

## 宽阻带平面低通滤波器的设计

宁俊松,罗正祥,羊 恺,补世荣,刘娟秀

(电子科技大学微波中心,四川成都 610054)

**摘要:** 低通滤波器是通信系统中关键的器件之一,常作为选频器件用来抑制干扰信号和谐波信号,因此低通滤波器阻带带宽成为关键指标.常见的平面低通滤波器采用短截线(分支线)或高低阻抗线结构,这些结构的低通滤波器阻带不够宽,一般在截止频率的2倍频或3倍频处出现寄生通带.本文使用等效的T形节替代低通滤波器中的串联传输线的方式实现了带阻滤波器嵌入到低通滤波器内部,既对低通滤波器的阻带上任意频段出现的寄生通带进行了抑制,又不影响低通滤波器的通带内性能,并给出等效T形节的综合设计公式.此结构综合设计方法严谨简单、易于平面电路实现,制作出来改进的低通滤波器对3倍频寄生通带进行抑制,扩宽了阻带带宽到4个倍频程以上,测试结果:通带带宽0~3GHz,通带插入损耗小于0.5dB,带外抑制3.6~12GHz大于60dB.

**关键词:** 低通滤波器; 带阻滤波器; 等效T形节; 宽阻带

中图分类号: TN713 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2008) 02-0342-04

## Design of Broad-Stopband Planar Lowpass Filters

NING Jun-song, LUO Zheng-xian, YANG Kai, BU Shi-rong, LIU Juan-xiu

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract:** Conventional planar lowpass filters often suffer from the problem of spurious passbands. For spurious response suppression, integration of bandstop filters in a conventional open-stub lowpass filter is presented. By using equivalent T-shaped transmission lines to replace series connecting transmission lines of the conventional lowpass filter, the T-shaped lines work as bandstop filters at the spurious passbands. Furthermore, general design equations are given to transform arbitrary series connecting lines of the filter into the equivalent T-shaped lines. The proposed filter improves the out-of-band rejection over very wide operation band width and reduces the overall size with low insertion loss. Very good agreement has been observed between the experimental results and simulated data. The insertion loss is less than 0.5 dB from DC to 3GHz and the rejection is greater than 60 dB from 3.6GHz to 12GHz.

**Key words:** lowpass filter; bandstop filter; T-shaped transmission line; broad-stopband

### 1 引言

低通滤波器是一种常见的微波无源器件,在微波测试系统、通信系统、雷达系统等有着广泛的应用.低通滤波器作为选频器件,可以用来抑制干扰信号和谐波信号.它既可以置于系统接收机的前端,有效地限制系统的有效工作带宽,保护后级放大器不受干扰信号的影响,从而达到提高系统灵敏度的目的;也可以利用它相对宽的阻带特性,将其置于系统带通滤波器之前,以达到消除带通滤波器寄生通带、抑制放大器谐波信号的目的.从以上低通滤波器的应用上,人们希望低通滤波器具有尽可能低的插入损耗(放置在系统前端,低插损意味着低噪声、高灵敏度)和更宽的阻带(抑制更远端的干

扰信号和高次谐波).

在低频段的应用中,集中参数滤波器有着良好的表现,但随着频率上升到了微波频段(300MHz以上),因为集中参数元件(电感、电容)的Q值急剧下降,造成滤波器的插入损耗太大,这时就必须使用分布参数元件来替代集中参数元件,由于分布参数元件电路等效表达式中三角函数(如 $\sin$ 、 $\cos$ 、 $\tan$ 等)具有周期性,分布参数滤波器的阻带不可避免出现寄生通带.为了获得宽的阻带,近些年人们进行了大量的研究,提出一些新结构,像平面光子带隙结构(Photonic Bandgap Structure)<sup>[1]</sup>、缺陷地结构(Defected Ground Structure)<sup>[2]</sup>、高低阻抗谐振器<sup>[3]</sup>以及不对称耦合结构<sup>[4]</sup>等,这些结构有着良好的带外抑制性能,但也存在设计复杂或是加工复杂的缺陷.本文使

用等效的 T 形节替代低通滤波器中的串联传输线的方式实现了低通滤波器中嵌入带阻滤波器, 对 3 倍频寄生通带进行抑制, 扩宽了阻带带宽到 4 个倍频程以上。这种嵌入式的结构综合设计方法严谨简单、易于平面电路实现, 近年来国际上已有多篇论文涉及到此类结构<sup>[5-7]</sup>, 这些论文的讨论都是在某种特例情况下, 有一定的局限性。本文利用传输线传输模型推导出等效 T 形节替代滤波器中任意串联传输线的通用等效公式, 能够灵活实现对滤波器阻带上任意频段上出现的寄生通带进行抑制, 最后以仿真和实验加以验证。

## 2 低通滤波器的设计

常见的低通滤波器结构有开路端短截线结构以及高低阻抗结构, 设计都较为成熟易于实现。

由于高低阻抗结构采用  $\frac{1}{4}\lambda$  高低阻抗线, 导致滤波器体积太大, 为了缩小体积, 本文采用了  $\frac{1}{8}\lambda$  开路端短截线结构。这里简单介绍设计过程<sup>[8]</sup>: 根据截止频率和带外抑制指标选用选择切比雪夫函数滤波器以及滤波器的阶数, 查表可得等效电路如图 1 的电感电容的参数值, 先应用 Richards 变换, 然后利用 Kuroda 规则, 将电感电容转换终端开路短截线(终端短路短截线在平面电路不容易实现), 终端开路短截线的输入阻抗  $Z_{in}$ :

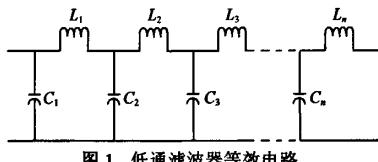


图 1 低通滤波器等效电路

$$Z_{in} = -j Z_0 \frac{1}{\tan(\beta d)} \quad (1)$$

$Z_0$  特性阻抗、 $\beta$  相移常数、 $d$  传输线长度  
当  $\beta d \ll 1$  时,

$$Z_{in} \approx -j Z_0 \frac{1}{\beta d} \quad (2)$$

根据公式(2)实现集中参数元件到分布参数元件的变换。

取开路短截线长度  $d = \frac{\lambda}{8}$ , 从而可以得到  $\frac{1}{8}\lambda$  开路短截线低通滤波器的综合初值。由于推导的过程中使用了理想电路等效以及公式近似, 没有考虑分布元件的寄生参数和相邻谐振器之间的附加耦合, 这个推导出的综合初值和实际情况有些偏差, 为此需使用基于矩量法的全波分析软件 IE3D 进行结构微调, 可以得到图 2 所示的最终设计结果。

以设计一个 0 ~ 3GHz 的平面低通滤波器为例, 要求通带插入损耗小于 0.5dB, 带外抑制 3.6GHz 到 12GHz 大于 60dB, 为了避免采用普通微带结构空气介质面附

近激起表面波以及辐射损耗造成损耗较大, 采用了带状线开路短截线结构, 使用 IE3D 仿真得到的结构尺寸如表 1:

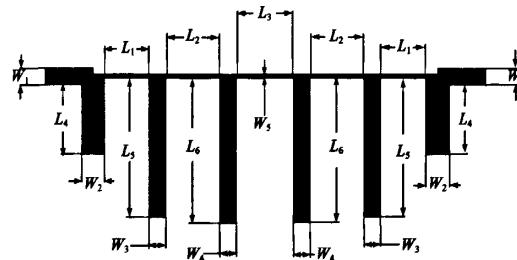


图 2 常见开路短截线结构

基片采用:  $\epsilon_r = 2.2$ ,  $H = 0.762\text{mm}$ ,  $\tan\delta = 0.003$

表 1 常见开路短截线结构尺寸

$W_1$ (mm)	$W_2$ (mm)	$W_3$ (mm)	$W_4$ (mm)	$W_5$ (mm)	$L_1$ (mm)	$L_2$ (mm)	$L_3$ (mm)	$L_4$ (mm)	$L_5$ (mm)	$L_6$ (mm)
1.32	2.8	2	2	0.5	7.4	7.9	7.9	7.15	7.15	11.26

结果如图 6, 在 3 倍频即 9GHz 附近出现寄生通道, 考虑设计一个带阻滤波器中心频率在 9GHz 来抑制低通滤波器的 3 倍频的寄生通道。如果这个带阻滤波器能够嵌入低通滤波器内部, 既能缩小滤波器的整体体积又能减小通带内插损。这里关键问题是如何使得带阻滤波器嵌入低通滤波器后而不影响低通滤波器通带性能, 做出这样的设想:

低通滤波器各个开路短截线之间的串联传输线用等效 T 形节来替代, 如图 3, 如果在通带内即 3GHz 以下的频段内 T 形节的传输特性与这段串联传输线近似, 那么用 T 形节来替代这段传输线不会影响滤波器的通带性能; 同时为了抑制 3 次谐波即在 9GHz 附近的寄生通带, T 形节中开路短截线的电长度  $\theta = 30^\circ$ , 则 T 形节在 9GHz 左右形成一个传输零点, 从而抑制了滤波器的 3 倍频的寄生通道(抑制任意  $n$  次谐波寄生通带, T 形节中开路短截线的电长度  $\theta = \frac{90^\circ}{n}$ )。从上述分析可知, 等效 T 形节在滤波器通带内表现为一段传输线对滤波器通带性能影响很小; 另一方面在滤波器寄生通带能表

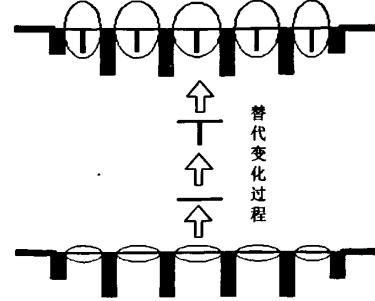


图 3 替代变换示意图

现为带阻滤波器对寄生通带进行抑制。在下一节中使用传输线传输模型来推导出计算等效 T 形节的结构参数的综合公式。

### 3 T 形节与传输线等效分析

传输线和 T 形节传输线传输模型原理如图 4 传输线 ( $Z_1$  特性阻抗、 $\theta_1$  电长度) 的  $ABCD$  矩阵  $M_1$  为<sup>[8]</sup>

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & jZ_1 \sin\theta_1 \\ j\sin\theta_1 & Z_1 \cos\theta_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

等效 T 形节传输线模型由两边两段等长等特性阻抗的传输线 ( $Z_2$  特性阻抗、 $\theta_2$  电长度) 和中间一段开路短截线 ( $Z_3$  特性阻抗、 $\theta_3$  电长度) 构成, 忽略 T 形节的不连续性和开路终端效应, 则 T 形节等效矩阵  $M_T$

$$M_T = M_2 M_3 M_2 \quad (4)$$

其中

$$M_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & jZ_2 \sin\theta_2 \\ j\sin\theta_2 & Z_2 \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\tan\theta_3 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

T 形节等效传输线传输特性, 必须有  $M_T = M_1$  式(3)、(4)、(5)、(6) 带入式(7)解得:

$$Z_2 = \cot\theta_2 \frac{1 - \cos\theta_1}{\sin\theta_1} Z_1 \quad (8a)$$

$$Z_3 = \tan\theta_3 \frac{\cos^2\theta_2}{\cos 2\theta_2 - \cos\theta_1} \frac{1 - \cos\theta_1}{\sin\theta_1} Z_1 \quad (8b)$$

对式(8)分析: (a) 传输线特性阻抗  $Z_1$  和电长度  $\theta_1$  以及开路短截线的电长度  $\theta_3$  (由要抑制的寄生通带的频率决定,  $\theta_3 = \frac{90^\circ}{n}$ ,  $n$  为寄生通带频率与基波频率的比) 是已知参数, 剩下的  $Z_2$ 、 $Z_3$  和  $\theta_2$  是未知参数, 只有两个方程 8(a) 和 8(b), 说明可能有无数个解满足上述方程, 考虑到电路的可实现性, 只有部分解有现实的意义, 因此需要合理选择  $\theta_2$  的值, 就能确定  $Z_2$  和  $Z_3$  的值 ( $\theta_2$  的取值并不影响滤波器的性能, 需保证  $Z_2$  和  $Z_3$  特性阻抗不能太高, 即其线宽不小于 0.1mm, 否则光刻和腐蚀工艺精度不够); (b) 由式(8)得  $\cos 2\theta_2 - \cos\theta_1 > 0$  这样  $Z_3$  才有意义, 可以进一步确定  $\theta_2$  取值范围 ( $0 < \theta_2 < \frac{\theta_1}{2}$ ), 即改进的低通滤波器的体积小于常见开路短截线低通滤波器的体积; (c) 当  $\theta_2 = \frac{\theta_1}{2}$  时,  $Z_2 = Z_1$ ,  $Z_3 \rightarrow \infty$

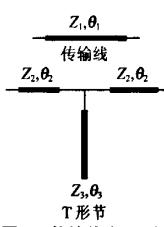


图 4 传输线和 T 形节  
传输模型原理图

由式(1)可知, 开路短截线输入阻抗  $Z_{in} \rightarrow \infty$ , 相当于开路, 可以忽略其影响, 这样 T 形节与替代的传输线就完全一致。

### 4 改进低通滤波器的结构及结果

以 T 形节替代低通滤波器中间的串联传输线即第 3 段串联传输线为例, 其他串联传输线替换过程相同, 只是根据需要抑制的寄生通带的频率决定不同 T 形节的开路短截线电长度  $\theta$ 。

由表 1 已知滤波器第三段串联传输线宽度  $W_5 = 0.5\text{mm}$ , 长度  $L_3 = 7.9\text{mm}$ , 则其阻抗  $Z_1 \approx 80\Omega$ , 电长度  $\theta_1 \approx 42.2^\circ$ ; 已知要抑制寄生通带中心频率为 9GHz, 故  $\theta_3 = 30^\circ$ ;

综合电路可实现性和简易性, 取  $\theta_2 = 15^\circ$ , 带入式(8), 解得  $Z_2 \approx 115\Omega$ ,  $Z_3 \approx 133\Omega$

由于寄生通带是具有一定带宽且对寄生通带需要抑制度要求高的情况下, 往往只靠一个 T 形节阻带滤波器是不够的, 而且对这里的低通滤波器而言, T 形节改变了原来的谐振器之间耦合方式, 导致 2 倍频会出现新的寄生通带, 这也需要更多的 T 形节对阻带不同频率段的寄生通带进行抑制, 因此再以两个 T 形节替代第一段和第五段串联传输线用来抑制 9GHz 附近的寄生通带, 以另外两个 T 形节替代第三段和第四段串联传输线用来抑制 6GHz 附近的寄生通带, 最后得到改进的低通滤波器结构如图 5。使用 Agilent 8720E 矢量网络分析仪进行测量, 测试结果达到: 通带带宽 0~3GHz, 通带插入损耗小于 0.5dB, 带外抑制 3.6~12GHz 大于 60dB。

根据设计结果制作出的改进低通滤波器比常见开路短截线低通滤波器体积缩小 16%, 测试曲线如图 6, 与仿真的结果有很好的吻合。



图 5 改进后低通滤波器结构

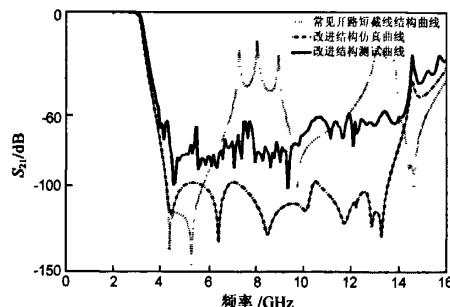


图 6 结果曲线对比图

## 5 结论

为了扩宽平面低通滤波器的阻带带宽,本文使用等效 T 形节替代平面低通滤波器中的串联传输线的方式实现了带阻滤波器嵌入到低通滤波器内部,既对低通滤波器的任意频段上出现的寄生通带进行了抑制,达到了扩宽阻带的目的,又不影响低通滤波器的通带性能且缩小了整体体积。利用传输线传输模型推导出等效 T 形节的综合设计公式,能简便的实现常见滤波器结构转换成改进滤波器结构。最后通过制作一个 0~3GHz 的低通滤波器进行验证,仿真和试验得到了很好的吻合。这种设计方法还可以推广到宽阻带带通以及带阻滤波器设计中,将进一步提高微波通信系统整机性能。

## 参考文献:

- [1] Kim T, Seo C. A novel photonic bandgap structure for low-pass filter of wide stopband [J]. IEEE Microw Guid Wave Lett, 2000, 10(1): 13~15.
- [2] Ahn D, Park J -S, Kim C -S, Qian Y, Itoh T. A design of low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2001, 49(1): 86~93.
- [3] Hsieh L -H, Chang K. Compact elliptic-function low-pass filters using microstrip stepped-impedance hairpin resonators [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2003, 51(1): 93~199.
- [4] Gao J, Zhu L. Asymmetric parallel-coupled CPW stages for harmonic suppressed  $\lambda/4$  bandpass filters [J]. Electron Lett, 2004, 40(18): 1122~1123.
- [5] C Quendo, E Rius, C Person, M Ney. Integration of optimized low-pass filters in a bandpass filter for out-of-band improvement [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2001, 49(12): 2376~2383.
- [6] A Manchec, C Quendo, E Rius, C Person, J -F Favenne. Synthesis of dual behavior resonator (DBR) filters with integrated low-pass structures for spurious responses suppression [J]. IEEE Microw Wireless Compon Lett, 2006, 16(1): 4~6.
- [7] Wen-Hua, Tu Kai Chang. Compact second harmonic-suppressed bandstop and bandpass filters using open stubs [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2006, 54(6): 2497~2502.
- [8] Ludwig R, 等. 射频电路设计·理论与应用 [M]. 王子宇, 等,译. 北京:电子工业出版社, 2002.5

## 作者简介:



宁俊松 男, 1995 年天津工业大学自动化专业获得学士学位, 2001 年电子科技大学物理电子学专业获得硕士学位, 现在电子科技大学攻读博士学位。主要研究方向为高温超导材料在微波器件及通信系统中应用。  
E-mail: wbzx@uestc.edu.cn

罗正祥 男, 教授, 博导, 主要从事高温超导微波电路与系统、高温超导薄膜微波表面电阻无损伤检测技术、微波综合自动测量系统以及高温超导微波电路 CAD、CAA 和制作技术等方面的研究工作。在高温超导器件的实用化、高温超导薄膜的性能评定上做出了富有成效的工作, 并作为课题第二负责人在研制了国内第一台高温超导高灵敏度接收机样机。获得电子部科技进步二等奖 3 项, 电子部科技进步三等奖 3 项, 四川省教学成果一等奖 1 项, 发表论文 30 多篇。

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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/>