

高功率S波段注入锁定频控功率源研究

刘臻龙

Study on high-power S-band frequency-controlled microwave source based on injection locking

Liu Zhenlong

引用本文:

刘臻龙. 高功率S波段注入锁定频控功率源研究[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36: 093001. doi: 10.11884/HPLPB202436.240147

Liu Zhenlong. Study on high-power S-band frequency-controlled microwave source based on injection locking[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36: 093001. doi: 10.11884/HPLPB202436.240147

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.240147>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

S波段低磁场紧凑型相对论磁控管设计

Design of a compact S-band relativistic magnetron operating at low magnetic field

强激光与粒子束. 2023, 35: 093001-1-093001-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.230058>

基于反向传播神经网络PID的高功率微波炉温度控制

Research on temperature control of high power microwave oven based on back propagation neural network PID

强激光与粒子束. 2024, 36: 013010-1-013010-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230280>

高功率窄线宽光纤激光技术

High-power narrow-linewidth fiber laser technology

强激光与粒子束. 2020, 32: 121001-1-121001-22 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200186>

X波段高功率高增益多注相对论速调管放大器设计

Design of X-band high-power high-gain multiple-beam relativistic klystron amplifier

强激光与粒子束. 2020, 32: 103004-1-103004-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200188>

高功率半导体激光泵浦源研究进展

Research progress of high power semiconductor laser pump source

强激光与粒子束. 2020, 32: 121010-1-121010-10 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200236>

X波段高功率负载的优化设计与测试

Design and test of X-band high power loads

强激光与粒子束. 2022, 34: 043007-1-043007-9 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210451>



·高功率微波技术·

高功率 S 波段注入锁定频控功率源研究^{*}

刘臻龙

(中国电子科技集团公司 第十研究所, 成都 610036)

摘 要: 针对高功率微波源在深空通信、空间无线能量传输和高功率超导线性加速器等应用中的实时功率控制难题, 提出了一种利用注入锁定频率控制输出功率的方法。从理论上分析了注入锁定频控功率源的可行性, 并基于双路 S 波段 20 kW 高功率磁控管完成了注入锁定频率控制输出功率的实验。实验结果表明, 当双路 20 kW 磁控管的自由振荡频率或注入功率不同时, 双管合成的输出功率可通过注入频率实现有效控制, 功率控制的范围达到了 3 dB, 注入锁定的带宽达到了 4.0 MHz, 输出频谱尖锐, 无啁啾颤噪, 杂散抑制比为 -65.0 dBc@500 kHz。该系统合成输出功率达到了 33.9 kW, 系统效率约为 86.6%。上述研究结果为磁控管在高功率微波领域的应用起到了重大推动作用。

关键词: 磁控管; 功率合成; 高功率; 效率; 功率控制

中图分类号: TN123

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.240147

Study on high-power S-band frequency-controlled microwave source based on injection locking

Liu Zhenlong

(The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: The high-power microwave source does not satisfy the requirements for deep space communications, wireless power transmission systems and high-power superconducting accelerators because of the real-time power control problems. To break through such limitations, an available power control method based on injection locking is proposed. Theoretical analysis and experiment are carried out to prove the performance of the proposed frequency-controlled microwave source based on dual 20 kW S-band high power magnetrons. The experiment results show that the real-time power control combining via the injecting frequency is achieved, when the injection power or free-running frequency of magnetron is unequal. Simultaneously, the system shows an output power control range of 3.0 dB, a nearly 4.0 MHz injection-locking bandwidth, and a sharp spectrum with an excellent spur suppression ratio of -65.0 dBc@500 kHz. The highest combining power output of 33.9 kW with the system efficiency of 86.6% is also proved. Such researches play an important role in the development of high-power microwave applications.

Key words: magnetron, power combining, high power, efficiency, power control

深空通信^[1]、空间无线能量传输^[2]、高功率超导线性加速器^[3]等系统的实现都离不开高功率微波源。其中, 高功率磁控管以其巨大的成本与转换效率优势, 在上述系统中有着无法替代的地位^[4]。然而, 单只高功率磁控管的功率容量有限, S 波段连续波磁控管的最高输出功率仅能达到 30 kW^[5], 难以满足上述系统对微波功率的需求。

多个磁控管的功率合成是解决这一问题的有效途径。2008 年, 电子科技大学魏惠月等在完成商业磁控管 2M219J 注入锁相实验的基础上, 建立了双管锁相模型, 并采用 3 dB 功分器合成磁控管输出的耦合功率, 输出功率接近 1 mW, 合成效率 $\geq 70.8\%$ ^[6]。2010 年, 日本 N. Shinohara 教授等完成了最大规模的 S 波段有源相控阵 SPORTS 2.45, 其采用 12 只相控磁控管, 在 5 位移相器的控制下, 输出功率达到了 3.6 kW^[7]。2015 年至 2017 年, 四川大学刘长军教授^[8]研究了磁控管注入锁定对功率合成的影响, 在引入注入锁频和反馈调相技术后, 系统输出功率大于 25 kW,

* 收稿日期: 2024-05-12; 修订日期: 2024-06-23

基金项目: 国家核高基项目 (2009ZYHW0022); 国家自然科学基金项目 (62101366, 62071316); 国家 973 计划项目 (2013CB328902)

联系方式: 刘臻龙, zhenlong_liu@foxmail.com。

合成效率大于 95%^[8]。2022 年,刘臻龙等利用磁控管的频率推移特性实现了双管功率合成,合成输出功率大于 34 kW,合成效率为 92.3%^[9]。

多磁控管合成输出功率的实时调控成为了互注入类功率合成微波源的应用瓶颈,如文献 [9] 中的微波源输出功率与频率相互制约,难以实现功率调节;外注入锁相类的功率合成微波源^[7-11]虽然能实时调节合成输出功率,但需要额外引入反馈调相机,一方面会恶化前级增益和相位噪声,另一方面随着微波源输出功率达到万瓦量级时,实时相位控制补偿会变得昂贵、耗时,甚至于难以实现。因此,以磁控管功率合成系统输出功率实时控制为切入点,利用磁控管注入锁定技术可以准确操控其输出频率的特性,提出了一种利用注入锁定频率控制功率合成系统输出功率的方法,并进行了实验验证。本文为高功率微波源系统提供了一种低成本实时功率控制的通用技术解决方案,并希望以此扩展该类高功率微波源的应用场景。

1 H-T 波导分支功率合成理论

本文选用了最简易的波导分支元件——波导 T 型转接头作为功率合成器^[12],为满足磁控管功率合成系统的对称特性^[9],则可进一步确定为 H-T 分支接头合成器,后续称为 H-T 功率合成器。H-T 功率合成器的 S 参数矩阵^[12]为

$$[S]_{H-T} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{j}{\sqrt{2}} & -\frac{j}{\sqrt{2}} \\ -\frac{j}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{j}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

若两路功率信号 $P_{H-T,1}e^{j\varphi_1}$ 和 $P_{H-T,2}e^{j\varphi_2}$ 同时入射 H-T 功率合成器,根据 H-T 功率合成器的 S 参数矩阵, H-T 功率合成器的合成输出为

$$P_{\text{total}} = \frac{1}{2}(P_{H-T,1} + P_{H-T,2}) + \sqrt{P_{H-T,1}P_{H-T,2}} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2)$$

式中: $P_{H-T,1}$, $P_{H-T,2}$ 为入射信号的功率; φ_1 和 φ_2 为信号入射至 H-T 功率合成器端面处的相位。

则 H-T 功率合成器的合成效率为

$$\eta_c = \frac{P_{\text{total}}}{P_{H-T,1} + P_{H-T,2}} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{k} \cos \Delta\varphi}{1+k} \quad (3)$$

式中: k 为功率比, $k = \frac{P_{H-T,1}}{P_{H-T,2}}$ 。

从式(2)和(3)可知,当入射 H-T 功率合成器的信号功率相等且相位相同时,合成器的合成效率最高且达到了 100%;随着两路功率信号的入射相位差从 0° 变化到 180° 时, H-T 功率合成器的合成功率从 $(P_{H-T,1} + P_{H-T,2})$ 线性减小为 0。故功率合成系统可以通过控制入射 H-T 功率合成器的信号相位来实现输出功率的实时控制。

2 基于注入锁定的频控功率理论

从前文可知,合成输出功率实时控制的本质是控制入射 H-T 功率合成器的信号相位,下面讨论建立注入频率与高功率磁控管输出相位的关系,实现通过注入频率实时控制合成系统的输出功率。

在注入锁定的合成系统中,外注入与互注入效应并存。延续先前的工作^[9],则可先考虑两只对等磁控管的互注入效应,假设两只磁控管各体差异可以忽略,外观品质因数相近,功率合成网络互易对称,则根据 Adler 理论^[13]可知,磁控管入射至 H-T 功率合成器的相位差 $\Delta\varphi$ 将满足如下方程

$$\frac{d\Delta\varphi}{dt} = \Delta\omega + \left[\frac{\omega_1 \xi_{12}}{2Q} \sin(\Phi + \Delta\varphi) - \frac{\omega_2 \xi_{21}}{2Q} \sin(\Phi - \Delta\varphi) \right] \quad (4)$$

式中: ω_1 和 ω_2 分别是两只磁控管各自的自由振荡频率; $\Delta\omega$ 为频差; Q 是外观品质因数; φ_1 和 φ_2 是两只磁控管的输出相位; ξ_{12} 表示自由振荡频率为 ω_2 的磁控管对自由振荡频率为 ω_1 的磁控管的耦合强度; ξ_{21} 表示自由振荡频率为 ω_1 的磁控管对自由振荡频率为 ω_2 的磁控管的耦合强度; Φ 则代表互注入路径上带来的相位超前或者滞后。

在稳态情况下, $d\Delta\varphi/dt = 0$, 又因为 $|\sin(\Phi + \Delta\varphi)| \leq 1$, 则其中任一只磁控管的互注入锁定条件^[13]为

$$\Delta\omega \leq \xi_{ij} \omega_i |\cos \Phi| / Q \quad (5)$$

式中: $i \neq j, i=1, 2, j=1, 2$; ω_i 为第 i 只磁控管的自由振荡频率; ξ_{ij} 表示第 j 只磁控管对第 i 只磁控管的耦合强度。

则锁定输出频率都为

$$\omega_{\text{final}} = \omega_i \left(1 - \frac{\xi_{ij}}{2Q} \sin \Phi \right) \quad (6)$$

然后, 在注入锁定的合成系统中, 两只磁控管都还有外注入信号, 且两只磁控管还可分别被各自的外注入信号锁定, 根据 Adler 理论^[13], 任一只磁控管输出信号 φ_i 将满足如下方程

$$\frac{d\varphi_i}{dt} = \Delta\omega + \frac{\rho_{\text{inj}_i}\omega_i}{2Q} \sin(\varphi_{\text{inj}} - \varphi_i) + \frac{\xi_{ij}\omega_i}{2Q} \sin(\Phi + \varphi_j - \varphi_i) \quad (7)$$

式中: $\rho_{\text{inj}_i} = \sqrt{P_{\text{inj}_i}/P_i}$, $i \neq j, i=1, 2, j=1, 2$; φ_i 和 φ_j 是磁控管输出相位, φ_{inj} 是注入信号的相位, ρ_{inj_i} 是第 i 只磁控管的注入比, P_i 是第 i 只磁控管的输出功率。

最终, 根据线性叠加原理或 N. Shinohara 理论^[14], 合成系统中两路磁控管输出的瞬时相位差 (即入射至 H-T 功率合成器的相位差 $\Delta\varphi$) 满足下述方程

$$\frac{d\Delta\varphi}{dt} = \Delta\omega + \left[\frac{\omega_1\xi_{21}}{2Q} \sin(\Phi + \Delta\varphi) - \frac{\omega_2\xi_{12}}{2Q} \sin(\Phi - \Delta\varphi) \right] + \frac{\rho_{\text{inj}_1}\omega_1}{2Q} \sin(\varphi_{\text{inj}_1} - \varphi_1) - \frac{\rho_{\text{inj}_2}\omega_2}{2Q} \sin(\varphi_{\text{inj}_2} - \varphi_2) \quad (8)$$

从式(8)可知, 两只磁控管的输出相位差 (即入射至 H-T 功率合成器的相位差 $\Delta\varphi$) 与磁控管自由振荡频率及注入功率的关系如下: 1) 当两只磁控管的自由振荡频率频差 $\Delta\omega$ 近似为 0, 且注入功率一致时, 此时两只磁控管的输出相位必然满足同步条件, 式(8)简化为 Adler 方程^[13], 故即使注入频率在锁定区域移动, 合成系统的输出功率维持不变, 此状态不可实现注入频率控制合成输出功率, 故本文后续不对此情况进行讨论; 2) 当两只磁控管的自由振荡频率频差 $\Delta\omega$ 近似为 0, 且注入功率不一致时, 则注入频率在锁定区域移动, 合成系统的输出功率维持不变, 若注入频率移动至低注入功率磁控管的外注入锁定边界时, 该只磁控管的输出相位相对于外注入信号相位会快速翻转 180° , 则系统的合成输出功率也跟随快速降低, 此状态可注入频率控制合成输出功率; 3) 当两只磁控管的自由振荡频率频差 $\Delta\omega$ 不为 0, 但满足互注入锁定条件, 且注入功率相等时, 则注入频率在锁定区域移动, 两只磁控管的输出相位差为不同常数, 此状态也可实现注入频率控制合成输出功率。因此, 当磁控管功率合成系统的自由振荡频率和注入功率满足条件 2) 或条件 3) 时, 可通过控制注入频率实现两路磁控管输出相位差的控制, 也即实现 H-T 功率合成器入射端面的信号相位控制, 从而实现通过注入频率控制系统的合成功率输出。由于该原理实现的功率合成系统是通过注入频率控制系统的输出功率, 故将这种微波源称之为频控功率源。

3 S 波段注入锁定频控功率源实验

3.1 H-T 高功率合成器的设计与实现

根据节 1 中 H-T 功率合成器的 S 参数矩阵, H-T 功率合成器无法同时匹配所有端口, 为实现高效的功率合成, 只需对 H-T 功率合成器的输出端口进行匹配设计, 故本文的设计思路是在传统 WR430 H-T 分支波导的基础上, 插入一个圆柱形的销钉, 实现输出端口的阻抗匹配。所设计的 H-T 功率合成器模型及加工实物如图 1 所示。H-T 功率合成器的端口 1 和端口 2 为信号的入射端口, 端口 3 为合成信号的输出端口, 输出端口 3 的中间为用于匹配的圆柱形销钉。

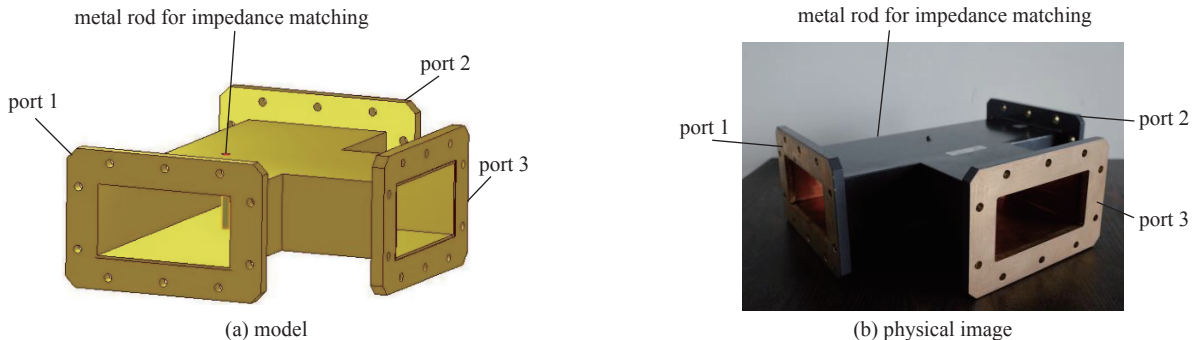


Fig. 1 H-T power combiner

图 1 H-T 功率合成器

H-T 功率合成器因匹配销钉引入了不连续性, 该不连续性会引起 H-T 功率合成器中激励起高次模, 从而增大了 H-T 功率合成器的损耗, 故使用商业软件反复优化设计, 尽量抑制高次模效应, 优化后的设计和实测 S 参数结果如图 2 所示。从图 2 可知, 输出端口的 S 参数 S_{33} 仿真时低于 -30 dB, 输出端口的实测 S 参数也低于 -20 dB, 匹配特性良好; 传输系数 $|S_{31}|$ 接近 3 dB, 插入损耗小于 0.05 dB, 性能理想。

为了验证 H-T 的功率容量, 在商业仿真软件中用两路等功率同相的 20 kW 信号同时激励 H-T 功率合成器, 其电场分布结果如图 3 所示。

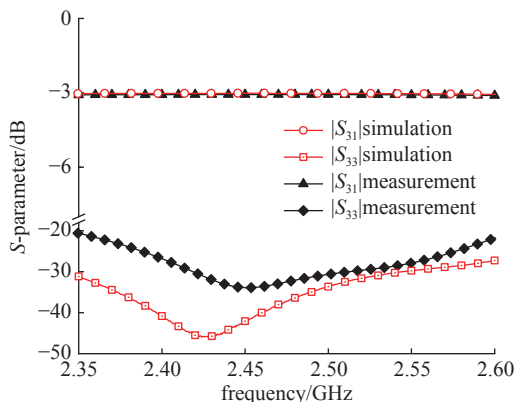


Fig. 2 S parameters of H-T power combiner

图 2 H-T 功率合成器 S 参数

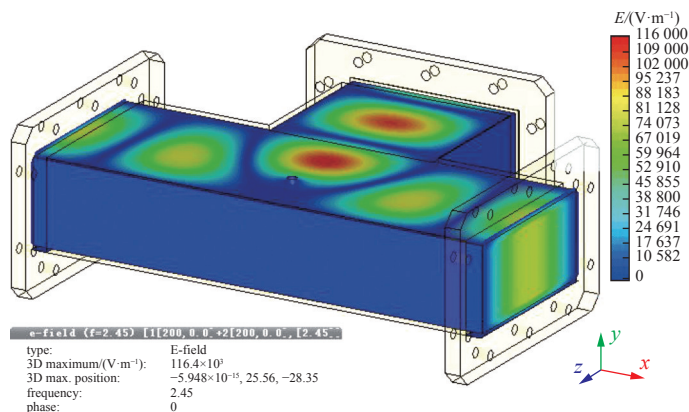


Fig. 3 E-field distributions of H-T power combiner

under 20 kW power signals excitation

图 3 20 kW 等功率合成电场分布图

从图 3 中可知, 输入端口处的电场分布对称, 输出端口处的电场约为输入端口的 $\sqrt{2}$ 倍, 通过坡印亭矢量公式^[15]求出 H-T 功率合成器合成端口输出功率约为 39.72 kW, 则可计算出合成效率高达 99.3%; 合成电场最强的位置位于输出端口和销钉之间, 电场强度为 116 kV/m, 远远小于连续波击穿空气的场强 30 kV/cm, 所以 H-T 功率合成器功率容量明显高于 40 kW。

3.2 高功率注入锁定频控功率源设计与实现

利用上节中的 H-T 功率合成器, 构建了基于 20 kW S 波段注入锁定磁控管的频控功率源系统, 其原理框图如图 4 所示。

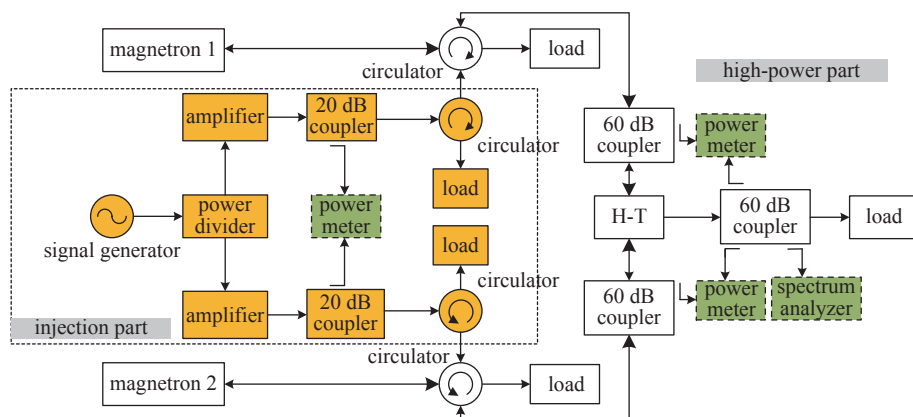


Fig. 4 Diagram of the S-band frequency-controlled microwave source based on injection locking

图 4 S 波段注入锁定频控功率源原理框图

频控功率源系统的高功率部分见图 4 中白色框图部分所示, 两只 20 kW CK-2091 连续波磁控管的输出信号分别经过各自的四端口环行器导向(四端口环行器一方面将磁控管的高功率信号与注入信号隔离, 并导入注入信号至磁控管, 另一方面实现磁控管的输出保护, 防止磁控管输出反射功率过大而烧毁磁控管)后, 分别传输至 60 dB 波导定向耦合器, 耦合采样后的两路高功率信号送至 H-T 功率合成器, 合成后的功率信号由一个 60 dB 波导定向耦合器采样后流向大功率水负载, 绝大部分微波功率被该负载所吸收, 剩余的少部分功率反射回四端口环行器, 由隔离负载吸收。图 4 中大箭头指示了磁控管的高功率信号传输路径, 小箭头指示了磁控管之间互相耦合的信号传输通道。

频控功率源系统的注入部分由图 4 黄色框图部分表示,注入信号由安捷伦矢量信号源产生,经 3 dB 功分器分为两路等功率同相信号,等分后的两路信号分别经过 200 W 功率放大器放大后,再分别由 20 dB 的耦合器采样后,最后通过环行器注入磁控管。磁控管的注入功率则是通过调节功放的增益来实现。

频控功率源的测试部分如图 4 中绿色部分所示,两只 20 dB 耦合器的耦合端接至功率计,采样外注入信号的功率;3 只 60 dB 耦合器的耦合端接至功率计采样 H-T 的入射信号功率与合成信号功率,60 dB 耦合器的反向耦合端接至频谱仪用于采样该系统的频谱质量。

按照之前的工作,先从对等磁控管的功率合成开始^[9],分别开启两只磁控管,利用频率推移实现 20 kW 磁控管自由振荡频率的牵引,即分别调节两路磁控管的阳极电流,分别记录两只磁控管在不同阳极电流下的工作参数与状态。随后,选取了分别满足第二节中条件 2)和条件 3)的两种初始状态,在这两种初始状态下,同时开启两只磁控管,确认并记录此时对等功率合成的工作状态。最终,把满足第二节中条件 2)和条件 3)的两种初始状态标记为初始状态(1)和初始状态(2),其工作特性参数列入了表 1。

表 1 磁控管的两种初始状态
Table 1 The original states of magnetrons

state	free-running frequency ω/GHz	output power P_{mag}/kW	incident power of H-T combiner $P_{\text{H-T}}/\text{kW}$	coupling power P_{ξ}/W	mutual injection-locking frequency $\omega_{\text{final}}/\text{GHz}$	output power $P_{\text{total}}/\text{kW}$	combining efficiency $\eta_c/\%$
state 1	2.4475	19.9	18.1	107.9	2.4465	32.1	89.4
	2.4480	19.3	17.8	156.0			
state 2	2.4470	17.4	15.8	200.0	2.4460	25.9	82.4
	2.4482	17.6	15.6	183.5			

根据第二节的理论分两种情况进行实验研究:

第一种情况:在第(1)种初始状态下,保持一路注入功率为 100 W,另一路通过调节功率放大器的增益,将注入功率降低至 70 W 左右,则可实现条件 2)描述的频控功率源,实验结果如图 5 中红色曲线所示,频控功率源系统的锁定范围为 2.4440~2.4480 GHz,双管的注入锁定带宽达到了 4.0 MHz。在 2.444~2.4469 GHz 的锁定频率范围内,H-T 总合成输出的功率约为 33.9 kW,H-T 功率合成器的合成效率为 94.6%;当进一步提高注入频率,若注入频率高于 2.4469 GHz,随着注入频率增加,H-T 合成输出功率快速降低,当注入频率增加至 2.4480 GHz 时,H-T 的合成功率降低至 7 kW 左右,功率控制范围约 6 dB。造成这种现象的原因是外注入信号功率较低的一路磁控管已经处于外注入信号的锁定边界,此时其对应注入的磁控管输出相位相对于外注入信号相位会快速翻转 180°,导致 H-T 入射相差从 0°向 180°移动,实现了第二节中条件 2)描述的频控功率源。

第二种情况:在第(2)种初始状态下,两只磁控管的自由振荡频率差约为 1.2 MHz,两只磁控管之间的自由振荡频率差异不可忽略,两只磁控管之间互注入的功率分别为 200.0 W 和 183.5 W,满足式(5)互注入锁定条件,两路磁控管互注入锁定于 2.4460 GHz,与式(6)计算结果一致。通过 H-T 功率合成器后端的 60 dB 耦合器确认磁控管都振荡在 2.4460 GHz 以后,连接注入支路并打开信号源,对两只磁控管注入 100 W 等功率同相的信号,并在 2.4460 GHz 附近移动注入频率,测得注入锁定频率与 H-T 功率合成器的合成功率关系,如图 5 中蓝色曲线所示。频控功率源的注入锁定范围为 3.1 MHz,随着注入频率的增加,H-T 合成器合成功率降低,当注入频率为 2.4452 GHz 时,双管合成效率最大,约为 95.0%,合成输出功率为 30.0 kW;当注入频率为 2.4483 GHz 时,双管合成效率最小,约为 48.4%,合成输出功率约为 15.2 kW,功率控制范围约为 3 dB,实现了第二节中条件 3)描述的频控功率源。

3.3 频控功率源的输出频谱特性

为了说明此频控功率源的优越性,进一步对基于注入锁定频控功率源的输出频谱特性进行了表征与对比,如

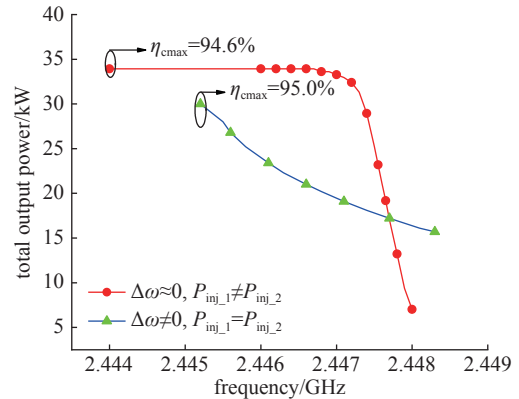


Fig. 5 Results of the frequency-controlled microwave source measurement at different states

图 5 不同情况下频控功率源的测试结果

图6所示。当两只磁控管处于自由振荡状态时,磁控管输出振荡频谱谱宽较宽,各自的输出频率漂移现象明显;当两只磁控管达到互注入锁定之后,磁控管输出频谱稍微收窄,且磁控管输出的调频噪声被抑制;当两路磁控管的注入功率都为100 W时,该微波源的合成输出频谱更加尖锐,输出频谱中不存在任何的杂散频谱或啁啾颤噪,磁控管的输出频谱杂散抑制大于 $-65.0\text{ dBc}@500\text{ kHz}$,该输出频谱特性远远优于先前工作报告结果^[8-9]。

4 结 论

针对互注入与外注入功率合成系统的局限性,本文基于注入锁定技术,提出了一种利用注入频率实时控制合成输出功率的解决方案,完成了理论分析并进行了实验验证。在两种不同的情况下分别实现了两种不同的频控功率源。频控功率源的功率控制范围达到了3 dB,注入锁定带宽达到了4.0 MHz,杂散抑制比为 $-65.0\text{ dBc}@500\text{ kHz}$,系统总功率达到33.9 kW,H-T合成器合成功率94.6%,系统效率约为86.6%。目前尚未见到国际上报道类似S波段磁控管频控功率源系统,也尚未见到国际上S波段两路连续波磁控管无移相器功率合成系统达到类似性能的报道。

参考文献:

- [1] 陈潇杰,刘臻龙,刘长军.用于微放电测试的S波段注入锁频磁控管试验研究[J].中国空间科学技术,2017,37(2):96-102. (Chen Xiaojie, Liu Zhenlong, Liu Changjun. Experimental research on an S-band inject-locking magnetron for multipactor discharge test[J]. Chinese Space Science and Technology, 2017, 37(2): 96-102)
- [2] Shinohara N, Matsumoto H, Hashimoto K. Solar Power Station/Satellite (SPS) with phase controlled magnetrons[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2003, 86(8): 1550-1555.
- [3] Padamsee H. The science and technology of superconducting cavities for accelerators[J]. Superconductor Science and Technology, 2001, 14(4): R28-R51.
- [4] Liu Zhenlong, Chen Xiaojie, Yang Menglin, et al. Experimental studies on a 1-kW high-gain S-band magnetron amplifier with output phase control based on load-pull characterization[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(4): 909-916.
- [5] Liu Zhenlong, Chen Xiaojie, Yang Menglin, et al. Experimental studies on a low power injection-locked continuous wave magnetron[C]//Proceedings of 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). 2017: 451-454.
- [6] 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. (Wei Huiyue. The investigation of L-band phase-locking magnetrons and power combination technique[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011)
- [7] Shinohara N, Matsumoto H. Research of magnetron phased array with mutual injection locking for Space Solar Power Satellite/Station[J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 173(2): 21-32.
- [8] Liu Changjun, Huang Heping, Liu Zhengyu, et al. Experimental study on microwave power combining based on injection-locked 15-kW S-band continuous-wave magnetrons[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(8): 1291-1297.
- [9] 刘臻龙,唐正明,刘长军.20 kW 磁控管频率推移特性的功率合成实验研究[J].应用科技,2022,49(1):90-93,110. (Liu Zhenlong, Tang Zhengming, Liu Changjun. Study on the power synthesis system of 20 kW magnetrons based on frequency pushing[J]. Applied Science and Technology, 2022, 49(1): 90-93,110)
- [10] 党章,黄建,邹涌泉,等. Ku频段高效50 W连续波空间功率合成放大器[J].电讯技术,2009,49(9):71-74. (Dang Zhang, Huang Jian, Zou Yongquan, et al. A high efficient 50 W Ku-band CW spatial power combined amplifier[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(9): 71-74)
- [11] Lai Chao, Zhao Chaoxia, Li Kang, et al. Highly efficient microwave power system of magnetrons utilizing frequency-searching injection-locking technique with no phase shifter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(10): 4424-4432.
- [12] 张强,袁成卫,刘列.一种T形高功率微波功率合成器[J].强激光与粒子束,2010,22(10):2369-2372. (Zhang Qiang, Yuan Chengwei, Liu Lie. T-junction high power microwave power combiner[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(10): 2369-2372)
- [13] Adler R. A study of locking phenomena in oscillators[J]. Proceedings of the IRE, 1946, 34(6): 351-357.
- [14] Shinohara N, Fujiwara J, Matsumoto H. Development of active phased array with phase-controlled magnetrons[C]//Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation. 2000: 713-716.
- [15] 杨永辉,郑贵强. S波段2 kW连续波功率合成技术[J].强激光与粒子束,2007,19(1):95-98. (Yang Yonghui, Zheng Guiqiang. 2 kW continuous wave power combining technique in S band[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(1): 95-98)

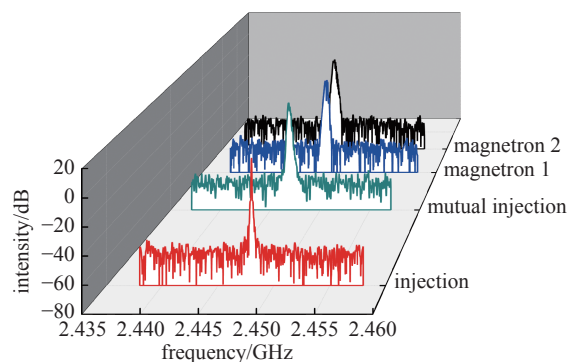


Fig. 6 Spectrums of the frequency-controlled microwave source output at different states (RBW: 50 kHz, VBW: 50 kHz, SPAN: 15 MHz)

图6 频控功率源在不同状态下的输出频谱图 (RBW: 50 kHz, VBW: 50 kHz, SPAN: 15 MHz)