

## 第8章 锁相环路及其他反馈控制电路

---

在通信技术中，为了改善电子设备的性能，多采用各种反馈控制电路。常用的有：

- **PLL锁相环路（APC自动相位控制电路）——相位反馈控制系统；**
- **AGC自动增益控制——在输入信号变化幅度很大的的情况下，使输出信号幅度保持恒定或仅在小范围内变化；**
- **AFC自动频率控制——频率反馈控制系统，控制信号频率。**

# 第8章 锁相环路及其他反馈控制电路

---

## 8.1 锁相环路

## 8.2 集成锁相环芯片

## 8.3 锁相环路的应用

## 8.4 自动增益控制电路

## 8.5 自动频率控制电路

## 8.1 锁相环路

---

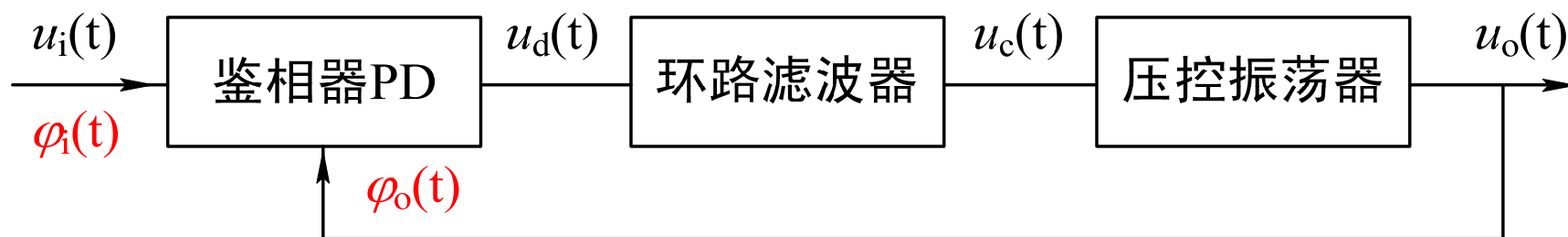
### 相位反馈控制电路

使某一振荡器的相位受另一基准振荡器的控制，当二者的相位差等于常数时，称为相位锁定。——锁相

锁相环的应用十分广泛：

- 调制
- 解调
- 锁相接收机
- 频率合成器
- .....

## 基本锁相环的构成



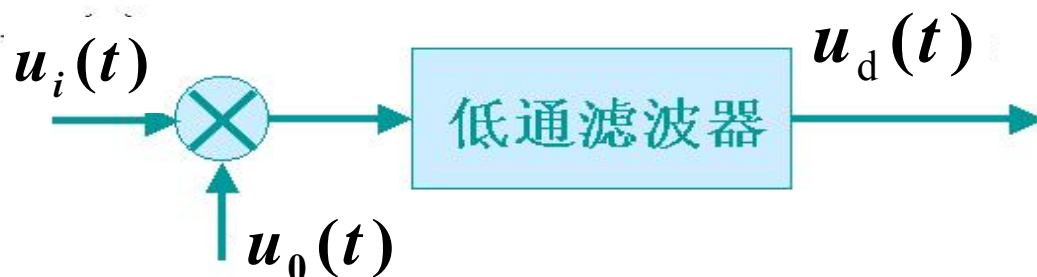
(1) 三个基本部件组成：鉴相器，环路滤波器和压控振荡器。

(2) 基本原理：

- 鉴相器的输出信号  $u_d(t)$  是输入信号  $u_i(t)$  和压控振荡器输出信号  $u_o(t)$  之间相位差的函数。
- 经环路滤波器滤波（也可能包括放大），滤除高频分量后，成为压控振荡器的控制电压  $u_c(t)$ 。
- 在  $u_c(t)$  的作用下，压控振荡器输出信号的相位将发生相应变化并反馈到鉴相器。最后输出信号与输入信号相位差为常数，进入稳定状态。

## 1. 鉴相器 (PD)

- 常用的鉴相器有以下几类：数字鉴相器、模拟相乘器、抽样鉴相器和鉴频鉴相等。
- 作为原理分析，通常使用具有正弦鉴相特性的鉴相器。



设输入信号为  $u_i(t) = U_{1m} \sin[\omega_i t + \theta_i(t)]$  ,

压控振荡器的输出信号为  $u_o(t) = U_{2m} \cos[\omega_o t + \theta_o(t)]$

为了便于比较两者之间的相位差，现都以  $\omega_o t$  为参考相位。这样  $u_i(t)$  瞬时相位为

$$\omega_i t + \theta_i(t) = \omega_o t + [(\omega_i - \omega_o)t + \theta_i(t)] = \omega_o t + \varphi_i(t)$$

---

按照新定义,  $u_i(t) = U_{1m} \sin[\omega_0 t + \varphi_i(t)]$

$$u_o(t) = U_{2m} \cos[\omega_0 t + \theta_o(t)] = U_{2m} \cos[\omega_0 t + \varphi_o(t)]$$

乘法器输出

$$A_m u_i(t) u_o(t)$$

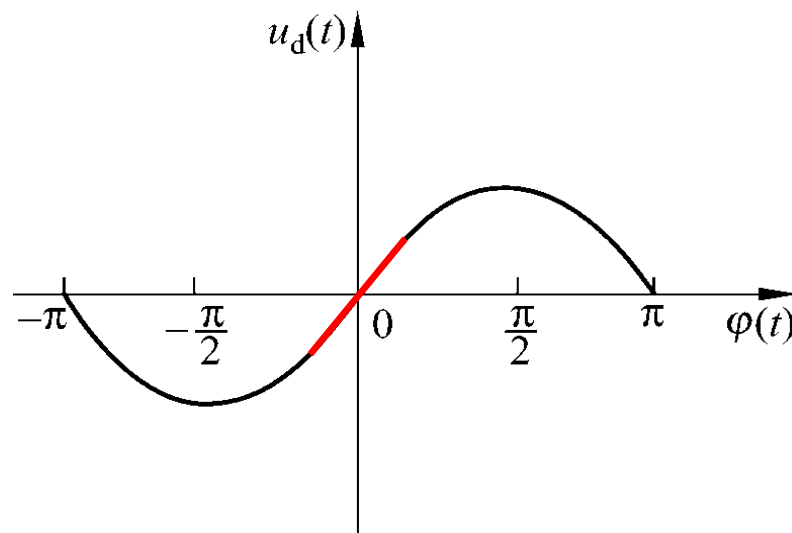
$$= \frac{1}{2} A_m U_{1m} U_{2m} \{ \sin[2\omega_0 t + \varphi_i(t) + \varphi_o(t)] + \sin[\varphi_i(t) - \varphi_o(t)] \}$$

通过低通滤波器, 则鉴相器的输出为

$$u_d(t) = \frac{1}{2} A_m U_{1m} U_{2m} \sin[\varphi_i(t) - \varphi_o(t)] = K_d \sin \varphi(t)$$

$$u_d(t) = K_d \sin \varphi(t)$$

由于 $u_d(t)$ 随 $\varphi(t)$ 作周期性的正弦变化，因此这种鉴相器称为正弦波鉴相器。



当  $|\varphi_i(t) - \varphi_o(t)| \leq \pi / 6$

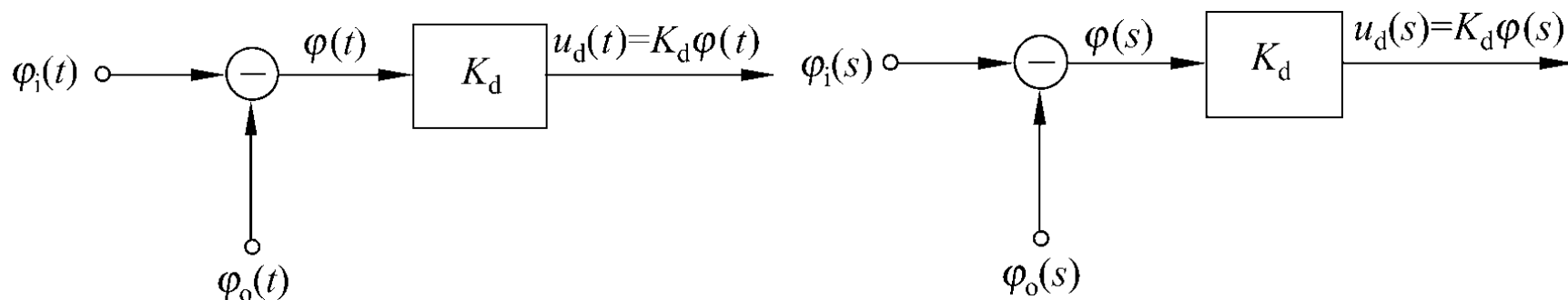
$$\sin[\varphi_i(t) - \varphi_o(t)] \approx \varphi_i(t) - \varphi_o(t)$$

因此，  $u_d(t) \approx K_d [\varphi_i(t) - \varphi_o(t)] = K_d \varphi(t)$

## 鉴相器线性化的数学模型

$$u_d(t) \approx K_d [\varphi_i(t) - \varphi_o(t)] = K_d \varphi(t)$$

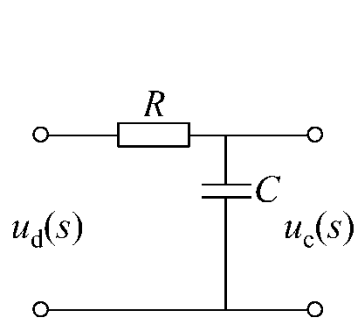
当强调对相位的贡献时，模型可以表示为：



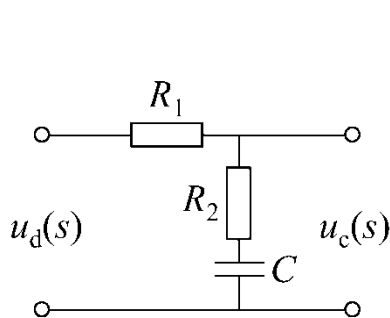


## 2. 环路滤波器

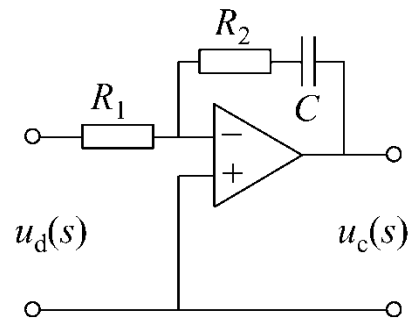
环路滤波器是线性电路，由线性元件电阻、电感和电容组成，有时还包括运算放大器在内，它是低通滤波器。



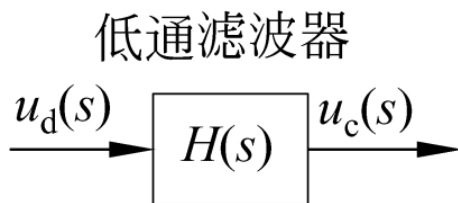
(a) RC 积分滤波器



(b) 无源比例积分滤波器



(c) 有源比例积分滤波器



### RC积分滤波器

$$H(j\omega) = \frac{u_c(j\omega)}{u_d(j\omega)} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + sRC}$$

### 3. 压控振荡器——一般采用含有变容二极管的振荡器



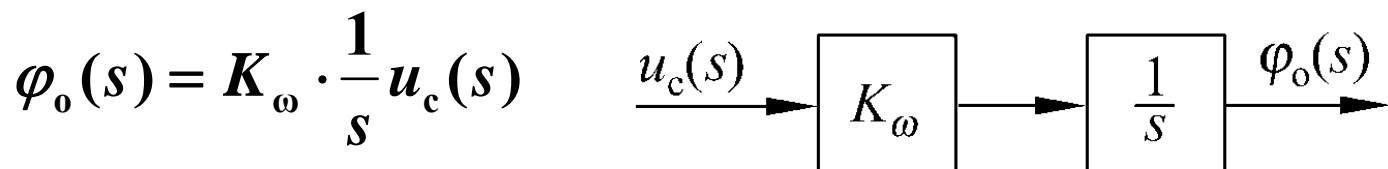
在锁相环路中，我们关心的是相位变化，瞬时相位

$$\varphi_{o1}(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \omega_0 t + \int_0^t K_\omega u_c(t) dt$$

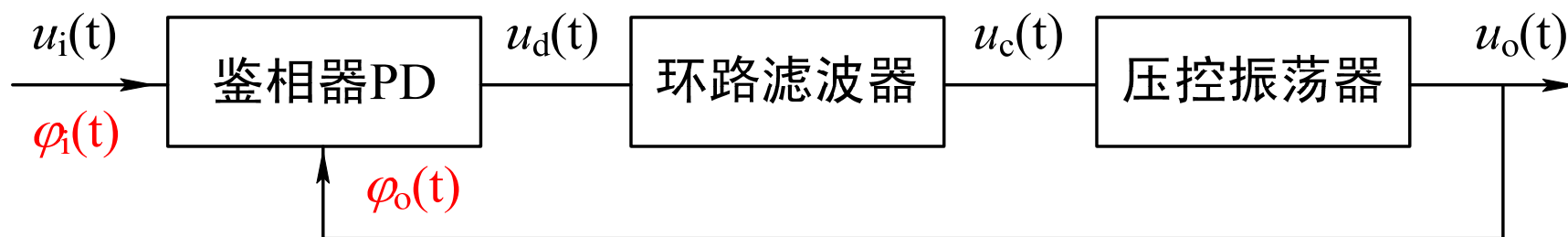
对相位的贡献是变化部分

$$\varphi_o(t) = \varphi_{o1}(t) - \omega_0 t = \int_0^t K_\omega u_c(t) dt$$

可以认为，压控振荡器是一个固有积分环节。



## 锁相环的各构成部分分析



鉴相器:  $u_d(t) = K_d[\varphi_i(t) - \varphi_o(t)] = K_d\varphi(t)$

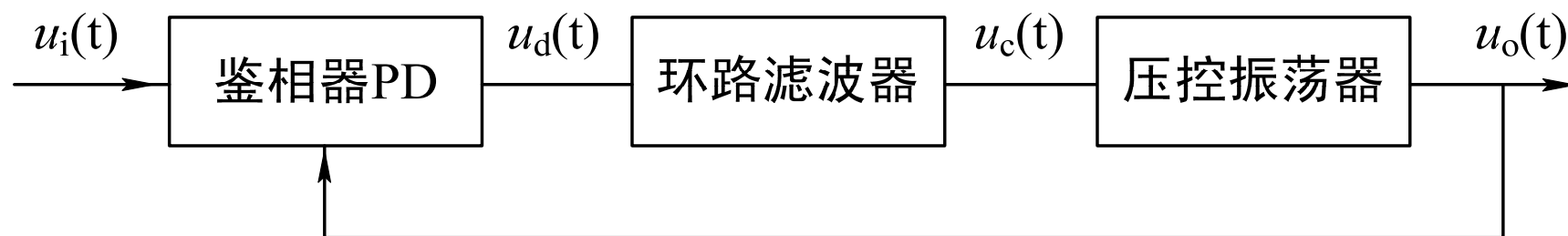
环路滤波器:  $u_c(t) = H(p)u_d(t)$

压控振荡器:  $\omega(t) = \omega_0 + K_\omega u_c(t)$

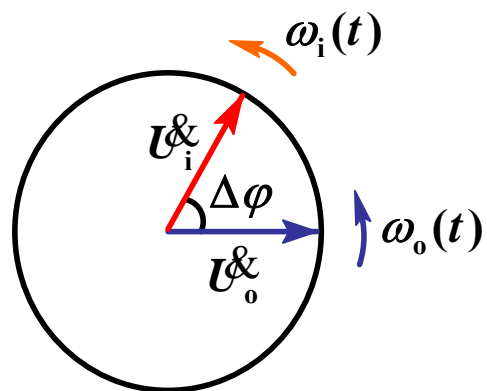
式中,  $\omega_0$  为压控振荡器的中心频率。

$$\varphi_o(t) = \int_0^t K_\omega u_c(t) dt$$

结论:



利用输入信号和压控振荡器输出信号之间的相位误差去消除频率误差。当电路达到平衡状态之后，虽然有剩余相位误差存在，但频率误差可以消除，从而实现无误差的频率跟踪。



$$\Delta\varphi = \text{常数}$$

$$\frac{d\Delta\varphi}{dt} = \omega_i - \omega_o = 0$$

# 锁相环的锁定、捕捉和跟踪

1. **锁定**：输出信号与输入信号频率相等；

2. **捕捉**：环路原先是失锁的，通过自身调节由失锁调整到锁定的过程；

相应的，能够由失锁进入锁定的最大输入固有频差，称为环路**捕捉带**或**捕捉范围**。

$$\Delta\omega = \omega_i - \omega_o, \text{ 捕捉带} = |\Delta\omega|_{\max} = |K_d H(p) K_\omega \sin \varphi(t)|_{\max}$$

3. **跟踪**：环路原先是锁定的，由于某种原因造成环路偏离锁定，通过自身调节重新维持锁定的过程。

压控振荡器的频率随输入信号频率变化，但压控振荡器的频率变化范围是有限的。当输入信号频率变化超过某一边界值 $W_H$ 后，压控振荡器不再能跟踪它的变化。 $W_H$ 称为**同步带**或**跟踪带**。

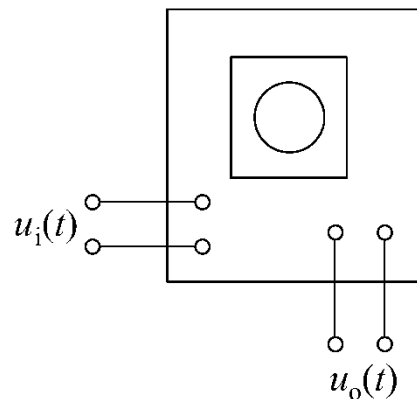
#### 4. 判断环路是否锁定的方法

##### ① 在有双踪示波器的情况下

当 $f_i=f_o$ 时，表示环路已经进入锁定状态。

##### ② 单踪——普通示波器（实验）

利用李沙育图形来判断。如果环路已锁定，且在理想情况下，李沙育图形应是一个圆。



# 第8章 锁相环路及其他反馈控制电路

---

8.1 锁相环路

8.2 集成锁相环芯片

8.3 锁相环路的应用

8.4 自动增益控制电路

8.5 自动频率控制电路

## 8.2 集成锁相环芯片

---

### 集成锁相环分类

#### □ 模拟环（APLL）：

通用型（多功能）： $VCO$ ， $PD$ ， $VCO + PD + AMP$ 。

专用型： $AM/PM$  的解调，CTV中用的色度信号同步环。

#### □ 数字环（DPLL）：

通用型（多功能）： $VCO$ ， $PD + VCO$ ， $PD +$  分频器。

专用型：频率合成器。

应用数字锁相环路，在一定范围内可以消除类似于模拟锁相环路中压控振荡器控制特性的非线性、环路滤波器传输函数的不稳定等的影响，从而改善锁相环路的性能。



# 第8章 锁相环路及其他反馈控制电路

---

8.1 锁相环路

8.2 集成锁相环芯片

8.3 锁相环路的应用

8.4 自动增益控制电路

8.5 自动频率控制电路

## 锁相环的优点：

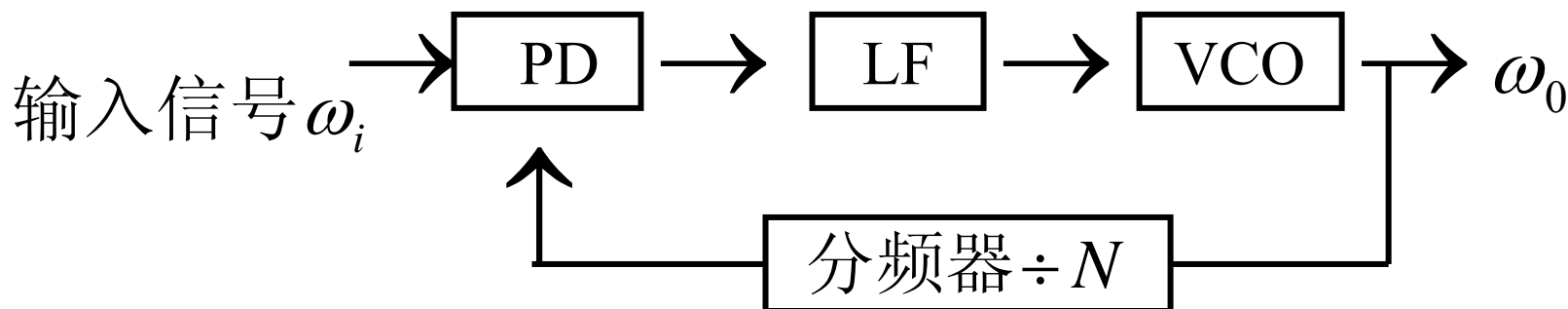
- (1) 锁定时无剩余频差；
- (2) 良好的窄带滤波特性；  
(可以在几十 $MHz$ 的中心频率上,实现几十 $Hz$ 甚至几 $Hz$ 的滤波)
- (3) 良好的跟踪特性；
- (4) 易于集成化。

因此，锁相得到了广泛的应用。

## 1. 锁相倍频、分频和混频

——在稳频技术中的应用

### (1) 锁相倍频——锁相环路中插入分频器

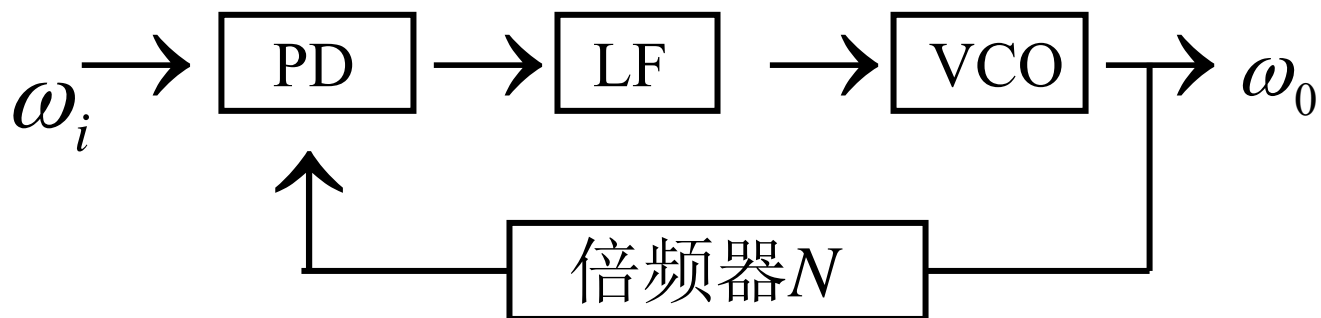


$$\omega_i = \frac{\omega_0}{N}$$

$\therefore VCO$ 信号频率锁定在 $\omega_0 = N\omega_i$

## (2) 分频

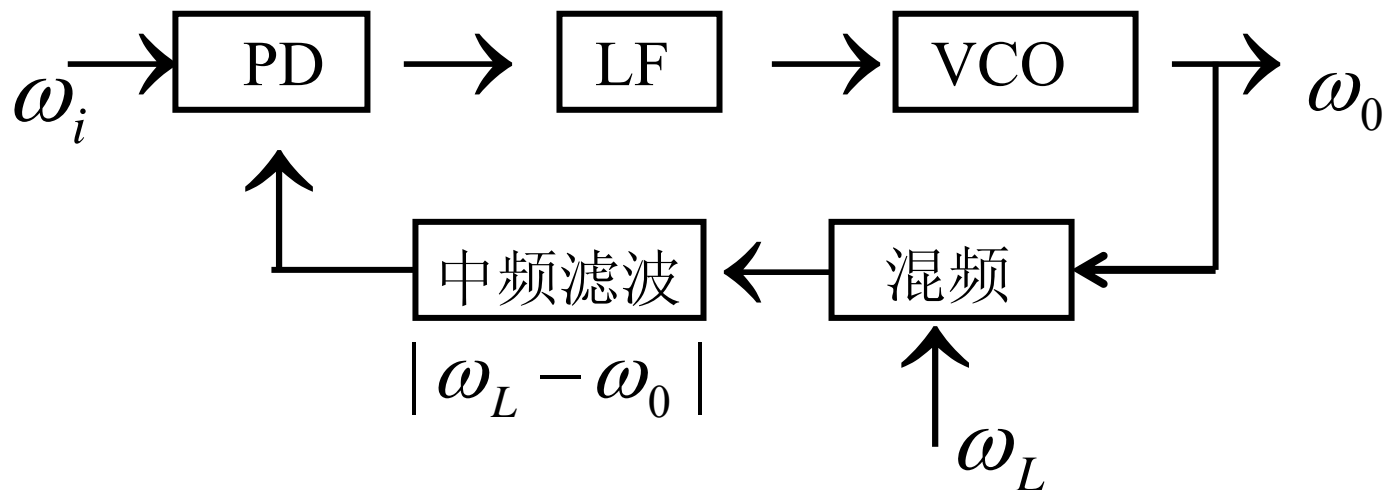
---



$$\omega_i = N\omega_0$$

$$\therefore \omega_0 = \frac{\omega_i}{N}$$

### (3) 混频



$$|\omega_L - \omega_0| = \omega_i$$

$$\therefore \omega_0 = \omega_L - \omega_i \quad \text{或} \quad \omega_0 = \omega_L + \omega_i$$

## (4) 频率合成器 (P<sub>241</sub>)

---

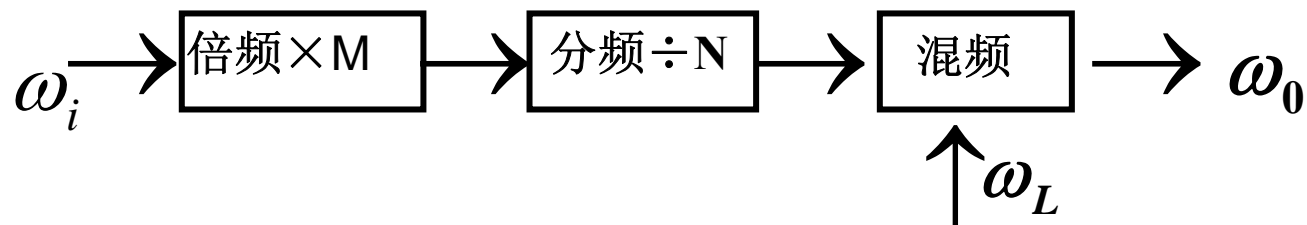
利用一个频率既准确又稳定的晶振信号产生一系列频率准确的等间隔的信号的设备称为频率合成器。

这些离散频率的频率稳定性和精确度与基准频率相同。

主要由频率范围、频率间隔两个指标。

- 直接频率合成
- 间接频率合成
- 直接数字式频率合成

## □ 直接频率合成器

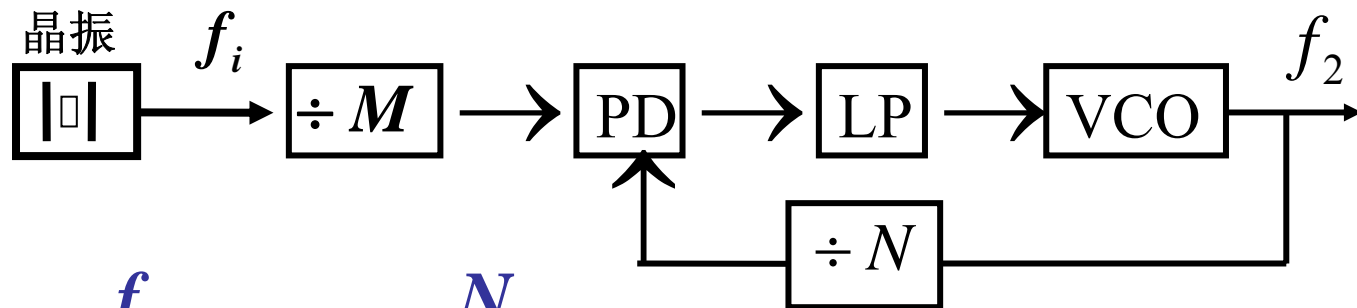


$$\omega_0 = \omega_L - \frac{M}{N} \omega_i \quad \text{频率间隔为 } \frac{1}{N} \omega_i, \text{ 离散频率数由 } M \text{ 决定}$$

主要缺点:

- 有较多的非线性电路;
- 可能产生寄生干扰;
- 接入了大量的、滤波性能较高的滤波器, 使设备体积庞大、造价昂贵。

## □ 间接频率合成器



$$\frac{f_i}{M} = \frac{f_2}{N} \Rightarrow f_2 = \frac{N}{M} f_i$$

若晶振提供的频率为 $200\text{KHz}$ ,  $M = 50$ ,  $N = 200 \sim 300$ ,  
求输出频率范围和频率间隔。

$$f_2 = (4 \sim 6) f_i = 800 \sim 1200\text{KHz}$$

$$\text{频率间隔} = \frac{1200 - 800}{300 - 200} \text{KHz} = 4\text{KHz}$$



## 间接频率合成主要优点：

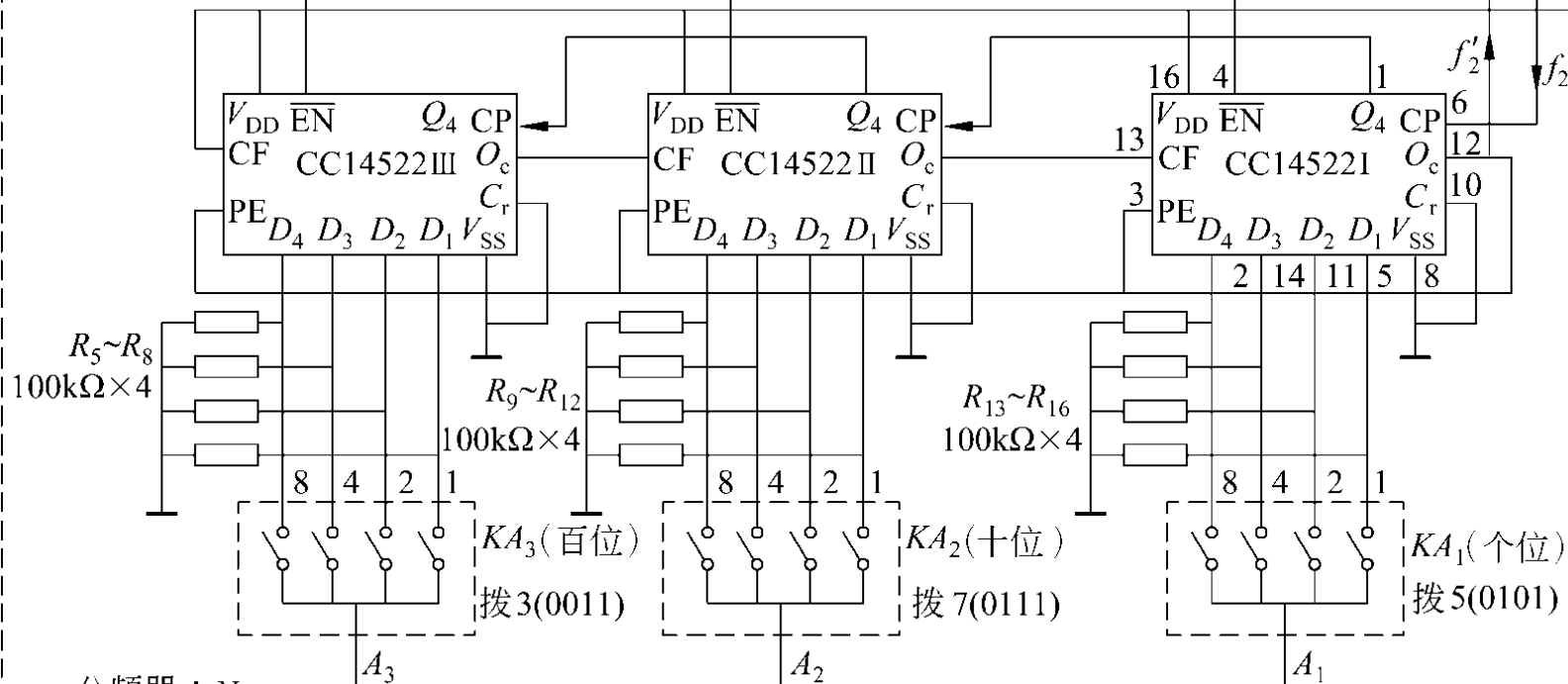
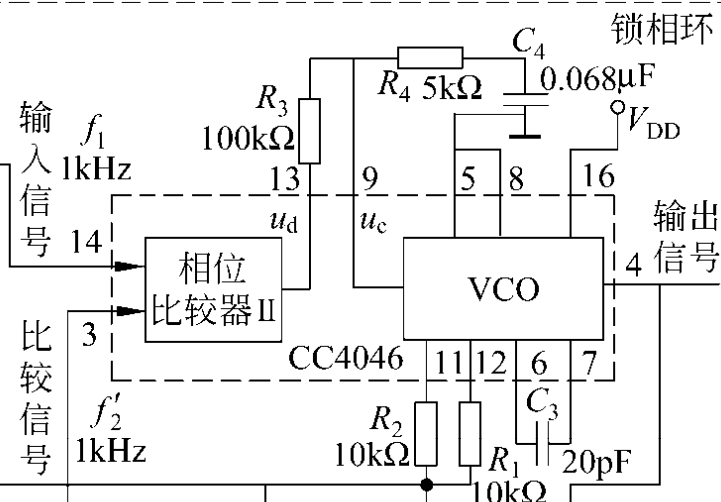
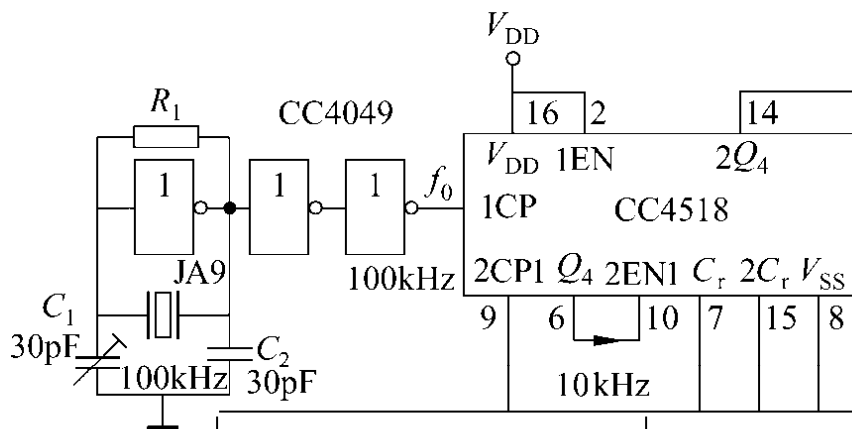
---

- 系统简单；
- 锁相环路时具有良好的窄带滤波性能，输出信号质量好；
- 易于集成化。

## □ 直接数字式频率合成器

**P243 图8-22**

# 基准频率产生

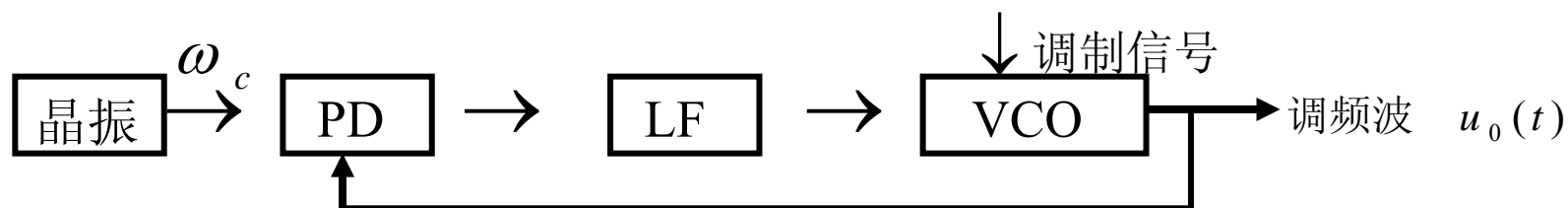


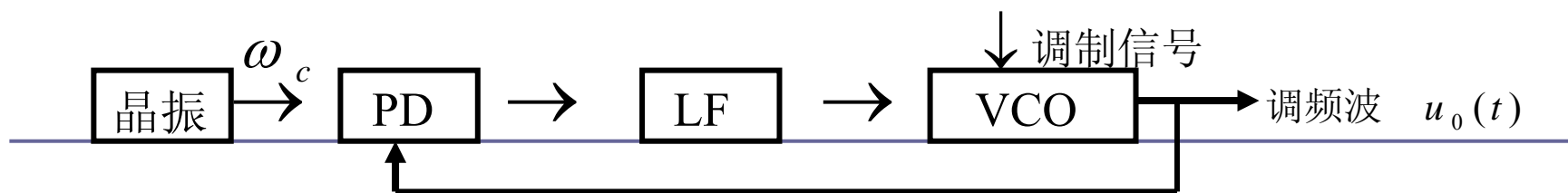
分频器 ÷ N

## 2. 锁相的调制与解调

### (1) 调频波的产生

对调频波的基本要求是：中心频率应足够稳定，频偏要足够宽。前面介绍的LC振荡器中心频率的稳定度不够高，石英晶体振荡器难以获得足够的频偏。

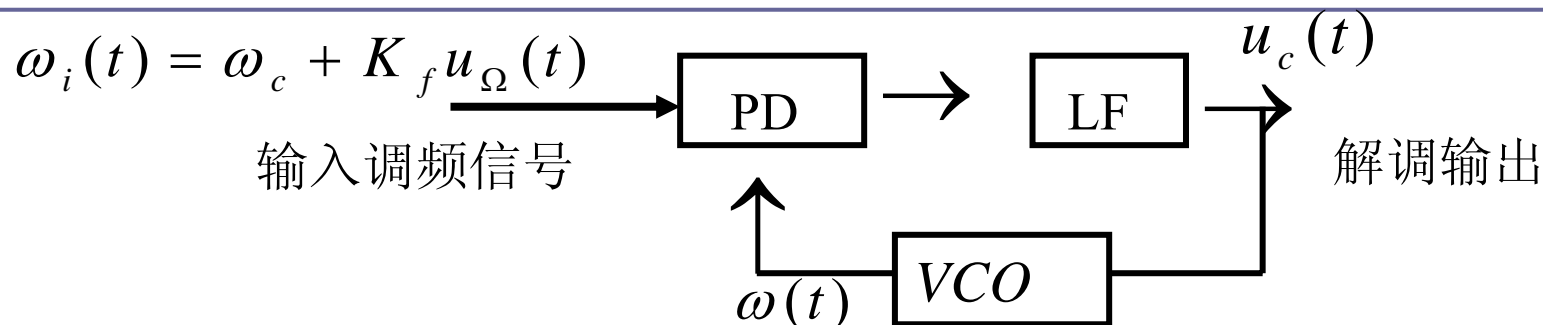




$PD$ 的输出将反映 $VCO$ 中心频率的漂移和随调制信号产生的频偏，但二者在变化的快慢上有明显的不同。 $u_0(t)$ 中心频率的漂移是慢变化，而调制信号是快变化，适当设计 $LF$ ，使其输出电压不随调制信号变，而只有随 $u_0(t)$ 中心频率漂移而变的量，于是 $u_0(t)$ 中心频率的变化减小，最终锁定时等于晶振频率，而随调制信号变化所产生的频偏不受影响。即调制信号的频谱处于 $LF$ （窄带）之外。

**实现锁相调频的条件：**①调制信号的频谱要处于低通滤波器通带之外；②锁相环只对载波频率的慢变化起调整作用，使其中心频率锁定在晶振频率上。

## (2) 调频波的解调



锁相环中环路的带宽应设计得足够宽，使  $VCO$  能跟踪输入调频信号而变，当环路锁定  $\omega_i(t) = \omega(t)$ ;

$VCO$  的频率变化与  $u_c(t)$  成正比，即  $\omega(t) = \omega_0 + k_\omega u_c(t)$ ，所以  $u_c$  的变化规律与  $u_\Omega$  相同， $u_c$  为解调器输出。

**实现锁相鉴频的条件：**

- ① 锁相环的捕捉带必须大于调频波的最大频偏；
- ② 环路带宽必须大于调频波中调制信号的频谱带宽。

这种环路又称为跟踪型环路。

### 3. 锁相接收机——在空间技术上的应用

#### 窄带锁相跟踪接收机

---

在空间通信中，地面接收站接收卫星发送来的无线电信号

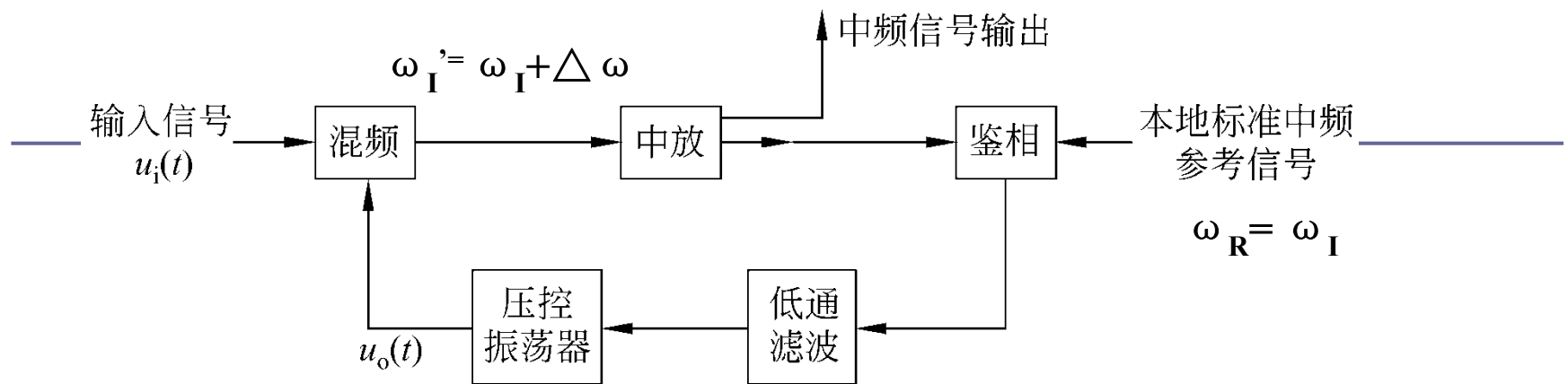
（1）地面接收站收到的信号是极为微弱的；

（2）由于多普勒效应，地面接收站收到的信号频率将偏离卫星发射的信号频率，并且其值往往在较大范围内变化。

---

所以地面接收到的信号强度弱，中心频率偏离大。如果采用普通接收机，要求带宽足够宽，接收机输出的噪声将因放大的带宽很宽而加大，输出信噪比严重降低，无法检出有用信号。

比如，载波频率为 $108\text{MHz}$ ，多普勒频移可能在 $\pm 3\text{kHz}$ 范围内，如果用固定调谐接收机，带宽至少为 $6\text{kHz}$ 。而卫星发射的信号本身带宽却很小，大约为 $6\text{Hz}$ ，这样接收机带宽比信号带宽大1000倍。



如果中频信号与本地信号频率有偏差，PD的输出电压调整VCO的频率，使混频输出的中频信号频率锁定在本地标准频率上。

不论输入信号频率如何变化，混频器的输出总是自动维持恒值，所以中频放大器的通频带可以做的很窄。

由于锁相接收机的中频频率可以跟踪接收信号频率的漂移，且中频放大器带宽又很窄，所以称为窄带跟踪滤波器。



# 第8章 锁相环路及其他反馈控制电路

---

8.1 锁相环路

8.2 集成锁相环芯片

8.3 锁相环路的应用

8.4 自动增益控制电路

8.5 自动频率控制电路

## 8.4 自动增益控制电路

在一部调幅接收机中，由于无线电波传播的多径效应和衰落等原因，天线上感生的有用信号强度往往有很大的起伏变化，致使扬声器发出的声音忽强忽弱。

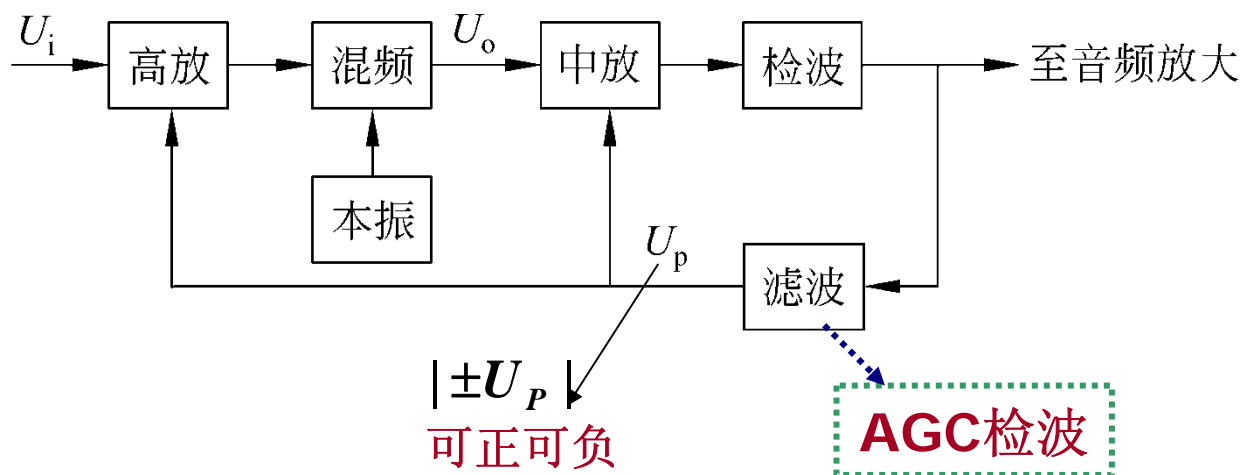
为使接收机对大小信号都能很好的接收，即使在信号有强度变化时，也能使输出信号大小能基本保持恒定，需加入自动增益控制电路——是接收机的重要辅助电路。

- 当接收到的信号较弱时，接收机的增益提高；
- 当接收到的信号较强时，接收机的增益减小；

自动增益的作用：当输入信号变化很大时，保持接收机输出电压（功率）几乎不变。

——避免过强的信号使晶体管和终端器件过载、损坏。

## 一、AGC电路接收方框图



由检波器的输出进行AGC检波，得到直流成分 $U_p$ ，加到被控级晶体管基极，来控制它的基极电流，从而改变其增益大小的方法来实现自动增益控制。

$U_p$ 可正可负，随输入信号改变

- 输入信号强  $\rightarrow |\pm U_p|$  大  $\rightarrow$  高放、中放增益低
- 输入信号弱  $\rightarrow |\pm U_p|$  小  $\rightarrow$  高放、中放增益高

---

注意：

AGC检波器不同于包络检波器，包络检波器的输出是反映包络变化的解调电压；而AGC检波器仅输出反映输入载波电压振幅的直流电压。

$$u_{AM} = U_m (1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t$$

包络检波器的输出：  $\eta_d U_m (1 + m_a \cos \Omega t)$

AGC检波器：  $\eta'_d U_m$

## 二、AGC电压的产生

---

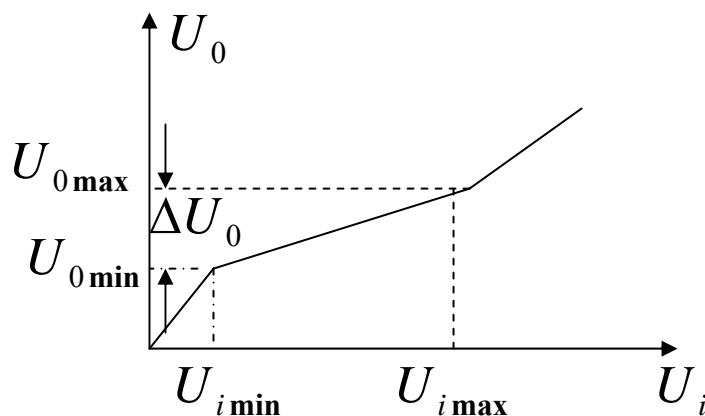
接收机的 $U_p$ 大都是利用它的中频输出信号经检波后产生的。

延迟式AGC电路： **P246 图8-27**

$V_2$ 、 $R_p$ 、 $C_p$ 组成AGC的检波，产生控制电压  $U_p$ 。

**AGC的质量指标：**当外来信号的变化范围一定时，接收机的输出电压变化愈小，则AGC的性能就越好。

图8-28



$U_i < U_{i\min}$ , AGC不起作用，增益为曲线斜率。

$U_i \geq U_{i\max}$ , AGC起作用，对应增益减小。

在输入电压变化范围内， $U_{i\min} < U_i < U_{i\max}$ ，输出电压的变化 $\Delta U_0$ 越小越好。

例如：

---

收音机的AGC指标：输入信号强度变化 $26dB$ 时，输出电压变化不超过 $5dB$ 。

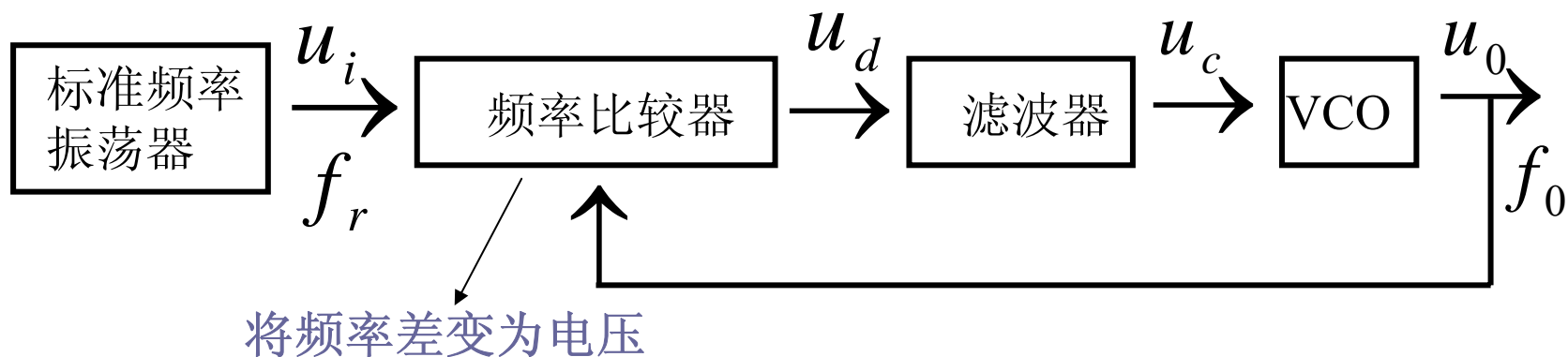
在高级通信中，AGC指标：输入信号强度变化 $60dB$ 时，输出电压变化不超过 $6dB$ 。输入信号在 $10\mu V$ 以下，AGC不起作用。

三、控制放大器的增益——实现AGC的方法，  
(P247—248) 自学

## 8.5. 自动频率控制 (AFC)

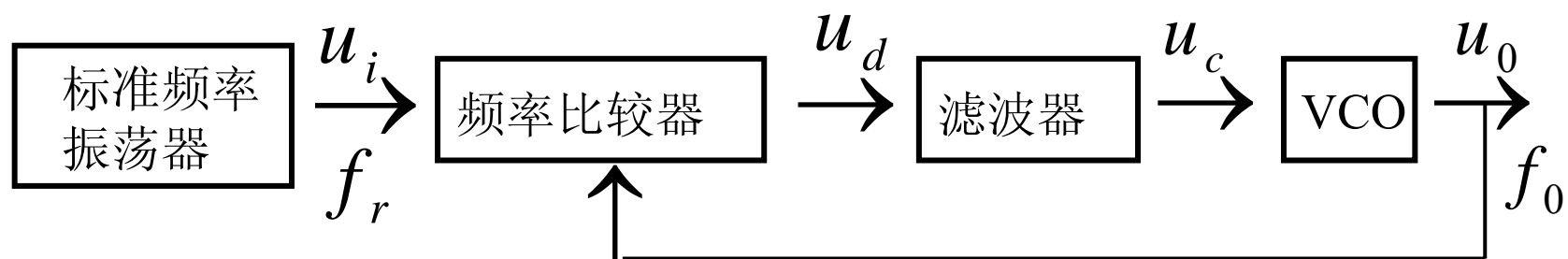
### 一、AFC的原理

振荡器的频率经常由于某种因素的影响而发生变化。为了提高频率的稳定度，采用自动频率控制 (AFC)——使某一个频率稳定度不高的振荡器受另一个频率稳定度高的振荡器的控制。



{ 标准频率振荡器：高稳定度，通常是石英晶体振荡器。  
{ VCO：产生所需信号的振荡器，其频率受电压的控制。





被稳定的振荡器频率  $f_0$  与标准频率  $f_r$  在频率比较器（鉴频器）中进行比较。当  $f_0 = f_r$  时，频率比较器无输出，控制元件不受影响；当  $f_0$  偏离标准频率  $f_r$  时，频率比较器产生一个正比于  $|f_0 - f_r|$  的电压  $u_d$ ，即误差电压，该电压作用于  $VCO$ ，改变  $VCO$  的振荡频率，使  $f_0$  趋向于  $f_r$ 。 $VCO$  在误差电压的作用下，经多次循环， $f_0$  只能接近  $f_r$ ，而不能  $f_0 = f_r$ 。最后有一个剩余频差  $\Delta f = |f_0 - f_r|$ ，这时  $VCO$  将稳定在  $f_r \pm \Delta f$  上。

---

## 二、AFC的应用：P<sub>249</sub>(8.5.2)

1. 调幅接收机自动频率控制系统;
2. 调频接收机自动频率控制系统;
3. 采用AFC的调频器

说明：

*AFC*系统和锁相环路的工作过程十分相似：二者都是利用误差电压的反馈作用来控制振荡器的频率，但二者又有本质的区别：

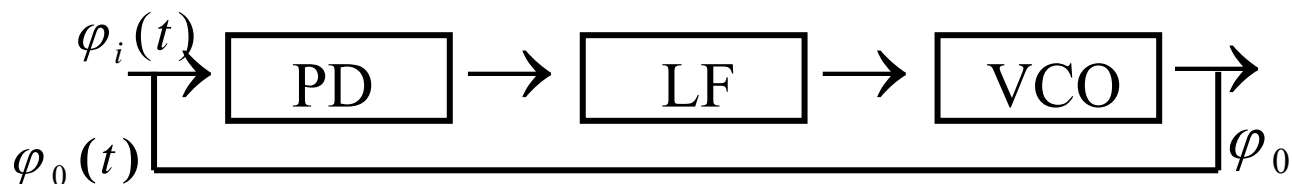
- 1、锁相环路采用的是鉴相器，将相位变化变换为电压的变化，压控振荡器则将变化的电压变换为相位的变化。最终环路锁定， $\frac{d\varphi(t)}{dt} = 0$ ,  $\varphi = \text{常数}$ ，有剩余相差存在，而输入信号的频率与VCO的瞬时频率严格相等。
- 2、*AFC*的系统中，采用鉴频器，将频率变化变换为电压变化，VCO将变化的电压变换为频率的变化，最后稳定时，有剩余频差存在。

所以利用锁相环路可以实现较为理想的频率控制。

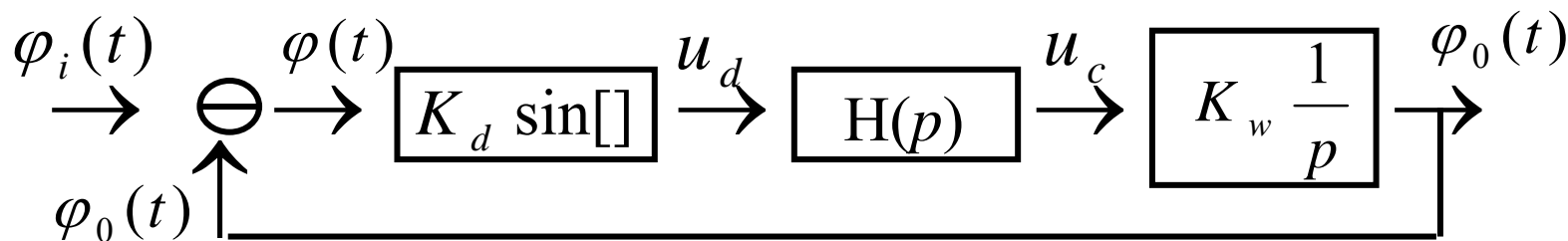
小结:

一、锁相环路（一个框图、一个模型）

1、锁相环路的基本部件：**PD**、**LF**、**VCO**



2、数学模型:



### 3、环路锁定

当环路锁定(瞬时频差为0) ,

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = 0, \varphi = \text{常数}, \omega_i = \omega(t)$$

—压控振荡器的瞬时频率

4、概念：**锁定**、捕捉、跟踪（同步）。

## 二、锁相环的应用

---

{ 倍频、混频、分频 → 锁相频率合成  
调制、解调

三、 $AGC$ 系统  
 $AFC$ 系统 } 工作原理

注意AFC系统与锁相环的区别，锁相环稳频要优于AFC系统稳频。