

超高频振荡器的 频率稳定

苏联 С. И. 貝契柯夫 Н. И. 布連宁 Р. Т. 薩法罗夫 著

黃 小 屏 譯

人 民 郵 電 出 版 社



超高频振荡器的频率稳定

C. H. 貝契柯夫

(苏联) H. H. 布連宁 著

P. T. 薩法罗夫

黃小屏 译

人民邮电出版社

С. И. Бычков, Н. И. Буренин, Р. Т. Сафаров
Стабилизация Частоты Генераторов СВЧ

Издательство "Советское Радио", 1962

内 容 提 要

这是一本专门叙述超高频振荡器的稳频问题的书。书内首先对不同无线电子设备分别提出了应有的频率稳定度的要求,对有关影响稳定度的各种情况进行了详细的分析;其次介绍参数稳频、石英稳频、同步稳频及自动频率微调等稳频方法。书中对自动频率微调,讨论得比较全面,除详细分析了各种稳频器外,还讨论了所用控制元件及介绍了电子式与电机式自动频率微调系统。书末,举了许多稳频系统的实例。

超高频振荡器的频率稳定

著 者: (苏联) С. И. 貝契柯夫
Н. И. 布連宁
Р. Т. 薩法羅夫

譯 者: 黃 小 屏
出版者: 人 民 郵 電 出 版 社

北京东四六条13号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号)

印刷者: 北 京 市 印 刷 一 厂
发行者: 新 华 书 店 北 京 发 行 所
經售者: 各 地 新 华 书 店

开本 850×1168 1/32

1965 年 4 月北京第一版

印张 9 18.32 页数 153

1965 年 4 月北京第一次印刷

印刷字数 252,000 字

印数 1—5,350 册

統一书号: 15045·总1461—无422

定价: (科6) 1.40 元

序 言

无綫电技术系統工作的可靠性和不間断性，几乎都在很大程度上取决于頻率的穩定度。

苏联和各国学者的許多著作[1—7, 38, 70]对穩頻理論和穩頻技术的发展起过重要的作用。

但是，这些著作主要是研究較长波波段的振蕩器頻率的穩定。当然，有关自激振蕩系統穩頻、自动頻率微調系統 (АПЧ)、参数穩定等的一般理論的基本原理，在超高頻段振蕩器穩頻系統的設計中也适用。但是，后者的穩頻系統具有許多特点，需作專門的研究。

超高頻振蕩器穩頻的許多重要問題仅在期刊上介紹过，在研究各种穩頻方法及設計超高頻无綫电設備时，实际应用这些資料，都有困难。

本书試圖把超高頻自激振蕩器穩頻方面的著作加以系統化，作若干綜合并作进一步的闡述。

书中比較着重地討論了各种因素对超高頻自激振蕩器頻率穩定度的影响，这特別使得在設計自动頻率微調或参数穩定裝置时，便于提出原始的数据。

在各种穩頻方法中，对各种无綫电技术設備广泛采用的振蕩器的自动頻率微調法，特別詳細地作了討論。

虽然，本书由于篇幅所限，对許多于穩頻有重要价值的問題未能闡述；但是，本书对于从事超高頻无綫电設備設計和維護的讀者是有用的，也可以作为学习超高頻振蕩器和穩頻方法的教学参考书。

目 录

序言

第一章 超高频振荡器频率不稳定对无线电设备工作

的影响 1

§ 1.1. 超高频振荡器的应用范围 1

§ 1.2. 对某些无线电设备中所用振荡器频率稳定度的要求 3

第二章 各类超高频振荡器频率稳定度的分析 6

§ 2.1. 自激振荡器的频率稳定度 6

1. 自激振荡器的等效电路和稳定条件 6

2. 相位和幅度的稳定条件 8

3. 定量估算不稳定因素对振荡器频率的影响 10

§ 2.2. 工作状态对自激振荡器频率的影响 13

1. 电子管自激振荡器 13

2. 反射速调管 18

3. 多腔磁控管 24

4. 行波管和返波管 41

§ 2.3. 负载对自激振荡器频率的影响 56

1. 自激振荡器的频率牵引现象 56

2. 失配馈线上波段自激振荡器的工作 66

3. 自激振荡器在长馈线上脉冲工作的特点 68

§ 2.4. 温度、湿度和大气压力对自激振荡器频率的影响 73

1. 温度的影响 73

2. 湿度和大气压力的影响 78

§ 2.5. 噪声引起的振荡器频率起伏 81

§ 2.6. 分子振荡器的频率稳定度 90

第三章 稳频方法概述 93

§ 3.1. 稳频方法分类 93

§ 3.2. 各种稳频方法评价 96

第四章 参数稳频和石英稳频 99

§ 4.1. 温度稳频 99

§ 4.2. 减小机械变形、湿度和压力影响的措施	115
§ 4.3. 用空腔谐振器稳频	116
§ 4.4. 超高频振荡器的石英稳定	126
1. 石英的稳定特性	126
2. 应用倍频稳定	131
3. 宽频段石英稳定	133
第五章 同步法稳频	139
§ 5.1. 超高频振荡器同步的特点	139
§ 5.2. 调幅时自激振荡器的同步	148
第六章 自动频率微调	154
§ 6.1. 自动频率微调系统的分类和基本方框图	154
§ 6.2. 频率标准	160
§ 6.3. 超高频鉴频器	168
1. 一般知识	168
2. 具有相位检波器的波导鉴频器	171
3. 包含双 T 接头和定向耦合器的波导鉴频器	176
4. 具有两个双 T 接头的鉴频器	179
5. 利用驻波工作的波导鉴频器	180
6. 具有两个空腔谐振器的鉴频器	184
7. 空腔谐振器中有两振荡型的鉴频器	186
8. 具有中频误差信号的鉴频器	189
9. 具有一个检波器和与谐振腔耦合周期性改变的鉴频器	196
10. 具有接成通过式电路的周期性变调空腔谐振器的鉴频器	198
11. 周期性变调空腔谐振器和检波器接在输入端的鉴频器	201
12. 被稳定振荡器调频的鉴频器	204
13. 具有分子频率标准的波导鉴频器	205
14. 某些鉴频器的频段特性	206
15. 鉴频器在脉冲振荡器 АПЧ 系统中工作的某些特点	210
16. 各种鉴频器评比	211
§ 6.4. 控制元件	213
§ 6.5. АПЧ 系统的动特性	225
1. 电子式 АПЧ 系统	225
2. 电机式 АПЧ 系统	238

§ 6.6. 自动频率微调系统的误差	265
第七章 实际稳频系统举例	271
§ 7.1. 石英稳定的、220—400 兆赫频段的无线电台激励器	271
§ 7.2. 分米波振荡器的参数稳频	274
§ 7.3. 用空腔谐振器在宽频段内稳定速调管振荡器频率	279
§ 7.4. 超高频波段无线电中继线路中的频率稳定实例	282
§ 7.5. 速调管振荡器自动频率微调系统	286
§ 7.6. 磁控管电机式 АПЧ 系统	289
参考文献	292

第一章 超高频振荡器频率不稳定 对无线电设备工作的影响

§1.1. 超高频振荡器的应用范围

目前，超高频振荡器在各种无线电技术部门获得广泛应用。超高频振荡器首先是在雷达设备中得到重要的实际应用，用来探测和确定飞机的方位。后来，超高频振荡器在无线电通信（例如无线电中继线路）、电视、无线电导航以及无线电遥控系统和无线电物理学中获得了应用。超高频振荡器的作用日益增大，在很大程度上是由于产生该频段振荡的理论和技术的发展，特别是由于振荡功率、效率的提高和稳频方法的改善。

超高频振荡器不仅应用在各种无线电系统的发送设备中，而且用作接收设备的本机振荡器以及用于各种测量仪器中（标准信号发生器、频谱分析仪等等）。

无线电技术的一个主要部门——远程无线电中继通信中，应用超高频振荡器的趋向尤其突出。在无线电中继通信系统中，由于有可能产生锐定向辐射，因而可以保证用较小的发射机功率实现远距离通信并大大降低邻近通信线路之间的相互干扰及减小窃听通信的危险。超高频无线电中继系统的主要优点是它的机动灵活性和有可能实现多路通信。现代的无线电中继系统可通数十乃至数百个话路[72]。

显然，发送设备和接收机本机振荡器的频率稳定对无线电中继线路的正常工作具有重要的意义。频率不稳定就要求加宽接收设备的通频带，使规定频段内工作频率的数目减少并使通路之间相互干扰的电平升高。

最近，在厘米波段和分米波段的无线电中继通信线路上，许多国家除了使用电子管振荡器以外，还广泛采用反射速调管和行波

管。

在频率分路的多路无线电中继线路上，为了得到调频的振荡，特别宜于使用在相当宽的频带内容许电子频率控制的反射速调管。

多腔磁控管是厘米波段和毫米波段的大功率振荡器，广泛应用在各种地面上的和飞机上的雷达系统及导航系统中（例如，飞机探测站、着陆系统、为了确定目标的运动速度的多普勒系统等等）。

最近，在雷达站中开始使用磁控式电子器件——泊管(платинотрон)*。它既可以作为大功率放大器（称为增幅管），也可以在自激状态下工作（称为稳频管）[99, 119]。此稳频管的频率高度稳定及增幅管的效率高，使得它们在大功率超高频发送设备中将成为使用得相当广泛的电子器件。

苏联科学家所研制的分子振荡器能够得到 10^{-9} 数量级的频率稳定度，而在 1—2 小时内达到 10^{-12} 数量级 [106]。这样高的频率稳定度为其他类型的振荡器所不及，这使得有可能进行无线电物理学和天文学中精密的科学实验和广泛地用于报时，以控制和校准时间标准。

还有，由于制成了分子振荡器，原则上有可能检验广义相对论中一个很重要的原理，即时间流逝的速率依赖于万有引力场，譬如，地球的重力场。由相对论可知，分别放在地球上和一定高度上空的两个完全相同的时钟，将以不同的速率运行。在地球的场中，接近地球表面的重力频率偏移为

$$\Delta f = 7 \cdot 10^{-10} f_0 \frac{h}{R},$$

其中 f_0 ——振荡器频率；

h ——离地球表面的距离；

R ——地球半径。

此偏移很小。例如，距地面高度 $h=1$ 公里，约等于 $10^{-13} f_0$ 。显然，

* платинотрон, 英文为 platinotron, 音译为泊管，也有译为高原管的——译者。

装在地球人造卫星上的高稳定分子振荡器，看来能用实验检验重力的频率偏移。

§ 1.2. 对某些无线电设备中所用振荡器频率稳定度的要求

发射机及接收设备本机振荡器的频率高度稳定，是保证无线电线路可靠和工作不间断所必不可少的条件之一。只有当频率稳定度很高时，才有可能实现不必搜寻发射机频率的无线电通信。

提高发射机的频率稳定度可以大大缩小接收设备的通频带，从而增加无线电线路的工作距离。

在各种无线电设备中，根据其用途不同，既可采用连续工作法，又可采用脉冲工作法。

脉冲工作法最初曾优先地使用于雷达系统中，而目前，则在无线电多路通信、无线电导航、无线电遥测等系统中也获得广泛应用。与此同时，连续工作法开始也扩大到借多普勒效应工作的各种雷达系统中。

振荡器的频率变化可分成两种类型：快速的频率变化和缓慢的频率变化。自然，这样划分只能够是相对的，对频率缓慢变化和快速变化的定量的界限，应根据每一具体的无线电设备来确定。

如果所说的一般脉冲系统，不是采用相干法工作，则发射机频率的变化可分类如下：

1. 缓慢的频率变化。这是当空隙度*很大时脉冲间隔时期所发生的频率漂移；而在各单个脉冲产生期间，即在每个脉冲所占时间内，频率实际上可认为是恒定的。这种类型的频率不稳定是由外界条件（例如，环境温度）变化、电源电压不稳定、振荡器工作状态变化，特别是外负载的变动（例如，天线系统转动时）所引起的。

2. 快速的频率变化。这时各单个脉冲所占时间内发生的频率

* 原文为“Сквозность”，一般译为“填充系数”。

变化已不能忽略。这类频率漂移系由振荡器有电子频移所致,例如,调制电压的波形与矩形相差显著,自激振荡器振荡型的跳变以及自激振荡器对失配的长馈线工作时所发生的过渡过程,都要引起频率的快速变化。

缓慢的频率漂移对无线电设备工作的影响很明显,因此我们暂不准备谈这个问题;仅简要地指出在频率快速变化的情况下可能出现的后果。

脉冲期间振荡器频率变化引起脉冲频谱变化。这样使包含脉冲能量主要部分的频带增大,而其频谱形状与载频不变时由脉冲包络所决定的频谱形状可能有很大的差异。这又迫使接收设备的通频带增大,在许多情况下,这可能对自动频率微调系统产生很不良的影响。

讨论频率变化对脉冲频谱影响的问题,目前具有越来越大的意义。这一方面是由于脉冲系统中为了传输辅助信息采用频率调制;另一方面是由于出现了电子频移极大的返波振荡器,因而在脉冲状态下工作时,对调制电压波形的要求很严格。这个问题虽很重要,但这里暂不准备加以讨论,因为在论文[21]中已经作了详尽的讨论。

下面我们扼要地讨论发射机和接收机本机振荡器频率不稳定对各种无线电系统工作的影响。

在无线电通信系统中,包括无线电中继线路在内,由于发射机和接收机本机振荡器的频率不稳定,使得接收设备通频带不得不有所增大,因而降低了无线电线路的抗干扰能力,缩短了通信距离和给定频带内通信通路的数目。通频带增大自然要使接收设备的结构复杂化。许多情况下,发射机或接收机本机振荡器频率的漂移是使邻近通路中产生附加失真和增大噪声电平的原因。

为了判断无线电中继通信系统中所允许的频率偏离的数量级,一般认为:在100—500兆赫频段内,相对频率不稳定性应限定为 10^{-4} ;在500—10500兆赫频段内,应限定为 $5 \cdot 10^{-4}$;并逐渐降低到 $3 \cdot 10^{-4}$ 。在现代多路电话和电视的无线电中继线路上,最大的频率

漂移須限定为 $5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$ 。

在雷达及导航系統中，发射机工作频率的变化使得目标基本参数、飞机方位等的测量誤差增大。此外，与任何无线电綫路相同，振荡器频率的不稳定使接收设备的通頻帶必須加寬，并具有由此而产生的全部不良后果。在脉冲系統中，如上所述，在产生各单个脉冲期間发射机频率的变化使脉冲頻譜失真，其結果是降低雷达站作用距离；在許多情況下，是使接收机本机振荡器的自动频率微調系統工作变坏，特別是降低微調准确度，或者甚至完全破坏微調系統的正常工。作。

在无线电遙控系統中，稳定发射机的频率具有重要的意义。在无线电遙控系統中，信息的傳輸是在短時間內不規則地进行的，因此，接收设备不容易采用自动频率微調。仅管某些情況下，为了微調接收机的频率，发射机得以周期性脉冲序列的形式发送專門的信号，但这样会增加振荡器的負荷（在超高频段，由于获得大功率相当困难，这是特別不利的），降低系統的效率，使接收设备复杂化，并在一定的程度上使綫路洩密。

在利用多普勒效应的系統中，無論对发射机或接收机本机振荡器的频率稳定度都提出很高的要求。

在能够从各种不动目标中或小速度运动目标中分辨出运动目标的相干脉冲雷达系統中，振荡器的频率不稳定可能大大破坏或实际上不可能实现运动目标的分辨[43, 103]。

在連續輻射的多普勒系統中，例如，用以測量目标的路程速度的系統，振荡器频率不够稳定将使測量誤差增大。

发射机有信号直接漏到接收机輸入端是連續輻射的多普勒系統中严重的和难以克服的缺点。此时对工作最明显的影响是产生寄生調幅及較小程度的寄生調相。此調相作用使从目标反射的信号与从发射机直接漏过来的信号，在检波时产生差拍現象。

在工作于小空隙度的相干脉冲系統中，通常要采用参考振荡器和梳形带阻滤波器，并对发射机的频率稳定度和参考振荡器的振

幅度的稳定性提出很高的要求。

在上述几种系统中，发射机频率短时间的相对稳定度用 10^{-8} — 10^{-9} 数量级估计 [103]。在脉冲跟踪期间，频率的偏差不应该超过 20—50 千赫。自然，在超高频段，要得到这样高的频率稳定度，即使是在短的时间间隔内（约 1000 微秒），也有一定的技术困难。

第二章 各类超高频振荡器 频率稳定度的分析

§ 2.1. 自激振荡器的频率稳定度

1. 自激振荡器的等效电路和稳定条件

超高频自激振荡器的等效电路可表示成两个元件：线性的 Y'_K 和非线性的 Y_e （图 2.1）。非线性元件 Y_e 相当于等效电子导纳，等于振荡系统电流一次谐波和高频电压的幅度比，

$$Y_e = \frac{I_1}{U_1} = g_e + jb_e,$$

其中 g_e 和 b_e 分别是电子导纳的实部和虚部。

线性的二端网络 Y'_K 表示考虑了外负载的影响时振荡器振荡系统的等效导纳。

显然，自激振荡系统振荡持久的条件（稳定条件）具有下列形式：

$$Y_e + Y'_K = 0, \quad (2.1)$$

其中 Y_e 和 Y'_K 在一般情况下可能是复数。

上面复数关系式相当于两个实数方程

$$g_e + g'_K = 0, \quad (2.2)$$

$$b_e + b'_K = 0, \quad (2.3)$$

其中 g'_K 和 b'_K 分别是导纳 Y'_K 的实部和虚部。

表示式 (2.1) 也可表示成

$$y_e e^{j\varphi_e} + y'_k e^{-j\varphi_k} = 0,$$

式中 y_e, y'_k 及 φ_e, φ_k 分别为电子导纳和振荡系统导纳的模数和相角。

对于电子管振荡器, 宜于把图 2.1 的等效电路绘得更详细些 (图 2.2)。图 2.2 中标出了非线性元件 (电子管)、反馈回路和振荡系统 (迴路)。

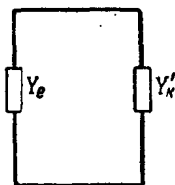


图 2.1 自激振荡系统的等效电路

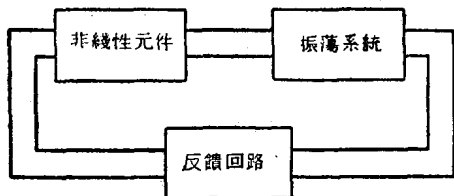


图 2.2 自激振荡系统的方框图

由自激振荡器的理论可知, 板流一次谐波等于

$$I_{a1} = S_{ep}(u_g + DU_a), \quad (2.4)$$

其中 S_{ep} ——平均跨导,

U_g 和 U_a ——电子管栅极上和板极上交变电压的幅度。

电子管的栅极电压

$$U_g = -kU_a,$$

其中 k 是反馈系数。

非线性元件的电子导纳等于

$$Y_e = \frac{I_{a1}}{U_a} = (D - k)S_{ep}, \quad (2.5)$$

于是稳定条件可写成以下形式:

$$Y'_k + (D - k)S_{ep} = 0 \quad (2.6)$$

令 $Z_0 = \frac{1}{Y'_k}$, 便得到熟知的关系式

$$(k - D)S_{ep}Z_0 = 1,$$

以

$$k-D=K'=k'e^{jq_{\kappa'}},$$

$$S_{cp}=s_{cp}e^{jq_s} \text{ 和 } Z_0=z_0e^{jq_0}$$

代入上式，可分写成两个实数方程

$$k's_{cp}z_0=1 \quad (2.7)$$

和

$$\varphi_{\kappa'}+\varphi_s+\varphi_0=2\pi n, \quad (2.8)$$

其中 $n=0,1,2,\dots$

这两个关系式是幅度平衡和相位平衡的条件。

分析相位平衡方程式 (2.8)，可明显地看出自激振荡器频率改变的机构。在稳定状态下，相位平衡总能得到满足。当其中一个相角发生变化时，例如 φ_s 或者 $\varphi_{\kappa'}$ 变化（其变化特别与电源电压有关）时，为了恢复等式 (2.8)，自激振荡器的频率必须发生一定的变化。由于频率偏离谐振频率时，振荡器振荡系统的相角 φ_0 急剧变化；所以，振荡频率有相当小的变化，就能恢复等式 (2.8)。

在具有窄带谐振系统的电子管振荡器、磁控管以及速调管中，振荡系统是决定振荡器频率的元件。

2. 相位和幅度的稳定条件

上述振荡器的相位和幅度平衡条件是必需条件，但是要使振荡持续存在，它们还不是充分条件。为了使系统中的振荡稳定地存在，除平衡条件外，还必须满足幅度和相位稳定条件。

我们来推求适用于电子管自激振荡器的这些条件，其推导过程很简明。

用 $q(U_a)$ 代表关系式 (2.7) 的左部，它与振荡幅度有关。

我们假定由于某种原因，使振荡幅度发生变化，函数 $q(U_a)$ 获得一不大的增量 $\Delta q(U_a)$

$$q(U_a)=1+\Delta q(U_a), \quad (2.9)$$

其中

$$\Delta q(U_a) \ll 1.$$

若函数的增量 $\Delta q(U_a) > 0$, 而微商 $\frac{\partial q}{\partial U_a} < 0$, 则幅度平衡将能满足; 但当幅度等于 $U_a + \Delta U_a$ 时:

$$q(U_a + \Delta U_a) = 1.$$

当函数 $q(U_a)$ 的增量很小时, 上面表示式可近似地写成

$$q(U_a) + \frac{\partial q(U_a)}{\partial U_a} \Delta U_a = 1. \quad (2.10)$$

根据公式 (2.9) 和 (2.10) 得到

$$\Delta U_a = -\Delta q(U_a) \frac{1}{\frac{\partial q(U_a)}{\partial U_a}}. \quad (2.11)$$

考虑到 $\Delta U_a > 0$ 和 $\Delta q(U_a) > 0$, 幅度稳定条件可写成

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial q(U_a)}{\partial U_a} &< 0 \\ \frac{\partial(s_{cp} z_s k')}{\partial U_a} &< 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

或

从关系式 (2.12) 中看出, 振荡器振荡幅度的稳定性决定于微商

$$\frac{\partial q(U_a)}{\partial U_a} = \frac{\partial(s_{cp} z_s k')}{\partial U_a}$$

实际上可以认为 Z_s 和 k' 与振荡幅度无关, 于是幅度稳定条件可写成

$$\frac{\partial s_{cp}}{\partial U_a} < 0.$$

我们来研究第二个条件——满足频率稳定的条件。振荡频率由相位平衡方程式 (2.8) 确定。

在稳定状态下沿振荡电路 (由反馈电路、振荡系统和电子管所组成) 的相位移的总和一般为频率的函数, 它等于

$$\varphi(\omega) = \varphi'_k + \varphi_s + \varphi_s = 2\pi n \quad (2.13)$$

当原来频率 ω 上的相位平衡被破坏时, 函数 $\varphi(\omega)$ 有一附加的增量, 即

$$\varphi(\omega) = 2\pi n + \Delta\varphi$$

我們假定 $\Delta\varphi > 0$ 。

若系統对頻率是稳定的，則相位平衡重新恢复，但系統不是穩定在原来的頻率 ω 上，而是穩定在 $\omega + \Delta\omega$ 的頻率上，即

$$\varphi(\omega + \Delta\omega) = 2\pi n.$$

准确到二阶微量的函数增量 $\Delta\varphi(\omega) = \varphi(\omega) - \varphi(\omega + \Delta\omega)$ 等于

$$\Delta\varphi(\omega) = -\frac{\partial\varphi(\omega)}{\partial\omega}\Delta\omega.$$

若微商

$$\frac{\partial\varphi(\omega)}{\partial\omega} < 0, \quad (2.14)$$

显然，相位平衡可以恢复。

这一条件是确定振荡器频率（相位）稳定的条件。

在具有諧振系統的振荡器中，方程 (2.8) 中包含三个相角 φ'_k ， φ_s 和 φ_0 ，其中 φ'_k 和 φ_s 与頻率的关系較 φ_0 与頻率的关系要小得多，即

$$\left| \frac{\partial\varphi'_k}{\partial\omega} \right| \ll \left| \frac{\partial\varphi_0}{\partial\omega} \right| \text{ 和 } \left| \frac{\partial\varphi_s}{\partial\omega} \right| \ll \left| \frac{\partial\varphi_0}{\partial\omega} \right|.$$

在計算时，可略去微商 $\frac{\partial\varphi'_k}{\partial\omega}$ 和 $\frac{\partial\varphi_s}{\partial\omega}$ 于是頻率（相位）穩定条件

簡化为

$$\frac{\partial\varphi(\omega)}{\partial\omega} \approx \frac{\partial\varphi_0}{\partial\omega} < 0. \quad (2.15)$$

3. 定量估算不稳定因素对振荡器頻率的影响

我們来确定由于不稳定因素 α 所引起的振荡頻率变化，这里 α 可理解为溫度及电源电压变化，零件的机械变形等等。

当相角 φ'_k ， φ_s 和 φ_0 与 α 有关时，相位平衡方程可写成一般形式