

短槽混合电路功率合成器的优化设计

王少庆 林为干

(电子科技大学应用物理研究所 成都 610054)

张 梅

(广东工学院 广州 510115)

摘要 本文提出了用负阻非线性网络模型来表征短槽混合电路功率合成器相互注入锁定现象的新思想,该模型比较完整地反映了相互注入锁定中的非线性特性。在导出了功率合成系统的非线性方程之后,给出了达到最大功率合成效率时振荡器工作参数的优化方法,优化结果与实验结果吻合较好。

关键词 短槽混合电路,功率合成器,优化设计,相互注入锁定

1 引言

微波功率合成电路主要可以分成两大类^[1,2]: (1) 多器件功率合成振荡器。(2) 多振荡器功率合成系统。在第1类功率合成器中,多个微波固态器件通过一个特殊的谐振腔共同振荡达到功率合成之目的。在第2类功率合成电路中,多个振荡器(包括多器件合成振荡器)通过一个适当的微波多端口混合电路,将振荡器的功率进行合成。后一种电路合成形式在毫米波段和多级功率合成器的末级合成中具有广泛的应用,因此出现了多种合成电路结构^[3,4]。在这些电路结构中,文献[4]提出的3dB短槽混合电路功率合成器因其结构紧凑、体积小、合成效率高等诸多优点而最为有名。在这种电路结构中,三个振荡器通过一个3dB短槽混合电路相互耦合达到同步工作,从而实现功率合成。然而在这种电路中,由于三个被合成的振荡器是相互注入锁定的,因此正如文献[5]所指出的,这类功率合成器的分析和调试都比较困难。为此有必要从理论上确定达到最佳功率合成效率的工作参数。

2 功率合成器的动态方程

在短槽混合电路功率合成器中,振荡器1,2,3分别接在短槽混合电路的1,2,3端口,合成功率通过端口4输出到匹配负载。短槽混合电路的结构如图1(a)所示。若混合电路的耦合段为理想3dB耦合,则功率合成系统可用图1(b)所示的非线性负阻网络来等效。其中振荡器1,2,3从其输出端看进去的等效导纳分别用 Y_{1D} , Y_{2D} , Y_{3D} 来表示。它

1982-11-29收到,1993-06-26定稿

王少庆 男,1964年生,讲师,从事电磁场与微波技术研究工作。

林为干 男,1920年生,教授,学部委员,从事电磁场与微波技术研究工作。

张梅 女,1962年生,助教,从事电路理论教学工作。

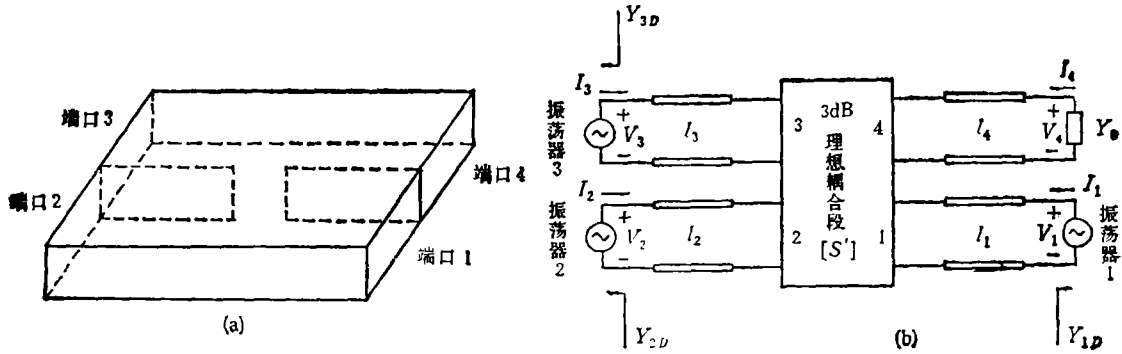


图 1 (a) 短槽混合结构示意图

(b) 功率合成器负载网络等效模型

们分别是工作频率 ω 和端口电压幅值 $|V_1|$, $|V_2|$, $|V_3|$ 的非线性函数。在图 1(b) 中, l_1, l_2, l_3, l_4 分别为短槽混合电路四段矩形波导传输线的长度。

理想 3dB 耦合段的 S 参数矩阵为

$$[S'] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & j\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 & j\frac{\sqrt{2}}{2} \\ j\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & j\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{bmatrix}.$$

假设四段波导传输线的长度均相等, 即 $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l$, 且其传播常数为 $\nu = \alpha + j\beta$, 则短槽混合电路的 S 参数矩阵为

$$[S] = e^{-2\nu l} [S'].$$

与之对应的 Y 矩阵可由下式计算得到

$$[Y] = ([1] - [S])([1] + [S])^{-1} Y_0 = \begin{bmatrix} A & B & C & D \\ B & A & D & C \\ C & D & A & B \\ D & C & B & A \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中

$$A = \frac{1 - \exp(-8\nu l)}{1 + \exp(-8\nu l)} Y_0, \quad B = \sqrt{2} \frac{\exp(-6\nu l) - \exp(-2\nu l)}{1 + \exp(-8\nu l)} Y_0, \\ C = -\sqrt{2} j \frac{\exp(-6\nu l) + \exp(-2\nu l)}{1 + \exp(-8\nu l)} Y_0, \quad D = 2j \frac{\exp(-4\nu l)}{1 + \exp(-8\nu l)} Y_0,$$

Y_0 为矩形波导的特性导纳。

在图 1(b) 所示的电压、电流参考方向下, 振荡器输出电压的幅值和相位可由下式表示^[6]

$$-I_i = \left(Y_{iD} + Y_{iDj\omega} \frac{d}{dt} \right) V_i, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (2)$$

式中 $Y_{iDio} = \partial Y_{iD} / \partial(j\omega)$.

由(1),(2)两式可得到功率合成系统的复数方程为

$$Y_{iDio} \frac{dV_i}{dt} = H_i, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} H_1 &= -(Y_{1D} + A^2 + D^2E)V_1 - (DCE + B)V_2 - (DBE + C)V_3, \\ H_2 &= -(Y_{2D} + A^2 + C^2E)V_2 - (DCE + B)V_1 - (BCE + D)V_3, \\ H_3 &= -(Y_{3D} + A^2 + B^2E)V_3 - (BDE + C)V_1 - (BCE + D)V_2; \\ E &= -1/(Y_0 + A). \end{aligned}$$

令(3)式左边的微分项等于零并将虚实部分分开,从而得到功率合成器的平衡工作点方程为

$$G_i = \operatorname{Re}[H_i] = 0, \quad (i = 1, 2, 3); \quad (4)$$

$$G_i = \operatorname{Im}[H_{i-3}] = 0, \quad (i = 4, 5, 6). \quad (5)$$

联立求解上面六个非线性方程组可以求得功率合成器在给定振荡器工作参数下功率合成器的工作频率、合成功率率和合成效率。合成功率率和效率分别可由下式计算得到

$$P_{out} = |V_1|^2 Y_0 = |E|^2 Y_0 |DV_1 + CV_2 + BV_3|^2,$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_1 + P_2 + P_3},$$

式中 P_1, P_2, P_3 分别为振荡器 1, 2, 3 的输出功率。在求得功率合成器的平衡点以后,可通过由(3)式而获得的实数微分方程组,利用鲁斯-霍尔维兹稳定性判据来判定平衡点的稳定性。

3 振荡器工作参数的优化

在实际功率合成中,一般被合成的三个振荡器的功率是确定的,而振荡器的频率在一定的范围内是可调的。实际功率合成中三个振荡器频率怎样选择才能使合成效率达到最大,这是人们一直关心的问题。从理论上解决这一问题将简化调试过程中的复杂性并克服调试的盲目性。为解决功率合成器的优化问题,我们以合成效率和(4)、(5)式的六个平衡点约束条件构成如下的优化目标函数

$$F = x_k |1 - \eta| + W_k \sum_{i=1}^6 G_i^2,$$

式中 x_k 为权因子, W_k 为罚因子。利用序贯加权因子法(即 SWIFT 法)对目标函数进行优化。当 F 满足一定精度要求时,功率合成器的合成效率将达到最大,同时平衡点方程亦将得到满足。在获得一个最佳合成效率平衡点以后,利用鲁斯-霍尔维兹判据对平衡点进行稳定性判定。若平衡点不稳定,则改变振荡器频率选择的初值,再次寻找优值,直至获得稳定的平衡点为止。在优化过程中,初值的选择将决定功率合成器的工作频率范围,在一定频率范围内,一般都能得到一个稳定的优化工作点。

做为一个优化实例,我们在 Ka 波段研制了一批功率合成器,如图(2)所示。在对单个振荡器测试之后,功率合成器采用单一馈电方法。三个振荡器的等效导纳可以用下式的多项式表示^[7,8]

$$Y_D = -G_0 + jB_0 + (G_\omega + jB_\omega)\Delta\omega + (G_\nu + jB_\nu)|V|^2$$

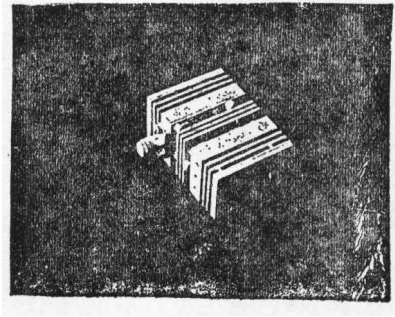


图2 Ka 波段短槽混合电路功率合成器

$$+ (G_c + jB_c)\Delta\omega |V|^2 + (G_{\omega_2} + jB_{\omega_2})\Delta\omega^2$$

式中的系数 $G_0, B_0, G_{\omega}, B_{\omega}, G_{\nu}, B_{\nu}, G_c, B_c, G_{\omega_2}, B_{\omega_2}$ 可用文献[7,8]的方法测试和拟合,如表1所示.其中三个振荡器的中心频率为 35×10^3 MHz,输出功率分别为 $P_1 = 168$ mW,

表1 Ka 波段振荡器参数

振荡器编号	模型系数										
	G_0 $\times 10^{-3}$	B_0 $\times 10^{-3}$	G_{ω} $\times 10^{-8}$	B_{ω} $\times 10^{-8}$	G_{ν} $\times 10^{-3}$	B_{ν} $\times 10^{-3}$	G_c $\times 10^{-8}$	B_c $\times 10^{-9}$	G_{ω_2} $\times 10^{-9}$	B_{ω_2} $\times 10^{-9}$	
1	4.96	-1.5	7.42	2.0	3.5	1.79	3.41	1.69	8.63	2.41	
2	4.82	-1.52	7.28	1.82	3.57	1.91	3.77	1.60	8.58	2.47	
3	4.94	-1.58	7.47	1.73	3.84	2.05	3.52	1.82	8.71	2.55	

表2 功率合成器优化及实验结果

振荡器编号	振荡器频率 (GHz)	计算机优化值		实验值	
		合成功率 (mW)	合成效率	合成功率 (mW)	合成效率
1	35.00	479	100.5%	474	99.3%
2	34.78				
3	34.80				

$P_2 = 157$ mW, $P_3 = 152$ mW. 功率值在 ± 150 MHz 范围内基本保持不变. 在优化过程中, 由于矩形波导很短, 四段传输线的损耗可以忽略. 表2给出了一个功率合成器计算机优化值和实验结果, 可以看出两者吻合较好.

4 结论

短槽混合电路功率合成器中各振荡器相对频率的选择是影响合成效率的主要因素.

由于该功率合成器是一个振荡器相互注入锁定的复杂系统,三个振荡器频率和功率究竟怎样选择才能使合成效率最大,这是功率合成当中人们很想知道的一个问题。本文提出的非线性分析和计算机优化设计能较好地回答这个问题。同时本文的方法也使 3^N 和 $2N + 1$ 个振荡器的并行和串行多级功率合成系统的计算机优化设计成为可能。

参 考 文 献

- [1] Russell K J. IEEE Trans. on MTT, 1979, MTT-27(5): 472—478.
- [2] Chang K, Sun C. IEEE Trans. on MTT, 1983, MTT-31(2): 91—107.
- [3] Mizushina S. Proc. IEEE, 1967, 55(12): 2166—2167.
- [4] Mizushina S, Kondon H, Ashiki M. IEEE Trans. on MTT, 1980, MTT-28(12): 1428—1432.
- [5] Ohta I, Kaneko T. IEEE Trans. on MTT, 1989, MTT-37(11): 1699—1707.
- [6] Nakajima M, Ikenoue J. Int. J. Electron. 1978, 44(4): 465—472.
- [7] Fukumoto K, Nakajima M, Ikenoue J. IEEE Trans. on MTT, 1983, MTT-31: 954—959.
- [8] Fukumoto K, Nakajima M, Ikenoue J. IEEE Trans. on MTT, 1985, MTT-33: 319—323.

OPTIMUM DESIGN OF SHORT-SLOT HYBRID POWER COMBINER

Wang Shaoqing Lin Weigan

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Zhang Mei

(Guangdong Institute of Technology, Guangzhou 510115)

Abstract A new idea of representing the mutual injection locking phenomena in the short-slot hybrid power combiner by a model of negative nonlinear network is proposed. This model thoroughly represents the nonlinear characteristic of the combiner. After the nonlinear equations of the combining system are derived, a method of optimizing the parameters of the combined oscillators to achieve a maximum power combining efficiency is given. The optimum results agree with experimental ones quite well.

Key words Short-slot hybrid, Power combiner, Optimum design, Mutual injection-locking