω 微带线的宽度  $K$  为 4.6mm.

为了便于比较,分别选用螺旋电感匝数为 0.2、0.6 和 0.8 的三种子单元作为示例,分别标记为 A、B、C,再把这三种不同的子单元分别组成  $3 \times 3$  阵列,如图 4(a)所示.另外,把 A、B、C 三种子单元交错组合在一起作为

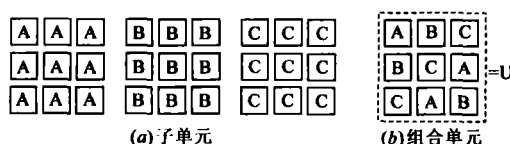


图 4 子单元 A、B、C 和组合单元 U

一个组合单元,标记为 U,如图 4(b)所示.

仿真结果如图 5 所示,可以看到,三种子单元分别对应三种不同的带隙特性.在以  $S_{21} \leq -20$  dB 为标准时, A 的带隙为 4.98 GHz ~ 5.89 GHz, B 的带隙为 3.75 GHz ~

4.37 GHz, C 的带隙为 3.49 GHz ~ 3.96 GHz, 组合单元 U 的带隙为 3.50 GHz ~ 5.31 GHz (仿真时 U 组成  $1 \times 2$  阵列). 对比子单元 A、B、C 和组合单元 U 的带隙频带特性,可以看出:运用组合单元法,带隙带宽得到了显著扩展.

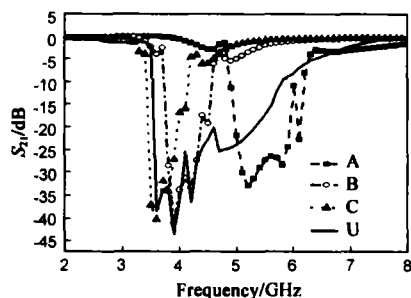


图 5 子单元 A、B、C 和组合单元 U 带隙的仿真结果

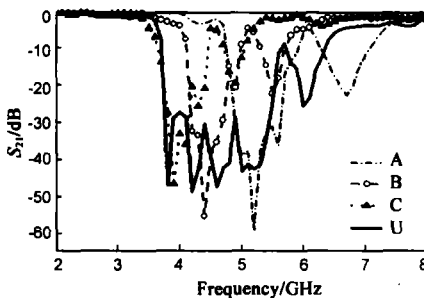


图 6 组合单元法的实测结果

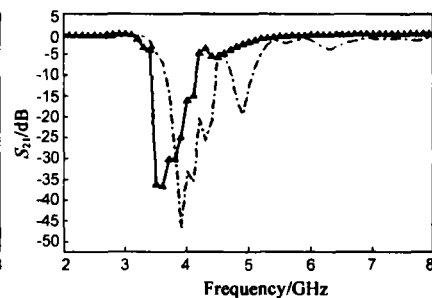


图 7 单元 C 的仿真和实测结果

#### 4 实测结果和容差分析

为了验证组合单元法的有效性和正确性,分别设计并制作了子单元 A、B、C 和组合单元 U 所组成的 EBG 结构,在实验室环境下用悬置微带法进行了测量,实测结果如图 6 所示.

为了评估组合单元法展宽带隙带宽的实际效果,分别从以下几个方面进行分析:带隙范围 ( $S_{21} \leq -20$  dB)、中心频率、绝对带宽、相对带宽.从表 1 所示的数据可以看出,运用组合单元法,带隙的绝对带宽的展宽可达 2~3 倍,带隙的相对带宽的展宽可达 2.2~2.6 倍,效果相当明显,即验证了组合单元法的有效性和正确性.

比较图 5 和图 6,容易发现实测和软件仿真结果并不完全一致.为了便于分析和比较,以子单元 C 为例,图 7 和表 2 分别给出了子单元 C 带隙的软件仿真和实测结果的比较.

表 1 组合单元法实测结果的效果分析

类	带隙左	带隙右	中频	绝对带宽	相对带宽
A	4.8GHz	5.7GHz	5.25GHz	0.9GHz	17.14%
B	4.1GHz	4.8GHz	4.45GHz	0.7GHz	15.73%
C	3.8GHz	4.4GHz	4.10GHz	0.6GHz	14.63%
U	3.8GHz	5.6GHz	4.70GHz	1.8GHz	38.30%

表 2 单元 C 仿真与实测的比较

类型	带隙左	带隙右	中频	绝对带宽	相对带宽
仿真	3.4GHz	3.8GHz	3.6GHz	0.4 GHz	11.11%
实测	3.8GHz	4.4GHz	4.1GHz	0.6 GHz	14.63%

由表 2 的比较可以看出,实测的带隙比仿真的带隙在频率上往高频偏移约 0.5 GHz;同时,对于绝对带宽和相对带宽,前者也比后者宽些.原因主要是因为 EBG 结构在制作、加工和测试的过程中,各种相关参数产生了误差所致.这里涉及的参数主要是金属贴片的尺寸、过孔的参数、缝隙尺寸、贴片间距、介质相关参数等.

为了验证上述这些参数各自对 EBG 结构的带隙特性产生的影响,分别针对各个参数进行了理论分析和公式推导,并结合 Zealand/HF3D 10.0 软件仿真结果,得出可能导致误差的原因有如下 5 个方面:

(1) 金属贴片的尺寸:金属贴片的边长越小,则金属贴片对地的面积就越小,等效电容就越小,带隙越往高频偏移;

(2) 过孔的位置和尺寸:过孔位置的偏移,会使带隙展宽,这是因为当过孔在贴片的正中心位置时,只有一个谐振频率,而当过孔位置发生偏移时,就会产生两个谐振频率,分别向低频和高频偏移<sup>[16]</sup>,当两者偏移程度在一定范围之内时,在带隙特性上反映为频带展宽;过孔的半径越大,带隙越往高频偏移,这是因为过孔的半径越大导致等效电感越小,频率就越向高频偏移;

(3) 螺旋电感:金属贴片表面螺旋的线宽 D 越大,则等效电感 L 和等效电容 C 都会越小,带隙频率会越往高频偏移;

(4) 相邻金属贴片的间距:在较小范围内,贴片的间距越小,则相邻贴片的耦合会越大,带隙的宽度也会越宽;

(5) 介质:当介质厚度的误差不是很大时,对带隙特性的影响非常小,几乎可以忽略;而介质的介电常数对带隙特性的影响较大,根据式(3)可知,ε 越小,等效电容 C 就会越小,带隙频率也越往高频偏移.

对实际制作的 EBG 结构的各参数用显微镜进行测量,从最终得到的实际参数的分析可以看出,在以上所举的可能存在的 5 个方面的原因中,符合其中的(1)、(2)、(3)、(4)四点,即由于加工误差,造成实际制作的 EBG 结构存在金属贴片边长偏长、过孔位置有偏移、过孔半径偏大、螺旋线宽偏大、贴片间距偏大等现象,这些因素均导致了实测结果和仿真结果存在差异.

## 5 结论

本文从分析蘑菇形 EBG 结构的等效电路和金属贴片表面螺旋电感的匝数对电磁带隙特性产生影响等现象出发,提出了一种展宽 EBG 结构的带隙带宽的新方法——组合单元法:就是把多个在带隙频率上首尾相连的子单元结构组合在一起,以达到展宽 EBG 结构的带隙带宽的目的.组合单元法为解决 EBG 结构存在的带隙带宽较窄的问题提供了一种新的思路.

Zealand/IE3D 10.0 软件仿真和实际测量结果都验证了该方法的有效性和正确性.文中以蘑菇形 EBG 结构为例,分别用 A、B、C 三种子单元组成 EBG 结构,调节这三种结构的金属贴片上的螺旋电感的匝数,以使得三种子单元对应的带隙首尾相连.根据实际测得的数据可知(以  $S_{21} \leq -20\text{dB}$  为标准),它们的带隙宽度分别为  $4.8\text{GHz} \sim 5.7\text{GHz}$ ,  $4.1\text{GHz} \sim 4.8\text{GHz}$  和  $3.8\text{GHz} \sim 4.4\text{GHz}$ .对这三种单元使用组合单元法之后,带隙宽度扩大为  $3.8\text{GHz} \sim 5.6\text{GHz}$ ,带宽的最大展宽比达 3 倍.在本文的最后还针对实测结果和仿真结果之间存在的差异,进行了容差分析,指出了问题和导致差异的原因.

## 参考文献:

- [1] Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20):2059-2062.
- [2] Hsuan-Ju Hsu, et al. A duroid-based planar EBG cavity resonator filter with improved quality factor[J]. IEEE Antennas and Propagation Letters, 2002, 1(2):67-70.
- [3] William J Chappell, et al. High isolation, planar filters using EBG substrates[J]. IEEE Microwave and Wireless Components, 2001, 11(6):246-248.
- [4] Young-Joon Ko, et al. Fully integrated unequal wilkinson power divider with EBG CPW[J]. IEEE Microwave and Wireless Components, 2003, 13(7):276-278.
- [5] Mekki Belaid, et al. Spatial power amplifier using a passive active TEM waveguide concept[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., 2003, 51(3):684-689.
- [6] Ramesh Abhari, et al. Metello-dielectric electromagnetic bandgap structures or suppression and isolation of parallel-plate noise in high-speed circuits[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., 2003, 51(6):1629-1639.
- [7] Fan Yang, et al. Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2003, 51(10):2691-2703.
- [8] Nader Engheta. Thin absorbing screens using metamaterial surfaces[A]. IEEE Antennas and propagation Society International Symposium 2002[C]. 2002, 2:392-395.
- [9] Fengmin Zhang, Zhengwei Du, Qiang Wang, Ke Gong. A novel approach to enhance the bandwidth of mushroom-like EBG structures[A]. The Conference Proceedings of ICMMT'07[C]. GuiLin China:2007.215-218.
- [10] 闫敦豹, 高强, 付云起, 袁乃昌. 加窗技术在微带 EBG 结构中的应用[J]. 微波学报, 2004, 20(4):60-63.
- [11] Wang Xin, Hu Xing-hua, Li Yi-zhou et al. Enlargement of omnidirectional total reflection frequency range in one-dimensional photonic crystals by using photonic heterostructures[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(23):4291-4291.
- [12] Dan Sievenpiper, et al. High-Impedance electromagnetic surface with a forbidden frequency band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11):2059-2074.
- [13] Yuan Yao, et al. A novel dual-band compact electromagnetic bandgap(EBG) structure and its application in multi-antennas[A]. IEEE Antennas and propagation Society International Symposium 2006[C]. 2006.1943-1946.
- [14] 李斌, 李龙, 梁昌洪. EBG 高阻表面结构的矩形波导宽边缝隙天线[J]. 电子学报, 2006, 34(3):429-432.
- Li Bin, LI Long, LIANG Chang-hong. The rectangular waveguide board wall slot array Antenna with EBG high-impedance surface structure[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3):429-432. (in Chinese)
- [15] 樊明延, 等. 二维电磁带隙结构研究的新方法[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(2):127-131.
- [16] Fan Yang, et al. Polarization dependent electromagnetic band-gap surfaces: characterization, designs, and applications[A]. IEEE Antennas and propagation Society International Symposium 2003[C]. 2003.3:339-342.

## 作者简介:



张丰敏 男, 1983 年出生于浙江. 2004 年、2007 年在清华大学电子工程系分别获学士、硕士学位. 现为空军装备研究院工程师, 研究方向为 EBG 结构、雷达、电子对抗等.  
E-mail: zhangfengmin@gmail.com



杜正伟 男, 1971 年生于四川. 清华大学电子工程系教授. 研究方向为电小天线与电波传播、微波电路、电磁兼容、计算电磁学等.  
E-mail: zwdu@tsinghua.edu.cn