

连续波 1 kW 磁控管注入锁频初步实验研究

霍飞向 黄何平 刘 玲 银振宇 郁成阳 刘长军

(四川大学电子信息学院, 四川成都 610064)

摘 要: 注入锁频技术是实现磁控管相干功率合成的关键技术之一。本文研究并搭建了 S 波段 1 kW 连续波磁控管的注入锁频系统。分析了灯丝电源对磁控管输出特性的影响, 通过降低灯丝电流的方式使磁控管自由振荡输出频带宽度由 12 MHz 降低至 300 kHz 的同时延长了磁控管的使用寿命。注入锁频技术的引入进一步降低了磁控管输出信号的边带噪声。本文通过提高注入信号的功率, 在实现 1 kW 连续波输出功率的同时, 获得了高达 14 MHz 的锁频带宽。该系统的实现为多只连续波磁控管的相干功率合成提供了重要的实验依据。

关键词: S 波段, 连续波磁控管, 注入锁频, 锁频带宽

Primary Experimental Study on the Inject-Locking of a 1kW CW Magnetron

Feixiang Huo, Heping Huang, Ling Liu, Zhenyu Yin, and Changjun Liu

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

Abstract: The inject-locking on a magnetron is a key technique to achieve coherent power combining to extend the power capacitance of magnetrons. In this paper, the S-band 1 kW continuous wave magnetron inject-locking system is built and studied. The influence of the filament current on output characteristics of the magnetron is studied. The bandwidth of the free oscillating magnetron is reduced from 12 MHz to 300 kHz by decreasing its filament current, and the service time of magnetron will be expanded at the same time. The sideband noise of the magnetron is apparently reduced as adopting of inject-locking technology. In addition, the locking bandwidth reached to 14 MHz when the magnetron have an output power of about 1 kW by enhancing the power of inject signal. The implementation of the system provides an important experimental basis for coherent power combining of Multi-Magnetrons.

Key words: S-Band; CW Magnetron; Inject-Locking; Locking Bandwidth

1 引言*

磁控管是一种效率较高的大功率微波源, 不仅在军事、工业等领域得到了广泛的应用。实践证明, 磁控管有输出功率高、转换效率高和工作可靠性高等优点^[1]。工业应用中的微波对象大都体积庞大, 对功率提出了较高的要求。单只磁控管由于自身限制功率容量有限^{[2]-[3]}, 不能满足工业应用的要求。故需要进行多只磁控管的功率合成来获得大功率的连续波输出, 传统的非相干功率合成的合成效

率低、难以消除各个磁控管之间的互耦, 严重影响了微波源的工作稳定性和工作寿命, 严重时将直接损坏微波源。

为了实现相干功率合成首先需要改善磁控管输出信号的频谱宽度, 得到稳定的输出频率, 降低磁控管输出信号的边带噪声。同时, 为了便于进行多只磁控管的相干功率合成, 克服磁控管因制造工艺造成的一致性差的缺点需要拓展磁控管的稳定输出频带宽度。对于磁控管输出信号频谱的改善, Brown 提出“内部反射机理”^{[4][5]}方案, 日本京都大学 Tomohiko Mitani 等人提出减小磁控管供电电源的波纹系数、增加磁控管谐振腔阴极阳极间的距离、关闭灯丝电源、加入锁相环反馈系统等方案^{[6][7]}。

* 国家 973 计划 2013CB328902 资助。

2 连续波磁控管注入锁频技术

早在二十世纪五六十年代 Adler 等^[8]就对微波振荡器的锁相进行了理论方面的研究自此以后各国学者对微波振荡器注入锁相产生了浓厚的兴趣。磁控管注入锁频是指在磁控管中注入一个低电平的高稳定度的外部基准频率微波信号,该信号频率接近于磁控管的固有振荡频率 f_0 ,经过环形器直接注入到磁控管中,当注入信号幅度达到相当数量级时,受高压调制脉冲控制的磁控管振荡频率与被注入信号的相位同步。在锁频范围内,磁控管的输出频率与锁定频率为同一值,磁控管的输出频率直接由注入信号频率控制。一般注入锁频系统如图 1 所示,一定功率的微波信号通过三端口环形器输入端口注入至磁控管谐振腔,在锁频带宽内三端环形器的输出端口将输出频率稳定、相位稳定的微波信号。著名的 Adler 公式给出了一般情况下注入锁频带宽与锁频信号功率的关系:

$$\Delta f = \frac{2f_0\rho}{Q_E} \quad (1)$$

式中 Δf 为锁频带宽, ρ 称为注入比,表示注入功率 P_I 与被锁定磁控管的输出功率 P_O 的比值的开方,即 $\rho = \sqrt{P_I / P_O}$, f_0 为磁控管自由振荡频率, Q_E 为磁控管外观品质。从式中可以看出要获得一定的锁

定带宽 Δf 就必须有足够的注入功率 P_I 。

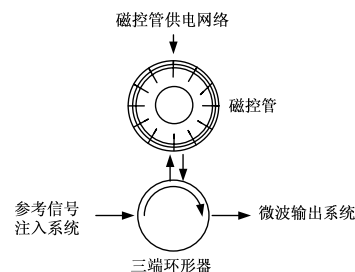


图 1 注入锁频系统框图

3 磁控管注入锁频实验系统

磁控管注入锁频研究的实验系统框图如图 2 所示。磁控管的供电系统由直流高压源和灯丝电源组成,均是自制模拟电源。由于独立灯丝电源的存在可以在磁控管稳定工作后,降低灯丝电流,这样可以提高磁控管输出信号的频谱纯度,同时可以有效地延长磁控管的使用寿命。磁控管自由振荡时输出微波信号经激励腔、波导环形器、波导双向定向耦合器传输至大功率水负载 1 由水吸收,这就是磁控管的输出路径。其中波导环形器的作用是防止大功率水负载 1 的匹配误差引起的反射功率对磁控管稳定工作的干扰,波导双向定向耦合器起到磁控管输出信号功率和频谱监测的作用。

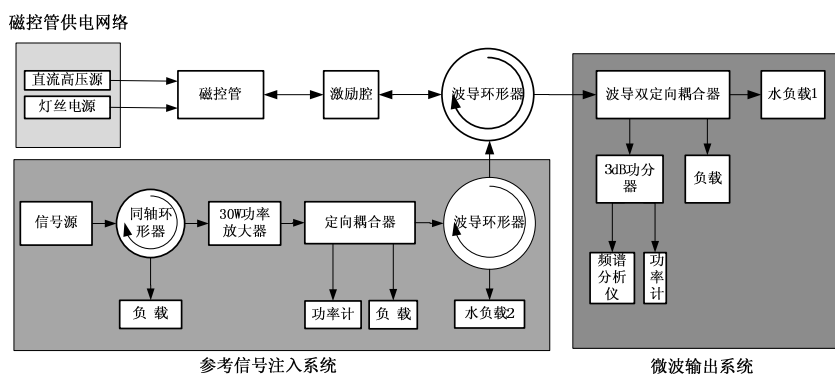


图 2 注入锁频实验系统框图

4 实验结果与分析

本文选用磁控管为阳极额定电压为 4.1 kV,灯丝电流 I_f 为 10 A,阳极电流 300 mA,冷却方式为水冷,额定输出功率为 900 W 的松下 2M210-M1J1 连续波磁控管。系统照片如图 3 所示。磁控管在自由振荡状态下,调节灯丝电源使磁控管灯丝电流 I_f

分别为 10 A 和 0 A,磁控管的输出微波频谱如图 4 所示。 $I_f=10$ A 时,磁控管输出信号频带宽度约为 10 MHz,中心频率约为 2458 MHz。从图 4 可以发现在磁控管稳定工作时降低磁控管灯丝电流 I_f 至 0 A 可有效改善磁控管自由振荡情况下的输出信号频带宽度。磁控管稳定工作后,阴极灯丝发射的电子会有一部分重新返回至阴极灯丝。

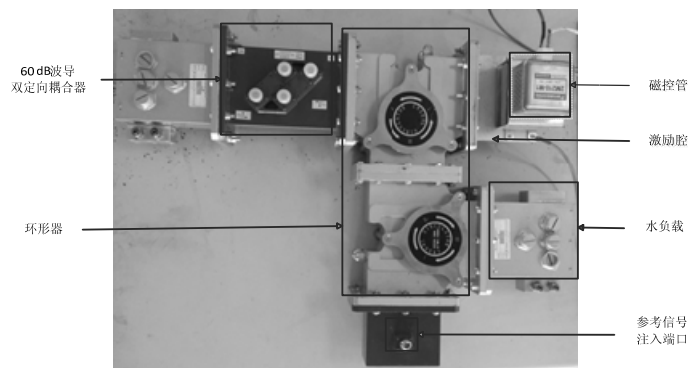


图3 注入锁频实验系统实物图

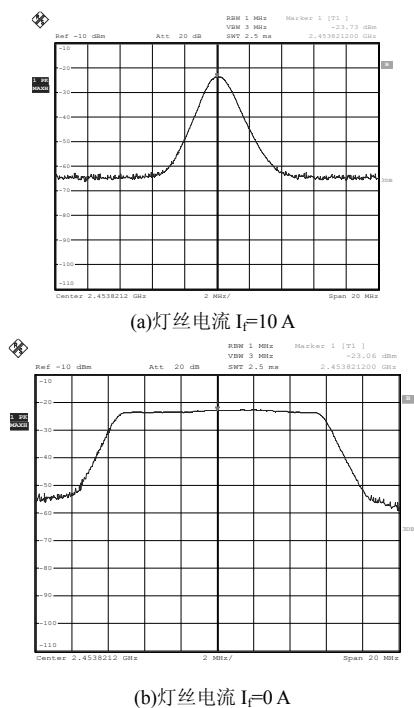


图4 未注入锁频时磁控管输出信号频谱 (SPAN=20 MHz)

5 总结

本文研究了用于相干功率合成的 S 波段 1 kW 连续波磁控管输出频谱的改善。磁控管工作后,降低灯丝电流可以有效地使磁控管输出频谱宽度由 11MHz 降为 300 kHz,在获得更好输出频谱的同时有效地延长了磁控管使用寿命。关闭灯丝电源状态下,进行注入锁频实验,注入锁频后,磁控管输出信号频率被锁定为注入信号频率,注入锁频后的磁控管可输出高于 950 W 的稳定连续波功率,锁定频率范围为 2449.7-2463.7 MHz,锁频带宽达到 14MHz,为多只磁控管的相干功率合成提供了一定的实验依据。

参考文献

- [1] 吴群. 磁控管的研究现状和发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学报, 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] 谢文楷,蒙林. 高功率微波振荡器功率合成中的锁频与锁相[J]. 电子科技大学学报.1994,23(4):393-399
- [4] Brown, W. C., The SPS transmitter Designed around the Magnetron Directional Amplifier, Space Power, vol. 7, no. 1, 1988, pp. 37-49.
- [5] Brown, W. C., Beamed Microwave Power Transmission and its Application to Space,IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 40, no. 6, 1992, pp. 1239-1250.
- [6] Mitani, T., N. Shinohara, H. Matsumoto, and K. Hashimoto, Experimental Study on Oscillation Characteristics of Magnetrons after Turning off Filament Current (translated version into English), John Wiley & Sons Inc., Electronics and Communications in Japan Part II. Electronics, vol.86, no.5, 2003, pp.1-9.
- [7] Mitani, T. and N. Shinohara, Development of a Pulse-Driven Phase-Controlled Magnetron, Proceedings of IVEC 2007, Kitakyushu, Japan, May 15-17, 2007, pp. 425-426.
- [8] Adler R. A study of locking phenomena in oscillators [J]. Proceedings of the IRE, 1946, 35(6): 351-357.