

· 研究与设计 ·

毫米波 60 W 波导空间功率合成放大器研究

方建洪, 李 军

(中航工业雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063)

Studies on a 60 W Millimeter-Wave Waveguide Based Spatial Power Combining Amplifier

FANG Jian-hong, LI Jun

(Institute of Radar and Avionics of Aviation Industry Corporation of China, Wuxi 214063, China)

Abstract: This paper presents a waveguide-based solid state spatial power combining amplifier at millimeter-wave frequency. In this amplifier, a waveguide dividing/combining cascade connecting waveguide-quartz probe spatial power dividing/combining network is adopted. A sixteen-way broadband low loss symmetrical power dividing/combining is achieved at millimeter-wave frequency with an easy manufacturing process and the convenience of integrating solid-state high power devices. The measured output power of this amplifier is more than 59.6 W with a power combining efficiency more than 87.2% in 34.2~35.2 GHz; while in 34.2~35 GHz, the output power is more than 60 W and the maximum power combining efficiency is 92.1%.

Key words: Millimeter-wave, Power combining, Efficiency

摘要:介绍了一种新型的毫米波波导空间固态高功率合成放大器。该放大器中采用的波导功分/功合级联波导-石英探针空间功率合成网络,在毫米波频段实现了幅度、相位对称的16路功率分配/合成和波导-微带过渡转换,由此研制的毫米波高功率合成放大器,在34.2~35.2 GHz范围内,合成效率高于87.2%,输出功率大于59.6 W,并在34.2~35 GHz内高于60 W,最大合成效率为92.1%。

关键词:毫米波;功率合成;效率

中图分类号:TN73 文献标识码:A 文章编号:1002-8935(2016)01-0038-05

DOI:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2016.01.013

毫米波系统工作波长短、设备体积小、重量轻、机动性能好,并能提供较高的精度和良好的分辨率,以其良好的特性在军事和民用上扮演着越来越重要的角色。其中毫米波放大器被广泛用于卫星通信,相控阵雷达,电子对抗等应用系统中。国内由于诸多因数目前在Ka频段还无法提供较大功率的MMIC功率单片,这在相当程度上影响到我国在此领域的开发。因此,只有以小功率MMIC单片作为单元电路,运用功率合成技术来获取毫米波系统所需的大功率值^[1-2]。

国内在研究毫米波波导内空间合成方面做得比较好的有电子科技大学。2008年电子科技大学赵晨曦^[1]报道了波导内空间功率合成,在32~36 GHz范围内合成效率高于70%,最大输出功率达到13.2

W。电子科技大学的谢小强^[3]在2011年报道了Ka波段波导内空间功率合成,在29~31 GHz范围内合成效率高于80%,输出功率大于43.4 dBm。

由于空间功率合成具有合成效率基本与固态器件数量无关的优点,更适合多器件的大功率输出,因此本文采用两级空间功率合成的形式来实现16路的功率分配/合成。该合成方式的第一级为微带波导混合合成^[3],采用E面波导3 dB功分器转石英探针的结构形式,实现波导内4路芯片合成,得到输出功率为16 W的模块;第二级采用E面波导功分器的形式实现4路16 W模块的合成。该功率合成方式在34.2~35 GHz的频率范围内能得到大于60 W的输出功率,合成效率高于88%。

1 波导-石英探针空间功率分配/合成网络

本文所使用的波导-石英探针空间功率分配/合成网络,文献[3]的结构方式,并在其基础上作了改进,将材料为 Rogers5880 的微带探针改进为石英探针。本文的石英探针选用厚度为 0.254 mm,相对介电常数为 3.326 的石英薄膜基片,基片正面和背面镀金 $2\ \mu\text{m}$ 。使用石英探针克服了传统软基片过渡易于形变的缺点,降低了波导探针过渡的损耗,也更适用于管芯和探针之间的金丝键合工艺。

在 ANSOFT HFSS 软件中,建立如图 1 所示的模型,并对该分配/合成网络进行电磁场仿真模拟。

仿真结果如图 2 所示。

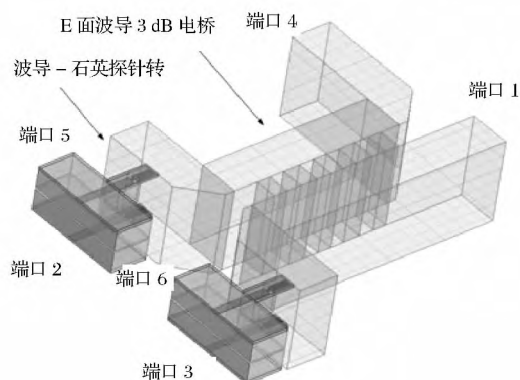
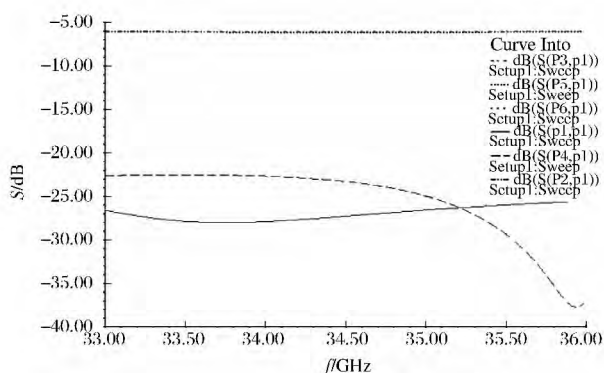
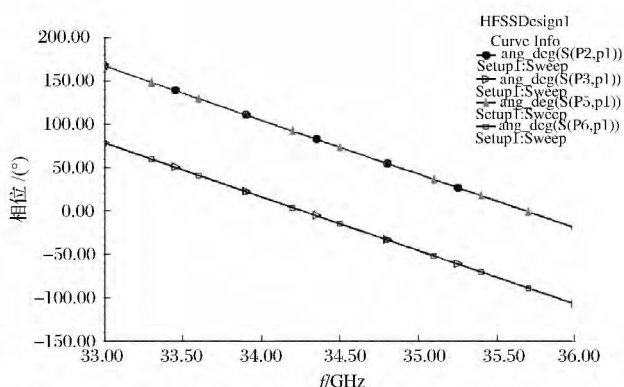


图 1 波导-石英探针空间功率分配/合成网络



(a) S 参数幅度



(b) S 参数相位

图 2 仿真结果

从图 2 中可以看出,在 33~36 GHz 频段内,回波损耗 S_{11} 小于 -25 dB,隔离度 S_{41} 优于 22 dB,四路微带端口具有良好的幅度一致性;端口 2 和端口 5(或端口 3 和端口 6)具有相同的相位关系,端口 2 (或端口 5)与端口 3(或端口 6)具有近乎理想的 90° 相位差。

该无源结构背靠背的仿真模型见图 3。仿真结果如图 4 所示。

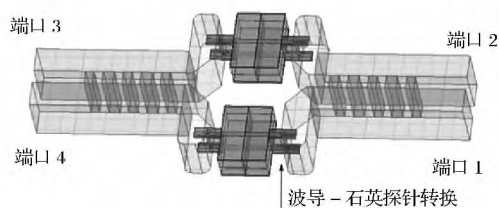


图 3 背靠背波导-石英探针空间功率分配/合成网络仿真模型

由图 4 可见, S_{31} 的插损在 0.1 dB 以内,隔离度 S_{21} 优于 19 dB,隔离度 S_{41} 优于 31 dB。

根据以上结果加工制作了一个背靠背功率分

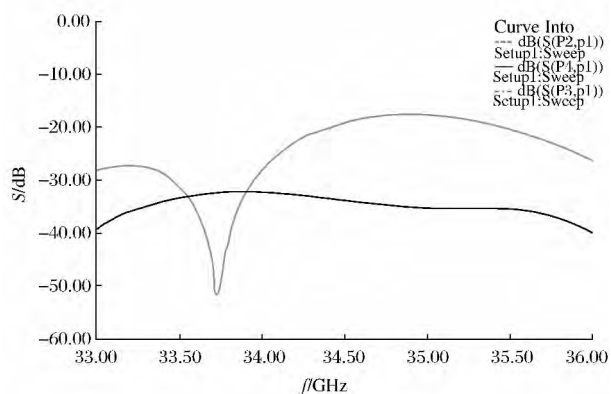


图 4 背靠背网络仿真结果

配/成网络,如图 5 所示,网络中,波导隔离端口接匹配负载,功率分配网络与功率合成网络间嵌入的 $50\ \Omega$ 石英探针的长度为 15 mm。

用 Agilent 公司生产的矢量网络分析仪 E8363B 对此分配/合成网络进行测试,测试结果如图 6。由图 6 可见,在频段 34.7~36 GHz 范围内,该背靠背结构回波损耗低于 -18 dB,插入损耗小于 0.6 dB。扣除石英探针损耗(约 0.1 dB),单个波导-

石英探针空间分配/合成网络损耗小于 0.25 dB。在频段 33~34.7 GHz 范围内,该背靠背结构回波损耗低于-20 dB,插入损耗小于 0.4 dB,扣除石英探针损耗(约 0.1 dB),单个波导-石英探针空间分配/合成网络损耗小于 0.15 dB。在 Ka 频段,采用波导-微带集成方式实现四路功率分配/合成,该网络损耗最低。

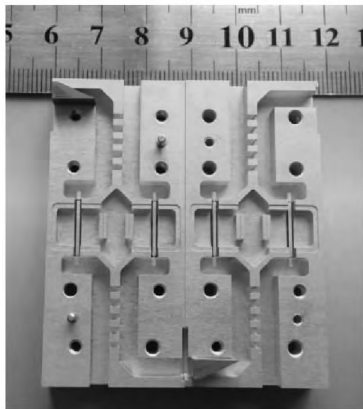


图 5 背靠背波导-石英探针空间合成网络

2 毫米波 16 W 空间合成放大器的实现

在以上功率分配/合成网络的基础上,做了 4 路功率放大合成电路,以分析该功率分配合成网络的性能。功率单片为 TRIQUINT 公司的产品 TGA2575,各级的指标分配如图 7 所示。为了实现功放的小型化,将直流馈电电路放在该功放模块上下两层的背面。由于 TGA2575 单片工作电流较大,且对加电和断电顺序有要求,所以必须制作电

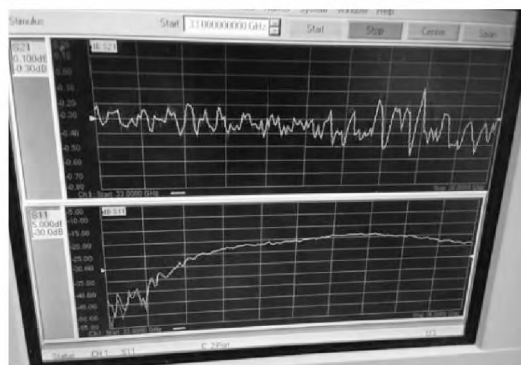


图 6 背靠背网络测试结果

源调制电路。电源调制电路可以降低功放器件的发热量,提高功放的效率,同时又要能够避免因电源开关电顺序操作错误或电源故障造成功率器件的损坏。

对功放管采用漏极调制方式,如图 8 所示,首先对功放管的栅极进行供电,当栅极电压正常时,脉冲调制信号经驱动单元对功放管漏极电路回路中的开关管进行控制,给功放管的漏极提供脉冲电流。

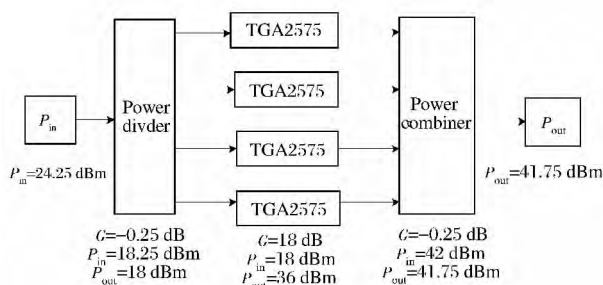


图 7 16 W 功率合成放大器增益指标分配

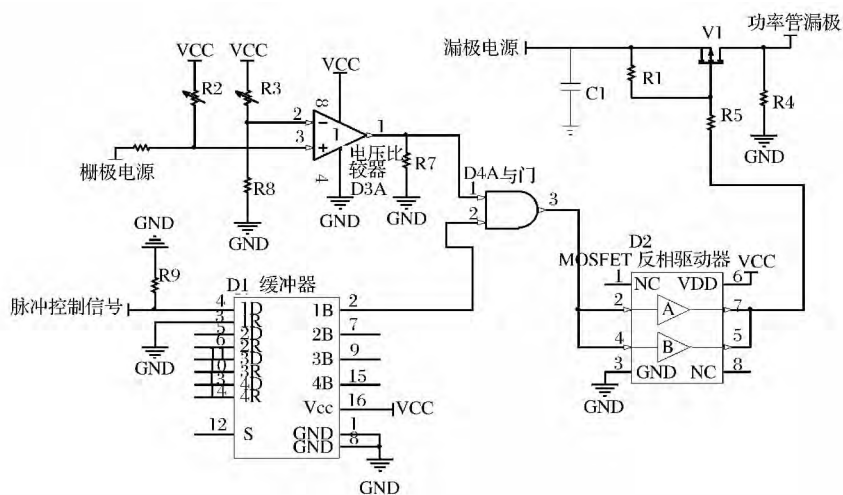


图 8 漏极电源调制电路

图 8 中, D1 为缓冲器, 接收脉冲调制信号, 该调制信号比射频脉冲分别提前和滞后数微秒; D3A 为比较器, 调节 R_3 、 R_8 的值, 当栅极负压正常时, 比较器输出高电平, 当栅极电压降到设定值或者无 -5 V 电源时, 比较器输出低电平。比较器输出信号与脉冲调制信号相与后经 D2 控制开关管 V1 导通, 给功放管的漏极提供脉冲电流, D2 为快速 MOSFET 驱动电路。其中, V1 为场效应开关管, C_1 为储能电容, 用以提供脉冲大电流, 其容值根据脉冲电流的大小、脉冲宽度和允许的脉冲顶降确定。

16 W 空间合成放大器实物如图 9 所示。本实验采用 Agilent 公司生产的峰值功率计 N1911A 测试其饱和输出功率, 测试结果如表 1 所示, 在 34.6 GHz 处该功率合成器具有最大的输出功率 16.6 W。

由合成效率计算公式, 计算出各个频点的合成效率如表 1 所示。

$$\eta = \frac{\text{放大器实际输出功率}}{\text{各路放大单元功率和}} \times 100\%$$

从表 1 测试结果可以看出, 在 34.2~35.2 GHz 带宽内合成效率达到 89.5% 以上。在同等功率和带宽条件下, 如此高的合成效率在国内属于首次报道。

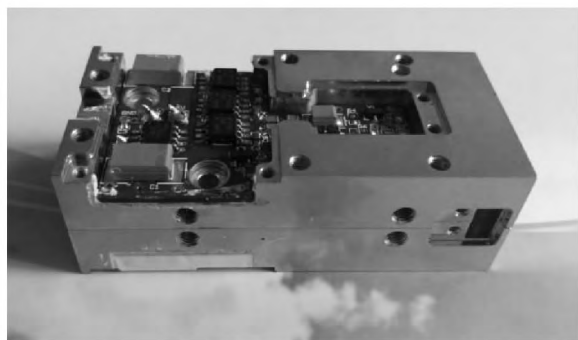


图 9 16 W 空间合成放大器

表 1 各频点输出功率及合成效率

f/GHz	34.2	34.4	34.6	34.8	35	35.2
$P_{\text{单}}/\text{W}$	4.27	4.32	4.37	4.42	4.42	4.27
P_{out}/W	16.1	16.3	16.6	16.5	16	15.3
η	94.3%	94.3%	94.9%	93.3%	90.5%	89.5%

3 波导 4 路功分/功合器的实现

本文采用的波导 4 路功分/功合器结构如图 10 所示, 该结构由主波导、支波导、主支波导过渡三个部分依次对称级联而成。其中主波导为标准的 BJ320, 波导口尺寸为 $7.112 \text{ mm} \times 3.556 \text{ mm}$, 支波导的窄边为主波导的一半, 宽边与主波导相同。该结构的理论依据是根据波导电磁场理论, 沿着标准

波导的 H 面, 将波导一分为二, 并不会改变磁场的分布, 电磁场仍然可以在其中按照特定的模式传播, 从而实现信号的均匀等分。在主波导和支波导连接处, 即 T 型结处包括一个倒角槽, 此槽的作用是用于改善输入端口的驻波, 降低功率分配的损耗, 其倒角尺寸可以通过电磁仿真软件很快捷地模拟出来。

在 CST 中对该功分器建模仿真, 通过合理改变电路尺寸以消除不连续性对电路性能的影响, 从而得到优化的结果。由于电路结构具有对称性, 仅需优化 S_{11} , 即使 1 端口回波损耗最小就可以达到目的。仿真时波导的边界为理想导体 (PEC)。在优化过程中发现, 对 S_{11} 影响比较大的尺寸因数有波导拐角处的倒角, T 型结处的倒角槽, 主支波导过渡段尺寸。只要将以上三个尺寸控制好, 即可得到比较好的优化结果。该功分器的最终仿真结果如图 11 所示, 从仿真结果可以看出, 在频段 33~36 GHz 内四路的功分幅度较好, 为 $-6 \pm 0.1 \text{ dB}$, 达到了理想的四等分状况, 回波损耗也优于 22 dB; 四路相位近乎理想的一致。

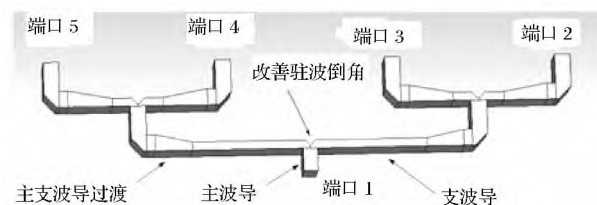


图 10 波导功分/功合器模型

为了验证仿真结果, 对该功分器进行了加工和测试, 加工实物如图 12 所示, 为了降低损耗, 功分器波导腔内全部镀金。

用 Agilent 公司生产的矢量网络分析仪 E8363B 将两个功分器背靠背连接好进行测试。测试结果如图 13 所示, 由图可见在频段 34.1~35.2 GHz 内插损小于 0.2 dB, 则单个功分器的插损小于 0.1 dB, 回波损耗 S_{11} 优于 15 dB。

4 毫米波 60 W 空间合成放大器的实现

在以上波导功分器和 16 W 空间合成放大器的基础上, 进行了 16 路单片的功率合成, 以分析该两级级联功率分配/合成网络的性能。各级增益指标分配如图 14 所示, 其中推动级功放为国内某公司生产的高增益功放单元 (PAU), 其技术指标为: 工作频率 33~36 GHz, 增益 31 dB, 带内平坦度: $\pm 0.5 \text{ dB}$, 输出功率: $\geq 31 \text{ dBm}$ 。

由于功放管芯和 16 W 模块都经过事先筛选,保证了各个 16 W 模块输出功率的幅度和相位一致性。用 Agilent 公司生产的峰值功率计 N1911A 测试该 16 路合成的饱和输出功率,测试结果如表 2 所示。

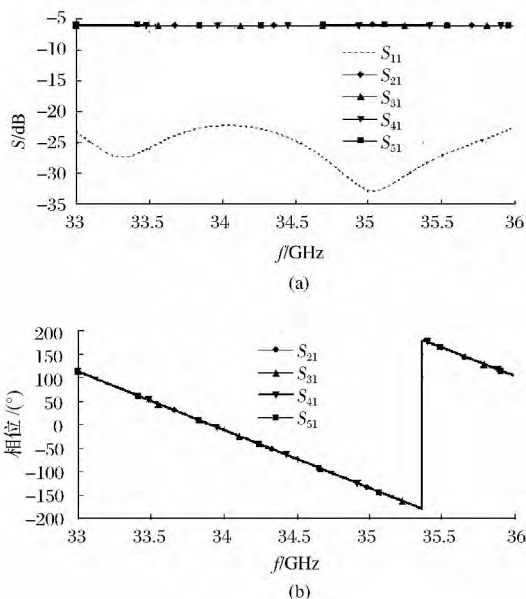


图 11 波导功分器仿真结果

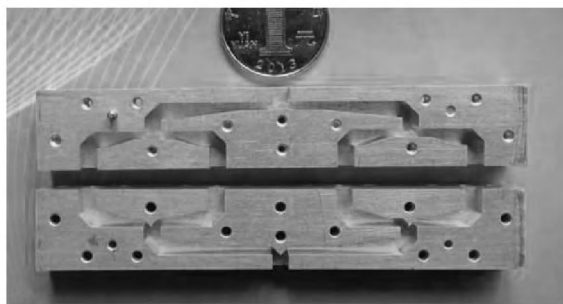


图 12 波导 4 路功分器实物图

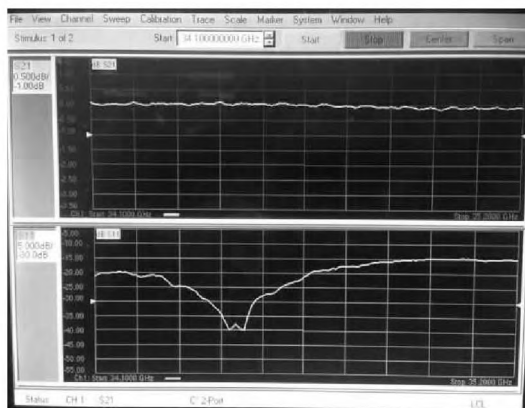


图 13 功分器测试结果

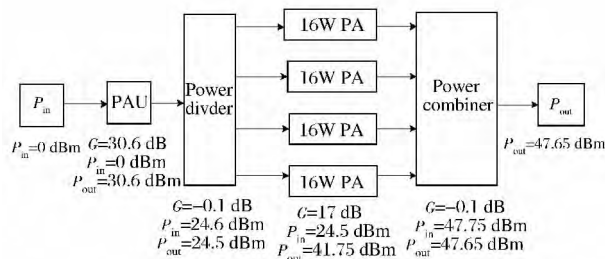


图 14 60 W 功率合成放大器增益指标分配

表 2 各频点输出功率及合成效率

f/GHz	34.2	34.4	34.6	34.8	35	35.2
$P_{\text{单}}/\text{W}$	4.27	4.32	4.37	4.42	4.42	4.27
P_{out}/W	62.5	63.5	64.4	64.3	62.3	59.6
η 效率	91.5%	91.9%	92.1%	90.9%	88.1%	87.2%

由表 2 可以看出,在 34.2~35.2 GHz 带宽内合成效率达到 87.2% 以上。在同等功率和带宽条件下,如此高的合成效率在国内属于首次报道。

整个 60 W 功率合成放大器的体积是 110 mm \times 97 mm \times 20 mm,能保证在 10% 占空比下连续工作。

5 结语

本文所设计的毫米波空间功率合成放大器在 Ka 频段实测输出功率为大于等于 59.6 W,带宽为 1 GHz,最大合成效率为 92.1%,其输出功率及合成效率指标在国内还未见报道。其优越的工作性能预示着其在高效率、宽频带毫米波中大功率功放中将会有良好的应用前景。

参考文献

- [1] ZHAO Chen-xi, XIE Xiao-Qiang, XU Rui-Ming. Study on a 10 W Millimeter-Wave Power Amplifier Based on Spatial Combination Structure [J]. J Infrared Millim Waves, 2008, 27(1): 433—436.
- [2] CHEN Chang-Ming, XU Jun, YU Meng-Xia, *et al.* Study on a 6W Millimeter-Wave Solid-State Integrated Power-Combining Amplifier [J]. J Infrared Millim Waves, 2007, 26(1): 35—37.
- [3] XIE Xiao-Qiang, LIU Xiao, XU Rui-Min. 25 W Solid State Power Combining Amplifier in Ka-band [J]. J Infrared Millim Waves, 2011, 30(1): 347—349.

收稿日期: 2015—06—05