

渐变规律对蝶形单元电磁带隙结构 滤波器性能的影响

陈 鹏¹, 田雨波², 彭 涛², 沙 莎², 彭智慧², 毛云龙²

(1. 东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

(2. 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 电磁带隙结构在微波、毫米波段具有广泛应用. 文中给出了一种具有蝶形单元的电磁带隙结构滤波器, 采用微波二端口理论讨论了蝶形单元不同渐变规律对滤波器性能的影响, 这些渐变规律包括 Bartlett, Welch, Connes, Exponent, Gaussian, Sine, Hanning 等形式. 从仿真计算结果可以看出, 当渐变规律为 Hanning 时, 该滤波器具有最大的阻带衰减 (35.77 dB) 和最大的相对带宽 (55%); 当渐变规律为 Sine 时, 该滤波器的通带波纹最小且基本对称 (低通部分为 2.11 dB, 高通部分为 2.51 dB).

关键词: 电磁带隙; 滤波器; 渐变规律

中图分类号: TN820

文献标志码: A

文章编号: 1673-4807(2011)04-0372-04

Impact of different tapered function on filter of electromagnetic band gap structure with bow-tie cells

Chen Peng¹, Tian Yubo², Peng Tao², Sha Sha², Peng Zhihui², Mao Yunlong²

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

(2. School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China)

Abstract: EBG (Electromagnetic Band Gap) structure is widely used in microwave and millimeter-wave fields. Based on the theory of microwave two-port network, the EBG structure filter with bow-tie cells is given in this study, and impact of bow-tie cell with different tapered functions on the filter is discussed. The tapered functions include Bartlett, Welch, Connes, Exponent, Gaussian, Sine, and Hanning. The simulation results show that the EBG structure filter is with maximum attenuation in stop band (35.77 dB) and maximum relative band-width (55%) when tapered function of bow-tie cells is Hanning; whereas the EBG structure filter is with minimum and basically symmetrical ripples in pass band (2.11 dB at lowpass, and 2.51 dB at highpass).

Key words: electromagnetic band gap; filter; tapered function

1987 年 Yablonovitch 和 John 在讨论周期性电介质结构对材料中光传播行为的影响时各自独立地提出了“光子晶体”这一新概念^[1-2], 由于它的重要学术价值和巨大应用前景, 国际学术界和工程界对此投入了大量的人力和物力进行研发, 并在物理、光学、天线和微波等学术刊物上被列为专题. 在微波领域, 一般将光子晶体称为电磁带隙 (Electromagnetic Band Gap, EBG), 它是一种周期性结构, 可以阻止一定频率的微波在某些方向上的传播, 呈

现良好的带阻特性^[3]. 由于 EBG 结构具有独特的选频特性, 且结构简单易于实现, 其研究已经涉及滤波器、混合器、谐振器、高效放大器、谐波抑制器、高性能微波天线、相控阵天线等, 在微波、毫米波电路方面得到广泛应用, 并取得了一些有实用价值的研究成果^[4-10].

文中介绍了一种具有蝶形单元的 EBG 结构滤波器, 并采用微波二端口网络理论对其进行了分析, 重点讨论了蝶形单元具有 Bartlett, Welch, Connes, Exponent, Gaussian, Sine, Hanning 等 7 种渐

收稿日期: 2011-04-12

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (CX10S_007Z); 江苏科技大学本科生创新项目; 江苏省高校优势学科建设项目

作者简介: 陈 鹏 (1989—), 男, 江苏东台人, 东南大学信息科学与工程学院, 研究方向为微波电路.

通讯作者: 田雨波 (1971—), 男, 辽宁铁岭人, 博士, 副教授, 研究方向为智能计算的电磁应用. E-mail: yuboe@sohu.com

变规律时对其频率特性的影响.

1 蝶形单元 EBG 结构滤波器理论分析

讨论的蝶形单元 EBG 结构滤波器如图 1a),图 1b)给出其中一个单元的结构,图中的 w_1 和 w_2 分别为蝶形单元的宽边和窄边尺寸, l 为蝶形单元的长度.由微波二端口网络的有关知识可知,对于图 1a)所示的 EBG 结构滤波器,可以求解其中每一单元的 ABCD 矩阵,再将所有单元的 ABCD 矩阵乘在一起,即可以得到整个 EBG 结构的 ABCD 矩阵.对于图 1b)所示的一个蝶形单元,在求解其 ABCD 矩阵时,可以考虑将其分成 $2n$ 等份,其中每一份的长度为 Δl ,这样它所对应的 ABCD 矩阵可以表示为^[11]

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos(\beta_i \Delta l) & j Z_{0i} \sin(\beta_i \Delta l) \\ j \sin(\beta_i \Delta l) / Z_{0i} & \cos(\beta_i \Delta l) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, β_i 为第 i 份对应的相位常数, Δl 为每一等份的长度, Z_{0i} 为相应的特性阻抗.

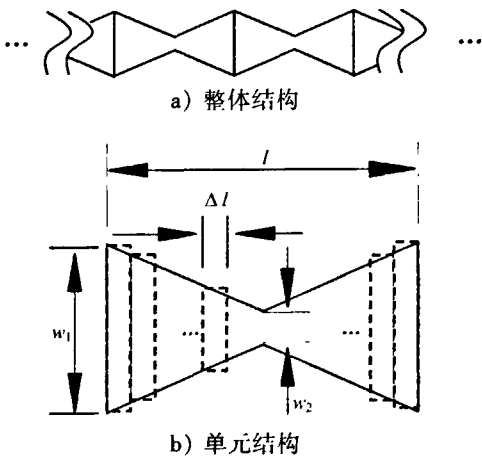


图 1 蝶形单元滤波器结构
Fig.1 Filter of EBG structure with bow-tie cells

式(1)中的每个量可以用如下公式计算得到

$$\beta_i = \frac{2\pi}{\lambda_{eff,i}} \quad (2)$$

$$\lambda_{eff,i} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{eff,i}}} \quad (3)$$

$$\epsilon_{eff,i} = \begin{cases} \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + \frac{12h}{w_i} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0.04 \left(1 - \frac{w_i}{h} \right)^2 \right] & w_i/h \leq 1 \\ \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w_i}}} & w_i/h \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$Z_{0i} = \begin{cases} \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{eff,i}}} \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{8h}{w_i} + \frac{w_i}{4h} \right) & w_i/h \leq 1 \\ \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{eff,i}}} \frac{1}{\frac{w_i}{h} + 2.42 - 0.44 \frac{h}{w_i} + \left(1 - \frac{h}{w_i} \right)^6} & w_i/h \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, c 为电磁波在真空中的速度, h 为 PCB 板的厚度, ϵ_r 为 PCB 板的介电常数, η_0 为真空中特性阻抗.

对于图 1b)所示的蝶形单元,如果从宽边 w_1 到窄边 w_2 以 Bartlett 规律变化,变化规律的表达式和对应的图形如表 1,则分成 $2n$ 等份后每一份的宽度 w_i 可以表示如下

$$w_i = w_1 - \frac{(i-1)(w_1 - w_2)}{n-1} \quad (6)$$

$w_{2n-i+1} = w_i$

其中 $1 \leq i \leq n$. 这样,每个蝶形单元的 ABCD 矩阵可以表示为所有的 T_i 之积的形式,即

$$T_{unit} = T_L T_R \quad (7)$$

$$\begin{cases} T_L = T_1 T_2 \cdots T_n \\ T_R = T_{n+1} T_{n+2} \cdots T_{2n} \end{cases} \quad (8)$$

式中, T_L 为一个蝶形单元左半部分的 ABCD 矩阵, T_R 为一个蝶形单元右半部分的 ABCD 矩阵, T_{unit} 为每个单元的 ABCD 矩阵.于是,整个滤波器的 ABCD 矩阵可以表示为

$$T_p = T_{unit} T_{unit} \cdots T_{unit} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (9)$$

第 1 个等号右侧 T_{unit} 的个数为蝶形单元的周期数.

有了 ABCD 矩阵后,可以按照如下公式将其转换为 S 矩阵

$$S = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} A + \frac{B}{Z_0} - CZ_0 - D & 2(AD - BC) \\ 2 & -A + \frac{B}{Z_0} - CZ_0 + D \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\Delta = A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D \quad (11)$$

式中, Z_0 为传输线输入和输出的特性阻抗,文中取 50Ω .

在试验仿真中取 PCB 板的相关参数 $\epsilon_r = 3.4$, $h = 1.2 \text{ mm}$,每个蝶形单元的长度为

$$l = \frac{\lambda_m}{2} = \frac{1}{2 f_m \sqrt{\epsilon_{eff}}} c \quad (12)$$

表 1 不同的渐变规律及计算结果
Table 1 Tapered functions and computing results

渐变规律	表达式	图形	中心频率点 5.2 GHz 处阻带衰减/dB	低通最大 波纹/dB	高通最大 波纹/dB	-10 dB 相 对带宽/%
Bartlett	$y = x $		-26.83	-2.94	-1.97	43
Welch	$y = x ^2$		-34.21	-4.76	-1.73	53
Connes	$y = x ^4$		-32.67	-5.99	-0.41	49
Exponent	$y = \exp(x)$		-29.08	-3.64	-1.72	46
Gaussian	$y = \exp\left(-\frac{ x ^2}{2}\right)$		-25.05	-2.14	-2.52	40
Sine	$y = \sin\left(\frac{\pi x }{2}\right)$		-24.86	-2.11	-2.51	40
Hanning	$y = \left(\sin\left(\frac{\pi x }{2}\right)\right)^2$		-35.77	-3.69	-3.49	55

其中 f_m 为阻带的中心频率, λ_m 为 f_m 对应的波长, ϵ_{eff} 为对应的有效介电常数.取 f_m 为5.2 GHz,则可以计算得到 l 为17.6 mm.由式(2~5)可以知道,当传输线的特性阻抗取为50 Ω 时,对应的 w_1 为2.768 mm,对应的 ϵ_{eff} 为2.682.如果计算EBG结构的 S 矩阵时取 $\Delta l=0.1$ mm,则 $2n=176$,即 $n=88$.有了上述相应的参数和前面的理论分析,便可以计算滤波器的频率特性.

在具体仿真试验中取蝶形单元 w_1 到 w_2 的渐变形式为Bartlett规律,蝶形单元数为6, $w_2=0.2$ mm,计算结果如图2和表1.从图2和表1可以看出,当蝶形单元渐变形式为Bartlett规律时,在中心频率点5.2 GHz处,阻带衰减为26.83 dB,通带波纹分别为2.94 dB和1.97 dB,-10 dB相对带宽为43%.

2 蝶形单元不同渐变规律对滤波器性能的影响

对于图1b)所示的蝶形单元,从其宽边 w_1 到窄边 w_2 的渐变形式可以有多种,不同的渐变规律对滤波器的性能有很多影响.文献[12]应用IE3D仿真软件研究了一种双平面EBG结构微带滤波器,讨论了缺陷接地的渐变规律对其频率特性的影响,并给出相应缺陷接地的具体结构尺寸.这部分内容主要应用上面介绍的微波二端口网络理论分析图1a)所示的滤波器的每个蝶形单元从宽边到窄边按照不同的规律变化时对滤波器性能的影响,其中变化规律分别取为Bartlett, Welch, Connes,

Exponent, Gaussian, Sine, Hanning等7种形式,它们的函数表达式和图形如表1的第2列和第3列,计算结果分别考虑滤波器的阻带衰减、通带波纹和-10 dB相对带宽,计算结果如图2和表1中第4列到第7列所示,其中单元数 $p=6$,中心宽度 $w_2=0.2$ mm.

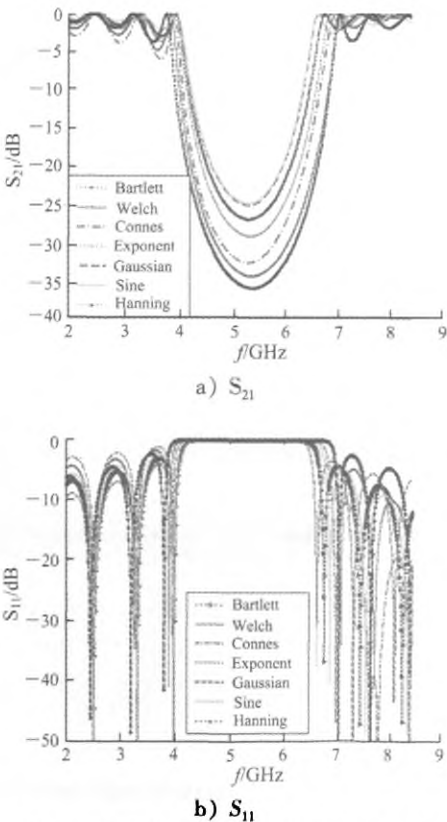


图 2 不同渐变规律的滤波器的 S 曲线
Fig.2 S-curves of filter with different tapered functions

从图2和表1可以看出,渐变形式取不同规律,滤波器的频率特性各不相同,中心频率点处的衰减从24.86 dB(Sine 规律)到26.83 dB(Hanning 规律)变化,低通最大波纹从2.11 dB(Sine 规律)到5.99 dB(Connes 规律)变化,高通最大波纹从0.41 dB(Connes 规律)到3.49 dB(Hanning 规律)变化,而-10 dB 相对带宽从40% dB(Sine 规律和 Gaussian 规律)到55%(Hanning 规律)变化,可以针对不同的技术要求而选择不同的渐变规律. 总体上讲,如果对通带波纹要求较高,则可以取 Sine 规律变化;如果对带宽和阻带衰减要求较高,则可以考虑取 Hanning 规律变化.

3 结论

给出了一种具有蝶形单元的电磁带隙结构滤波器,并采用 ABCD 矩阵对其进行了分析,然后将 ABCD 矩阵转换为 S 矩阵,进而获得其频率特性. 重点讨论了蝶形单元分别取 Bartlett, Welch, Connes, Exponent, Gaussian, Sine, Hanning 等7种不同渐变规律时对该滤波器频率特性的影响. 仿真计算结果表明当渐变规律为 Hanning 时,该滤波器具有最大的阻带衰减和最大的相对带宽;当渐变规律为 Sine 时,该滤波器的通带波纹最小且基本对称. 在实际的微波工程中可以根据不同的要求来选择不同的渐变规律.

参考文献 (References)

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059–2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486–2489.
- [3] Lin S Y, Chow E, Hietala V, et al. Experimental demonstration of guiding and bending of electromagnetic waves in a photonic crystal[J]. *Science*, 1998, 282(5387): 274–276.
- [4] D Orazio A, De Sario M, Petruzzelli V, et al. Photonic band gap filter for wavelength division multiplexer[J]. *Optics Express*, 2003, 11(3): 230–239.
- [5] Boutayeb H, Denidni T A, Mahdjoubi K, et al. Analysis and design of a cylindrical EBG-based directive antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(1): 211–219.
- [6] García-García J, Bonache J, Martín F. Application of electromagnetic bandgaps to the design of ultra-wide band-pass filters with good out-of-band performance[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(12): 4136–4140.
- [7] 赵国华, 刘长军. 新型紧凑电磁带隙结构在微波合路器中的应用[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2008, 45(2): 327–330.
Zhao Guohua, Liu Changjun. Novel compact electromagnetic band-gap structure and its applications in a microwave combiner [J]. *Journal of Sichuan University: Natural Science Edition*, 2008, 45(2): 327–330. (in Chinese)
- [8] 朱方明, 林青春. 新型电磁(光子)晶体贴片天线的研究进展[J]. *电波科学学报*, 2002, 17(2): 182–186.
Zhu Fangming, Lin Qingchun. The development of novel patch antenna using photonic band-gap structures [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2002, 17(2): 182–186. (in Chinese)
- [9] 林宝勤, 张焕梅, 曹祥玉. 介质型电磁带隙结构的三维直线法分析[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(3): 422–428.
Lin Baoqin, Zhang Huanmei, Cao Xiangyu. Analysis of dielectric EBG using 3-D method of lines[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(3): 422–428. (in Chinese)
- [10] 田雨波, 沙莎. 一种蝶形单元的电磁带隙结构的频率特性[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(5): 865–868, 878.
Tian Yubo, Sha Sha. Frequency characteristics of electromagnetic band gap structure with bow-tie unit [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2009, 24(5): 865–868, 878. (in Chinese)
- [11] 李宗谦, 余京兆, 高葆新. 微波工程基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 173–187.
- [12] Huang S Y, Lee Y H. Tapered dual-plane compact electromagnetic bandgap microstrip filter structures [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(9): 2656–2664.

(责任编辑: 童天添)

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, 致力和专注于微波、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/>