

DOI: 10.11991/ykj.201705005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20170620.1356.002.html>

两路 15 kW 连续波微波磁控管相干功率合成技术

位宇, 陈潇杰, 刘臻龙, 刘长军

四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064

摘 要: 为了提高大功率微波磁控管相干功率合成的效率, 并且使合成功率能够长时间稳定输出, 需要克服注入锁频磁控管工作时存在的相位漂移问题。基于 LabVIEW 实现了对两路 S 波段 15kW 注入锁频磁控管相干功率合成系统相位的闭环控制。通过对注入锁频磁控管进行移相精度为 1.8° 的相位控制, 使相干功率合成的效率最高达到 93.6%, 并且保障了相干功率合成系统的稳定。基于 LabVIEW 的相位闭环控制是微波磁控管相干功率合成系统获取大功率和高效率的关键技术, 能够促进注入锁频磁控管在微波能工业中的应用。

关键词: 微波磁控管; 相干功率合成; 相位控制; 注入锁频; 虚拟仪器技术; 微波能; 合成效率; LabVIEW

中图分类号: TN123

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2018)02-0034-04

Synthesis of coherent power of microwave magnetrons based on two-way 15 kW continuous wave

WEI Yu, CHEN Xiaojie, LIU Zhenlong, LIU Changjun

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: It is necessary to overcome the phase drift existing when the injection frequency locking magnetron works in order to improve the synthesis efficiency of coherent powers of large-power microwave magnetrons and realize a long-term stable output. On basis of LabVIEW, the closed-loop phase control on the coherent power synthesis system of two-way S-waveband 15 kW injection frequency locking magnetrons was realized. By carrying out the phase control with 1.8 degrees of phase shift precision for the injection frequency locking magnetrons, the maximum efficiency of the coherent power synthesis can reach 93.6%, in addition, the stability of the coherent power synthesis system can be assured. The closed-loop phase control based on LabVIEW is a key technology for the coherent power synthesis system of a microwave magnetron to obtain large power and high efficiency, it is able to promote the application of injection frequency locking magnetron in the field of microwave energy.

Keywords: microwave magnetron; coherent power synthesis; phase controlling; injection frequency locking; virtual instrument technology; microwave energy; synthesis efficiency; LabVIEW

微波加热具有效率高、速度快的特点, 相比传统加热节能优势明显。推动微波能在工业领域应用, 符合我国节能减排的基本国策^[1]。目前阻碍微波能工业应用的一大瓶颈是缺乏可靠的工业用大功率微波源^[2]。磁控管因为其价格低和效率高的优势, 已经被证明是适合大规模工业应用的微波源^[3], 需要进一步采用相干功率合成技术提高功率^[4]。大功率连续波磁控管本身具有输出频率

不稳定、相位随机变化等缺点^[5], 无法直接进行功率合成, 需要通过对磁控管进行外部注入锁频, 才能进行磁控管高效率相干功率合成。因此, 基于注入锁频的磁控管相干功率合成技术是目前获得大功率微波的一种有效方法。

国内外对磁控管的注入锁相已经有不少研究, 比如 2009 年美国 E.J Cruz, B.W Hoff 等人用 2 450 MHz 的磁控管通过互注入锁定的方式完成了注入锁相和相干功率合成实验, 实验得到了 2 kW 左右的合成功率和 80% 的合成效率^[6]。人们对小功率磁控管的注入锁定和相干功率合成做了很多研究, 但是对 10 kW 以上大功率磁控管的注入锁定和功率合成研究较少^[7-10]。

收稿日期: 2017-05-12. 网络出版日期: 2017-06-20.

基金项目: 973 计划项目 (2013CB328902).

作者简介: 位宇 (1990-), 男, 硕士研究生;

刘长军 (1973-), 男, 教授.

通信作者: 刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

对于注入锁频磁控管的相干功率合成,微波的相位差是影响合成效率的关键因素。由于磁控管存在相位漂移现象,两路微波的相位差无法长期稳定。LabVIEW 由于开发效率高、程序修改维护方便、库函数丰富、拥有可视化界面和集成性强,成为现在流行的虚拟仪器开发平台^[1]。本文利用 LabVIEW 平台进行 S 波段 15 kW 大功率磁控管的相位控制,实现了两路相干功率合成最高 93.6% 的效率,并维持了输出功率的稳定。

1 注入锁频磁控系统

S 波段 15 kW 注入锁频磁控管如图 1 所示,注入锁频磁控管可以看作一个整体,是在普通磁控管的基础上加入注入锁频模块来改善磁控管的输出特性。注入锁频磁控管由两部分组成:功率输出部分(矩形框所示)当开启高压直流电源后磁控管正常起振,其阳极电压达到 12.5 kV,阳极电流达到 2.2 A,输出微波功率达到 15 kW 左右,经四端口环行器和双定向耦合器后被大功率水负载吸收。注入锁频部分(圆角矩形框所示)通过外部固态信号源产生稳定且与磁控管自由振荡频率相近的微波信号,经功率放大器和环行器注入到磁控管内部,注入信号会将磁控管的输出频率牵引至注入信号的频率,输出微波的相位与注入信号的相位差保持恒定,从而实现对磁控管注入锁相^[4]。

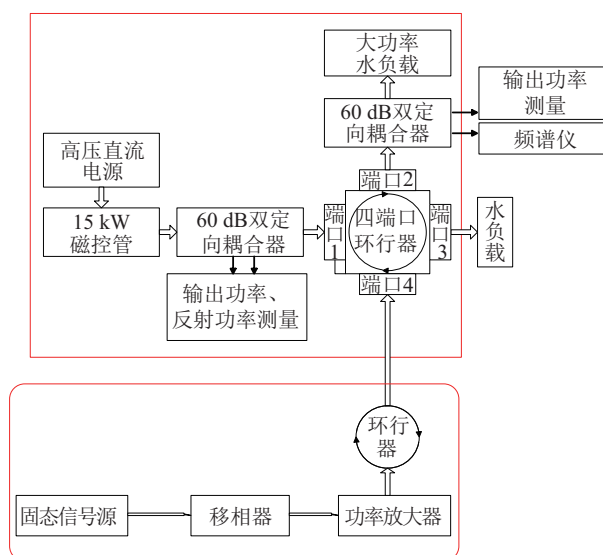


图1 注入锁频磁控管

磁控管注入锁定后,磁控管输出信号的相位由随机分布变为与注入信号相位差锁定。通过对注入信号移相可改变磁控管输出微波的相位,为磁控管的相干功率合成提供基础。系统采用的 S 波段 15 kW 磁控管实物如图 2 所示。



图2 S波段15 kW水冷磁控管

2 两路注入锁频磁控管相干功率合成

两路注入锁频磁控管相干功率合成系统如图 3 所示,对两路磁控管分别注入锁频以后,两路注入锁频磁控管输出信号的频率相同,通过合路器进行功率合成后输出并被大功率水负载吸收。为提高功率合成效率,将其中一路微波输出信号作为参考信号,上位机的相位控制程序根据频谱仪测得的合成端信号幅值数据,对另外一路微波进行移相。

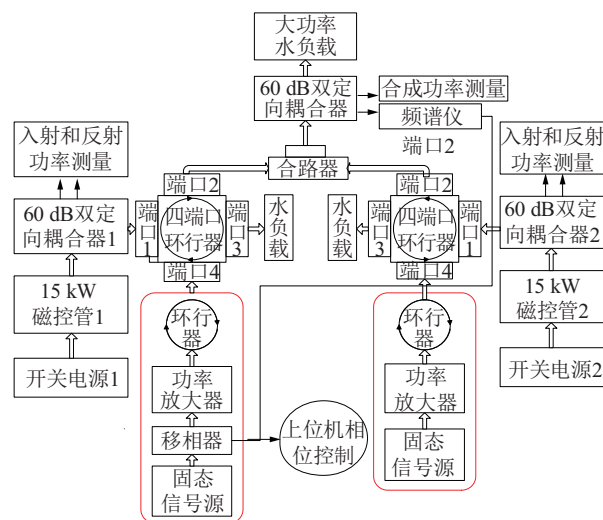


图3 相干功率合成系统

对于两路信号的相干功率合成,如果两路微波信号的频率相同,那么两路信号进行相干功率合成时合成效率^[5]为

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_1 + P_2} = \frac{k^2 + 2k \cos \Delta\theta + 1}{2k^2 + 2}$$

式中: P_{out} 为合成功率, P_1 和 P_2 分别为两路输入信号的功率, k 为两路信号的幅度比, $\Delta\theta$ 为两路信号的相位差。假设 $\Delta\theta=0^\circ$, 即两路信号相位相同, 合成效率与幅度比的关系为

$$\eta = \left(\frac{k}{k^2 + 1} + \frac{1}{2} \right) \times 100\%$$

如图 4 所示,当幅度比是 1 时,合成效率最高。幅度比偏离 1 以后,合成效率逐渐下降。因

此在进行相干功率合成时,应尽可能使两路信号的幅度相同。

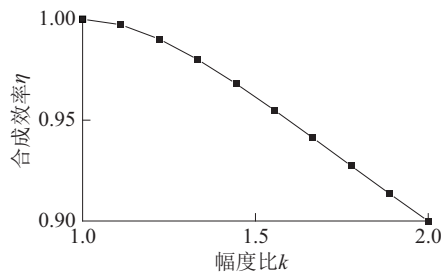


图4 功率合成效率与幅度比的关系

假设 $k=1$, 即两路信号的幅度比相同, 那么合成效率与相位差关系为

$$\eta = \left(\frac{1}{2} \cos \Delta\theta + \frac{1}{2} \right) \times 100\%$$

如图 5 所示, 当 $\Delta\theta$ 为 0 时, 合成效率最高; $\Delta\theta$ 为 π 时, 合成效率最低。因此在进行相干功率合成时, 应尽量减小两路微波的相位差。由于磁控管存在相位漂移, 难以通过人工调节移相器长时间满足此条件。

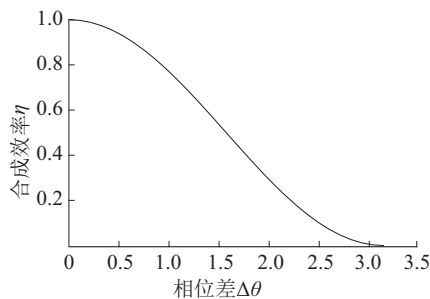


图5 合成效率与相位差的关系

3 LabVIEW 平台下控制磁控管移相

系统采用的移相器型号是 TELEMAKUS 公司的 TEP4000-5 移相器, 基本参数如表 1 所示。本文通过调用 TELEMAKUS 公司提供的 API 接口实现移相, 具体是通过 LabVIEW 中的 .NET 工具调用 DLL 文件实现对移相器的控制^[12-13]。

表1 数字移相器基本参数表

频率范围/ GHz	移相范围/ (°)	最大输入功率/ dBm	最小步进/ (°)	最大插入损耗/ dB
2~4	360	20	0.25	6

首先通过构造器节点创建一个设备引用, 然后通过 Load_drv() 函数加载设备驱动, 通过 Set_Phase() 函数设置相移度数, 最后通过 Unload_drv() 函数卸载驱动并关闭设备引用。

系统使用频谱分析仪来测量合成端信号的频谱, 频谱分析仪型号是 RS FSV40, 验证注入锁频的结果, 同时获得相干功率合成后的微波功率数

值。通过 GPIB 总线连接频谱仪, 将可编程标准命令 SCPI (standard commands for programmable instruments) 封装起来, 实现对频谱仪的控制^[14-15]。

中心频率设为 2.45 GHz, 带宽设为 5 MHz。通过寻峰标记信号的幅值和对应的频点。从频谱仪读取频谱并实时显示。当移相器对其中一路信号进行 360° 移相时, 能够记录合成信号幅值随相位的变化过程, 获得“幅值-相位”关系。如图 6 所示, 系统在运行过程中记录两路微波相位差与功率合成输出幅度的关系, 其中横坐标将 360° 相位分为 100 个点, 纵坐标表示合成信号的幅值。

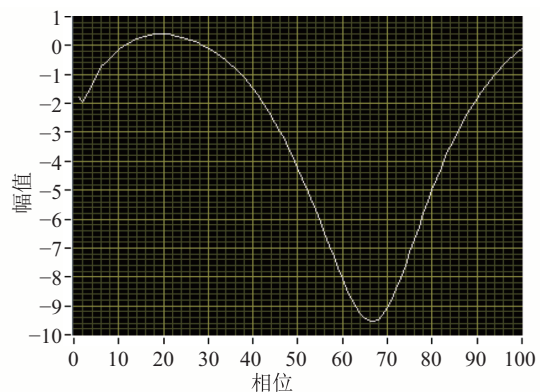


图6 相位差与合成输出幅度的关系

4 相干功率合成的实验验证

系统控制相位的流程如图 7 所示, 移相器自动完成步进为 3.6° 的 360° 粗调扫描相位, 上位机从频谱仪读取合成信号的幅值。合成信号的幅值会随相位不断变化, 上位机记录“幅值-相位”关系。通过比较 100 个采样点的幅值, 寻找最大的幅值, 并将对应的相位值赋给移相器。再在该值附近进行细调扫描相位, 移相步进 1.8°, 设 10 个采样点循环采样, 寻找最大的幅值, 并将对应的相位值赋给移相器, 这个相位值可以获得接近最佳的合成效率。当磁控管发生较大相位漂移, 合成微波功率下降到最大值 90% 以后, 将扩大范围进行粗调移相器重新寻找最大值。

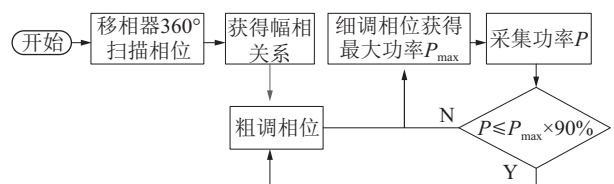


图7 相位控制流程

在两路磁控管的相干功率合成实验中, 对 S 波段 15 kW 连续波磁控管进行注入锁频相位控

制, 实验测得结果如表 2 所示, 相干功率合成效率最高达 93.6%。控制系统可以在磁控管相位发生漂移时, 及时调节移相器, 保证相干功率合成系统长时间稳定工作。

表 2 两路微波相干功率合成

P_1/kW	P_2/kW	锁频频率/MHz	最大 P_{tot}/kW	$\eta/\%$
14.52	14.49	2449.3	27.14	93.6

5 结论

1) 微波的相位差是影响两路大功率磁控管相干功率合成效率的关键。2) 本文在 LabVIEW 平台下实现对 S 波段 15 kW 注入锁频磁控管的相位控制并完成两路微波的相干功率合成。在相位步进为 1.8° 的条件下, 获得了最高 93.6% 的相干功率合成效率。

该技术可以使系统长时间保持较高的合成效率, 有望在多支磁控管相干功率合成系统中得到应用, 并促进大功率磁控管的工业应用。

参考文献:

- [1] 刘长军, 吴昕. 微波能工业应用研究进展[J]. 信息与电子工程, 2012, 10(4): 451–455.
- [2] 杨宋寒, 刘友春, 王荣川, 等. 大功率长寿命连续波磁控管注入锁频技术[J]. 真空电子技术, 2013(5): 96–98.
- [3] 岳松, 张兆传, 高冬平. 阻抗匹配条件下磁控管的注入锁频[J]. 物理学报, 2013, 62(17): 509–516.
- [4] 霍飞向, 刘征宇, 黄何平, 等. S 波段 1 kW 连续波磁控管

拓展注入锁频带宽[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(2): 251–254.

- [5] 银振宇, 位宇, 刘臻龙, 等. 1 kW 注入锁定连续波磁控管微波相干合成实验研究[J]. 应用科技, 2016, 43(5): 20–23.
- [6] CRUZ E J, HOFF B W, PENGVANICH P, et al. Experiments on peer-to-peer locking of magnetrons[J]. Applied physics letters, 2009, 95(19): 351.
- [7] 冯永强, 郭庆功, 张昊, 等. C 波段 4 路磁控管相干功率合成微波源实验研究[J]. 真空电子技术, 2014(4): 52–57, 61.
- [8] CHOI G W, KIM H J, KIM H J, et al. The self-injection-locked magnetron[C]//IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA: IEEE, 2008: 445–446.
- [9] 魏惠月. L 波段磁控管锁相及功率合成技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011: 53–57.
- [10] 尹志超, 郭庆功. C 波段磁控管注入锁相的实验研究[J]. 真空电子技术, 2012(1): 64–66.
- [11] 徐磊, 翟文涛, 严利民, 等. 基于 LabVIEW 的流量测试系统设计[J]. 仪器仪表用户, 2010, 17(5): 9–10.
- [12] 侯博, 廖醒宇. 基于 LabVIEW 环境下调用 DLL 实现仪器控制[J]. 电子世界, 2015(21): 96–98.
- [13] 徐富新, 李成龙, 陈芳, 等. LabVIEW 平台下用 Windows API 函数绘制波形图[J]. 微计算机信息, 2011(12): 123–125.
- [14] 聂鹏, 宋平, 徐涛, 等. 基于 LAN 总线的频谱仪控制技术的实现[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2014, 31(6): 42–47.
- [15] 吕继宇, 张华春, 阴和俊. 基于 LabVIEW 的频谱仪控制系统设计[J]. 测试技术学报, 2005, 19(4): 426–431.

本文引用格式:

位宇, 陈潇杰, 刘臻龙, 等. 两路 15 kW 连续波微波磁控管相干功率合成技术[J]. 应用科技, 2018, 45(2): 34–37.

WEI Yu, CHEN Xiaojie, LIU Zhenlong, et al. Synthesis of coherent power of microwave magnetrons based on two-way 15 kW continuous wave[J]. Applied science and technology, 2018, 45(2): 34–37.