

文章编号: 1001-4322(2007)01-0095-04

S 波段 2 kW 连续波功率合成技术*

杨永辉, 郑贵强

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 介绍了 S 波段基于行波管放大器的 2 kW 连续波功率合成技术。对大功率合成效率以及影响幅相一致性的原因进行了分析。在分析的基础上设计了 2 kW 连续波功率合成放大器, 阐述了幅度均衡的实现方法、相位均衡的实现方法和合成器的击穿保护措施, 并开展了实验研究, 实验结果表明: 采取幅相均衡技术以后, 合成效率大于 95%。

关键词: 行波管; 放大器; 功率合成; 均衡; 击穿

中图分类号: TN73 **文献标识码:** A

S 波段大功率合成技术是电子对抗、卫星测控和深空探测中的关键技术之一。为了在 S 波段获取更大的射频功率, 基于行波管放大器的功率合成技术越来越受到关注。相位与幅度的控制技术是基于行波管功率合成的关键。行波管放大器相位与幅度的不一致将严重影响合成效率, 而相位不匹配是行波管的固有特性^[1]。影响行波管放大器相位与幅度的因素很多, 其影响程度随频段的变化而变化, 因此, 不同频段的相位与幅度的控制技术也不相同。对于基于行波管放大器的 S 波段 2 kW 连续波的功率合成, 采取何种措施尽量保证各路放大器输出的幅度和相位一致, 从而使得在宽带范围内合成效率达到 90% 或者更高, 是功率合成的关键所在。为了获得高的合成效率, 从理论分析和幅相不一致的原因分析入手, 设计了高效率的功率合成方案。

1 合成效率的理论分析

功率合成的实质是多个矢量相加, 使得总输出低于多路输出之和。一般情况下, 行波管放大器的输出信号有着不同的幅度和相位。以两管合成为例, V_1 和 V_2 为单只行波管的电压幅值, 它们在某一频率处的相位差为 Φ , 根据矢量叠加原理, 假设两只行波管的慢波结构具有相同的特性阻抗, 则它们的合成功率

$$P_{out} = (P_1 + P_2) \frac{k^2 + 2k\cos\Phi + 1}{2 + 2k^2} \quad (1)$$

式中: $k = |V_1/V_2| = \sqrt{P_1/P_2}$ 表示幅度差, P_1 和 P_2 分别是第一路放大器和第二路放大器的输出功率。由公式 (1) 可得合成效率 (合成功率除以各路输入功率之和) 为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_1 + P_2} = \frac{k^2 + 2k\cos\Phi + 1}{2 + 2k^2} \quad (2)$$

利用 Matlab 软件仿真, 可以得到合成效率 η 和两路放大器幅度差 k 以及相位差 Φ 的关系曲线, 如图 1 所示。由图 1 可以看出, 行波管放大器的合成效率 η 和幅度差 k 以及相位差 Φ 两个变量有关, 当幅度差 $k \geq 0.9$, 相位差 $\Phi \leq 30^\circ$ 时, 合成效率大于 85%, 而且相位差比幅度差对合成效率的影响更明显。所以, 在实际应用时, 若能很好地控制行波管放大器之间的相位差和幅度差, 则可以获得比较理想的输出功率。

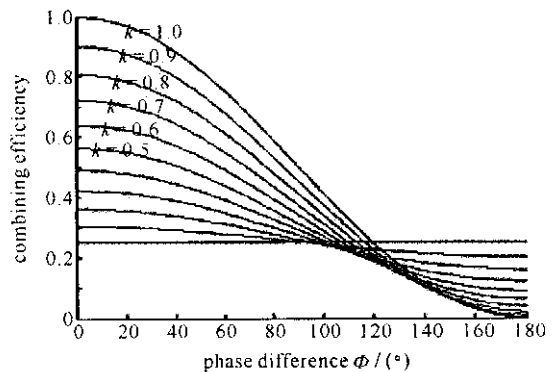


Fig. 1 Relationship between combining efficiency and amplitude difference/ phase difference

图 1 合成效率与幅度差、相位差的关系

2 幅相不一致的原因分析

行波管放大器在工作频带内的幅度变化是由于电子束对螺线和阻抗的依赖性引起的。调幅/调幅 (AM/

* 收稿日期: 2006-08-24; 修订日期: 2006-12-14

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 杨永辉 (1973—), 副研究员, 硕士, 从事发射机和电子对抗研究工作; younphy@163.com。

AM)转换是影响幅度不一致的重要原因,AM/AM 转换是测量射频输入驱动的变化(例如传输曲线斜率变化)引起射频输出功率变化情况的指标。通常用输出功率与输入功率关系曲线的斜率来表示,单位为 dB。文献[1]中示出了行波管的典型高频输出与输入的关系曲线,并且示出了增益和 AM/AM 转换与高频输入功率的关系。在线性区,AM/AM 转换系数为 1 dB/dB;在饱和区,AM/AM 转换系数为 0 dB/dB。具有较高变换效率的行波管工作在频带高端时增益将扩展,这是由于螺旋线在全频带范围内无法匹配减速下的电子束引起的,这时行波管处于过驱动状态,使得电子束散焦,是非理想状态。

行波管可以看成是一个非线性的双口慢波网络,为了达到小体积、高增益和高效率的目标,行波管的高频电路往往设计为正常色散和高阻抗的螺旋线型慢波结构,这种结构将会引起很大的相位变化。任何影响电子束速度的因素都将使射频输出信号的相位变化。当射频驱动电平增加达到非线性区后,由于激励信号的增大,引起从电子束中拉出的能量增大,使电子束速率下降,导致行波管的相移量增加。这种现象称作调幅/调相(AM/PM)转换。文献[1]示出了相移量随输入功率变化的典型曲线。在线性区,相移相对输入功率不十分敏感;当行波管饱和后,相移量的变化随之增大。AM/PM 的峰值在低于饱和输出几 dB 时出现,同时和频率有关(对于一个给定的螺旋线设计,其值随频率增加而增加)。

如果影响电子束速率的因素随时间而变,结果会造成在射频输出信号上出现调相,影响电子束速率的主要因素是阴极电压,其它电压或外部因素(例如:由于风机摆放离行波管太近感应的电压)的影响是次要的。典型的行波管相位推移指标为:阴极电压为 $100^\circ/1\%$;阳极电压(开发射状态)为 $10^\circ/1\%$;收集极电压为 $0.0005^\circ/1\%$ 。

这些指标数据为近似值,对任何特定的行波管,其相位推移指数的实际值由电子枪导流系数、增益、效率等决定。对于正弦纹波,其低于载波的杂散抑制度 σ (用 dB 表示)可粗略估计为

$$\sigma \approx 10 \lg\left(\frac{1.13 \times 10^3 L^2 F^2 V_{pp}^2}{V^3}\right) \quad (3)$$

式中: L 为行波管射频输入到输出的长度; F 为射频信号频率,单位为 GHz; V_{pp} 为阴极纹波的峰峰值; V 为阴极电压值。相位波纹的峰峰值(用 $\Delta\Phi$ 表示,单位为 $^\circ$)与小信号增益纹波有关(用 dG 表示,单位 dB),其表达式为

$$\Delta\Phi \approx 57.3(10^{dG/20} - 1) \quad (4)$$

谐波分量也是引起失真的一个重要原因。由于行波管的高增益和宽带特性,行波管工作在线性区域时会出现谐波分量。单倍频程的行波管一般有一 3 dB 或更低的谐波分量,而双倍频程行波管的谐波分量与基波一样大或者比基波还要大。在行波管的输出信号中,高阶谐波也存在,但是其幅度较小。宽带行波管对射频驱动信号的谐波成分有响应,如果信号足够强,这部分谐波将根据输入信号的基波和谐波的相对相位关系增强或影响输出功率。

3 功率合成设计方案

根据上述分析,设计 S 波段 2 kW 连续波功率合成方案,关键是克服 AM/AM,AM/PM 和谐波的影响,补偿各路行波管放大器的幅度和相位,保证各路输出的幅度和相位基本一致,从而达到较高的合成效率。在 S 波段,目前国内厂家的行波管最大输出连续波功率约 1.1 kW,但行波管的幅相一致性不十分理想。为了实现 2 kW 的合成功率,拟采用两路合成的方案。图 2 是基于行波管放大器的大功率合成的原理和测试框图^[2]。进行方案设计时主要考虑幅度均衡技术和相位均衡技术。

3.1 魔 T 的应用

魔 T 是一个理想匹配的双 T 接头,为四端口器件,其散射矩阵为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可见,魔 T 既是一个 3 dB 耦合器,又是一个理想的 3 dB 合路(功分)器。根据互易原理,将 3 和 4 端口接匹配负载,1 和 2 端口分别输入同相或反相信号,则可以分别从 3 或 4 端口获得合成输出功率。3 端口称为

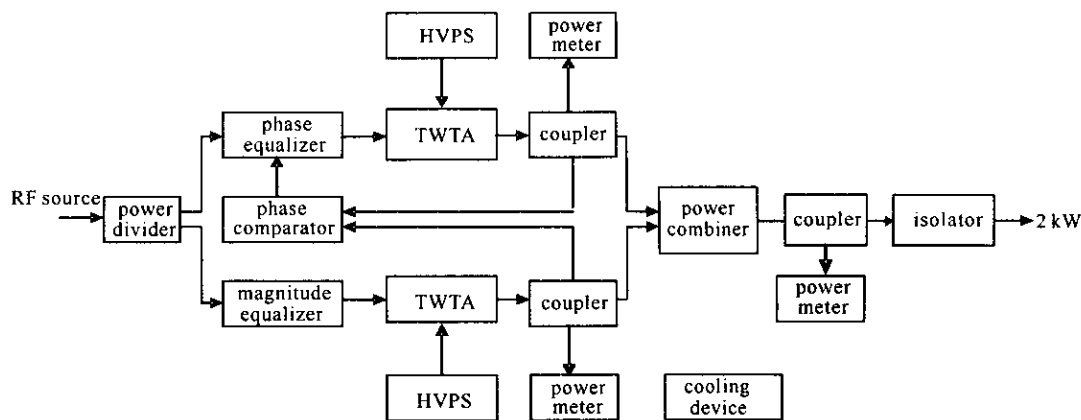


Fig. 2 Principle and test block diagram of power combining based on the traveling wave tube amplifier

图 2 基于行波管放大器的大功率合成的原理和测试框图

和路端口, 4 端口称为差路端口。当两输入信号幅度相等、相位相同或相反时, 可以从和路端口或差路端口获得最大合成输出功率。因此, 魔 T 本身的指标如插损、相位不平衡度、幅度不平衡度同样也影响合成效率或合成损耗的高低。

3.2 增益均衡的实现方法

在功率合成方案中, 通常情况下不同行波管的输入信号是相同的, 所以幅度的均衡可认为是等激励条件下增益的均衡。一般将幅度均衡网络接在输入端, 这样可以降低均衡网络所需要承受的功率容量。均衡网络对一路行波管放大器的功率/频率曲线进行补偿, 使得两路行波管放大器的功率/频率曲线趋于一致。行波管幅度均衡的步骤如下: 在工作频带内逐点测试第一个行波管放大器饱和和工作时的输入功率、输出功率和增益; 将第一个行波管放大器饱和和工作时的输入功率/频率曲线作为基准输入功率/频率曲线; 按基准输入功率/频率曲线激励第二个行波管放大器, 测试其输出功率和增益; 比较两个行波管放大器的增益/频率曲线, 找出满足增益失配度的偏移值; 按照偏移值与频率的关系设计增益均衡网络接入第二个行波管放大器的输入端^[3-4]。

3.3 相位均衡的实现方法

相位均衡的实现前提是对行波管之间的相位差进行测量。相位差的测量主要有如下几种方法: 一是通过矢量网络分析仪测量和比较; 二是通过一个移相器和魔 T 进行四种状态的测量; 三是通过衰减器和魔 T 进行测量, 详见文献^[5]。在倍频程的行波管放大器中^[6], 若工作在频带的低端, 行波管的相位差很小, 不需相位均衡即可达到较高的合成效率; 若工作在频带的高端, 行波管之间的相位不一致十分严重, 必须引入相位均衡技术^[7-8]。为了实现倍频程但较窄瞬时工作带宽的应用背景, 相位均衡采用鉴相和移相相结合的方法。此方法中两路行波管放大器输出都经耦合器送到鉴相器, 根据鉴相器的结果实时调整某一路的相位, 使得两路的行波管放大器输出的相位基本保持一致, 从而实现相位均衡。

另外, 进行功率合成方案设计时还应考虑: 为了获得最大的输出功率, 在满足相位增益一致性的要求下, 行波管应尽量加大输入功率, 将行波管推到过饱和状态; 行波管电源电压波动对放大器输出造成的影响。行波管的工作电压越高电子束的速度越快, 注波互作用的时间越短, 造成能量交换不充分、增益降低和相位滞后, 为了满足相位一致性的技术指标, 则要求电压的波动必须在 $\pm 1\%$ 的范围内; 工作电流对放大器输出造成的影响, 为了同时满足增益和相位一致性的技术指标, 必须将工作电流的波动控制在 $\pm 9\%$ 。

4 实验研究

现有功率计无法对发射机输出功率进行直接测量。采用的方法是在行波管和波导魔 T 之后加入大功率高方向性波导耦合器进行间接功率测试, 同时在耦合端口加入同轴低通滤波器, 将发射机的 2 次和 3 次谐波分量抑制掉。在实际测试中, 需要将耦合器的插损和耦合度以及滤波器的插损折算到功率计的偏移量中, 从而进行比较准确的输出功率测量。另外, 魔 T 隔离端输出可以用来定性监测行波管输出幅度不平衡度、相位不平衡度等指标以及输出频谱监测。用三台功率计分别监测两个放大器输出和功率合成输出的功率(测量框图如图 2 所示), 功率计连接在耦合器的耦合端进行测量, 测试结果见表 1。测试结果表明: 2 kW 连续波功率合成器可以在 2~4 GHz 的频率范围内工作, 且合成效率大于 95%。

表 1 功率合成的测试结果
Table 1 Test result of power combining

| test frequency/GHz | input power/mW | output power P_1 /W | output power P_2 /W | combining power/W |
|--------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| 2.0 | 930 | 1 130 | 1 120 | 2 155 |
| 2.1 | 594 | 1 130 | 1 130 | 2 169 |
| 2.2 | 428 | 1 120 | 1 140 | 2 165 |
| 2.3 | 298 | 1 120 | 1 120 | 2 130 |
| 2.4 | 170 | 1 120 | 1 120 | 2 130 |
| 3.0 | 120 | 1 140 | 1 120 | 2 160 |
| 3.5 | 105 | 1 110 | 1 100 | 2 120 |
| 4.0 | 292 | 1 100 | 1 120 | 2 120 |

5 结 论

经过对 S 波段 2 kW 连续波功率合成的分析、设计和实验,结果表明:各路行波管放大器的幅度差和相位差是影响合成效率的最主要的原因,但相位差的影响更明显;采用上述的幅度均衡和相位均衡技术,能够较好地使得各路放大器输出信号的幅度和相位基本一致,从而实现功率合成的效率大于 95%。

采用幅度均衡和相位均衡技术设计的功率合成器已成功应用在某电子对抗系统中,其功率合成效率高,工作稳定可靠。

参考文献:

- [1] Gilmour A S. Principles of traveling wave tubes[M]. Norwood, MA: Artech House, 1994.
- [2] 李镇远. 连续波行波管放大器功率/增益与相位自动扫频测量系统[J]. 真空电子技术, 1998, 9(6):33-39. (Li Z Y. A power/gain and phase automatic test system for CW TWTs. *Vacuum Electronics*, 1998, 9(6):33-39)
- [3] 王衡军,周东方,牛宗霞,等. 大功率行波管均衡器的仿真研究[J]. 信息工程大学学报, 2003, 4(1):8-10. (Wang H J, Zhou D F, Niu Z X, et al. Research on the high-power TWT equalizer simulation. *Journal of Information Engineering University*, 2003, 4(1):8-10)
- [4] 吕昌,牛宗霞,周东方,等. 大功率行波管用微波均衡器[J]. 信息工程学院学报, 1998, 17(4):34-36. (Lü C, Niu Z X, Zhou D F, et al. Microwave equalizer for the power travelling-wave tube. *Journal of Information Engineering Institute*, 1998, 17(4):34-36)
- [5] 方大纲,孙锦涛,张文梅,等. 一种微波相位测试的新方法[J]. 微波学报, 1995, 11(1):14-18. (Fang D G, Sun J T, Zhang W M, et al. A new method of microwave phase measurement. *Journal of Microwave*, 1995, 11(1):14-18)
- [6] 徐福错,丁武. 一种高功率宽带回旋波放大器[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(9):889-894. (Xu F K, Ding W. A high power wideband gyro-TWT amplifier. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(9):889-894)
- [7] 刘庆想,葛名立,袁成卫,等. 一种新型高功率微波相移器[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4):569-574. (Liu Q X, Ge M L, Yuan C W, et al. A new kind of high power microwave phase shifter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(4):569-574)
- [8] Even B. Broadband phase equalizing technique for combining high power TWTs[J]. *Microwave Journal*, 1998, 31(12):107-116.

2 kW continuous wave power combining technique in S band

YANG Yong-hui, ZHENG Gui-qiang

(Institute of Electronic Engineering, CAEP, P.O. Box 919-517, Mianyang 621900, China)

Abstract: This paper introduces the 2 kW continuous wave power combining technique based on TWTs. It mainly proceeds the analysis of the combining efficiency and the factors influencing the conformation of magnitude and phase. A 2 kW power amplifier is designed based on the analysis. The magnitude equalizing, phase equalizing and combiner protecting are also discussed. The experiments indicate that the combining efficiency can be greater than 95% with magnitude and phase equalizing technique.

Key words: Traveling wave tube; Amplifier; Power combiner; Equalizing; Breakdown