

小型化高方向性的微带双定向耦合器设计^{*}

傅世强 张云瑞 房少军
(大连海事大学 信息科学技术学院,大连 116026)

摘 要: 为解决弱耦合时微带平行耦合线定向耦合器方向性低的问题,提出了适用于大功率场合的小型化高方向性微带双定向耦合器。基于传统四分之一波长平行耦合三线微带双定向耦合器结构,采用扇形微带电容加载可明显减小耦合器尺寸并增大隔离度,通过耦合边缘引入锯齿结构进一步提高了方向性。负载电阻采用扇形微带短截线接地设计,避免电气化过孔,使得加工更加简单。设计了一个中心频率为 915 MHz、耦合度为 20 dB 的微带双定向耦合器,利用 HFSS 仿真软件对耦合器结构进行优化设计,并做了实物加工和测试。实测结果表明,在中心频率处耦合度为 20.2 dB,方向性达到 32.1 dB;在 0.74~1.35 GHz 频带内,输入匹配良好,耦合度波动小于 0.5 dB,方向性高于 20 dB。

关键词: 平行耦合微带线,双定向耦合器,高方向性,扇形微带短截线

Design of Microstrip Dual Directional Coupler with Miniaturization and High Directivity

FU Shi-qiang , ZHANG Yun-rui, FANG Shao-jun
(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to solve the problem of low directivity of parallel coupling line microstrip directional coupler in the case of weak coupling, a miniaturized high-directivity microstrip dual directional coupler suitable for high-power occasions is proposed. Based on the traditional quarter-wavelength parallel-coupled three-line microstrip dual directional coupler structure, the size of the coupler can be significantly reduced while the isolation of the coupler can be increased by using microstrip radial stub capacitance, and the directivity can be further improved by introducing sawtooth structure into the coupling edge. The load resistance grounding adopts microstrip radial stub design to avoid electrification via holes, which makes the processing simpler. A microstrip dual directional coupler with a central frequency of 915 MHz and a coupling degree of 20 dB is designed. HFSS simulation software is used to optimize the design, and the prototype is fabricated and measured. The measured results show that the coupling degree at the center frequency is 20.2 dB and the directivity reaches 32.1 dB. In the frequency band of 0.74 GHz to 1.35 GHz, good input matching is obtained while the fluctuation of coupling degree is less than 0.5 dB and the directivity is higher than 20 dB.

Key words: parallel coupled microstrip line, dual directional coupler, high directivity, microstrip radial stub

引 言

微带平行耦合线定向耦合器是一种常用的射频微波器件,主要功能是实现信号的分离,可用于功率监测,也可用于发射机的在线测量,更成为驻波表和矢量网络分析仪中的关键部件之一^[1]。在大功率测量时常常需要弱耦合的定向耦合器,然而耦合度的增加往往导致方向性的恶化。为此,许多研究人

员提出了一些提高方向性的方法,如微带耦合边缘锯齿化结构^[2],引入电感、电容元件补偿技术^[3-6],耦合端加载短截线技术^[7-8]等。

双定向耦合器和传统定向耦合器相比,入射时的耦合端口和反射时的耦合端口彼此隔离,消除了耦合端口不匹配导致的测量误差,从而使得对入射波和反射波的提取更加精确^[9]。微带双定向耦合器可以由两个传统平行耦合线定向耦合器串联或并

^{*} 收稿日期:2019-08-30;修回日期:2019-11-10
基金项目:国家自然科学基金(61571075)

联构成。文献[10]设计了一种应用于反射计的串联结构双定向耦合器,通过加入介质基片增加奇模电容来提高双定向耦合器的定向性,但方向性仅有 18 dB,且尺寸较大;文献[11]提出了并联式的平行耦合三线微带双定向耦合器,通过在耦合端和隔离端引入反相抵消电路,方向性提升到 30 dB,但结构复杂;文献[12]研究了集总电容加载的微带三线双定向耦合器,并进行了简单的仿真分析,通过参数的优化调整可以实现在弱耦合情况下隔离度的明显改善,但性能指标受到加工精度的限制。

本文针对大功率应用场合,设计了一款中心频率为 915 MHz、耦合度为 20 dB 的小型化高方向性的平行耦合三线微带双定向耦合器。该耦合器结构在主路耦合线段以外的支路处引入并联扇形微带电容,通过调节电容的大小和位置增大隔离度,并且由于电容的引入导致耦合线长度的减小进而达到小型化的目的,同时通过将耦合段微带线边缘锯齿化,进一步提高方向性。负载电阻采用扇形微带短截线接地结构设计,大大减小了由于电气化过孔带来的加工复杂性。对所设计的耦合器进行了软件仿真优化和实物制作测试,验证了设计方案的可行性。

1 耦合器的设计与仿真

选用相对介电常数为 2.65、厚度为 1.5 mm 的 F4B 微波介质基板,设计一个中心频率为 915 MHz、耦合度为 20 dB 的平行耦合三线微带双定向耦合器。基于传统四分之一波长平行耦合线定向耦合器的设计方法,建立的平行耦合三线微带双定向耦合器电路结构如图 1(a)所示,尺寸为 $l_1 = 55.05$ mm, $w_1 = 3.97$ mm, $w_2 = 4.05$ mm, $s = 1.93$ mm, $R = 50 \Omega$ 。对于入射波的检测,假定端口 1 为输入端,则端口 3 为耦合端,端口 4 为隔离端;对于反射波的检测,则端口 3 为隔离端,端口 4 为耦合端。利用 HFSS 软件进行仿真分析,图 1(b)为 S 参数仿真结果。从仿真结果可知 915 MHz 处耦合度为 20 dB,隔离度为 30 dB,方向性仅仅为 10 dB。并且仿真发现,随着耦合度的增加,方向性进一步变差。由此可见,弱耦合时,必须设法增大隔离以提高方向性。

为此,通过在主路耦合线段以外的支路处的耦合端和隔离端引入并联电容,可提高方向性,电路结构如图 2 所示。电容值的大小会对耦合器的耦合度和隔离度产生影响,如图 3 所示,其它参数不变的情况下增大电容值 C ,耦合度和隔离度均会增大,且耦合曲线的中心频率会向低频偏移。此时,电容选取

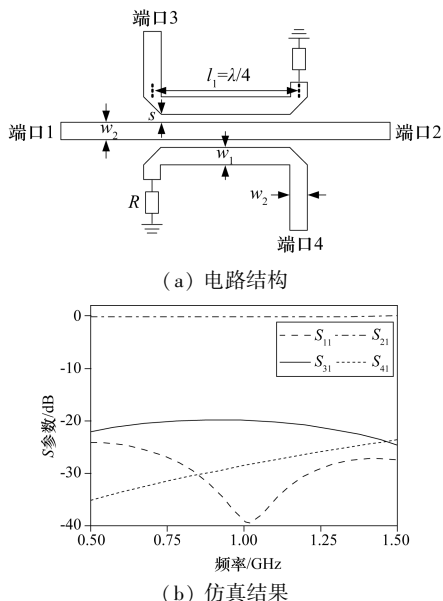


图 1 传统的平行耦合三线双定向耦合器

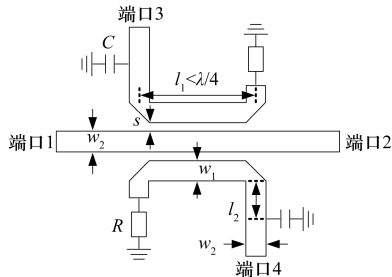


图 2 改进的平行耦合三线双定向耦合器

一个固定值 $C = 4.3$ pF 后,通过减小耦合线 l_1 长度和缝隙间距 s ,可以恢复原中心频率处耦合度为 20 dB,同时仍保证了较高的隔离度,满足了高方向性和小型化的目的。此时电路结构的尺寸为 $l_1 = 34.05$ mm, $l_2 = 0$ mm, $w_1 = 3.97$ mm, $w_2 = 4.05$ mm, $s = 1$ mm, $R = 50 \Omega$ 。S 参数仿真结果如图 4 所示,由仿真分析可知,引入的并联电容值越大方向性越高。值得一提的是,耦合长度和缝隙间距限制了电容的无限增大。

除电容值大小外,电容在支路的位置也会影响方向性。在其它参数不变的情况下,仅改变电容的位置 l_2 ,得到的 S 参数结果如图 5 所示。由仿真结果可知,电容位置的改变会影响隔离度而对耦合度几乎不产生影响。由图 5(b)可知, $l_2 = 8$ mm 时隔离度最大,减小或增大 l_2 都会导致隔离度变小。

然而,上述的改进结构集总电容取值离散,限制了耦合微带线的尺寸也为固定值。本文提出了用扇形微带电容来替代集总电容,扇形电容使得电容值可以随意选取,增大优化空间。同时负载电阻也由金属化过孔理想接地改进为射频扇形微带短截线接

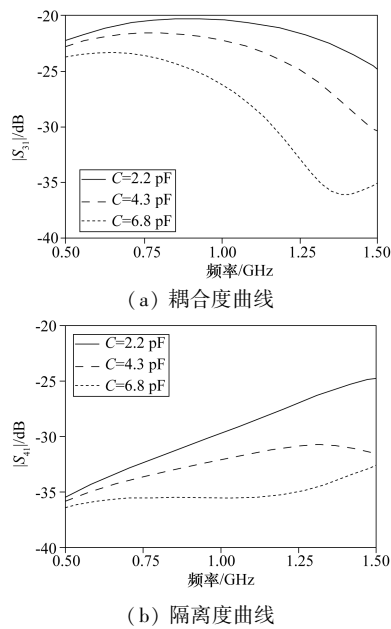


图 3 不同电容值时的耦合度和隔离度变化

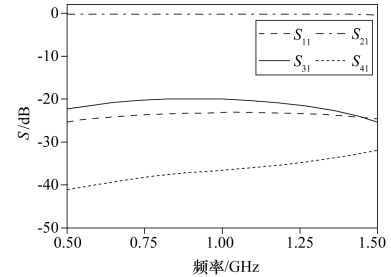


图 4 改进的平行耦合三线双定向耦合器仿真结果

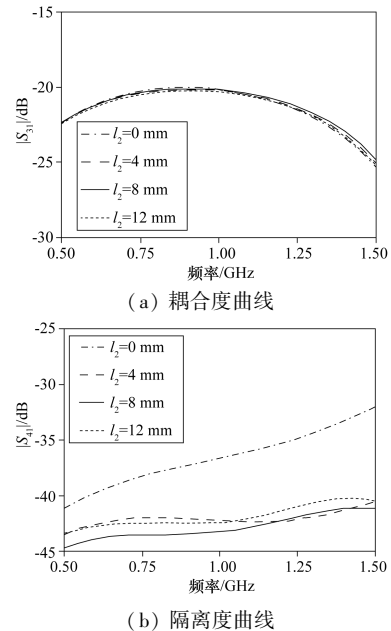


图 5 电容在不同位置时的耦合度和隔离度变化

地,如图 6 所示。利用射频电路设计软件 ADS 仿真分析了扇形微带短截线参数的影响,如图 7 所示。为了实现理想接地与扇形微带射频接地在中心频率处的等效,需要满足 Z_{in} 虚部为 0。由仿真结果可

知,扇形微带线的长度 l 主要决定等效的中心频率,角度 θ 决定曲线的平坦度, θ 越大,曲线越平坦,二者近似等效的频率范围越宽。但由于扇形微带短截线受到实际布局的限制,长度与角度需要折中考虑。虽然在低频段扇形微带短截线尺寸较大,但是相比文献[12]无需电容电阻接地打孔,降低了加工复杂性,此结构适合更高频率的应用。

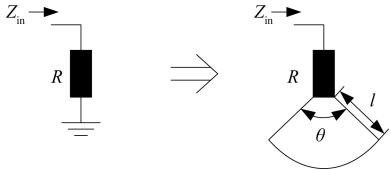


图 6 理想接地改进为扇形微带短截线接地

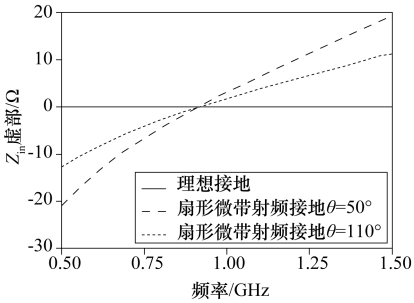


图 7 扇形微带短截线不同角度时的阻抗虚部变化

为进一步提高方向性,引入耦合边缘锯齿结构。最终提出的微带双定向耦合器电路结构如图 8 所示。采用扇形微带替代集总电容和射频接地后,考虑到实际电路的电磁场效应,以及锯齿结构的不连续性影响,使用三维电磁场分析软件 HFSS 对所提出的耦合器进行仿真优化,最终确定的耦合器尺寸为 $l_1=34.1\text{ mm}$, $l_2=7\text{ mm}$, $l_3=15.8\text{ mm}$, $l_4=31.5\text{ mm}$, $w_1=4\text{ mm}$, $w_2=4.1\text{ mm}$, $s=1.2\text{ mm}$, $d=1\text{ mm}$, $\theta_1=80^\circ$, $\theta_2=80^\circ$, $R=50\text{ }\Omega$ 。

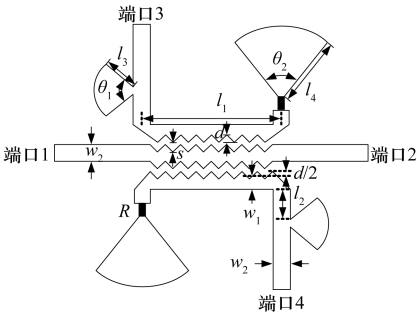


图 8 提出的微带双定向耦合器电路结构

2 耦合器的制作和测试

为验证仿真结果可靠性,对设计的耦合器结构进行加工,实物如图 9 所示。利用 Agilent N5230A 矢量网络分析仪对耦合器进行 S 参数测量,测试结果与 HFSS 仿真结果对比如图 10 所示。由仿真结

果可知,设计的耦合器在中心频率 915 MHz 处耦合度为 19.73 dB、隔离度为 62 dB,方向性达到了 42.27 dB,在0.60~1.36 GHz频带内方向性均在 20 dB 以上,输入反射系数小于-23.37 dB,插入损耗在 0.20 dB 以内。由测试结果可知,耦合器实物性能与 HFSS 仿真结果基本吻合, S_{41} 曲线略有偏差但趋势相同,原因可能是实际加工误差和射频接头的影响。最终测试结果为在中心频率处反射系数为-26.64 dB,插入损耗为 0.21 dB,耦合度为 20.2 dB,隔离度为 52.34 dB;在 0.74~1.35 GHz 频带内耦合度波动小于 0.5 dB,方向性达到 20 dB 以上。

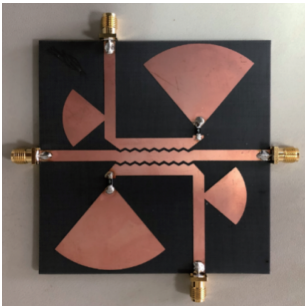


图9 微带双定向耦合器加工实物图

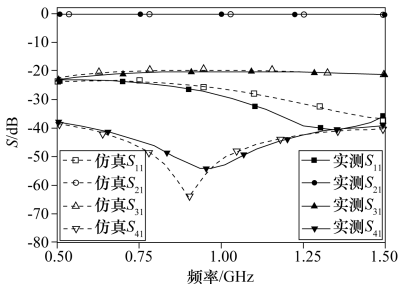


图10 HFSS 仿真与实测 S 参数结果对比

3 结论

本文利用扇形微带电容和锯齿结构改进传统四分之一波长平行耦合三线微带双定向耦合器,增大了隔离度,显著提升了耦合器的方向性,并实现了小型化。设计制作了在中心频率 915 MHz 处耦合度为 20 dB 的微带双定向耦合器,并改进射频接地结构,简化了加工工艺。实物测试结果表明在中心频率处耦合度 20.2 dB,方向性达到 32.14 dB;在 0.74~1.35 GHz 频带内耦合度波动小于 0.5 dB,方向性均在 20 dB 以上。该微带双定向耦合器加工简单、性能优良,可以推广到其它频率范围弱耦合场合下以满足高定向性要求。

参 考 文 献

[1] 金铃. 高定向性微带定向耦合器的研究[J]. 微波学报, 2017, 33(S1):195-198
Jin L. The study of high directivity microstrip coupler

[J]. Journal of Microwaves, 2017, 33(S1): 195-198
[2] Podell A. A high directivity microstrip coupler technique [A]. IEEE G-MTT 1970 International Microwave Symposium[C], 1970. 33-36
[3] Dydyk M. Microstrip directional couplers with ideal performance via single-element compensation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(6): 956-964
[4] Lee S, Lee Y. A design method for microstrip directional couplers loaded with shunt inductors for directivity enhancement[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(4): 994-1002
[5] Ha J, Shin W, Lee Y. An inductive-loading method for directivity enhancement of microstrip coupled-line couplers[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(4): 356-358
[6] Muller J, Pham M N, Jacob A F. Directional coupler compensation with optimally positioned capacitances[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(11): 2824-2832
[7] Kim W, Lee M, Kim J, et al. A passive circulator with high isolation using a directional coupler for RFID [A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C], 2006. 1177-1180
[8] 万继伟. 简易高定向耦合器[J]. 现代雷达, 2015, 37(8): 53-54
Wan J W. Simple high-directivity coupler[J]. Modern Radar, 2015, 37(8): 53-54
[9] Tan P C. Dual adjacent directional coupler[J]. Electronics Letters, 1969, 5(13): 283-285
[10] 左海亮, 殷兴辉. 网络分析仪中反射计的双定向耦合器的设计和优化[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(24): 7175-7179
Zuo H L, Yin X H. Design and optimization of dual directional coupler for reflector in network analyzer[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(24): 7175-7179
[11] Tas V, Atalar A. Using phase relations in microstrip directional couplers to achieve high directivity[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(12): 4063-4071
[12] Kikkert C J. RF electronics design and simulation[M]. Townsville: James Cook University Press, 2018. 85-87

傅世强 男,1981年生,博士,副教授。主要研究方向:海事卫星通信和卫星定位导航终端天线理论与设计,微波电路和射频识别技术等。
E-mail: fushq@dlmu.edu.cn