



·高功率微波技术·

## 双枝节加载的 L 波段宽带高隔离度定向耦合器\*

马 壮, 周东方, 张德伟, 张 毅, 吕大龙

(战略支援部队 信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450001)

**摘 要:** 提出了一种小型化双枝节加载的 L 波段微带线定向耦合器。使用功率相消技术提高定向耦合器的隔离度, 并且采用两根长度不同的加载枝节分别在两个相近的频点上反射信号, 从而实现耦合器的带宽扩展; 同时采用缺陷地结构的慢波特性减小该定向耦合器的物理尺寸, 并利用缺陷地结构产生的陷波, 合并上述两根枝节反射抵消产生的两个陷波, 进一步提高定向耦合器的带宽和隔离度。该耦合器工作在 L 波段, 耦合度约为 10 dB, 在整个 L 波段内的隔离度均优于 -20 dB, 最大约为 -52.81 dB, 相对带宽为 60%。最后对设计的定向耦合器进行加工和测试, 测试与仿真结果一致性较好, 证明了该电路的可行性。

**关键词:** 定向耦合器; 隔离度; 相对带宽; 功率相消; 缺陷地结构

中图分类号: TN715

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210289

## Dual-branch loaded L-band broadband high isolation directional coupler

Ma Zhuang, Zhou Dongfang, Zhang Dewei, Zhang Yi, Lü Dalong

(Information Engineering College, PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** This paper presents a miniaturized L-band microstrip line directional coupler loaded with double branches. Power cancellation technology is used to increase the isolation of the directional coupler, and two loading branches with different lengths are used to reflect signals at two similar frequency points respectively, so as to realize the bandwidth expansion of the coupler; at the same time, the slow wave characteristics of the defective ground structure are used to reduce the physical size of the directional coupler, and the notch generated by the defective ground structure is used to combine the two notch waves generated by the reflection of the two branches to further improve the bandwidth and isolation of the directional coupler. The coupler works in the L-band, the coupling is about 10 dB, the isolation in the entire L-band is better than -20 dB, and the maximum is about -52.81 dB, and the fractional bandwidth is 60%. Finally, the designed directional coupler is processed and tested, and the test and simulation results are in good agreement, which proves the feasibility of the circuit.

**Key words:** directional coupler, isolation degree, fractional bandwidth, power cancellation, defective ground structure

定向耦合器是射频前端系统中的重要组件之一, 广泛应用于功率检测电路中, 可在宽频范围内进行功率分配和功率合成。其主要功能是对某一确定传输方向的微波功率进行监视、测量等。随着微波通信系统的发展, 宽带宽、高隔离度的定向耦合器越来越受到人们的青睐。

基于微带线的定向耦合器具有体积小、质量轻、制造简单和易于集成的优点, 被广泛用于微波/毫米波电路系统中。但微带线具有准 TEM 特性, 奇偶模相速度不相等, 导致隔离度较低。因此, 一直以来不断有研究尝试不同的方法对定向耦合器进行改进, 来提高其带宽和隔离度。对于如何提高带宽, 文献 [1] 提出了一种带有缺陷地的结构的宽带分支线耦合器, 在每个分支线对应的接地位置都蚀刻一个大的矩形槽, 通过矩形槽的不同宽度影响微带线的特性阻抗来扩大耦合器的带宽。文献 [2] 设计了使用三根并联耦合线耦合的两段式超宽带 90°混合耦合器, 耦合器具有 3 根并联耦合线, 并联耦合线的一端接地, 一端接在分支线耦合器上。文献 [3] 通过将一个带状线耦合器

\* 收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2021-12-06

基金项目: 国家科技重大专项项目

联系方式: 马 壮, 976093822@qq.com。

插入集成到一个基片集成波导定向耦合器中,提出了一种紧凑型平面交叉定向耦合器。通过这种多层结构,实现了较宽的相对带宽。文献[4]所提出的耦合器由两条椭圆形的微带线组成,它通过椭圆形的槽宽边带耦合,实现了较宽的带宽。而对于如何提高隔离度,文献[5]在传统的微带线定向耦合器的基础上,在其中一个端口引入了一个短路枝节,通过控制其形状和位置,调整该端口反射波相位和幅度,提高了其隔离度。文献[6]在文献[5]的基础上,通过使用缺陷地结构(DGS)技术,缩小了定向耦合器的尺寸。文献[7]通过两个额外的短路短截线修改环形耦合器,并对接地层进行图案化设计,改善了环形耦合器的隔离度和平衡。文献[8]在两条耦合线之间使用了补偿电容器,补偿了相速度的不平衡,提高了定向耦合器的隔离度,但在耦合线上加入补偿电容,影响了连接点的阻抗。所以文献[9]在两条耦合线之间使用了浮动短截线,不仅起到了额外的电容补偿的作用,还能降低奇模相位速度,而且对所需频率范围内的阻抗没有影响。文献[10]在耦合器四个端口加载了电感,提高了隔离度。文献[11]则是在耦合线上通过加载高阻抗线等效为电感,对定向耦合器实现了电感加载,提高了耦合器的隔离度。

本文提出了一种新型的L波段定向耦合器结构。使用功率相消技术增加耦合器的隔离度,使用两根长度不同的短路枝节,每根枝节都是一根四分之一波长接地线,两根长度相近的枝节就在两个相近的频点上反射信号,以此来增加耦合器的带宽和隔离度;同时使用缺陷地结构来减小耦合器的物理尺寸,并且利用缺陷地结构产生的陷波,合并了上述两根枝节反射抵消产生的两个陷波,进一步提高了定向耦合器的带宽和隔离度。该定向耦合器耦合度约为10 dB,在整个L波段内的隔离度均优于-20 dB,最大约为-52.81 dB,相对带宽为60%。通过加工及测试,测试结果与仿真结果一致性较好,证明了此方法的可行性。

## 1 定向耦合器设计与分析

### 1.1 功率相消技术

传统的微带线定向耦合器的S矩阵如下式所列<sup>[12]</sup>(这里假设3端口为耦合端口,4端口为隔离端口)

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & T & C & I \\ T & 0 & I & C \\ C & I & 0 & T \\ I & C & T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

矩阵中的***b***和***a***分别表示端口的反射波和入射波;下标表示对应的端口;***T***、***I***、***C***分别表示直通、隔离和耦合因子。

而在其3端口,即耦合端口存在以下关系

$$a_3 = \Gamma b_3 \quad (2)$$

将这个式子带入上述矩阵可得

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^2\Gamma & T+C\Gamma I & 1+C\Gamma I \\ T+C\Gamma I & I^2\Gamma & C+T\Gamma I \\ 1+C\Gamma I & C+T\Gamma I & T^2\Gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

而由S参数理论可得, $S_{41}$ 越小,隔离度越大。则可看出,只有当 $S_{41}=0$ ,即 $1+C\Gamma I=0$ 时候才能提升耦合器的隔离度。这时端口3的反射系数为

$$\Gamma = -1/T C \quad (4)$$

而由传输线理论可得

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (5)$$

其中, $V_0^-$ 为反射波电压; $V_0^+$ 为入射波电压; $Z_{in}$ 为输入阻抗; $Z_0$ 为传输线特性阻抗。

继而可得输入阻抗

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta\alpha)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta\alpha)} \quad (6)$$

其中, $Z_L$ 为负载抗。由式(6)可知,端口1泄露到4的信号,和耦合到3的信号,相位差为四分之一一个波长。如果让加载枝节在端口3反射信号,并与端口4的泄露信号相位相反,即相差二分之一一个波长,则短路加载枝节的长度约为四分之一一个波长。

## 1.2 缺陷地结构

缺陷地结构<sup>[13-16]</sup>是在接地金属板上蚀刻周期性、非周期性的栅格结构,这种结构会干扰接地层中的屏蔽电流分布,进而改变微带线的分布式电容和电感,使微带线具有带阻和慢波特性的。带阻特性能够限制某些频率的电磁波传播,进而形成陷波,提高带宽和隔离度,而慢波特性能够减小电路的尺寸。

因此,选择合适的缺陷地结构及其参数,能够有效地形成陷波,提高定向耦合器的带宽和隔离度,同时也能够减小定向耦合器的物理尺寸。

## 1.3 本文定向耦合器设计与分析

本文提出的定向耦合器结构如图1所示。该结构将功率相消技术和缺陷地结构进行结合,使用上、下两根短路枝节。而由图1可看出,上、下两根短路枝节长度相近,都是四分之一波长接地线,这样就能够两个相近的频点上反射信号,进而拓宽了耦合器的带宽,并提高了隔离度。同时在耦合微带线下方的接地板上蚀刻出一个矩形缺陷地结构,利用DGS结构的慢波特性减小定向耦合器的物理尺寸,并借助产生的陷波,合并上述两根枝节反射抵消产生的两个陷波,进一步提高了带宽和隔离度。

本文使用ANSOFT公司的电磁仿真软件HFSS 15.0对该定向耦合器进行仿真。介质板的材料为F4BM-2,相对介电常数为2.65,介质厚度为1.0 mm。各单元尺寸如下: $L=33.73$  mm,  $W=2.74$  mm,  $S=0.25$  mm,  $L_p=14$  mm。第一根短路枝节的尺寸如下: $L_{d1}=2.5$  mm,  $L_{s1}=24$  mm,  $L_{w1}=3.1$  mm,  $L_{m1}=5.45$  mm。第二根短路枝节的尺寸如下: $L_{d2}=3.5$  mm,  $L_{s2}=24$  mm,  $L_{w2}=3.1$  mm,  $L_{m2}=5.9$  mm,两根短路枝节的宽度均为0.5 mm。接地金属板上蚀刻矩形尺寸如下: $A=17$  mm,  $B=10$  mm。

图2为设计的耦合器仿真结果图。从图中可见,该耦合器的耦合度约为10 dB,在整个L波段内的隔离度均优于-20 dB,最大约为-52.81 dB,相对带宽为60%。而回波损耗均高于25 dB。

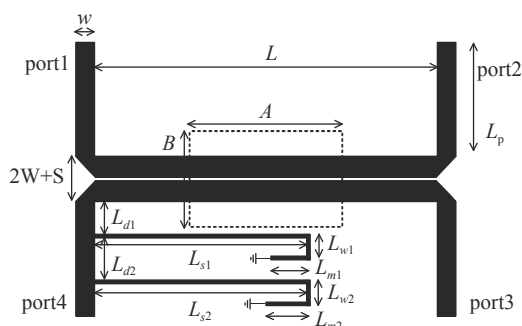


Fig. 1 Structure of the directional coupler designed in this paper

图1 本文设计的定向耦合器结构图

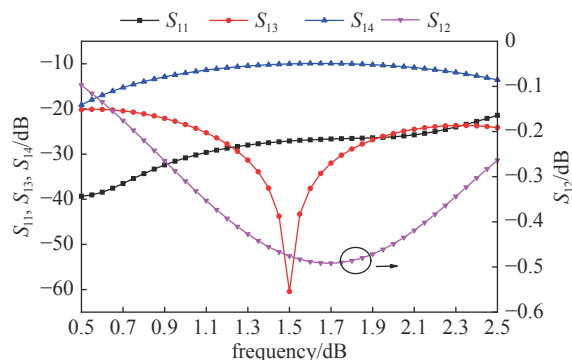


Fig. 2 Simulation results of the directional coupler in this paper

图2 本文定向耦合器的仿真结果

本设计使用了两根长度相近的枝节,一方面是为了在相近的频点上产生陷波,从而扩展定向耦合器的带宽;另一方面,使用两根枝节,能够反射相消更多的信号,从而提高了定向耦合器的隔离度。同时利用DGS结构的慢波特性减小了定向耦合器的物理尺寸,并借助产生的陷波进一步提高了带宽和隔离度。为了验证两根枝节以及缺陷地结构的作用,对其分别进行仿真分析。

首先对DGS结构的作用进行分析。在图1的基础上,去掉DGS结构,即填补背面地板蚀刻的矩形缺陷地结构,然后对填补后的结构进行仿真分析,其结果如图3所示。

图3中的结构没有DGS结构,此时只有两根枝节的作用。从图中可以看出,两根枝节分别在1.4 GHz和2.65 GHz反射相消了信号,并形成了两个陷波。因此DGS结构的作用之一就是产生一个陷波,合并上述两根枝节产生的两个陷波,进一步提高了该定向耦合器的带宽和隔离度。至于其小型化的作用,则是DGS结构的慢波特性,增大了中心频率。频率越大,对应的微波器件物理尺寸越大。而在不增大物理尺寸的情况下,使用DGS结构提高了中心频率,就相当于达到了小型化的目的。

为了更加直观地展示DGS结构的作用,现将有DGS结构和无DGS结构时的隔离度结果展示如图4所示。从图4中可以看出,当无DGS结构时,两根枝节分别在1.4 GHz和2.65 GHz处形成了两个陷波。而有DGS的结构,在两个频率中间又形成了一个陷波,并合并了上述两根枝节产生的两个陷波,最终综合表现为在1.5 GHz的中心

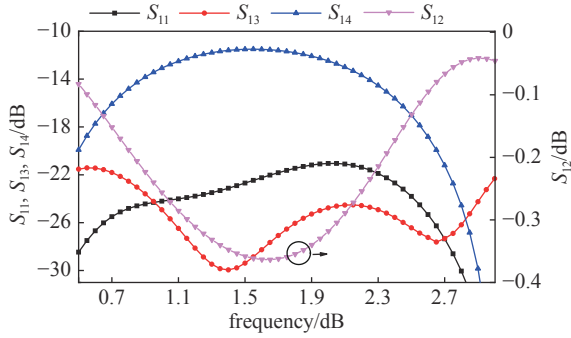


Fig. 3 Simulation results without DGS structure

图 3 无 DGS 结构时仿真结果图

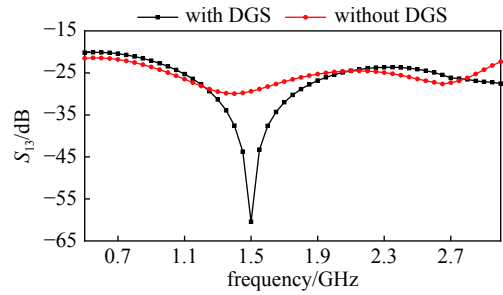
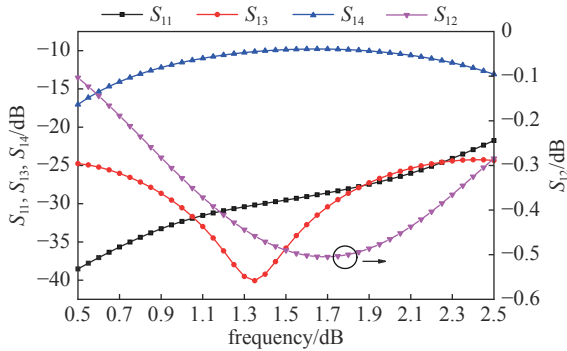


Fig. 4 Simulation results with or without DGS structure isolation

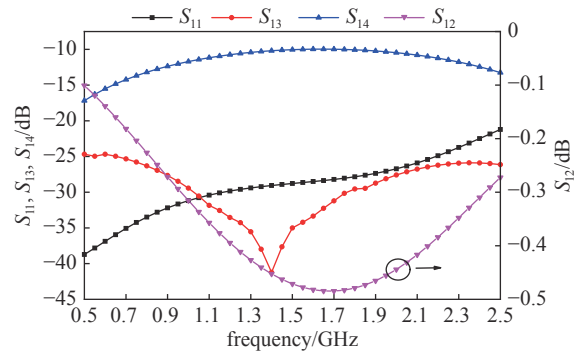
图 4 有无 DGS 结构隔离度仿真结果图

频率处形成一个很深的陷波, 达到了较好的隔离度和带宽。

分别对去掉上、下两根枝节的结构进行仿真分析。单根枝节加 DGS 结构的整体结构仿真结果如图 5 所示。



(a) upper branch+DGS structure



(b) lower branch+DGS structure

Fig. 5 Simulation results of single branch + DGS structure

图 5 单枝节+DGS 结构仿真结果图

从上面对 DGS 结构的分析中, 我们已知两根枝节在两个不同频点反射相消了信号, 产生了两个陷波。而图 5(a)(b)分别是上、下枝节和 DGS 结构共同作用的结果。从图 5 中可以看出, 在上、下单枝节的作用下, 隔离度只有  $-40.6$  dB 和  $-43.2$  dB, 带宽和中心频率点也都不能达到要求。因此, 单根枝节不能满足本设计要求, 必须使用双枝节进行反射相消, 以达到提高带宽和隔离度的目的。

为了更加直观具体地阐述表示双枝节结构对功率相消的作用, 以及更直观地与单枝节结构进行对比, 下面给出了所设计定向耦合器分别在单、双枝节情况下的表面电流分布, 如图 6 所示。从图中可以看出, 双枝节定向耦合器在端口 3 处的表面电流远小于对应的单枝节定向耦合器, 从而证明了所添加枝节反射相消了更多的信号, 达到了提高隔离度的效果。

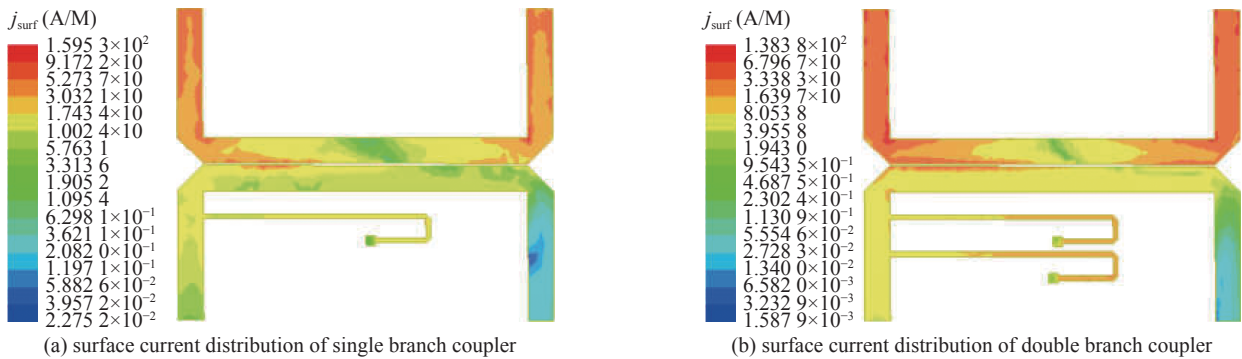


Fig. 6 Surface current distribution of the designed directional coupler

图 6 所设计定向耦合器表面电流分布

两根枝节之间距离的大小对结果的影响仿真结果如下图 7 所示。可以看出, 当两根枝节距离较近时 (2.5 mm), 仿真结果很差, 这是由于两根枝节距离太近, 二者相互之间产生了耦合, 影响了性能。随着两根枝节之间距离不断

增加,可以看到隔离度逐渐提高,直到二者距离达到 3.5 mm 时达到最大值。此时二者距离继续加大,结果将会变差。而从小型化角度来看,二者之间的距离对中心频率的影响不大。但是采用了将枝节弯折的方式,也达到了部分小型化的目的。因此,双枝节的加载,对中心频率影响不大,主要是为了增加隔离度和带宽,而弯曲的方式,达到了枝节小型化的目的。而整个器件的小型化则主要是由 DGS 结构达成的。

## 2 加工及测试结果

参照上述优化之后的尺寸制作的定向耦合器实物如图 8 所示。使用 Agilent N5230A 矢量网络分析仪对其进行了测试,仿真和实际测试的  $S$  参数对比如图 9 所示。从图 9 中可以看出,本文所设计的定向耦合器耦合度约为 9 dB,在整个 L 波段内的隔离度均优于 -20 dB,最大约为 -52.81 dB,相对带宽为 60%,达到了宽带和高隔离度的要求。而通过 DGS 结构的慢波特性和,提高了中心频率,达到了小型化的目的。

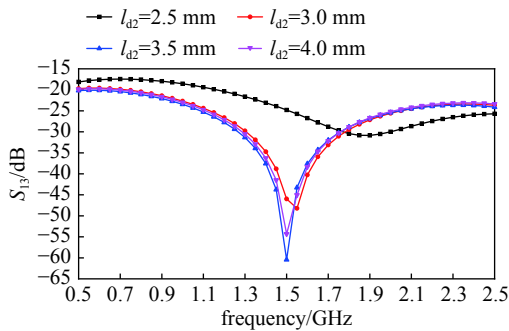
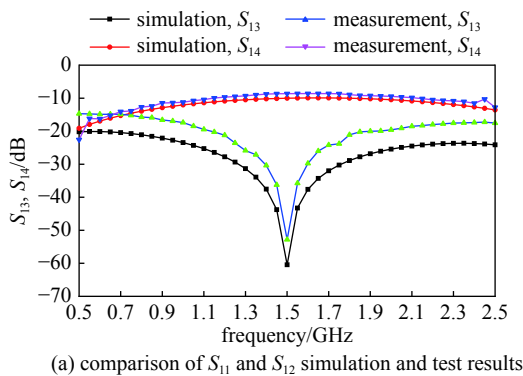


Fig. 7 Influence of the distance between two branches on the isolation

图 7 两根枝节间距离对隔离度的影响



(a) comparison of  $S_{11}$  and  $S_{12}$  simulation and test results

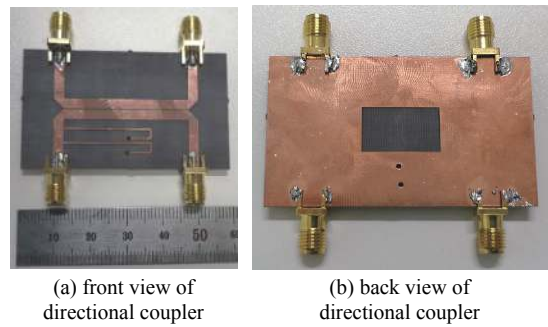
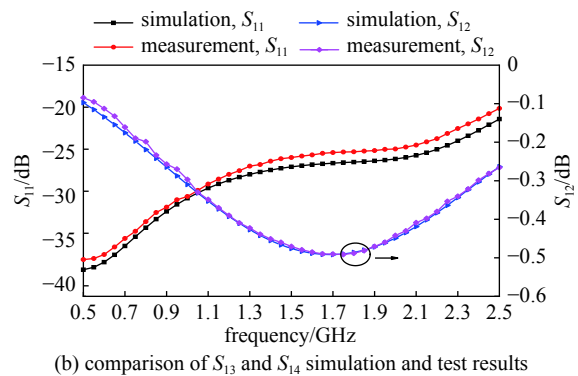


Fig. 8 The physical diagram of the directional coupler proposed in this paper

图 8 本文提出的定向耦合器实物图



(b) comparison of  $S_{13}$  and  $S_{14}$  simulation and test results

Fig. 9 Comparison of simulated and measured  $S$  parameters

图 9 仿真和实测  $S$  参数对比

测试结果与仿真结果基本吻合,其中的误差可能是由于板材制造公差及测试误差造成。测试误差主要包含两个方面:一是由于作者焊接水平有限,导致 SMA 接头焊接地不是很完美,这在一定程度上影响了测试结果;二是本设计制造的实物仅为板子结构,没有制作相应的空气盒子,而在仿真时是添加了空气盒子后的结果,这在一定程度上也会导致结果变差。

## 3 结论

本文采用功率相消技术和缺陷地结构进行结合的方法,设计了一款工作在 L 波段的高隔离度微带线定向耦合器。使用两根长度不同的枝节进行功率相消,提高了定向耦合器的带宽和隔离度;同时使用 DGS 结构的慢波特性和减小了定向耦合器的物理尺寸,并利用 DGS 结构产生的陷波,合并了上述两根枝节反射抵消产生的两个陷波,进一步增加了定向耦合器带宽的隔离度。通过对设计的定向耦合器进行加工和测试,测试与仿真结果一致性较好,证明了该电路的可行性。

### 参考文献:

[1] Tang C W, Chen M G, Lin Y S. Broadband microstrip branch-line coupler with defected ground structure[J]. *Electron Lett*, 2006, 42(25): 1458-1460.

- [2] Yoon H J, Min B W. Two section wideband  $90^\circ$  hybrid coupler using parallel-coupled three-line[J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2017, 27(6): 548-550.
- [3] Cao Y Y, Wu Y W, Jiang Z, et al. A compact millimeter-wave planar directional coupled crossover with a wide bandwidth[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020: 1-4.
- [4] Muraguchi M, Yukitake T, Naito Y. Design of compact directional couplers for UWB applications[J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2007, 55(2): 189-194.
- [5] Wan K K, Moon Q L, Jin H K. A passive circulator with high isolation using a directional coupler for RFID[J]. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2006: 1177-1178.
- [6] 陈蕾, 尚宇, 魏峰. 一种新的缺陷地微带线定向耦合器[J]. *西安工业大学学报*, 2008, 28(4): 372-374. (Chen Lei, Shang Yu, Wei Feng. A new defective ground microstrip line directional coupler[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2008, 28(4): 372-374)
- [7] Chang W S, Liang C H, Chang C Y. Wideband high-isolation and perfect-balance microstrip rat-race coupler[J]. *IEEE Electronics Letters*, 2012, 48(7): 382-383.
- [8] 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.
- [9] Zhang Z H, Rautschke F, Nguyen H. A novel structure of high directivity broadband microstrip coupler[C]//*IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*. 2015: 1-4.
- [10] 周越, 申冀湘, 宋亮. 电感补偿高方向性的微带定向耦合器[J]. *无线电工程*, 2013, 43(7): 38-40. (Zhou Yue, Shen Jixiang, Song Liang. Microstrip directional coupler with inductance compensation and high directivity[J]. *Radio Engineering*, 2013, 43(7): 38-40)
- [11] 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.
- [12] 杨宇斌. 带短路支节的高隔离度分支线定向耦合器设计研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015. (Yang Yubin. Design and research of high isolation branch line directional coupler with short-circuit branch[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015)
- [13] Rahman A, Verma A K, Boutejdar A, et al. Control of bandstop response of microstrip low-pass filter using slot in ground plane[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, 52(3): 1008.
- [14] Lim J S, Kim C S, Lee Y T, et al. Design of low-pass filters using defected ground structure and compensated microstrip line[J]. *Electron Lett*, 2002, 38(22): 1357.
- [15] Lim J S, Kim C S, Ahn D, et al. Design of the low-pass filters using defected ground structure[J]. *IEEE MTT*, 2005, 53(8): 2539.
- [16] Guo Huili, Xin Huajiang, Xiao Mingzhong. A novel defected ground structure and its application to a low-pass filter[J]. *Microwave Opt Technol Lett*, 2006, 48(9): 1760.