

DOI: 10.11991/yykj.201602004
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20160927.1607.002.html>

1 kW 注入锁定连续波磁控管微波相干合成实验研究

银振宇,位宇,刘臻龙,刘长军

四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要: 为满足工业应用大功率微波源的需求,开展了基于两路 S 波段 1 kW 注入锁定连续波磁控管的微波功率相干功率合成系统的实验研究。在理论上,分析了两路磁控管输出微波功率比和相位差对合成效率的影响。在实验中,用同步的微波源实现两路注入信号,采用磁控管注入锁定技术,通过虚拟仪器软件实现了自动化合成功率控制。实验成功进行了基于两路 1 kW 在 S 波段注入锁定连续波磁控管的相干功率合成。测试结果表明,两路 S 波段 1 kW 连续波磁控管的相干功率最高合成效率 $\geq 95\%$,为研究高效率的大功率合成微波源提供了重要的实验基础。

关键词: S 波段; 1 kW; 工业应用; 注入锁定; 功率相干合成; 自动控制; 磁控管

中图分类号: TN123

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2016)05-020-04

Study on coherent power combining system of 1 kW CW inject-locking magnetrons

YIN Zhenyu, WEI Yu, LIU Zhenlong, LIU Changjun

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

Abstract: In order to satisfy the requirement of high power microwave sources in industrial applications, an experimental study on the coherent power combining system of two-way S-band injection-locked continuous wave (CW) magnetrons were presented in this paper. The impacts of power ratio and phase differences on combining efficiency of the two magnetrons was analyzed theoretically. Coherent controlling of the two-way microwave sources was realized by a synchronized injection. Signals were injected in two ways with synchronous microwave sources, and magnetron injection locking was applied to the experiments. Automatic power combining control was achieved with virtual instrument software. The experiments of coherent power combining based on two-way 1kW S-band CW inject-locking magnetrons were performed. The test shows that two-way S-band 1kW CW magnetrons coherent power combining efficiency is equal or higher than 95%. The results provide an experimental basis for the power combining of high power microwave sources.

Keywords: S-band; 1 kW; industrial application; inject-locking; coherent power combining; automatic control; magnetron

磁控管效率高、成本低、体积小,在军事、工业、农业、医疗卫生等领域应用中具有诸多优势,一直发挥着重要作用^[1]。多路连续波磁控管通过微波相干功率合成,是获取高输出功率作为大功率微波源使用的一种有效方式^[2-3]。传统的非相干功率合成方法成本低,但是合成效率低,输出功率提升不明显,各个磁控管安装位置的设计不当引起磁控管间

较强的互耦,影响微波源的工作稳定性和工作寿命^[4]。实现多个磁控管在工作频率、相位相同下的微波功率相干合成成本高,但是可大幅度提高合成效率。在空间太阳能电站技术中探讨了通过磁控管注入锁定下进行相位的调节以实现相位接近一致时的高效率功率合成^[5-6]。

连续波磁控管自由振荡状态下输出特性差,输出频率与输出相位均不稳定,对于实现连续波磁控管微波相干功率合成是一个难题。本文采用了连续波磁控管的注入锁定技术,改善了磁控管的输出特性。结合微波相干功率合成技术,成功实现了两路注入锁定磁控管的高效率相干功率合成,相干功率

收稿日期: 2016-02-17. 网络出版日期: 2016-09-27.
基金项目: 973 计划项目(2013CB328902); 国家自然科学基金项目
(61271074).

作者简介: 银振宇(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.

合成效率测试结果大于 95%。

1 两路磁控管相干功率合成技术

微波功率合成根据各微波源输出信号的频率及相位的一致性分为非相干功率合成与相干功率合成^[7]。相干功率合成需要各微波源的频率和相位一致,合成效率通常高于非相干功率合成的效率,能够长时间稳定工作。本文研究两路磁控管子系统相干功率合成,为了实现较高的合成效率和系统稳定性^[8],在实验中利用波导合路器进行功率合成,通过自动化控制调节两路信号的相位。当两路信号在同频情况下功率合成时,合成效率和两路信号的相位差、幅度比可由下式表示^[9]:

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{OUT}}}{P_1 + P_2} \right) \times 100\% = \left(\frac{1 + 2k \cos(\Delta\varphi) + k^2}{2 + 2k^2} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中 η 为两路连续波磁控管微波能量合成效率, k 为电场强度幅值比, 相位差为 $\Delta\varphi$ 。合成效率主要受两路信号相位差和幅度比的影响。

图 1 为两路注入锁定连续波磁控管系统框图,采用外部注入锁定方式,两路子系统的外部相干注入信号通过同一微波固态源提供,注入信号的频率与磁控管自由振荡频率接近^[10-11]。其中一路注入

信号通过移相器进行相位调节,注入锁定后磁控管的输出微波相位跟随注入信号的相位保持恒定。

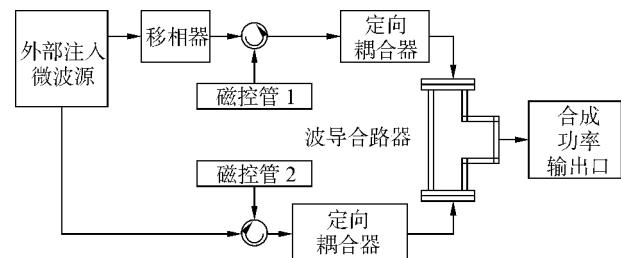


图 1 频域脉冲压缩方法框图

2 两路磁控管微波相干功率合成实验系统

两路磁控管微波相干功率合成实验系统如图 2 所示。微波固态信号源(HMC-T2220)对 2 支磁控管进行注入锁定,两路由注入锁定磁控管产生的微波能量经环形器和双定向耦合器最终在功率合成器两端进行功率合成,最终两路磁控管的合成功率被水负载所吸收。为防止微波能量发生反射损坏器件,在微波传输中安置环形器吸收反射能量进而保护器件。其中通过双定向耦合器提取两路微波能量的相位信息,传输至上位机进行运算处理。并通过上位机对移相器的调节,完成对两路微波能量相位差的改变。

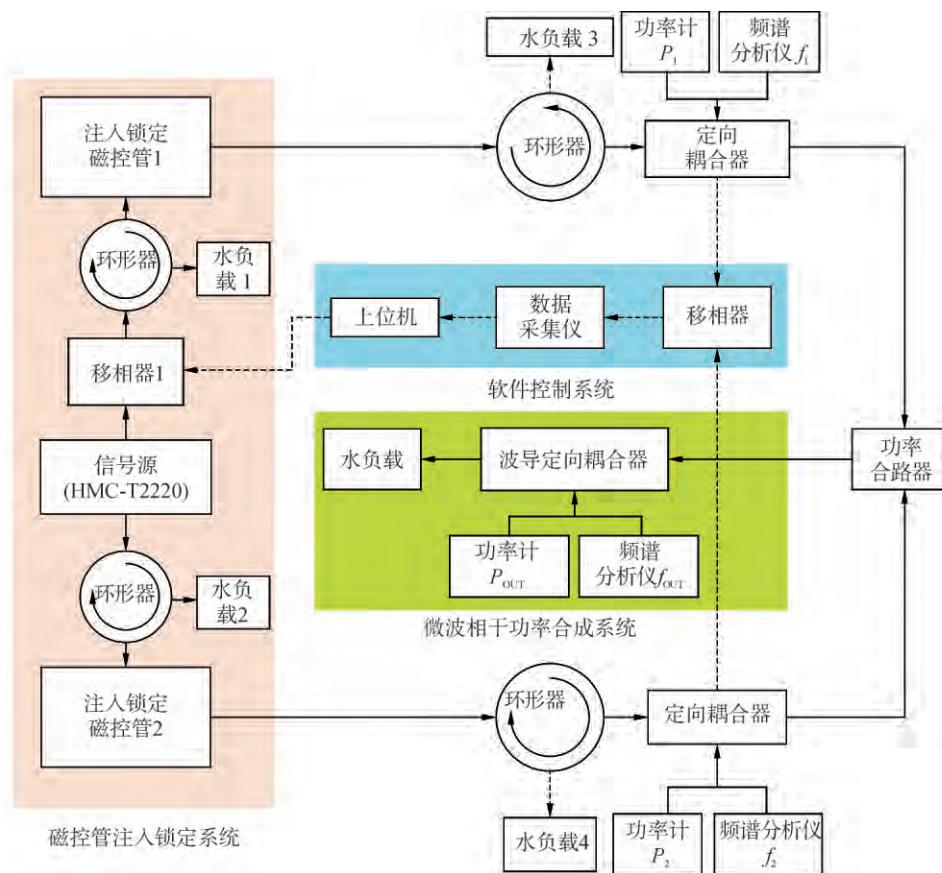


图 2 微波功率相干合成系统框图

在功率合成器两端的定向耦合端口处,通过中电第 41 所的 AV2434 峰值功率计测量得到两路微波能量功率值 P_1, P_2 ,通过 R&S 频谱仪测量得到两路微波能量的输出频率 f_1, f_2 。在合成器输出口的定向耦合器中得到合成的输出功率 P_{OUT} 及合成端口的输出频率 f_{OUT} ,合成效率如式(1)所示。

软件控制系统的运行界面如图 3 所示,主要实现两路注入锁定磁控管功率合成的自动控制。实验中采用的移相控制系统利用 GPIB-USB 总线连接数据采集仪、频谱分析仪和上位机,搭建包含有移相器与鉴相器的实验平台。实现微波注入信号的 $-180^\circ \sim +180^\circ$ 相位调节,相位精度为 5° 。软件结构主要是基于 LabWindows/CVI 软件开发,并结合直接存储器存取、系统定时控制、数据高速传送等技术。控制界面中包括功率指示、注入微波信号频率等。

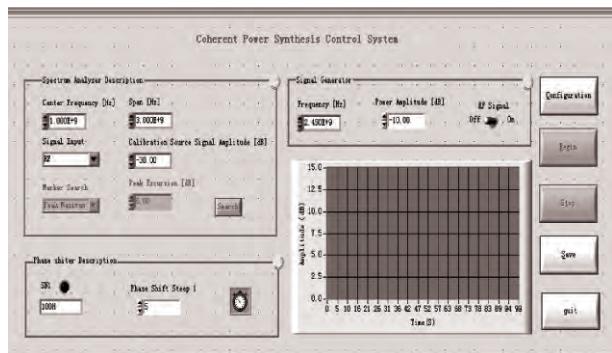


图 3 软件控制系统界面

3 实验结果与分析

本文对两路磁控管输出信号幅度比对功率合成效率的影响进行了实验研究。两路连续波磁控管的微波功率相干合成系统如图 4 所示。

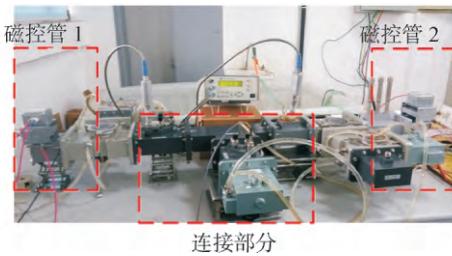


图 4 两路磁控管微波相干功率合成系统

设置微波信号源的输出频率为 2 452 MHz, 功率为 -3 dBm 经过功率放大器后得功率为 44.2 dBm 的微波信号, 将其分别注入至磁控管 1 和磁控管 2, 进行注入锁定。控制移相器 1 对外部注入信号的相位进行调节, 注入锁定磁控管 1 的输出信号相位也随之发生变化, 实现对磁控管的输出信号相位差 $\Delta\theta$ 的调节。实验中维持磁控管 1 的输出功率基本不

变, 通过改变磁控管阳极电流来改变磁控管 2 的输出功率。保证两路注入信号的功率能将磁控管输出信号锁定在 2 452 MHz 频率下, 实现 K 值的改变。

对不同幅度比($K = \sqrt{P_1/P_2}$)状态下进行了功率合成的实验研究。由式(1)可知, 在两路合成信号频率相同、输出功率相近时, 注入锁定磁控管输出信号的合成效率随相位差的减小而增加。在保证相位差较小的情况下, 从实验中获取到的关于功率比变化对合成效率的影响如图 5 所示。图 5 为两路输出微波能量合成效率受幅度比及相位差变化情况。图中曲线分别是理想情况下相位差从 $0^\circ \sim 55^\circ$ 时功率比的变化与其合成效率的关系图。

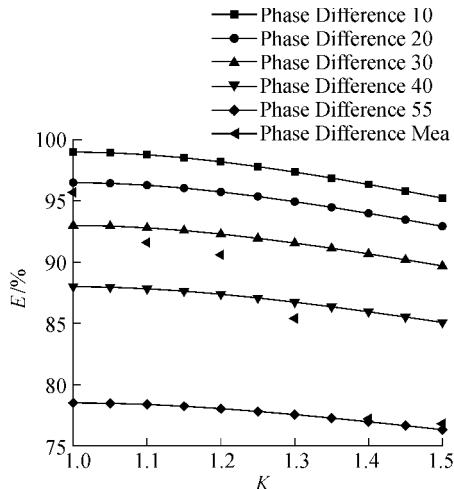


图 5 幅度比变化对效率影响

从图中得到, 随着 K 的增加, 合成效率值减小。随着幅度比的增大, 其相位浮动也变大, 因此在 $K=1.4$ 时, 其合成效率下降很多。 K 值分别为 1、1.3 和 1.5 时测量得到的最佳的功率合成效率值如表 1 所示。其中 P_1, P_2 为两路磁控管输出微波能量功率值; P_{OUT} 为合成端输出功率值; f_{OUT} 为合成端微波能量输出频率; K 为两路微波能量幅度比; η 为微波能量合成效率。

表 1 幅度比对磁控管相干功率合成效率的影响

K	P_1 / W	P_2 / W	$f_{\text{OUT}} / \text{MHz}$	$P_{\text{OUT}} / \text{W}$	$\eta / \%$
1	1 008	1 012	2 452	1 933	95.7
1.3	1 013	604	2 452	1 381	85.4
1.5	998	421	2 452	1 090	76.8

随着两路磁控管输出幅度比的增加, 合成效率下降。实际测量的功率合成效率低于式(1)中理想条件下的合成效率。这主要由于当两支磁控管的输出功率相差较大时, 功率合成器的端口反射功率会加大。另外, 考虑功率合成器的插入损耗、功率合成器相位不平衡度等使得实验得到的合成效率略低于

计算结果。实验结果分析可得,若要得到高于 86% 的合成效率,幅度比 K 应小于 1.3。

4 结论

本文开展了 1 kW 注入锁定的连续波磁控管直接波导相干功率合成研究。实验结果表明: 1) 实现基于 LabWindows 的智能移相系统, 相位控制精度为 5° ; 2) 相位、频率、幅度比一致性越高则合成效率越高; 3) 合成最高效率高于 95%。为实现工业应用相干的高功率微波合成奠定了基础。

参考文献:

- [1] 吴群. 磁控管的研究现状与发展趋势 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(5): 9–12.
- [2] 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.
- [3] 周传明, 刘国治, 刘永贵, 等. 高功率微波源 [M]. 北京: 原子能出版社, 2007: 41–45.
- [4] 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.
- [5] MITANI T, SHINOHARA N, MATSUMOTO H. Development of a pulse-driven phase-controlled magnetron [C]// 2007 IEEE International Vacuum Electronics Conference. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2007.
- [6] SHINPOHARA N, MATSUMOTO H, HASHIMOTO K. Solar power station/satellite (SPS) with phase controlled magnetrons [J]. IEICE transactions on electronics, 2003, E86-C(8): 1550–1555.
- [7] 纪新峰. X 波段功率合成技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [8] 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.
- [9] 董士伟, 王颖, 李军, 等. 微波毫米波功率合成技术 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012: 125–129.
- [10] 郭永杰, 郭庆功. 基于注入锁相的磁控管微波源系统稳定性研究与测试 [J]. 现代电子技术, 2013, 36(9): 144–150.
- [11] 霍飞向, 刘征宇, 黄何平, 等. S 波段 1kW 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, 261.

本文引用格式:

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.
YIN Zhenyu, WEI Yu, LIU Zhenlong, et al. Study on coherent power combining system of 1 kW CW inject-locking magnetrons [J]. Applied Science and Technology, 2016, 43(5): 20–23.

(上接第 19 页)

- [8] STORN R. Designing nonstandard filters with differential evolution [J]. IEEE signal processing magazine, 2005, 22(1): 103–106.
- [9] GUO Z Y, QIANG A, CHENG B, et al. Research on work roll temperature with improved differential evolution in hot strip rolling process [J]. Journal of system simulation, 2007, 19(21): 4877–4880.
- [10] SINGH H, SRIVASTAVA L. Modified differential evolution algorithm for multi-objective VAR management [J]. International journal of electrical power & energy systems, 2014, 55: 731–740.
- [11] SHI Y H. Brain storm optimization algorithm [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Swarm Intelligence. Berlin: Springer, 2011: 1–3.
- [12] XUE J Q, WU Y L, SHI Y H, et al. Brain storm optimization algorithm for multi-objective optimization problems [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Swarm Intelligence. Berlin: Springer, 2012, 513–519.
- [13] QIU H X, DUAN H B. Receding horizon control for multiple UAV formation flight based on modified brain storm optimization [J]. Nonlinear dynamics, 2014, 78(3): 1973–1988.
- [14] 沈林. 基于头脑风暴算法优化的 v-SVR 的研究及应用 [D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [15] EUSUFF M M, LANSEY K E. Optimization of water distribution network design using the Shuffled frog leaping algorithm [J]. Journal of water resources planning and management, 2003, 129(3): 210–225.
- [16] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia: IEEE, 1995.
- [17] YUCEK T, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2009, 11(1): 116–130.

本文引用格式:

刁鸣, 王小兰, 高洪元. 差分头脑风暴算法及其在频谱感知中的应用 [J]. 应用科技, 2016, 43(5): 14–19, 23.
DIAO Ming, WANG Xiaolan, GAO Hongyuan. Differential brain storm optimization algorithm and its application to spectrum sensing [J]. Applied Science and Technology, 2016, 43(5): 14–19, 23.