

雷 达 技 术 小 丛 书

增 益 調 整 和
自 动 頻 率 控 制

М. А. 莫托利切夫著



國防工業出版社

增益調整和自动頻率控制

И. А. 莫托利切夫著

赵永昌译



國防工業出版社

內容簡介

本書系苏联軍事出版社出版的“雷達技術小叢書”之一。

本書敘述了現代雷達接收機的自動調整基本原理，以及在自動增益調整和自動頻率控制電路中的物理過程。

本書可作操作雷達機工作人員的參考書；也可供廣大的希望了解雷達站部件的讀者作參考。

苏联 И. А. Моторичев 著 ‘Регулировка усиления в АПЧ’
(Всениздат 1958 年第一版)

*

國防工業出版社出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 号
機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

*

787×1092¹/₃₂ 2¹³/₁₆ 印張 58 千字

1959 年 10 月第一版

1959 年 10 月北京第一次印刷

印數：0,001—2,500 冊 定價：(10) 0.38 元

NO. 3083

目 录

前言	4
增益調整的一般問題	5
接收机的增益系数 (5) —— 增益調整的必要性 (7) ——	
增益調整器的作用原理 (8) —— 电子管的栅極特性曲綫 (8)	
—— 放大級的增益系数 (10) —— 增益調整的方法 (12) ——	
对于增益調整器的要求 (13)	
手动增益調整	18
改变控制栅極上偏压的增益調整 (19) —— 改变帘栅極电压的	
增益調整 (22) —— 改变屏極电压的增益調整 (23) —— 改变	
抑制栅極电压的增益調整 (23) —— 視頻級中的增益調整 (24)	
自动增益調整	25
自动增益調整的必要性 (25) —— 自动增益調整电路的作用原	
理 (26) —— 簡單的自动增益調整电路 (28) —— 延迟自动	
增益調整电路 (30) —— 放大式延迟自动增益調整电路 (31)	
—— 具有时间选择回路的自动增益調整电路 (34) —— 自动增	
益調整电路的滤波器用途和时间常数 (36) —— 瞬时的自动增	
益調整 (38) —— 增益自动随时調整 (43) —— 自动增益調	
整还是手动增益調整 (46)	
自动頻率控制	47
破坏頻率稳定性的原因 (47) —— 自动頻率控制的必要性 (49)	
自动頻率控制的作用原理 (50) —— 自动頻率控制电路的分	
类 (51) —— 自动頻率控制电路的灵敏元件 (54) —— 鑿頻	
器輸出回路的时间常数 (62) —— 反射式速調管 (63) ——	
自动頻率控制电路的調整設備 (66) —— 自动頻率控制电路特	
性的比較 (86)	

前 言

近代的无綫电接收机是复杂的設備。其中除去完成接收机基本任务（接收信号的放大和变频）的很多級以外，还有保証基本的各級（也就是整个无綫电接收机）正常工作的附加系統。首先，增益調整系統、自动頻率控制系統和电源工作状态的調整系統都屬於这个系統。

本書中主要將討論两种系統〔接收机中的增益調整(PY)和自动頻率控制 (АПЧ)]的工作。

根据接收机(雷达接收机、广播接收机、电视接收机等等)的用途，增益調整和自动頻率控制系統的設備可能各不相同。这里主要討論雷达接收机的增益調整和自动頻率控制設備。

增益調整的一般問題

接收机的增益系数

通常，雷达接收机是超外差型式的。米波段雷达接收机基本的各級表示在圖 1 的方框圖中。

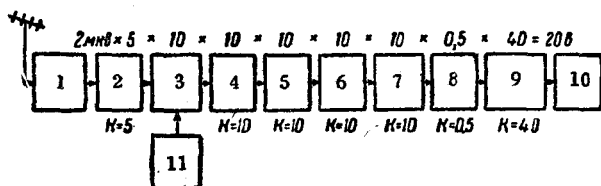


圖 1 米波段雷达接收机的方框圖：

- 1—輸入設備；2—高頻放大器；3—混頻器；4—第一中頻放大器；5—第二中頻放大器；6—第三中頻放大器；7—第四中頻放大器；8—檢波器；9—視頻放大器；10—負荷；11—本地振蕩器。

假設天綫所接收的反射信號，在接收机的輸入端產生約為 2 微伏的電壓，而高頻放大器具有增益系數

$$K_{\text{ВЧ}} = \frac{U_{\text{ВЧХ}}}{U_{\text{ВЧ}}} = 5。$$

那麼，在放大器輸出端，接收信號將有五倍大的電壓振幅，即 $U_{\text{ВЧ}} = 2 \times 5 = 10$ 微伏。這個電壓送到電子管混頻器的控制柵極上。

在混頻器中，由於兩個不同頻率（信號頻率和外差頻率）的電壓的聯合作用，接收到的超高頻信號變換成較低的頻率，即所謂的中頻。這時，電子管混頻器也放大接收信號。假設，

混頻器的增益系数 $K_c = 10$ ，則显然，混頻器輸出端的电压振幅
 $U_c = 10 \times 10 = 100$ 微伏。

以后，中頻信号送到几个串联的中頻放大器 (УПЧ)，在这些放大器中实现接收机的主要增益。假定，接收机仅有四个中頻放大級，其中每一級的增益系数等于10。則送到第一級中頻放大器輸入端的电压为 100 微伏的信号，在它的輸出端产生 $U_{1\text{УПЧ}} = 100 \times 10 = 1000$ 微伏的电压。这个电压被第二級中頻放大器放大 10 倍，且在第二級的輸出端，信号电压的振幅 $U_{2\text{УПЧ}} = 1000 \times 10 = 10000$ 微伏。在第三級中頻放大器輸出端 $U_{3\text{УПЧ}} = 10000 \times 10 = 100000$ 微伏，而在第四級放大以后， $U_{4\text{УПЧ}} = 100000 \times 10 = 1000000$ 微伏，即 1 伏。

在雷达接收机中通常采用二極管檢波器，信号在檢波器中檢波以后，信号振幅减小。假設，檢波器的傳輸系数 $K_A = \frac{U_{\text{ВМХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 0.5$ 。則电压 $U_A = 1 \times 0.5 = 0.5$ 伏，将送到視頻放大器的輸入端。如果視頻放大器所有各級的增益系数 $K_{\text{ВЧ}} = 40$ ，則在接收机輸出端的电压振幅达到 $U_{\text{ВМХ}} = 0.5 \times 40 = 20$ 伏。

因此，当在接收机輸入端的反射信号具有电压振幅为 2 微伏时，由于放大，在它的輸出端可达 20 伏。知道接收机輸出端的电压 $U_{\text{ВМХ}}$ 和它的輸入端的电压 $U_{\text{ВХ}}$ 以后，不难計算出整个接收机放大多少倍，即决定接收机的总增益系数。

接收机的輸出电压与輸入电压之比叫做整个接收机的增益系数 $K_{\text{ПР}}$

$$K_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ВМХ}}}{U_{\text{ВХ}}}。$$

对于上面討論的实例

$$K_{\text{ПР}} = \frac{20 \text{ 伏}}{2 \text{ 微伏}} = \frac{20000000}{2} = 10000000。$$

整个接收机的增益系数决定于各級的增益系数且等于它們

的乘积

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{увч}} K_{\text{с}} K_{1\text{упч}} K_{2\text{упч}} K_{3\text{упч}} K_{4\text{упч}} K_{\text{д}} K_{\text{вво}}$$

从上面的公式中可看出，整个接收机的增益系数主要决定于中頻放大級的增益系数。

增益調整的必要性

当雷达机工作时，由于雷达机作用区域内的空中情况連續地改变着，彼此間电压显著不同（几万倍）的脉冲送到接收机的輸入端。有从远离 100~150 公里的目标和远离 5~10 公里的目标来的。信号送到接收机的輸入端；同一目标（例如飞机）可以連續地改变它至雷达机的距离；在雷达机的作用区域内可能出现固定的目标，它們也位于离开雷达机的不同距离处；此外，无线电波傳播的条件也可能改变等等。

假定这样来选择接收机的增益系数，使得在阴極射綫管的螢光屏上产生由距离雷达机 100 公里的目标来的正常脉冲。如果观测員需要監視在距离雷达机 10 公里处飞过的目标，則从这个目标反射来的信号将在接收机的輸入端产生很大的电压。在这个电压作用下，就能使接收机过荷或在阴極射綫管的螢光屏上产生难以确定座标讀数的脉冲。而在輸入信号的强度变化时，由于激烈的《冲击》和目标运动加速度的急速改变而使系統（例如，自动跟踪系統）不能工作。

因此，为接收弱信号所必須的增益不仅是过度的，而且在接收强信号时这增益也是有害的。同时，只考虑接收强信号的增益，而将接收机做成低灵敏度的，这种接收机将不能接收弱信号。为使同一接收机既能接收强信号，也能接收弱信号，必須考慮到的增益調整

增益調整器的作用原理

接收机的增益可以用手动的或自动的方法，通过专用的设备（系统）——增益調整器来調整。增益調整器改变接收机的增益系数，在接收强信号时减小增益系数和接收弱信号时增大增益系数。

增益調整器的作用原理是在某种程度上减小接收机的最大增益系数。它的工作可以部分地和列車的制动器的作用相比较。假设，沒有制动的列車發揮最大的速度 100 公里/时。利用制动器，这个速度可以規定 30 公里/时；减小制动，它可以达到 50~80 公里/时等等。但制动器不可能将列車的速度增加到 110 公里/时。这和增益調整器是同样的。增益調整器按制动的原理工作。因此，增益調整器連接在电路中即使在接收很弱的信号时增益系数也有些减小，这問題也是我們所不希望的。

电子管的柵極特性曲綫

大家知道，在电子管的控制柵極上的电压改变时，屏流也改变。这种关系通常用曲綫来表示。在屏压 U_a 不变时，表示电子管的屏流 I_a 与控制柵極上电压 U_g 变化的关系曲綫叫做电子管的柵極特性曲綫。它通常这样来表示：

$$I_a = f(U_g)$$

每一种类型的电子管都随它的结构和电极上的电压不同，而有它自己的柵極特性曲綫。柵極特性曲綫彼此間的区别首先是互导 S 。

屏流的增量 ΔI_a 与产生屏流增量的柵压增量 ΔU_g 之比叫做互导 S ：

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} = \frac{I_a' - I_a''}{U_g' - U_g''}$$

如果柵極的綫匝繞得稀疏或綫匝离开阴極較远 (圖 2, a), 則柵極的作用減弱, 柵極上 1 伏电压的改变导致較小的屏流改变和电子管具有較斜的特性。它的互导

$$S = \frac{15-12}{2-1} = 3 \text{ 毫安/伏。}$$

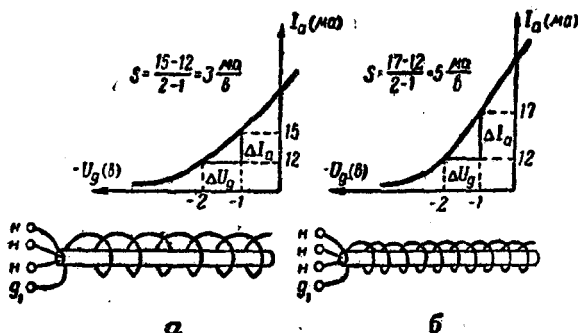


圖 2 互导和电子管柵極結構的关系。

如果电子管具有密繞的柵極或它的綫匝分布位置接近阴極 (圖 2, b), 則柵極的作用加强, 柵極上同样 1 伏的电压变动会导致較大的屏流改变和电子管具有較陡的特性。它的互导

$$S = \frac{17-12}{2-1} = 5 \text{ 毫安/伏。}$$

我們的工厂生产出具有可变互导的特殊电子管 (6K7, 2K2M 等等)。利用下列各种不同結構的控制柵極可以得到这样的特性:

具有变化的綫匝間距 (圖 3, b);

具有不同的綫匝直徑 (圖 3, c);

在均匀纏繞的柵極中点具有一匝的切口 (圖 3, d)。

可变互导电子管工作的实质在于，根据控制栅极上的负电压数值得到可变的比值 $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$ 。例如，在具有变化的线圈间距的控制栅极加上小的负电压（-5 伏）和电压在不大的范围内改变着，则从阴极到屏极的电子通过所有的、大间距的和小区段的栅极区段。电子管工作在特性曲线的陡峭部分上。在大的负电压（-15 伏）送到这个栅极上时，具有小的线圈间距的栅极区段不能通过电子，因此，不是整个的栅极，而仅是它的

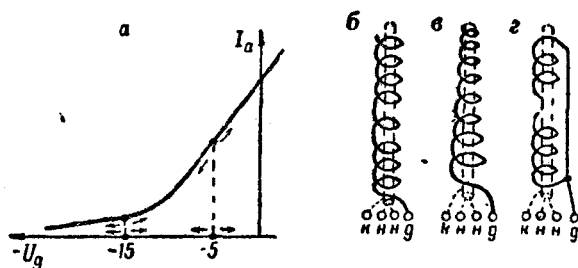


圖 3 变互导的电子管的特性和控制栅极结构的各种型式。

具有大的线圈间距的区段控制屏流的数值。电子管工作在特性的倾斜部分。

在增益调整电路中，利用变互导的电子管是很合适的。

放大级的增益系数

上面已经表明，整个接收机的增益系数等于它的各级的增益系数的乘积。因此，可以用调整各级的增益系数的方法来改变整个接收机的增益。

为使放大级（圖 4, a）的工作没有畸变和栅流，由电阻 R_k 将在电子管的控制栅极上产生负偏压 $-E_g$ ，负偏压将起始工作

点 a 移到栅極特性曲綫左边部分的范围內 (圖 4, б)。为减小高频电流部分的損失, 用电容器 C_6 将电阻 R_k 旁路。由栅極特性曲綫可以看出, 在 $E_g = -2$ 伏时, 电子管屏流 $I_a = 10 \mu a$ 。

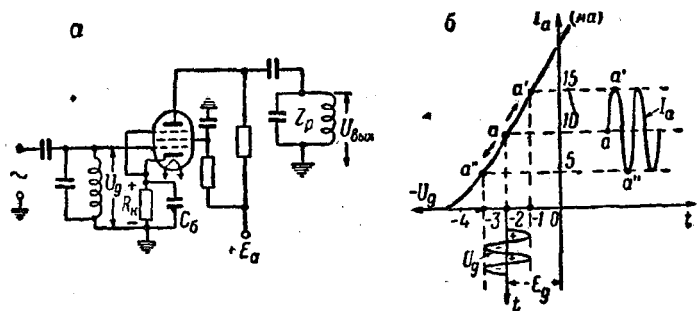


圖 4 放大級的电路圖(a)和說明它工作原理的曲綫(б)。

假設, 交变信号电压 U_g 加到这个电子管的控制栅極上, 它的振幅等于 1 伏。屏流 I_a 的交变分量将在屏極回路中流过, I_a 通常表示成和栅極特性曲綫在一起的曲綫 $I_a = f(t)$ 。加到栅極的电压 U_g 愈大和电子管的互导 S 愈大, 則屏流 I_a 的交变分量愈大 (圖 5)

$$I_a \approx S U_{g0}$$

屏極回路中的回路調諧到与外加电压諧振, 因此, 对于調諧頻率来說, 回路是純电阻 Z_p , 通过回路的屏流 I_a 在其上产生电压降

$$U_K = I_a Z_p = U_{BHX},$$

它是該級的輸出电压。如在后一等式中用 I_a 的数值代替电流 I_a , 則得到

$$U_{BHX} = I_a Z_p = S Z_p U_g = S Z_p U_{Bx0}$$

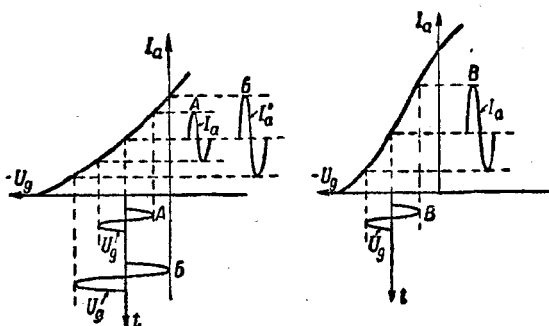


圖 5 屏流 I_a 的交变分量与栅压 U_g 和互导 S 的关系。

等式两边用 U_{BX} 来除，得到

$$\frac{U_{BIX}}{U_{BX}} = \frac{SZ_p U_{BX}}{U_{BX}};$$

因为

$$\frac{U_{BIX}}{U_{BX}} = K,$$

则

$$K = SZ_p.$$

这样一来，电子管的互导 S 和回路的谐振电阻 Z_p 愈大，则接收机高频级的增益系数愈大。因此可以得出结论，可用改变电子管的互导 S 和回路谐振电阻 Z_p 的方法来调整该级的增益。

增益调整的方法

应当指出，用改变回路谐振电阻 Z_p 的方法来调整增益，在雷达接收机中几乎从未用过，因为在此情况下，被调整回路原来就不足的质量因数变得更差。因此，通常借改变电子管的互导 S 来调整增益。

以五极管为例，我们讨论电子管电极上电压的改变对互导 S 改变的影响。

假定，在五極管中我們規定屏極直流电压 $U_a = 200$ 伏，而帘栅極直流电压 $U_{g2} = 140$ 伏且改变控制栅極上的电压 U_{g1} ，画出栅極特性曲綫 a (圖 6)。为了看出屏压改变的影响，将屏压减小到 $U'_a = 160$ 伏，而帘栅压仍为同一数值 ($U_{g2} = 140$ 伏)。改变电压 U_{g1} ，作出栅極特性曲綫 b 。为了看出帘栅压改变的影响，将它减小到数值 $U'_{g2} = 100$ 伏且用同样的方式作出另外二个栅極特性：在 $U_a = 200$ 伏时——曲綫 c 和 $U'_a = 160$ 伏时——曲綫 d 。

从得到的栅極特性曲綫族中，得出結論：

同一特性的互导不是固定的，它取决于控制栅極上的电压 (在綫段 1 上的互导比綫段 2 上的大)；

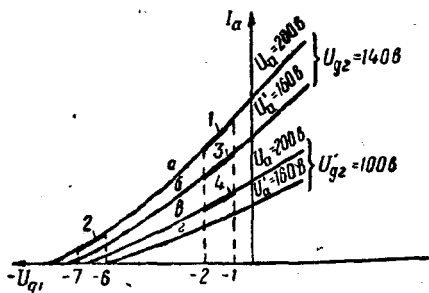


圖 6 互导和五極管工作状态的关系。

互导取决于屏压 (在綫段 1 上的互导比綫段 3 上的大)；

互导取决于帘栅極上电压的改变 (在綫段 1 上的互导比綫段 4 上的大)；

减小 U_a 或 U_{g2} ，将使特性曲綫向右和向下《移动》。

因此，改变控制栅压、帘栅压或屏压，可以調整互导 S ，也就是說，調整增益系数。

对于增益調整器的要求

增益調整器应当防止接收机的过荷。当輸入电压 U_{bx} 提高到某一电平时，虽然增加輸入电压，但輸出电压停止增加且甚

至开始减小，接收机的这种状态即理解为过荷（圖 7）。接收机的过荷是由一級或几級放大級的过荷所产生的。过荷可以这样来说明，在强脉冲的情况下，放大器栅極回路中由于电子的重新分配产生大的栅流；这时屏流减小，因而减小了該級的輸出电压。栅流使栅極回路中的所有电容器充电，增加了栅極的負偏压和显著地减小（到零）了該級的增益。然后，在强脉冲停止后，电容器开始通过电阻按指数規律放电。这时，栅極上大的負偏压将在这样的电平下保持某些時間，在該电平下弱信号不能通过。

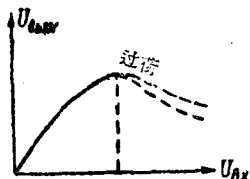


圖 7 放大器的过荷特性。

增益調整器不应当减小比值 $\frac{U_{\text{char}}}{U_{\text{ш.г.м}}}$ 。在雷达技术中，《噪声》的名詞是从听觉接收的領域中轉移过来的。在超短波波段中，接收机的內部噪声是主要的，噪声是由电流沿导綫和阻抗的不均匀流通所引起的。由于散粒效应，电子在带有正电荷的栅極間重新分布等等的結果，电子管屏流的波动是不均匀性的主要原因。这些偏差（起伏）在負荷上产生自己的电压，它們由接收机放大后，在阴極射綫管的螢光屏上产生不規則的輝点的偏轉（草），反射脉冲在此背景上被观测出来。

如果接收机輸入端的信号振幅等于噪声的振幅，則和噪声得到相同的放大后，有用的信号可能消失。在調整时，信号电压不应低于噪声的电平。

增益調整器不应当在被接收的信号中引入畸变。畸变多半是由于不正确的选择放大电子管的工作状态所引起。

增益調整器应当勻調地改变和在接收机的輸出端产生所需的电压，如果必要的話，并維持此电压之值不变。

根据这些要求，我們来討論在哪些級中調整增益是合适的，多少級应当受到調整和調整电压应当作用在哪些电極上。

主要是两个因素影响到調整級的选择：

防护接收机（也就是各級）避免过荷；

保持最有利的比值 $\frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\text{шум}}}$ 。

防护接收机避免过荷的必要性需要調整最接近于接近机輸入端的各級。例如，假定过荷有威胁第三以及后面的所有中頻放大級的可能，則增益調整应从第三中頻放大級开始；如果第二中頻放大級可能过荷，則增益調整应从第一中頻放大級开始，依此类推。

但不要忘记，增益調整器不应当使接收机中的比值 $\frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\text{шум}}}$ 变坏。信号电压与噪声电压的比值愈大，在接收机輸出端愈容易分辨出信号和整个接收机的工作愈有效。我們已經指出，增益調整系統的作用归結于在某种程度上减小有效信号 $U_{\text{сигн}}$ 的振幅。大家也知道，在接收机中比值 $\frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\text{шум}}}$ 的数值主要是取决于第一个电子管的工作：第一个电子管的噪声愈大，这个比值愈小。如果在第一个电子管的一定的噪声电压 $U_{\text{шум}}$ 的情况下，調整它的增益系数，减小 $U_{\text{сигн}}$ ，則比值 $\frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\text{шум}}}$ 可能得到不利的数值。因此，接收机第一級中的增益調整是不合适的。

应用上述的原則来討論下列具有不同輸入級电路的三个接收机的实例：

用于工作在 1000 兆赫以下的頻率并具有一个或二个高頻放大級的接收机（圖 8, a）；

用于工作在比 1000 兆赫高一些的頻率和在輸入端具有电子管混頻器（沒有高頻放大級）的接收机（圖 8, б）；

輸入端具有晶体混頻器的厘米波段接收机（圖 8, в）。

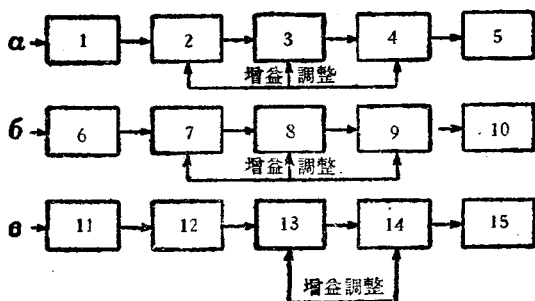


圖 8 各種頻段的接收機的增益調整器的位置：

a—具有高頻放大器的接收機；*b*—輸入端具有電子管混頻器的接收機；*B*—輸入端具有晶體混頻器的接收機。

1—高頻放大器；2—混頻器；3—第一中頻放大器；4—第 *n* 中頻放大器；5—檢波器；6—電子管混頻器；7—第一中頻放大器；8—第二中頻放大器；9—第 *n* 中頻放大器；10—檢波器；11—晶體混頻器；12—第一中頻放大器；13—第二中頻放大器；14—第 *n* 中頻放大器；15—檢波器。

在具有高頻放大器的接收機中，尤其是如果高頻放大級的數目大於一時，為避免過荷起見，增益調整應從第二高頻放大級或電子管混頻器開始。

在那些沒有高頻放大級和電子管混頻器是第一級的接收機中，增益調整通常是從第一中頻放大級開始。因為混頻器在增加信號振幅的同時，也將噪聲的振幅增加到這樣的程度，使得第一中頻放大級的噪聲已經沒有決定的意義，只須要避免產生過荷。

在輸入端具有晶體混頻器（為了減小固有噪聲）的厘米波段接收機中，增益調整從第二中頻放大級開始，因為晶體混頻器本身過荷比它的輸出電壓可能使第一中頻放大級過荷要早。此外，在通過頻帶為幾兆赫的中頻放大器中，第一級的增