

基于薄膜电阻的波导 E-T 结功率分配/合成器

王斌, 田兵, 汪春霆

(中国电子科技集团公司第 54 研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要: 单个器件输出功率不满足系统要求时, 功率合成技术是提高系统输出功率的有效方法. 本文详细研究了基于薄膜电阻的波导 E-T 结功率分配/合成器, 最终设计了一种新型的基于薄膜电阻的波导 E-T 结. 该结构具有高隔离度、低插入损耗、小体积、宽频带等优点. 通过合理设计薄膜电阻的长宽比, 尽量增大薄膜电阻的面积, 并且采用高导热的氮化铝陶瓷基板作为微带和薄膜电阻的介质基板, 提高了基于薄膜电阻的波导 E-T 结承受的功率. 利用三维电磁场仿真软件 HFSS 对其进行了建模仿真, 加工的实物经过测试在 25 ~ 34 GHz 插入损耗小于 0.2 dB, 回波损耗优于 -15 dB, 隔离度优于 10 dB. 经对比, 实测结果与仿真结果吻合, 具有较好的工程应用价值.

关键词: Ka 频段; 功率分配/合成器; 波导 E-T 结; 薄膜电阻

中图分类号: TN73 **文献标识码:** A

Power divider/combiner of waveguide E-T junction based on thin film resistor

WANG Bin, TIAN Bing, WANG Chun-Ting

(The 54th Research Institute of CECT, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Power combining technology is an effective method to improve the output power of a system when the output power of a single amplifier does not meet the requirement of the system. In this paper, a new type of waveguide E-T junction power divider/combiner based on thin film resistor was studied in detail, and a novel waveguide E-T junction based on thin film resistor was designed. The structure has the advantages of high isolation, low insert loss, small size, and wide band. In order to increase the power which the waveguide E-T junction based on thin film resistor can bear, we try to increase the area of the thin film resistor by designing the length to width ratio of the thin film resistor reasonably, and use the aluminum nitride substrate with high thermal conductivity as the dielectric substrate of the microstrip and thin film resistor. The novel waveguide E-T junction based on thin film resistor was simulated in 3D electromagnetic simulation software HFSS. After testing, the insert loss was less than 0.2 dB, the return loss was better than -15 dB, the isolation was better than 10dB in 25 ~ 34 GHz. The measured results were consistent with the simulated results, and the structure has a good engineering application value.

Key words: Ka-band, power divider/combiner, waveguide E-T junction, thin-film resistor

PACS: 07.57.Kp, 84.40.-x

引言

卫星通信系统中, EIRP 是重要系统性能指标之一, 天线增益确定以后, 该指标主要取决于发射机的

输出功率. 为提高发射机的输出功率, 通常采用功率合成技术, 现有的微波、毫米波功率合成技术可以分为二进制树形结构、行波结构、径向结构等. 二进制树形结构因结构简单、合成效率高、频带宽等优点而

收稿日期: 2016-07-07, 修回日期: 2016-09-18

Received date: 2016-07-07, revised date: 2016-09-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2015AA015701)

Foundation items: National High-tech R&D Program of China (863 Program) (2015AA015701)

作者简介 (Biography): 王斌 (1983 -), 男, 山东夏津人, 博士研究生, 工程师, 主要研究领域为卫星通信技术、微波毫米波技术. E-mail: wangbin_cetc54@163.com

广泛应用于微波、毫米波功率合成. 3 dB 功率分配/合成器是二进制树形结构的核心单元,其性能的优劣直接决定了功率合成的效率和可靠性. 常用的 3 dB 功率分配/合成器主要有:威尔金森电桥、波导 E-T 结、波导 H-T 结、3 dB 分支波导耦合器及波导魔 T 等. 威尔金森电桥^[1]是微带形式的,插入损耗大,不适用于在毫米波频段进行大功率合成;波导 E-T 结^[2]和波导 H-T 结^[3]是常用的 3 dB 波导功率分配/合成器,具有体积小、频带宽、插入损耗小、易加工等优点,缺点是两输出端口之间隔离度较差;3 dB 分支波导耦合器^[4]的输出端口相位差 90° ,输出端口间具有良好的隔离度,缺点是体积较大,带宽较窄;波导魔 T^[5]的输出端口间具有良好的隔离度,缺点是隔离端口和其它三个端口未在同一平面上,结构复杂,集成到功率合成模块内困难.

针对 3 dB 功率分配/合成器的宽带、高效、高隔离度等设计要求,在考虑高隔离度和结构小型化的基础上,本文研究了一种新型基于薄膜电阻的波导 E-T 结功率分配/合成器,该结构具有频带宽、插入损耗小、隔离度高、结构紧凑、加工方便等优点.

1 模型分析

常用的 3 dB 波导功率分配/合成器主要有两种类型:无耗三端口波导功率分配/合成器和带隔离端口的四端口波导功率分配/合成器. 无耗三端口波导功率分配/合成器支路间的隔离度和端口驻波较差,用于功率合成时,容易造成放大器稳定性下降而自激. 带隔离端口的波导功率分配/合成器用于功率合成时,其隔离端口一般需要外接波导负载或添加一个斜劈或尖劈形式的吸波材料,一般体积较大,不利于整个功放模块的小型化.

波导魔 T 是一个典型的波导四端口器件,结构如图 1 所示. 波导魔 T 在结构上具有良好的对称性,其幅度和相位一致性较好. 波导魔 T 有隔离端口 4,使用时需要外接波导负载或者添加一个斜劈或尖劈形式的吸波材料,所以波导魔 T 的体积较大,不易集成到功率合成模块内,不易实现功率合成模块的小型化.

为解决波导吸收负载带来的体积较大的问题,实现功放模块的小型化,在不改变原波导魔 T 四端口特性的前提下,将波导负载用薄膜电阻负载来替代. 为解决这个问题首先需要实现波导-微带转换,方案采用的波导-微带转换结构示意图如图 2 所示. 最终得到了如图 3 所示的基于薄膜电阻的波导

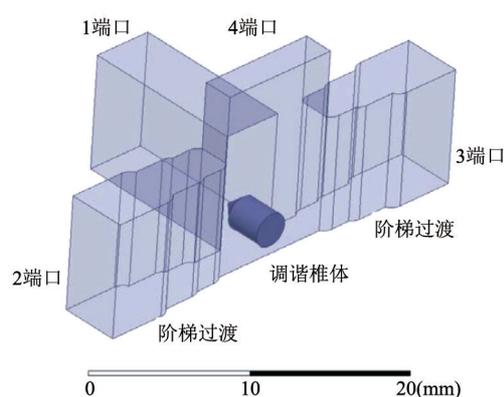


图 1 魔 T 功率分配/合成器

Fig. 1 The magic tee power divider/combiner

E-T 结功率分配/合成器,原波导魔 T 的隔离端口 4 通过波导-微带转换变换到微带线,且微带线的末端通过一个匹配薄膜电阻作为功率吸收负载. 所以基于薄膜电阻的波导 E-T 结就是一个 4 端口已经匹配好的波导魔 T 四端口网络,基于薄膜电阻的波导 E-T 结的理论分析过程与波导魔 T 相近.

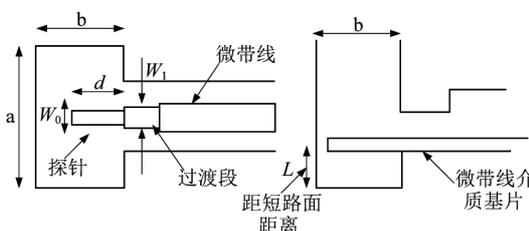


图 2 微带探针型波导—微带转换

Fig. 2 Waveguide to microstrip transition based on microstrip probe

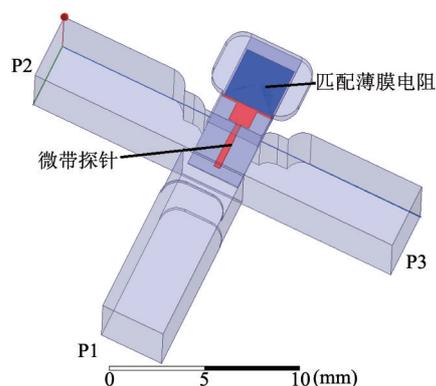


图 3 基于薄膜电阻的波导 E-T 结

Fig. 3 Waveguide E-T junction based on thin film resistor

魔 T 是一个四端口网络,用模式匹配法和叠加原理可以对魔 T 结构进行理论分析^[6]. 理想的魔 T 是一个无耗、互易的四端口网络,其 S 参数矩阵为:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} \end{bmatrix}$$

根据么正性,可以得到:当 $S_{33} = S_{44} = S_{34} = 0$ 时, $S_{11} = S_{22} = S_{12} = 0$,即波导魔 T 的四个端口必须同时匹配. 此时有, $|S_{14}|^2 + |S_{13}|^2 = 1$, $|S_{24}|^2 + |S_{23}|^2 = 1$, $|S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 = 1$, $|S_{14}|^2 + |S_{24}|^2 = 1$. 其中魔 T 的 E 臂对应 1 端口, H 臂对应 4 端口, 2、3 端口为结构对称的平分臂, 只要 E 臂和 H 臂之间既有良好的隔离又有良好的端口匹配, 那么 2、3 端口之间也可以做到良好的隔离和端口匹配.

2 仿真分析

利用 HFSS 确定该波导功率分配/合成器中匹配结构的具体尺寸, 然后优化各个尺寸. 要求设计的功率分配/合成器工作在 25 ~ 34 GHz, 故选用 WR28 矩形波导作为主传输线, 隔离端口微带探针和薄膜电阻的介质基板选用厚度为 0.254 mm, 介电常数为 8.9 的氮化铝陶瓷, 在 HFSS 中建立的三维模型如图 3 所示, 仿真结果如图 4 ~ 图 7 所示:

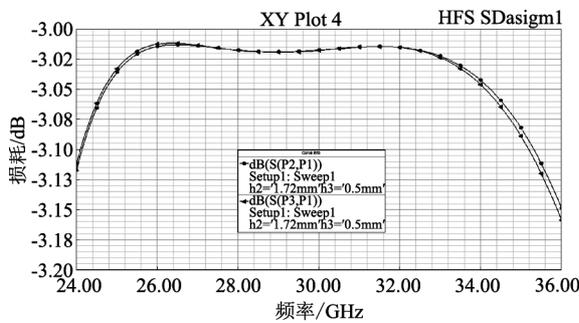


图 4 基于薄膜电阻的波导 E-T 结仿真结果
Fig. 4 The simulated results of waveguide E-T junction based on thin film resistor

从仿真结果图中 S_{21} 、 S_{31} 曲线可以看出, 该结构 3 dB 功率分配时, 在 25 ~ 34 GHz 功率分配损耗在 -3.05 dB 以内; 从仿真结果图中 S_{11} 、 S_{32} 曲线可以看出, 在 25 ~ 34 GHz 输入端口的驻波优于 -20 dB, 输出两端口的隔离度优于 15 dB; 从仿真结果图中 S_{22} 、 S_{33} 曲线可以看出, 在 25 ~ 34 GHz 两输出端口的驻波小于 -14 dB; 从仿真结果图中 S_{21} 、 S_{31} 的相位曲线可以看出, 在频带内两输出支路间相位差 180°. 当该结构背靠背用于功率分配/合成网络时, 功率分配器和功率合成器的相位差叠加并相互抵消, 不影响

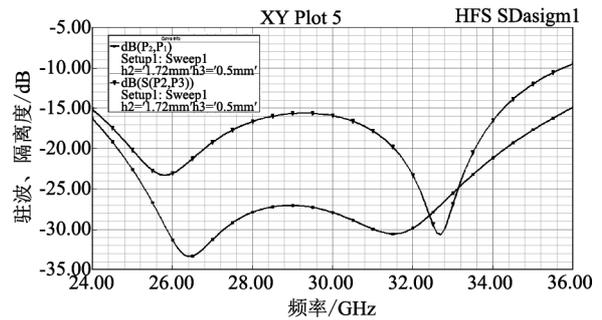


图 5 基于薄膜电阻的波导 E-T 结仿真结果
Fig. 5 The simulated results of waveguide E-T junction based on thin film resistor

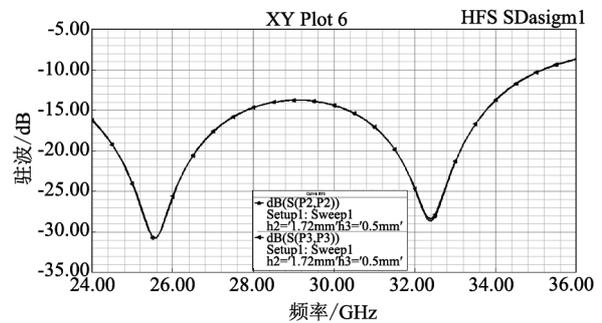


图 6 基于薄膜电阻的波导 E-T 结仿真结果
Fig. 6 The simulated results of waveguide E-T junction based on thin film resistor

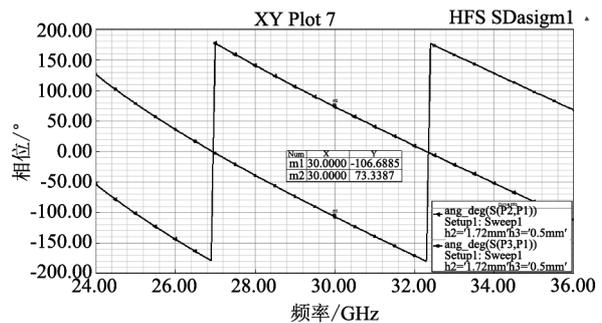


图 7 基于薄膜电阻的波导 E-T 结仿真结果
Fig. 7 The simulated results of waveguide E-T junction based on thin film resistor

功率合成效率.

3 性能测试

基于薄膜电阻的波导 E-T 结功率分配/合成器用于功率合成时, 因为两路功率幅度的差异, 有一定的能量消耗在薄膜电阻上. 特别是一路功率出现故障时, 另一路约一半的功率会被薄膜电阻吸收. 因此为了提高基于薄膜电阻的波导 E-T 结功率分配/合

成器的可靠性, 需要提高薄膜电阻的功率承受能力. TaN 薄膜具有极好的稳定性, 是目前制备微波薄膜电阻器件的首选材料, 当 TaN 薄膜电阻厚度、介质基板厚度确定时, 只能通过适当增大薄膜电阻面积和选用高热导介质基板两种方式来提高薄膜电阻的功率承受能力. TaN 薄膜电阻的厚度为 $0.1 \mu\text{m}$, 氧化铝基板厚度为 0.125 mm 时, TaN 薄膜电阻可以耐受约 $4 \text{ W}/\text{mm}^2$ 的功率密度. 根据一般军品工程应用中的降额要求, 设计的 TaN 薄膜电阻所耐受的功率密度应该小于 $2 \text{ W}/\text{mm}^2$, 介质基板厚度增加时其所承受的功率密度还会降低. 本文设计的薄膜电阻的面积约为 4 mm^2 , 所以薄膜电阻可靠工作时所承受的功率应该小于 8 W , 当该薄膜电阻工作于两路较大功率的合成时, 可靠性会下降, 所以还应采用导热性更好的介质基板进一步提高薄膜电阻可承受的功率.

氮化铝陶瓷的理论热导率是 $320 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 大约是铜热导率的 80% , 比氧化铝陶瓷的热导率高一个数量级, 其介电常数略低于氧化铝陶瓷, 且具有高电阻、低密度和接近硅的热膨胀系数等特点. 采用文献^[7]中热导率约为 $180 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的氮化铝基片作为微带探针和薄膜电阻的介质基板, 改进后的薄膜电阻可承受的功率密度提高近一个数量级. 并且采用高导热的 NAMICS -SK70N 导电胶将其粘结在金属壳体上, 薄膜电阻的接地端同样采用该导电胶接地. 针对承受更高功率的需求, 则采用共晶焊接的方式将其焊接在热膨胀系数相近的钨铜合金载体上, 然后再将其焊接在金属壳体上, 实际制作的基于薄膜电阻的波导 E-T 结功率分配/合成器, 如图 8 所示:

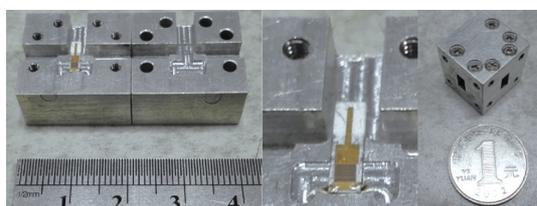


图 8 实际制作的基于薄膜电阻的波导 E-T 结功率分配/合成器

Fig. 8 The waveguide E-T junction based on thin film resistor

利用矢量网络分析对该结构进行测试, 测试结果如图 9 ~ 12 所示:

由测试结果可知, 该结构作为 3 dB 功率分配器时, 在 $26 \sim 34 \text{ GHz}$ 功率分配结果在 -3.1 dB 以内, 在

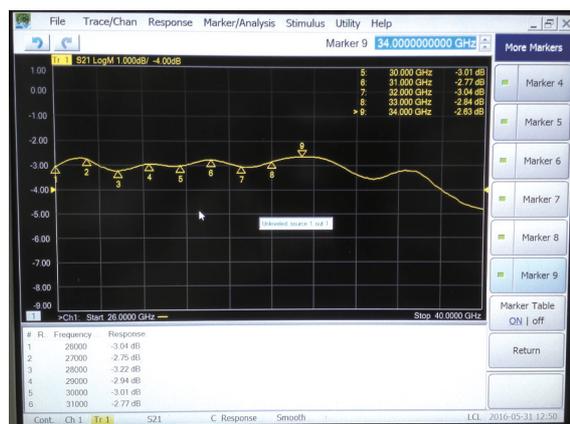


图 9 基于薄膜电阻的波导 E-T 结的 S_{21} 实测结果

Fig. 9 The measured results about S_{21} of waveguide E-T junction based on thin film resistor

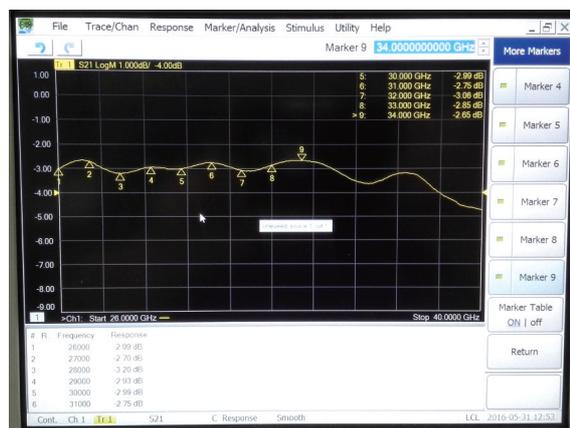


图 10 基于薄膜电阻的波导 E-T 结的 S_{31} 实测结果

Fig. 10 The measured results about S_{31} of waveguide E-T junction based on thin film resistor



图 11 基于薄膜电阻的波导 E-T 结的 S_{32} 实测结果

Fig. 11 The measured results about S_{32} of waveguide E-T junction based on thin film resistor

$25 \sim 34 \text{ GHz}$ 输出两端口的隔离度优于 10 dB , 输入



图 12 基于薄膜电阻的波导 E-T 结的 S_{11} 实测结果

Fig. 12 The measured results about S_{11} of waveguide E-T junction based on thin film resistor

端口的驻波小于 -15 dB, 两输出端口的驻波小于 -10 dB, 实测结果和仿真结果的差别主要是因为实际电路的误差所致. 将该结构应用于功率分配/合成网络, 制作了一个八路功率合成的功放模块, 该功放模块的无源结构如图 13 所示, 该无源结构插入损耗的实测结果如图 14 所示.

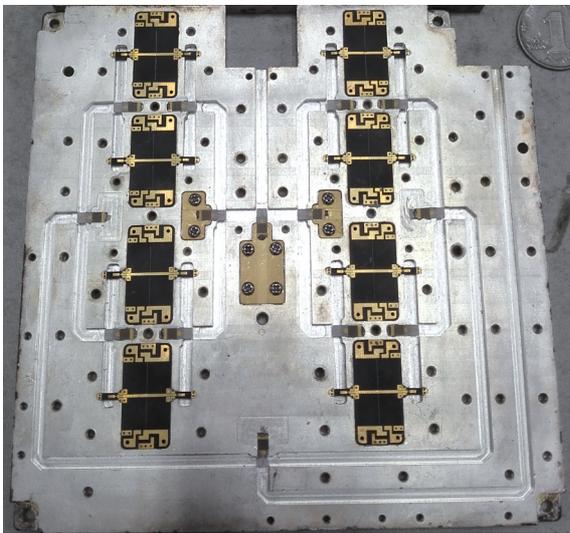


图 13 基于薄膜电阻波导 E-T 结的八路功率合成网络

Fig. 13 The eight way back-to-back network with waveguide E-T junction based on thin film resistor

由实测结果可知, 该八路功率分配/合成网络的插入损耗在 26 ~ 37 GHz 小于 3.3 dB, 插入损耗最小约为 1.8 dB. 其中包含了三级 3 dB 功率分配/合成器背靠背的损耗、波导微带转换背靠背的损耗和长约为 10 mm 微带线的损耗, 根据工程经验该八路功率合成网络完全满足工程应用的要求.



图 14 基于薄膜电阻波导 E-T 结的八路功率合成网络实测结果

Fig. 14 The measured result of the eight way back-to-back network

4 结语

本文详细研究了一种新型的 3 dB 功率分配/合成器, 实际制作了基于薄膜电阻的波导 E-T 结, 根据其实测结果制作了基于该结构的八路功率合成模块. 该 3 dB 功率分配/合成器具有结构简单、易于加工、频带宽、插入损耗小、隔离高等优点. 相关文献介绍的紧凑型毫米波功率分配/合成器^[8], 通过微带-波导转换将吸收负载设计成波导形式, 体积较大, 不利于大规模集成应用于功率合成模块. 相关文献介绍的基于波导 E-T 结的新型功率分配器^[9], 采用集总形式的 50 Ω 功率电阻作为吸收负载, 随着波导 E-T 工作频率的提高其性能逐渐下降. 相关文献介绍的波导 E-T 结^[10]采用 Rogers RT/Duroid 5880 作为微带探针的介质基板, 该基板易变形从而影响波导-微带转换的性能. 吸收负载虽然是薄膜电阻, 但和微带探针之间采用金丝键合的方式进行连接, 电阻另外一端同样采用金丝键合的方式接地, 金丝引入的电感会影响吸收负载的性能, 从而影响整个波导 E-T 结的性能. 相关文献介绍的加载电阻膜片的波导 E-T 结^[11]采用薄膜电阻作为吸收负载, 但是该电阻膜片的安装方式导致其散热能力有限, 从而使得电阻膜片可承受的功率不高, 降低了 3 dB 功率分配/合成器可承受的功率. 相关文献介绍的 E 面集成波导魔 T^[12]采用氧化铝陶瓷作为薄膜电阻的介质基板, 氧化铝陶瓷作为热的不良导体致使该器件的功率承受能力不高. 本文采用氮化铝陶瓷作为介质基板等方式使得该器件的功率承受能力提高了一个数量级,

并且通过进一步优化该结构微带探针的尺寸和薄膜电阻的阻值使得其相对带宽达到 30.5%, 相对带宽提高了一倍. 综上所述, 本文研究的基于薄膜电阻的波导 E-T 结功率分配/合成器性能优异, 适合应用于毫米波功率合成领域, 具有较高的工程应用价值.

References

- [1] XIE Xiao-Qiang, LIN Wei-Gan, XU Rui-Min. New-style millimeter wave power combining circuit [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (谢小强, 林为干, 徐锐敏. 一种新型的毫米波功率合成电路. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(1): 25 - 28.
- [2] JIANG Xiao-Li, WANG Bin. Improvement and design of Ka-band T-junction waveguide power combiner [J]. *Radio Engineering of China* (江肖力, 王斌. Ka 频段 T 型波导功率合成器的改进设计. *无线电工程*), 2009, **39**(3): 41 - 43.
- [3] CUI Yan, TIAN Bing. Design on millimeter wave broadband waveguide power combiner [J]. *Radio Engineering of China* (崔焱, 田兵. 毫米波宽带波导功率合成器设计. *无线电工程*), 2011, **41**(6): 54 - 57.
- [4] XIE Xiao-Qiang, LIU Xiao, XU Rui-Min. 25 W solid state power combining amplifier in Ka-band [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (谢小强, 刘晓, 徐锐敏. Ka 波段 25W 固态功率合成放大器. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(4): 347 - 349.
- [5] WANG Bin. Design of a novel power combiner in Ka-band [J]. *Radio Engineering of China* (王斌. 一种新型 Ka 频段功率合成器的设计. *无线电工程*), 2009, **39**(10): 32 - 35.
- [6] Thomas Sieverding, Fritz Arndt. Modal analysis of the magic tee [J]. *IEEE microwave and guided wave letters*. 1993, **3**(5): 150 - 152.
- [7] LIU Jian, LIU Zhi-ping. Research of the high performance AlN ceramic substrate production key technology [J]. *Electronics and Packaging* (刘建, 刘志平. 高性能氮化铝陶瓷基片生产关键技术研究. *电子与封装*), 2007, **7**(12): 1 - 6.
- [8] CHU Qing-Xin, WU Qiong-Sen, MO Da-Yi, HE Yin-Jian. Compact Ka-band power combiners/dividers [J]. *Journal of Microwaves* (褚庆昕, 吴琼森, 莫大仪, 等. 紧凑型毫米波功率合成/分配器研究. *微波学报*), 2015, **31**(6): 1 - 5.
- [9] KOU Yang. A method of designing a new type power divider based on waveguide E-T junction [J]. *Electronic Science and Technology* (寇阳. 一种基于波导 E-T 结的新型功分器的设计方法. *电子科技*), 2015, **28**(8): 18 - 20.
- [10] Zhengbin Xu, Jie Xu, Yinjie Cui, Cheng Qian. A novel rectangular waveguide T-junction for power combining application [J]. *IEEE microwave and wireless components letters*. 2015, **25**(8): 529 - 531.
- [11] Epp Larry W, Hoppe Daniel J, Khan Abdur R, et al. A high-power Ka-band (31-36GHz) solid-state amplifier based on low-loss corporate waveguide combining [J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*. 2008, **56**(8): 1899 - 1908.
- [12] WANG Peng-fei, YANG Yi, TIAN Bing. Design of new E-plane integrated waveguide magic T [J]. *Radio Engineering of China* (王鹏飞, 杨懿, 田兵. 一种新型 E 面集成波导魔 T 的设计. *无线电工程*), 2013, **43**(8): 47 - 50.