

五臂混合环的分析改进和具有三种分配比的功率分配器的设计*

赵连贵

提 要

本文用等效电路法对五臂混合环进行了分析,并得出两种改进方案.改进后的方案,既能使中心臂同环完全匹配,同第二对侧臂理想隔离,也能使第一对侧臂同环完全匹配,并彼此理想隔离.本文还提出用五臂混合环设计具有三种分配比的功率分配器的方法,给出了分析和计算公式.理论分析和实验结果基本一致.

一、引 言

普通五臂环只有中心臂与环匹配,中心臂与第二对侧臂相互隔离,而第一对侧臂之间不完全隔离,且与环不完全匹配.

在采用文献[1]中的高隔离度复合环做单脉冲天线的和差器时,就不仅要求中心臂同环匹配,同第二对侧臂相互隔离,而且要求第一对侧臂之间有很好的隔离度,并与环完全匹配,否则就会造成不良影响.

五臂环属于 $(2n + 1)$ 端对网络,如果要求有相互隔离的端对,用散射矩阵可以证明,不可能每一端都对与环匹配.为了改善这种环的性能,Budenbom^[2]曾提出两种改进方法,但结构复杂,使用困难.

本文把各臂之间环的特性导纳和第二对侧臂的特性导纳作为未知量,依匹配和隔离条件建立相应的方程组,并求其解,得出两种改进方案,从而解决了第一对侧臂与环完全匹配和这两个侧臂之间彼此理想隔离的问题.

早期的三路功率分配器输出端之间的隔离度很差^[3].后来的 N 路功率分配器在性能方面虽有较大的改善,但结构比较复杂,在某些情况下实现比较困难,并且不是对任何形式传输线都适用.本文提出的具有三种分配比的功率分配器结构简单,易于实现,而且对任何形式的传输线都适用;各输出端之间也可获得较好或适当的隔

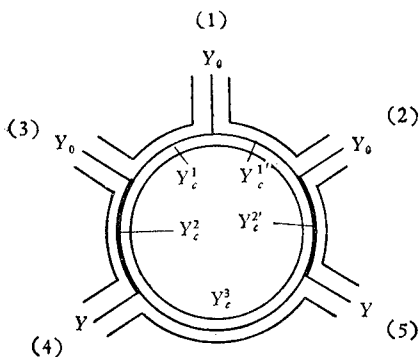


图1 五臂环的一般形式

单,易于实现,而且对任何形式的传输线都适用;各输出端之间也可获得较好或适当的隔

* 1979年8月28日收到.

离度。同时,一个这样的功率分配器,随着输入端的不同,可以有三种不同的功率分配关系,相当于三个功率分配器,这在天线馈电系统和其它一些场合中都是很有用的。

二、分析和改进^[4]

如果把环分为六等分,并组成五段,环的各段传输线和各臂传输线的特性导纳如图 1 所示。假定各输出端均同负载匹配,且不考虑各连接点的连接效应,便可得如图 2 所示的等效电路。

运用节点电流法可以整理出下列方程组:

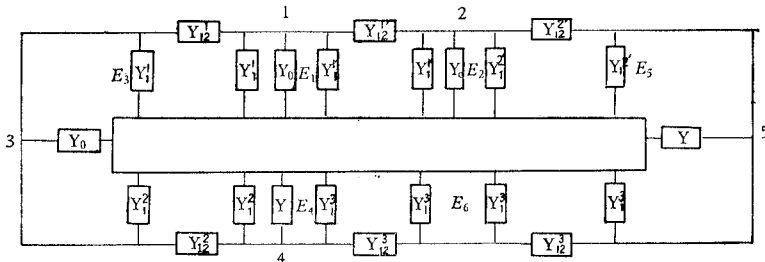


图 2 五臂环的等效电路

$$\begin{cases}
 I_1 = Y_{11}E_1 - Y_{12}'E_2 - Y_{12}^1E_3 \\
 I_2 = -Y_{12}'E_1 + Y_{22}E_2 & -Y_{12}^2E_5 \\
 I_3 = -Y_{12}^1E_1 & +Y_{33}E_3 - Y_{12}^2E_4 \\
 I_4 = & -Y_{12}^2E_3 + Y_{44}E_4 & -Y_{12}^3E_6 \\
 I_5 = & -Y_{12}^2E_2 & +Y_{55}E_5 - Y_{12}^3E_6 \\
 I_6 = & & -Y_{12}^3E_4 - Y_{12}^3E_5 + Y_{66}E_6
 \end{cases} \quad (1)$$

其中, I_k 为第 k 个节点的电流;

$$Y_{11} = Y_0 + Y_1^1 + Y_1^{1'} + Y_{12}^1 + Y_{12}^{1'}, \quad Y_{22} = Y_0 + Y_1^{1'} + Y_1^{2'} + Y_{12}^1 + Y_{12}^{2'}$$

$$Y_{33} = Y_0 + Y_1^1 + Y_1^{2'} + Y_{12}^1 + Y_{12}^{2'}, \quad Y_{44} = Y + Y_1^2 + Y_1^{3'} + Y_{12}^2 + Y_{12}^{3'}$$

$$Y_{55} = Y + Y_1^{2'} + Y_1^{3'} + Y_{12}^2 + Y_{12}^{3'}, \quad Y_{66} = 2Y_1^3 + 2Y_{12}^{3'}$$

而

$$Y_1^i = jY_c^i \tan(\theta/2), \quad Y_{12}^i = -jY_c^i / \sin\theta;$$

$\theta = (2\pi/\lambda_g)L$, λ_g 为传输线中波长; L 为传输线长度。

求解(1)式得第 n 个节点的电压为:

$$E_n = \left(\sum_{k=1}^6 \Delta_{kn} I_k \right) / \Delta \quad (2)$$

其中, Δ 为方程组的行列式, Δ_{kn} 为第 k 行第 n 列元素的代数余子式。

如果令 $Y_c^1 = Y_1^1$, $Y_c^2 = Y_1^2$, 根据(1)式及有关参数的定义可以求出:

1. 中心臂的输入导纳

$$Y_{in} = Y_{11} - \frac{\Delta_{12} + \Delta_{13}}{\Delta_{11}} Y_{12}^1 - Y_0$$

$$= Y_{11} - 2(Y_{12}^1)^2 \frac{Y_{55}Y_{66} - 2(Y_{12}^3)^2}{Y_{22}Y_{55}Y_{66} - 2Y_{22}(Y_{12}^3)^2 - Y_{66}(Y_{12}^2)^2} - Y_0 \quad (3)$$

由此可求得中心臂同环匹配的条件为:

$$Y_c^1 = Y_0 / \sqrt{2} \quad (4)$$

2. 中心臂与第二对侧臂的隔离度

$$C_4^1 = C_5^1 = 20 \log \left| \frac{[Y_{55}Y_{66} - 2(Y_{12}^3)^2][Y_{11}Y_{22} - 2(Y_{12}^1)^2] - Y_{11}Y_{66}(Y_{12}^2)^2}{-2Y_{12}^1Y_{12}^2Y_{66}} \right| \text{ (dB)} \quad (5)$$

从(5)式可以看出,只要对称地选取各段传输线的特性导纳,则在中心频率上,中心臂与第二对侧臂之间就永远相互隔离,而与电路参数无关.

3. 第一对侧臂向环看去的输入导纳

$$Y_{in}^2 = Y_{in}^3 = Y_{22} - Y_0 - (\Delta_{21}Y_{12}^1 + \Delta_{25}Y_{12}^2) / \Delta_{22} = Y_{22} - Y_0 - l/m \quad (6)$$

其中,

$$l = [2(Y_{12}^3)^2 - Y_{55}Y_{66}][Y_{12}^1)^2Y_{33}Y_{44} - 2(Y_{12}^1)^2(Y_{12}^2)^2 + Y_{11}Y_{33}(Y_{12}^2)^2] + Y_{11}Y_{66}(Y_{12}^1)^4 - Y_{11}Y_{33}(Y_{12}^2)^2(Y_{12}^3)^2,$$

$$m = [Y_{44}Y_{66} - 2(Y_{12}^3)^2][Y_{11}Y_{33}Y_{55} - Y_{44}(Y_{12}^1)^2 - Y_{11}(Y_{12}^2)^2 - Y_{11}(Y_{12}^2)^2(Y_{12}^3)^2]$$

4. 第一对侧臂之间的隔离度

$$C_3^2 = 20 \log (p/q) \quad (7)$$

其中,

$$p = [Y_{33}Y_{44} - (Y_{12}^2)^2][Y_{11}Y_{22} - 2(Y_{12}^1)^2][Y_{55}Y_{66} - 2(Y_{12}^3)^2] - Y_{11}Y_{66}(Y_{12}^2)^2$$

$$q = -2[2(Y_{12}^1)^2(Y_{12}^2)^2Y_{55} - Y_{11}(Y_{12}^2)^2(Y_{12}^3)^2 - (Y_{12}^1)^2Y_{44}Y_{55}Y_{66}]$$

根据以上各式,可导出两种改进方案,它们都能使中心臂和第一对侧臂都与环匹配,中心臂与第二对侧臂隔离;同时,第一对侧臂之间也相互隔离.这两种改进方案为:

- (1) $Y = Y_c^2 = Y_0, Y_c^1 = Y_0 / \sqrt{2}$
- (2) $Y = Y_0 / 2, Y_c^1 = Y_c^2 = Y_0 / \sqrt{2}$

普通环和两种改进方案的各特性导纳的选择如图 3 所示.

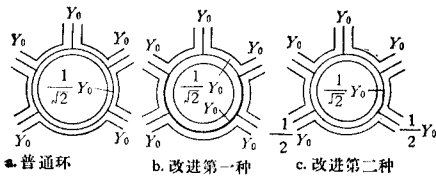


图 3 五臂环的三种方案

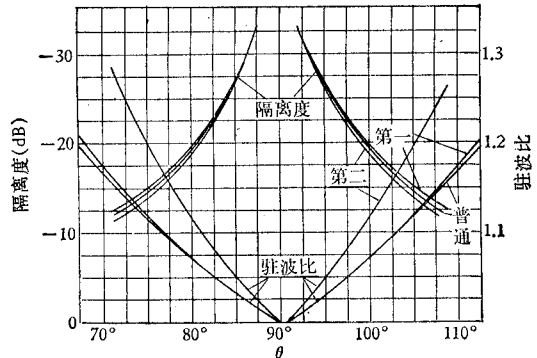


图 4 中心臂输入驻波比及其与第二对侧臂的隔离度

把等效电路的具体参数代入(3)、(5)、(6)和(7)式最终就可算得隔离度和驻波比的频率特性, 分别示于图 4—6. 计算结果表明: 改进方案可以使第一对侧臂之间的隔离度在 $\pm 15\%$ 的带宽上得到提高; 可以使第一对侧臂的输入电压驻波比在 5% 的带宽内得到改善, 而中心臂与第二对侧臂的隔离度基本保持不变. 在后面的实验结果中还会看到, 第二对侧臂的输入电压驻波比的频率特性也变化不大.

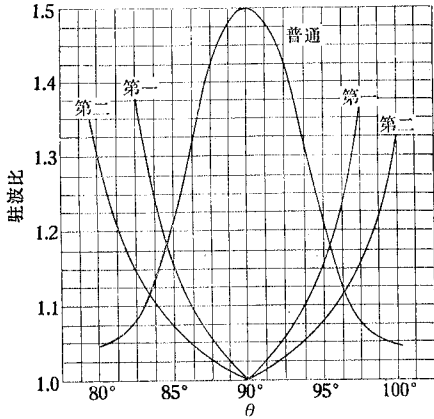


图 5 第一对侧臂的输入电压驻波比

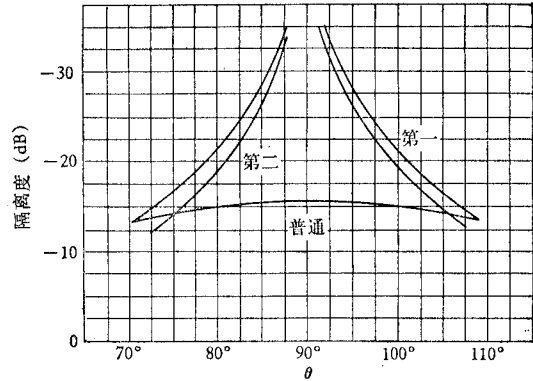


图 6 第一对侧臂之间的隔离度

最后顺便指出, 第二对侧臂之间环的特性导纳不影响中心频率上各有关臂的输入驻波比和它们之间的隔离度, 但影响这些参数的带宽.

三、具有三种分配比的功率分配器的设计

四臂环可以设计成具有任意分配比的两路功率分配器^[5]. 运用上节的分析方法则可以得出具有三种分配比的五臂环功率分配器的设计. 这种五臂环既作为一个两路功率分配器, 也可作为两种具有不同分配比的三路功率分配器. 为此, 令图 1 中的 $Y_c' = Y_c^1$, $Y_c'' = Y_c^2$, 如图 7 所示. 将这一假定代入(1)式, 最终可以求得功率分配器的各个参数.

当信号由中心臂输入时, 其输入导纳为:

$$Y_{in}^1 = Y_{11} - (\Delta_{12}/\Delta_{11})Y_{12} - (\Delta_{13}/\Delta_{11})Y_{12} - Y_0 \quad (8)$$

其中,

$$\begin{aligned} \Delta_{11} &= Y_{22}Y_{33}Y_{44}Y_{55}Y_{66} + Y_{66}(Y_{12}^1)^2(Y_{12}^2)^2 - Y_{66}Y_{22}[Y_{55}(Y_{12}^2)^2 + Y_{44}(Y_{12}^1)^2] \\ &\quad - Y_{22}Y_{33}(Y_{12}^3)^2(Y_{44} + Y_{55}) + Y_{22}(Y_{12}^2)^2[(Y_{12}^1)^2 + (Y_{12}^2)^2] \\ \Delta_{12} &= Y_{55}Y_{66}Y_{12}^1[Y_{33}Y_{44} - (Y_{12}^2)^2] - (Y_{12}^2)(Y_{12}^3)^2[2Y_{33}Y_{55} - (Y_{12}^2)^2 - (Y_{12}^1)^2] \\ \Delta_{13} &= Y_{44}Y_{66}Y_{12}^1[Y_{22}Y_{55} - (Y_{12}^1)^2] - (Y_{12}^1)(Y_{12}^3)^2[2Y_{22}Y_{55} - (Y_{12}^1)^2 \\ &\quad - (Y_{12}^2)^2 - (Y_{12}^2)^2] \end{aligned}$$

第一对侧臂之间的功率分配比为:

$$\frac{P_2^1}{P_3^1} = \frac{\{Y_{55}Y_{66}Y_{12}^1[Y_{33}Y_{44} - (Y_{12}^2)^2] - (Y_{12}^3)^2(Y_{12}^2)[2Y_{33}Y_{55} - (Y_{12}^1)^2 - (Y_{12}^2)^2]\}^2}{\{Y_{44}Y_{66}Y_{12}^1[Y_{22}Y_{55} - (Y_{12}^1)^2] - (Y_{12}^2)^2(Y_{12}^1)[2Y_{22}Y_{55} - (Y_{12}^1)^2 - (Y_{12}^2)^2]\}^2} \quad (9)$$

当信号从②号臂输入时, ①、④、⑤号臂有输出, 如果假定③号臂与②号臂是隔离的.

便可得②号臂的输入导纳为:

$$Y_{in}^2 = Y_{22} - [(Y_{12}^2)^2/Y_{11}] - [(Y_{12}^2)^2(Y_{11} - Y_{44})/Y_{11}Y_{55}] - Y_0 \quad (10)$$

①与④、④与⑤号臂的功率分配比分别为:

$$\frac{P_1^2}{P_4^2} = \frac{2\{Y_{55}Y_{66}Y_{12}^2[(Y_{12}^2)^2 - Y_{33}Y_{44}] + [Y_{33}(Y_{44} + Y_{55}) - (Y_{12}^1)^2 - (Y_{12}^2)^2]Y_{12}^2(Y_{12}^3)^2\}}{\{Y_{55}Y_{66}Y_{12}^1(Y_{12}^2)^2 + Y_{12}^1(Y_{12}^3)^2[Y_{11}Y_{33} - (Y_{12}^1)^2 - (Y_{12}^2)^2]\}^2} \quad (11)$$

$$\frac{P_4^2}{P_5^2} = \frac{\{Y_{55}Y_{66}Y_{12}^1(Y_{12}^2)^2 + Y_{12}^1(Y_{12}^3)^2[Y_{11}Y_{33} - (Y_{12}^1)^2 - (Y_{12}^2)^2]\}^2}{\{Y_{11}Y_{66}Y_{12}^1[Y_{33}Y_{44} - (Y_{12}^2)^2] - Y_{44}Y_{66}(Y_{12}^2)^3 + Y_{12}^1(Y_{12}^3)^2[(Y_{12}^1)^2 + (Y_{12}^2)^2 - Y_{11}Y_{33}]\}^2} \quad (12)$$

把 $\theta = \pi/2$ 代入式 (9) — (11) 可得中心频率时的分配比:

$$\left. \begin{aligned} P_2^1/P_3^1 &= (Y_c^2)^2/(Y_c^1)^2 = k \\ P_1^2/P_4^2 &= 2(Y_c^2)^2/(Y_c^1)^2 = 2k \\ P_4^2/P_5^2 &= 1:1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

即:

$$P_1^2:P_4^2:P_5^2 = 2k:1:1 \quad (14)$$

当信号从③号臂输入时,信号仍从①、④、⑤号臂输出,类似地可推得③号臂的输入导纳为:

$$Y_{in}^3 = Y_{33} - [(Y_{12}^1)^2/Y_{11}] - [(Y_{12}^2)^2(Y_{11} - Y_{55})/Y_{11}Y_{44}] - Y_0 \quad (15)$$

功率分配比为:

$$P_1^3:P_4^3:P_5^3 = 2:k:k \quad (16)$$

可以证明上述三个输入臂在中心频率与环匹配的条件均为:

$$(Y_c^1)^2 + (Y_c^2)^2 = (Y_0)^2 \quad (17)$$

同样可以推得:

$$C_4^1 = 20 \log \left| \frac{S}{Y_{22}Y_{55}Y_{66}Y_{12}^1Y_{12}^2 - Y_{66}(Y_{12}^2)^3Y_{12}^1} \right| \text{ (dB)} \quad (18)$$

$$C_5^1 = 20 \log \left| \frac{S}{Y_{33}Y_{44}Y_{66}Y_{12}^1Y_{12}^2 - Y_{66}(Y_{12}^2)^3Y_{12}^1} \right| \text{ (dB)} \quad (19)$$

$$C_3^2 = 20 \log \left| \frac{S}{Y_{44}Y_{55}Y_{66}Y_{12}^1Y_{12}^2 - Y_{12}^1Y_{12}^2(Y_{12}^3)^2[Y_{44} + Y_{55} - Y_{11}]} \right| \text{ (dB)} \quad (20)$$

其中,

$$\begin{aligned} S &= Y_{22}Y_{44}Y_{55}Y_{66}[Y_{11}Y_{33} - (Y_{12}^1)^2 - (Y_{12}^2)^2] + Y_{11}Y_{66}[(Y_{12}^1)^2(Y_{12}^2)^2 \\ &\quad - Y_{33}Y_{44}(Y_{12}^2)^2 - Y_{33}Y_{55}(Y_{12}^2)^2] + Y_{66}[Y_{44}(Y_{12}^1)^4 + Y_{55}(Y_{12}^2)^4] \\ &\quad + (Y_{12}^2)^2\{[(Y_{12}^1)^2 + (Y_{12}^2)^2][2Y_{22}Y_{55} + Y_{11}Y_{22} - (Y_{12}^1)^2 \\ &\quad - (Y_{12}^2)^2] - Y_{11}Y_{22}Y_{33}(Y_{44} + Y_{55})\} \end{aligned}$$

显然,第一对侧臂之间彼此隔离的条件为:

$$Y_{44} + Y_{55} = Y_{11} \quad (21)$$

把全部特性导纳都对 Y_0 归一化,就可求出环各段传输线的特性导纳与功率分配比 k 的关系:

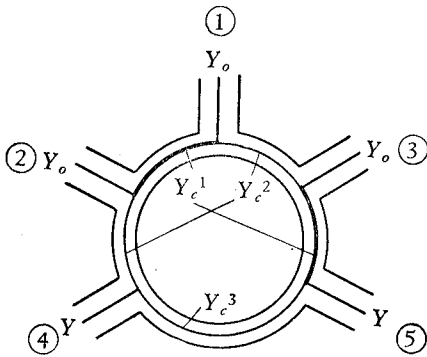


图7 具有三种分配比的功率分配器

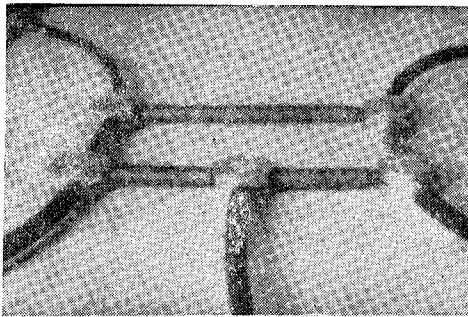
$$Y_c^1 = (1 + k)^{-1/2} \tag{22}$$

$$Y_c^2 = [k/(1 + k)]^{-1/2} \tag{23}$$

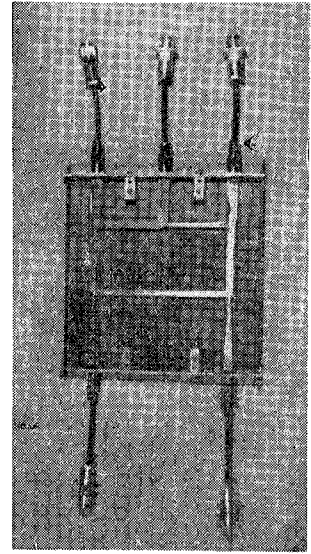
这样,根据以上各式,就可以按需要设计随输入端不同而具有三种分配比的两路和三路功率分配器了。

四、实验结果

为了验证分析结果,用同轴电缆加工了中心频率为 500 MHz 的普通环和第一种改进环实验样件,用带状线加工了中



(a)



(b)

图8 五臂环样件

(a) 第一种改进方案 (b) 具有三种分配比的功率分配器

心频率为 1000 MHz, 具有三种功率分配比 2:1、1:1:1、4:1:1 的五臂环样件(图 10)。为了能看清阻抗变化情况,后者是拿去上盖板拍摄的。

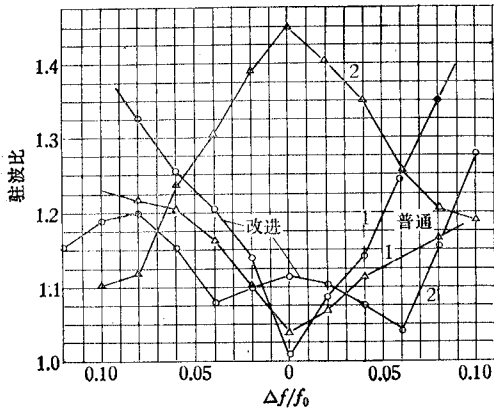


图9 输入驻波比的频率特性

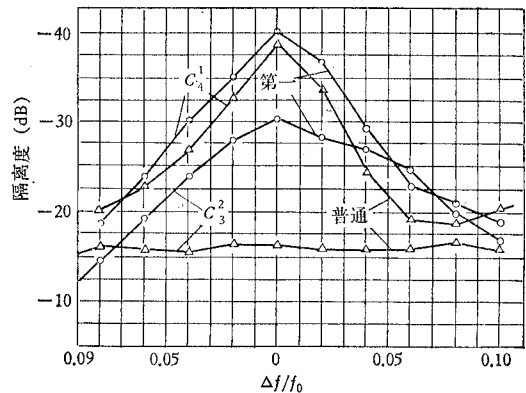


图10 隔离度的频率特性

图 9、10 是普通环和第一种改进环有关臂输入电压驻波比和有关臂之间隔离度的频率特性实测结果。从图中可以看出,改进环第一对侧臂的输入驻波比和它们之间的隔离度较普通环均有明显改善。表 1 的数据则表明第二对侧臂的输入驻波比和彼此的隔离度变化不大。图 11、12 为带状线五臂环功率分配器的有关实验结果。三种功率分配比在

± 100 MHz 以内与中心频率上的理论值相差均小于 1 dB。三个臂的输入驻波比均小于 1.3。中心臂与第二对侧臂之间的隔离度在此带宽内高于 20 dB。第一对侧臂之间的隔离度虽然较差,但也高于 15 dB。以上实验结果与理论预期数据基本相符。

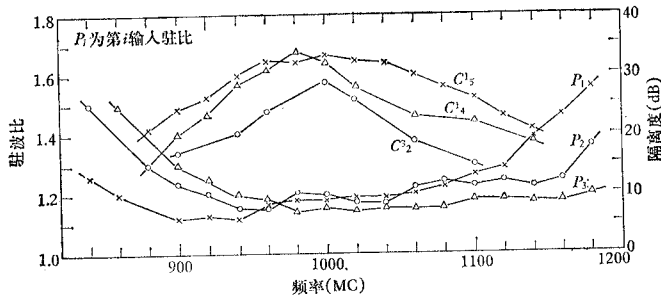


图 11 带状线五臂环功率分配器驻波比和隔离度的频率特性

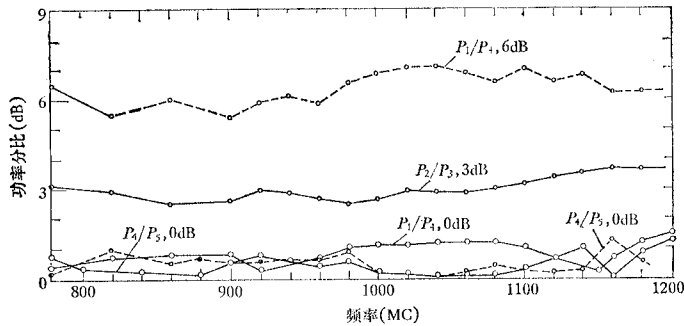


图 12 带状线五臂环功率分配器分配比的频率特性

表 1 第二对侧臂的输入 波比和隔离度

普通环	$f(\text{MHz})$	420	440	460	480	500	520
	ρ	1.91	2.01	1.94	1.78	1.93	2.22
	$C_2^2(\text{dB})$	-10.1	-9.5	-9.9	-11.0	-10.0	-8.4
第一种改进环	$f(\text{MHz})$	430	450	470	490	510	
	ρ	1.79	1.82	1.67	1.66	1.81	
	$C_2^2(\text{dB})$	-10.9	-10.7	-12.0	-12.0	-10.8	

五、结 束 语

理论和实验都证明普通五臂环按本文提出的方法改进后,可以提高第一对侧臂的隔离度和它们与环的匹配状况,也证明了设计具有三种分配比的两路、三路五臂环功率分配器的可实现性。这在天线馈电系统、实验室中需要由一个本振源同时向三个混频器提供本振信号时,可以有效减少元件、器件的数目,特别在空间、体积、重量都受限制的情况下,就更有实际意义。

五臂环是平面结构,它较易于适用任何传输线形式,并有容易设计和实现的特点。

本文的部分实验结果由赵汝雄同志提供。全文曾由李桂生同志审阅过。特此向他们表示深切的感谢。

参 考 文 献

- [1] H. T. Budenbom, IRE Nat. Conv. Rec., Pt. I (1957), 186.
- [2] H. T. Budenbom, U. S. Paten, No. 3010082.
- [3] 林为干, 微波网络, 国防工业出版社, (1978), 第 452 页.
- [4] J. W. Sutherland, Electronic Engineering, 28 (1956), 464.
- [5] Chuck, Y. Pon, IRE Trans. on MTT, MTT-9(1961), 571.

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF THE FIVE-ARM RING AND DESIGN OF A FIVE-ARM RING POWER DIVIDER HAVING THREE DIFFERENT POWER RATIO'S

Zhao Lian-gui

Analysis by the use of equivalent circuit method is made for the five-arm ring, and two ways to improve it are found. The improved method can make the center arm entirely match the ring and isolated ideally from the second pair of side arms, and can make the first pair of side arms perfectly match the ring and both arms ideally isolated from each other. A method of design a five-arm ring power divider having three different power ratios is proposed. Analysis and calculation formulas are given. Theoretical results and experimental findings agree quite closely.