

329602

成都工学院图书馆

基本馆藏

高频迴路不稳定性 的温度补偿

[捷] J. 普罗瓦兹 著



国防工业出版社

012
061

高頻迴路不穩定性的 溫度補償

[捷] J. 普罗瓦茲著

陳良生譯

李選良校



國防工業出版社

1965

內 容 簡 介

原书系捷克文，由苏联外文出版社于1960年譯成俄文出版。本书系由俄譯本“Температурная компенсация неустойчивости высокочастотных контуров”轉譯出版。

书中叙述了設計、計算稳定的高频迴路的基本問題。在讲述溫度对迴路元件参数的影响时，着重于物理概念方面。书中列有許多可供实际应用的計算公式，还列举了一些典型的溫度补偿綫路的計算实例。

本书可供工程技术人員和科学研究人員閱讀、参考。

TEPLOTNÍ KOMPENSACE KMITOČTU VYSOKOFREKVENČNÍCH OBVODŮ

[捷] Josef Provaz

PRAHA 1958

STÁTNÍ NAKLADATELSTVÍ
TECHNICKÉ LITERATURY

高频迴路不稳定性的溫度补偿

陈良生譯

李进良校

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第974号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168¹/₃₂ 印張5⁷/₈ 116千字

1965年8月第一版 1965年8月第一次印刷 印数：0,001—3,000册

統一书号：15034·941 定价：(科七) 1.00元

作者原序

对无线电通信系统、专用和业务通信用设备、无线电信标和急救电台工作可靠性的日益增长的要求，以及为了最大限度地提高无线电广播质量的迫切愿望，促使着无线电接收机和发射机的参数不断地改进。无线电广播、通信和电视向更高的频段上的过渡，提出了一系列问题，这些问题的解决不仅关系着工作的质量，而且决定着一定系统在此波段运用的可能性。

无线电通信系统可靠工作的最重要的条件之一，就是通信线路发送端和接收端的频率的高度稳定性。稳定性问题受到世界各国的重视，这一事实证明了它的重要性。国际无线电咨询委员会(CCIR)1956年华沙会议通过的对发送电台频率稳定度的新建议，是这一问题重要性的最明显有力的证明。这里所规定的新的频率稳定度条件比上次在大西洋城（美国）会议上所通过的大约要严格一倍多。

新的通信方法（其中有单边带、多路电报）的运用对通信线路接收端频率稳定度的要求显著地提高了。

无线电设备频率的稳定是一个复杂的问题。导致频率不稳定的最重要的因素之一，是温度变化对发射机的主控振荡器或超外差接收机的本机振荡器的回路元件参数的影响。在计算高质量振荡器时，通常最大注意力集中在频率的温度稳定性问题上。

作者写这本书的动机是希望描绘出有关达到给定频率稳定度的方法，正确的设计与制造回路元件的方法，以及有关旨在消除回路及元件中温度变化影响的补偿计算方法等的大致轮廓。温度补偿问题的完全解决，不仅要求叙述消除温度变化的不良影响的方法，而且要让读者认识这一问题的本质，分析由于温度变化而

4
造成的元件的电气和结构参数的改变，以及研究无线电设备线路中这个或者那个部分容许的温度不稳定的数值。

本书前两章研究温度关系，这是以后继续深入分析和解决补偿问题的基础。在其余的章节中，是讨论元件温度系数的计算、实现自身（自动）补偿和确定有温度补偿的回路总的频率温度系数的方法等问题。

从书名可以看出，本书不打算解决频率稳定的所有问题，也不打算讨论某些利用自动频率微调或用回路元件恒温等特殊方法来稳频的问题。上面提到的这些特殊方法并不排斥利用合理选择元件参数及其相互补偿的方法来稳频的必要性。这些方法的理论和实际应用问题都是值得特别注意的，但是它们的讨论已经超出了本书的范围。

书末列举了若干讨论温度补偿问题的书目。其中大部分都只是部分地涉及这个问题。作者认为，出版一本从解决线路不同组成部分容许的不稳定度开始，到计算补偿元件制造公差的极限值为止的、讨论这一问题所有方面的书籍，将会填补现有无线电工程书籍中这方面的空白。

J. 普罗瓦兹

1956 年于布拉格

俄譯本校閱者序

現代無線電技術的發展，要求在現有波段內容納最大限度數目的無線電台，要求建立抗干擾性很高的、無需尋找即可溝通聯絡的無線電信道。所有這些，必然導致對發射機中的主控振盪器和接收機中的本机振盪器的頻率穩定度提出越來越高的要求。

目前解決無線電設備頻率穩定度問題的基本方向有三：

- 1) 採用晶体穩頻的自激振盪器；
- 2) 採用自動頻率微調系統；
- 3) 採用普通類型的自激振盪器，其迴路中決定振盪頻率的元件具有很高的穩定度。

前兩種方法可以獲得極高的頻率穩定度，但它們也具有一系列的缺點。無論是第一種方法還是第二種方法，都只能在波段的一個頻率或若干個不連續的頻率上實現穩頻。並且，採用上述方法必將導致無線電設備的線路和結構顯著的複雜化，工作可靠性勢必下降。

應用第三種方法的優點是，實際上不需要複雜的自激振盪器線路即可在一個連續的頻率範圍內實現穩頻，但它要求製造高質量的、通常是特殊結構的元件和採用高質量的材料。

應當指出，在大多數場合下，這種或者那種穩頻方法之間並不是彼此排斥的，在採用了某一種穩頻方法的同時，還可以採用另一種穩頻方法。例如，採用自動頻率微調並不排斥穩定自激振盪器迴路參數的必要性，因為剩餘頻率誤差與起始失諧成正比，而與自動微調系統的調整系數成反比，後者隨着起始失諧可能範圍的減小而增大。

近年來窄頻帶通信系統得到了廣泛的應用，這樣，對發射機和接收機其餘各級中迴路的頻率穩定度就提出了越來越高的要

求。要使这种窄頻帶类型的通信（例如电报，单边帶通信，发送頻率的頻譜在动态压缩下的通信等）以及其他类型的通信設備能够正常地工作，充分發揮它們的优点，不仅要求自激振蕩器，而且也要求发射机的中間級迴路、接收机的高頻放大器与中頻放大器迴路具有很高的頻率穩定度。这些任务，实际上只有用第三种方法才能得到有成效地解决。

在造成振蕩迴路頻率偏移的原因中，占首要位置的是振蕩迴路中的元件参数由于溫度改变而引起的变化。我們不能同意作者的这样一种意見：与接收机的本机振蕩器相比，由于发射机的主控振蕩器工作于較窄的波段，因此，頻率溫度不稳定性只有在接收机中才有决定性的意义。其实，这样获得的溫度穩定性的好处則全部为发射机的不稳定性所抵消，因为发射机主控振蕩器的功率电平要比接收机本机振蕩器高 1~2 个数量級，并且它与后面各級电路有着相当强的耦合。

目前，自激振蕩器总的不穩定度的 70~90% 决定于溫度条件的改变。因此，无论对无线电发送設備还是对接收設備的技术來說，和溫度变化的影响作斗争是一项十分重要的任务。

由于在生产中运用新的高质量的材料和元件方面的巨大成就，目前已有可能在很多情况下利用参数稳定法将自激振蕩器的頻率穩定度提高到接近晶体振蕩器的水平。这一事实使得发展参数稳定法的这一方向更具有重大的意义。

对溫度穩定性問題最全面最系統的闡明发表于 C. C. 阿尔申諾夫的专著“电子管振蕩器頻率的溫度穩定性”（苏联国家动力出版社，1952 年出版）。目前这本书已成为文献中的珍品。尽管在这方面存在着迫切的需要，在上述著作发表后，八年以来，苏联文献中却未出現过具有同等价值的书籍。捷克斯洛伐克工程师 J. 普罗瓦茲論述振蕩迴路頻率溫度补偿問題的著作，在一定程度上可以弥补这个空白。該书在討論問題的深度和广度方面不及 C. C. 阿尔申諾夫的著作，书中很多地方引用了后者的材料。但是由于

該書在取材上選擇了最重要的課題，加之敘述簡明清晰，因而具有一定的價值，且便於廣大讀者應用。

按照推理順序，該書首先討論了振蕩迴路頻率的溫度穩定性的一般理論問題和振蕩迴路元件溫度系數的計算方法。然後在所得結論的基礎上闡述溫度補償的理論，說明獲得元件自身補償的一些方法。為了說明溫度補償的計算方法，書中若干章節的末尾列舉了很多計算實例。

雖然作者集中注意於解決無線電接收設備各級的溫度補償這一任務上，但是所得結論在研究無線電發送設備時也可以利用。

書中有許多有趣的新材料，利用這些材料可以使實際計算更為方便和準確。例如，採用單層電感線圈形狀系數的簡單近似表示法，可以計算當計及形狀系數改變時的溫度系數。

此外，有必要談談對書中個別論點的一些意見。

為了減小可變電容器電容溫度系數的變化，作者建議尽可能減小動片的轉角。採用這一建議時應十分小心，因為頻率覆蓋系數為給定時，動片轉角的減小會導致頻率準確度的降低。這樣造成的誤差在數值上可能超過由於減小電容溫度系數的變化而獲得的好處。

作者在書中好幾個地方斷言，空氣介質不會給電容器引入損耗。這一論斷不能認為永遠是正確的。在實際使用條件下經常會遇到這樣的情況，即當溫度、濕度急劇變化時，電容器的極片上將形成水膜或薄冰。這時電容器中的損耗將增加好幾倍。電容器結構零件上出現輝光放電時，損耗也會急劇增加。這是在很多情況下機器不得不採取密封、恆溫或利用吸濕器的原因之一。上述現象在工作條件比較惡劣（溫度差、濕度差和壓力差大）的航空設備中特別容易遇到。飛行高度增加時，击穿電壓下降達數倍之多，宇宙輻射的電離作用也加強了。

作者認為，當用一個電容器在波段的一點上實現溫度補償時，由於可變電容器溫度系數的變化，迴路頻率溫度系數的正負號在

波段的两端会改变，这个論断是不能令人信服的。虽然这种效应是存在的，但主要的、起决定作用的原因不在于此，而在于温度补偿电容器的电容量和迴路总电容量之間比例关系的改变。事实上，根据公式(120)，并联温度补偿綫路的总的温度系数

$$\beta = \frac{\beta_1 C_1 + \beta_2 C_2}{C_1 + C_2},$$

式中 β_1 ——可变电容器 C_1 的温度系数；

β_2 ——温度补偿电容器 C_2 的温度系数。

如果令迴路总电容量

$$C_1 + C_2 = C,$$

則不难得出：

$$\beta = \beta_1 + (\beta_2 - \beta_1) \left(\frac{C_2}{C} \right).$$

令电感綫圈的温度系数为 α ，得迴路频率温度系数的表示式

$$\gamma = - \frac{1}{2} \left[\alpha + \beta_1 + (\beta_2 - \beta_1) \frac{C_2}{C} \right].$$

温度补偿电容器的温度系数是負的，其数值較可变电容器的温度系数大 1~2 个数量級。遵守后一条件是必要的，因为只有这样才能使得补偿电容器的电容量远小于可变电容器的电容量，而不致明显地增加迴路的起始电容量。因此，虽然系数 β_1 在波段內是变化的，但差数 $\beta_2 - \beta_1$ 的符号是不变的，在迴路調諧过程中，迴路频率温度系数的最終符号将因第三項数值的改变而改变，第三項数值的改变是由于温度补偿电容器的电容量与迴路总电容量之間比例关系的改变而造成的。

由于本书篇幅有限，不允許作者进行推导和說明許多原始公式和半經驗关系式的来源。讀者如果对这些問題深感兴趣，可参考 C. C. 阿尔申諾夫的专著。

Д. 林捷 (Линде)

目 录

作者原序	3
俄譯本校閱者序	5
第一章 高频迴路的頻率稳定度	11
§ 1 頻率稳定度与溫度变化的关系	11
§ 2 对高频迴路稳定度要求的分析	12
第二章 固体参数溫度关系的物理基础	25
§ 1 固体受热时尺寸的增大	25
§ 2 高频迴路溫度系数的一般定义	27
§ 3 零件尺寸的溫度关系	34
§ 4 介电常数的溫度关系	42
§ 5 磁导率的溫度关系	42
§ 6 金屬有效电阻的溫度关系	43
第三章 迴路元件溫度系数的計算	45
§ 1 电感溫度系数的計算	45
§ 2 电容器电容溫度系数的計算	73
第四章 迴路元件溫度系数的补偿	101
§ 1 电感溫度系数最小的綫圈的制造工艺	101
§ 2 綫圈溫度系数的自身补偿	106
§ 3 随着頻率的变化电感溫度系数的改变	108
§ 4 溫度系数最小的电容器的制造工艺	109
§ 5 电容器溫度系数的自身补偿	110

第五章 迴路的頻率溫度系数 114

- §1 迴路頻率溫度系数的定义 114
- §2 电容器混联时总的溫度系数 114
- §3 电感綫圈混联时的溫度系数 117
- §4 不同类型迴路的总的頻率溫度系数 118
- §5 复杂綫路溫度系数的計算举例 120

第六章 頻率溫度补偿的理論和計算 122

- §1 頻率溫度补偿的基本方程式 122
- §2 具有固定調諧頻率的高頻迴路 123
- §3 迴路在連續波段內的溫度补偿 125
- §4 当电感溫度系数取决于頻率时的溫度补偿 149
- §5 用可变电感調諧的迴路的頻率溫度补偿 156
- §6 波段两端具有相同頻率偏移的溫度补偿 157
- §7 对溫度补偿理論的簡評 158

第七章 溫度补偿时迴路頻率溫度系数沿整个波段的变化 ... 160

- §1 頻率溫度系数变化特性曲綫的确定 160
- §2 迴路元件的制造公差对頻率溫度系数变化特性的影响 166
- §3 寄生电容及其溫度系数对溫度补偿质量的影响 168
- §4 用可变溫度补偿元件来保証必需的頻率溫度系数 169

第八章 溫度系数的測量 170

- §1 零件溫度系数的測量 170
- §2 頻率溫度系数的測量 175
- §3 溫度系数的循环性和直綫性的測量 177

第九章 其他一些保証高頻迴路頻率溫度穩定度方法的探討... 178

附录:

- 书中公式 (98) 及相应結論的論证 179
- 参考文献 181
- 补充参考文献 182

第一章 高頻迴路的頻率穩定度

§ 1 頻率穩定度與溫度變化的關係

調諧迴路的諧振頻率決定於組成該迴路的電容量和電感量，其間的關係就是大家所熟悉的湯姆遜(TOMCOH)公式。迴路的一個或者兩個參數由於任何原因的作用引起了變化，都將導致諧振頻率的改變，只要這時下列的乘積不是常數

$$L_1 C_1 = (L_1 \pm \Delta L) (C_1 \mp \Delta C)。 \quad (1)$$

式(1)中的 ΔL 和 ΔC 分別表示電感和電容的增量。

調諧迴路應當具有一定的穩定性，即調諧頻率的不變性。這種穩定性應當由迴路電感和電容的恒定性來保證。如果無法消除迴路元件參數發生變化的原因，則應當使變化這樣來進行：即保持方程式等號兩邊的乘積的數值不變。因此，迴路元件應當這樣來選擇和製造，即當受到溫度變化的影響時，其數值的變化應尽可能地小或者能夠相互補償。

參數變化的絕對補償是做不到的。根據對機器提出的其他方面的要求，通常允許調諧頻率在受到某些外來因素的作用時，有一定的偏移。當機器受到振動、絲壓或板壓改變、氣壓或濕度改變以及當環境溫度改變時，總是要產生這樣或者那樣的頻率偏移。

在設計穩定的振盪器、窄帶濾波器和中頻放大器的迴路等部件時，必須考慮一系列的因數，迴路元件參數的溫度不穩定性是其中最重要的因數之一，它是頻率溫度不穩定性的根源。

需要的頻率穩定度定義為以絕對值或相對值表示的頻率最大容許偏差。頻率相對變化則以頻率絕對變化對規定頻率的百分數來表示。同時要規定在什麼溫度變化範圍之內應當保證給定的頻

率稳定度。

这样，对温度稳定度的要求完全可以用下列三种方法之一来表达：

1) ± 20 赫/°C，温度变化范围为 $+20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ；

2) $\pm 0.02\%$ ，温度变化范围由 $+15^{\circ}\text{C}$ 至 $+25^{\circ}\text{C}$ ；

3) $\pm 2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，温度变化范围为 $+15^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C}$ ●。

在规定的温度范围以外，由于回路参数不可能在 a —未经补偿的回路； b —已经补偿的回路。一个很宽的范围內保持恒定的直线性温度关系，通常稳定度要下降。当然，规定的温度变化范围通常和设备可能的工作条件是吻合的，如果要求保证能够按照给定的稳定度可靠地工作，则有必要限制温度在一定的范围内变化。

在分析回路各个元件的温度关系和分析减小温度对回路频率影响的可能性之前，必须先讨论一下工作于无线电设备不同级中的回路，它们的谐振频率变化的影响。下面进行的分析使得我们有可能确定各种不同高频回路容许的不稳定度。这样，只要知道回路各个元件参数的温度关系，就可以决定在不同的具体情况下，需要不需要温度补偿。

§2 对高频回路稳定度要求的分析

1. 无线电接收机的输入回路

如果为了保证足够的选择性起见采用了若干个高频放大级或

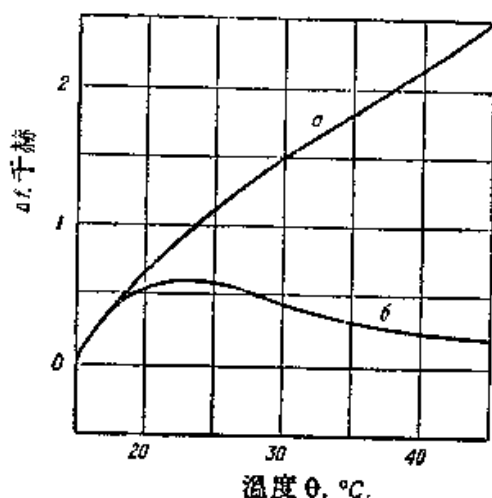


图1 当温度 θ 变化时，回路的频率变化 Δf ：
 a —未经补偿的回路； b —已经补偿的回路。

● 原文为 $+15^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 。——校者

輸入帶通濾波器，那麼，當它們的迴路的諧振頻率改變時，將會破壞其與本机振盪迴路的精確跟蹤。同時，接收到的信號將受到一定程度的衰減，特別是當接收微弱信號時，信號噪聲比要下降。這種情況還會降低假象波道的衰減，增加出現干擾嘯聲和交擾調制的可能性。

我們用輸入迴路諧振頻率如下的變化作為容許的迴路溫度不穩定度的標準：在這種變化之下產生的對接收信號的衰減，還能夠正常地接收相當於該型接收機靈敏度的最微弱的信號。

例如，接收機的靈敏度在噪聲相對電平為 10 分貝時應為 1 微伏，實測表明，調諧好的接收機噪聲相對電平為 12 分貝，那麼，只要迴路的失諧不會使輸入信號的衰減超過 2 分貝，都認為是容許的。輸入迴路的這種失諧不會降低接收機的靈敏度。應當指出，這一推論只有對所謂輸入電壓的直線性範圍、當接收機的放大量恒定时，亦即當噪聲電平與信號電平無關時，才是完全正確的。實際上，輸入迴路的失諧與噪聲電平的改變之間的关系是很複雜的。

假設，由於溫度作用引起輸入迴路失諧而造成的信號最大衰減為 a 。根據迴路失諧時的衰減方程式

$$a = \sqrt{1 + \beta^2 Q^2}, \quad (2)$$

當迴路失諧 β 比較小時，得

$$\beta = \frac{2\Delta f_c}{f} = \frac{\sqrt{a^2 - 1}}{Q},$$

由此

$$\frac{\Delta f_c}{f} = \frac{\sqrt{a^2 - 1}}{2Q}. \quad (3)$$

實際上，在採用溫度系數很小的質量元件的情況下，無補償迴路的不穩定度約為 $0.025\%/1^\circ\text{C}$ 。圖 2 示出了在單迴路的情況下，當容許值 Δa 和 Q 給定時，必須進行補償的範圍。在大多數情況下，在具有中等質量因數的線圈的單輸入迴路中，是不需要進行溫度補償的。

当对接收机的质量要求较高时（例如干线通信用的接收机），必须在混频器前采用两个或者数目更多的回路。在具有若干个高频回路的情况下，信号总的衰减决定于单回路的衰减之总和。为了简化，假设所有回路的质量因数均相同。在采用三级高频回路以及总的容许衰减为 a 的情况下，每一个回路的衰减应为

$$a_1 = \sqrt[3]{a},$$

根据式(3)得

$$\frac{\Delta f_c}{f} = \frac{\sqrt{a^{2/3} - 1}}{2Q}. \quad (4)$$

当 $Q = 200$ ● 和 $a = 1.41$ （对于温度每变化 10°C ）时，容许的频率不稳定度为 $0.025\%/1^\circ\text{C}$ 。

在高质量的接收机中， $Q > 100$ ，并且容许的总衰减不得超过 2 分贝（特别是当接收微弱信号时）。应当注意，甚至在信号比较微弱的情况下，自动增益控制系统也能工作，这将破坏输入和输出信号之间的直线性关系。这就意味着，当信号由于衰减增加而减小 2 分贝时，输出的信噪比将下降 2 分贝以上。

可见，采用没有温度补偿的输入回路，至少在大多数的情况下不会显著的降低接收质量。只有在设计干线通信用的接收机时，才需要考虑输入回路的温度不稳定性。

2. 中频放大器回路

中频放大级中采用两个或者更多数目的谐振回路，这些回路

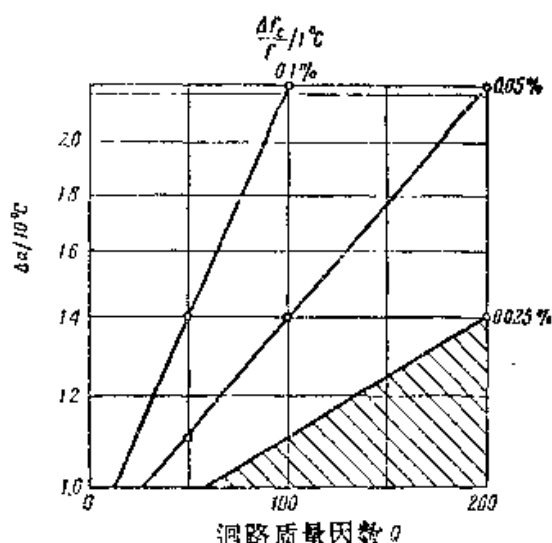


图2 当衰减 Δa 和回路质量因数 Q 给定时，输入回路必须补偿的范围。

● 原文为 $Q = 100$ 。——校者

保証着放大器給定的選擇性（它決定于合成諧振特性曲線）。中頻放大器諧振曲線表明，在一定的頻率範圍（即所謂通頻帶）內衰減很小，而在通頻帶範圍以外衰減則尽可能地大或者等于某個給定的數值。中頻放大器的自然頻率就是通頻帶的中心頻率，放大級的諧振迴路就調諧在該頻率上。

圖3示出了中頻放大器的理想頻率特性曲線（曲線a）和實際頻率特性曲線（曲線6）。這里還畫出了調諧在同一頻率上的單迴路的諧振曲線（曲線b）。此時，單迴路和中頻放大器的耦合迴路具有相同的质量因數。

中頻放大器的主要參數是通頻帶和選擇性。我們稱這樣一個

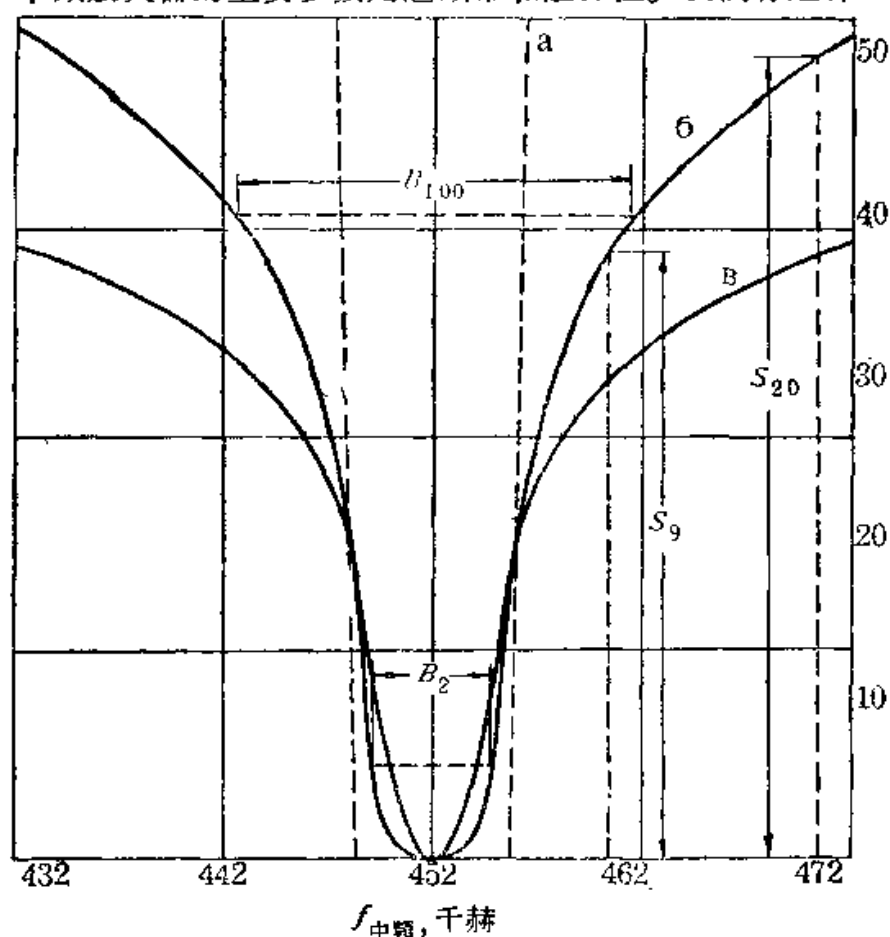


圖3 中頻放大器的選擇性曲線：
a—理想曲線；6—實際放大器的諧振曲線；
b—單迴路的諧振曲線。

頻率範圍叫做中頻放大器的通頻帶：在此範圍的兩端頻率上，衰減不應超過某一給定的數值；而選擇性則用在一定失諧下工作時的衰減來表征。

例如，通頻帶 $B_2 = 6$ 千赫，這就意味着，在 $f_{\text{中頻}} \pm 3$ 千赫的頻率上，和中頻 $f_{\text{中頻}}$ 比較，放大減小了一半。因此，在該頻率上的衰減等於 6 分貝。同樣，通頻帶 $B_{100} = 20$ 千赫的意思是，在頻率 $f_{\text{中頻}} \pm 10$ 千赫上，衰減為 40 分貝。

選擇性可以這樣來表示，例如 $S_9 = 38$ 分貝，這就是說，在 $f_{\text{中頻}} \pm 9$ 千赫的頻率上，信號衰減為 38 分貝。通頻帶 B_2 和 B_{100} 以及選擇性 S_9 和 S_{20} 的意義示於圖 3 ●。

比較一下曲線 δ 和 ϵ ，不难看出，對於失諧時的衰減來說，中頻放大器的耦合迴路和單一的輸入迴路是顯著不同的。

為了確定容許的溫度不穩定度，首先必須研究一下當中頻迴路的諧振頻率改變時將會造成什麼樣的後果。中頻放大器的通頻帶由必需通過的調制頻率的頻譜所決定，頻譜中的兩個端界頻率應當以最小容許的衰減通過中頻放大器。因此，通常取 $B_2 > 2f_{\text{最大}} \text{●}$ ，這裡 $f_{\text{最大}}$ 為最高調制頻率，此頻率通過放大器時應當沒有明顯的衰減。中頻放大器諧振頻率的改變，將使頻譜的兩個端界頻率受到不均勻的衰減和出現附加的相移。這樣造成的失真可能大大超過對機器容許的總要求。

中頻放大器的選擇性對於保證給定的對發射機鄰近波道信號的抑制是必需的。這種對干擾信號的抑制應當達到這樣的程度，即在接收微弱電台的信號並且當接收機的增益最高時，鄰近干擾信號應當受到足夠的抑制，諧振頻率的偏移使得對鄰近信號的抑制減弱到如此程度，以致接收機的輸出端可能出現干擾信號的最高調制頻率。

由於溫度變化使得迴路諧振頻率偏移而出現的兩種現象示於

● 原文與圖 3 不符，圖、文均有誤，已予改正。——校者

● 原文為 $B_2 > f_{\text{最大}}$ 。——校者