

计及特性阻抗不连续性的多频带 多节变换器优化设计

张晨露¹, 陈 明², 张 毅¹, 梁丽君¹

(1. 西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西西安 710061; 2. 西安邮电大学电子信息工程系, 陕西西安 710121)

摘 要: 本文设计了计及特性阻抗不连续性的两频两节及三频三节变换器. 基于理想传输线模型和微带传输线理论, 建立了计及微带线“台阶”效应的设计方程, 采用遗传算法实现优化设计, 取得了在纯电电阻源阻抗和负载阻抗以及随频率变化的源阻抗和负载阻抗两种情况下的两频两节及三频三节阻抗变换器设计参数. 用 ADS(Advanced Design System)商用软件对基于上述设计参数的微带电路进行电磁仿真的数值结果显示了该设计的有效性.

关键词: 微带传输线; 台阶效应; 多频带; 阻抗变换器; 遗传算法

中图分类号: TN624.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)02-0407-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.02.031

Optimal Design of Multi-Band Multi-Section Transformer Considering the Characteristic Impedance Discontinuities

ZHANG Chen-lu¹, CHEN Ming², ZHANG Yi¹, LIANG Li-jun¹

(1. Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710061, China;

2. Institute of Electronic and Information Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China)

Abstract: A dual-band two-section and tri-band three-section impedance transformers are designed, in which the characteristic impedance discontinuities of the corresponding transmission line is involved. Based on the transmission line model and microstrip line theory, design equations of the proposed transformers are derived, and the effect of the microstrip “step” is included. By the method of genetic algorithm, the design parameters of the proposed transformers are obtained for the purely resistive source and load impedances, as well as the frequency-dependent source and load impedances, respectively. Finally, electromagnetic simulations of the microstrip circuit based on the above design parameters are implemented with the commercial software ADS, and the numerical examples prove the validity of the proposed design.

Key words: microstrip transmission line; step effect; multi-band; impedance transformer; genetic algorithm

1 引言

具有较小尺寸结构和较低复杂度的多频带的传输线阻抗变换器, 是实现多频带现代无线通信系统中射频/微波器件设计的一个关键环节^[1]. 十年前, Chow and Wan^[2]第一次提出了双频变换器, 该变换器由两段传输线构成, 每段长度为三分之一波长, 要求第二个频率必须为基频的二次谐波. 在此基础上, Cesar Monzon^[3]作了进一步的研究, 他把上述的两段传输线阻抗变换器推广到任意的两个频率上, 而且得到了精确的设计公式. 之后, Yongle Wu 等^[4]提出了一种源阻抗和负载阻抗为两个任意复阻抗的双频变换器. 紧接着, 人们又开始研究适合纯电电阻源阻抗和负载阻抗的三频^[5]和多频^[6]传输线变换器. 然而, 在上述研究中, 均未考虑特性阻抗的不

连续性影响. 由于在多频多节阻抗变换器设计中, 特性阻抗的不连续(用微带线实现则表现为“台阶”)是不可避免的, 这种不连续性对于阻抗变换器的性能会带来不利影响, 因此计及这种不连续性的多频多节阻抗变换器设计研究对于改进和提高设计效果具有重要意义.

遗传算法^[7]较其他优化算法有很多的优点, 其中最重要的是: 群体搜索特性, 即同时对搜索空间中的多个解进行评估, 这一特点使遗传算法具有较好的全局搜索性能, 也使得遗传算法本身易于并行化; 遗传算法在搜索过程中不容易陷入局部最优, 即使在所定义的适应度函数是不连续的、非规则的或有噪声的情况下, 也能以很大的概率找到全局最优解. 故本文采用遗传算法实现优化设计.

2 理论与设计方法

本文所研究的两频两节以及三频三节的传输线阻抗变换器分别如下图 1 和图 2 所示:

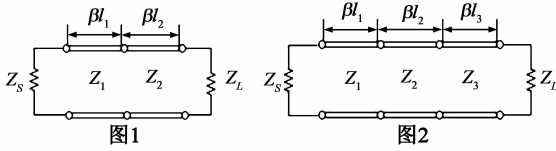


图1

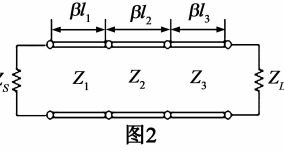


图2

其中, Z_S 为源阻抗, Z_L 为负载阻抗, Z_1, Z_2, Z_3 分别为各段传输线的特性阻抗, $\beta l_1, \beta l_2, \beta l_3$ 分别为各段传输线的电长度。

本文中随频率变化的源、负载阻抗采用文献[8]图 2 给出的结果。

微带线宽度突变影响(台阶效应)等效电路如图 3 所示^[9]。两个微带线之间的“台阶”等效为串联电感 L_S 和并联电容 C_S 的混合电路,其中 L_S 和 C_S 有具体的计算公式(即式(1)到式(3)),微带线阻抗 Z 也有具体的公式^[10](即式(4))。

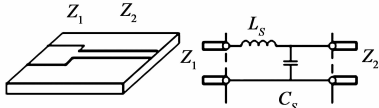


图3 微带线的宽度突变及其等效电路

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/w}} \quad (1)$$

$$L_s = h \left[1 - \frac{Z_1}{Z_2} \sqrt{\frac{\epsilon_{re1}}{\epsilon_{re2}}} \right]^2 (\mu\text{H}) \quad (2)$$

$$C_s = 1370h \frac{\sqrt{\epsilon_{re1}}}{Z_1} \left(1 - \frac{w_2}{w_1} \right) \left[\frac{\epsilon_{re1} + 0.3}{\epsilon_{re1} - 0.258} \right] \left[\frac{w_1/h + 0.264}{w_1/h + 0.8} \right] (\text{pF}) \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left(\frac{8d}{w} + \frac{w}{4d} \right), & w/d \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} [w/d + 1.393 + 0.6671 \ln(w/d + 1.444)]}, & w/d \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中: ϵ_r 为基板相对介电常数, ϵ_{re} 为微带线的有效介电常数, d 为微带线的厚度, w 为微带线的宽度, h 为基板厚度, Z_1, Z_2 分别为两段微带线的特性阻抗。

当考虑台阶效应后,两节、三节微带传输线变换器的等效电路分别如图 4、图 5 所示。

图中 L_1, C_1, L_2, C_2 的值可由式(1)到(3)计算。

考虑台阶效应的两频两节微带传输线阻抗变换器设计方程,可由图 6 导出:

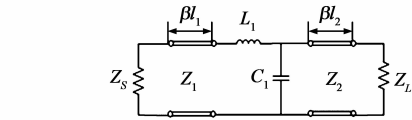


图4 考虑台阶效应后的两节传输线变换器等效电路

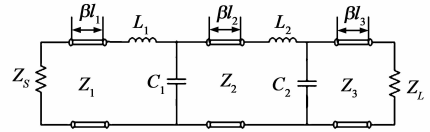


图5 考虑台阶效应后的三节传输线变换器等效电路

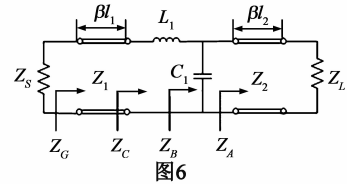


图6

$$Z_A = Z_2 \frac{Z_L + jZ_2 \tan(\beta l_2)}{Z_2 + jZ_L \tan(\beta l_2)} \quad (5)$$

$$Z_B = \frac{Z_A (1/(j2\pi f C_1))}{Z_A + (1/(j2\pi f C_1))} \quad (6)$$

$$Z_C = j2\pi f L_1 + Z_B \quad (7)$$

$$Z_{in} = Z_1 \frac{Z_C + jZ_1 \tan(\beta l_1)}{Z_1 + jZ_C \tan(\beta l_1)} \quad (8)$$

$$\Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_S^*}{Z_{in} + Z_S^*} \quad (9)$$

$$\Gamma_{in} = |\Gamma_{in}(f_1)|^2 + |\Gamma_{in}(f_2)|^2 \quad (10)$$

图 6 中 L_1, C_1 可由式(1)到(3)计算。

要在两个频率点处达到匹配,即要使反射系数 Γ_{in} 达到最小值。

考虑台阶效应的三频三节微带传输线阻抗变换器设计方程,可由图 7 导出:

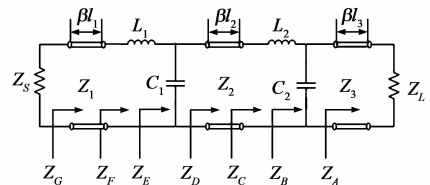


图7

$$Z_A = Z_3 \frac{Z_L + jZ_3 \tan(\beta l_3)}{Z_3 + jZ_L \tan(\beta l_3)} \quad (11)$$

$$Z_B = \frac{Z_A (1/(j2\pi f C_2))}{Z_A + (1/(j2\pi f C_2))} \quad (12)$$

$$Z_C = j2\pi f L_2 + Z_B \quad (13)$$

$$Z_D = Z_2 \frac{Z_C + jZ_2 \tan(\beta l_2)}{Z_2 + jZ_C \tan(\beta l_2)} \quad (14)$$

$$Z_E = \frac{Z_D(1/(j2\pi fC_1))}{Z_D + (1/(j2\pi fC_1))} \quad (15)$$

$$Z_F = j2\pi fL_1 + Z_E \quad (16)$$

$$Z_{in} = Z_1 \frac{Z_F + jZ_1 \tan(\beta l_1)}{Z_1 + jZ_F \tan(\beta l_1)} \quad (17)$$

$$\Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_S^*}{Z_{in} + Z_S^*} \quad (18)$$

$$\Gamma_{in} = |\Gamma_{in}(f_1)|^2 + |\Gamma_{in}(f_2)|^2 + |\Gamma_{in}(f_3)|^2 \quad (19)$$

为了建立遗传算法优化设计,首先需建立适应度值函数,在此分别选取方程(10)和(19)为两频两节及三频三节变换器的适应度函数.两频两节变换器遗传算法设计流程如下:

(1)确定 f_1, f_2, Z_S, Z_L .

(2)产生含 Z_1, Z_2, l_1, l_2 的初始种群.

(3)根据适应度函数求出 Z_1, Z_2, l_1, l_2 的适应度值,优胜劣汰.

(4)根据适应度值的大小对种群进行遗传操作(选择,交叉,变异).

(5)重复(3)直至满足适应度函数值或达到最大遗传代数.

(6)得到最优解,终止运算.

本文中用到的遗传算法选择初始种群规模为 100,每个染色体的码长度为 20,交叉概率为 0.7,代沟为 0.9,最大遗传代数为 1000.

同理,可得三频三节的遗传算法运算流程.

3 数值结果及分析

采用设计公式(10)及(19),借助遗传算法,分别求出计及特性阻抗不连续影响的纯电阻源、负载阻抗条件下的两频两节和三频三节微带线阻抗变换器的设计参数示于表 1、2、3 和 4.为了验证该设计的有效性,还分别计算了不计及台阶影响的设计结果,这可由在上述方程(10)及(19)中令 $L_1 = L_2 = C_1 = C_2 = 0$ 获得,计算结果示于表 1、2、3 和 4.

本文中所用微带线基片参数为:相对介电常数 $\epsilon_r = 9.6$,厚度 $h = 0.25\text{mm}$.

对于两频两节的传输线阻抗变换器,取 f_1, f_2 分别为 0.9GHz 和 1.8GHz.

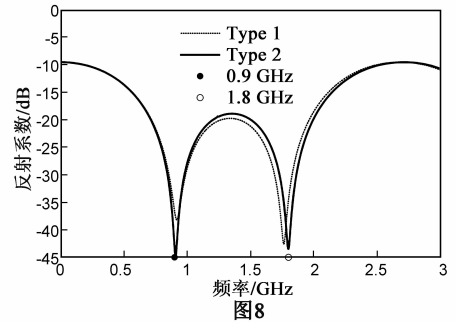
当源和负载阻抗为纯电阻(取 $Z_S = 50\Omega, Z_L = 100\Omega$)时,基于以上设计方程及遗传算法的设计参数值列于表 1.

表 1 中 Type 1 表示的是未计及台阶效应的设计参数,Type 2 表示的是计及台阶效应的设计参数.由表 1 可以看出,不考虑台阶效应和考虑台阶效应时的微带线阻抗和电长度值是不同的,这正是所预料的.基于表 1 中设计参数的电磁仿真可用 ADS 软件实现,所得到的

仿真结果如图 8 所示.

表 1 固定阻抗时的微带线阻抗和电长度值

Type	$Z_1(\Omega)$	$Z_2(\Omega)$	$\beta l_1(\text{deg})$	$\beta l_2(\text{deg})$
1	63.0609	79.2885	60.0000	60.0001
2	63.0609	79.2563	59.8242	59.5180



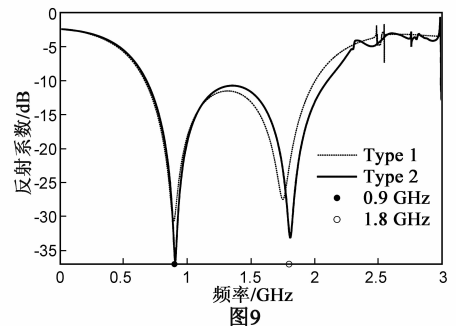
由图 8 可见:用遗传算法对传输线变换器进行优化设计,在设定的两个频率点处达到了匹配,而且反射系数小于 -35dB .然而,考虑了台阶效应后,反射系数得到了明显的改善,频率偏移变小,带宽也有所增加.

对于随频率变化的源阻抗和负载阻抗,基于以上设计方程及遗传算法得到的设计参数值列于表 2.

表 2 频变阻抗时的微带线阻抗和电长度值

Type	$Z_1(\Omega)$	$Z_2(\Omega)$	$\beta l_1(\text{deg})$	$\beta l_2(\text{deg})$
3	57.9303	111.3958	39.2898	75.0747
4	57.9302	111.3960	39.4547	73.8444

表 2 中 Type3、Type4 分别表示未计及、计及台阶效应的设计参数.同表 1 可见,其仿真结果如图 9 所示.



同图 8 可见,但反射系数小于 -25dB .

对于三频三节的传输线阻抗变换器,取 f_1, f_2, f_3 分别为 0.9GHz、1.8GHz 和 3.7GHz.

当源和负载阻抗为纯电阻(取 $Z_S = 50\Omega, Z_L = 100\Omega$)时,基于以上设计方程及遗传算法得到的设计参数值列于表 3.

表 3 固定阻抗时的微带线阻抗和电长度值

Type	$Z_1(\Omega)$	$Z_2(\Omega)$	$Z_3(\Omega)$	$\beta_1(\text{deg})$	$\beta_2(\text{deg})$	$\beta_3(\text{deg})$
5	62.7131	79.6487	79.7789	58.9605	43.9336	15.0301
6	63.0619	55.0542	78.9796	50.9197	5.7810	61.5828

表 3 中 Type5、Type6 分别表示未计及、计及台阶效应的设计参数. 同表 1 可见, 其仿真结果如图 10 所示.

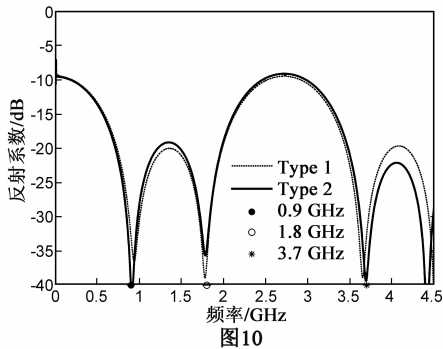


图 10

同图 8 可见, 但反射系数小于 -30dB .

对于随频率变化的源阻抗和负载阻抗, 基于以上设计方程及遗传算法得到的设计参数值列于表 4.

表 4 频变阻抗时的微带线阻抗和电长度值

Type	$Z_1(\Omega)$	$Z_2(\Omega)$	$Z_3(\Omega)$	$\beta_1(\text{deg})$	$\beta_2(\text{deg})$	$\beta_3(\text{deg})$
7	58.2837	106.8426	62.9258	40.9968	49.2649	11.5709
8	50.5843	67.5128	116.4100	14.0966	32.0357	73.1238

表 4 中 Type7、Type8 分别表示未计及、计及台阶效应的设计参数. 同表 1 可见, 其仿真结果如图 11 所示.

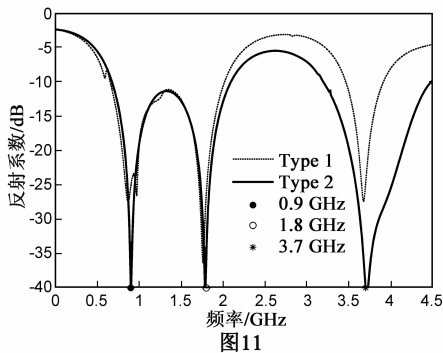


图 11

同图 8 可见, 但反射系数都小于 -25dB .

綜上表 1、2、3 和 4 并结合图 8、9、10 和 11 可见, 当计及“台阶”效应时, 无论是对于纯电阻源、负载阻抗还是对于随频率变化的源、负载阻抗, 经优化设计得到的两频两节阻抗变换器的电长度均发生改变, 而经优化设计得到的三频三节阻抗变换器的微带传输线特性阻抗和电长度均发生改变. 这一改变量必将产生一个附加的电抗(包括感抗和容抗). 应该指出的是, 正是由于这一附加的电抗, 与微带线间“台阶”效应引起的电抗

(包括感抗和容抗)在设置的匹配频率上数值相等且极性“即正负号”相反, 于是两者的作用相互抵消, 从而实现了反射系数频率响应特性的改善.

本文所示的方法在理论上对于任意频率下都是可实现的, 由于本文选择的频率是国际通用的三个频率标准, 即 GSM 900(0.9GHz)、GSM 1800/1900(1.8GHz)、以及 WiMAX IEEE 802.16(3.7GHz), 它们之间恰好是近似倍频的关系. 作者目前正在研究计及特性阻抗不连续性的六频六节变换器优化设计, 其结果不久将发表在后继论文中.

4 结论

本文采用理想传输线模型和微带传输线理论(包括台阶等效电路公式)和遗传算法成功地设计了不同类型的计及微带线宽度突变影响(即台阶效应)的两节两频及三节三频阻抗变换器, 该变换器不论是对于纯电阻的源、负载阻抗, 还是对于随频率变化的源、负载阻抗都能够任意两个或三个频率下实现阻抗匹配. 电磁仿真结果显示: 无论是对于纯电阻的源、负载阻抗, 还是对于随频率变化的源、负载阻抗, 考虑“台阶”效应后: 一般而言, 电长度值发生改变, 而且, 对于在三频三节的情况下, 不仅电长度值发生改变, 微带线的阻抗值(及微带线宽度)也会发生变化. 定性分析指出了该改变量引起的附加电抗在设置的匹配频率上抵消了微带线宽度突变引起的等效电抗作用, 从而使新设计变换器的反射系数的频率响应特性得到改善即反射系数下降. 带宽有所增加, 频率偏移(理想计算得到的匹配频率点离设定的匹配频率点之间的距离)减小. 本文的研究结果, 对于多频带现代无线通信系统的 RF/微波电路及元器件设计是具有重要意义.

参考文献

- [1] Webb William. The Complete Wireless Communications Professional: A Guide for Engineers and Managers[M]. Boston: Artech House, 2003.
- [2] Chow Y L, Wan K L. A transformer of one-third wavelength in two sections—for a frequency and its first harmonic[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2002, 12(1): 22–23.
- [3] Monzon C. A small dual-frequency transformer in two sections[J]. IEEE Transactions and Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(4): 1157–1161.
- [4] Wu Y, Liu Y A, Li S L, Yu C P, Liu X. A generalized dual-frequency transformer for two arbitrary complex frequency-dependent impedances[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(12): 611–613.
- [5] Chongcheawchamnan M, Patisang S, Srisathit S, Phromloungsri

R, Bunnjaveht S. Analysis and design of a three-section transmission-line transformer[J]. IEEE Transactions and Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(7): 2458 - 2462.

- [6] Chen Ming. Novel design method of a multi-section transmission-line transformer using genetic algorithm techniques[A]. 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2008[C]. Wuhan, China, 2008. 17 - 20.
- [7] 雷英杰, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005. 3 - 4.
- [8] Chen Ming. A multi-band transformer for two arbitrary complex frequency-dependent impedances[J/OL]. <http://www.springerlink.com/content/c4155x2j58878m13/>, 2011-12-25.
- [9] 李绪益. 微波技术与微波电路[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2007. 160 - 161.
- [10] David M. Pozar. 微波工程[M]. 3th ed. 张肇仪, 等. 译. London: Wiley, 2005. 124 - 125.

作者简介



张晨露 女, 1988 年 4 月出生于陕西西安, 毕业于西安邮电大学, 硕士生, 研究方向为射频微波电路设计与仿真.

E-mail: zhangchenlulu@126.com



陈明(通讯作者) 男, 1956 年 2 月出生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为微波与集成光学. 主持完成国家 863 计划项目、国家自然科学基金项目、省部级自然科学基金项目 5 项. 作为主研人员参加多项国家自然科学基金重大项目、国家 863 项目、国家振兴教育行动重大项目等研究工作. 在国内外有关学术期刊发表论文数十篇.

E-mail: chenming5628@sina.com