

毫米波 6W 固态集成功率合成放大器研究

陈昌明^{1,2}, 徐军¹, 喻梦霞¹, 王天宝²

(1. 电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054;

2. 成都信息工程学院通信工程系, 四川 成都 610225)

摘要:提出一种采用双对极鳍线—微带过渡的 Ka 频段 2×2 波导基功率合成结构. 这种两路过渡结构在 31.0 ~ 40.0GHz 范围内实测背对背插损小于 0.9dB, 回波损耗优于 12.0dB. 组合四块 GaAs MMIC 功率单片制作的这种新型功率合成器, 在 32.0 ~ 36.0GHz 频带、 ± 1.21 dB 增益波动下获得 6W 的最大饱和输出功率, 带内平均合成效率为 82%, 且在 25W 的直流功耗下也保持了极佳的散热性能. 这些测试结果验证了本方案的可行性.

关键词:毫米波; 功率合成; 双对极鳍线; 合成效率

中图分类号: TN454 **文献标识码:** A

STUDY ON A 6W MILLIMETER-WAVE SOLID-STATE INTEGRATED POWER-COMBINING AMPLIFIER

CHEN Chang-Ming^{1,2}, XU Jun¹, YU Meng-Xia¹, WANG Tian-Bao²

(1. School of Physical Electronics, UEST of China, Chengdu 610054, China;

2. Department of Communication Engineering of Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: A waveguide-based 2×2 power-combining structure at Ka-band by using double antipodal finline-to-microstrip transitions was presented. A very low back-to-back insertion loss of 0.9dB and return losses better than 12.0 dB at the range of 31.0 ~ 40.0GHz frequencies were obtained from the two-way transition structure. By using 4 GaAs monolithic-microwave integrated-circuit (MMIC) power amplifiers, the new combining circuit produced up to 6W maximum power output with a gain variation of ± 1.21 dB within the band of interest (32.0 ~ 36.0GHz). The average combining-efficiency over the operating band was estimated at 82%. This combiner also provides an excellent thermal property, sustaining as much as 25W of dc power consumed by the MMIC amplifiers. The measured results demonstrate the feasibility of the proposed approach.

Key words: millimeter-wave; power-combining; double antipodal fin-line; combining-efficiency

引言

提高毫米波频率源的射频输出功率一直是个研究热点. 近来, 有国内学者采用回旋行波管放大器在 35GHz 频率获得了超过 450kW 的峰值功率输出^[1]. 随着毫米波单片集成电路 (MMIC) 的广泛应用, 基于 MMIC 的毫米波功率放大器得到了迅速发展. 鉴于单个功率单片的功率输出电平有限, 人们运用功率合成技术提出了多种毫米波功率合成器^[2,3]. 这些功率合成器虽然在 X 频段获得了 120W 的输出功率, 但由于采用键合金线的槽线—微带过渡, 而限制

了其在 Ka 频段的应用. 有学者利用 3dB 微带电桥成功地研制了一种 Ka 频段功率合成器^[4], 但其较低的输出功率电平无法满足实际系统需要. 采用双对极鳍线组成的 4 路功率合成器在 24GHz 附近的合成效率达 83%, 获得了 3.3W 的射频功率输出, 并具有向高端频率延伸的潜能^[5]. 在文献[5]中作为功分器的双对极鳍线由于采用了锯齿形抗流装置而带来反射和损耗, 同时对电路加工精度也提出了更高要求. 针对上述问题, 本文提出一种宽带、高效并具有优良散热特性的毫米波功率合成器. 该结构简洁、加工调试容易、重复生产率高; 在 Ka 频段一定

的带宽内获得了最大连续波饱和输出功率 6W, 最大合成效率 87%, 放大器输出功率几乎不受温度影响的良好工作性能.

1 电路设计

本文介绍的功率合成器是一种以波导—对极鳍线—微带过渡为基础的合成器. 在图 1 中给出了 1×2 路功分器的背对背正面电路示意图. 从图中可见, 该电路主要由以下几个部分组成. 第一部分为凹形槽的 $\lambda_g/4$ 介质阻抗变换器, 可把空气填充波导阻抗变换到鳍线开始过渡的部分介质填充波导的阻抗, 这种结构可以将回波损耗提高 2 ~ 3dB. 介质阻抗变换器的宽度 W 和长度 L_m 确定可参考由 Hoefler^[6] 推导出的理论设计公式. 第二部分是功率分配/合成网络, 它由双对极鳍线组成, 是功率合成器的核心部分. 结构中的双对极鳍线通过旋转电场方式把矩形波导中的 TE_{10} 模变换成微带中的准 TEM 模, 同时实现功率合成/分配的功能. 以阻抗关系表示, 其作用就是把波导中的高阻抗变换成微带中的低阻抗. 由于本结构中每个鳍线过渡在波导端看进去的阻抗只是单鳍线结构的一半, 因而从原理上讲, 双对极鳍线结构可以获得比单鳍线结构更宽的带宽. 图 1 中的 L_i 是鳍线渐变过渡的长度, L_c 是半圆切口的长度, 50 欧姆标准微带线长度可根据腔体和所用 MMIC 单片的几何尺寸并兼顾损耗指标进行综合考虑.

文献[2]所提出的空间功率合成结构是一种将几块平面功率合成托架垂直堆积在波导 E 面的结构. 这种结构能够组合多个一维功率托架而合成效率又不会明显降低. 本文利用类似堆积方案将上述的双对极鳍线扩展至 2×2 路功率合成阵列. 整个合成器由 3 个金属块组成, 中间金属托架的两面对称地放置着两片 1×2 路功分电路, 组成四路功率合成阵列, 余下的两块构成完整的 BJ-320 波导, 装配后

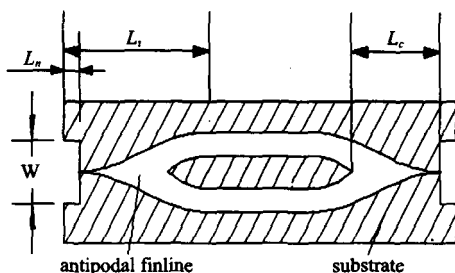


图 1 1×2 合成器背对背正面电路示意图

Fig. 1 Front circuit of the back-to-back 1×2 combiner

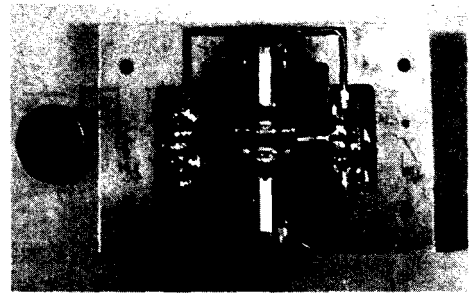


图 2 波导基功率合成器

Fig. 2 Inside the waveguide-based power combiner module

的波导基功率合成器如图 2 所示. 所用单片为 Triquint 公司生产的某型号功率单片 MMIC-001, 工作频率范围为 33.0 ~ 36.0GHz, 在额定工作条件下, 最大饱和输出功率为 33dBm.

2 仿真和测试结果

功率合成器无源功分网络仿真模型的构建可借助 3-D 场仿真软件 CST 来完成. 在建立对极鳍线过渡物理模型时, 鳍线渐变的长度 L_i 和半圆切口 L_c 都是合成结构中的重要参量. 加长 L_i 有利于降低回波损耗, 但同时引入的欧姆损耗也会随之增加, 因此 L_i 需要在二者之间取其折衷, 一般取 $1.1\lambda_0$ (λ_0 为波导波长). 经典的鳍线设计为了防止在工作频段内渐变下面的无金属区可能出现的谐振现象, 而附加了一块半圆形的金属面^[7], 实际上只要控制 L_c 的长度就可将谐振点移至到带外. 在本文所提出的功率合成器结构中, 通过增加 L_c 的长度将谐振频率移到了 Ka 频段的低端, 从而取消了附加的金属块. 最终确定的电路将制作在厚度为 0.254mm, 介电常数 $\epsilon_r = 2.22$ 的 RT duroid 5880 基片上. 仿真时所有的导电材料, 包括波导壁、微带线以及接地面都视为理想导体, 并假设波导端口边界上只存在 TE_{10} 模. 经过对上述关键参量的优化, 2×2 路功分模型背对背仿真结果如图 3(a) 所示. 为了验证该方案的可行性, 用标量网络分析仪 Agilent E8247C 对背对背无源结构进行了测试, 实测结果如图 3(b) 所示. 由图 3(b) 可知, 在 31.0 ~ 40.0GHz 的频率范围内实测插损均小于 0.9 dB; 回波损耗优于 12.0dB, 与仿真结果相比较: 插损和回波损耗的平均误差分别为 0.28dB 和 1.17dB. 估计是由于仿真模型的理想化和实际装配工艺误差所致.

为检验合成器的输出功率和合成效率, 对 2×2 路功率合成器放大模块进行了测试, 测试结果如图 4 所示(此时的腔体温度 T 为 26°C). 测试所加漏极

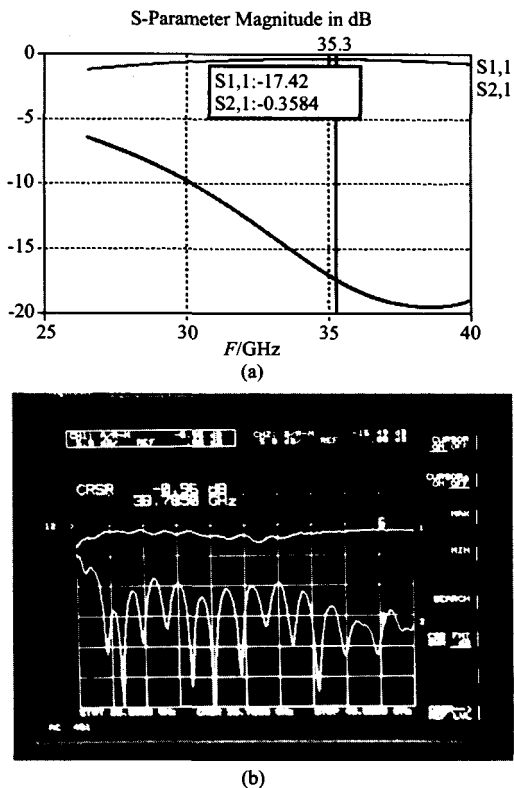


图3 2×2合成器背对背仿真和测试结果 (a)仿真结果 (b)测试结果

Fig.3 Simulation and measurement of the back-to-back 2×2 combiner (a)simulation (b)measurement

电压 5.8V, 栅极电压为 -0.65V , 4 片 MMICs 的静态电流总共为 2.5A. 在 32.7 ~ 34.4GHz 范围内, 获得的连续波最大饱和输出功率均为 37.79dBm (6W), 带宽为 1.7GHz; 在 32.0 ~ 36.0GHz 的频率范围内, 功率增益波动小于 $\pm 1.21\text{dB}$. 由于顾及 MMICs 芯片损坏, 因此所加电源未能达到芯片的额定工作值, 其单个 MMIC 器件的具体饱和输出功率不能确知, 只能估算电路的合成效率. 根据目前国内运用该 MMIC 器件组装的最大饱和输出功率为 1.7W 来计算, 其最大合成效率达到 87%, 带内平均合成效率估计为 82%, 合成效率与频率之间的关系如图 5 所示. 当合成放大器工作电流为 4.32A; 饱和输出功率为 37.79dBm (6W) 时的功率相加效率约为 13.6%.

对瓦级功率电平的毫米波放大器来说, 热设计是保证放大器正常工作的关键环节之一. 为妥善解决 6W 毫米波功放的热耗问题, 首次在国内使用了一种高导热的特殊材料作为 MMIC 单片的热载体, 使其热量能够及时有效地传递至腔体, 继而使放大器工作的可靠性能够得以保证. 为监测放大器输出

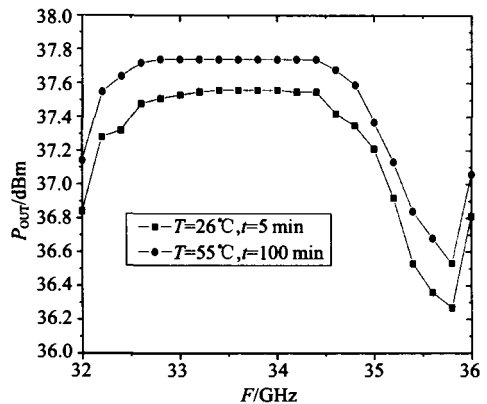


图4 输出功率与温度及频率

Fig.4 Output power versus temperature

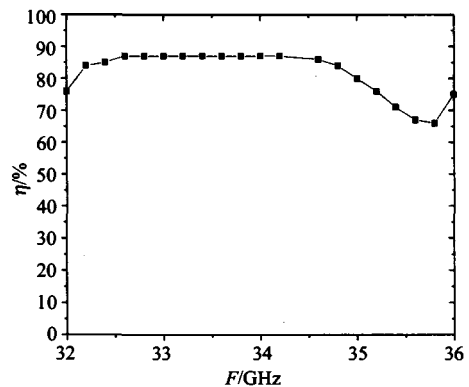


图5 合成效率与频率

Fig.5 Combining-efficiency versus frequency

功率随温度的变化情况, 用热电偶测试了放大器腔体的温度, 观察了放大器在初始工作状态和在热平衡状态下的输出功率情况, 如图 4 所示. 图中 T 为腔体温度, t 为放大器工作时间. 由图 4 可知, 合成功放在连续工作时间为 100min 后, 腔体温度趋于恒定 (即 $T=55^\circ\text{C}$), 即热交换处于平衡, 此时最大饱和功率输出为 37.65dBm (5.8W). 与功放初态时 37.79dBm 相比较, 输出功率下降了 0.14dBm, 下降最多的输出功率也小于 0.32 dBm. 试验结果表明该功率放大器的散热特性良好, 完全可以满足实际工程的需要, 同时也验证了所选散热方案的可行性.

3 结论

本文提出了一种结构新颖的毫米波四路功率合成放大器. 该合成器具有体积小、重量轻、可靠性高、加工调试方便和一致性好的特点, 可在对体积、重量和可靠性有严格要求的集成毫米波弹载和机载系统

(下转 55 页)

4 结论

随着激光器技术和光谱探测技术的发展, LIBS 的应用潜力将逐渐发挥出来. 本文在 LIBS 技术应用研究过程中, 针对光栅光谱仪“波长准确度”引入的 LIBS 元素识别误差问题, 提出了基于标准样品原子光谱的元素识别方法. 这种识别方法利用标准样品的原子谱线和未知样品的原子谱线进行对照, 从谱线峰值和谱线轮廓两个角度对照识别, 极大的减小了识别误差, 在低探测信噪比的情况下也能较好的识别, 同时具有抑制特定随机误差的能力, 具有一定的工程应用价值.

REFERENCES

- [1] XU Dai-Sheng, WANG Jian-Yu. Interactional effect between laser cheating jammer and laser guidance system[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐代升, 王建宇. 激光欺骗式干扰与激光制导系统相互作用效应研究. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(1): 77—80.

- [2] XU Wei-Ming, WANG Jian-Yu, SHU Rong, et al. Theoretical analysis of geometrical rectification accuracy for linear pushbromm imaging spectrometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (许卫明, 王建宇, 舒嵘, 等. 线列推扫成像光谱仪几何校正误差的理论分析. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(2): 109—112.
- [3] CHEN Gang, WEN Zhi-yu, WU Ying, et al. Influences on spectrum line position caused by light activated element's swidth of electrophotonic array [J]. *Acta Photonica Sinica* (陈刚, 温志渝, 吴英, 等. 光电探测器阵列光敏元宽度对谱线峰值位置影响的研究. *光子学报*), 2002, 31(3): 297—301.
- [4] MIAO Chun-an, MA Ren-hong. Wavelength accuracy and wavelength calibration of spectromete [J]. *Chinese Journal of scientific Instrument* (苗春安, 马仁宏. 光谱仪器的波长准确度及波长校准. *仪器仪表学报*), 1997, 18(6): 591—595.
- [5] XUE Zhong-min, YU Bing-xi. Wavelength calibration for PC20002PC/104 spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineer* (徐中民, 禹秉熙. 对 PC20002PC/104 型光谱仪的波长定标. *光学精密工程*), 2004, 12(1): 11—14.

(上接 37 页)

中使用. 该合成放大器在 Ka 频段实测最大饱和输出功率为 6W, 带宽为 1.7GHz, 最大合成效率估计为 87%, 所获指标目前在国内还未见相关报道. 此外该合成器所具有的良好散热特性及大规模空间功率合成潜力将会使之成为毫米波频段中、高功率放大器方案中一种具有很强竞争力的实际结构.

REFERENCES

- [1] JIA Yun-Feng, LAI Guo-Jun, LIU Pu-Kun. Simulation and design of a Ka band fundamental wave gyro traveling wave tube amplifier [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (贾云峰, 来国军, 刘濮鲲. Ka 波段基波回旋行波管放大器的模拟与设计. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(5): 386—389.
- [2] Nai Shuo-Cheng, Peng Cheng-Jia, Rensch D, et al. A 120-W X-band spatially combined solid-state amplifier [J]. *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*. 1999, 47:2557—2561.

- [3] Nai Shuo-Cheng, Angelos A, Michael G, et al. 40-W CW broad-band spatial power combiner using dense finline arrays [J]. *IEEE Trans. On Microwave Theory Techniques*, 1999, 47:1070—1076.
- [4] XIE Xiao-Qiang, LIN Wei-Gan, XU Rui-Min. New-style millimeter wave power combining circuit [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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.
- [5] Jeong J, Kwon Y, Lee S, et al. 1.6-and 3.3-W power amplifier modules at 24 GHz using waveguide-based power-combing structures [J]. *IEEE Trans. On Microwave Theory Techniques*, 2000, 48(12): 2700—2708.
- [6] Verer C, Hoefer W. Quarter-wave matching of waveguide to finline transitions [J]. *IEEE Trans. On Microwave Theory Techniques*, 1984, 32(12): 1645—1648.
- [7] Begeman G. An X-band balanced fin-line mixer [J]. *IEEE Trans. On Microwave Theory Techniques*, 1978, 26(12): 1007—1011.