

無線電量測技術基礎

下 冊

成都電訊工程學院選編

北 京 科 學 教 育 編 輯 室

1962.5.

目 录

第十一章 频率的测量

§ 11-1 电桥法	3
§ 11-2 比较法	5
§ 11-3 谐振法	12
§ 11-4 计数法	18
§ 11-5 频率标准及其新成就	24
§ 11-6 利用频率标准的频率精密测量法	28
§ 11-7 毫米波段中波长的测量	30

第十二章 电路元件参数的测量

§ 12-1 具有集中参数阻抗的基本测量方法	33
(一) 直接测量法	33
(二) 电桥测量法	36
(三) 谐振法	47
§ 12-2 具有分布参数系统的阻抗的测量方法	58
(一) 开路法和短路法	59
(二) 测量线法	60
(三) 比较法	67
(四) 自动法——阻抗图示仪	69

第十三章 波形的测量

§ 13-1 引言	72
§ 13-2 非直线性系数的测量	72
§ 13-3 谐波分析仪	77
§ 13-4 已调波参数的测量	84

第十四章 衰减量的测量

§ 14-1 超高频传输线的衰减量的测量方法的综述和比较	95
(一) 功率比的直接测量法	95
(二) 替代法	97
(三) 利用驻波效应来测量衰减量的方法	100
§ 14-2 非常小的衰减量的测量方法	102
§ 14-3 空腔谐振器品质因数的测量	104

第十五章 超高频介质的测量

§ 15-1 概述	110
§ 15-2 谐振法	111
§ 15-3 测量线法	116
§ 15-4 在自由空间中介质常数和损耗角的测量	117

第十六章 电场强度及干扰的测量

§ 16-1 概论	120
§ 16-2 电场强度的测量	123
§ 16-3 无线电干扰的测量	129

第十七章 噪声的测量

§ 17-1 噪声和噪声系数	131
§ 17-2 测量噪声系数的特点和要求	135
§ 17-3 噪声系数的测量方法	135

第三篇 无线电测量的某些应用

第十八章 非电参量变换成电参量

§ 18-1 概论	140
§ 18-2 对变换器的基本要求	141
§ 18-3 变换器的分类	141
§ 18-4 电阻式变换器	142
§ 18-5 电感变换器	146
§ 18-6 电容变换器	147
§ 18-7 电离变换器	148
§ 18-8 电势变换器	154
§ 18-9 电参量的检取	160
§ 18-10 利用被检验件对电磁波的作用来确定被检验件的非电参量	162

参考文献目录

目 录

第十一章 频率的测量

§ 11-1 电桥法	3
§ 11-2 比较法	5
§ 11-3 谐振法	12
§ 11-4 计数法	18
§ 11-5 频率标准及其新成就	24
§ 11-6 利用频率标准的频率精密测量法	28
§ 11-7 毫米波段中波长的测量	30

第十二章 电路元件参数的测量

§ 12-1 具有集中参数阻抗的基本测量方法	33
(一) 直接测量法	33
(二) 电桥测量法	36
(三) 谐振法	47
§ 12-2 具有分布参数系统的阻抗的测量方法	58
(一) 开路法和短路法	59
(二) 测量线法	60
(三) 比较法	67
(四) 自动法——阻抗图示仪	69

第十三章 波形的测量

§ 13-1 引言	72
§ 13-2 非直线性系数的测量	72
§ 13-3 谐波分析仪	77
§ 13-4 已调波参数的测量	84

第十四章 衰减量的测量

§ 14-1 超高频传输线的衰减量的测量方法的综述和比较	95
(一) 功率比的直接测量法	95
(二) 替代法	97
(三) 利用驻波效应来测量衰减量的方法	100
§ 14-2 非常小的衰减量的测量方法	102
§ 14-3 空腔谐振器品质因数的测量	104

第十五章 超高频介质的测量

§ 15-1 概述	110
§ 15-2 谐振法	111
§ 15-3 测量线法	116
§ 15-4 在自由空间中介质常数和损耗角的测量	117

第十六章 电场强度及干扰的测量

§ 16-1 概论	120
§ 16-2 电场强度的测量	123
§ 16-3 无线电干扰的测量	129

第十七章 噪声的测量

§ 17-1 噪声和噪声系数	131
§ 17-2 测量噪声系数的特点和要求	135
§ 17-3 噪声系数的测量方法	135

第三篇 无线电测量的某些应用

第十八章 非电参量变换成电参量

§ 18-1 概论	140
§ 18-2 对变换器的基本要求	141
§ 18-3 变换器的分类	141
§ 18-4 电阻式变换器	142
§ 18-5 电感变换器	146
§ 18-6 电容变换器	147
§ 18-7 电离变换器	148
§ 18-8 电势变换器	154
§ 18-9 电参量的检取	160
§ 18-10 利用被检物件对电磁波的作用来确定被检物件的非电参量	162

参考文献目录

第十一章 頻率的測量

在無線電技術中涉及到的頻率範圍極其寬闊，它從幾分之一赫開始直到數千萬兆赫的頻率，在這一整個頻譜中可以劃分為下列具有不同特性的幾個頻段：音頻（20千赫以下）、超音頻（20~100千赫）、射頻（100千赫~300兆赫）、超高频（300兆赫以上）。不同的頻段要求不同的測量精確度，因而所選用的測量方法也完全不同，不過測量原理還是一樣的，而當頻率增高時，主要是測量設備元件的結構形式有所變化而已，因此我們還是按測量的方法來劃分，測量頻率的方法基本上可以分為：電橋法、比較法、諧振法、計數法。但到了毫米波段在測量方法上又有其許多特殊之點，這將在本章最後給予討論。

§ 11-1 電 橋 法

測量頻率的電橋法是基于電橋平衡時，頻率和電橋電路元件的參數有關的理論作成的。最簡單的電橋如圖 11-1 所示，電橋平衡時必須滿足下列條件：

$$R_1 \left(\frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega_x C_4} \right) = R_3 \left(R_2 + \frac{1}{j\omega_x C_2} \right)$$

其中 $\omega_x = 2\pi f_x$ ， f_x 是被測頻率，變換後可得

$$\begin{aligned} \frac{R_1}{R_3} &= \left(R_2 + \frac{1}{j\omega_x C_2} \right) \left(\frac{1}{R_4} + j\omega_x C_4 \right) \\ &= \frac{R_2}{R_4} + \frac{C_4}{C_2} + j \left(\omega_x R_2 C_4 - \frac{1}{\omega_x R_4 C_2} \right) \end{aligned}$$

既然電橋平衡，則上面等式的實數部份和虛數部份應該分別對應相等，即滿足模數平衡和相角平衡條件，由此可得：

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} + \frac{C_4}{C_2} \quad (11-1)$$

$$\omega_x R_2 C_4 - \frac{1}{\omega_x R_4 C_2} = 0 \quad (11-2)$$

從 (2) 式可以得到

$$f_x = \frac{\omega_x}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_2 R_4 C_2 C_4}}$$

如果 $R_2 = R_4 = R$

$C_2 = C_4 = C$

則被測頻率將為：

$$f_x = \frac{1}{2\pi RC}$$

如果電容器 C 是固定電容器，而電阻 R_2 、 R_4 是可變的，則改變電阻就可在電橋平衡的

情況下讀出頻率 f_x ， R_2 和 R_4 需要安裝在同一軸上保證 R_2 和 R_4 的變化在任何情況下都能同步，即 R_2 總是和 R_4 相等，而在可變電阻 R_2 和 R_4 的刻度盤上可以用頻率來進行刻度。

利用諧振電橋亦可測量頻率，其電路圖示於圖 11-2，當調節 C 到與被測頻率諧振時，電橋臂 4 變成一個純電阻，並且調節 R_2 ，當 $R_2 = R_4$ 時，電橋平衡，此時 $\omega_x L = \frac{1}{\omega_x C}$ ，因此可得 $f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，這裡電感量 L 為固定的已知值，而電容 C 的刻度則可以按頻率來刻度。

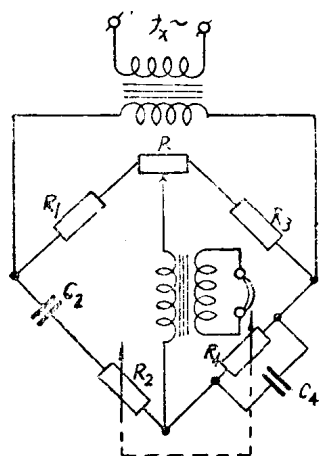


圖 11-1 測量頻率的電橋電路

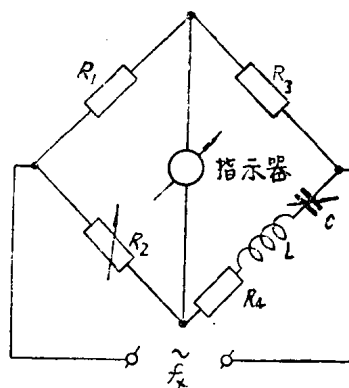


圖 11-2 諧振電橋電路

還可以用雙 T 型電橋來測量頻率，電路圖見圖 11-3，電橋的工作原理將在下一章討論。電橋的平衡條件是：

$$R_2^2 C_2 C_1 \omega_x^2 = 2$$

$$2R_2 = \frac{1}{\omega_x^2 C_1^2 R_1}$$

如果選擇電橋元件，使 $R_2 = 2R_1$ 及 $C_2 = 2C_1$ ，則其兩個平衡條件合而為一：得到：

$$f_x = \frac{\omega_x}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 2R_1 C_1}$$

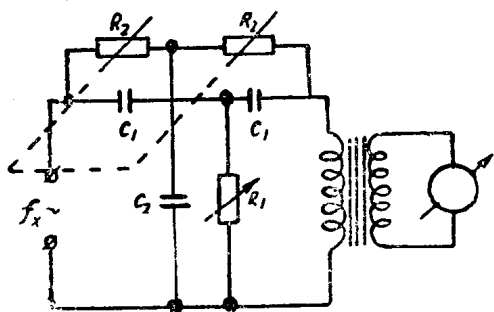


圖 11-3 雙 T 電橋電路

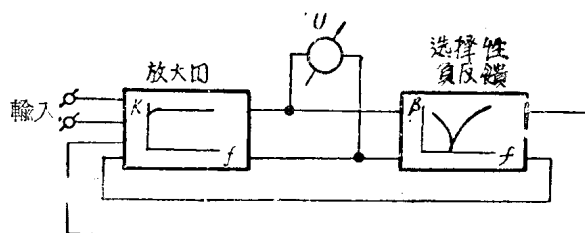


圖 11-4 具有負反饋的 RC 選擇性電橋的頻率計
(K —放大系數； β —負反饋系數)

如果保持电容 C_1 和电阻 R_2 不变, 改变 R_1 就可以使电桥平衡, 因而电阻 R_1 的改变可以按频率来刻度。而改变 R_2 就可以改变频率的量子。

用电桥法测量频率的误差约为 0.5~1%, 如果被测频率的电压含有谐波成份, 则上述电桥平衡起来就比较困难。利用具有负反馈的 RC 选择电桥就可以克服这一缺点其电路示于图 11-4。

被测频率的电压加到放大器的输入端, 电子管伏特计接在放大器的输出端, 和 RC 选择性电桥的输入端并接。如果加到 RC 电桥输入端的电压频率准确地等于电桥平衡时的调谐频率, 则负反馈电压等于零, 放大器具有最大的放大量, 而电子管伏特计指示出最大的电压值。如果被放大的电压频率和电桥的调谐频率不一样, 则电桥的电源电压的频率和调谐频率相差越大, 负反馈电压也就越高。由于负反馈对放大器作用的结果, 将降低放大器的输出电压, 这样一来, 用来调谐 RC 电桥的元件可以按频率刻度。

采用电桥法测量频率时有以下缺点:

1. 被测频率范围有限, 只能用于音频测量, 因为被测讯号源总是有一端接地, 而作为电桥平衡指示器的电子管伏特计也有一端是接地的, 如果讯号源直接接到电桥的一对角线上, 则电桥必然有一臂被短路掉, 因此被测频率讯号源和电桥之间必须用变压器耦合, 一般都是采用有导磁体铁芯的变压器, 当频率大于 10 千赫时不可能得到理想的频率特性曲线, 因此导磁体限制了电桥法测量频率的范围不超过 10KC。

2. 当测量的讯号电压为非正弦波形时, 电桥很难准确地建立平衡, 采用图 11-4 具有选择性电桥的频率计时可以克服这一缺点。

虽然有这些缺点, 但由于使用电桥法测量频率时既简单又方便, 因此在测量音频范围的频率时仍然得到了广泛的运用。

§ 11-2 比 较 法

(一) 利用拍频现象来比较两个音频频率

把标准频率 f_s 和被测频率 f_x 同时加到线性元件 (如耳机, 电压表等) 上, (如图 11-5 所示), 如果 f_x 非常接近于 f_s , 则可以从耳机上听到拍频。线性迭加以后, 合成电压的振幅是时间的余弦函数, 振幅的变化和频率 f_x 及 f_s 有关。

如果 $f_x = 1000$ 赫, f_s 和 f_x 相差 5 赫, 这两个频率的电压线性迭加在耳机上, 由耳机可以听到每秒强弱变化五次的“嗡……”的声音 (它的频率实际为 1000 赫) 如果用电压表则可以看到指针每秒钟摆动五次。如果 f_s 刚好等于 f_x , 则耳机上只能听到一种声音——频率为 1000 赫的声调。

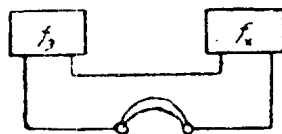


图 11-5 利用差拍比较两个音频的示意图

如果 f_x 和 f_s 都很稳定的话, 则利用比较法的拍频法来测量频率时, 误差可以小到小于一赫。但是这种方法只能适用于被测频率低于 15000 赫以下, 频率太高时, 耳机中听不到声音。

(二) 利用电子示波器来比较两个音频频率

利用电子示波器可以把被测频率和标准频率进行比较,如图 11-6 所示。被测频率 f_x 加到示波器的一对偏转板上,而标准频率信号电压加到示波器的另一偏转板上。如果 f_x 和 f_s 的频率成一整数比,则在荧光屏上就能看到一固定不动的李沙育图形。根据李沙育图形,我们就可以确定出 f_s 和 f_x 之间的比例关系。例如在垂直偏转板上加上频率 f_x 的电压,在水平偏转板上加上频率 f_s 的电压,如果出现图 11-7(a)的图形,则由于在水平方向作一直线与图形相交于 3 点,在垂直方向作一直线和图形相交于两点,所以 $\frac{f_x}{f_s} = \frac{3}{2}$,即 $f_x = \frac{3}{2}f_s$,

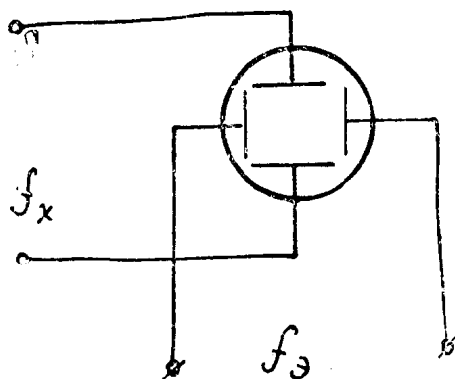


图 11-6 利用示波器来比较频率

用同样的方法可以推出图 11-7(d) 的频率比 $\frac{f_x}{f_s} = \frac{4}{3}$,图 11-7(e) 的频率比为 $\frac{f_x}{f_s} = \frac{5}{2}$ 。

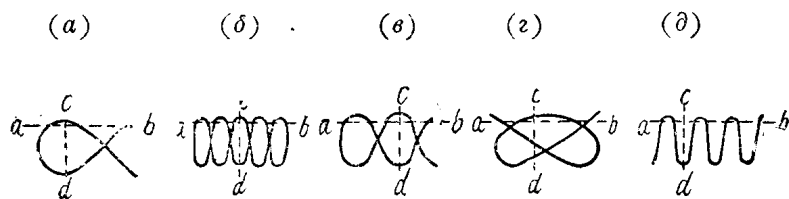


图 11-7 频率关系复杂时所得到的李沙育图形

用上述方法测量频率时,只要 f_s 很准确,则测量的准确度是很高的。但是如果频率比大于 $10/1$,则利用李沙育图形来确定频率比是比较困难的,因为这时图形很复杂,而且要得到固定不动的图形就要求两个电压的频率非常稳定。由于电压不可能非常稳定,因此图形就可能会转动,例如 f_x 和 f_s 都是 1000 赫,频率稳定度为 10^{-4} ,则频率的绝对变化为 0.1 赫,李沙育图形也就以 0.1 赫的频率转动。如果图形非常复杂,那就很难数清楚交点的数目了。如果用约为 100 千赫的两个频率进行比较,频率稳定度仍然是 10^{-4} ,则李沙育图形就以每秒 10 赫的频率转动,根本无法看清楚图形。所以这种方法只能用在音频或低射频范围进行测量。

为了方便地来确定两个频率之比,可以采用圆扫描法,把标准频率的电压经过 RC 移相器加到两对偏转板上见图 11-8,这样两对偏转板上电压的频率相等而相位相差 90° ,根据李沙育图形的原理在荧光屏上应该得到一个圆(或椭圆)。

被测频率 f_x 的电压加到第二阳极上,使第二阳极上的电压按照频率 f_x 起伏变化,由于电子束管的灵敏度取决于第二阳极电压,因此在原来以 R 为半径的圆上迭加上被测信号频率的变化——半径 R 在 $R_1 R_2$ 之间按照频率 f_x 起伏变化如图 11-9 所示,如果 f_x/f_s 为一个整数比,则这个圆就不动了, f_x/f_s 就等于齿数。这种方法实际上很少采用,因为这要求

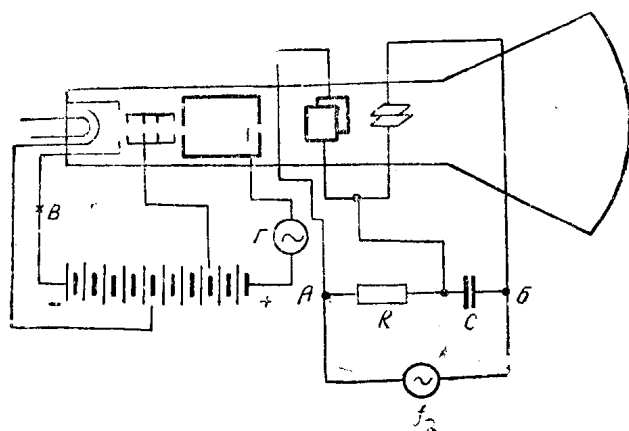


图 11-8 利用示波器比较频率的电路方案之一

被测频率电压必须很大,否则无法在圆上看到齿形;同时一般示波器的第二阳极电压都没有在面板上安装有引出的接线柱;再方面由于阳极电压 U_{a2} 变化使电子束的聚焦状态被破坏,产生散焦。因此被测频率的电压一般不是加在 U_{a2} 上,而是加到调制栅极上面(如图 11-8 中的 B 点),在被测电压处于负半周时,调制栅极由于电压过负而把电子束熄灭,在正半周时,电子束加强,于是荧光屏上的圆受到亮度调制,根据圆上的亮点数目可以读出频率比 f_x/f_s 。如果 f_x/f_s 为一正整数,则图形不动。这样的测量方法叫做栅极调亮法,其必要条件是

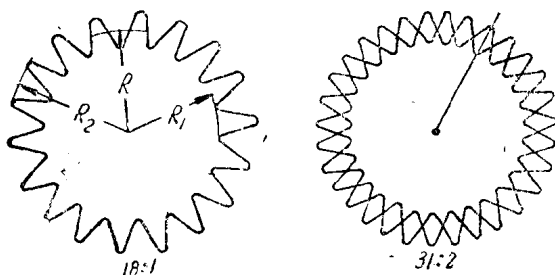


图 11-9 被测频率的电压加在电子束管的阳极时,在荧光屏上得到的图形

$$f_x > f_s.$$

频率比 $\frac{f_x}{f_s} = \frac{k}{n}$, 这里 k ——亮点数, n ——整

数,决定于 f_x 的大略值。如果 f_x 为 f_s 的几倍,则 $n=1$, 亮点数即为比值 f_x/f_s , 如图 11-10。

总之,用示波器来比较两个频率,只能在音频或低射频范围内进行。

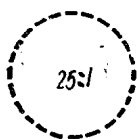


图 21-10 在电子束管的调制极上加有被测频率的电压时,在荧光屏上所得到的图形

(三) 零拍法

上面所讨论的两种比较法都只能应用在音频或低射频范围内进行测量,如果要测量射频段的频率,则可以采用零拍法以及后面几节中将要讨论到的其他方法。

用零拍法来比较两个射频频率的最简单的方法就是把两个射频信号 f_x 和 f_s 的电压加到线圈 L_1 和 L_2 上,经过非线性元件检波以后,接上耳机来听,如图 11-11(a)所示。

检波出来的信号包含有频率为 f_x 、 f_s 、 $f_x \pm f_s$ 、 $nf_x \pm mf_s$ 、以及 f_x 和 f_s 的谐波成分,但在这里我们所感兴趣的是 $|f_x - f_s|$ 。当 $|f_x - f_s|$ 处在音频范围内时,就能在耳机中

听出来, 当 $|f_x - f_s|$ 小于 20 赫或 15 赫以下时耳朵就听不出声音来, 即在图 11-11(δ) 中在 $f''_s - f'''_s$ 这一段频率范围内都可称之为零拍。但真正的零拍点是图 11-11(δ) 中的 A 点, 此时 f_x 才真正等于 f_s 。所以采用零拍法测量的绝对误差为 30~40 赫, 但如果有牵引现象存在, 则误差会大大增加。

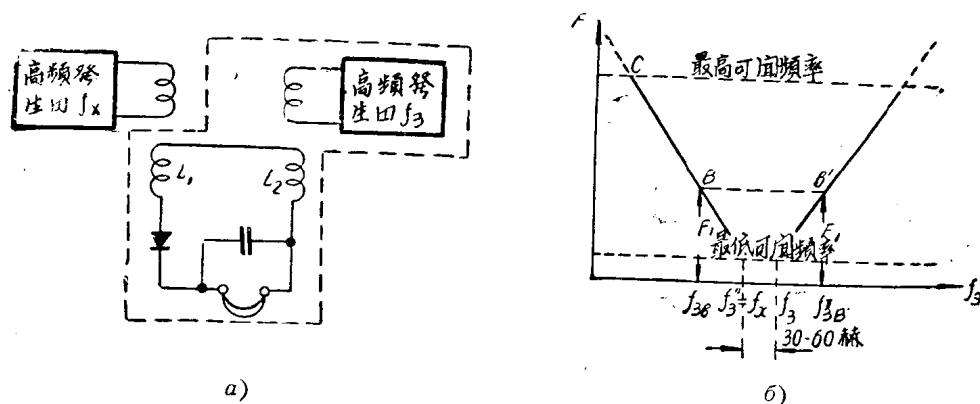


图 11-11 考虑到可测频率下限的差频变化曲线

所谓牵引现象, 就是当 f_x 还没有等于 f_s , 而接近于 f_s 时, 如果被测信号源功率很大, 则 f_s 被迫等于 f_x , 此时耳机中听到的不是 $|f_x - f_s|$, 而是零拍声。如果两个信号源之间耦合很弱, 则可以削弱或消除牵引现象, 因此图 11-11(a) 中所表示的两个信号源要进行屏蔽 (如虚线表示)。

如果要使零拍点更精确一些, 则可以采用电流计来代替耳机, 当 $|f_x - f_s| = 1-3$ 赫时, 电流计的指针已有偏转。

当被测频率很高时, 用图 11-11 的方法, 不论用耳机或电流计来指示零拍都是非常困难的, 此时必须改用图 11-12 的办法。

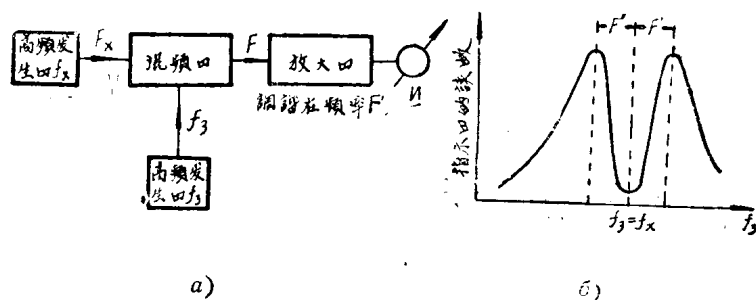


图 11-12 a) 用零拍法比较两个射频频率的方框图
b) a 图中指示器 N 的读数变化

放大器是调谐在频率 F' 上, f_x 和 f_s 经过混频以后得到差频 F , 这一差频 F 加到放大器上。当差频等于放大器的调谐频率 F' 时, 电表 N 读数最大。改变 f_s , 指示器读数发生相应的改变, 而当 $f_x = f_s$ 时, 指示器读数最小, 如图 11-12(δ) 所表示。

用双重差拍法可以大大提高测量频率的精确度, 其方框图见 11-13。此时比较频率不是在零拍点 A [见图 11-11(δ)] 而是在 B 点上。假定音频固定振荡器的频率 $F_1 = 1000$ 赫, 则

改变标准频率 f_s 直到 $|f_x - f_s| = 1000$ 赫时，差频 $|f_x - f_s|$ 和频率 F_1 迭加在线性元件（耳机）上，拍频结果，只听到 1000 赫的音调，如果 $|f_x - f_s|$ 是接近于 1000 赫而尚未等于 1000 赫时，则在耳机上听到 1000 赫的嗡嗡声，嗡嗡发响的频率等于 $\Delta F = ||f_x - f_s| - F_1|$ ，被测频率 f_x 之值为：

$$f_x = f_{s,b} + F_1$$

或

$$f_x = f'_{s,b} - F_1$$

应用这种比较法的准确度可以达到几分之一赫。

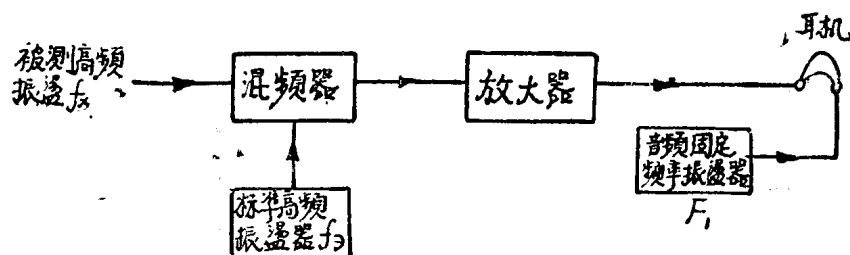


图 11-13 双重差拍法的方框图

(四) 用内插法比较射频频率

在被测频率或标准频率可以连续变化时，上面所讨论的利用零拍法或双重差拍法来比较频率 f_x 和 f_s ，对 f_x 进行测量的方法是方便易行的。在这种情况下，常常可以使上述两个频率彼此相等或者可以使它们之差准确地等于一给定的频率数值。但是在实际上要制造一部频率可以在很宽的范围内平滑地变化的标准发生器是有很大的困难的，因此我们通常采用有几个固定的标准频率的发生器，这些固定的标准频率是利用某一标准基频的分频或倍频的办法来得到的。在这种情况下，可以利用内插法来测量不等于任何一个标准频率的频率 f_x 。

采用内插法测量频率时，除了固定标准频率的信号源以外，还必须具有一个辅助的内插本地振荡器，它的频率和它本身调谐电容的刻度盘上的分度成线性关系，图 11-14 示出了测量用的电路图。

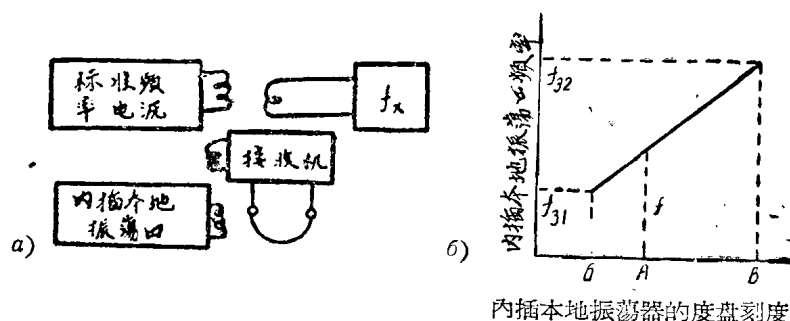


图 11-14

a) 用内插法测量频率的电路图

b) 用标准频率决定内插本地振荡器的频率

首先用一个谐振式波长计或者是一个有频率刻度的，在振荡状态下工作的再生式接收机来粗略地确定被测频率 f_x ，然后接通内插本地振荡器，把它的振荡电压和被测频率 f_x 一同

加到一个接收机, 并利用零拍法把内插本地振荡器调谐到被测频率 f_x 上。在内插本地振荡器的调谐度盘上记出相应于调谐到频率 f_x 上的那一个刻度以后, 撤去作用在接收机上的振荡, 假定上述读数等于 A 。

接着, 接通标准频率振荡器, 并把它振荡和内插本地振荡一起加到接收机上, 然后用零拍法将内插本地振荡器调谐到标准频率的两个谐波 f_{s1} 和 f_{s2} , 被测频率 f_x 则位于 f_{s1} 和 f_{s2} 之间。设这时的 $f_{s1} < f_x$, $f_{s2} > f_x$ [图 11-14(δ)] 假定内插本地振荡器在调谐到频率 f_{s1} 时, 刻度盘上的刻度为 B , 调谐到频率 f_{s2} 时刻度盘的刻度等于 B 。

因为内插本地振荡器的标准曲线是一根直线, 所以它的刻度盘的 B — B 段中, 每一分度所代表的频率赫数等于

$$\alpha = \frac{f_{s2} - f_{s1}}{B - B}$$

在这种情况下, 被测频率为:

$$f_x = f_{s1} + \alpha(A - B)$$

或

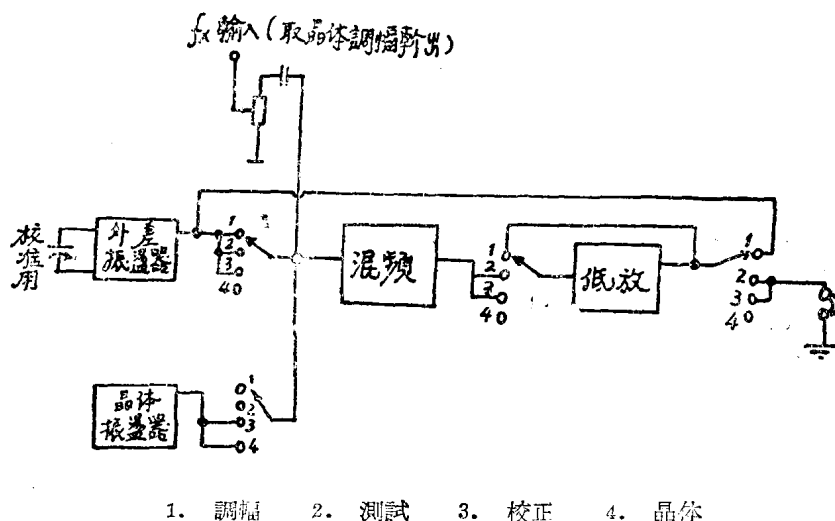
$$f_x = f_{s2} - \alpha(B - A)$$

内插本地振荡器的频率刻度所具有的特性愈接近于直线, 与频率 f_x 相邻的两个标准频率之差越小, 则 α 的数值亦越小 (即内插本地振荡器的度盘上每一分度所具有的频率赫数越小), 用内插法测量频率的准确度也就越高。而内插本地振荡器的频率刻度的绝对值准确度并不会影响到测量的结果。

(五) 利用外差式频率计测量频率

最简单的外差式频率计的方框图, 如图 11-13 所表示。但为了提高测量的准确度, 在外差式频率计中还包括了一个频率稳定度不低于 10^{-5} 左右的晶体振荡器。用这个晶体振荡器可以对已校准的振荡器的刻度上的许多基准点进行频率的校准。

现在以国产的 WCP-1 型外差式频率计为例, 其方框图见 11-15(a) 电路图见图 11-15(δ)。



1. 调幅 2. 测试 3. 校正 4. 晶体

图 11-15a WCP-1 型外差式频率计方框图

WCP-1 型外差式频率计在频率自 125 千赫~20 兆赫范围内用来测量发射机和接收机的等幅振荡频率，可以单独输出一基频为 1 兆赫的晶体振荡频率，并可以输出调幅波，是一种精确简便可靠的仪器。

外差振荡器是一个 LC 高频振荡器，共有两个波段：即从 125~250 千赫和 2~4 兆赫。当开关放在调幅位置时，低频放大器变成音频振荡器，耦合至外差振荡器作为调幅讯号，使外差振荡器输出调幅波。当开关放在测试位置时，被测频率和外差振荡器频率送至混频器，差频经过低放到达耳机。

当开关放在校正位置时，用晶体振荡器校正外差振荡器频率。

当开关放在晶体位置时，单独输出一基频 1 兆赫的晶体振荡频率，此时外差振荡器，混频器，低频放大器均不起作用。

这种外差式频率计的缺点是可以测量的频率范围不大。因为希望频率计的波段要宽、稳定度高、而频率又可以连续变化，这是很困难的。要克服这一困难，频率计内要用两个振荡器，一个粗测，一个精测，如图 11-16 所示。

这里粗测振荡器是宽频段振荡器 30~300 兆赫，用来对被测频率 f_x 进行粗略的测量。而精测振荡器的频段很窄（从 3000~3300 千赫），用以作精密测量，以满足在频率稳定度方面所提出的很高的要求。

决定被测频率可用下述方法进行，断开晶体振荡器和精测振荡器，利用开关 Π_1 和 Π_2 把被测频率 f_x 和粗测振荡器的频率 f_c ，

的振荡一同加在第一混频器上，利用开关 Π_3 把低频放大器和指示器接在第一混频器的输出端上。改变粗测振荡器的调谐可以得到被测频率 f_x 和振荡器频率 f_c ，或者是它的各次谐波之间的零差频，使用粗测振荡器大约可以得到 $\pm 0.3\%$ 左右的测量准确度。

粗测以后，断开被测频率 f_x ，然后准确地确定得到零拍点时粗测振荡器的调谐频率是多少。为此，首先要用晶体振荡器来校正精测振荡器的频率，此时只需要利用开关 Π_4 和 Π_5 把精测振荡器和晶体振荡器加到第二混频器上面，又利用开关 Π_3 把低频放大器和指示器接到第二混频器的输出端上，在精测振荡器的频率范围内有晶体振荡器基频的 30、31、32、33 次谐波，利用这些谐波来校正精测振荡器的频率。校正以后便把晶体振荡器断开，并利用开关 Π_1 和 Π_2 把粗测和精测振荡器的振荡加到第一混频器上，这时又重新把低频放大器和指示器接到第一混频器的输出端上。

改变精测振荡器的调谐以便达到二振荡频率之间的零拍点。然后根据精测振荡器的刻度来确定出和被测频率 f_x 相等的粗测振荡器的频率，测量的准确度约为 0.003%。

如果被测频率高于粗测振荡器的最大频率，那么就利用与粗测振荡器的谐波相比较的方法来测量它。

当频率达到毫米波段时，还是可以用比较法来进行测量，在原理上也完全一样，不过仅

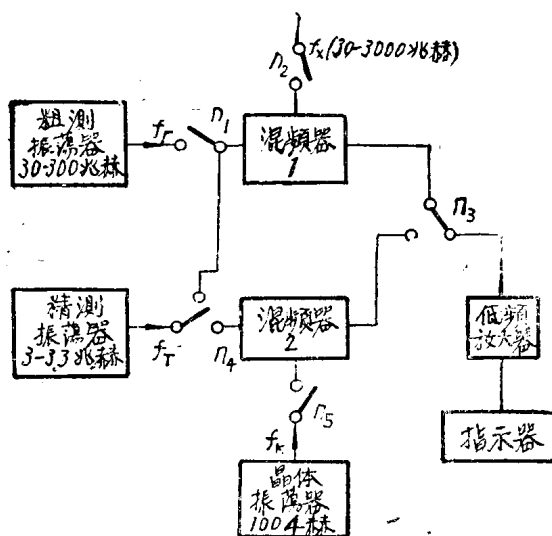


图 11-16 测量 30~300 兆赫的外差式频率计方框图

器結構的形式有所改變，這裡我們介紹一個測量 25000 兆赫的外差式頻率計，其方框圖如下：

訊號發生器 13 激勵波導 7 內的電磁波，晶体检波器 3 接入同軸綫 5，將電磁波從速調管工作頻率約為 3000 兆赫的輔助振蕩器 1 輸入同軸綫。輔助振蕩器的頻率用外差式頻率計 2 來測量，其準確度為 $1 \times 10^{-3}\%$ 。輔助振蕩器的第 8 次或第 9 次諧波訊號經過晶体检頻器以後輸送到中頻放大器 10，而中頻放大器輸出端裝有檢波器和微安表。高頻檢波器的直流部份電流由電表 8 顯示出來。放大器共有五級，总的放大量為 90 分貝諧振頻率為 45 兆赫，通頻帶寬度和速調管訊號發生器的穩定度有關。在最好的條件下即在電源電壓穩定和周圍溫度不變的情況下，發生器頻率在每 12 分鐘內的變化等於 $1 \times 10^{-2}\%$ ，即為 2.5 兆赫。

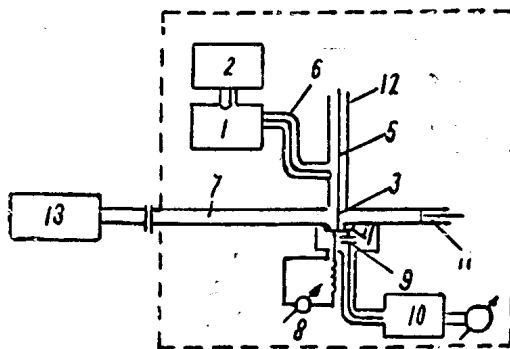


圖 11-17 測量頻率約為 25000 兆赫的外差式頻率計方框圖

這種外差式頻率計的準確度很高，但由於結構複雜而且笨重，因此使用起來很不方便，因而只有在使用其他測量方法無法保證測量的準確度的情況下，才使用上述的測量方法。

§ 11-3 諧 振 法

諧振法只是用在射頻和超高频的頻率測量中，它是利用諧振原理來測量頻率的。波長大於一米以上時可以採用具有集中參數 LC 的諧振原理來測量頻率的吸收式波長計；當波長短於一米時，則採用具有分布參數的長綫式波長計。

(一) 具有集中參數的吸收式波長計

通常這種波長計是由可變電容 C 和幾個可調換的綫圈 L 組成振蕩回路，如圖 11-18 所示。吸收式波長計測量頻率的原理是：被測頻率 f_x 的訊號源和波長計作電感耦合，改變 L 或 C ，使 LC 回路諧振，而諧振頻率 f_0 = 被測頻率 f_x ，改變 L 就是改變波段，而改變 C 就是在一個波段內連續地改變 LC 回路的諧振頻率，吸收式波長計的刻度就是按 $1/2\pi\sqrt{LC}$ 來刻度。

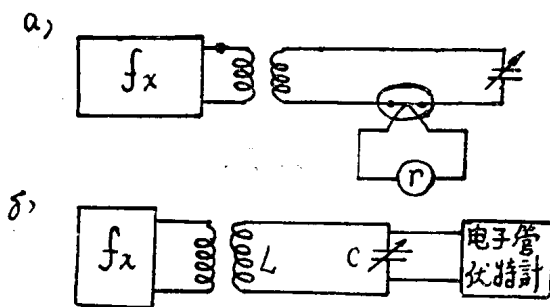


圖 11-18 吸收式波長計的電路

a) 用熱偶式電流表作為指示器 b) 用電子管伏特計作指示器

吸收式波长計的指示器有两种:

a) 用电流計作为指示器, 因为电流表是串在 LC 回路上, 故应该选用具有小电阻的电流諧振指示器, 虽然可用白熾灯, 热綫式电流表, 但是一般还是用热偶式电流表, 因为它的电阻小, 指示灵敏。

δ) 用电压表作为电压諧振指示器, 亦可用充气管, 但它的准确度不高, 故一般还是用高輸入阻抗的电子管伏特計作为电压指示器。

如果回路的諧振曲綫比較平坦, 則当改变波长計回路的电容时, 常常发现很难正确地确定讀数的最大值, 在这种情况下可以应用交叉讀数法。

电流 I 取在諧振电流的 70~80%, 由曲綫可以看出此时电容器稍为改变一点, 指針就会有显著的偏轉, 相对于电流 I_1 、 I_2 时电容器的电容量为 C_1 和 C_2 、頻率为 f_1 和 f_2 (见图 11-19), 則諧振頻率為

$$f_0 = \frac{1}{2}(f_1 + f_2)$$

这个公式是假定諧振曲綫完全对称的情况下来計算的, 事实上, 諧振曲綫是不对称的,

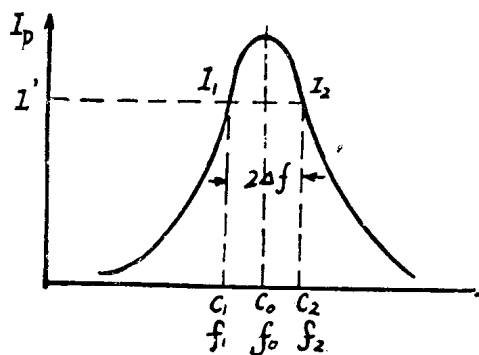


图 11-19

不过虽然不对称, 只要相对失諧不很大的話, 采用交叉讀数法测量的相对誤差还是比较小的。

另外必須注意, 波长計和被測振蕩器的耦合应该选用弱耦合, 不然的話, 由于波长計所引入的反作用的影响, 自激振蕩器的頻率就会发生变化, 由于牵引現象会使测量結果变得不真实。弱耦合使諧振曲綫相对于其唯一的最大值具有良好的对称性 (见图 11-20)。如果耦合很强的話, 則波长計的电容器 C 往一个方向和另一个方向改变时, 会出现两个急剧下降的最大值, 这两个最大值是在不同的 C 值下得到的 [见图 11-20(δ)]。

测量頻率很高时, 例如到了米波段分米波段以后, 波长計的振蕩回路通常都是做成电容量和电感量能够同时改变的形式如图 11-21。这样就提高了由一个綫圈和电容器所組成的回路所能复盖的頻率范围。

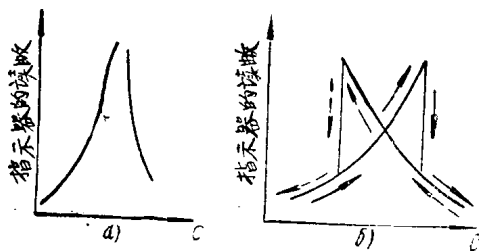


图 11-20 弱耦合和强耦合时的諧振曲綫

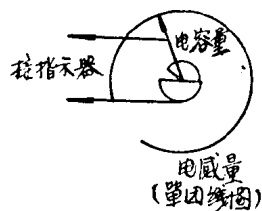


图 11-21 分米波諧振式波长計的原理图

具有集中参数的波长計可以工作的頻率一直扩展到 1500 兆赫 ($\lambda = 20$ 厘米) 左右。这

类波长计的准确度是 $\pm(0.25-1)\%$ ，而在采用交叉读数法时准确度可达 0.1% 。

(二) 具有线性分布参数的谐振式波长计

在频率很高的时候，集中参数的振荡回路衰减很大，谐振曲线比较平坦而不尖锐，因此在频率很高的频段内 ($\lambda < 3$ 米)，用具有分布参数的振荡系统来测量频率比较适宜。平行双导线式传输线就是这种系统的最简单形式，其概略图见图 11-22。

利用耦合线圈 L_1 使双导线式传输线和被测波长的讯号源作电感耦合。这时如果频率很高，则耦合系统也可以由两根拉紧了的（通常是水平拉紧）并且仔细绝缘了的平行导线组成。具

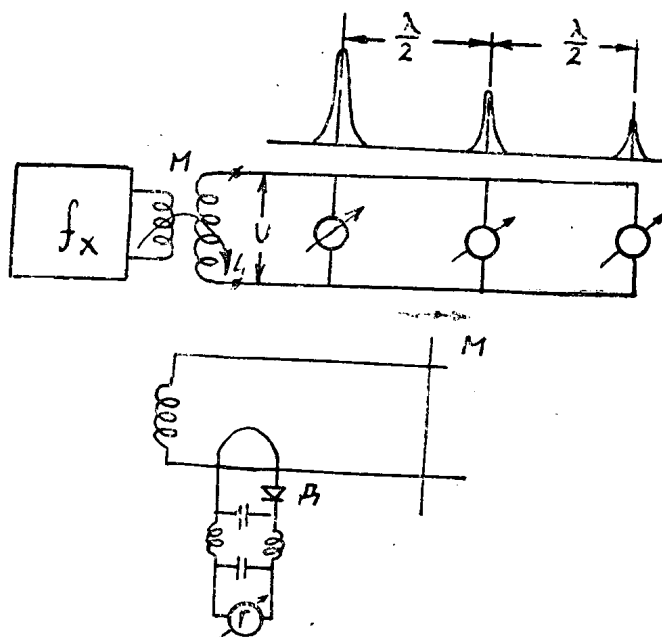


图 11-22 具有平行两线式传输线段的波长计的概略结构

- a) 仪表可动的；
- b) 指示仪表固定的。

有很小阻抗的热电式电流测量仪表沿着传输线移动，因此可以初步近似地认为传输线是短路的。根据传输线理论：

$$I_k = \frac{U_1}{Z_0 \sin \alpha l}$$

其中 I_k ——仪表所测得的短路电流；
 U_1 ——传输线始端的电压；
 l ——从传输线始端到短路点的距离；
 Z_0 ——传输线的波阻抗；

$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}$ ——传输线的相位常数。

在这种情况下，仪表读数的最大值相当于 $\sin \alpha l = 0$ 时的距离 l 。在传输线将有許多点满足这一条件。 $l=0$ 是传输线上电流读数最大的第一点，第二个最大值是在距离传输线始端 $\frac{1}{2} \lambda$ 。