



基于耦合线的高隔离度三频分支线耦合器

摘要

本文提出了一种应用于无线功率传输系统中的新型三频分支线耦合器.通过在传统分支线耦合器的基础上加载 1/4 波长短路耦合线来实现 3 个频段的通带.每个通带之间均保持高的隔离度,且通过改变加载耦合线的奇偶模阻抗值,耦合器通带的中心频率可以在较宽频带范围内调节.对一个工作在 0.69/1.0/1.4 GHz 的平面三频耦合器模型进行了设计与加工,测试结果与理论期望值吻合较好.

关键词

分支线耦合器;高隔离度;短路耦合线;三频段工作

中图分类号 TN622

文献标志码 A

收稿日期 2016-11-21

资助项目 国家自然科学基金青年基金项目(61401206);江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20140791)

作者简介

赵宇,女,硕士生,主要研究无源器件与电路、LTCC 电路等.zhaoyu1993_njust@163.com

冯文杰(通信作者),男,副教授、硕士生导师,主要研究宽带电路与技术、基片集成波导技术、平面电路与系统等.fengwenjie1985@163.com

¹ 南京理工大学 电子工程与光电技术学院,南京,210094

0 引言

随着通信技术的快速发展,传统直连传输能量的方式存在着线路老化、电击穿等缺点.无线功率传输技术能较好地克服传统直连电路的缺点,在近 10 年得到了快速的发展.微波分支耦合器作为无线功率传输系统中的基本无源器件之一^[1-2],在实现功率合成/分配的基础上,能较好地实现输入/端口之间的隔离,多频段耦合器的研究成为无线功率传输系统中的热点问题.实现双频/三频分支线耦合器的常见方法是将传统结构中的单频传输线替换为双频/三频传输线,如采用开路短路支节^[3]、左右手传输线^[4]、阶梯阻抗加载支节^[5]、Pi 型/T 型网络^[6-7]等多频传输模块.另外,也可以采用在传统耦合器端口增加阻抗变换网络^[8-9]来满足多频段工作的需求.但此类结构对于不同工作频段的隔离特性及频率可调特性研究较少.

本文提出了一种新型三频分支线耦合器,通过在传统分支线耦合器结构的基础上加载 1/4 波长短路耦合线来实现三频应用.相比加载分支线支节,该结构采用等长的耦合线使得推导与计算更加简便,下文给出了具体的分析及各个通带频率的表达式.并且,短路耦合线产生的传输零点使得各个通带之间具有高的隔离度.上述耦合器的电路和结构特性已用 Ansoft Designer v3.0 和 Ansoft HFSS v.13.0 软件仿真,选取的参数是介电常数 $\epsilon_r = 2.65$,厚度 $h = 1.0$ mm,介质损耗 $\tan \delta = 0.003$ 的介质板.

1 三频耦合器的分析与设计

图 1a 和 1b 分别为三频耦合器的微带结构俯视图和等效电路,4 对短路平行耦合线 (Z_{oe}, Z_{oo}, θ) 分别接在传统单频分支线耦合器 (Z_1, Z_2, θ) 的 4 个端口.耦合器 S 参数满足以下特性:

$$S_{11} = S_{41} = 0, \quad |S_{21}| = |S_{31}|. \quad (1)$$

利用奇偶模分析法^[9],各本征导纳 $Y_{ee}, Y_{eo}, Y_{oe}, Y_{oo}$ (图 2a—2d) 可表示为

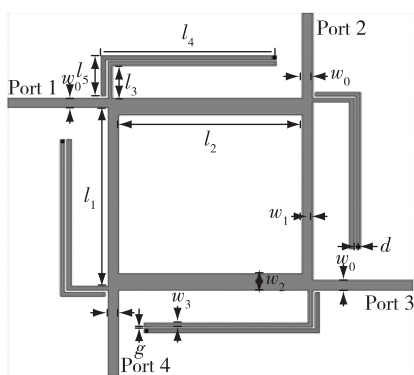
$$Y_{ee} = j \frac{\tan(\theta/2)}{Z_1} + j \frac{\tan(\theta/2)}{Z_2} + Y_C, \quad (2)$$

$$Y_{eo} = j \frac{\tan(\theta/2)}{Z_1} - j \frac{\cot(\theta/2)}{Z_2} + Y_C, \quad (3)$$

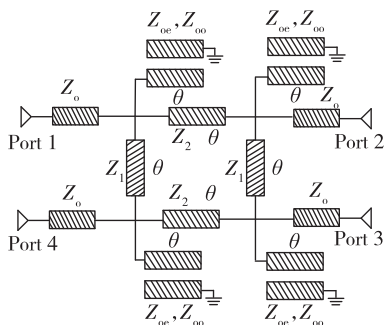
$$Y_{oe} = -j \frac{\cot(\theta/2)}{Z_1} + j \frac{\tan(\theta/2)}{Z_2} + Y_C, \quad (4)$$

$$Y_{oo} = -j \frac{\cot(\theta/2)}{Z_1} - j \frac{\cot(\theta/2)}{Z_2} + Y_C, \quad (5)$$

$$Y_C = j \frac{(Z_{oe} + Z_{oo}) \sin 2\theta}{(Z_{oe} + Z_{oo})^2 \cos^2 \theta - (Z_{oe} - Z_{oo})^2}, \quad (6)$$



a. 三频耦合器俯视



b. 三频耦合器等效电路

图1 本文提出的三频耦合器的结构和电路模型

Fig. 1 Top view (a) and equivalent circuit (b) of the proposed tri-band coupler

其中, Y_C 为短路平行耦合线的输入导纳. 根据耦合器的特性可以推出奇偶模导纳满足 $Y_{ee} Y_{eo} = Y_{oe} Y_{oo}$, 将式(2)–(6)代入可计算出3个通带的中心频率与微带线的特性阻抗以及平行耦合线的奇偶模阻抗之间的关系:

$$\theta(f_1) = \arccos \frac{\sqrt{n(Z_{oe} - Z_{oo})^2 + (Z_{oe} + Z_{oo})}}{\sqrt{n(Z_{oe} + Z_{oo})^2 + (Z_{oe} + Z_{oo})}},$$

$$\theta(f_2) = 90^\circ, \quad \theta(f_3) = \pi - \theta(f_1),$$

$$n = \frac{Z_1 + Z_2}{2Z_1 Z_2}. \quad (7)$$

3个通带之间的传输零点表达式如下所示:

$$\theta_{tz} = \arccos \frac{Z_{oe} - Z_{oo}}{Z_{oe} + Z_{oo}},$$

$$\theta_{tz2} = \pi - \theta_{tz}. \quad (8)$$

图3a和3b是图1b的频率响应的仿真结果

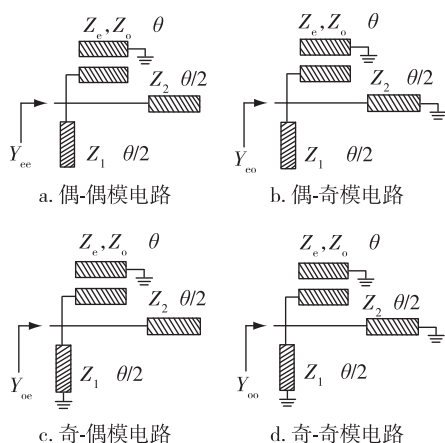


图2 三频耦合器奇偶模等效电路

Fig. 2 Even/odd-mode equivalent circuit of the tri-band coupler, (a) even-even mode circuit,

(b) even-odd mode circuit, (c) odd-even mode circuit, and (d) odd-odd mode circuit

(Ansoft Designer v3.0). 选取3组奇偶模值 $Z_{oe}/Z_{oo} = 80/40$ 、 $100/60$ 和 $150/90 \Omega$, 该耦合器直通口和耦合口的输出幅度相等均为 -3 dB , 且端口匹配与隔离良好, 回波损耗、隔离幅度均高于 20 dB . 改变耦合线的奇偶模阻抗值, 各个通带的中心频率可以在较宽频带范围内调节. 本文提出的耦合器设计相比于文献[7-9]中的设计, 实现了3个频段的功分效果, 无需加载多个不等长支节, 结构更加简单, 分析计算更加简便, 并且传输零点的引入使得各通带间具有高的隔离度.

2 测试结果与分析

为了进一步验证, 对三频耦合器电路进行了实际加工与测试. 图1a中三频耦合器结构模型各部分的参数为: $l_1 = 49.21 \text{ mm}$, $l_2 = 45.2 \text{ mm}$, $l_3 = 9.0 \text{ mm}$, $l_4 = 41.6 \text{ mm}$, $l_5 = 11.11 \text{ mm}$, $w_0 = 2.68 \text{ mm}$, $w_1 = 2.68 \text{ mm}$, $w_2 = 4.62 \text{ mm}$, $w_3 = 1.11 \text{ mm}$, $g = 0.53 \text{ mm}$, $d = 0.8 \text{ mm}$, 电路实物尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 2.65$, $h = 1.0 \text{ mm}$, $\tan \delta = 0.003$. 图1b所示的三频耦合器电路的最终参数为 $Z_0 = 50 \Omega$, $Z_1 = 50 \Omega$, $Z_2 = 35.36 \Omega$, $Z_{oe} = 100 \Omega$, $Z_{oo} = 60 \Omega$, $\theta = 90^\circ$. 图4是该三频耦合器的实物照片以及测试和仿真结果. 从图4中测试结果可以看出, 本文的三频耦合器分别工作在 $0.73/1.02/1.44 \text{ GHz}$, 在3个通带的工作频点, 直通口的插入损耗最大值分别为 -3.0 、 -3.13 和 -3.06 dB , 耦合口的插入损耗最大值分别为 -3.62 、 -3.9 和 -3.63 dB . 直通口和耦合口插入损耗之间的幅度差维

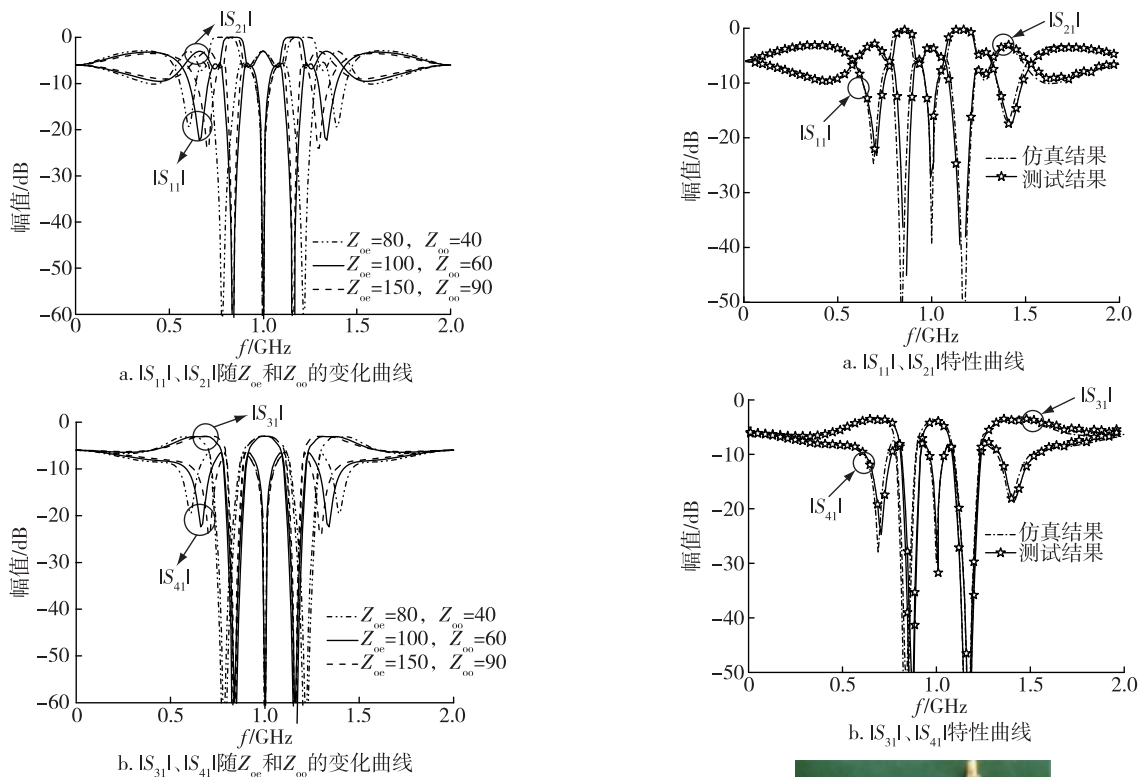


图3 三频耦合器的S参数仿真结果
($Z_1 = 50 \Omega, Z_2 = 35.36 \Omega, f_0 = 1 \text{ GHz}$)

Fig.3 Simulated S-parameters of the tri-band coupler
($Z_1 = 50 \Omega, Z_2 = 35.36 \Omega, f_0 = 1 \text{ GHz}$)

持在 $\pm 0.8 \text{ dB}$ 之内,相位差维持在 $90^\circ \pm 1.5^\circ$ 之内.在频率范围 $0.707 \sim 0.746$ 、 $1.01 \sim 1.04$ 、 $1.43 \sim 1.47 \text{ GHz}$ 内,回波损耗高于 16 dB .在频率范围 $0.697 \sim 0.746$ 、 $1.01 \sim 1.03$ 、 $1.41 \sim 1.46 \text{ GHz}$ 内,端口隔离高于 16 dB .测试结果中频率偏移和耦合口插入损耗略大主要是由于加工和测量误差所引起的.

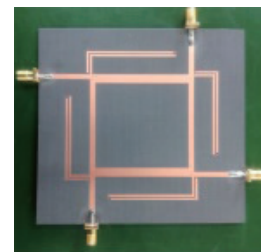
3 结论

本文提出了一种加载短路耦合线实现的新型高隔离度三频耦合器.通过改变耦合线的奇偶模阻抗,各个通带的中心频率可以在较宽范围内调节,且由于传输零点的引入,各通带之间均具有高的隔离度.该耦合器具有多频段工作、结构简单和隔离度高的优点,测试与仿真结果也吻合较好,可以适用于平面微波电路与系统.

参考文献

References

[1] Boaventura A J S, Collado A, Georgiadis A, et al. Spatial power combining of multi-sine signals for wireless power



c. 实物照片

图4 三频耦合器的实物照片、测试和仿真结果
Fig.4 Photograph, simulated and measured results of the proposed tri-band coupler

transmission applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2014, 62 (4) : 1022-1030

[2] Florian C, Mastri F, Paganelli R P, et al. Theoretical and numerical design of a wireless power transmission link with GaN-based transmitter and adaptive receiver [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2014, 62 (4) : 931-946

[3] Tang C W, Chen M G. Design of multipass band microstrip branch-line couplers with open stubs [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2009, 57 (1) : 196-204

[4] Chi P L, Liu C C. Novel dual-band quasi-0-dB coupled-line coupler using the composite right/left-handed transmission lines [J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2014, 4 (2) : 259-267

[5] Chin K S, Lin K M, Wei Y H, et al. Compact dual-band branch-line and rat-race couplers with stepped impedance-stub lines [J]. IEEE Transactions on

- Microwave Theory & Techniques, 2010, 58 (5): 1213-1221
- [6] Wu Y, Shen J Y, Liu Y, et al. Miniaturized arbitrary phase-difference couplers for arbitrary coupling coefficients[J].IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques,2013,61(6):2317-2324
- [7] Ren H,Shao J,Zhou M, et al.Design of tri-band branch-line couplers using novel tri-band transmission lines[C] //Wireless and Microwave Circuits and Systems,2014, DOI:10.1109/WMCaS.2014.7015884
- [8] Liou C Y, Wu M S, Yeh J C, et al. A novel triple-band microstrip branch-line coupler with arbitrary operating frequencies[J].IEEE Microwave & Wireless Components Letters,2009,19(11):683-685
- [9] Lin F,Chu Q X,Lin Z.A novel tri-band branch-line coupler with three controllable operating frequencies [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters,2010,20(12):666-668

Tri-band branch line coupler with high isolation using coupled lines

ZHAO Yu¹ FENG Wenjie¹ CHE Wenquan¹

¹ School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094

Abstract A novel tri-band branch line coupler is proposed for wireless power transmission system. A conventional coupler loaded with quarter-wavelength short coupled lines is adopted to realize the triple passbands. Each passband has a high degree of isolation. The passband center frequencies of the coupler can be adjusted over a wide band by changing the even/odd-mode characteristic impedances of the coupled lines. A planar tri-band coupler located at 0.69/1.0/1.4 GHz is designed and fabricated for verification. Good agreement can be observed between measured results and theoretical expectations.

Key words branch line coupler; high isolation; short coupled line; tri-band operation