

X 波段百兆瓦级高功率微波合成器 设计及实验研究

方进勇^{1)2)†} 黄惠军²⁾ 张治强²⁾ 张晓微²⁾ 张黎军²⁾ 张庆元²⁾
郝文析²⁾ 黄文华²⁾ 江伟华¹⁾

1) (清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

(2010 年 6 月 5 日收到; 2010 年 12 月 29 日收到修改稿)

介绍了一种极化正交全耦合型高功率微波 (HPM) 合成器, 其主要用途是实现两路 HPM 分时共用一个天线辐射. 合成器主要由输入段、耦合段及输出段三部分组成, 利用该合成器能够实现一个吉瓦级 HPM 脉冲序列和一个百兆瓦级 HPM 脉冲序列由一个公共端口共同输出. 合成器输入段有与主通道及副通道相连的两个输入端口, 合成器的主通道与公共输出口直接相连, 副通道利用连续长缝结构将能量耦合进入主通道经公共输出口输出. 利用数值模拟方法对合成器进行了优化设计, 合成器主通道的能量传输效率可达 99% 以上, 副通道的能量耦合效率可达 96% 以上. 建立了 HPM 测试平台, 测试表明: 合成器主通道的能量传输效率接近 100%, 功率容量大于 1 GW; 副通道的能量耦合效率大于 87%, 功率容量约为 300 MW. 合成器工作于 X 波段, 工作带宽约为 200 MHz.

关键词: 高功率微波, 合成器, 耦合波

PACS: 84.90.+a

1. 引言

高功率微波 (HPM) 是近年来出现的一项新技术^[1,2]. 利用全新的相互作用机制^[3-9], 并得益于脉冲功率技术的快速发展, HPM 技术近年来取得了重大进展, 微波源的输出功率已达吉瓦量级. 为了获取更高的脉冲功率或脉冲重复频率, 有必要对 HPM 合成技术进行探索和研究. 假如有两台 HPM 源且工作频段相同, 如果想将两台源产生的 HPM 同时辐射出去, 则必须研制两套与之配套的天线, 本文试图探索并解决的问题是将两台源产生的 HPM 在波导内先进行合成然后再用同一幅天线辐射出去. 这种合成并非通常意义上的功率合成, 而是脉冲宽度合成或脉冲重复频率合成, 即实现两路吉瓦级 HPM 由两个端口馈入, 一个端口输出. 当前, HPM 合成尚处于概念研究阶段, 进行吉瓦量级的 HPM 波导内合成尚未见报道, 本文的研究结果是对 HPM 波导内合成的有益探索, 为下一步实现吉瓦级 HPM 波导内合成奠定基础.

2. 原理

设计合成器的目的是应用于 HPM 辐射系统, 由于微波源的输出功率在吉瓦量级, 因此 HPM 辐射系统的传输波导均为工作于过模状态下的圆波导, 以本所研制的 X 波段 3 GW 返波管 HPM 源为例, 其传输波导半径约为^[4] 25 mm, 传输波导的半径与返波管器件半径基本相当, 是经过优化选取的结果. 另外, 对于圆波导传输模式, TE_{11}^0 模式是适合天线辐射的模式, 这也是当前大多数 HPM 天线采用的输入模式. 基于上述分析, 合成器的设计要求如下: 实现将两路工作于 TE_{11}^0 模式的 HPM 由两个端口输入, 一个端口输出, 两路微波是分时工作的, 为了连接方便, 合成器输入输出接口波导半径尽量与 HPM 器件半径一致.

根据耦合波理论^[10], 当两只波导内传输的两列波满足相关同步条件时, 如果是连续耦合, 则两列波可以在两只波导内来回转换, 这也是 0 dB 强耦合定向耦合器的工作原理. 图 1 所示为一段两只背靠

† E-mail: fjiy90@sina.com

背的圆波导,两波导的物理尺寸一致,中间开有一条连续的长缝.

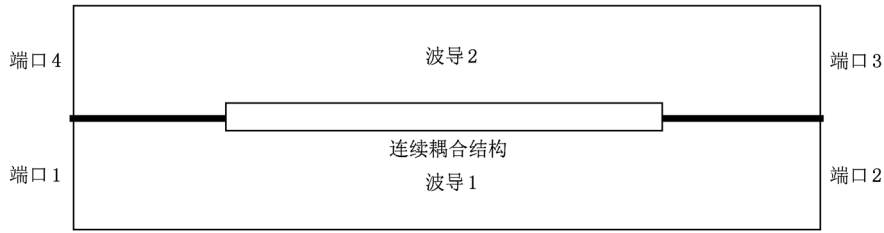


图1 微波合成器结构示意图

设波导1为副波导,输入端口1有单一模式初始激励 $a_1(0)$,波导2为主波导,输入端口4的信号为零,根据耦合波理论,对于单一模式,两波导满足固定相移系数相等条件,即满足同一模式微波在两波导内同方向传输的同步条件

$$\beta_{01} = \beta_{02} = \beta.$$

对此固定模式,设两波导间的耦合系数分别为 k_{12} 和 k_{21} ,希望获取同方向的耦合波,则满足

$$\begin{aligned} k_{12} + k_{21}^* &= 0, \\ |k_{12}| &= |k_{21}|. \end{aligned}$$

设

$$\beta_c = \sqrt{\left(\frac{\beta_{01} - \beta_{02}}{2}\right)^2 + |k_{12}|^2},$$

则两波导内电压信号 $a_1(z)$ 及 $a_2(z)$ 随耦合缝长度 z 的变化规律为^[10]

$$a_1(z) = a_1(0) \cos \beta_c z e^{-j\beta z}, \quad (1)$$

$$a_2(z) = a_1(0) \sin \beta_c z e^{-j\beta z}. \quad (2)$$

微波沿 z 方向传输,两波导中的微波功率可分别表示为

$$\begin{aligned} |a_1(z)|^2 &= [a_1(0)]^2 \cos^2 \beta_c z \\ &= \frac{[a_1(0)]^2}{2} (1 + \cos 2\beta_c z), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} |a_2(z)|^2 &= [a_1(0)]^2 \sin^2 \beta_c z \\ &= \frac{[a_1(0)]^2}{2} (1 - \cos 2\beta_c z). \end{aligned} \quad (4)$$

设耦合缝的长度 $z = l$ 时,满足 $\beta_c l = k_{12} l = \frac{\pi}{2}$,则波导2输出端有微波输出, $[a_2(l)]^2 = [a_1(0)]^2$,而波导1则无功率输出, $[a_1(l)] = 0$,能量全部由副波导耦合进入主波导.这说明如果有单一模式的微波由副波导端口1输入,在满足相关条件下,其完全可以实现由主波导端口3输出.根据互逆原理,如果主波导端口4注入的微波模式与副波导相同,则该

列微波也可全部耦合进入副波导由端口2输出,难以实现微波由两个端口输入一个端口输出之目的.但对于圆波导 TE_{11}^0 模式则有其特殊性,其可以分为水平极化和垂直极化两种状态,如果设计耦合结构适合 TE_{11}^0 垂直极化模式耦合,则在同等条件下水平极化 TE_{11}^0 模式的耦合系数与垂直极化 TE_{11}^0 模式的耦合系数相差极大.因此对于垂直极化的 TE_{11}^0 模式微波,在合适的结构下可实现由副波导完全耦合进入主波导输出,而由主波导注入的水平极化 TE_{11}^0 模式微波则只有极少部分耦合进入副波导,大部分能量由与之直接相连的输出口输出,这也可用极化正交理论来加以解释^[11].

3. HPM 合成器研制

3.1. HPM 合成器设计

根据设计目的,确定 HPM 合成器的以下设计原则:(1)采用连续长缝耦合结构,便于工程实现;(2)波导尺寸尽量与返波管输出波导尺寸一致;(3)合理选择缝宽以达到较高的耦合效率同时兼顾功率容量及主通道相对于副通道的隔离度;(4)采用磁耦合方式,副通道输入垂直极化 TE_{11}^0 模式微波,主通道输入水平极化 TE_{11}^0 模式微波.

根据耦合波理论,耦合度的强弱与波导半径、微波频率和模式及耦合缝的宽度密切相关.具体而言,当微波频率和模式固定时,波导半径越大,同等耦合缝宽条件下耦合度越弱,能量全部耦合所需耦合缝越长;当波导半径固定时,耦合缝越窄,则能量全部耦合所需耦合缝越长.数值模拟研究表明,对于固定半径的圆波导,当频率及模式固定时,达到较高能量耦合效率的耦合缝宽度存在一个上限,大于这个缝宽上限时能量耦合效率会大大降低.设计原则是选择耦合缝宽度接近这个上限值,在获取较

高能量耦合效率的情况下还可以带来两方面的好处. 一是耦合缝的长度较短, 器件较为紧凑; 二是耦合缝间电场强度较低, 可以达到较高的功率容量.

以本文设计的合成器为例, 确定合成器的工作频率为 9.3 GHz, 选择圆波导半径为 25 mm 以便与返波管输出波导匹配, 在副波导注入垂直极化 TE_{11}^0 模式微波条件下进行了系统数值模拟研究. 结果表明: 耦合缝宽度 w 在 4—6 mm 范围内变化时, 最高能量耦合效率均可达到 96% 左右, 只是当宽度为 5 mm 以下的耦合缝且微波输入功率为 1 GW 时, 缝间电场强度远大于 1 MV/cm 的波导内金属击穿阈值; 当耦合缝宽度达到 8 mm 时, 最高能量耦合效率下降到了 93% 左右; 当耦合缝宽度达到 10 mm 时, 最高能量耦合效率下降到了 86% 左右. 这主要由于耦合缝宽度 w 越大圆波导边界条件破坏越严重, 出现较多的高次模造成了一定的能量损失. 在上述条件下最高能量耦合效率 η 随耦合缝宽度 w 的变化关系如图 2 所示.

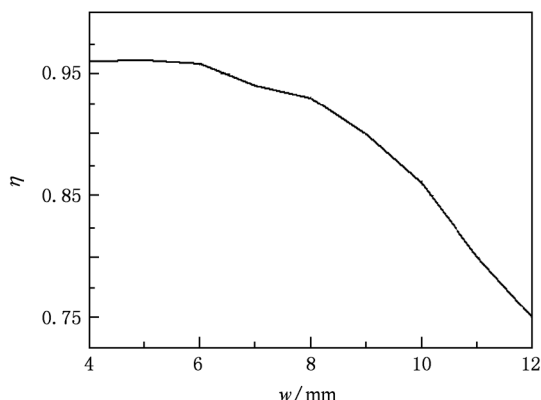


图 2 垂直极化 TE_{11}^0 模式微波最高能量耦合效率 η 随耦合缝宽度 w 的变化

优化设计的结果如下: 圆波导半径为 25 mm; 耦合缝宽度为 6 mm, 耦合缝长度为 700 mm; 两输入口距离耦合缝起始端 200 mm, 副波导输出口设为短路面, 距离耦合缝末端 50 mm, 主波导输出口为公共输出口, 距离耦合缝末端 200 mm.

3. 2. 性能指标

3. 2. 1. 主通道性能

如上所述, 利用数值模拟软件建立了 HPM 合成器模型如图 1 所示, 合成器波导半径为 25 mm, 耦合缝宽度为 6 mm, 耦合缝长度为 700 mm. 当主波导传输水平极化 TE_{11}^0 模式微波时, 其微波电场分布如图

3 所示, 图中不同的灰度表示不同的电场强度, 对应微波功率 1 GW 输入时波导内的最高电场强度约为 440 kV/cm, 远低于 1 MV/cm 的波导内金属击穿阈值, 因此主波导的传输功率容量远大于 1 GW. 相应的电压传输效率 η_u 随微波频率 f 的变化如图 4 所示, 能量传输效率为电压传输效率的平方, 即全频带内主通道能量传输效率几乎都可以保持在 99% 以上. 耦合缝的设计是按照垂直极化 TE_{11}^0 模式微波达到较高耦合效率设计的, 与其正交极化的水平极化 TE_{11}^0 模式微波耦合系数与垂直极化的耦合系数相差很大, 只有极少部分能量耦合进入副波导, 大部分能量将直接传输至输出口. 主波导半径为 25 mm, 在 X 波段为过模传输, 其传输 TE_{11}^0 模式微波的频率可下降至 C 波段直至 S 波段上限, 在很宽的带宽内主波导均具有极高的能量传输效率.

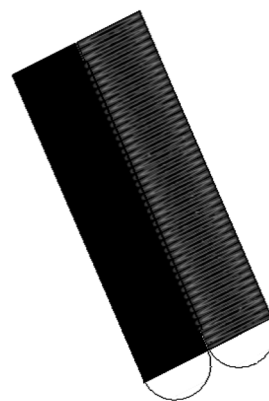


图 3 主通道传输微波电场分布

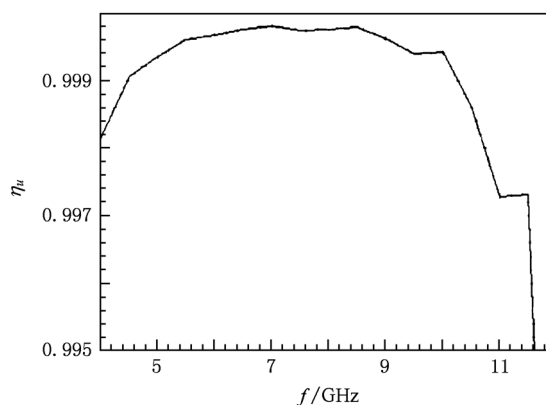


图 4 主通道电压传输效率 η_u 随微波频率 f 的变化

3. 2. 2. 副通道性能

当副波导输入垂直极化 TE_{11}^0 模式微波时, 其微波电场分布如图 5 所示, 图中不同的灰度表示不同

的电场强度,对应微波功率 1 GW 时最高电场强度约为 930 kV/cm,接近于 1 MV/cm 的波导内金属击穿阈值,因此副波导进行能量耦合时其理论功率阈值约为 1 GW,考虑到器件加工带来的场增强效应,功率阈值估计会在百兆瓦量级. 副通道相应的电压耦合效率 η_{uc} 随微波频率 f 的变化如图 6 所示,能量耦合效率为电压耦合效率的平方,可见设计器件以 9.3 GHz 为中心,在 200 MHz 带宽范围内能量耦合效率均可达到 96% 以上.

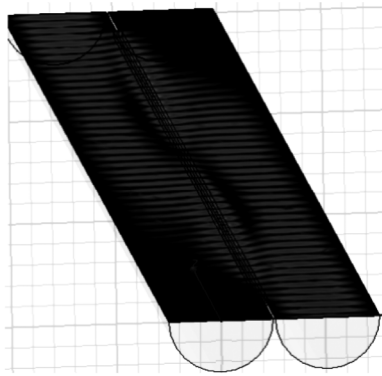


图 5 副通道耦合微波电场分布

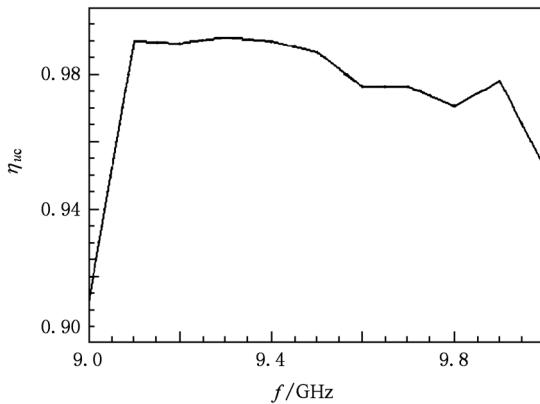


图 6 副通道电压耦合效率 η_{uc} 随微波频率 f 的变化

3.3. 器件研制

研制的 X 波段百兆瓦级 HPM 合成器三维结构如图 7 所示,主要包括输入段、耦合段及输出段等. 输入段的作用是实现微波由两个端口注入,包括一个直段圆波导及一个 90° 弯波导^[12],直波导长度约为 200 mm,弯波导长度约为 600 mm;中间耦合段的作用是实现微波能量全部由副波导耦合进入主波导,由两个圆波导背靠背组成,中间连接处开有宽 6 mm,长 700 mm 的连续长缝,两个圆波导的总长与

缝长一致;输出段为一长一短两个背靠背圆波导,其中较短的圆波导长度约为 50 mm,与副通道相连,终端视隔离度要求直接加短路面或吸波材料,较长的圆波导长度约为 200 mm,与主通道相连,为合成器的公共输出端. 整个合成器各部件连接面均刻有密封槽,器件满足高真空使用条件.

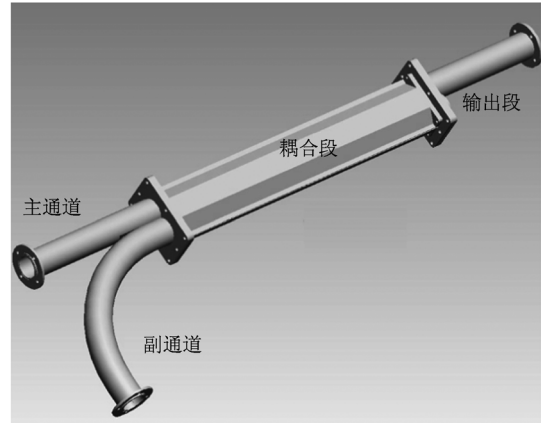


图 7 合成器的三维结构

4. 实验结果及分析

4.1. 器件测试

对于研制的 HPM 合成器,主要关心器件的主通道功率容量和能量传输效率以及副通道功率容量和能量耦合效率四个关键指标. 图 8 所示为 HPM 测试系统照片,主要包括吉瓦级 HPM 源、合成器前端在线测量装置、模式转换器、辐射喇叭天线及辐射场测量装置.

为了排除合成器以外其他设备及器件等击穿的可能,选取了接近合成器长度的圆波导替代合成器与辐射喇叭天线连接进行热测. 实验表明,当微波源产生的微波功率为 1 GW 时,辐射场检测微波波形与在线测量微波波形基本一致,所得结果如图 9 所示,对应的微波脉冲宽度为 20 ns. 比较在线测量微波波形及辐射场测量微波波形可以判断,当微波输出功率在不大于 1 GW 时,辐射喇叭天线等器件不是影响功率传输及辐射的因素.

首先进行主通道功率容量及能量传输效率的测试实验. 主通道输入水平极化 TE_{11}^0 模式微波,微波源的输出功率由 500 MW 逐渐增加,直至达到其最大输出 1.27 GW. 通过比对在线微波波形与辐射

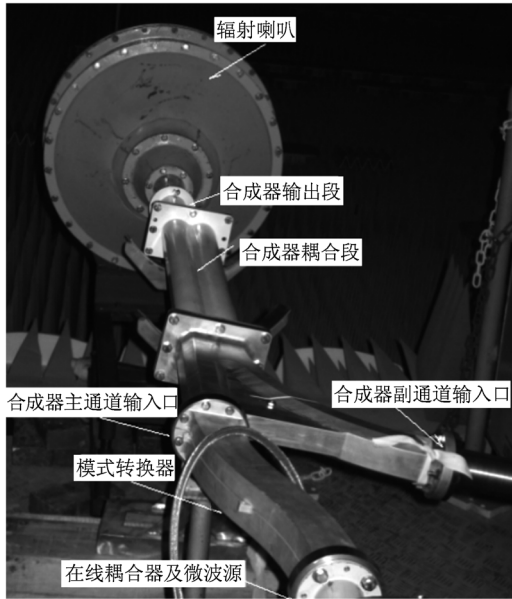


图8 正在进行 HPM 测试的合成器

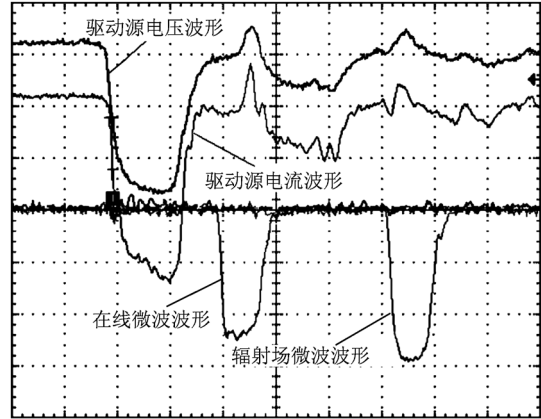


图10 合成器主通道传输 1.27 GW 时的测试波形

波形稍有异常,初步判断处于临界击穿状态,如图12所示.另外,在利用同等长度的传输波导替代合成器后,微波源输出功率为 300 MW 时距离辐射喇叭中心 10 m 处测得微波功率密度约为 9 kW/cm^2 ,而加入合成器后利用副通道耦合输出在相同位置处进行辐射实测得到的微波功率密度为 7.83 kW/cm^2 ,能量耦合效率约为 87%,此测试值包括了模式转换器的转换效率.

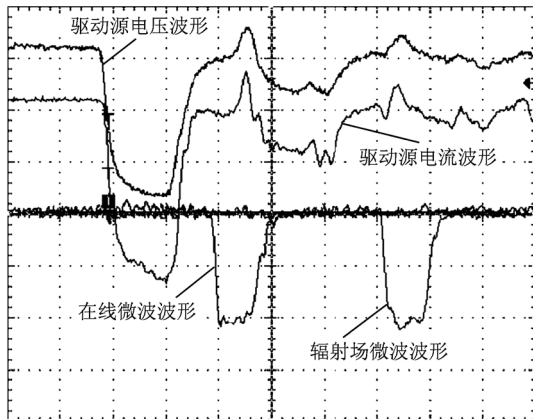


图9 用传输波导替代合成器时的测试波形

场微波波形未发现击穿现象,因此可以判断主通道的功率容量大于 1 GW. 通过比对在线测量功率与辐射场测量功率及加合成器前后距离辐射喇叭同一距离的中心位置处的辐射场功率密度可知,合成器主通道的能量传输效率接近 100%. 图 10 为合成器主通道传输 1.27 GW 时的测试波形.

为了对合成器副通道的功率容量及能量耦合效率进行测试,采取了降低微波源输出功率的方法开展实验研究.降低后的输出功率已经接近 HPM 源输出下限,因此波形不是很平坦,但从整体上看,当微波功率小于 300 MW 时,经合成器后的辐射场测试波形与合成器前的在线测试波形仍符合得较好,结果如图 11 所示.当微波源功率达到 345 MW 时,

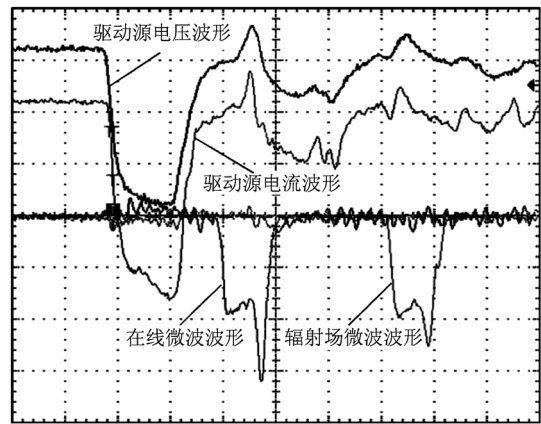


图11 合成器副通道耦合 300 MW 时的测试波形

4.2. 结果分析

由器件测试结果可知,主通道的能量传输效率与设计指标基本一致,副通道的能量耦合效率较设计指标略低.主要原因在于返波管器件输出的微波为 TM_{01}^0 模式,经模式转换器转换为 TE_{11}^0 模式后再注入合成器,实验用模式转换器的转换效率约为^[12] 95%,如果从主通道输入,则未转换的 TM_{01}^0 模式的能量也能顺利传输,因此加入合成器前后总体能量

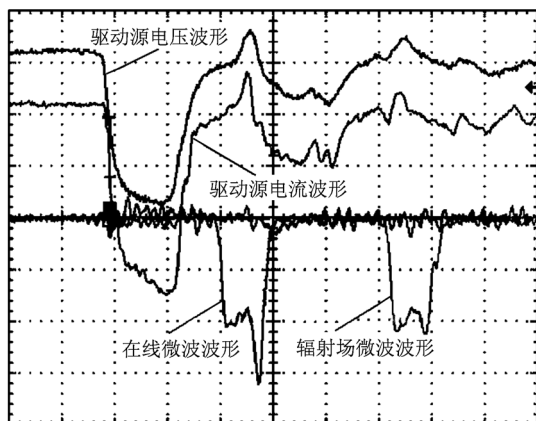


图 12 合成器副通道耦合 345 MW 时的测试波形

几乎没有损失. 如果由副通道输入, 由于耦合结构是按照 TE_{11}^0 垂直极化模式微波设计的, 则模式转换器未能转换的其他模式微波不能耦合进入主通道, 因此总的能量效率为模式转换器效率与合成器耦合效率之积. 另外, 实验用高功率微波源输出功率为 300 MW 时对应的微波频率与输出功率为 1 GW 时对应的微波频率相比偏移约 100 MHz, 此时模式转换器的效率约为 93%, 总体理论效率约为 89%, 而实测效率约为 87%, 两者很接近. 该热测效率包括了模式转换器效率, 由于模式转换器的实际效率当前暂无法进行热测, 因此实际合成器副通道的耦合效率将大于该测试值. 主通道功率容量主要由波导半径决定, 因此功率容量会远大于 1 GW, 实践表明半径为 25 mm 的圆波导传输功率可达 3 GW 以上^[4]. 副通道的功率容量主要受耦合缝限制, 缝间

电场强度决定了器件的功率容量, 理想情况下本文设计的合成器副通道功率容量可达 1 GW, 理论分析功率容量在百兆瓦量级, 实测功率容量约为 300 MW, 达到了器件设计预期目标. 实践表明, 对耦合缝进行平滑处理是提高器件功率容量的一种有效手段.

由于设计的合成器输入均为纯度极高的 TE_{11}^0 模式微波, 且微波主频率固定, 频带极窄, 而合成器主通道传输距离很短, 副通道耦合是严格按照垂直极化 TE_{11}^0 模式微波设计的, 因此在传输及耦合过程中产生其他模式微波的可能性极小, 信号失真度也比较小, 数值模拟结果较清楚地说明了这一点. 另外, 在 HPM 技术研究领域, 主要关心的是整体能量效率, 信号失真问题并不是特别需要关注的.

5. 结 论

随着 HPM 技术的发展, HPM 合成技术将成为未来的一个研究热点. 本文介绍了一种基于耦合波理论的通道合成器的研制及测试. 测试结果表明: 合成器主通道的能量传输效率接近 100%, 功率容量在吉瓦量级以上; 合成器副通道能量耦合效率大于 87%, 功率容量约为 300 MW. 利用该合成器可实现 X 波段百兆瓦级 HPM 与吉瓦级 HPM 通道内合成输出, 下一步的工作是进一步优化结构设计, 将副通道的功率容量提高到吉瓦量级, 实现两路吉瓦量级的 HPM 合成输出.

- [1] Balanis C A 1997 *Antenna Theory: Analysis and Design* (2nd ed) (New York: John Wiley & Sons) p1
- [2] Barkep R J, Schamiloglu E 2001 *High Power Microwave Sources and Technologies* (New York: IEEE) p1
- [3] Fan Z K, Luo X M, Fan B, Zhang Y J 2008 *Chin. Phys. B* **17** 975
- [4] Xiao R Z, Liu G Z, Chen C H 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3807
- [5] Huang H, Gan Y Q, Lei L R, Jin X, Ju B Q, Xiang F, Feng D C, Liu Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1765 (in Chinese) [黄华, 甘延青, 雷禄容, 金晓, 鞠炳权, 向飞, 冯弟超, 刘忠 2008 物理学报 **57** 1765]
- [6] Li Z H, Chang A B, Ju B Q, Xiang F, Zhao D L, Gan Y Q, Liu Z, Su C, Huang H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2603 (in Chinese) [李正红, 常安碧, 鞠炳权, 向飞, 赵殿林, 甘延青, 刘忠, 苏昶, 黄华 2007 物理学报 **56** 2603]
- [7] Luo X, Liao C, Meng F B, Zhang Y J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5774 (in Chinese) [罗雄, 廖成, 孟凡宝, 张运俭 2006 物理学报 **55** 5774]
- [8] Shao H, Liu G Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2387 (in Chinese) [邵浩, 刘国治 2001 物理学报 **50** 2387]
- [9] Chao A W, Tigner M 1998 *Handbook of Accelerator Physics and Engineering* (Singapore: World Scientific) pp374—378
- [10] Zhang K Q, Li D J 2001 *Electromagnetic Theory for Microwave and Optoelectronics* (2nd ed) (Beijing: Electronic Industry Press) p443 (in Chinese) [张克潜, 李德杰 2001 微波与光电子学中的电磁理论(第二版)(北京:电子工业出版社)第 443 页]
- [11] Xu Z H 1982 *Basic Technology of Microwave* (Changsha: National University of Defense Technology Press) p82 (in Chinese) [徐之华 1982 微波技术基础(长沙:国防科学技术

大学出版社] 第 82 页]

[12] Huang H J, Qiu S, Fang J Y, Zhang Q Y, Zhang Z Q, Hou Q,
Zhu X X 2008 *Proceedings of the 17th International Conference on*

High-Power Particle Beams (Xi'an: China Academy of
Engineering Physics) pp346—348

An X band synthesizer for a few hundred megawatt level power microwaves

Fang Jin-Yong^{1)2)†} Huang Hui-Jun²⁾ Zhang Zhi-Qiang²⁾ Zhang Xiao-Wei²⁾ Zhang Li-Jun²⁾
Zhang Qing-Yuan²⁾ Hao Wen-Xi²⁾ Huang Wen-Hua²⁾ Jiang Wei-Hua¹⁾

1) (*Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

(Received 5 June 2010; revised manuscript received 29 December 2010)

Abstract

A synthesis method for a few hundred megawatt level power microwave is presented in this paper. Based on the coupling wave theory and the polarized wave orthogonal theory, the pulse series of one gigawatt level power microwave and one hundred megawatt level power microwave can be put in two separate ports and put out from one common port. The synthesizer is unitized by two cylindrical waveguides which are back to back combined; the cylindrical waveguide which is joined with the output port is named main channel, and the other cylindrical waveguide is called associate channel. The main channel transmits horizontally polarized TE_{11}^0 mode microwave, and the operation frequency band is only limited to the barrier frequency λ_c . The associate channel transmits vertical polarized TE_{11}^0 mode microwave, and the operation frequency band can reach up to several hundred mega hertz. High power experiment indicates that the transmission energy efficiency of the main channel is nearly 100% and the coupling energy efficiency of the associate channel is above 87%, the power capacity of the main channel is more than 1GW and that of the associate channel is about 300 MW.

Keywords: high power microwave, synthesizer, coupled wave

PACS: 84.90.+a

† E-mail: f jy90@sina.com