《电磁波与应用》，2014年，第28卷，第10期，1269–1274，
http://dx.doi.org/10.1080/09205071.2014.915201

基于人工传输线结构的新型小型化低通滤波器

Yu He、Xin Wu 和 Chang-jun Liu*

中国四川省成都市610064，四川大学电子信息工程学院

（收稿日期：2014年1月5日；录用日期：2014年4月10日）

提出了一种基于人工传输线结构设计新型小型化低通滤波器的方法。基于电磁仿真和参数提取，直接利用微带结构构造电抗元件，即电容器和电感器。将构造的电抗元件集成起来，构成低通滤波器。本文介绍了采用该方法实现的五阶巴特沃斯滤波器，以及纹波为0.25、0.5和1 dB的切比雪夫滤波器。所提出的低通滤波器结构紧凑，尺寸约为传统微带低通滤波器的20%。仿真结果与测量结果吻合良好，验证了所提出设计方法的有效性。这些小型化低通滤波器可应用于多种微波系统。

关键词：微带滤波器；小型化；低通滤波器；人工传输线；电抗元件；参数提取

1. 引言

微带低通滤波器因制造成本低，已广泛应用于微波系统。[1] 微带滤波器的小型化受到广泛关注，许多研究致力于减小滤波器的尺寸。[2,3] 文献中报道的人工传输线用于缩小微波元件的尺寸，例如功率分配器、耦合器和巴伦。[4–6] 本文利用人工传输线，通过对所构建电抗元件进行参数提取，设计了一种新型小型化低通滤波器。采用蛇形线和并联平板电容器，分别替代集总电感器和电容器。

由于波长与滤波器结构的物理尺寸相当，微波频段的滤波器难以使用集总元件实现，且会导致更大的损耗。因此，分布式传输线元件对于设计实用的微波滤波器至关重要。将集总元件转换为分布式元件的传统方法依赖于理查德变换，而黑田恒等式可用于利用传输线段分隔滤波器元件。然而，尽管这些传输线段不会影响滤波器响应，却会显著增大滤波器的尺寸。滤波器尺寸过大，使其无法应用于当前要求小型化和集成化的无线通信领域。

提出了一种新的滤波器设计方法，以解决上述问题。电抗元件，即电容器和电感器，可以直接

*通讯作者。电子邮箱：cjliu@ieee.org

基于电磁仿真和参数提取，由微带结构构建。将构建的电抗元件集成起来，形成所需的滤波器。该方法适用于低频段微波滤波器的设计。与传统分布式元件滤波器相比，电路尺寸更加紧凑。

2. 设计概念与方法

根据上述滤波器设计概念，低通滤波器的设计步骤如下：(a) 选择满足设计准则的归一化滤波器参数；(b) 通过频率变换和阻抗变换获得滤波器参数 L_i 和 C_i ；(c) 利用电磁仿真构建等效微带结构并提取等效元件参数；(d) 集成并优化微带结构。

通用归一化低通滤波器有两种可能的实现方式。这里，我们选择低通滤波器的第一个元件为与信号源串联的电感器。低通滤波器的等效电路如图1所示。

为说明此类滤波器的设计流程，下面介绍一个具有巴特沃斯响应、截止频率为 1.8 吉赫兹的五阶低通滤波器设计。巴特沃斯响应的元件值为 $g_1 = g_5 = 0.618$、$g_2 = g_4 = 1.618$ 和 $g_3 = 2$。经过频率变换和阻抗变换后，可得 $L_1 = L_5 = 2.73$ nH、$C_2 = C_4 = 2.86$ pF 和 $L_3 = 8.84$ nH。采用蛇形线和平行板电容器实现这些数值。使用全波电磁仿真器 IE3D [7] 从等效电路模型中提取元件值。基于微带蛇形线构建的电感器及其对应的等效集总电路模型分别如图2(a)和(b)所示。弯折传输线可能是实现尺寸缩减最直接的方法。[8–10]参见图2(b)中的等效模型，电感器 L 表示蛇形线电感器，而 C_1 和 C_2 表示寄生电容。为简化起见，假设 C_1 和 C_2 相同。等效模型的 Y矩阵可写为

$$[Y] = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} j\omega C_1 + \dfrac{1}{j\omega L} & -\dfrac{1}{j\omega L} \\ -\dfrac{1}{j\omega L} & j\omega C_2 + \dfrac{1}{j\omega L} \end{pmatrix} \tag{1}$$

L 和 C 可通过提取 Y矩阵的虚部获得

$$L = \frac{1}{2\pi f \,\mathrm{Im}(Y_{21})} \tag{2}$$

$$C_1 = C_2 = \frac{\mathrm{Im}(Y_{11}) + \mathrm{Im}(Y_{21})}{2\pi f} \tag{3}$$

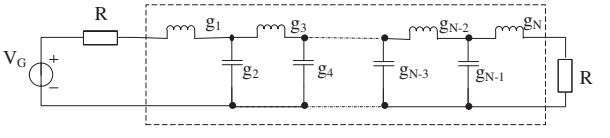

图1. 低通滤波器的等效电路模型。

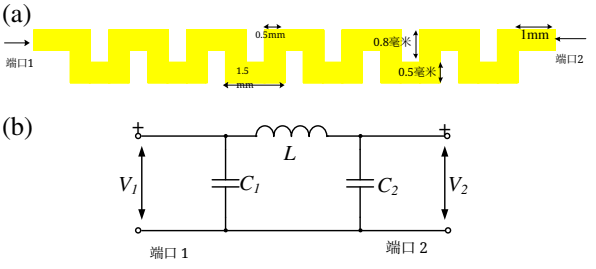

图2. 基于微带蛇形线构造的电感器。（a）电路原理图。（b）等效集总电路模型。

根据式（2）和（3），L 和 C 是频率的函数。因此，只有将特定频率代入式（2）和（3），才能得到等效参数 L 和 C。通过 IE3D 仿真提取了蛇形线在 0 至 5 吉赫兹范围内的 Y矩阵。根据设计参数对蛇形线的长度和宽度进行优化。在 1.8 吉赫兹的截止频率下，$L = 7.20$ nH，$C = 0.40$ pF。其等效电感为 $L_{eff} = 8.84$ nH，与设计值相符。

该方法也可用于构造平行板电容器。由微带结构构成的电容器及其对应的等效集总电路模型分别如图3（a）和（b）所示。等效模型的Y矩阵可表示为

$$[Y] = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} = \frac{1}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \tag{4}$$

L 和 C 可通过提取 Y矩阵的虚部获得

$$L = \frac{\mathrm{Im}\left(\frac{1}{Y}\right) + f\frac{\partial \mathrm{Im}\left(\frac{1}{Y}\right)}{\partial f}}{4\pi f} \tag{5}$$

$$C = \frac{-1}{\pi f\left[\mathrm{Im}\left(\frac{1}{Y}\right) - f\frac{\partial \mathrm{Im}\left(\frac{1}{Y}\right)}{\partial f}\right]} \tag{6}$$

同样，通过在 1.8 吉赫兹截止频率处进行仿真参数提取，我们得到 $C = 1.48$ pF 和 $L = 2.57$ nH。

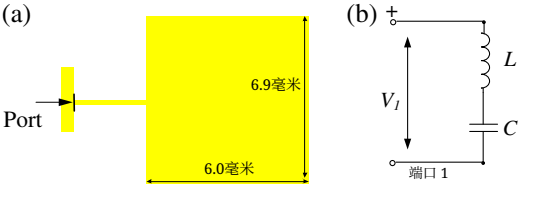

图 3. 微带结构构成的电容器。(a) 电路原理图。(b)等效集总电路模型。

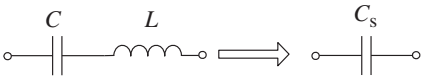

图 4. 串联 LC 谐振电路的等效电路。

串联LC 谐振电路可以等效为一个串联电容器，如图4所示。

串联 LC 谐振电路的阻抗为

$$Z_{LC} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \tag{7}$$

单个串联电容器的阻抗为

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C_S} \tag{8}$$

令 $Z_{LC} = Z_C$，将 C = 1.48 pF 和 L = 2.57 nH 代入公式 (9)，可求得 C_S 的值。由此得到 $C_S = 2.88$ pF，与设计值 2.86 pF 非常接近。

$$C_S = \frac{C}{1-\omega^2 LC} = \frac{C}{1-4\pi^2 f^2 LC} \tag{9}$$

如图所示，采用构建的曲折线和平行板电容器替代原有的集总元件 5。

3. 实验

按照设计流程，本研究设计的 滤波器采用 F4B-2 基板制作，厚度为 1 mm，介电常数 ε_r 为 2.65，介质损耗为 0.004。四个 滤波器的尺寸分别为 38.0 mm × 18.6 mm、46.2 mm ×18.3 mm、50.7 mm × 18.3 mm 和 58.4 mm × 18.5 mm。使用 Agilent N5230A 网络分析仪测量 $|S_{11}|$ 和 $|S_{21}|$，频率范围为 0 至 10 吉赫兹。仿真和实测结果如图 6所示。

如图5(a)所示，五极巴特沃斯滤波器滤波器在工作频率下的最大插入损耗仅为 0.5 dB，阻带范围为 1.8 至 4.5 吉赫兹。图 5(b) 至 5(d) 中三种切比雪夫滤波器的通带波纹分别低于 0.21、0.29 和 0.47 dB。所提出低通S参数的仿真结果与实测结果吻合良好。滤波器。

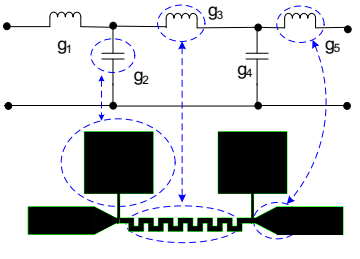

图5. 电抗元件取代集总元件。

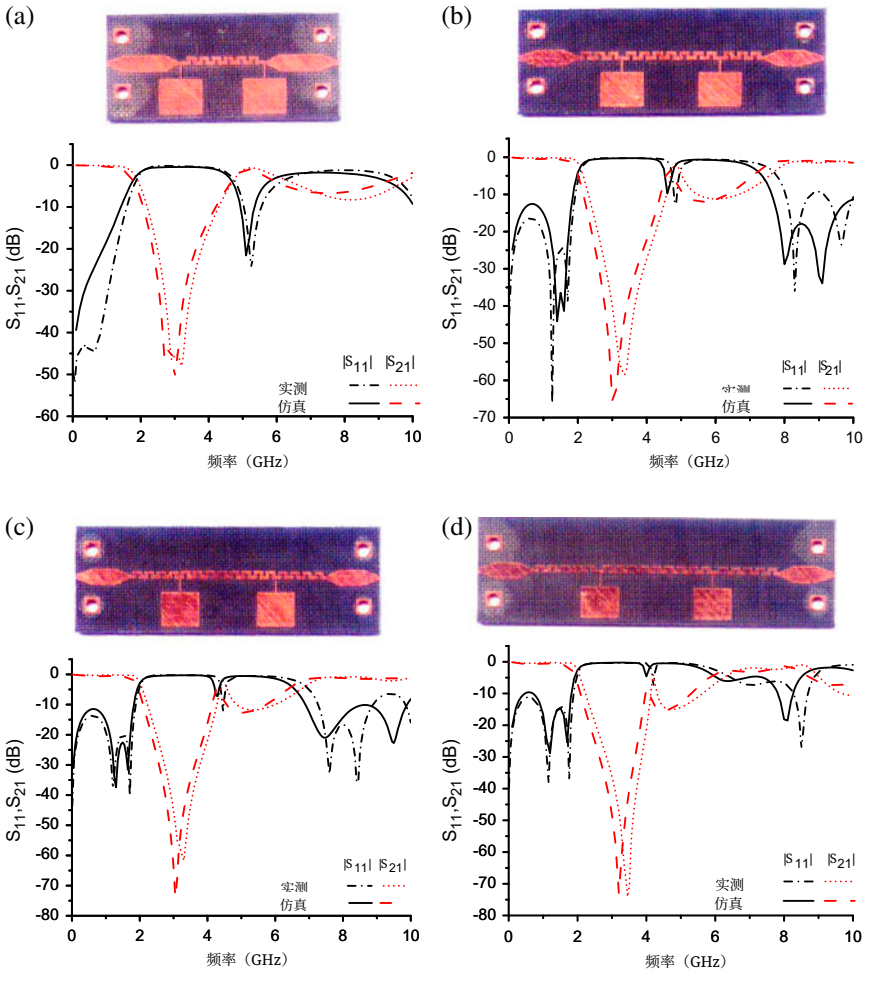

图 6。具有仿真和实测结果的低通滤波器。（a）五阶巴特沃斯滤波器。（b）五阶 0.25 dB 波纹切比雪夫滤波器。（c）五阶 0.5 dB 波纹切比雪夫滤波器。（d）五阶 1 dB 波纹切比雪夫滤波器。

4. 结论

本文提出了一种基于人工传输线构建电抗元件的新型小型化低通滤波器设计方法。电抗元件直接通过电磁仿真和参数提取构建。随后，以蛇形线和平行板电容器替代滤波器中的集总元件。所提出的低通滤波器结构紧凑，尺寸约为传统滤波器的 20%。为验证该方法，设计了四种具有不同特性的滤波器，实测结果与仿真结果吻合良好。

资助

本研究部分得到973计划2013CB328902、国家自然科学基金61271074和NCET-12-0383的资助。

参考文献

[1] Hong JS、Lancaster MJ。《射频/微波应用微带滤波器》。纽约（NY）：Wiley；2001。[2] Hsieh LH、Chang K。采用微带阶梯阻抗发夹谐振器的紧凑型椭圆函数低通滤波器。IEEE《微波理论与技术汇刊》。2003；51：193–199。[3] Park JW、Kim GN、Kim JP。利用人工传输线实现低通滤波器小型化。载于：IEEE MTT-S国际微波研讨会文摘；2005；美国夏威夷州檀香山。第2227–2230页。[4] Wang CW、Li KH、Wu CJ、Ma TG。采用平面人工传输线、具有谐波抑制特性的微型Wilkinson功率分配器。载于：亚太微波会议论文集；2007；泰国曼谷。第1–4页。[5] Wang CW、Ma TG、Yang CF。采用人工传输线实现具有谐波抑制功能、适用于射频识别应用的小型化支线耦合器。载于：IEEE MTT-S国际微波研讨会文摘；6月3日至8日；美国夏威夷州檀香山；2007。第29–32页。[6] Tan F、Huang W、Chen Y、Li Y、Huang K、Liu C。采用人工传输线的紧凑型微波元件的设计与实现。《电磁波与应用》。2013；27：385–395。[7] Zeland Software Inc., IE3D手册；深圳；2001。[8] Toyoda I、Hirota T。多层MMIC支线耦合器和宽边耦合器。载于：微波与毫米波单片电路研讨会文摘；6月1日至3日；美国新墨西哥州阿尔伯克基；1992。第79–82页。[9] Liu C、Yang T、Huang K、Menzel W。采用平面人工传输线的紧凑型电容补偿定向耦合器。《电子快报》。2011；47：1321–1323。[10] Huang W、Liu C。采用微带和集总元件人工传输线的紧凑型半波巴伦。载于：微波与毫米波技术会议；2012；中国深圳。第1–4页。