

任意功率分配比的微波开关*

郑敦祥

(北京航空维修技术开发公司)

1. 引言

微波功率分配器和开关在微波工程上都有许多应用,但两者不能兼容。W. L. Teeter 等人^[1]提出的任意分配比的功率分配器,无论是在性能上,还是在结构上都比早期工程上应用的有很大的提高。但仍然不能实现不同状态下功率分配比的快速转换。文中也未给出完整的分析。本文介绍的任意功率分配比的微波开关(以下简称“开关”),与文献[1]给出的不全相同,它是分配器和开关的组合。它具有可变的任意功率分配比和在不同状态(如宽、窄波束功率分配比;发射、接收等不同状态)下快速转换的多功能组件。

“开关”是作为某种机载雷达的波束转换开关而研制的,因为原铁氧体波束转换开关,不能在不同状态下提供任意的功率分配比。“开关”是利用 PIN 管开关的“通”、“断”来改变相差网络的相位关系,以实现不同状态下输出的 E, H 端口的任意功率分配比和快速转换。由于整机使用要求,在 A 态,要求“开关”以一定功率分配比(如 $\frac{1}{5}:\frac{4}{5}$)同时馈给 E, H 端口,使天线用 Σ, Δ 波束的组合形成宽波束; B 态则要求全部功率以低损耗馈给 E 端口,使天线用 Σ 波束形成窄波束。并实现 A, B 态转换。

对于发射、接收状态,“开关”的相位关系是可逆的,用正偏流脉冲控制电路和零偏置来实现收、发转换。

做出的“开关”工作于三厘米波段,其插入损耗 $< 0.7\text{dB}$, 输出端口的功率分配比可从 $\frac{1}{1000}$ 到 1 之间任意改变,输入端口两通道间

的隔离比 $\geq 30\text{dB}$, 工作的脉冲功率为 6kW 。

“开关”可以应用于多波束形成、多通道传输、两功率的合成输出、功率监测、双频天线的功率耦合器或双工器等。特别适合于中、小功率工作。

2. 改进和基本理论

任意功率分配器的一般模式如图1所示。

“开关”由输入、输出的 H 面折迭式合拢 $T(T_1, T_2)$ 、两个弯钮、PIN 管控制的相差网络(3dB 电桥、两个并联式 PIN 管开关 D_1, D_2 和两个反射式波导腔)和 PIN 管激励源所构成,其完整电路和简化示意图见图 2(a)、(b)。与 W. L. Teeter 等人^[1]给出的功率分配器

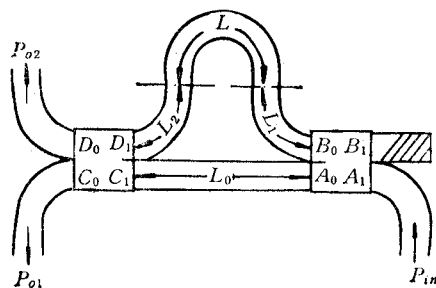


图1 任意功率分配器的分析模型

* 1984年3月21日收到,1984年11月14日修改定稿。

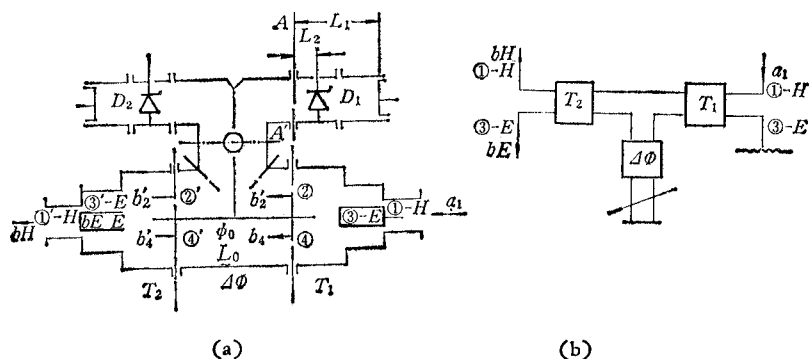


图2 “开关”的完整电路和简化示意图

相比，其改进和不同之处在于使用了相差网络。但基本原理都是调整相臂长度来改变两通道间的相差，从而实现输出端口 ①'-H, ③'-E 的任意功率分配比。

在解决微波工程技术问题时，为了避开复杂的边值问题，常采用等效网络法来分析，使问题得到简化。故用网络的散射系数 [s] 来描述各端口上进波 [a] 与出波 [b] 间的关系：

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

图2可分成三个区域：

(1) 输入网络 T_1 考虑到电路的实际情况，端口的反射系数 $\Gamma_2 \approx \Gamma_4 \approx 0$ ，且 $a_2 = \frac{a_1}{\sqrt{2}} \Gamma_2$ ， $a_4 = \frac{a_1}{\sqrt{2}} \Gamma_4$ 。由(1)式，经整理得：

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ a_1 \\ 0 \\ a_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由上式可见 $b_1 = b_3 = 0$ ； $b_2 = b_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} a_1$ ，进波 a_1 从端口 ①-H 进入，端口 ②、④ 的出波是既等分又同相。这时 b_2, b_4 分别进入“ $\Delta\Phi$ ”。

(2) 相差网络 $\Delta\Phi$ 不同的功率分配比是经过相差网络的相位处理，即调节相臂长度得到的。不同状态下的转换是通过 D_1, D_2 的通、断来实现的。

由(1)式和电路特性，可得出“ $\Delta\Phi$ ”的相差通道的 [a'] 和 [b'] 的关系式：

$$\begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \\ b'_3 \\ b'_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & j \\ 1 & 0 & j & 0 \\ 0 & j & 0 & 1 \\ j & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_1 \\ a'_2 \\ a'_3 \\ a'_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

当 D_1, D_2 工作于正偏、反偏(或零偏)时,波导开关为断、通态,分别在距离参考面 A A' 为 L_1, L_2 处,形成等效短路面,产生全反射(理想情况),使出波和进波间的相差为 $2\beta L$ (L_1 或 L_2),如再忽略 PIN 管的相移 φ ,则有: $a'_2 = -e^{-j2\beta L} b'_2$; $a'_4 = -e^{-j2\beta L} b'_4$. 因 $b'_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} a'_1$, $b'_4 = j \frac{1}{\sqrt{2}} a'_1$, a'_3 为负载端的反射波,其 $\Gamma_3 \approx 0$, 故 $a'_3 = \Gamma_3 b'_3 = 0$.

将上述各式代入(3)式,同时注意“ $\Delta\Phi$ ”的基准通道 $-\phi_0$ 的进波和出波间的关系,经整理可得出:

$$\begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \\ b'_3 \\ b'_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ a_1 e^{-j(2\beta L + \frac{\pi}{2})} \\ 0 \\ a_1 e^{-j(\phi_0 + \frac{\pi}{2})} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda_g} L_0$, L_0 为基准通道的波导长度.

由(1)、(2)、(4)式可得出输出网络 T_2 的进波和出波的关系式:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ a_1 e^{-j(2\beta L + \frac{\pi}{2})} \\ 0 \\ a_1 e^{-j(\phi_0 + \frac{\pi}{2})} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a_1 e^{-j(2\beta L + \frac{\pi}{2})} + a_1 e^{-j(\phi_0 + \frac{\pi}{2})} \\ 0 \\ a_1 e^{-j(2\beta L + \frac{\pi}{2})} - a_1 e^{-j(\phi_0 + \frac{\pi}{2})} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5) \end{aligned}$$

应用欧拉公式、三角函数等,经整理得出“开关”输出端口 ①'-H、③'-E 的出波关系式:

$$b_H = \frac{a_1}{\sqrt{2}} [1 + \cos(2\beta L - \phi_0)]^{\frac{1}{2}} e^{-j(2\beta L + \frac{\pi}{2})} e^{-j(\phi_0 + \frac{\pi}{2})}, \quad (6)$$

$$b_E = \frac{a_1}{\sqrt{2}} [1 - \cos(2\beta L - \phi_0)]^{\frac{1}{2}} e^{-j(2\beta L + \frac{\pi}{2})} e^{-j(\phi_0 + \frac{\pi}{2})}. \quad (7)$$

这样,控制 $L(L_1, L_2)$ 的大小和 L_1, L_2 的快速转换,便可实现 ①'-H, ③'-E 端口的任意分配比和转换;或作为多工器时,①-H, ③-E 端口同时进波,①'-H 或 ③'-E 端口则全部功率(理想情况)或按所需功率分配比输出.

3. 任意功率分配比的数学模型和曲线

(1) 理想情况 由(6)、(7)式,可得输出端口 ①'-H、③'-E 的功率为:

$$P_H = \frac{1}{2} |b_H|^2 = \frac{a_1^2}{4} [1 + \cos(2\beta L - \phi_0)], \quad (8)$$

$$P_E = \frac{1}{2} |b_E|^2 = \frac{a_1^2}{4} [1 - \cos(2\beta L - \phi_0)], \quad (9)$$

$$\textcircled{1}-H \text{ 端口输入功率 } P_{\textcircled{1}} = \frac{1}{2} |a_1|^2. \quad (10)$$

故“开关”的输出端口 $\textcircled{1}'-H$ 、 $\textcircled{3}'-E$ 的任意功率分配比的数学模型:

$$P_H/P_{\textcircled{1}} = \frac{1}{2} [1 + \cos(2\beta L - \phi_0)] = m, \quad 0 \leq m \leq 1; \quad (11)$$

$$P_E/P_{\textcircled{1}} = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\beta L - \phi_0)] = n, \quad 0 \leq n \leq 1. \quad (12)$$

由此,根据(11)、(12)式,令 $n = 1$; D_1 、 D_2 处于通或断;调节 L_1 或 L_2 , 使 $\cos(2\beta L - \phi_0) = -1$. 这时(11)式 $m = 0$, 则全部功率馈给 $\textcircled{3}'-E$ 端口. 以此类推, 令 $m = 1$, 而 $n = 0$, 则全部功率馈给 $\textcircled{1}'-H$ 端口; n 、 m 为任一比值, 如 $n = \frac{1}{5}$, $m = \frac{4}{5}$, 则 $\frac{1}{5}$ 的功率馈给 $\textcircled{3}'-E$ 端口, $\frac{4}{5}$ 的功率馈给 $\textcircled{1}'-H$ 端口; 等等.

计算得的 $m-L$ 、 $n-L$ 关系曲线如图 3 示.

(2) 实际工作情况 (考虑端口失配系数的影响) 实际上, 各端口工作不是处于理想匹配状态, 需考虑失配系数及其插入损耗的影响. 故 $0 < n, m < 1$, 且 $n + m \cong 1$ (在同一状态). 这样, (11)、(12) 式经修正后变为:

$$m = \frac{1}{2} \frac{1 - |\Gamma_{\textcircled{1}'-H}|^2}{1 - |\Gamma_{\textcircled{1}-H}|^2} [1 + \cos(2\beta L - \phi_0)], \quad 0 < m < 1; \quad (13)$$

$$n = \frac{1}{2} \frac{1 - |\Gamma_{\textcircled{3}'-E}|^2}{1 - |\Gamma_{\textcircled{1}-H}|^2} [1 - \cos(2\beta L - \phi_0)], \quad 0 < n < 1. \quad (14)$$

由此可见, 当 $\Gamma_{\textcircled{1}-H} \cong 0$, $\Gamma_{\textcircled{1}'-H}$, $\Gamma_{\textcircled{3}'-E} \cong 0$ 时, 则(13)、(14)式变为(11)、(12)式. 故(11)、(12)式为(13)、(14)式的特例. 因此, 对“开关”各端口的匹配性能提出要求是很必要的.

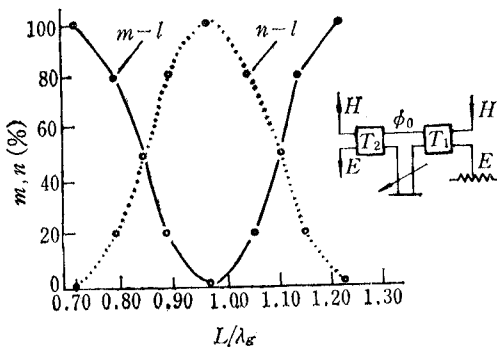


图 3 m, n 随 L/λ_g 的变化关系
 $\phi_0 = 2.88$

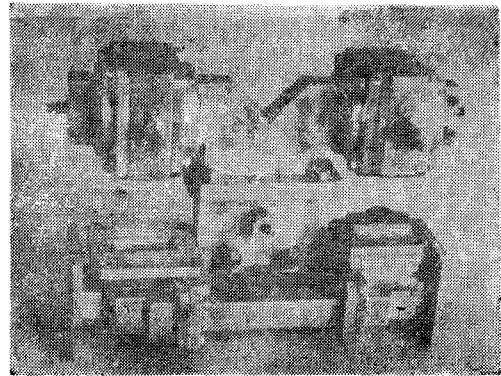


图 4 任意功率分配比的微波开关

4. 实验结果

做出的“开关”的结构图见图 4.

(1) PIN 管的开关性能 “开关”的性能主要决定于 PIN 管开关的低损耗 (α_L)、高隔离 (α_H) 的性能. 用通式表示 α_L , α_H 有:

$$\alpha = 10 \log \left[\left(1 + \frac{Z_0 G}{2} \right)^2 + \left(\frac{Z_0 B}{2} \right)^2 \right] \text{ (dB)}, \quad (15)$$

式中 Z_0 是波导的特性阻抗； G, B 是 PIN 管的导纳 Y 的电导和电纳部分，其值在正、反偏（或零偏）时相差很大。对应的理论曲线和实验曲线如图 5 所示。由图可见，理论值和实验值很相近。由于 PIN 管的正向电阻 R_f 的理论值与工作时的值有差别，致使 α_H 测试值偏小些。

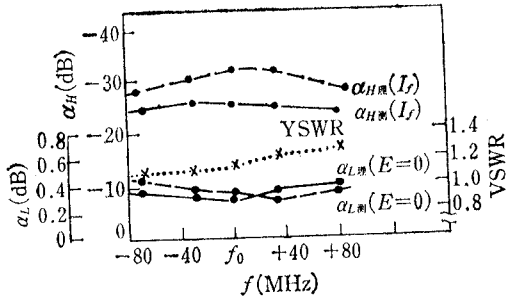


图 5 PIN 管的开关性能

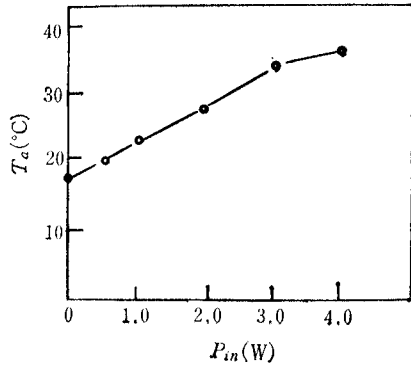


图 6 PIN 管壳温升的测量曲线

(2) VSWR 的频率特性 PIN 管波导式开关在零偏时的 VSWR 示于图 5。“开关”的 VSWR- f 的测量值如表 1 所示。

表 1

VSWR 测量值 工作状态	A 态——“断”			B 态——“通”		
	VSWR _{⊕-H}	VSWR _{⊗'-E}	VSWR _{⊕'-H}	VSWR _{⊕-H}	VSWR _{⊗'-E}	VSWR _{⊕'-H}
工作频率 (MHz)						
$f_0 - 45$	1.111	1.097	1.336	1.187	1.147	1.231
f_0	1.170	1.105	1.336	1.150	1.147	1.302
$f_0 + 45$	1.125	1.156	1.336	1.066	1.163	1.336

(3) 分配比 n, m 的频率特性 用作波束转换开关时的测量值示于表 2。

表 2

n, m 测量值 工作状态	A 态——“断”		B 态——“通”	
	n	m	n	m
工作频率 (MHz)				
$f_0 - 45$	0.19	0.73	0.92	≤ 0.001
f_0	0.185	0.74	0.91	≤ 0.001
$f_0 + 45$	0.18	0.75	0.93	≤ 0.001

(4) 允许的工作功率和温升 “开关”的功率控制能力主要决定于管子的射频功率耗散（主要表现为温升）、反向击穿电压等。在试验中曾出现管子因结面温升过高而被烧

毁。不论在通或断的状态, D_1 、 D_2 都要承受大于 3kW 的脉冲功率。管壳温升 T_a 与输入功率 P_{in} 关系的测量曲线示于图 6。曲线是每次加功率 15min, 用半导体点温计测量管子的 N 端温度获得的。VK-7、WP30 管的最大结面温度 $T_{amax} \geq 150^\circ\text{C}$ 。

5. 结束语

“开关”经过实验室连试、模拟高空低气压试验、地面通电试验和某种机载雷达试飞 8 架次都达到设计要求。

这项工作得到史兆林工程师等协助, 全文得到邵文昌副研究员的审阅。在此谨表示谢意。

参 考 文 献

- [1] W. L. Teeter and K. R. Bushore, *IRE Trans. On MTT*, **MTT-5** (1957), 227.
- [2] 吴培亨, 微波电路, 科学出版社, (1980), 40.
- [3] 上海无线电 17、26 厂译, 微波半导体器件及其应用, 上海人民出版社, (1975), 293.
- [4] R. V. Garver, *IRE Trans. on MTT*, **MTT-9** (1951), 224.
- [5] R. E. Fisher, *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-13** (1955), 706.

A MICROWAVE SWITCH WITH OPTIONAL POWER DIVISION RATIO

Zheng Dunxiang

(Beijing Aircraft Maintenance Engineering Development Corporation)

In this paper, a microwave switch with optional power division ratio, which uses PIN diode for controlling, is introduced. Analytic formulas are given. They are straightforward and feasible for engineering purposes. The theoretical analysis is in good agreement with the experimental result.