

重入式双路旋转交连的研究

殷连生

(南京电子技术研究所, 南京 210013)

摘要 本文介绍一种新颖的双路旋转交连, 一路设计在S波段, 另一路设计在P波段。S波段交连的电压驻波比为: 在1.2~4.4GHz频带内小于1.2, P波段交连采用重入式谐振腔结构, 以使交连长度缩短。两路交连的总长度接近 $\lambda/4$, 满足了特定的小尺寸要求。

关键词 重入式旋转交连; 双路旋转交连; 重入式谐振腔

1. 引言

旋转交连能保持连续旋转的天线的射频信号连续不断。当需要多路信号旋转通过时, 各路交连可以同心地堆积而成, 也可以把一路交连套在另一路交连的外边。前者的总长度是各路交连的和, 后者的总长度约为最低波段交连的长度。本文所述的交连采用TEM波工作模式, 由于实际工作条件的限制, 既要求两路交连的总长度不超过最短工作波长的一半, 又要求两路交连的最大直径小于10cm。这迫使我们寻求新的设计方法。

2. 设计考虑

交连旋转部分的连接基本上有两种形式, 一种是接触式, 另一种是非接触式。前者用弹簧刷完成电接触, 要求加工精度高, 而且容易磨损, 影响交连的性能和寿命。后者用金属间隙之间形成的电容实现电耦合, 对加工精度要求较低, 稍许有点偏心, 对电性能和旋转影响也不大, 所以一般多采用非接触式。为了确保S波段交连的宽频带性能, 电容间隙采用 $\lambda/4$ 扼流耦合器结构。为了缩短P波段交连的长度, 电容间隙采用一般的电容耦合。

鉴于交连本身采用同轴传输线结构, 为了防止高次模出现, 必须保证

$$(D + d) < 2\lambda_{\min}/\pi$$

式中 D 和 d 分别是同轴线外导体的内径和内导体的外径, $\lambda_{\min}$ 是最短工作波长。可见, 长波段交连的直径可取得大些, 所以让P波段交连套在S波段交连的外边。

P波段交连的工作波长较长, 对交连的总长度起主要作用。即使取消常规交连所用的 $\lambda/4$ 扼流部分, 选用最简化的半波长谐振腔结构形式, 仍不能满足交连长度的要求。图1是我们提出的一种新方案, 腔体采用重入式结构, 其轴向长度仅比 $\lambda/4$ 略长一点, 供P波段交连选用。

3. 重入式谐振腔交连的分析和设计

图1是旋转交连的一种新的结构形式, 如何进行设计, 有待于分析以后才能进行。

(1) 谐振腔激励装置的影响 由于半波长谐振腔输入、输出激励装置的影响, 实际谐振频率会升高, 但用场论精确求解这一影响的大小, 目前尚有困难, 故用网络理论与测量相结合的办法求解。用图 2 中的 C_x 代替这一影响, 通过测量最简单的模拟直腔的谐振频率 f_0 , 并解下列方程:

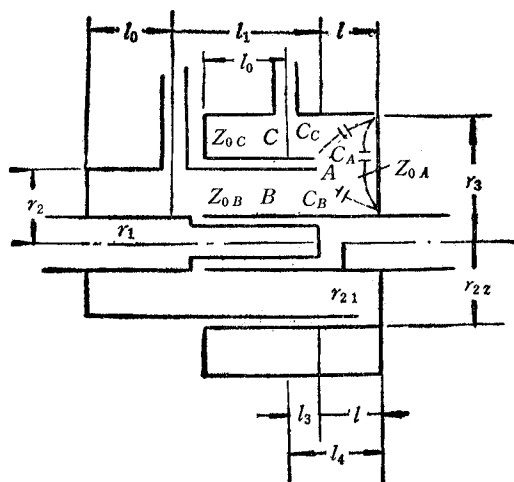


图 1 重入式谐振腔交连

导纳, Y_1 是谐振腔输入输出同轴线的特性导纳, v 是真空中光速, $v=3 \times 10^{10}$ cm/s。求得 C_x , 供计算重入式谐振腔交连谐振频率时使用, 若 C_x 为正表示容性, C_x 为负表示感性。

测量相结合的办法求解。用图 2 中的 C_x 代替这一影响, 通过测量最简单的模拟直腔的谐振频率 f_0 , 并解下列方程:

$$\operatorname{Im}[Y_{in}(l_0)] + \operatorname{Im}[Y_{in}(l_2 + l_0)] = 0 \quad (1)$$

式中,

$$Y_{in}(l_0) = Y_1 - jY_0 \cot(2\pi f_0 l_0 / v) + j2\pi f_0 C_x$$

$$Y_{in}(l_2 + l_0) = Y_0 [Y_{in}(l_0) + jY_0 \tan(2\pi f_0 l_2 / v)] / [Y_0 + jY_{in}(l_0) \tan(2\pi f_0 l_2 / v)]$$

Y_0 是构成腔体的同轴线本身的特性

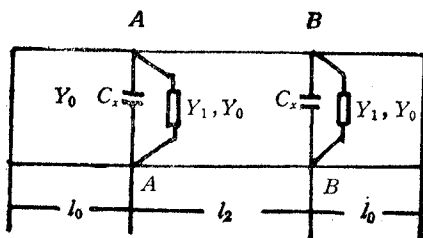


图 2 模拟直腔的双线等效电路

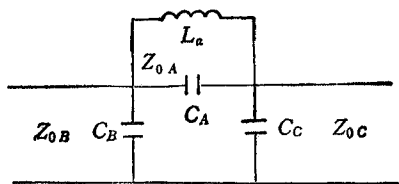


图 3 重入式交连的部分双线等效电路

(2) 耦合电容的影响 由于耦合电容 C_1, C_2 (图 5) 串接在双线等效电路中, 所以它们的影响使谐振频率升高, 且耦合电容越小, 频率升高越多, 其它性能也越差, 所以一般都把耦合电容设计得大些, 使其呈现的容抗在 1Ω 左右。

(3) 重入式谐振腔内的不连续电容和电感 在图 1 的结构中存在不连续电容 C_A, C_B 和 C_C , 以及附加的电感 L_a 。为了精确计算其谐振频率, 首先得计算出 C_A, C_B, C_C 和 L_a 。参阅文献 [1] 可得到重入式交连有关部分的双线等效电路(图 3), 当 B 和 C 之间的壁厚很薄时, 其不连续按下式计算。*

$$C_A / (2\pi r_3) \approx -2P\epsilon a^2 L_0(a/b, r_3/r_1) / [\pi^3 r_3 r_2 \ln(r_3/r_1) \ln(r_2/r_1)]$$

$$C_B / (2\pi r_3) \approx 2P\epsilon a^2 \ln(r_3/r_1) L_0(a/b, r_3/r_1) / [\pi^3 r_3 r_2 \ln(r_3/r_2) \ln^2(r_2/r_1)]$$

$$C_C / (2\pi r_3) \approx 2P\epsilon a^2 \ln(r_3/r_1) L_0(a/b, r_3/r_1) / [\pi^3 r_3 r_2 \ln(r_2/r_1) \ln^2(r_3/r_2)]$$

* 文献[1]中给出的公式有误。

式中, $L_0(a/b, r_3/r_1) = \sum_n \beta_{0n}, (n = 1, 2, \dots, N)$

$$\beta_{0n} = \pi^3 k_{Bn} r_2 Z_0(k_{Bn} r_2) / (K_{Bn}(k_{Bn} a)^2 \{ [k_{Bn} r_3 Z_1(k_{Bn} r_3)]^2 - [k_{Bn} r_1 Z_1(k_{Bn} r_1)]^2 \})$$

$$K_{Bn} = \sqrt{1 - (2\pi/(\lambda k_{Bn}))^2}, P = \coth(\pi l/a), Z_0(k_{Bn} r_2) = J_0(k_{Bn} r_2) + G_{Bn} N_0(k_{Bn} r_2)$$

$$Z_1(k_{Bn} r_1) = J_1(k_{Bn} r_1) + G_{Bn} N_1(k_{Bn} r_1), Z_1(k_{Bn} r_3) = J_1(k_{Bn} r_3) + G_{Bn} N_1(k_{Bn} r_3)$$

$$G_{Bn} = -J_0(k_{Bn} r_1) / [N_0(k_{Bn} r_1)], k_{Bn} = X_{0n}/r_1, \varepsilon = 0.0885 \text{ pF/m}, X_{0n} = \{ \pi^2 \pi^2 / (\alpha - 1)^2 - 1 / (\alpha + 1)^2 \}^{\frac{1}{2}}, \alpha_{0n} = r_3/r_1$$

J_0, J_1 分别是零阶和一阶贝塞尔函数, N_0, N_1 分别是零阶和一阶纽曼函数。由于 β_{0n} 收敛非常快, 取 $N \geq 10$ 即可满足精度要求。 L_a 是由末端短路的同轴线引起的, 当 $l < \lambda/4$ 时, 其输入电抗呈感性, 于是得到

$$L_a = [69\lambda/(\pi v)] \log(r_3/r_1) \tan(2\pi l/\lambda) \quad (2)$$

当 B 与 C 之间的壁有一定厚度时, 文献 [2] 给出的一种平行板线不连续结构及其等效电路

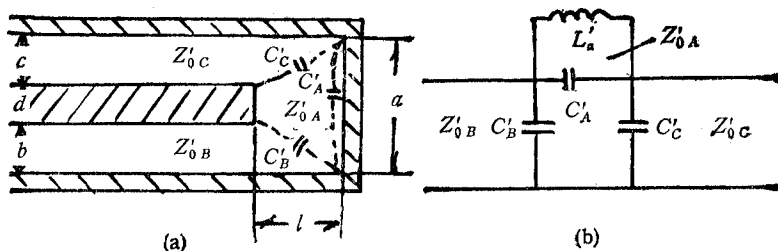


图 4 平行板线不连续结构及其双线等效电路

路(图 4)可供参考。图中 $Z'_{0A}, Z'_{0B}, Z'_{0C}$ 是相应平行板线的特性阻抗, 单位宽度的不连续电容按下式计算:

$$C'_A = [-2a^2 P \varepsilon / (\pi^3 b c)] \sum_m [\sin(m\pi b/a) \sin(m\pi f/a) / (m^3 K_{Am})]$$

$$C'_B = [2a^2 P \varepsilon / (\pi^3 b^2)] \sum_m [\sin^2(m\pi b/a) / (m^3 K_{Am})] - C'_A$$

$$C'_C = [2a^2 P \varepsilon / (\pi^3 C^2)] \sum_m [\sin^2(m\pi f/a) / (m^3 K_{Am})] - C'_A$$

式中 $K_{Am} = \sqrt{1 - (2a/(m\lambda))^2}$, $P = \coth(\pi l/a)$, $f = b+d$ 。计算结果表明, 取 $m=100$, C'_A, C'_B, C'_C 均已收敛很好。求得 C'_A, C'_B, C'_C 以后, 利用同轴线和平行板线之间的关系^[2], 应用 (3) 式求得图 1 中示出的几个不连续电容。

$$C_A = \pi(r_3 + r_1)C'_A, C_B = \pi(r_3 + r_1)C'_B, C_C = \pi(r_3 + r_1)C'_C \quad (3)$$

L_a 仍用 (2) 式求, 因为 (2) 式是精确表达式, 至此得到重入式交连的双线等效电路(图 5)。

(4) 重入式交连中心频率的计算 根据图 5 的双线等效电路应用 (4) 式编出实用重入式交连中心频率的计算程序, 计算出 l_3

$$\text{Im}[Y_{in}(l_0)] + \text{Im}[Y_{in}(l_0 + l_3 + l_1)] = 0 \quad (4)$$

为不同尺寸时的中心频率, 计算中用到的有关参量如下:

$$a = r_3 - r_1, b = r_{21} - r_1, c = r_3 - r_{22}, d = r_{22} - r_{21}, l = l_4 - l_3$$

对于 $l_0 = 38\text{mm}$, $l_1 = 92.8\text{mm}$, $l_4 = 22.5\text{mm}$, $r_1 = 13\text{mm}$, $r_{21} = 17.8\text{mm}$, $r_{22} = 22.3\text{mm}$, $r_3 = 30.5\text{mm}$ 的计算值同实测值的比列于表 1。计算中之所以选择 l_3 为变量,是因为工程上通过改变 l_3 改变交连的中心频率最方便。

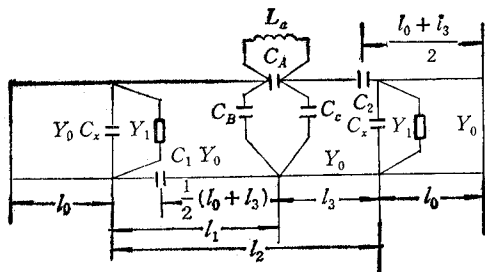


图 5 重入式交连的双线等效电路

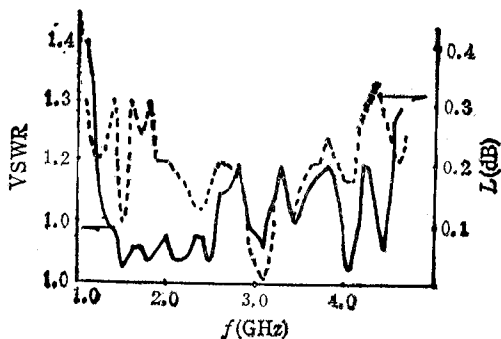


图 6 S 波段交连的驻波比和损耗

表 1

$l_3(\text{mm})$	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5
$f_0(\text{实测值})/(f_0\text{计算值})$	0.9969	0.998	0.9973	0.9994	1.0008	1.001	1.0005

4. 双路旋转交连的测试

用 HP8757 网络分析仪进行测试,测得的结果如图 6,图 7 所示,非常令人满意。P 波段交连中心频率的测试仍用 HP8757 进行,不过,此时应将信号源的扫频范围置得宽一些,使谐振峰更显著。表 1 列出的结果足以说明分析和计算方法的正确性。

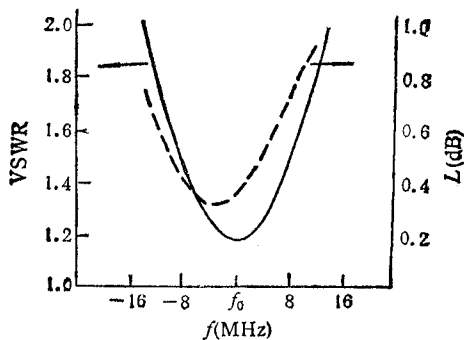


图 7 P 波段交连的驻波比和损耗

为了实现交连的小型化,取消了交连的 $\lambda/4$ 扼流装置,所以测试了两路交连之间的隔离性能。P 波段交连对 S 波段信号的隔离度大于 65dB, S 波段交连对 P 波段信号的隔离度大于 33.5dB,均比较理想。

5. 结束语

本文提出的方案可实现旋转多路交连的小型化。文中提出的分析方法可用于类似形式的交连精确设计,也可用于其它谐振腔的精确设计。所制作的交连性能优良, S 波段交连工作频带较接近 4 倍频程,转速为 60r/min。P 波段交连仅比 $\lambda/4$ 略长一点,改变 l_3 可以很方便地改变工作频带。

参 考 文 献

- [1] J.R. Whinnery, H.W. Jamieson, *Proc. IRE*, **32**(1944)11,695—711.
- [2] J.R. Whinnery, H.W. Jnmieson, *Proc. IRE*, **32**(1944)2,98—115.

DEVELOPMENT OF REENTRANT TWO WAY ROTARY JUNCTOR

Yin Liansheng

(Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210013)

Abstract A novel two way rotary junctor is presented. One way of the rotary junctor is designed at S band, and another way is designed at P band. The VSWR for S band rotary junctor is less than 1.2 in the 1.2~4.4 GHz frequency range. A reentrant resonant cavity is used for the design of the P band rotary junctor in order to reduce the length of the rotary junctor. The total length of two way rotary junctor is $\lambda/4$ approximately. It satisfies the needs for the especially small size.

Key words Reentrant rotary junctor; Two way rotary junctor; Reentrant resonant cavity