

文章编号: 2095-4980(2021)04-0688-05

## S 波段大功率注入锁频磁控管的输出特性

廖崇蔚, 陈潇杰, 余 泽, 陈 倩, 刘长军

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

**摘 要:** 在多路注入锁频大功率连续波磁控管的相干功率合成实验中, 输出特性分析有利于提升合成效率。搭建了一款 S 波段 20 kW 连续波磁控管注入实验系统, 该系统包含幅频可调的微波源和移相器, 由磁控管信号发生系统、注入锁定系统以及相位差检测系统 3 个小系统组成。利用外部注入信号, 分别对磁控管输出信号的相位稳定度、频谱和相位噪声进行实验分析, 实现了对实际磁控管在外部注入前后的特性分析。其中, 相位差波动最小不足  $4^\circ$ , 最大  $17^\circ$ , 锁频带宽在 2.9~13 MHz 之间变化, 在偏移频率 1 MHz 内对相位噪声抑制超过 40 dB; 并对注入锁频信号与输出信号之间的关系进行了总结, 为多路大功率磁控管的功率合成提供理论依据。

**关键词:** 注入锁频; 相干功率合成; 连续波磁控管; 相位差; 锁频带宽; 相位噪声

**中图分类号:** TN123

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2019512

## Injection frequency locking technology of S-band high power magnetron

LIAO Chongwei, CHEN Xiaojie, YU Ze, CHEN Qian, LIU Changjun

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

**Abstract:** In the coherent power combing experiment of multi-channel injection-locking of high-power continuous wave magnetron, the analysis on the output character can improve the combing efficiency. An injection-locking system of a 20 kW continuous wave magnetron at S-band is built, which is composed of three small systems: a magnetron signal generating system, an injection locking system and a phase difference detecting system. There are a microwave frequency source and a phase shifter with adjustable amplitude and adjustable frequency in the system. Using the external injection signal, the phase stability, spectrum and phase noise of the output signal of the magnetron are analyzed respectively. The minimum phase difference fluctuation is less than  $4^\circ$ , the maximum is  $17^\circ$ , the locking frequency band varies between 2.9 MHz and 13 MHz, and the phase noise suppression is over 40 dB. The relationships between the injection locking signals and the output signals are also summarized, which lays a foundation for the power combing of magnetrons.

**Keywords:** injection-locking; coherent power combing; continuous wave magnetron; phase difference; locking frequency band; phase noise

随着人们对能源的需求与日俱增, 具有清洁、高效等特点的微波能, 在工业、医药、化学等领域得到了广泛使用<sup>[1]</sup>。磁控管作为一种具有低成本、高效率、小体积等优点的大功率微波源, 突破了工业生产局限性<sup>[2]</sup>。磁控管的工作原理以及物理结构决定了其输出功率难以满足工业应用的大功率需求, 多路功率相干合成可有效解决这一问题, 同时通过注入锁频技术改善其输出特性, 最终实现多路连续波磁控管的高效合成。

注入锁频技术可在一定的带宽内, 提升磁控管输出稳定性, 延长磁控管寿命, 且具有系统简单、抑制杂散和相位可调等特点, 广泛用于工业生产中<sup>[3]</sup>。2015 年, 四川大学霍飞向等搭建 S 波段磁控管注入锁频系统, 锁频带宽达到 14 MHz, 相位噪声达到  $-94$  dBc/Hz@100 kHz<sup>[4]</sup>; 2018 年, 位宇等搭建了 2 路 S 波段 15 kW 注入锁频磁控管相干功率合成系统, 对一路信号进行  $360^\circ$ 移相, 获得了“幅值—相位”关系<sup>[5]</sup>。本文基于注入锁频技术, 设计了一款 S 波段大功率连续波磁控管注入锁频实验系统, 研究了不同注入锁频信号对输出特性的影响。

### 1 磁控管注入锁频系统

#### 1.1 注入锁频技术

注入锁频技术通过向磁控管输出端注入一个频率与自由振荡频率相近的稳定参考信号，实现输出信号和注入信号同步，降低磁控管自身以及负载驻波比变化引起的不稳定性。

在磁控管的阳极腔中，注入的参考信号耦合形成射频场，“牵引”A-K 间隙中的电子束。被“牵引”的电子束产生与外部注入频率同步的高频场，实现对输出相位和频率的控制。通过环形器注入的参考信号与输出信号隔离，系统结构如图 1 所示，其中  $f_i$  和  $f_o$  分别为注入的参考信号频率和输出信号频率<sup>[6]</sup>。

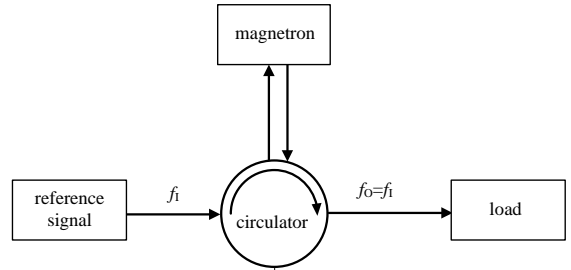


Fig.1 Brief diagram of injection frequency locking system  
图 1 注入锁频系统简图

#### 1.2 注入锁频磁控管系统设计

实际应用中，磁控管自身输出信号具有特殊性，自由振荡频谱不同于点频的输出状态，因此设置如图 2 所示的磁控管系统，对磁控管注入前后的特性进行分析。

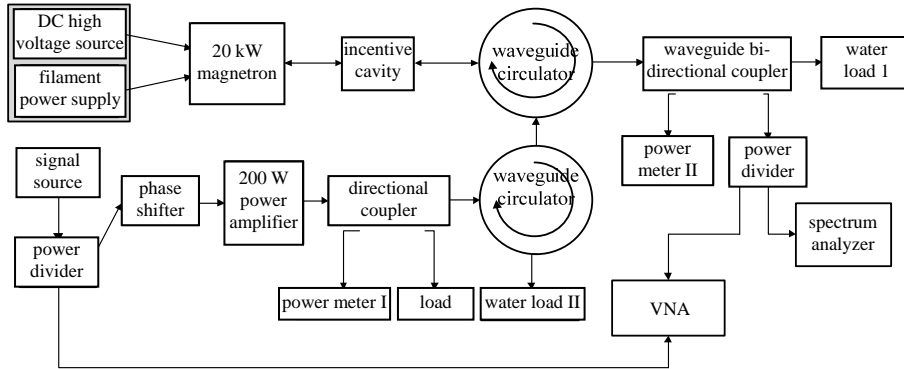


Fig.2 Block diagram of external injection locking magnetron system  
图 2 外部注入锁定磁控管系统框图

在直流预热完成后，开启直流高压电源，磁控管正常起振并输出 20 kW 的信号。信号源产生的参考信号等分出的一路信号通过波导环形器耦合到磁控管中，最终在波导双定向耦合器采集到输出信号；另一路信号作为矢量网络分析仪的参考信号，测量相位差。利用频谱分析仪，可以观测不同注入功率下的输出信号。

### 2 磁控管注入锁频的输出特性研究

#### 2.1 注入锁频相位及频谱特性分析

当输出功率为 18.0 kW 时，磁控管自由振荡，其输出信号的频谱如图 3 中的黑实线所示，磁控管输出频谱的中心频率为 2.45 GHz，频谱宽度为 1.2 MHz。通过频谱分析可知，磁控管是一个非线性源，且输出频率波动变化大，不能集中到单一频点输出。

当注入参考信号频率为 2.450 8 GHz、功率为 40 W 时，在 60 ms 的测量时间范围内，磁控管输出信号与注入信号呈无序排布，如图 4(a)中的黑线所示。注入的周期信号对磁控管的输出信号产生一个牵引作用，输出频谱出现“差拍投射”现象<sup>[7]</sup>，磁控管输出的微波能量分散在调制信号上，如图 5 所示。外部注入信号反向边带上的频率调制产物的峰—峰值频率间隔为差拍频率，相位差处于振荡状态。

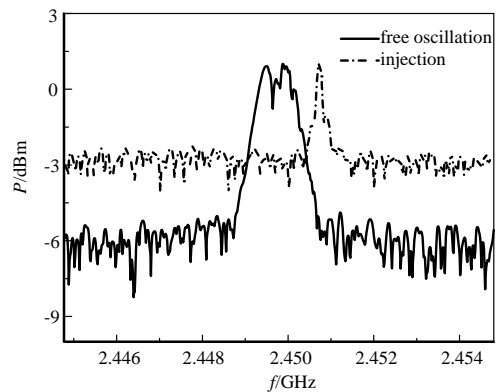


Fig.3 Free oscillation and injection frequency spectrum  
图 3 自由振荡和注入锁频频谱图

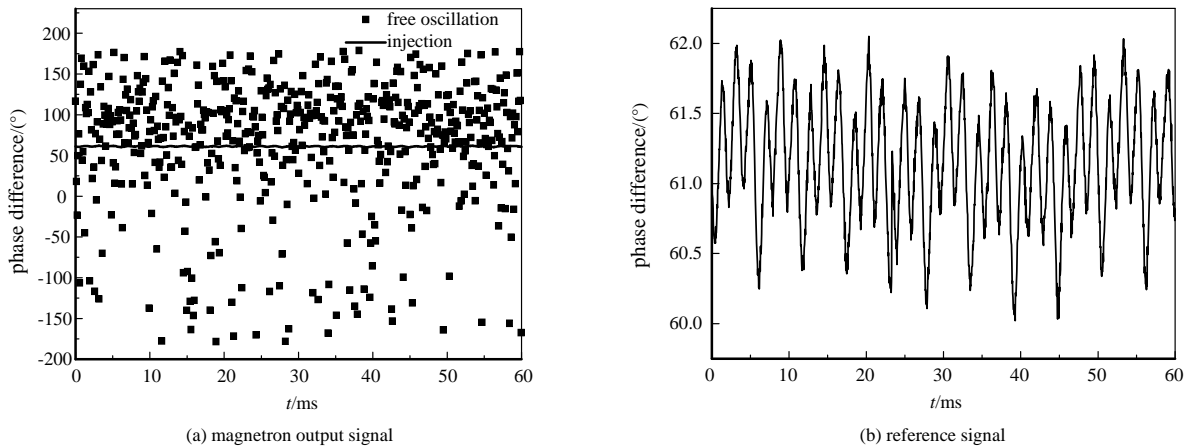


Fig.4 Phase difference of magnetron output signal and reference signal

图 4 磁控管输出信号和参考信号相位差

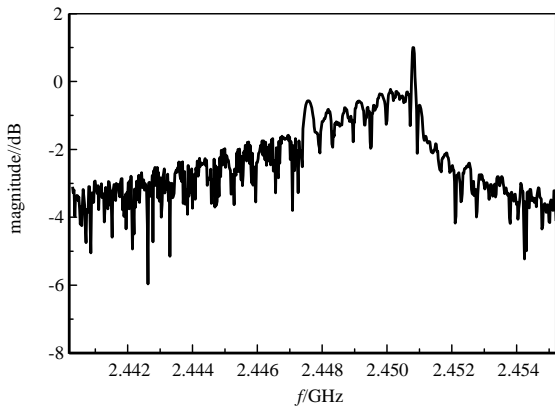


Fig.5 Beat projection spectrum

图 5 差拍投影频谱图

表 1 注入锁频磁控管的相位调节范围  
Table 1 Phase adjustment range of the injecting frequency-locked magnetron

phase shifter adjustment times	-180°—180°	
	phase difference/(°)	
1	-73.2	78.2
2	-133.2	139.0
3	-189.9	199.1
4	-246.4	263.2
5	-307.2	323.3
6	-370.1	382.9

当注入信号频率变为 2.45 GHz，功率不变时，输出信号频谱如图 3 虚线所示，输出信号与注入信号的相位差如图 4(a)和(b)黑实线所示。此时满足锁频条件，实现了磁控管输出信号和注入信号的同步，注入后输出信号比未注入时更加锐利，且边带抑制效果显著。从功率角度分析，杂散信号能量被牵引到锁频频点，使锁频频点下的功率得到提升；从相位角度分析，在测量时间内，注入信号与输出信号相位差保持稳定，相位抖动收敛，成功实现了注入锁频。

在实现注入锁频后，磁控管的非线性特性得到了抑制。保持功率以及频率不变，调节移相器，改变注入信号的相位，通过矢量网络分析仪，得到相位差变化的数据如表 1 所示。

当满足注入锁频的情况下，移相器每变化 60°，相位差平均变化 59.4°和 60.9°，所以外部注入信号和注入锁频后磁控管输出信号的相位差同步，相位调节范围为-180°~180°。

在磁控管锁频状态下，随机记录 4 组不同时间内的 60 s 相位差值，如图 6 所示。在测量时间内，散点 4 和散点 3 的相位差波动都不到 4°；而散点 1 和散点 2 的相位差漂移范围分别为 7°和 17°。由此可见，在注入锁频后，输出信号相位与注入信号的相位差存在一定的漂移<sup>[8]</sup>。

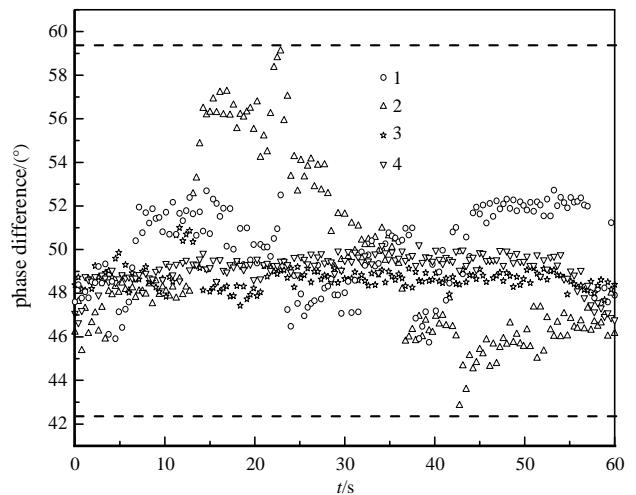


Fig.6 Drift scatter plot of 60 s phase difference

图 6 60 s 相位差漂移散点图

## 2.2 注入锁频带宽分析

外部注入信号的频率可调，注入信号功率保持 100 W 不变，改变磁控管输出信号功率大小，得到不同磁控管输出信号功率下对应的锁频范围，如表 2 所示。

表 2 等功率注入下功率可调磁控管的锁频带宽

injection signal power/W	output signal power/kW	phase lock range/GHz	frequency band/MHz
100	5.7	2.4342~2.4472	13.0
100	8.7	2.4418~2.4495	7.7
100	11.6	2.4478~2.4506	2.8
100	15.2	2.4482~2.4516	3.4
100	18.9	2.4480~2.4509	2.9

可以看出，在等注入功率下，随着磁控管自由振荡下的输出功率的增加，锁频带宽范围是呈减小的趋势，因此锁频带宽与注入比呈正相关的关系。同时，锁频范围的中心频率随磁控管输出功率的增加而发生一定的频率偏移<sup>[9]</sup>。

## 2.3 注入锁频相位噪声分析

为描述由于磁控管自身内部电子振荡噪声的影响，输出信号频谱纯度差这一问题，用相位噪声，即单位带宽内寄生调相信号引起的边带功率与载波功率的比值，表征磁控管输出信号的稳定性和精确度<sup>[10]</sup>。

实验中，磁控管自由振荡输出功率为 17 kW，用频谱分析仪测量其相位噪声，如图 7 所示。由图 7 分析可知，在低频率偏移点，注入锁频后，磁控管的相位噪声得到了明显的改善，相位噪声达到  $-105 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ kHz}$ ， $-110 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$ 。相较于自由振荡下的磁控管，当偏移频率在 1 MHz 内时，相位噪声的抑制超过 40 dB；当频率偏移在 1 MHz 以上时，注入锁频下的相位噪声与自由振荡下的相位噪声大致接近。因此，通过注入锁频技术可实现对杂散信号的抑制，得到更纯净的输出信号。

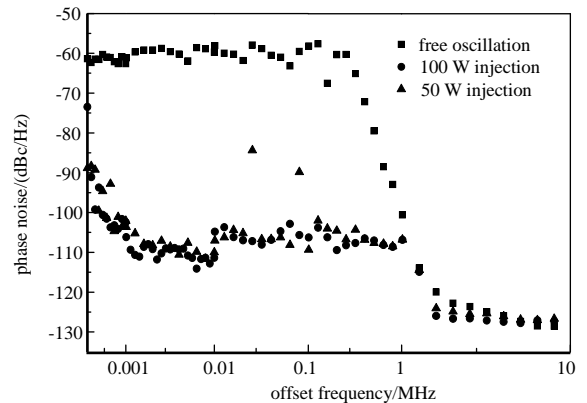


Fig.7 Phase noise measurement  
图 7 相位噪声测量结果

## 3 结论

注入锁频技术在多路连续波磁控管的微波相干合成实验中，扮演着十分重要的角色。对于不同的功率和频率情况，使磁控管信号和注入信号同步，对磁控管信号进行相位和频率调节，能极大提升磁控管输出信号的稳定性，抑制磁控管的非线性特性，有利于提高微波合成效率，节约资源，并且根据需求实时调控微波源。该系统能够基本满足对连续波磁控管的注入锁频技术研究，且为多路合成奠定了实践基础。

### 参考文献：

- [1] 刘长军,吴昕. 微波能工业应用研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(4):451-455. (LIU Changjun,WU Xin. Research progress on microwave energy industrial applications[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(4):451-455.)
- [2] 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. (WU Qun. Newly developed technique in the research of magnetrons[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000,32(5):9-12.)
- [3] 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. (YANG Songhan,LIU Youchun,WANG Rongchuan,et al. The injection locked technology for high-power long-life CW-magnetron[J]. Vacuum Electronics, 2013(5):96-98.)
- [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):251-254,261. (HUO Feixiang,LIU Zhengyu,HUANG Heping,et al. Inject-locking bandwidth expansion of a 1 kW Continuous Wave magnetron at S-band[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(2):251-254,261.)

(下转第 696 页)

- [12] 马建欢,李建雄,肖康,等. 太阳能电池作为天线辐射体的 RFID 标签天线的设计[J]. 天津工业大学学报, 2013(1):57-60.  
MA Jianhuan,LI Jianxiong,XIAO Kang,et al. Design of RFID tag antenna with integrated solar cell as antenna radiator[J].  
Journal of Tianjin Polytechnic University, 2013(1):57-60.)

作者简介:

白雪(1975-),女,辽宁省北票市人,副教授,主要研究方向为太赫兹无损探测技术、农业物联网、射频与振动复合能量收集器设计. email:baixue@ujts.edu.cn.

韩万阳(1995-),男,江苏省泰州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为天线理论与设计.

徐雷钧(1976-),男,江苏省海门市人,教授,主要研究方向为太赫兹集成电路、射频电磁波能量收集电路设计.

(上接第 691 页)

- [5] 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.)
- [6] YE Wenjun,ZHANG Yi,YUAN Ping,et al. Modeling and experimental studies of a side band power re-injection locked magnetron[J]. Chinese Physics B, 2016,25(12):496-502.
- [7] GYERGYEK T,ČERČEK M,STANOJEVIĆ M. Experimental evidence of periodic pulling in a weakly magnetized discharge plasma column[J]. Contributions to Plasma Physics, 2010,37(5):399-416.
- [8] DEWAN E M,DEVITO P A. The almost phase-locked magnetron and the Lashinsky spectrum[J]. Proceedings of the IEEE, 1970,58(1):161-162.
- [9] BUICK R I,REDDISH A,ZUCKER I J. Frequency pushing in crossed-field oscillators. A comparison between the c.w. magnetron and the magnetron-type backward-wave oscillator[J]. Proceedings of the IEE-Part B:Radio and Electronic Engineering, 1958,105(10):525-528.
- [10] ZHANG X,ZHOU X,DARYOUSH A S. A theoretical and experimental study of the noise behavior of subharmonically injection locked local oscillators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1992,40(5):895-902.

作者简介:

廖崇蔚(1995-),男,在读博士研究生,主要研究方向为电磁场与微波技术. email:18408251520@163.com.

陈潇杰(1991-),男,博士,主要研究方向为微波技术.

陈倩(1975-),女,副教授,主要研究方向为微波测量.

余泽(1994-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为无线电物理.

刘长军(1973-),男,教授,主要研究方向为微波技术.