



Design of an E-band Power Dividing/Combining Network Based on H-Plane 3dB Directional Couplers

Chen Peng, Wan Peng, Xu Jinping*

State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, China

Email address:

chenpeng_top@163.com (Chen Peng), Pengwan1124@163.com (Wan Peng), jpxu@seu.edu.cn (Xu Jinping)

*Corresponding author

To cite this article:

Chen Peng, Wan Peng, Xu Jinping. Design of an E-band Power Dividing/Combining Network Based on H-Plane 3dB Directional Couplers. *Science Discovery*. Vol. 7, No. 1, 2019, pp. 50-55. doi: 10.11648/j.sd.20190701.21

Received: April 19, 2019; Accepted: May 20, 2019; Published: May 23, 2019

Abstract: In this paper, an E-band four-channel power dividing/combining network is designed based on H-plane 3dB waveguide directional couplers. Firstly, the waveguide H-plane 3dB directional coupler with working frequency of 71~78GHz is designed by HFSS to achieve low loss and high isolation. According to the phase relationship of each port of the coupler, the topology of the power dividing/combining network is worked out, and then the HFSS simulation analysis model for the whole network is established. On the basis of simulation analysis and optimization, a prototype of the four-channel power dividing/combining network of the E-band were manufactured. A back-to-back testing scheme, where a one-fourth dividing network and a four-in-one combining network is jointed together, is adopted to facilitate the testing work. The measured results show that the overall insertion loss of the power dividing/combining network is less than 2.2dB, with a typical value of 1.7dB, in the frequency range of 72~77GHz.

Keywords: 3dB Directional Coupler, E-band, Power Synthesis, Broadband

基于H面3dB定向耦合器的E波段功率分配/合成网络设计

陈鹏, 万蓬, 徐金平*

东南大学毫米波国家重点实验室, 南京, 中国

邮箱

chenpeng_top@163.com (陈鹏), Pengwan1124@163.com (万蓬), jpxu@seu.edu.cn (徐金平)

摘要: 本文基于H面3dB波导定向耦合器设计了一种E波段四路功率分配/合成网络。首先采用HFSS设计出工作频率为71~78GHz的波导H面3dB定向耦合器, 仿真结果表明, 该耦合器具有低损耗、高隔离等优点。在此基础上, 根据耦合器各个端口的相位关系, 设计了功率分配/合成网络的拓扑结构, 并建立了完整的HFSS仿真分析模型。在仿真分析和优化设计的基础上, 加工制作了E波段四路功率分配/合成网络实验样品, 并进行了一分四和四合一两个网络的背靠背性能测试。实测结果表明, 在72~77GHz的频带范围内, 该功率分配/合成网络整体插入损耗小于2.2dB, 其典型值为1.7dB。

关键词: 3dB定向耦合器, E波段, 功率合成, 宽带

1. 引言

随着毫米波雷达以及通信系统的不断发展，对于宽带、高功率固态功放的需求不断增加。频率的提升使得半导体固态器件尺寸减小，功率容量下降，单个固态器件的输出功率已经无法满足大多数毫米波系统的应用需求[1]。因此，将多个固态器件进行功率合成，是获得高输出功率的一种常用方法。微波功率合成技术一直都是微波技术领域研究的一个重要方向，所以对于低损耗、宽带功分合成网络的设计研究也成为其中最为关键的一环，设计良好的功分合成网络可以大大的提高整机的功率输出，同时提高通信系统通信质量。

在目前的研究中，对于功分合成网络的设计，很多的研究者倾向于运用Y型波导功分器结构来实现，虽然Y型分支结构简单，易于加工，但是其存在的问题也很明显，由于Y型波导功分两支路之间缺少隔离电阻，致使各支路之间的相互干扰也随之增加，然而定向耦合器两路输出信号之间具有良好的隔离，所以依此为基础设计的功分合成网络提高了合成效率和可靠性。通过查阅大量的文献资料

[1-10]，了解到目前对于H面3dB定向耦合器的设计情况，并在相关文献的基础上设计制作的一款E波段H面3dB定向耦合器 [2]，这种耦合器与文献中的相比较，其工作频带更高，在隔离端口的隔离度更高，同时加工制作的过程也相对的更加方便。

2. E波段H面3dB定向耦合器的设计与分析

本文设计的E波段功率分配/合成网络都是基于E波段H面3dB定向耦合器模型来设计的，所以下面对单个的E波段H面3dB定向耦合器进行设计与分析。本文中所设计的定向耦合器模型如下图1中所示。如下图中所示，该定向耦合器的四个端口都是WR-12标准波导，a为波导的宽边尺寸，其中当port1为输入端口时，port2为该耦合器的直通端口，port3为耦合输出端口，port4为隔离端口。从下图中可以看出该结构的耦合器分别是上下和左右对称的，由于其属于上下左右物理对称，所以可以通过采用奇偶模分析方法对四端口网络模型进行分析[2]。

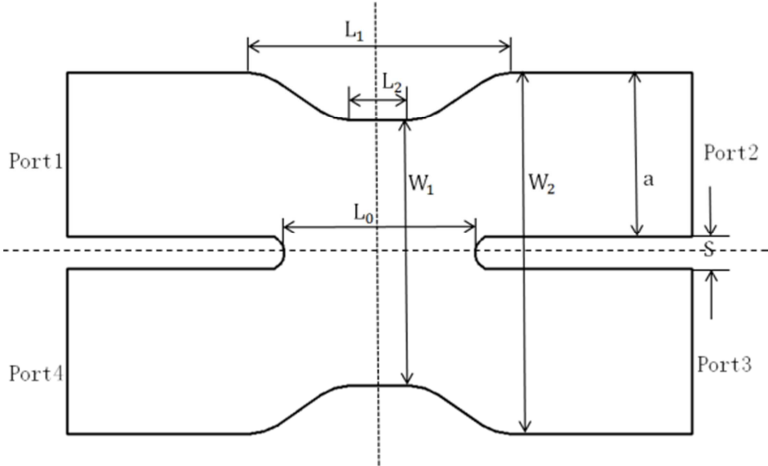


图1 H面定向耦合器结构。

根据上述的基本结构，运用多模等效模型的分析方法，可以得到E波段H面3dB定向耦合器的初步结构参数，并以此作为基础在三维电磁仿真软件HFSS中建立相应的模型进行参数的优化设计，具体的模型结构如图2中所示。

四个端口均是采用标准的WR-12标准波导，宽边a为3.10mm，窄边b为1.55mm，中间的耦合通道长度为L₀，通过改变这个额外的自由参量，可以提高耦合器的带宽。下表1中给出了模型的关键设计参数。

表1 耦合器设计关键参数 （mm）。

参数	L ₀	L ₁	L ₂	W ₁	W ₂	S
数值	3.69	4.47	1.77	5.00	6.80	0.60

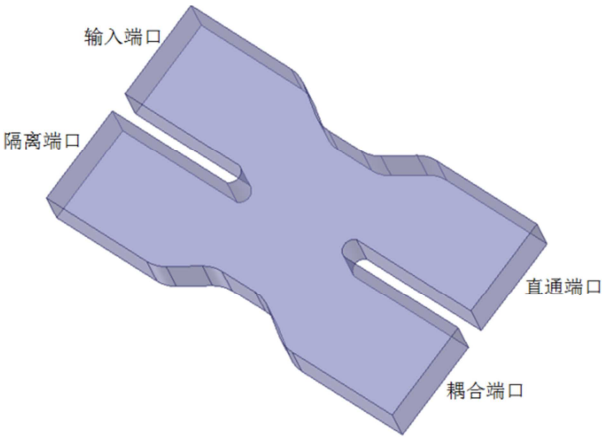


图2 E波段H面3dB定向耦合器。

利用三维电磁仿真软件High Frequency Structure Simulator对上述的模型进行优化设计，通过调整中间耦合通道的长度L₀来改变耦合的隔离度和带宽，仿真得到的结果如下图3、图4所示。在71~78GHz的频带内，耦合器的输入端口的回波损耗小于-19dB，隔离端口的隔离度小于-20dB，直通端口与耦合端口的传输系数接近理想值-3dB，不平衡度小于±0.15dB。在整个频带内耦合端口与直通端口相位相差90±0.2°。

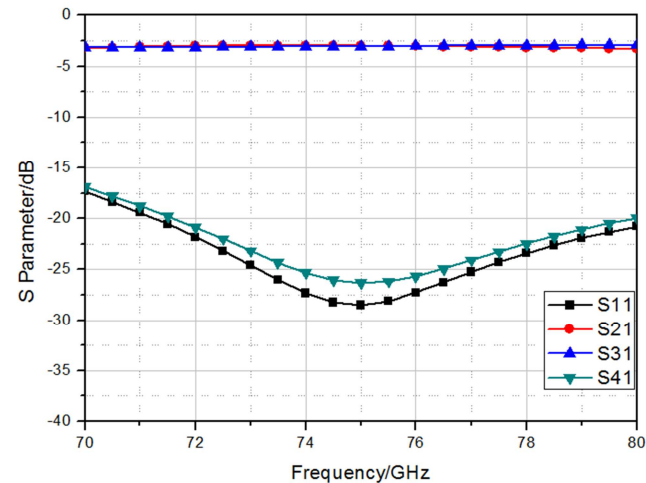


图3 各端口幅频特性。

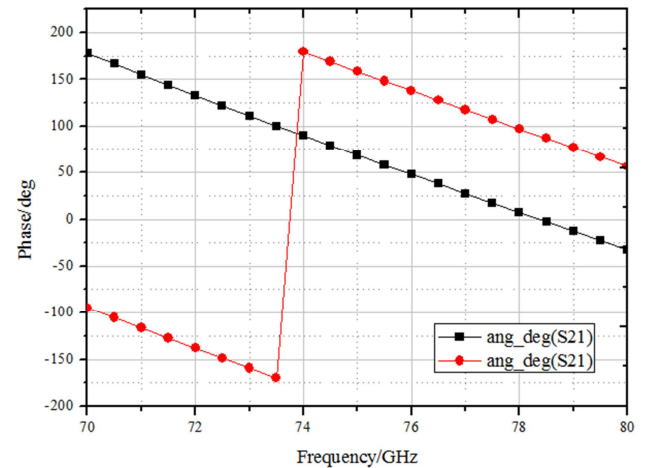


图4 直通端口、隔离端口相频特性。

为了后期加工的方便，在需要倒角的地方进行倒角处理，同时需要注意的是，加工误差会对耦合器的耦合度、端口相位产生影响，当采用多级耦合器级联实现功率分配/合成时，这种误差的叠加将会降低合成效率，所以在加工过程中应尽可能的控制误差范围。

3. H面正交台阶转换结构设计

由于考虑到在实际的工程应用中，需要将在水平面内传播的电磁波转换到与之正交的平面内传播，同时也为了能够实现对于整个功分合成网络的背靠背连接测试，所以需要在功率分配与功率合成网络之间设计一种H面正交台阶转换结构。该结构需要具有插入损耗小、回波抑制度高等特点，保证在转化中对能量的损耗到达最小。

如图5中所示，为E波段H面正交台阶转换结构模型，该正交台阶采用WR-12标准波导传输，其中尺寸如下：波导宽边a和窄边b，台阶高度h和宽度w，以及为了方便进行加工进行的倒角半径R。

其中对该台阶插入损耗、回波抑制度影响最大的尺寸为：台阶高度h和宽度w，在表2中所示给出了该结构的关键设计参数值。

表2 台阶设计关键参数（mm）。

参数	w	h	R
数值	0.75	0.75	0.5

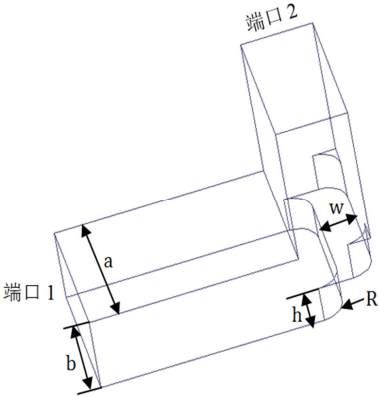
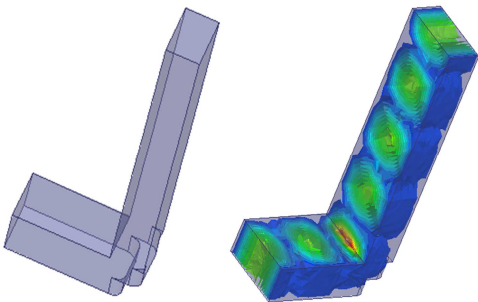
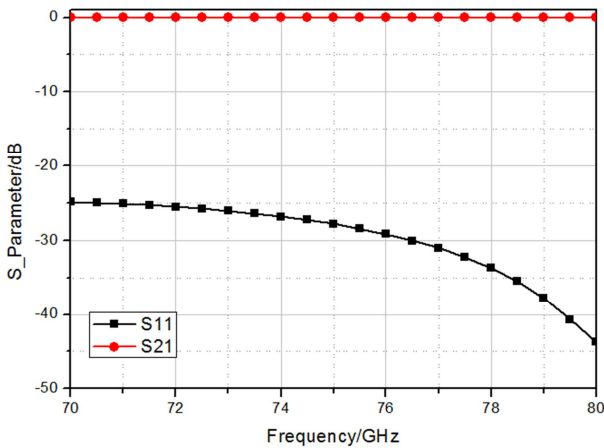


图5 H面正交台阶结构模型。

依据上表中的设计尺寸，可以确定最终的结构，利用HFSS对模型进行建模仿真，其中得到的仿真结果如图6中所示。



(a) 台阶中的场分布



(b) 幅频特性

图6 台阶结构仿真结果。

由上图6可以得出，在70~80GHz的频带范围内，波导输入端口的S11小于-25dB，同时带内的插入损耗优于-0.01dB。最后将该结构运用到整体模型中，使得模型连接成为整体功分/合成网络。

4. 基于H面3dB定向耦合器的E波段功率分配/合成网络的设计与分析

基于行波功率合成原理, 结合各个端口的相位关系, 设计了功率分配/合成网络的拓扑结构, 并在上述的H面3dB定向耦合器基础之上, 建立了E波段功率分配/合成网络。在本次的设计中采用的是四路功率分配/合成结构, 输入端口将输入的信号分为等幅、相差 90° 的两路信号,

两路信号再分别的各自通过一个H面3dB定向耦合器, 将信号分为四路信号, 四路信号分别通过功率放大器后, 再经过功率合成网络合成后输出。功率分配/合成模型如下图7中所示, 各个端口之间的相对距离保持一致, 2、6端口, 3、7端口, 4、8端口, 5、9端口之间分别接入功放模块, 由于输入输出端口(1、10)不是镜像对称的结构, 为了满足实际的工程需要, 在输出输入端口处进行倒角处理, 保证两个端口在同一中心线上。

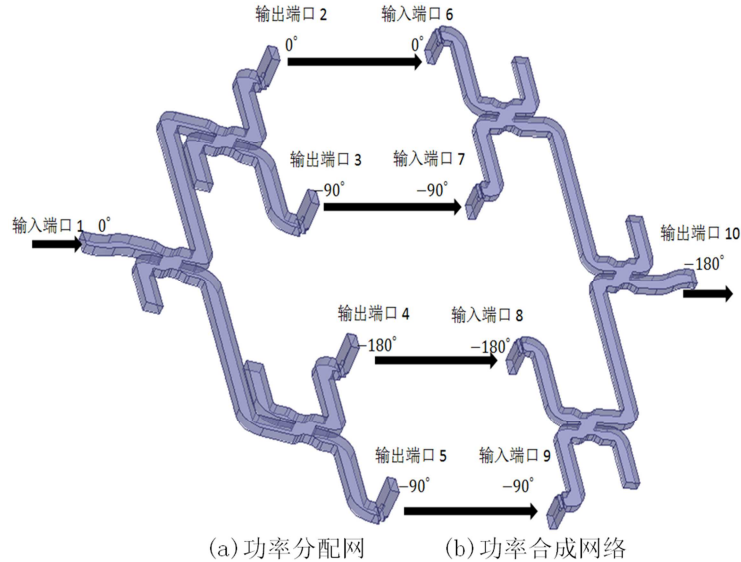
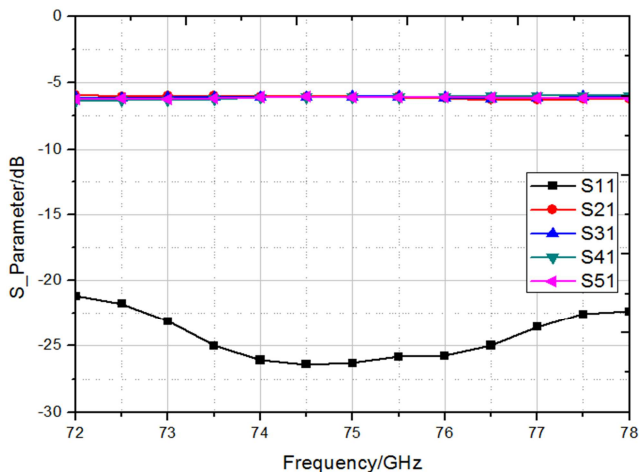
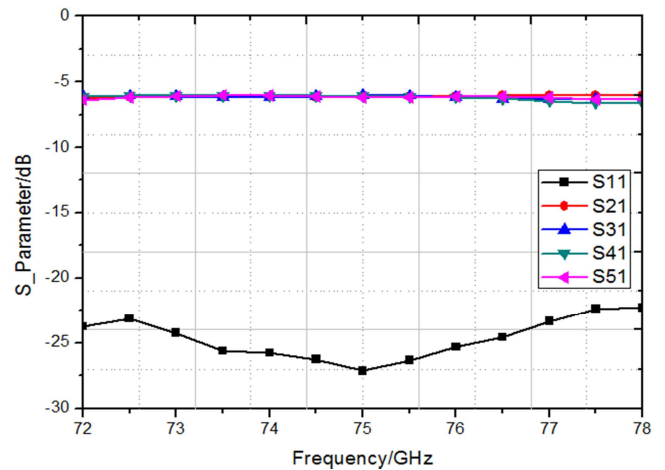


图7 功率分配/合成模型。

由于运用耦合器来搭建功率分配/合成结构模型在各个输出端口处存在相位差, 如上图7(a)中所示, 端口2、3, 端口4、5之间分别存在 90° 相位差, 所以为了保证在功率合成网络中具有最大的功率合成效率, 就需要保证信号在经过功放模块之后存在很小的相位波动, 所以在选择功放芯片时最好选用同一批次生产的产品, 同时需要严格的控制功率分配/合成网络腔体的加工误差范围。为了防止隔离端口处的信号反射进入到主传输路径中, 需要在隔离端口添加吸收式负载, 在工程上较为简单的方法是在隔离端口处贴覆吸波材料, 吸波材料是一种能够有效的吸收电磁波并让其衰减的材料。对上述模型具体的仿真结果如图8所示。



(a) 功率分配网络仿真结果



(b) 功率合成网络仿真结果

图8 功率分配/合成网络仿真结果。

由上得到的仿真结果中显示, 在72~78GHz的频带范围内, 功率分配网络的输入端口的回波损耗小于-21dB, 四个输出端口的传输系数接近理想值-6.02dB, 不平衡度小于 ± 0.3 dB; 功率合成网络的输入端口的回波损耗小于-22dB, 四个输出端口的传输系数接近理想值-6.02dB, 其不平衡度小于 ± 0.3 dB。

5. E波段功率分配/合成网络的测试与分析

基于上述的建模仿真设计, 最终对E波段功率分配/合成网络的实验加工样品如图9中所示。

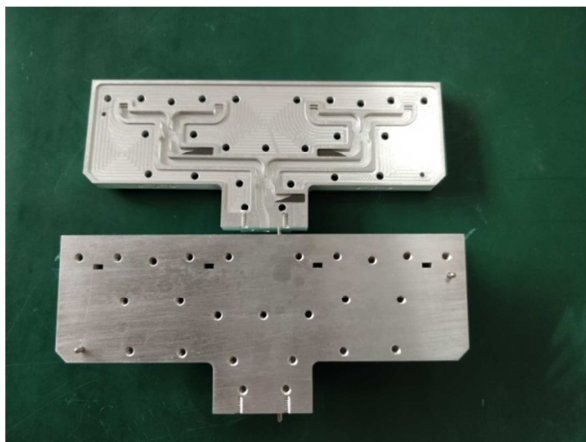


图9 E波段功率分配/合成网络实物图。

由于实验室中所使用的信号源输出频率不能够到达该网络所使用的频带范围, 所以需要搭建一个满足测试要求的系统。在测试时, 由Agilent 8527D信号源提供输入功率, 然后通过一个V波段无源二倍频器, 由于实验室中所使用的V波段无源二倍频器所需要的输入激励功率要求较高, 所以在前级加上一个Ka波段0.5W功放, 使得倍频器处于正常工作状态, 倍频输出信号通过一个连接波导输入到功率分配/合成网络中, 最后输出功率通过Agilent W8486A功率探头输出到功率计(Agilent N1911A)中显示。测试过程中, 首先对未加入功放无源结构的测试系统进行单独的功率输出测试; 再将E波段功率分配/合成网络接入到测试系统中, 测试此时的输出功率。最后将对应频点上, 两次测试的结果相减, 就可以推算出该网络的S21。搭建的测试系统如图10中所示。

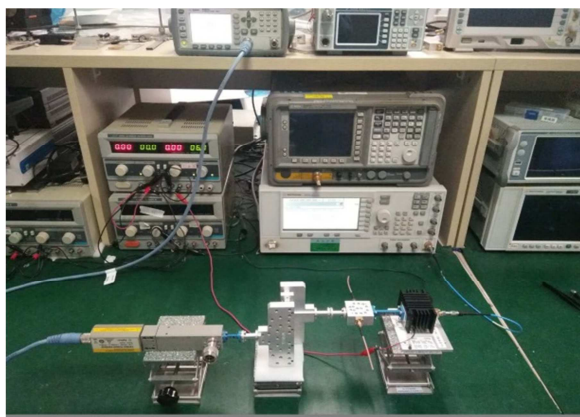


图10 搭建的测试系统。

所得到的实测结果如下图中11中所示, 在72GHz~77GHz频带范围内, 该功率分配/合成网络的实测插入损耗平均值在1.7dB左右, 可以推算出单个功率分配网络或者功率合成网络的插入损耗约为0.85dB。网络的整体实测插损比仿真结果平均偏高0.6dB左右, 主要原因可

能由加工误差、装配误差造成支路之间不平衡, 引入额外的合成损耗导致。

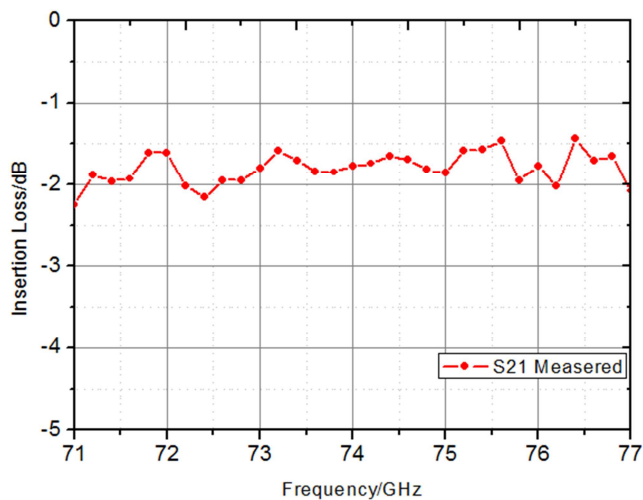


图11 E波段功分/合成网络实际插损测试结果。

6. 结论

本文基于行波功率合成原理, 在E波段H面3dB定向耦合器的基础之上, 设计了一种E波段功率分配/合成网络, 该网络具有宽带、低损耗、良好的幅相一致性等特点。实测结果表明, 在72~77GHz的频带范围内, 该功率分配/合成网络的背靠背测试插入损耗典型值为1.7dB, 该网络对研究E波段功率分配/合成技术具有较高的工程价值。

参考文献

- [1] 檀雷, 殷康, 徐金平. 基于波导-微带探针阵列Ka全频段功率合成放大的设计[J]. 微波学报, 2017.10.
- [2] 李兴萨, 李灿, 黄建等. Ka波段H面宽带3dB波导定性耦合器[J]. 第十五届全国半导体集成电路、硅材料学术会议, 2017.11.
- [3] 谢小强, 刘晓等. Ka波段25W固态功率合成放大器[J]. 红外与毫米波报, 2011.8.
- [4] Chang K, Sun C. Millimeter-wave power-combining techniques [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1983, 31 (2): 91-107.
- [5] E. J. Wilkinson, An N-Way Hybrid Power Divider [J]. *Ire Trans on Microwave Theory and Techniques*, 1960, Vol 8 (1): 116-118.
- [6] 万蓬, 檀雷, 殷康, 徐金平. E波段宽带行波功率分配/合成网络的设计[C]. 2018年全国微波毫米波会议论文集(下册), 2018.5.
- [7] 袁士涛, 侯艳茹, 高静, 李霞, 吴莹莹. 一种宽带毫米波波导分支定向耦合器[J]. 微波学报, 2016.8.

- [8] Ingram D L, Stones D I, Elliott J H, et al. A 6-W Ka-band power module using MMIC power amplifiers [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1997, 45 (12): 2424-2430.
- [9] Russell K J. Microwave power combining techniques [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1979, 27 (5): 472-478.
- [10] Xie X, Zhao X, Liu X. A waveguide-based spatial power combining module at higher millimeter-wave frequency [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, 34 (3): 299-307