

6mm 波导腔耿氏管功率合成器* **

薛呈添 王乔敏

(南开大学,天津) (天津大学,天津)

摘要 本文介绍6mm波导腔双源阵四管(耿氏管)功率合成器的原理、结构、优化计算、性能(例如:各种含义下的合成效率,推频曲线,频率漂移问题和功率稳定性)和实验方法。文中给出的理论和技术适用于厘米波和毫米波波导腔合成器。

关键词 固态源;毫米波;源阵;功率合成器

1. 引言

耿氏效应器件已广泛用于微波和毫米波频段的低噪声功率源中,由于单个耿氏管给出的功率低,所以在许多应用场合,采用功率合成技术来获取大功率^[1-3]。概括地说,工作频率低于50GHz的毫米波、厘米波频段,功率合成器采用波导腔结构较为简便实用;在工作频率高于50GHz的毫米波和亚毫米波频段,宜用准光腔功率合成技术^[4]。

2. 结构

我们研制了多种型式的波导腔固态源功率合成器,为了叙述简便,只举一个具体结构,如图1所示。在6mm全高矩形腔内,沿宽边中心线,在宽壁之间插入两个“源阵”。源阵之间纵向间隔为 L ,每个源阵都是由在两根共轴的金属棒之间串接两个耿氏管组成。两管接触处伸出一条电源馈线,经波导腔窄壁上的穿心电容与恒压源的正极相联。恒压源的另一极与波导腔壁电接触良好。耿氏管电压值为3.0V,单管电流约0.9A。

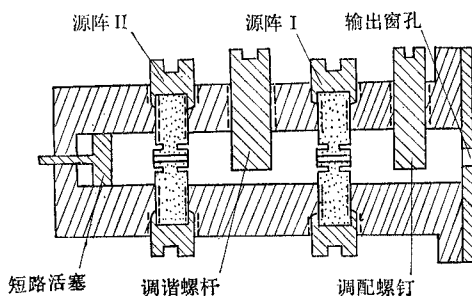


图1 双源阵功率合成器原理图

在波导腔宽壁中心线上,紧靠输出端安置一个调配螺钉,以改善合成器与负载之间的匹配。螺钉直径为1.5mm;合成器输出端的圆形窗孔^[5]直径为2.2mm。窗孔直径的大小可以改变合成器与负载之间的耦合程度。在合成器的另一端是可调短路活塞,起机械调谐作用,可使合成器获得较宽频带。在两源阵之间的中心位置上安置调谐螺杆,直径为2.0mm,起机械调谐作用。它可以调节

合成器的最高工作频率。

* 1987年9月18日收到,1988年5月19日修改定稿。

** 机械电子工业部资助课题

3. 原理

合成器的等效电路如图 2 所示, 令各段传输线的特性阻抗均为 Z_0 , 并假设等效电路中各个阻抗都已用 Z_0 归一化.

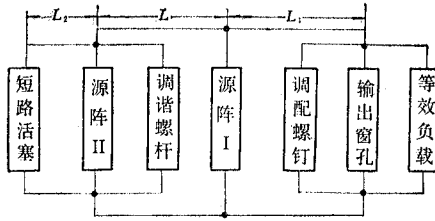


图 2 合成器的等效电路.

若合成器的负载在合成器的窗孔位置的等效导纳写作 $Y_L = G_L + jB_L$; 窗孔导纳写成 jB'_i , 则窗孔处的总导纳为:

$$Y_i = G_L + jB_i$$

其中 $B_i = B_L + B'_i$. 可以看出, Y_i 变换到“源阵 I”位置上的导纳 Y^i 为:

$$Y^i = \frac{G_L(1 + \tan^2\theta_1) + j[(B_i + \tan\theta_1)(1 - B_i \tan\theta_1) - G_L^2 \tan\theta_1]}{(1 - B_i \tan\theta_1)^2 + (G_L \tan\theta_1)^2}$$

而合成器的短路活塞在“源阵 II”位置上的等效导纳可写成 $-j\cot\theta_2$. 若源阵 II 位置的总导纳写成 $-G_{II} + jB_{II}$, 则此导纳变换到源阵 I 位置上的导纳为:

$$Y^{II} = \frac{-G_{II}(1 + \tan^2\theta) + j[(B_{II} + \tan\theta)(1 - B_{II} \tan\theta) - G_{II}^2 \tan\theta]}{(1 - B_{II} \tan\theta)^2 + (G_{II} \tan\theta)^2}$$

以上各式中 $\theta = \omega L$, $\theta_1 = \omega L_1$, $\theta_2 = \omega L_2$.

若“源阵 I”自身的导纳写作 $Y_I = -G_I + jB_I$, 则源阵 I 位置上的总导纳为:

$$Y = G + jB$$

其中

$$G = G_L \frac{1 + \tan^2\theta_1}{(1 - B_i \tan\theta_1)^2 + (G_L \tan\theta_1)^2} - \left[G_I + \frac{G_{II}(1 + \tan^2\theta)}{(1 - B_{II} \tan\theta)^2 + (G_{II} \tan\theta)^2} \right] \quad (1)$$

$$B = B_I + \frac{(B_i + \tan\theta_1)(1 - B_i \tan\theta_1) - G_L^2 \tan\theta_1}{(1 - B_i \tan\theta_1)^2 + (G_L \tan\theta_1)^2} - \frac{(B_{II} + \tan\theta)(1 - B_{II} \tan\theta) - G_{II}^2 \tan\theta}{(1 - B_{II} \tan\theta)^2 + (G_{II} \tan\theta)^2} \quad (2)$$

因此, 双源阵功率合成器实现有效功率合成的振幅条件和相位条件分别为:

$$G \leq 0 \quad (1')$$

$$B = 0 \quad (2')$$

在(1')式中, 小于符号意味着合成器的工作状态正在建立; 等于符号表示合成器的工作已达稳定状态.

上述振幅条件和相位条件反映了合成器实现有效功率合成时, 合成器负载与合成器的电路参数(包括: 波导腔的结构参数与耿氏管的性能参数)的普遍关系.

关于源阵 I 的归一化导纳 $Y_I^{[6]}$ 为:

$$Y_I = \frac{EZ_0(b^2S_I + 4h^2Z_I)}{S_I Z_I + A_I(b^2S_I + 4h^2Z_I)} = -G_I + jB_I \quad (3)$$

式中

$$A_I = jK \sum_{m=3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{\Gamma_{m0}} \cos \frac{m\pi}{a} r$$

$$S_I = j8K \sum_{\substack{m=1,3,\dots \\ n=2,4,\dots}}^{\infty} \frac{1}{\Gamma_{mn}} \cos \frac{m\pi}{a} r \left(\frac{\sin \frac{n\pi}{b} h}{\frac{n\pi}{b}} \right)^2$$

$$E = -\frac{2K}{|\Gamma_{10}|} \cos \frac{\pi}{a} r$$

$$K = \frac{\omega \mu_0}{ab}$$

关于源阵 II 的归一化导纳^[6]为:

$$Y_{II} = \frac{EZ_0(b^2S_{II} + 4h^2Z_{II})}{S_{II} Z_{II} + A_{II}(b^2S_{II} + 4h^2Z_{II})} = -G_{II} + jB_{II} \quad (4)$$

式中

$$A_{II} = jK \sum_{m=3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{\Gamma_{m0}} \left(\cos \frac{m\pi}{a} r \right) (1 - e^{-2\Gamma_{m0}L_2})$$

$$S_{II} = j8K \sum_{\substack{m=1,3,\dots \\ n=2,4,\dots}}^{\infty} \frac{1}{\Gamma_{mn}} \left(\cos \frac{m\pi}{a} r \right) \left(\frac{\sin \frac{n\pi}{b} h}{\frac{n\pi}{b}} \right)^2 (1 - e^{-2\Gamma_{mn}L_2})$$

上述各式中 a, b 分别为波导腔内壁的宽边和窄边尺寸, $a = 4.775 \text{ mm}$, $b = 2.388 \text{ mm}$; (标准波导); r 为金属棒的半径, $r = 2.0 \text{ mm}$; ε_0 和 μ_0 分别为真空中, 介电常数和磁导率; $\omega = 2\pi f$, f 为合成器工作频率 $f = 50.0 \text{ GHz}$. 分析中, 假定耿氏管对称地安置在波导腔的宽壁之间, 每个耿氏管的管芯离波导腔内壁都是 h .

在源阵导纳的表示式中, 假设耿氏管的归一化导纳对每个管都相同, 其值为:

$$\frac{1}{Z_I} = \frac{1}{Z_{II}} = \frac{-\omega^2 R^2 C_0^2}{1 - \omega^2 L_p (C_0 + C_1)} + j\omega \left[C_2 + \frac{C_0 + C_1}{1 - \omega^2 L_p (C_0 + C_1)} \right] \quad (5)$$

式中 $-R$ 为耿氏管的等效负电阻; C_0 为耿氏管有源区电容, C_1, C_2 和 L_p 分别为耿氏管的封装电容和封装电感.

4. 计算

安置在源阵上的耿氏管是借助金属棒和波导腔实现耦合的. 固态管虽可近似看成集总参数元件. 但波导腔、金属棒等都是分布参数元件. 对于这样复杂的电磁场边值问题, 欲直接求解是困难的, 可以采用等效电路分析的方法. 将双源阵功率合成器的并联等效电路画成图 3. 合成源的总导纳 $Y = G + jB$ 中包含: 源阵导纳 Y_I 和 Y_{II} ; 等效负载导纳 $Y_L = G_L + jB_L$; 矩形波导腔导纳 $Z_c = G_c + jB_c$ (包括: 波导腔的输出窗孔导

纳、螺钉、螺杆以及短路活塞等效导纳),因而双源阵功率合成器的功率关系为:

$$G = G_L + G_c - (G_I + G_{II}) \leq 0$$

或

$$G_I + G_{II} \geq G_L + G_c \quad (6)$$

式中大于号表示合成器处于建立过程中;等号表示合成器处于稳定工作状态。

一般说, G_c 与 $G_I + G_{II}$ 和 G_L 相比都是很小的,因而要得到高的输出功率,合成器中的源阵电导的绝对值应尽可能大,由(3)式和(4)式可知: G_I 和 G_{II} 都是合成器的电路参数 ($r, h, -R, L, C, \dots$) 的多元函数,要使合成器处于最佳工作状态,从数学上说:即求函数 $G_I + G_{II}$ 对这些电路参数的偏导数,令一级偏导数为零,二级偏导数小于 0,由此可确定上述电路参数的最佳值。然而这样做相当困难,不如利用计算机进行数值计算。先编制 $G_I + G_{II}$ 对上述电路参数的程序,并把计算结果绘制成曲线,由曲线求出 $G_I + G_{II}$ 最大值时的各个电路参数相应的值(称最佳值)。

编制计算程序时,例如编制 $G_I + G_{II}$ 对电路参数 r 的程序,可先给定其它参数的可能取值,然后计算函数 $G_I + G_{II}$ 随 r 变化的值,最后由计算曲线求出电路参数 r 的最佳值。照此方法,逐一求出其它电路参数的最佳值。按上述优化方法求得的电路参数而设计的合成器,具有优良性能。本文合成器就是用这种方法进行优化设计的。文献[7]曾给出了部分实验结果,但未报道理论分析和计算过程。

5. 实验

5. 实验

(1) 单管实验 首先在合成器的一个“源阵”上,安置一只待测耿氏管和一只已烧断(断管)的耿氏管;在另一源阵上,安置两个“断管”,随后给“待测管”施加直流工作电压,测量合成器的输出功率。定义单个耿氏管的电路效率为:

$$\eta_{ckt} = P_t (\text{实测值}) / P_n (\text{标称值})$$

其中 P_t 为测试系统调整到最佳状态下,实测的合成器最大输出功率; P_n 为产品的标称值。

(2) 单源阵实验 在一个源阵上安置两只待测管;在另一源阵上安置两只“断管”。待测管的电路效率已事先测定。现定义单源阵时合成器的合成效率为:

$$\eta_{comp} = P_{out} / (P_{t1} + P_{t2})$$

其中 P_{out} 是单源阵情况下,测试系统处于最佳状态下,合成器的输出功率;而 P_{t1} 和 P_{t2} 分别是单管情况下,合成器的输出功率。

(3) 双源阵实验 两个源阵都安置待测耿氏管。若合成器输出功率为 P_{out} ,则合成器的(总)合成效率为:

$$\eta_{comp} = P_{out} / \sum_{i=1}^4 P_{ti}$$

对于波导腔合成器来说,实验结果表明:合成器的合成效率容易做到 90% 以上,有时甚至大于 100%。这说明波导腔合成器的电路效率比准光腔功率合成器的高,波导腔

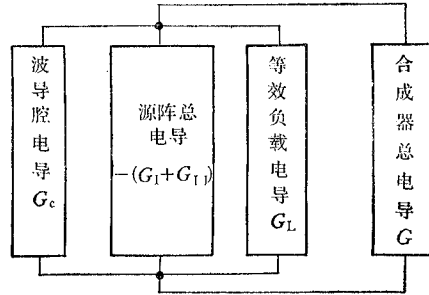


图 3 合成器的并联等效电路

合成器的合成效率高于 100% 可理解为: 在强射频场作用下, 耿氏管的功率转换效率提高了。耿氏管的功率转换效率规定为:

$$\eta_t = P_m/P_0$$

其中 P_m 为耿氏管产生的微波功率; P_0 为直流电压源供给耿氏管的功率。

要说明的是: 在单管测量时, 安置“断管”的目的是使单管与双管测试条件尽量相同; 在单源阵测量时, 在另一源阵上安置“断管”是为了维持单源阵与双源阵的测试条件一致。以上的实验安排是为了使合成器的测试能较客观地反映真实情况。

为了保护合成器中的耿氏管, 在合成器的外壳上安置有散热片。对于双源阵四管实验还另加风扇强拍风冷。

合成器的主要性能见表 1, 合成器的功率、频率曲线见图 4 至图 8。各图中实线为双源阵情况; 虚线为单源阵情况; 点划线为单个耿氏管情况。

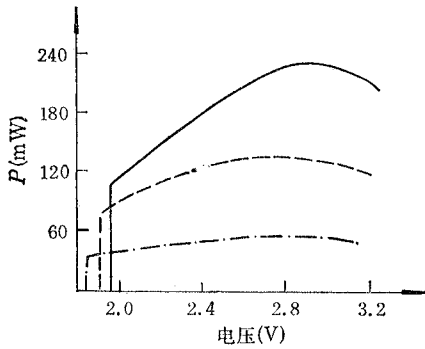


图 4 功率-电压曲线

表 1 合成器的主要性能

| 性能参数 | 指 标 | 性能参数 | 指 标 |
|---|--------------------|--|-------|
| 中心工作频率 f_0 (GHz) | 50 | 耿氏管平均的电路效率 $\eta_{ckt} = P_t/P_0$ | 60% |
| 输出功率 P_{out} (mW) | 240 | 合成效率 $\eta_{comp} = P_{out}/\sum_i P_{ti}$ | 102% |
| 频温系数 $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ (MHz/°C) | 0.04 | 转换效率 $\eta_t = P_{out}/P_0$ | 3.1% |
| 功温系数 $\frac{\Delta P}{\Delta t}$ (mW/°C) | 0.01 | 机调带宽 Δf (GHz) | 4.2 |
| 频率稳定度 $\Delta f/f_0$ | 9×10^{-9} | 温度补偿措施 | 双金属 |
| 推频系数 $\Delta f/\Delta V$ (MHz/0.1V) | 0.8 | 有源器件 GaAs 型号 | WT-57 |

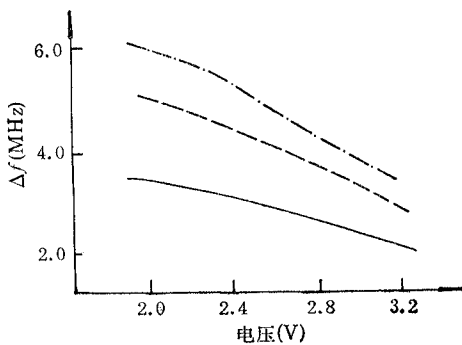


图 5 频率-电压曲线

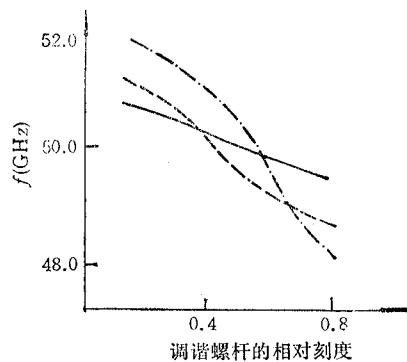


图 6 机械调谐曲线

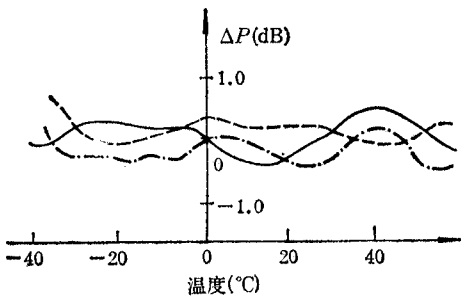


图7 功率-温度曲线

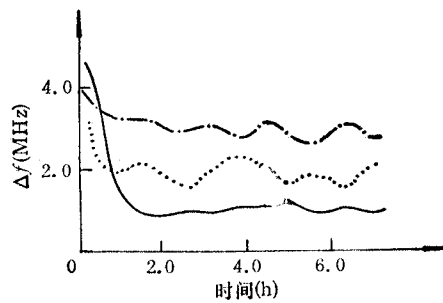


图8 频率稳定性曲线

实验和理论都表明: 合成器性能, 如输出功率 P_{out} , 合成效率 η_{comp} 不但与合成器的电路结构参数有关, 而且与耿氏管的性能密切相关。当 GaAs 耿氏管的电压工作曲线(推频特性)一致性好; 中心工作频率也较一致时, 则合成器输出功率大, 对负载适应性强, 并且不出现跳频和功率突变现象。

6. 结论

在 6 mm 波段, 利用矩形波导腔能够实现多只耿氏管功率的有效合成, 这种合成器的合成效率可高达 100%, 而且性能稳定, 结构简单, 使用方便。但与厘米波或 8 mm 波导功率合成器相比, 它的制作比较困难。

本工作得到南开大学翁心光付教授, 李惠珍讲师的帮助, 韦木升同志的热情指导, 朱遐教授, 丁守谦教授从多方面的热情帮助和指导, 在此一并深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 戴忠炎, 电子学报, 1988 年, 第 1 期, 第 103—110 页。
- [2] K. J. Russell, *IEEE Trans on MTT*, **MTT-27**(1979)5, 472—478.
- [3] K. Chang, *IEEE Trans on MTT*, **MTT-31**(1983)2, 91—107.
- [4] Cheng-tian Xue, Qian-min Wang, et al., *Int. J. Infrared and Millimeterwave*, 9(1988)4, 385—393.
- [5] J. F. White, *IEEE Trans on MTT*, **MTT-20**(1972)6, 372—378.
- [6] 韦木昇、沈爱根、张光明, 雷达测量技术(微波专辑) 1981 年, 第 1 期, 第 15—29 页。
- [7] P. C. Rakshit, et al., *IEEE Trans on MTT*, **MTT-34**(1986)11, 1223—1225.

A 6mm POWER COMBINER USING GUNN DIODES IN WAVEGUIDE CAVITY

Xue Chengtian

(Nankai University, Tianjin)

Wang Qiaomin

(Tianjin University, Tianjin)

Abstract A 6 mm power combiner which consists of four Gunn diodes with bi-source arrays in rectangular waveguide is described. The operating principle, configuration, optimal calculation, performance characteristics (e.g. combining efficiencies, pushing figure, frequency drift and power stability) and experimental methods of the combiner are presented. The theory and technique are suitable for the power combiner operating in centimeter or millimeter wave.

Key words Solid state source; Millimeter wave; Source-array, Power combiner