

基于慢波基片集成波导的小型化移相功分器

黄 文, 詹中杰, 陈 肖
(重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065)

摘要: 针对移相器和功分器的功能融合设计, 提出了一种基于慢波基片集成波导(Slow-Wave Substrate Integrated Waveguide, SW-SIW)的小型化移相功分器, 两个输出分支等长带宽, 可实现 30° 相移量. 其中一个输出分支通过基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)实现, 而另一个输出分支将互补开口谐振环(Complementary Split-Ring Resonator, CSRR)加载在上层金属表面, 代替传统SIW连续的金属表面, 该CSRR由经典CSRR结构演变而来, 同时为了降低由CSRR加载所造成的相位上的不稳定, 在CSRR内部添加金属化通孔, 实现SW-SIW, 使得截止频率和相速度降低. 测试结果表明, 移相功分器在9.0~11.8 GHz频带范围内反射系数 $|S_{11}|$ 小于-10 dB, 相对工作带宽为26.9%, 插入损耗小于1.3 dB. 两个输出端口的相位差稳定在 $30^\circ \pm 3^\circ$, 幅度差小于1.4 dB, 实现了等功率分配. 所设计的移相功分器具有较小的尺寸和低制造成本, 适合应用在相控阵天线中.

关键词: 移相功分器; 基片集成波导; 慢波基片集成波导; 小型化; 互补开口谐振环

基金项目: 重庆市研究生科研创新项目(No.CYS22445)

中图分类号: TN623; TN626

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)05-1562-08

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

DOI: 10.12263/DZXB.20230047

Miniaturized Phase-Shifting Power Divider Based on Slow-Wave Substrate Integrated Waveguide

HUANG Wen, ZHAN Zhong-jie, CHEN Xiao

(School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In this paper, a miniaturized phase-shifting power divider based on slow-wave substrate integrated waveguide (SW-SIW) is proposed for the functional integration of phase shifter and power divider. The design features two output branches with equal lengths and widths to achieve a 30° phase shift. One output branch is realized by a conventional substrate integrated waveguide (SIW), while the other output branch is loaded a complementary split-ring resonator (CSRR) on the upper metal surface to replace the continuous metal surface of the conventional SIW, and the CSRR is evolved from the classic CSRR structure. Meanwhile, a metallized via-hole is added inside the CSRR to reduce the phase instability caused by the loading of the CSRR, so a SW-SIW is realized, and the cut-off frequency and phase velocity are reduced. The measured results show that the reflection coefficient $|S_{11}|$ of the phase-shifting power divider is less than -10 dB in the frequency band of 9.0~11.8 GHz, the relative operating bandwidth is 26.9%, and the insertion loss is less than 1.3 dB. The phase difference between the two output ports is stable at $30^\circ \pm 3^\circ$, and the amplitude difference is less than 1.4 dB realizing equal power distribution. The designed phase-shifting power divider has a small size and low manufacturing cost, which is suitable for application in phased-array antennas.

Key words: phase-shifting power divider; substrate integrated waveguide; slow-wave substrate integrated waveguide; miniaturization; complementary split-ring resonator

Foundation Item(s): Chongqing Postgraduate Innovative Research Project (No.CYS22445)

1 引言

在功率分配网络中,端口输出相位的相差常见的有同相相差、反相相差和正交相差三种,而其他的相差情形则很少被关注^[1]. 对于 SIW 功率分配网络,与滤波功能的结合比较常见,而移相功能往往没有被关注^[2,3]. 对于阵列天线馈电网络的设计,一般是先对功分结构和移相结构进行分别设计,再直接结合起来^[4]. 随着通信技术的快速发展,在无线通信领域,多数调制技术都是复杂的,这些技术需要同时关注输出相位和幅度性能^[5]. 因而,基于 SIW 功率分配器开展相位和幅度的协同研究与设计,将功分器和移相器进行功能融合设计,可以更好地应对现代通信技术快速发展所带来的高度集成化需求.

移相功分器同时具备功分器和移相器的特性,可以实现功率分配和移相^[6]. 然而,移相功分器采用不等长或不等宽的分支来实现移相会增加器件尺寸,不利于其集成化设计^[7]. 而 SW-SIW 的提出,为采用等长等宽分支实现移相功分器提供了新的思路.

在 2014 年,SW-SIW 的概念被首次提出^[8],并首次通过加载金属盲孔阵列在 SIW 内实现了慢波效应,可以同时减小 SIW 横向和纵向的尺寸. 随后,有学者提出在 SIW 表面上加载微带折线以实现慢波效应^[9,10],并基于所提出的 SW-SIW 设计实现了小型化的耦合器^[11]及功分器^[12]. 2019 年,Liu 等人^[1]提出了一种加载多个 CSRR 的 SIW 传输线,通过 CSRR 的加载增加传播常数,实现了 SW-SIW,并实现了工作频率宽、插入损耗小的等长等宽的小型化六端口移相功分器. 相比于目前已有的微带折线单元周期性加载在 SIW 上以实现慢波效应的方式^[13],该结构具有简单的结构和较低的损耗. 但是该移相功分器输出端口间相位差的稳定性较差,难以满足实际应用中对于移相功分器相位差稳定性的要求. 而且采用多层介质板制造的移相功分器^[14-16]具有较高的加工成本和较差的结构稳定性.

因此,本文提出了基于 CSRR 和金属化通孔加载的等长等宽的小型化 SW-SIW 移相功分器,通过在 CSRR 内额外加载的金属化通孔降低了 CSRR 加载带来的相位不稳定影响,并验证了由 CSRR 和金属化通孔加载带来的慢波效应,实现了移相器与功分器的一体化设计. 并且该移相功分器只用了单层介质基板,具有简单的结构和较低的加工成本,可用于相控阵天线馈电网络. 测试结果表明,该移相功分器在 9.0~11.8 GHz 频段内具有良好的功率分配和移相性能.

2 基于 CSRR 的 SW-SIW 传输线设计

2.1 慢波效应的产生原理

SIW 结构如图 1(a)所示,其中平面二维传输线电

路模型如图 1(b)所示,对位于 xOz 平面,信号沿 z 方向传播的 SIW,在 TE_{10} 模式下,导波相速度^[17]为

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 \mu_z \varepsilon_y - \frac{\mu_z}{\mu_x} \left(\frac{\pi}{\omega w_{\text{eff}}} \right)^2}} \quad (1)$$

$$w_{\text{eff}} = w - 1.08 \times \frac{D^2}{p} + 0.1 \times \frac{D^2}{w} \quad (2)$$

其中, ω 表示角频率; w_{eff} 为将 SIW 等效成矩形波导时的等效宽度,如图 1(a)所示; w 为两排金属过孔的间距; D 为金属过孔的直径; p 为 z 方向相邻金属过孔的间距. 由式(1)可知,SIW 传输线慢波效应的产生,需要提高其磁导率 μ_x 或介电常数 ε_y ,以减慢相速度. 由图 1 的等效电路模型可知,在波长远大于传输线的长度 L 时,电路的部分等效介电常数和部分等效磁导率^[18]可以表示为

$$\begin{aligned} \mu_z &= \frac{L_x}{d} \\ \mu_x &= \frac{L_z}{d} \\ \varepsilon_y &= \frac{C_y}{d} \end{aligned} \quad (3)$$

根据式(3)可知,对于电磁波传播方向为 z 方向的 SIW,可以通过提高电感 L_z 或电容 C_y ,从而提高磁导率 μ_x 或介电常数 ε_y ,产生慢波效应.

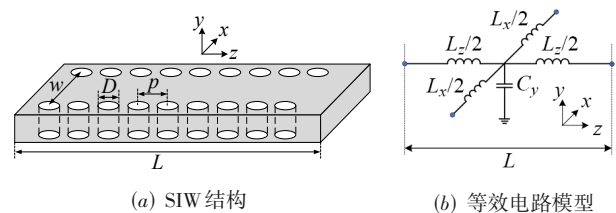


图 1 SIW 及其平面二维传输线等效电路模型

2.2 加载 CSRR 的 SW-SIW 传输线

经典的 CSRR 结构如图 2(a)所示,可等效为图 2(b)所示的 LC 谐振结构,当其加载到 SIW 上时,可以获得一个低于截止频率的通带,使尺寸减小^[19,20].

图 3(a)为所提出的 CSRR 结构的演进图,CSRR III 可以由经典的 CSRR 结构,即 CSRR I 演变而得,将这

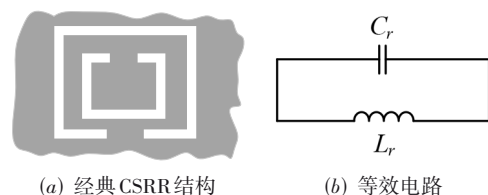
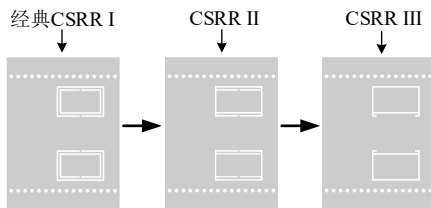
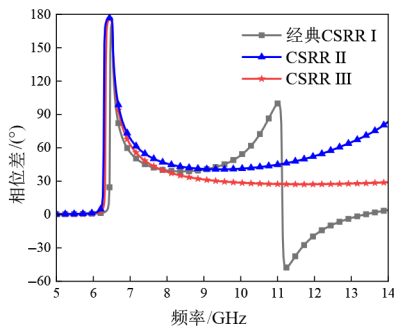


图 2 经典 CSRR 结构及其等效电路

三种 CSRR 分别加载到 SIW 上,可以得到相应的 SW-SIW 传输线. 图 3(b)给出了这三种 SW-SIW 相对于相同尺寸 SIW 的相位差曲线,其中相位差为信号在 SW-SIW 中的相移减去在相同尺寸 SIW 中的相移. 可以看出,加载经典的 CSRR I 结构的 SW-SIW 传输线相比于相同尺寸的 SIW 在一定频段内产生了相位偏移,在 7.5~9.3 GHz 的频带内具有 $40^\circ \pm 3^\circ$ 的较为平稳的相位差,但是其稳定相位差带宽较窄,无法满足宽带化需求. 于是为了使移相功分器实现更宽频带内稳定移相效果,根据经典 CSRR I 结构提出了 CSRR II. 首先将经典 CSRR I 的内环和外环进行了合并,开口不变,得到 CSRR II. 如图 3(b)所示,加载 CSRR II 结构的 SIW,相比加载经典 CSRR I 结构的 SIW,显著增加了具有稳定相位差的带宽. 最后在 CSRR II 基础上,增加了外环开口的长度,并省去内环开口两端开槽,形成 CSRR III 结构. CSRR III 实现了更宽频带的移相效果,在 8.7~14 GHz 的频带内具有 $30^\circ \pm 3^\circ$ 的相位偏移,相对带宽达到了 44%.



(a) 演变结构图



(b) 相对于 SIW 的相位差曲线

图 3 三种加载 CSRR 的 SW-SIW 传输线及相位差曲线

为了说明所提出的 CSRR III 结构加载到 SIW 上产生的慢波效应,通过全波仿真软件 HFSS 对其进行了电场分布及色散曲线的仿真分析. 图 4 给出了在 10 GHz 时,SIW 和加载 CSRR III 的 SW-SIW 的电场分布图,其长度 $T=14.7$ mm. 从加载 CSRR III 的 SW-SIW 的电场分布图可见,当信号通过 CSRR III 时,电场明显被压缩在两个 CSRR 中间,这一现象可以看作是 SIW 的等效宽度发生了变化,而 SIW 等效宽度变化会导致 SIW 相位常数发生变化. 图 5 和图 6 给出了在 10 GHz 时,SIW 和加载

CSRR III 的 SW-SIW 的横截面的电场和磁场分布. 从图 5 可以看出,两者横截面的电场分布都是均匀的,即从横截面中心到横截面边缘场强递减. 而从图 6 的横截面磁场分布可以看出,加载 CSRR III 的 SIW 磁场分布不再均匀,这是慢波效应的典型现象^[8].

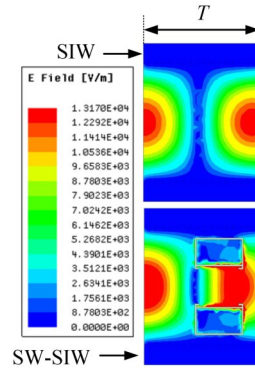


图 4 SIW 和加载 CSRR III 的 SW-SIW 的上表面电场分布

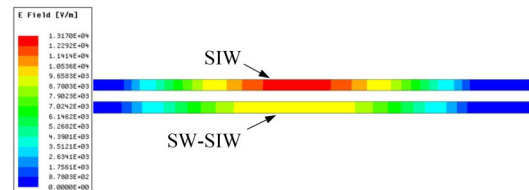


图 5 SIW 和加载 CSRR III 的 SW-SIW 的横截面电场分布

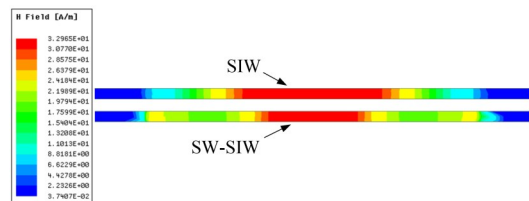


图 6 SIW 和加载 CSRR III 的 SW-SIW 的横截面磁场分布

图 7 比较了 SIW 的色散曲线和加载了 CSRR III 的 SW-SIW 的色散曲线,其中 β 为相位常数. 比较它们的截止频率(对应 $\beta T=0$)发现,加载 CSRR III 的 SW-SIW 的截止频率为 5.9 GHz,相比于相同大小的 SIW,其截止频率降低了约 1 GHz. 同时还可以看到,加载 CSRR III 的 SW-SIW 在同一频率时,具有明显更大的相位常数 β . 因为相位常数 β 和相速度 v_p 为反比关系,即 $v_p=2\pi f/\beta$,所以加载 CSRR III 的 SW-SIW 的相速度更低,证实了加载 CSRR III 的 SW-SIW 产生了慢波效应,因此在相同物理长度的情况下,加载 CSRR III 的 SW-SIW 相比起 SIW 传输线,其相移更大.

3 基于 SW-SIW 传输线的移相功分器设计

3.1 基于 CSRR III 的 SW-SIW 传输线的移相功分器

首先设计了在上输出分支采用 SIW,而下输出分支

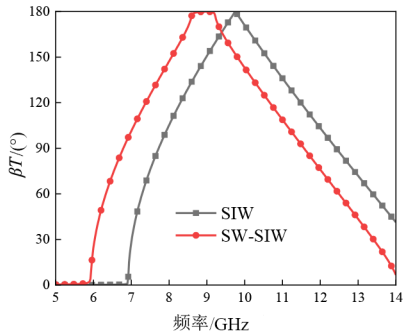


图7 SIW 和加载 CSRR III 的 SW-SIW 的色散曲线

金属表面上加载了 CSRR III 的移相功分器,如图 8 所示. 由于不需要通过增加下输出分支的长度或宽度实现移相,因此上、下输出分支具有相同的长度和宽度,实现了小型化的目标. 端口 1 为射频信号输入端,端口 2 和端口 3 为射频信号输出端.

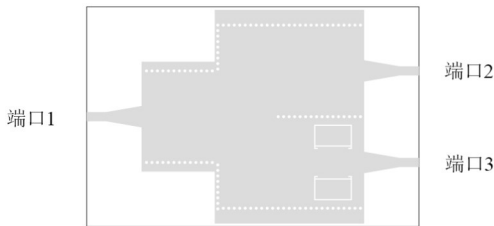


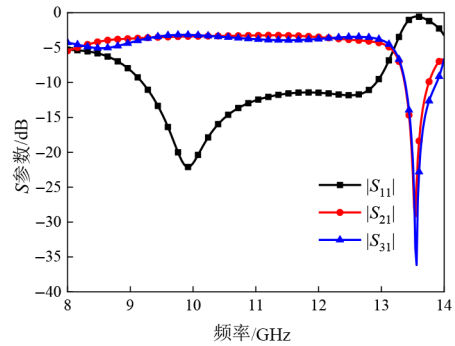
图8 加载 CSRR III 的 SW-SIW 移相功分器

由图 9(a)可见,在 9.2~12.9 GHz 频段内,加载 CSRR III 的移相功分器, $|S_{11}|$ 低于 -10 dB,其 -10 dB 阻抗带宽为 33%,并且在该频段内 $|S_{21}|$ 和 $|S_{31}|$ 大于 -3.9 dB. 如图 9(b)所示,在 9.2~12.9 GHz 频段内,两个输出信号幅度差小于 0.65 dB. 两个输出信号的相位差,在 8.6~9.7 GHz 频段内为 $30^\circ \pm 3^\circ$,其相对带宽只有 12%,说明该移相功分器的 30° 稳定相移带宽较窄. 而在 9.2~12.7 GHz 频段内相移量为 $26.5^\circ \pm 4.5^\circ$,相较于目标值 30° 偏低,并且相移不够稳定. 因此,尽管该移相功分器功率等分性能较好,但移相性能仍有不足.

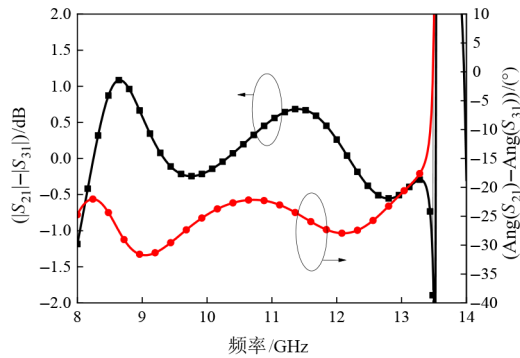
通过继续优化该结构的 CSRR 尺寸,可以更好地调整其相移特性. 但这种调整会导致下输出分支的特征阻抗发生变化,导致两个输出端口的功率相差过大. 由此可知,只加载 CSRR III 的移相功分器无法同时满足等功率分配和相位差稳定. 因此,为了不影响等功率分配特性和调节相位差,需要添加一种对下输出分支的特征阻抗影响尽可能小,且能够进一步调节下输出分支相位的额外结构.

3.2 基于 CSRR III 和金属化通孔的 SW-SIW 传输线的移相功分器

图 10 为最终所提出的加载 CSRR III 和金属化通孔的 SW-SIW 传输线,该结构在 SIW 上加载了两个 CSRR



(a) S 参数



(b) 幅度差和相位差

图9 加载 CSRR III 的 SW-SIW 移相功分器的 S 参数及幅度差、相位差

III,不同于已有加载 CSRR 的 SW-SIW 传输线,在 CSRR III 的内部各额外加载有一个金属化通孔. CSRR III 和金属化通孔结构可以近似为环-蘑菇型结构^[21],其等效电路如图 11 所示. 其中 L_1 和 L_2 分别表示由加载 CSRR 产生的串联电感和加载金属化通孔产生的寄生电感, C_2 表示由 CSRR III 内外金属间产生的增强电容,而 C_1 和 C_3 分别表示 CSRR 外部金属与接地板之间以及 CSRR III 内部金属与接地板之间产生的寄生电容. 可见,在下输出分支中,CSRR III 内部金属化通孔的加载,增大了 y 方向等效电容 C_y 和等效介电常数 ϵ_y ,从而增强了慢波效应,在传输线长度不变的情况下增加相移量.

图 12 给出了仅加载 CSRR III 的 SW-SIW 传输线的特性阻抗曲线,以及同时加载 CSRR III 和金属化通孔的 SW-SIW 传输线的特性阻抗曲线. 可见,在 CSRR III 内

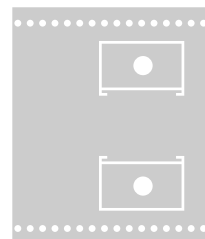


图10 加载 CSRR III 和金属化通孔的 SW-SIW

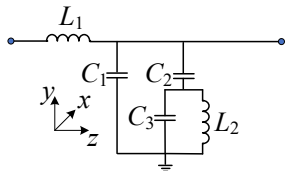


图11 CSRR III和金属化通孔结构在SW-SIW中的等效电路模型

部加载金属化通孔后,SW-SIW传输线的特性阻抗虚部有所减少,实部基本保持不变,说明等效电容 C_y 增加了,同时特征阻抗基本不变.图13给出了仅加载CSRR III的SW-SIW传输线的色散曲线,以及同时加载CSRR III和金属化通孔的SW-SIW传输线的色散曲线.可见,金属化通孔的加载会提高SW-SIW传输线的相移常数,进一步加强慢波效应,同时在对SW-SIW传输线特性阻抗影响较小的情况下,增加对相位特性调整的自由度,提高相位稳定性.

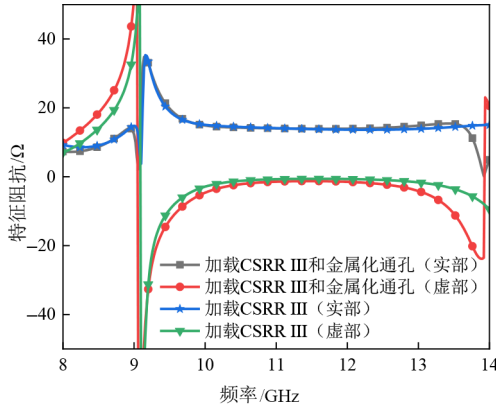


图12 SW-SIW传输线特性阻抗曲线

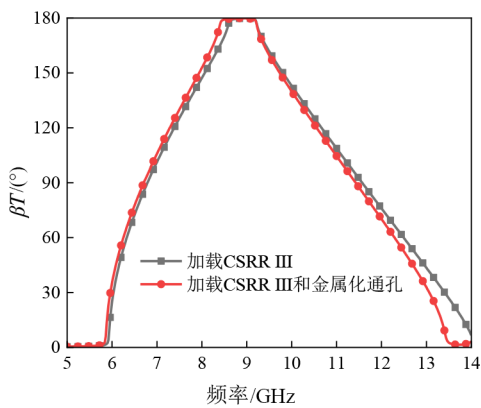


图13 SW-SIW色散曲线

图14展示了最终基于SW-SIW的小型化移相功分器的结构示意图.该移相功分器的下输出分支采用了加载CSRR III和金属化通孔的SW-SIW传输线,在端口3与输入端口1之间产生了较大的相移,从而在两个输出端口之间产生了相位差,形成两个输出端口间移相的效果.

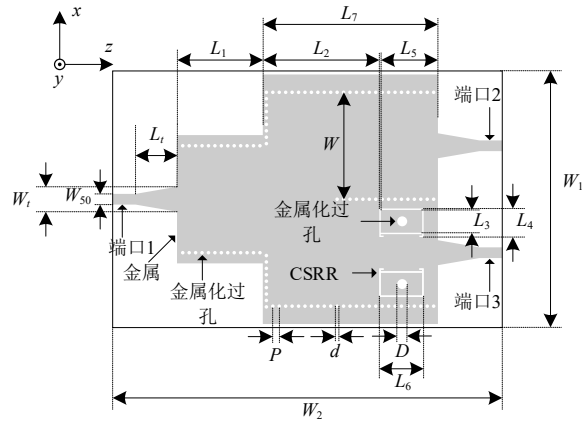


图14 基于SW-SIW的小型化移相功分器

移相功分器最终优化后的尺寸如表1所示.图15给出了CSRR III内加载金属化通孔后的移相功分器S参数及其相位和幅度差.由图15(a)可知,加载了金属化通孔的移相功分器在9.2~12.7 GHz频带内, $|S_{11}|$ 低于-10 dB,-10 dB阻抗带宽为32%,表明该移相功分器具有良好的阻抗匹配.在9.2~12.7 GHz频带内, $|S_{21}|$ 和 $|S_{31}|$ 均大于-3.9 dB,表明插入损耗小.根据图15(b)可知,两个输出端口的幅度差小于0.3 dB,实现了良好的等功率分配性能.在9.2~12.7 GHz频带内,端口2和端口3输出信号具有 $30^\circ \pm 3^\circ$ 的稳定相位差,相较CSRR III内未加载金属化通孔的情况,移相功分器两输出端口间的相移量和相移稳定度都明显提高.

表1 移相功分器的尺寸参数 单位:mm

参数	尺寸	参数	尺寸	参数	尺寸
W_{s0}	1.5	L_1	5.8	L_1	12.0
W_t	3.5	L_2	16.3	L_3	3.2
d	0.5	L_4	4.0	L_5	8.0
L_6	6.2	L_7	24.5	D	1.4
P	0.9	W_1	30.5	W_2	54.5
W	15.0				

4 测试结果分析

为了验证所设计移相功分器的性能,对其进行了实物加工,为了便于测试在端口均焊接了SMA接头,如图16所示.采用介质基板为Rogers 5880,其厚度为0.508 mm,损耗角正切为0.001 2,相对介电常数为2.2.整个移相功分器尺寸为54.5 mm × 30.5 mm × 0.508 mm,即约为 $2.6\lambda_g \times 1.6\lambda_g \times 0.024\lambda_g$,其中 λ_g 为移相功分器中心频率对应的导波波长.仿真和测试结果对比如图17所示.

从图17(a)可以看出,移相功分器的测试和仿真结果吻合较好,但由于三个SMA接头焊接和加工误差的

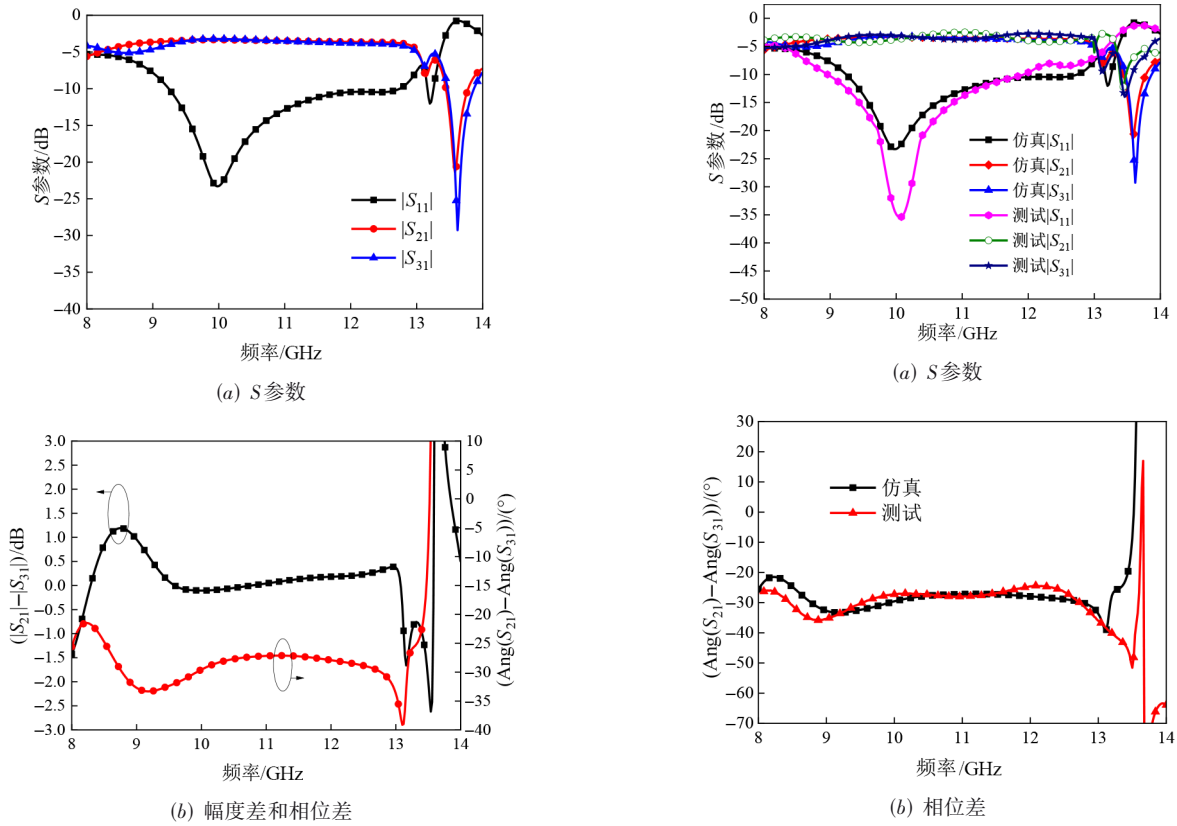


图 15 基于 SW-SIW 的小型化移相功分器的 S 参数及其幅度差、相位差

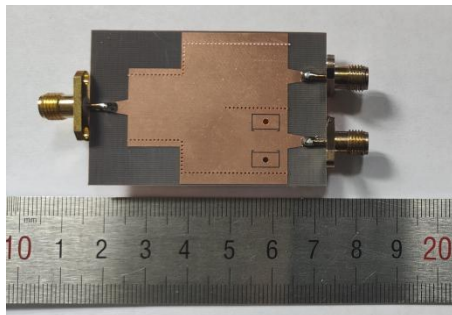


图 16 SW-SIW 移相功分器实物

影响,测试和仿真结果的 $|S_{11}|$ 、 $|S_{21}|$ 与 $|S_{31}|$ 存在较小的差异.从测试结果可以看出,该移相功分器在 9.0~11.8 GHz 频率范围内 $|S_{11}|$ 小于 -10 dB,相对工作带宽达到了 26.9%.在该频段内的插入损耗低于 1.3 dB,且 $|S_{21}|$ 与 $|S_{31}|$ 曲线具有相似的变化趋势,表明加载的 CSRR III 和金属化通孔结构损耗较低.如图 17(b)所示,两个端口的相位差在整个工作频段内基本稳定在 $30^\circ \pm 3^\circ$,表明加载的 CSRR III 和金属化通孔结构使得移相功分器的移相节产生了慢波效应,并实现了稳定的移相.从图 17(c)可以看出,两个输出端口的幅度差小于 1.4 dB,移相功分器在误差允许的范围,两个输

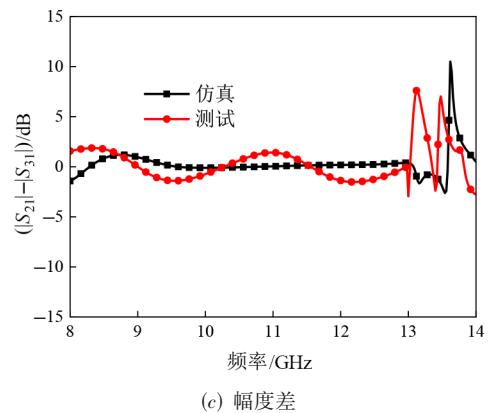


图 17 SW-SIW 移相功分器测试与仿真结果对比

出端口的幅度响应良好,表明在移相功分器的两个端口具有相似的阻抗特性,具有良好的功率等分性能.

本文所提出的移相功分器与最近报道的移相功分器的比较如表 2 所示,可以发现所提出的移相功分器具有相位差稳定、尺寸小、插入损耗低等优点.此外,相较文献[15]和文献[16],该 SIW 移相功分器只使用单层介质基板制造,加工成本更低,结构稳定性更好.相较文献[5],本设计的插入损耗更低,相移稳定性也更好.相较文献[7],本设计的尺寸更小,插入损耗更低.

表 2 与现有移相功分器的比较

对比文献	功分类型	介质基板层数	中心频率/GHz	尺寸	工作带宽/%	相位差	仿真(测试)最大插入损耗/dB
文献[6]	一分四(SIW)	2	9.23	$3.6\lambda_g \times 1.1\lambda_g \times 0.022\lambda_g$	26.6	$180^\circ \pm 2.5^\circ$	—
文献[15]	一分二(SIW)	2	8.50	$3.2\lambda_g \times 3.2\lambda_g \times 0.069\lambda_g$	62.5	$180^\circ \pm 5^\circ$	1.00 (1.60)
文献[16]	一分二(SIW)	2	9.60	$4.2\lambda_g \times 0.8\lambda_g \times 0.047\lambda_g$	20.8	$180^\circ \pm 0.8^\circ$	0.66 (—)
文献[5]	一分二(微带)	1	5.20	$0.8\lambda_g \times 0.5\lambda_g \times 0.015\lambda_g$	32.7	$30^\circ \pm 5^\circ$	1.40 (—)
文献[7]	一分四(SIW)	1	11.50	$4.5\lambda_g \times 3.5\lambda_g \times 0.030\lambda_g$	26.7	$30^\circ \pm 1^\circ$	1.60 (—)
本文	一分二(SIW)	1	10.40	$2.6\lambda_g \times 1.6\lambda_g \times 0.024\lambda_g$	26.9	$30^\circ \pm 3^\circ$	0.90 (1.30)

5 结论

本文提出一种基于加载 CSRR 和金属化通孔的 SW-SIW 的小型化移相功分器。不同于已有 SW-SIW, 加载的 CSRR 具有更加平稳的宽频带移相效果。同时, CSRR 的加载使移相功分器的下输出分支形成慢波传输线, 具有小型化的效果。提出了在 CSRR 的内部加载金属化通孔, 使得移相功分器具有更加平稳的相移特性。测试结果表明, 移相功分器在 9.0~11.8 GHz 频带范围内反射系数 $|S_{11}|$ 小于 -10 dB, 相对工作带宽为 26.9%, 插入损耗小于 1.3 dB。两个端口的相位差稳定在 $30^\circ \pm 3^\circ$, 且幅度响应良好。与之前研究的 SIW 移相功分器相比, 其具有小型化和制造成本低的特点, 传输性能和移相性能良好, 为相控阵天线馈电网络的设计提供了低成本和高性能的方案。

参考文献

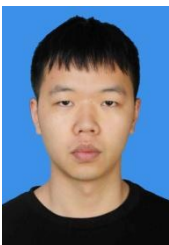
- [1] LIU S, XU F. Novel substrate-integrated waveguide phase shifter and its application to six-port junction[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(10): 4167-4174.
- [2] 陈守磊, 齐世山, 陈幸, 等. 基于三角窗耦合的 SIW 径向滤波功分器[J]. 微波学报, 2021, 37(S1): 89-92.
CHEN S L, QI S S, CHEN X, et al. SIW radial filter power splitter using triangle window coupling[J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(S1): 89-92. (in Chinese)
- [3] WANG X, ZONG Z Y, WU W. Compact filtering power divider using mixed quarter- and eighth-mode substrate integrated waveguide resonant cavities with flexible design [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2022, 32(2):1-10.
- [4] XIAO S W, YANG S W, ZHANG H Y, et al. A low-profile wideband tightly coupled dipole array with reduced scattering using polarization conversion metamaterial[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(8): 5353-5361.
- [5] CHENG Y, ZHU H R, HUANG Z X, et al. Filtering power divider with phase shift output[C]//2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). Piscataway: IEEE, 2020: 1-3.
- [6] EOM D S, BYUN J, LEE H Y. Multilayer substrate integrated waveguide four-way out-of-phase power divider[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(12): 3469-3476.
- [7] CHENG Y J, HONG W, WU K. Broadband self-compensating phase shifter combining delay line and equal-length unequal-width phaser[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(1): 203-210.
- [8] NIEMBRO-MARTÍN A, NASSERDDINE V, PISTONO E, et al. Slow-wave substrate integrated waveguide[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(8): 1625-1633.
- [9] JIN H Y, WANG K D, GUO J P, et al. Slow-wave effect of substrate integrated waveguide patterned with microstrip polyline[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(6): 1717-1726.
- [10] JIN H Y, ZHOU Y L, HUANG Y M, et al. Slow-wave propagation properties of substrate integrated waveguide based on anisotropic artificial material[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9): 4676-4683.
- [11] LIU S, XU F, DENG S S, et al. Dual-layer slow-wave half-mode substrate integrated waveguide E-plane coupler [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(6): 2992-2996.
- [12] ZHOU Y L, HUANG Y M, JIN H Y, et al. Slow-wave half-mode substrate integrated waveguide 3-dB Wilkinson power divider/combiner incorporating nonperiodic patterning[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(9): 765-767.
- [13] HUANG Y M, ZHOU Y L, DING S, et al. Non-uniform polylines enabled slow-wave half-mode substrate integrated waveguide for flexible phase shifting application[C]//2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). Piscataway: IEEE, 2020: 1-3.
- [14] JIN H Y, BU S Q, LUO G Q, et al. A millimeter-wave

- broadband E-plane out-of-phase power divider integrated with rectangular waveguide to substrate integrated waveguide transition[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63(4): 1012-1017.
- [15] ZHU H S, MA Y, FENG W J, et al. Wideband power dividers using multi-layer substrate integrated waveguide and microstrip line coupling technology[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2022, 32(2): 1-8.
- [16] CHEN Q, XU J. A two-layer substrate integrated waveguide out-of-phase power divider[J]. International Journal of Electrical Energy, 2013, 1(3): 152-155.
- [17] XU F, WU K. Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(1): 66-73.
- [18] ELEFThERIADES G V, BALMAIN K G. Negative-Refractive Metamaterials: Fundamental Principles and Applications[M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005: 1-46.
- [19] DONG Y D, YANG T, ITOH T. Substrate integrated waveguide loaded by complementary split-ring resonators and its applications to miniaturized waveguide filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(9): 2211-2223.
- [20] DONG Y D, ITOH T. Substrate integrated waveguide loaded by complementary split-ring resonators for miniaturized diplexer design[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011, 21(1): 10-12.
- [21] LI X Q. New Resonances, Gratings, and Slow-Wave Structures Based on 2D Periodic Structures[M]. Los Angeles: University of California, 2018.

作者简介



黄 文 女,1984年出生,重庆万州人。重庆邮电大学光电工程学院副教授、硕士生导师。主要研究方向为射频微波电路和天线。
E-mail: huangwen@cqupt.edu.cn



詹中杰 男,1998年出生,重庆江津人。现为重庆邮电大学光电工程学院在读硕士研究生。主要研究方向为微波射频电路及天线。
E-mail: 1415213927@qq.com