

使用 T 型结构的紧凑型电感耦合滤波器设计

李 霖, 武青华, 赵开宇
(浙江理工大学启新学院, 杭州 310018)

摘 要: 提出了一种使用 T 型结构的紧凑型电感耦合滤波器, 理论分析表明, 使用这种由传输线中央加载容性电纳的 T 型结构来替代传统传输线, 在不影响滤波器响应的同时可以有效地缩减滤波器的尺寸, 获得电路结构的小型化。基于这一原理, 笔者设计了一个三阶切比雪夫型电感耦合带通滤波器, 仿真结果表明: T 型结构不仅可以完美地满足滤波器设计要求, 同时还可以使结构更加紧凑。

关键词: 电感耦合; 带通滤波器; T 型结构; 紧凑
中图分类号: TN713.5 **文献标识码:** A

0 引 言

微波滤波器是微波系统中广泛使用的关键器件之一, 在微波系统中承担着选择有用信号, 滤除寄生信号的功能。通常, 滤波器可由传统传输线结构实现。但近年来, 随着无线通信进一步向智能化、多模式化和多功能化发展, 由传统传输线构成的微波滤波器不仅自身尺寸过大, 而且不利于封装集成, 已经很难满足新型无线通信系统对小型化的要求^[1-2]。因此, 实现微波滤波器的紧凑型设计便成为了进一步发展无线通信技术必须加以解决的重要问题之一。

笔者对一种传输线中央加载容性电纳的 T 型结构进行了研究。理论分析表明, 该结构能够等效于传统传输线结构, 且相比于传统的传输线结构, 它还能有效地缩减电路尺寸, 使滤波器结构变得紧凑。因此, 使用 T 型结构替代微波滤波器中的传统传输线, 既可以保持原有器件的优良性能, 又可获得微波滤波器结构的小型化, 满足现代无线通信的发展需求。

1 设计原理

1.1 电感耦合滤波器的设计原理

并联电感耦合滤波器是串联电容耦合滤波器的

对偶结构, 相比更常使用的串联电容耦合滤波器, 它能支持更宽的带宽, 且可免去难以建模的间隙, 设计更为简便。

并联电感耦合滤波器的设计电路图如图 1 所示。图 1 中 Z_0 为传输线的特征阻抗, θ_i 为第 i 段传输线的电长度值。

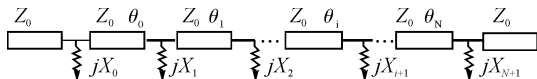


图 1 并联电感耦合滤波器传输线模型

在这种形式的滤波器中, 并联电感和其两侧负电长度的传输线构成阻抗倒相器^[3], 阻抗倒相器结构如图 2, 此外, 本结构中使用 N 个电长度为 π 的串联谐振器, 与两侧的阻抗倒相器中负电长度之和即为图 1 中的 θ_i 。

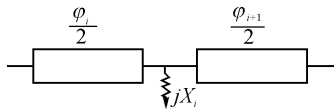


图 2 传输线与电感构成阻抗倒相器

所以电感耦合滤波器中第 i 段传输线的电长度为

$$\theta_i = \pi + \frac{\varphi_i}{2} + \frac{\varphi_{i+1}}{2} \quad (1)$$

在设计过程中选定滤波器阶数和待实现响应,确定滤波器中心频率与相对带宽,可由下列公式求出在中心频率处的 $K_{0,1}, K_{1,2}, \dots, K_{N,N+1}$ 的参数值^[4]。

$$\frac{K_{0,1}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_0 g_1 \omega_1}} \tag{2}$$

$$\frac{K_{i,i+1}}{Z_0} = \frac{\pi \Delta}{2\omega_1} \frac{1}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \tag{3}$$

$$\frac{K_{N,N+1}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_N g_{N+1} \omega_1}} \tag{4}$$

其中, Z_0 为传输线特征阻抗,通常选取 50Ω , Δ 表示相对带宽, ω_1 为低通滤波器原型的截止频率, $g_0, g_1, g_2, \dots, g_{N+1}$ 为归一化低通原型的元件值。

阻抗倒相器的中电感的电抗计算公式为:

$$X_i = \frac{K_{i,i+1}}{1 - (K_{i,i+1}/Z_0)^2} \tag{5}$$

$$\varphi_i = -2\arctan\left(\frac{K_{i,i+1}}{Z_0}\right) \tag{6}$$

最后得传输线电长度的计算公式为:

$$\theta_i = \pi - \arctan\left(\frac{K_{i,i+1}}{Z_0}\right) - \arctan\left(\frac{K_{i+1,i+2}}{Z_0}\right) \tag{7}$$

在设计中使用终端短路的传输线实现并联电感,计算公式如下:

$$jX_i = jZ_0 \tan \theta_{L_i} \tag{8}$$

最终,所设计的三阶电感耦合带通滤波器版图如图 3。

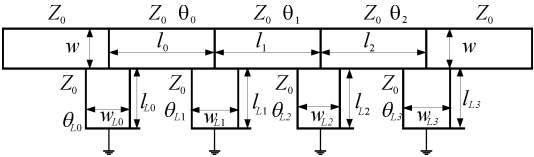


图 3 三阶电感耦合带通滤波器版图

众所周知,传输线长度与电长度成正比,由理论计算可知, θ_i 值大约为 180° ,显然该结构中传输线尺寸偏大,不符合小型化的发展需求。

1.2 T 型结构分析

如图 4 所示, T 型结构由中央加载容性电纳的特征阻抗为 Z_1 , 中心频率处电长度为 $2\theta_1$ 的传输线构成,忽略中间接头的长度, T 型结构的电长度等于 $2\theta_1$ 。

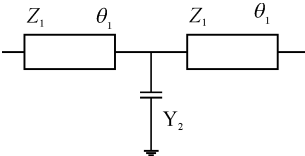


图 4 T 型结构模型

T 型结构的 ABCD 矩阵为^[5]:

$$M_T = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_1 + jZ_1 Y_2 \sin \theta_1 \cos \theta_1, \\ -Z_1^2 Y_2 \sin^2 \theta_1 + j2Z_1 \sin \theta_1 \cos \theta_1; \\ Y_2 \cos^2 \theta_1 + j2Y_1 \sin \theta_1 \cos \theta_1, \\ \cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_1 + jZ_1 Y_2 \sin \theta_1 \cos \theta_1. \end{bmatrix}$$

该结构可等效为特征阻抗为 Z_0 , 电长度为 θ_0 的传输线,由 ABCD 矩阵推得:

$$\cos \theta_0 = \cos 2\theta_1 - \frac{1}{2} Z_1 Y_2 \sin 2\theta_1 \tag{9}$$

$$Z_0 = \frac{\sqrt{(4 - Z_1^2 Y_2^2) \sin^2 \theta_1 + 2Z_1 Y_2 \tan \theta_1 \cos 2\theta_1}}{2 \sin \theta_1 + Z_1 Y_2 \cos \theta_1} \cdot Z_1 \tag{10}$$

若定义:

$$k = 1 - 2\theta_1/\theta_0 = 1 - \frac{2\theta_1}{\arccos(\cos 2\theta_1 - \frac{1}{2} Z_1 Y_2 \sin 2\theta_1)} W \tag{11}$$

当有效介电常数确定后, T 型结构的长度与等效传输线的长度之比等于它们的电长度之比,因此 k 值可以反映 T 型结构等效为传统传输线后长度的缩减幅度。由式(11) 分析可知,特征阻抗 Z_1 与容性电纳 Y_2 越大, k 值越大,等效的 T 型结构长度缩减就越明显。这就意味着可用有较小电长度的 T 型结构实现较大电长度的传输线。因此,使用 T 型结构替代传统传输线,可以有效地缩减电路长度。若选取合适的特征阻抗值与加载的容性电纳值, T 型结构的长度缩减程度可以达到其等效的传输线长度的一半,甚至更多。

但是, T 型结构在实现滤波器小型化的同时也会导致滤波器带宽的减小和损耗的增加,因此需要根据设计要求平衡各方面的性能,合理的选取 T 型结构中的各个参数值。

1.3 使用 T 型结构的电感耦合滤波器

基于以上分析,本文在设计中采用两段完全相同的 T 型结构来替代图 3 中的一段传输线。在 T 型结构的各个参数计算中,高特征阻抗值 Z_1 都选定为 100Ω ,然后求出每段 T 型结构中的电长度 θ_1 。其次,采用阶梯阻抗结构(SIR 结构)来实现并联电纳, SIR 结构如图 5 所示,其中 Z_3, Z_4 为传输线特征阻抗, θ_3, θ_4 为传输线的电长度值。相比开路传输线与贴片结构而言, SIR 结构具有结构紧凑的特点,可以进一步地缩减电路尺寸。

计算公式为^[6-7]:

$$Y_2 = j \frac{Z_3 \tan \theta_3 \tan \theta_4 - Z_4}{Z_3 \tan \theta_3 + Z_4 \tan \theta_4} \cdot \frac{1}{Z_4} \tag{12}$$

[3] David M Pozar. 微波工程[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 355.

[4] 《微波滤波器》翻译组. 微波滤波器阻抗匹配网络与耦合结构[M]. 上海: 上海科技情报通讯编译室, 1972: 276-286.

[5] Tu Wenhua, Chang Kai. Compact second harmonic-suppressed bandstop and bandpass filters using open substructures, 2006, 54(6): 2497-2499.

[6] Makimoto, M. Yamashita, S. 无线通信中的微波谐振器与滤波器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 22-26.

[7] 陈世勇, 杨士中. 微带 SIR 电容间隙耦合带通滤波器的设计[J]. 电路与系统学报, 2005, 10(3): 25-26.

[8] 冯 丰, 肖高标. 应用 DGS 结构的新型耦合 SIR 滤波器设计[J]. 信息技术, 2007(3): 59-60

General Design of Compact Inductively Coupled Filter
with T-Shaped Structure

LI Lin, WU Qing-hua, ZHAO Kai-yu

(School of Qixin, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This article puts forward a method of using T-shaped structure inductively coupled filter. Theoretical analysis shows that the response won't alter when using this central loaded capacity susceptance transmission line of the T-shaped structure to replace the traditional transmission lines. What's more, it can reduce the filter's size effectively and obtain the miniaturization of the circuit. Based on this theory, this article shows a three poles chebyshev type inductively coupled band-pass filter, and the simulation results indicate that the T-shaped structure can reduce the filter's length obviously and make the circuit more compact.

Key words: Inductance coupling; Band-pass filter; T-shaped structure; Compact
(责任编辑: 陈和榜)