

文章编号:1001-9014(2006)01-0060-04

# 连续结构微带滤波器的矩阵运算法分析

梁唯一, 焦扬, 王均宏

(北京交通大学 光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:**用矩阵运算法对“均匀”和“等比”两种连续结构的带阻及低通滤波器进行了研究, 分析了结构参数对滤波器性能的影响. 实际制作并测试了滤波器, 理论与实验结果基本一致.

**关键词:**微带线; 滤波器; 矩阵运算法; “均匀”结构; “等比”结构

**中图分类号:** TN455; TN713+.4; TN713+.5 **文献标识码:** A

## ANALYSIS OF STRUCTURE-CONTINUOUS MICROSTRIP FILTERS BY MATRIX MULTIPLICATION METHOD

LIANG Wei-Yi, JIAO Yang, WANG Jun-Hong

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, key laboratory of all optical network and advanced telecommunication network, Ministry of Education, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Two kinds of continuous structure bandstop and lowpass microstrip filters named ‘uniform’ and ‘constant ratio’ were studied by matrix multiplication method. The effect of structure parameters on the filtering property was analyzed. The filters were fabricated and measured. And the theoretical results are basically in agreement with the experimental results.

**Key words:** microstrip line; filters; matrix multiplication method; ‘uniform’ structure; ‘constant ratio’ structure

### 引言

滤波器是无线通讯系统中不可缺少的部分. 无线通讯的频谱范围十分广阔, 从以百兆赫兹为单位的电离反射层通讯系统, 到以千兆赫兹为单位的移动通讯、卫星通讯系统. 不同频段需要不同的滤波器, 因此不同特性微波滤波器的研究十分重要. 近几年来, 移动通讯获得了迅猛的发展, 相应的滤波器的新技术、新工艺、新产品也不断涌现. 其中微带滤波器由于体积小、易集成而受到了重视<sup>[1~5]</sup>. 本文中矩阵运算法<sup>[6]</sup>应用于连续结构微带滤波器特性的分析, 重点分析了微带带阻、低通滤波器的特性.

### 1 理论方法

连续结构微带滤波器是由特性阻抗沿长度方向连续变化的微带线构成<sup>[1~4]</sup>, 理论上可将微带线沿长度方向分成很多小段, 如图1所示, 每一小段的特性阻抗可近似看作恒定. 设入射波从左至右垂直入射到各小段上, 其中各段交界面的反射系数  $\Gamma_i$  和透

射系数  $t_i$  均由该交界面两侧的特性阻抗决定. 每段中的总电场可表示为入射波  $E_i^+$  与反射波  $E_i^-$  之和. 利用相邻分段交界面处的切向场连续条件得

$$E_i^+ + E_i^- = E_{i+1}^+ + E_{i+1}^- \quad (1)$$

由电磁场理论, 并利用式(1)的连续条件可推导出

$$\begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} E_{N+1}^+ \\ E_{N+1}^- \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中

$$[T] = \frac{1}{t_1 t_2 \cdots t_i \cdots t_N} [\Gamma^1] \cdot [\Phi^2] \cdot [\Gamma^2] \cdot \cdots \cdot [\Phi^i] \cdot [\Gamma^i] \cdot \cdots \cdot [\Phi^N] \cdot [\Gamma^N] \quad (3)$$

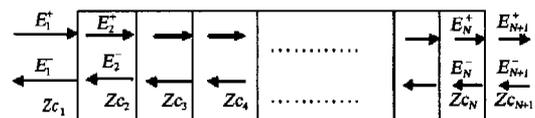


图1 微带滤波器的分段及各段特性参数示意图  
Fig.1 Scheme of the subsections and their characteristic parameters of the microstrip filters

收稿日期: 2005-04-18, 修回日期: 2005-10-15

Received date: 2005-04-18, revised date: 2005-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(60471053)及教育部优秀青年教师资助计划资助

作者简介: 梁唯一(1982-), 女, 湖南长沙人, 北京交通大学硕士研究生, 主要从事微波器件研究.

式中

$$[\Gamma^i] = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_i \\ \Gamma_i & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$[\Phi^i] = \begin{bmatrix} e^{j\varphi_i(z)} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi_i(z)} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

上式中,  $\Gamma_i = (Z_{ci} - Z_{ci+1}) / (Z_{ci} + Z_{ci+1})$  为各分段交界面处的电压反射系数,  $t_i = 2Z_{ci} / (Z_{ci} + Z_{ci+1})$  为交界面处的电压传输系数,  $\varphi_i(z) = \beta_i \Delta l$  为第  $i$  段的相移因子,  $\beta_i = 2\pi / \lambda_{gi}$  为第  $i$  段的传播常数,  $\lambda_{gi} = \lambda / \sqrt{\epsilon_{eff}^i}$  为第  $i$  段的波导波长,  $\epsilon_{eff}^i$  为第  $i$  段的等效介电常数, 它随微带线上各分段的位置而变化. 由于微带滤波器的终端接匹配负载, 所以有  $E_{N+1}^- = 0$ . 由式(2)得滤波器的  $S$  参数

$$S_{11} = \frac{E_1^-}{E_1^+} = \frac{T_{21}}{T_{11}}, \quad (6)$$

$$S_{21} = \frac{E_{N+1}^+}{E_1^+} = \frac{1}{T_{11}}, \quad (7)$$

由式(6)、(7)可以分析微带滤波器的滤波特性.

实际上连续结构微带滤波器根据微带线特性阻抗变化规律的不同可从形状上分为很多种, 本文将就其中的两种情况进行讨论, 即特性阻抗沿微带线按正弦规律变化的正弦型和特性阻抗按三角函数变化的三角型微带带阻滤波器, 分别如图2所示. 其结构可以看成是由一系列形状相同的基本单元周期性连接而成. 以正弦型为例, 一个单元内特性阻抗的变化可由下式表示:

$$\begin{cases} Z_c = 50 - (50 - Z_{cmin}) \sin\left(2\pi \frac{p}{L}\right) \leq 50\Omega, 0 \leq p \leq \frac{L}{2} \\ Z_c = 50 + (Z_{cmax} - 50) \left| \sin\left(2\pi \frac{p}{L}\right) \right| \geq 50\Omega, \frac{L}{2} \leq p \leq L \end{cases}, \quad (8)$$

其中  $Z_{cmin}$  和  $Z_{cmax}$  分别为微带线特性阻抗变化的最小值和最大值, 并且有  $\sqrt{Z_{cmin} \cdot Z_{cmax}} = 50\Omega$ . 上式中  $L$  为单元的长度,  $p$  为考察点在单元上的位置. 三角型结构单元内的特性阻抗的变化可类似写出.

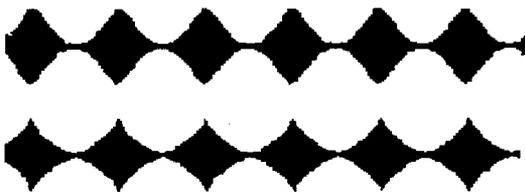


图2 正弦型和三角型微带滤波器形状  
Fig. 2 Shapes of the sinusoidal and triangular microstrip filters

## 2 计算结果及分析

将由完全相同的单元级联而成的滤波器称为均匀微带带阻滤波器. 为验证方法的正确性, 本文计算了正弦型均匀单元微带带阻滤波器, 并与文献[1]中由 IE3D 得到的结果进行了比较, 如图3所示. 计算所采用滤波器结构参数为: 介质衬底的相对介电常数  $\epsilon_r = 2.2$ , 衬底高度  $h = 0.508\text{mm}$ , 特性阻抗的变化范围为  $(25\Omega, 100\Omega)$ ,  $L = 21.2\text{mm}$ , 单元数  $N = 6$ , 计算时每个单元的分段数  $n$  为 40 段. 实际上可以取得更多, 但计算量会增加, 当  $n = 400$  时, 其结果与  $n = 40$  的结果的相对误差不到 0.7%, 因此下文中取  $n = 40$ . 由图3可见两者吻合很好, 表明本文所用矩阵运算法可有效地计算微带滤波器的  $S$  参数. 根据我们的计算, 频率到 18GHz 时, 矩阵法的计算结果与全波法的结果是一致的. 由于目前这一类滤波器没有更高频段的全波方法的结果, 因此我们没有进行更多的比较. 但从理论上讲, 只要没有跳跃的结构(如阶梯型的), 对于如本文所讨论的这一类连续变化的结构, 矩阵分析法应该可以算到很高的频率.

对于实际应用的滤波器要求入射波在其阻带内的衰减较大, 因此, 仅有一个单元还不够, 必须将多个单元级联在一起. 表1给出了特性阻抗变化范围为  $(25\Omega, 100\Omega)$ 、 $(31\Omega, 80\Omega)$ 、 $(15.5\Omega, 161\Omega)$  的微带带阻滤波器的  $S_{21}$  最小值随单元数变化的情况. 计算时的参数为: 介质衬底的相对介电常数  $\epsilon_r = 2.2$ , 衬底高度  $h = 2.0\text{mm}$ , 微带金属厚度  $t = 0.035\text{mm}$ , 介质损耗角正切  $\text{tg}\delta = 0.016$ .

可见, 特性阻抗变化范围不同, 滤波器的特性也不同. 研究表明, 特性阻抗  $Z_c$  变化范围越大, 阻带带宽越宽且带内下陷越深. 此外, 在其它参数相同的情

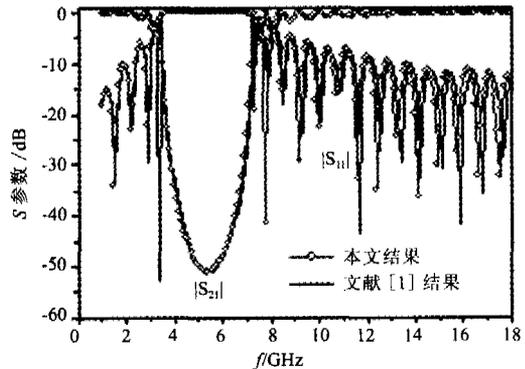


图3 均匀单元微带滤波器的特性  
Fig. 3 Characteristics of the microstrip filter with uniform cell

表 1 传输参数  $S_{21}$  随特性阻抗及单元数的变化情况  
 Table 1 Transmission parameter  $S_{21}$  as function of the characteristic impedance and cells' number

$(Z_{cmin}, Z_{cmax}) (\Omega)$	结构类型	带内 $S_{21}$ 最小值 (dB)		
		$m=1$	$m=3$	$m=6$
(31, 80)	正弦	-2	-13	-33
	三角	-1.6	-10	-25
(25, 100)	正弦	-5	-25	-50
	三角	-3.2	-17	-40
(15.5, 161)	正弦	-11	-43	-90
	三角	-7.9	-33	-72

况下,正弦型微带滤波器的频率响应特性优于三角型结构,但三角型结构比正弦型结构简单,且容易实现。

由于均匀带阻滤波器的 3dB 带宽较窄,为了增加带宽做如下改进:让微带滤波器的各单元长度成比例递减: $L_{i+1} = aL_i, i = 1, 2, 3, \dots, N; 0 < a < 1$ , 为比例因子,将上述结构的滤波器称为等比微带带阻滤波器。图 4 给出了  $L_1 = 21.2\text{mm}, a = 0.8$ , 单元数  $N = 10$  的等比正弦和三角型滤波器的特性。特性阻抗  $Z_c$  变化范围为  $(25\Omega, 100\Omega)$ , 其余参数同上。

从图 4 可以看到,单元长度等比例递减,滤波器阻带带宽显著增加,当然为了提高带内损耗,滤波器的级数应适当增加。

由于  $S$  参数与特性阻抗的变化紧密相关,改变特性阻抗的变化规律有可能优化出性能较好的滤波器。为此让每个单元中的特性阻抗的最大值都不同。令  $Z_{cmax} = 161 + 10 \times \sin(2\pi k/10), k = 0, 1, 2, \dots, 9$ , 比例系数  $a = 0.72, Z_{cmin} = 15$ , 级联 10 个单元。图 5 是该滤波器的频率响应曲线。从图中可以看出,所设计的微带滤波器,其截止频率  $f_c \approx 5\text{GHz}$ , 阻带的上

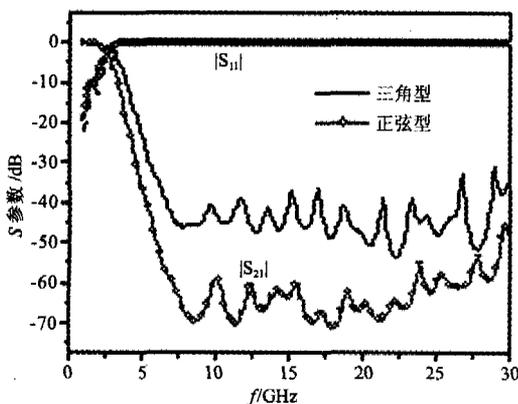


图 4 三角型和正弦型等比滤波器的频率响应特性  
 Fig. 4 Characteristics of the frequency responses of triangular and sinusoidal constant ratio filters

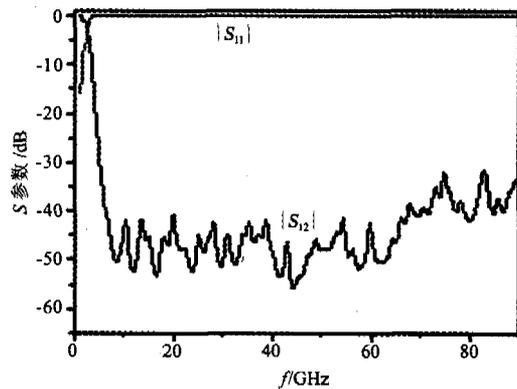


图 5 特性阻抗最大值变化的等比滤波器特性  
 Fig. 5 Characteristics of the constant ratio filter with the maximum value of the characteristic impedance changing

限频率超过 80GHz, 阻带内  $|S_{21}|$  在  $-45\text{dB}$  左右,  $|S_{11}| \leq 0.1\text{dB}$ 。

### 3 实验

实验中采用双面复合基材树脂铜箔层压板——S2130 作为微带滤波器制作材料。其相对介电常数  $\epsilon_r \leq 5.4$ , 典型值为 4.8, 介质衬底高度  $h = 2.0\text{mm}$ , 微带金属厚度  $t = 0.035\text{mm}$ , 介质损耗角正切  $\text{tg}\delta \leq 0.035$ , 典型值为 0.016。选用这一材料是因为制作出的滤波器尺寸较大,便于手工制作。图 6 为实际制作的均匀和等比微带滤波器的实物照片。图 7 则分别为所制作滤波器的计算和测量结果。其中,特性阻抗  $Z_c$  的变化范围为  $(25\Omega, 100\Omega)$ , 均匀微带带阻滤波器单元长度  $L = 1.7\text{cm}, N = 6$  单元数,等比带阻滤波器  $L_1 = 5\text{cm}$ , 比例因子  $a = 0.84$ , 单元数  $N = 9$ 。

由上图不难发现,理论分析结果与实测结果在阻带内的滤波特性还是比较一致的,只是均匀滤波器的理论分析结果的带内衰减稍大些,曲线更为尖锐,这主要是由于制作上未能保证单元完全相同,从

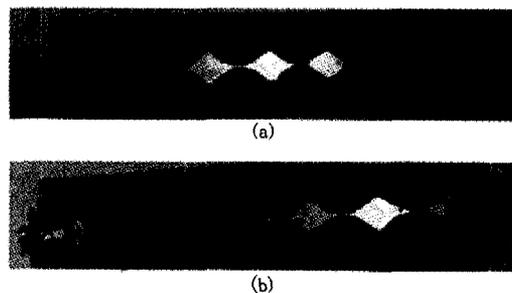


图 6 实际制作的微带滤波器实物照片 (a) 均匀滤波器 (b) 等比滤波器  
 Fig. 6 Photographs of the fabricated microstrip filters (a) uniform microstrip filter (b) constant ratio microstrip filter

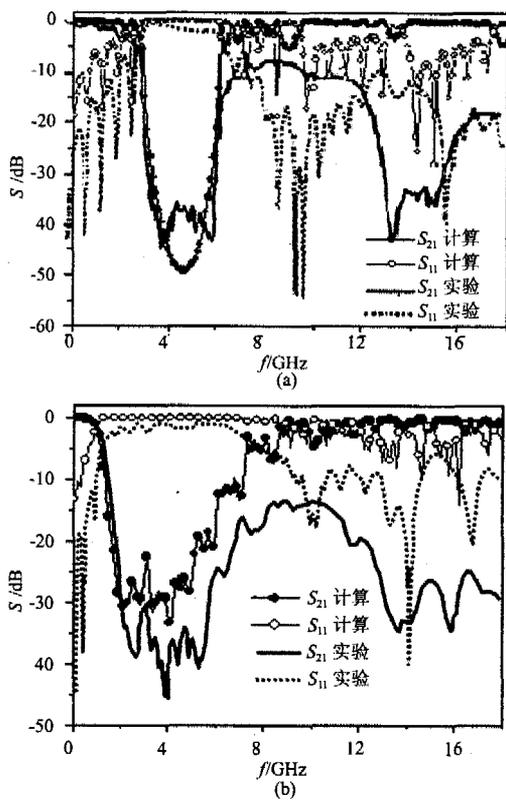


图7 实际制作的均匀和等比滤波器的S参数 (a) 均匀带阻滤波器 (b) 等比带阻滤波器  
Fig. 7 S-parameters of the fabricated microstrip filters (a) uniform bandstop microstrip filter (b) constant ratio bandstop microstrip filter

而使各单元的中心反射点不在同一点所致. 另外, 实测结果与理论值相比, 整个S参数曲线呈下降趋势, 带内插入损耗约2dB, 在高频区下降更为明显, 这就说明了该滤波器在高频区的损耗较大, 而滤波器未封装所造成的辐射损耗在某种程度上成为产生此现象的原因.

#### 4 结论

受结构、材料以及分析方法的制约, 微带滤波器

的分析是一项比较复杂的工作. 本文所采用的矩阵分析法适用性强, 对于连续、不连续的微带线结构都能够分析. 当微带线划分的层数越多, 计算结果精度越高, 实际应用中需权衡误差和计算量, 选取适当的层数. 通过本文的研究得到以下结论: 1) 带内抑制满足需要就可以, 不能过分追求高抑制, 否则滤波器单元数增多、体积变大、损耗增加; 2) 在同等抑制的要求下, 必须在插入损耗和体积两者之间进行权衡, 过分追求低损耗, 会使滤波器的体积增大, 反之会使滤波器的损耗增大.

#### REFERENCES

- [1] Dusan Nestic, Aleksandar Nestic. Bandstop microstrip pbg filter with sinusoidal variation of the characteristic impedance and without etching in the ground plane [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2001, 29(6): 418—420.
- [2] Roy M Le, Perennec A, Toutain S, et al. A new design of microwave filters by using continuously varying transmission lines [C]. *Proc. IEEE MTT-S Digest*, 1997: 639—641.
- [3] Marc Le Roy, André Pérennec, Serge Toutain, et al. The continuously varying transmission-line technique-application to filter design [J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory And Techniques*, 1999, 47(9): 1680—1687.
- [4] Txema Lopetegui, Miguel A G Laso, Maria J Erro, et al. Novel photonic bandgap microstrip structures using network topology [J]. *Microwave and Optic Technology Letters*, 2000, 25(1): 33—36.
- [5] LIU Hai-Wen, SUN Xiao-Wei, LI Zheng-Fan. Low-pass filters of wide stop-band based on photonic band-gap structures [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘海文, 孙晓玮, 李征帆. 一种基于光子带隙结构的宽阻带低通滤波器. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(2): 135—138.
- [6] ZUO Feng, WANG Jun-Hong, LI Tang-Jun, et al. Matrix computation method for analyzing double-wavelength fiber bragg gratings [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (卓峰, 王均宏, 李唐军, 等. 用于分析双波长光纤光栅的矩阵运算法. *光电子·激光*), 2001, 12(4): 354—357.