

第3章

高频小信号放大器

在通信系统中，高频小信号放大器用来从众多的无线电信号中选出需要的频率信号并加以放大，同时对其他无用信号、干扰与噪声进行抑制。高频小信号放大器具有多种电路类型，由三极管和 LC 单振荡电路组成的调谐放大器是高频小信号放大器最基本的形式。

本章主要介绍高频小信号放大器的分类及主要技术指标，高频小信号放大器电路的组成与工作原理，放大器中的噪声及抑制噪声的措施等，重点介绍对高频小信号放大器电路的分析。

知识点目标：

- 了解高频小信号放大器的分类与组成。
- 理解高频小信号单调谐放大器电路的组成与工作原理。
- 了解高频小信号单级及多级单调谐放大器的主要技术指标。
- 了解噪声的来源与分类。
- 了解在电路中衡量噪声性能的指标。
- 了解抑制噪声的措施。

技能点目标：

- 掌握高频小信号单调谐放大器电路的交/直流电路画法。
- 学会分析并测试高频小信号单调谐放大器的主要技术指标。
- 掌握低频小信号放大器与高频小信号放大器的联系与区别。
- 掌握在放大器中抑制噪声的措施。



3.1 高频小信号放大器的分类与组成及主要技术指标

在接收设备中,从天线上感应到的高频信号非常微弱,一般为微伏数量级,因此需要将信号进行放大,以便恢复传输的信号。高频小信号放大器广泛应用于广播、电视、雷达等接收设备中,用来从众多的无线电信号中选出有用的频率信号并加以放大,同时对其他无用的频率信号、干扰与噪声予以抑制,以提高信号的振幅与质量。

3.1.1 高频小信号放大器的分类与组成

高频小信号放大器若按器件分,可分为三极管放大器、场效应管放大器和集成电路放大器;若按通带分,可分为窄带放大器和宽带放大器;若按负载分,可分为谐振放大器和非谐振放大器。

高频小信号放大器应具有尽可能高的增益和较好的选频能力。前者由有源放大器件如三极管、场效应管、集成电路等提供,后者由无源选频网络如 LC 单振荡电路、陶瓷滤波器、晶体滤波器、声表面波滤波器等实现。高频小信号放大器的一般模型如图 3.1 所示。



图 3.1 高频小信号放大器的一般模型

高频小信号放大器的典型应用是在超外差式接收设备中,混频器之前的高频小信号放大器对接收到的不同高频信号的频率进行调谐放大,混频器之后的高频小信号放大器对固定的中频信号进行调谐放大,通常称为中频放大器。集中选频放大器由集中选频滤波器和集成宽带放大器组成,由于其具有性能可靠、选择性好、调整方便等优点,被越来越广泛地应用于目前的通信设备中。

3.1.2 高频小信号放大器的主要技术指标

在分析高频小信号放大器电路前,有必要了解一下高频小信号放大器的主要技术指标。

1. 谐振增益

谐振增益指放大器在谐振频率上的电压或功率增益,也称为放大倍数,记为 A_{u0} 或 A_{p0} 。

定义谐振电压增益

$$A_{u0} = \frac{U_o}{U_i} \quad (3.1)$$

谐振功率增益

$$A_{p0} = \frac{P_o}{P_i} \quad (3.2)$$

谐振增益也可用分贝 (dB) 来表示

$$A_{u0} = 20 \lg \frac{U_o}{U_i} \text{ (dB)} \quad (3.3)$$

$$A_{p0} = 10 \lg \frac{P_o}{P_i} \text{ (dB)} \quad (3.4)$$

在实际应用时,考虑到放大器的稳定性问题,单级放大器在谐振频率及通频带处的谐振增益应尽可能大;若谐振增益不够,可采用多级单调谐放大器级联实现。



扫一扫看调谐低噪声放大器的主要技术指标教学课件



扫一扫看调谐低噪声放大器的主要技术指标教学视频



2. 通频带

通频带指当放大器的电压增益下降到谐振电压增益的 0.7 或 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时所对应的频率范围, 一般用 $BW_{0.7}$ (或 f_{bw} 或 $2\Delta f_{0.7}$) 表示, $2\Delta f_{0.7}$ 又称 3 dB 带宽。高频小信号放大器的通频带如图 3.2 所示。

由于高频小信号放大器放大的信号一般都是已调信号, 包含一定的频谱宽度, 所以放大器必须有一定的通频带, 以便让必要信号中的频谱分量通过放大器。

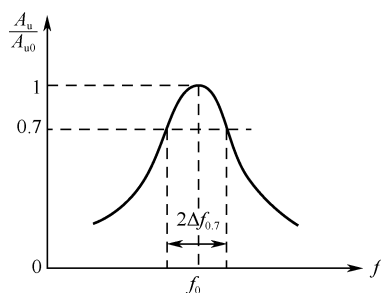


图 3.2 高频小信号放大器的通频带

3. 选择性

选择性指放大器从各种不同频率的信号中选出有用信号, 并抑制无用或干扰信号的能力。通常用矩形系数和抑制比来表示。

(1) 矩形系数。高频小信号放大器的理想谐振曲线应是矩形, 即对通频带内的频谱分量有同样的放大能力, 而对通频带以外的频谱分量完全抑制。但实际的谐振曲线与矩形有较大的差异。图 3.3 所示为高频小信号放大器理想与实际的频率特性。矩形系数用于评定实际谐振曲线偏离 (或接近) 理想谐振曲线的程度, 矩形系数的定义为

$$K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{f_{bw}} \quad (3.5)$$

$$K_{r0.01} = \frac{2\Delta f_{0.01}}{2\Delta f_{0.7}} = \frac{2\Delta f_{0.01}}{f_{bw}} \quad (3.6)$$

式中, $2\Delta f_{0.1}$ 、 $2\Delta f_{0.01}$ 分别表示增益下降至 0.1 和 0.01 处的带宽, K_r 的值越接近 1, 说明放大器的谐振曲线就越接近理想谐振曲线, 放大器的选择性越好。

(2) 抑制比。图 3.4 所示为调谐信号在频率 f_0 处的谐振曲线, 反映放大器的抑制能力。谐振点 f_0 的放大倍数为 A_{u0} 。假设干扰信号的频率为 f_k , 放大器对此干扰信号的放大倍数为 A_{uk} 。用抑制比 d_k 表示放大器对某个干扰信号 f_k 的抑制能力, 定义为

$$d_k = \frac{A_{u0}}{A_{uk}} \quad (3.7)$$

或用分贝表示

$$d_k = 20 \lg \frac{A_{u0}}{A_{uk}} \quad (\text{dB}) \quad (3.8)$$

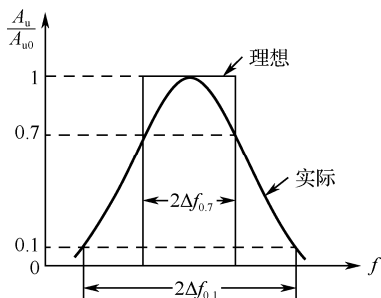


图 3.3 高频小信号放大器理想与实际的频率特性

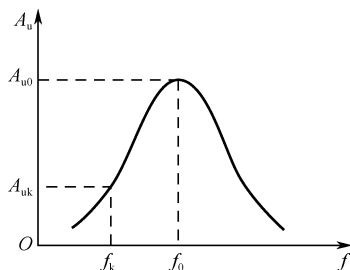


图 3.4 调谐信号在频率 f_0 处的谐振曲线

4. 噪声系数

放大器的噪声系数 F_n 为输入信号的信噪比与输出信号的信噪比的比值, 可以表示为



$$F_n = \frac{\text{SNR}_i}{\text{SNR}_o} = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} \quad (3.9)$$

噪声系数越接近 1，说明放大器的抗噪能力越强，输出信号的质量越好。

在多级放大器中，最前面一、二级的噪声对整个放大器的噪声起决定性作用，因此要求它们的噪声系数尽量接近 1。为减小小放大器的内部噪声，可采用低噪声管、正确选择工作点电流、选用合适的线路等方法。

3.2 高频小信号单调谐放大器



扫一扫看高频
小信号放大器
教学课件



扫一扫看高频
小信号放大器
教学视频

由三极管和 LC 单振荡电路组成的调谐放大器是高频小信号放大器最基本的形式。从电路形式来看，调谐放大器分为单调谐放大器、双调谐放大器和参差调谐放大器。本节主要讨论单级负载为谐振电路的高频小信号单调谐放大器。

3.2.1 单级单调谐放大器

1. 电路组成及工作原理

图 3.5 所示为共发射极单级单调谐放大器，其由三极管共发射极电路和并联谐振电路组合而成。图中 R_{b1} 、 R_{b2} 和 R_e 均为直流偏置电阻， C_b 、 C_e 为旁路电容， Z_L 为负载阻抗， L 、 C 组成并联谐振电路，电路采用抽头接入方式，以减小三极管对并联谐振电路的影响。电路的输入/输出端采用变压器耦合方式，以隔开前后级直流电路，同时可实现信号源、放大器及负载之间的阻抗匹配。在实际应用中，可选用低噪声场效应管来替代三极管，以获得良好的噪声特性。

根据电路中直流电源 U_{CC} 保留，交流输入信号 $\dot{U}_i$ 短路，所有电容断开，电感短路的规则，画出图 3.6 (a) 所示的单级单调谐放大器的直流通路，构成工作点稳定的分压式偏置电路。图 3.6 (b) 所示为单级单调谐放大器的交流通路。三极管工作在甲类工作状态下，高频小信号放大选频的过程如下：输入的高频小信号经 T_{r1} 耦合变压器在三极管的基极产生电压，形成基极电流 i_B ， i_B 经三极管放大形成集电极电流 $i_C = \beta i_B$ ，若 LC 单振荡电路调谐在高频小信号载波频率上，则 LC 单振荡电路对信号呈纯阻性；纯电阻负载可以将电流 i_C 转换成输出电压且输出最大，放大器具有最高增益。因此，输入的高频小信号得以被线性放大。

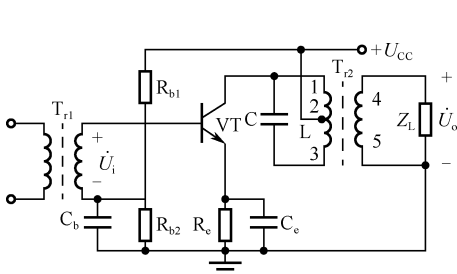


图 3.5 共发射极单级单调谐放大器

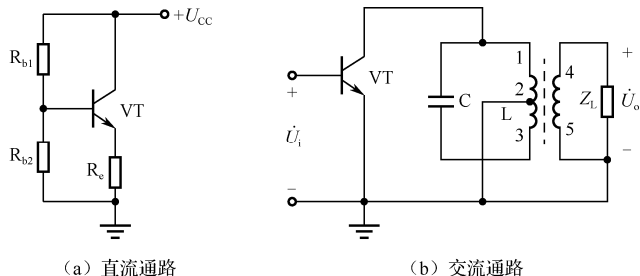


图 3.6 单级单调谐放大器的直流通路和交流通路

单级单调谐放大器的主要特点在于负载为具有选频作用的 LC 单振荡电路，因此单级单调谐放大器具有选频放大功能。图 3.7 所示为单级单调谐放大器的幅频特性曲线，当放大器的输入信号频率等于 LC 谐振频率，即 $f=f_0$ 时，其增益最高；当输入信号频率高于或低于 f_0



时,放大器失谐,其增益将迅速下降。

2. 主要技术指标

1) 谐振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}} \quad (3.10)$$

式中, C_Σ 是电路总电容, 为三极管输出电容和负载电容折合到 LC 单振荡电路两端的等效电容与电路电容 C 之和。改变 L 和 C_Σ 都可以改变谐振频率, 即进行调谐。

2) 通频带

$$2\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q_L} \quad (3.11)$$

式中, Q_L 为 LC 单振荡电路的有载品质因数, 其值不仅与电路自身有关, 而且与电路特性有关, 可表示为

$$Q_L = \frac{1}{g_\Sigma \omega_0 L} = \frac{\omega_0 C_\Sigma}{g_\Sigma} \quad (3.12)$$

式中, g_Σ 为 LC 单振荡电路的总电导。

由式 (3.11) 和式 (3.12) 可知, 改变 g_Σ 的值, Q_L 就会发生变化。通频带与 Q_L 成反比, 曲线越尖锐, 通频带越窄, 选择性越好。

3) 选择性

单级单调谐放大器的增益频率特性取决于并联谐振电路的频率特性, 可以表示为

$$\frac{A_u}{A_{u0}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(Q_L \frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}} \quad (3.13)$$

式中, $\Delta f = f - f_0$ 为并联谐振电路的绝对失调量。

单级单调谐放大器的选择性用矩形系数表示为

$$K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{f_{bw}} \quad (3.14)$$

$$\text{当 } \frac{A_u}{A_{u0}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(Q_L \frac{2\Delta f_{0.1}}{f_0}\right)^2}} = 0.1 \text{ 时, } 2\Delta f_{0.1} = \sqrt{10^2 - 1} \frac{f_0}{Q_L}, \text{ 因此}$$

$$K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} = \sqrt{10^2 - 1} \approx 9.95 \quad (3.15)$$

由上式可知, 实际单级单调谐并联谐振电路的矩形系数近似为 10, 远大于理想矩形系数 1, 这说明单调谐放大器的选择性较差, 因此实际电路常采用双调谐放大电路以提高其选择性。

3.2.2 多级单调谐放大器

若单级单调谐放大器的增益不满足要求, 则常采用多级单调谐放大器级联。级联后, 放大器的增益、通频带、选择性都会发生变化。图 3.8 所示为多级单调谐放大器的组成框图。

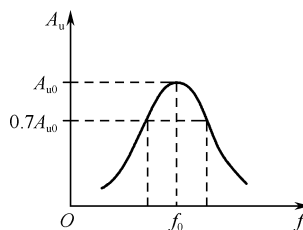


图 3.7 单级单调谐放大器的幅频特性曲线



多级单调谐放大器可工作于同一频率或不同频率。若每级单调谐放大器均调谐于同一频率,则为同步调谐,否则为参差调谐。下面讨论多级单调谐放大器的主要技术指标。

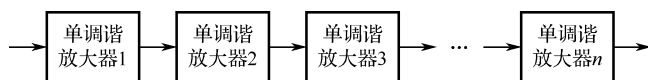


图 3.8 多级单调谐放大器的组成框图

1. 多级单调谐放大器的增益

假设多级单调谐放大器由 n 级级联而成,各级电压增益分别表示为 $A_{u1}, A_{u2}, \dots, A_{un}$, 则总增益 A_n 为各级增益的乘积, 即

$$A_n = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot \dots \cdot A_{un} \quad (3.16)$$

若以分贝表示 n 级放大器的增益, 则

$$A_n = A_{u1} + A_{u2} + \dots + A_{un} \text{ (dB)} \quad (3.17)$$

级数越多, 谐振增益越大, 谐振曲线越尖锐, 选择性越好, 但通频带越窄。

2. 多级单调谐放大器的通频带

当 n 级相同的放大器级联时, 总的通频带可由下式计算

$$\frac{A_n}{A_{n0}} = \frac{1}{\left[1 + \left(Q_L \frac{2\Delta f_{0.7}}{f_0} \right)^2 \right]^{\frac{n}{2}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3.18)$$

可得

$$(2\Delta f_{0.7})_n = \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1} \cdot \frac{f_0}{Q_L} \quad (3.19)$$

由上式可知, 总的通频带比单级通频带要窄。 $\sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}$ 为带宽缩减因子, 用来衡量放大器级数增加后总通频带变窄的程度。

3. 多级单调谐放大器的选择性

当 n 级相同的放大器级联时, $2\Delta f_{0.1}$ 可由下式计算

$$(2\Delta f_{0.1})_n = \sqrt{100^{\frac{1}{n}} - 1} \cdot \frac{f_0}{Q_L} \quad (3.20)$$

总的矩形系数为

$$(K_{r0.1})_n = \frac{(2\Delta f_{0.1})_n}{(2\Delta f_{0.7})_n} = \frac{\sqrt{100^{\frac{1}{n}} - 1}}{\sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}} \quad (3.21)$$

由上式可知, 级数越多, 矩形系数越小, 选择性越好。

3.2.3 集中选频放大器

在小信号选频放大器中, 越来越多地采用集中选频放大器。集中选频放大器主要由集成宽带放大器和集中选频滤波器组成, 它适用于固频选频放大器。其中, 集成宽带放大器由多级差分电路组成, 集中选频滤波器具有接近理想矩形的幅频特性, 包括前面介绍的石英晶体



滤波器、陶瓷滤波器和声表面波滤波器等。

3.3 放大器中的噪声

电子设备的性能指标在很大程度上与干扰和噪声有关,这可能会直接限制接收设备的灵敏度。在通信系统中,由于干扰和噪声的存在大大影响了接收设备的工作,因此了解噪声的特性及抑制噪声的方法有助于提高接收设备的性能。

3.3.1 噪声的来源与分类

干扰一般指外部干扰,可分为自然干扰和人为干扰。自然干扰包括天电干扰、宇宙干扰和大地干扰。人为干扰主要包括工业干扰和无线电台的干扰。

噪声一般指内部噪声,可分为自然噪声和人为噪声。自然噪声有热噪声、散粒噪声和闪烁噪声等。人为噪声有交流噪声、感应噪声、接触不良噪声等。这里主要讨论自然噪声。

1. 电阻的热噪声

电阻中含有大量的自由电子,由于温度的影响,这些自由电子在受到热激发后做不规则的运动,因此会发生碰撞、复合并产生二次电子等现象。温度越高,自由电子的运动越剧烈。就一个电子而言,一次运动会在电阻内部产生一个持续时间很短的脉冲电流。许多随机脉冲电流的组合就在电阻内部形成了无规律的电流。噪声电流在电阻内流通,电阻两端就会产生噪声电压。噪声电压波形如图 3.9 所示,在一段时间内,噪声电压出现正负值的概率相同,因而电阻两端的平均电压为零。由于这种噪声是由电子的热运动引起的,因此又称热噪声。



图 3.9 噪声电压波形

大量的实践和理论分析表明,电阻热噪声的特性可以用频率特性来描述。其具有很宽的频谱,频率从 0 一直延伸至 $10^{13} \sim 10^{14} \text{Hz}$ 以上,且各频率分量的强度相等。对无线电频率范围来说,这种具有均匀连续频谱的噪声可看作白噪声。

2. 三极管的噪声

三极管的噪声是设备内部固有噪声的另一个重要来源,放大电路中的三极管噪声往往强于电阻热噪声。三极管的噪声主要包括热噪声、散粒噪声、分配噪声和闪烁噪声。

1) 热噪声

与电阻相同,三极管中电子的不规则运动也会产生热噪声。三极管的发射极、集电极、基极电阻及相应的引线电阻都会产生热噪声,但主要以基极电阻的热噪声为主,其他极电阻和引线电阻产生的影响可以忽略。

2) 散粒噪声

散粒噪声是三极管噪声的主要来源。单位时间内通过 PN 结的载流子数目随机起伏,使得流过 PN 结的电流在平均值上下做不规则的起伏变化而形成噪声,这种噪声称为散粒噪声。在本质上它与电阻的热噪声类似,属于均匀连续频谱的白噪声。



3) 分配噪声

三极管中通过发射结的少数载流子大部分到达集电极形成集电极电流,少部分在基区内复合形成基极电流。集电极电流随基区载流子复合数量的变化而变化所引起的噪声称为分配噪声。

分配噪声本质上属于白噪声,由于渡越时间的影响,因此当三极管的工作频率高到一定值时,该噪声的功率谱密度会随着频率的增加而迅速增大。

4) 闪烁噪声

闪烁噪声与半导体材料及制造工艺水平有关,其特点是频率集中在低频段(一般为几千赫兹以下)时噪声强度显著增加,且随频率降低而增强。三极管在高频工作时,可以忽略这种噪声的影响。

3. 场效应管的热噪声

场效应管的热噪声包括栅极散粒噪声、沟道热噪声、栅极感应噪声和闪烁噪声4种。

栅极散粒噪声是由栅极内电荷的不规则起伏引起的,影响较小。沟道热噪声是沟道电阻中载流子的热运动产生的热噪声。栅极感应噪声是沟道中的起伏噪声通过沟道和栅极之间电容的耦合,在栅极上感应产生的噪声,频率越高,该噪声的影响越大。闪烁噪声与三极管的闪烁噪声一样,噪声功率在低频段与频率成反比。

3.3.2 电路中衡量噪声性能的指标

1. 信噪比

噪声的存在会对有用信号产生影响,一般用信号功率与噪声功率的相对值来衡量噪声对信号的影响程度。在指定频带内,同一端口信号功率和噪声功率的比值,即 P_s/P_n ,称为信噪比 SNR。信噪比用来表示噪声对信号的干扰程度及二者间的相对强弱。功率信噪比也可以用分贝表示,写为 $10\lg(P_s/P_n)$ 。功率信噪比越大,说明信号质量越好,噪声的影响越小。

2. 噪声系数

功率信噪比可反映信号质量的好坏,但无法反映放大器对信号质量的影响,也不能表示放大器本身噪声性能的好坏。在实际电路中信号通过放大器会叠加上噪声,导致输出端的噪声功率与输入端的噪声功率不同。

噪声系数是用来反映电路本身噪声大小的技术指标,其值与信噪比有关。与低频放大器一样,选频放大器的输出噪声也来源于输入端和放大电路本身。

噪声系数 F_n 定义为电路输入端信噪比与输出端信噪比的比值,即

$$F_n = \frac{\text{SNR}_i}{\text{SNR}_o} = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} \quad (3.22)$$

用分贝表示为

$$F_n (\text{dB}) = 10\lg \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} (\text{dB}) \quad (3.23)$$

噪声系数取决于系统的内部噪声,其值越接近1越好。理想无噪声放大器的输出端信噪比等于输入端信噪比,即 $F_n=1$ 。

若放大器本身有噪声,则输出噪声功率等于放大后的输入噪声功率和放大器本身的噪声功率之和。显然,经放大器放大后,输出端的信噪比比输入端的信噪比低,即 $F_n>1$ 。因此, F_n 表示信号通过放大器后,信噪比变差的程度。