DOI: 10.11991/yykj.202008011

第 48 卷第 4 期

2021年7月

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20210413.1605.008.html

一种新型 SISL 分支线 3 dB 定向耦合器

牟成林, 刘长军

四川大学 电子信息学院,四川 成都 610064

摘 要:为了构造高性能的定向耦合器,提出一种新型介质集成悬置线 (SISL)分支线 3 dB 定向耦合器。该耦合器在 SISL 空气腔的中心放置由覆铜板和金属化通孔包围的介质基板,提高了 SISL 结构的稳定性。馈电方式采用同轴接头直接 馈电,在 SISL 与接头连接处增加了接地金属化过孔,减小了插入损耗,改善了电路的电性能。测试结果表明:耦合器中心 频率为 2.45 GHz,在 2.3~2.6 GHz 回波损耗和隔离度均优于 20 dB,插入损耗低于 0.6 dB,幅度不平衡度小于 0.5 dB,相位误 差小于±1°。该新型定向耦合器结构稳定、损耗低、自封装和电磁屏蔽性能好,具有良好的工程应用前景。 关键词:介质集成悬置线;定向耦合器;回波损耗;插入损耗;相位误差;自封装;电磁屏蔽

中图分类号:TN455 文献标志码:A 文章编号:1009-671X(2021)04-0043-04

A novel SISL branch-line 3 dB directional coupler

MU Chenglin, LIU Changjun

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: In order to realize high performance directional couplers, a novel substrate integrated suspended line (SISL) branch-line 3 dB directional coupler is proposed. A substrate surrounded by copper-covered plate and metal vias is placed in the center of an SISL air cavity to improve the stability of the SISL structure. A coaxial connector is applied to feeding the SISL coupler directly, and vias are introduced between the SISL and coaxial connector to reduce insertion loss and improve its electrical performance. The center frequency of the coupler is 2.45 GHz, and both return loss and isolation are better than 20 dB in the range from 2.3 GHz to 2.6 GHz. The insertion loss is less than 0.6 dB, and the amplitude unbalance is less than 0.5 dB. The phase error is less than $\pm 1^{\circ}$. The novel directional coupler has advantages of high stability, low loss, self-packaging, well electromagnetic shielding, having a bright future in engineering applications.

Keywords: substrate integrated suspended line; directional coupler; return loss; insertion loss; phase error; self-package; electromagnetic shielding

定向耦合器^[1]作为微波电路中重要的无源器 件,可以在输入输出端口间实现功率分配,并保 持一定的相位差,广泛应用于混频器、平衡放大 器以及阵列天线馈电网络等方面。近年来,基于 不同传输线结构的高性能定向耦合器不断出现, 如波导^[2]、基片集成波导^[3]、微带线^[4]和悬置带状 线^[5-6]等。悬置带状线中的电场主要分布在空气 腔中,具有损耗低、色散低、等效介电常数低以及

收稿日期: 2020-08-23. 网络出版日期: 2021-04-13.
基金项目: 国家自然科学基金项目 (62071316); 四川省科技厅项目 (2021YFH0152).
作者简介: 牟成林, 男, 硕士研究生. 刘长军, 男, 教授, 博士生导师.
通信作者: 刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn. 电磁兼容性好等优点。然而传统的悬置带状线由 金属腔体构成,加工相对复杂、成本较高。新型 介质集成悬置线 (SISL)^[7-9]采用印制电路板 (printed circuit board, PCB)加工工艺替代金属腔体加工, 保留了悬置带状线的优点,同时具有成本低、重 量轻和自封装等优势。方同轴传输线^[10]具有宽 频带、低色散以及结构稳定的特点,在航天领域 得到了应用。本文提出了一种新型 SISL 分支线 定向耦合器,在 SISL 的基础上借鉴同轴结构的优 势,将空气腔中心填充表面敷铜、由金属通孔包 围的介质基板,使耦合器分支线形成类似于同轴 的传输结构,进一步减小了色散,提高了结构的 稳定性。采用同轴接头进行直接馈电,省去过渡 结构,既缩小了尺寸,又降低了损耗。

1 介质集成悬置线结构及设计

图 1 为 SISL 的三维结构图,由 5 层双面敷铜 的介质基板构成,介质基板和金属层自上而下分 别命名如图 1 所示。将第 2 层和第 4 层介质基板 局部切除形成空气腔,在空气腔周围由金属通孔 模拟金属波导的边界条件,实现电磁屏蔽,其 横截面如图 2 所示。5 层介质基板(substrate, Sub) 材料均为 FR-4,微波电路设计在 Sub3 的上层 G5 金 属层。





根据参考文献 [11], SISL 传输线的等效介电 常数为

$$\varepsilon_{\rm e} = \frac{h_3 + h_4}{h} \left(1 + \frac{h_2 \varepsilon_{\rm r}}{h_4 \varepsilon_{\rm r} + h_3} \right) \tag{1}$$

式中: *h*=*h*₂+*h*₃+*h*₄,其中,*h*₂、*h*₃、*h*₄分别为第2、3、 4 层介质基板的厚度;ε_r为介质基板相对介电常数。 特征阻抗为

$$Z_0 = \frac{Z_0'}{\sqrt{\varepsilon_{\rm e}}}$$

 $Z_0' = \frac{120\pi(h_3 + h_4)}{w_1}$

其中w。为金属导带的宽度。

本设计采用同轴直接馈电,在选择介质基板 高度和空气腔宽度时,应使 SMA 接头的法兰盘完 全遮盖空气腔,形成封闭结构,并且使耦合器馈 线的金属导带宽度大于同轴接头探针宽度。

设计介质基板厚度 h_1 =0.6 mm, h_2 =1 mm, h_3 = 0.6 mm, h_4 =1 mm, h_5 =0.6 mm; 空气腔宽度 w_3 =8 mm。 保持其他参数不变, 改变第 3 层介质基板 Sub3 上面的金属导带宽度 w_3 , SISL 特征阻抗变化趋势 如图 3 所示。选择合适的线宽, 即可得到需要的 SISL 特征阻抗。



2 分支线定向耦合器原理及设计

如图 4 所示,分支线定向耦合器由 2 条主线 和 2 条分支线组成,其中分支线的长度和间距均 为1/4波长。所有端口均匹配,从端口 1 输入的功 率平均分配给端口 2 和端口 3,且两输出端口之 间存在 90°相移,端口 4 隔离。图 4 中, λ₈ 为中心 频率工作波长, Z₀ 为归一化阻抗。



式中

2.45 GHz 的 SISL 分支线定向耦合器,其金属导带 所在的 G5 金属层结构如图 5(a) 所示。在正交混 合网络的中心敷铜,使每一条支线都保持相同尺 寸的 SISL 传输通路,通路两侧用金属通孔模拟金 属边界条件,实现电磁屏蔽。介质基板堆叠利用 金属通孔进行定位,铆钉穿过金属通孔将 5 层介 质基板铆接在一起,实现 SISL 结构的自封装。

由上述分析可知,若通过介质堆叠形成空气腔,需要将Sub2拆分成5块介质基板,其形状尺寸如图5(b)所示。其中Sub2-3的存在不仅提高了SISL结构的稳定性,而且具有降低色散、减小损耗的优势。由图4可知,耦合器各分支线设计初始线长为四分之一波长,可由式(1)计算得SISL等效介电常数,进而求得初始线长。分支线特征阻抗分别为Z₀和Z₀/ $\sqrt{2}$,初始线宽可由图3特征阻抗和线宽 w_s 的关系得到。实际尺寸为: W_0 =2.4 mm, L_0 =10 mm, W_1 =4 mm, L_1 =28 mm, W_2 =2.4 mm, L_2 =28.5 mm。





为验证 SISL 分支线定向耦合器的低损耗特性,利用 HFSS 仿真工具进行全波仿真。设计相同工作频率的微带(microstrip)分支线定向耦合器,介质基板采用厚度为 0.6 mm 的 FR-4,对比2 种结构的损耗曲线如图 6 所示。



$$P_{\text{loss}} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 - |S_{31}|^2 - |S_{41}|^2$$

仿真结果表明, SISL 定向耦合器的损耗在整 个频段内均远低于微带线结构, 并且随着频率的 升高, 二者之间的差别越来越大, 印证了 SISL 定 向耦合器的低损耗特性。

3 测试结果与分析

耦合器整体尺寸为 53.6 mm×58.3 mm×3.8 mm, 实物如图 7 和图 8 所示。在实际加工时,将 SMA 接头的法兰盘焊接到 SISL 结构 G1 层和 G10 层, 实现共同接地。在 Sub1 和 Sub5 耦合器端口处增 加一排金属通孔, 缩短电流路径, 改善过渡结构 的电性能。



图7 SISL 耦合器加工实物



图8 SISL 每层介质基板加工实物

定向耦合器仿真与实测结果如图 9 和图 10 所示,测试仪器使用 Agilent 矢量网络分析仪。在 中心频率 2.45 GHz 处,回波损耗和隔离度均优于 28 dB。频率在 2.3~2.6 GHz 时,回波损耗和隔离 度均高于 20 dB;传输端口 |*S*₂₁|为-3.12 dB,幅度不 平衡度为±0.18 dB;耦合端口 |*S*₃₁|为-3.39 dB,幅度 不平衡度为±0.15 dB;输出端口之间的相位差为 90°±1°。SISL 结构等效介电常数低,受介质基板 参数影响很小,因此仿真与实测结果吻合良好。





图10 SISL 定向耦合器仿真与实测输出端口相位差

表1为本设计与其他文献中定向耦合器性能 对比,其中相对带宽的指标为回波损耗和隔离 度,均优于20dB。由表1可知,SISL不仅以低成 本的介质基板实现了耦合器优良的电性能,并 且具有损耗小、自封装等优势,工程应用价值 较高。

表1 定向耦合器性能对比

方法	基板	相对带宽/%	插入损耗	自封装
文献[<mark>1</mark>]	FR-4	40	0.18	否
文献[<mark>5</mark>]	RO5880	5	< 0.05	否
本文	FR-4	12	< 0.05	是

4 结论

本文设计了一种中心频率工作于 2.45 GHz 的 新型基于 SISL 分支线 3 dB 定向耦合器, 与传统 耦合器结构相比, 主要具有如下特点。

1) 提出一种基于 SISL 分支线 3 dB 定向耦合 器结构, 将第 2 层和第 4 层介质基板分解, 使耦合 器的每条支路保持相同的 SISL 传输结构, 降低了 色散, 提高了结构稳定性。

2) 馈电方式采用同轴直接馈电,去掉过渡结构,在介质基板的馈电端口处添加金属通孔提高电性能,既减小了尺寸,又降低了电路损耗。

3)基于 SISL 传输线结构,利用金属通孔模拟 金属波导边界条件,电磁波主要在空气中传播, 具有损耗小、受介质基板参数影响小、电磁兼容 性好和自封装等优势。

参考文献:

- [1] TANG C W, TSENG C T, HSU K C. Design of the modified planar tandem couplers with a wide passband[J].
 IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2013, 61(1): 48–54.
- [2] 张翠翠, 王益, 王建忠. 高功率微波宽带波导定向耦合器 设计 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(6): 1036– 1040.
- [3] LIANG C H, CHANG W S, CHANG Chiyang. Enhanced coupling structures for tight couplers and wideband filters[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2011, 59(3): 574–583.
- [4] HAGAG M F, ZHANG Runqi, PEROULIS D. Highperformance tunable narrowband SIW cavity-based quadrature hybrid coupler[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2019, 29(1): 41–43.
- [5] MENZEL W, YANG Zimeng. Lumped element suspended stripline couplers[C]//Proceedings of 2009 German Microwave Conference. Munich, Germany: IEEE, 2009.
- [6] 余泽, 和历阳, 许立强, 等. 一种新型的悬置带状线带阻 滤波器设计 [J]. 应用科技, 2020, 47(1): 37-40.
- [7] WANG Yongqiang, MA Kaixue, MOU Shouxian. A compact branch-line coupler using substrate integrated suspended line technology[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2016, 26(2): 95–97.
- [8] LI Lianyue, MA Kaixue, YAN Ningning, et al. A novel transition from substrate integrated suspended line to conductor backed CPW[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2016, 26(6): 389–391.
- [9] CHU Yutong, MA Kaixue, WANG Yongqiang, et al. A self-packaged low-loss and compact SISL DBBPF with multiple TZs[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2019, 29(3): 192–194.
- [10] 谢敏, 雷国忠. 方同轴特性的研究 [J]. 火控雷达技术, 2015, 44(3): 56-59.
- [11] 顾墨琳. 微波固态电路设计 [J]. 微波学报, 1989(4): 86-87.
- [12] 刘长军, 黄卡玛, 朱铧丞. 射频通信电路设计 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2017: 101-104.
- [13] WANG Yongqiang, MA Kaixue, YAN Ningning, et al. A slow-wave rat-race coupler using substrate integrated suspended line technology[J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2017, 7(4): 630–636.

本文引用格式:

牟成林, 刘长军. 一种新型 SISL 分支线 3 dB 定向耦合器 [J]. 应用科技, 2021, 48(4): 43-46. MU Chenglin, LIU Changjun. A novel SISL branch-line 3 dB directional coupler[J]. Applied science and technology, 2021, 48(4): 43-46.