

通信工程中的锁相环路

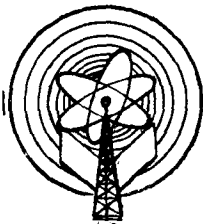
万心平 张厥盛 郑继禹 编

412



西北电讯工程学院

2002/15



通信工程中的锁相环路

万心平 张厥盛 郑继禹 编

西北电讯工程学院

1980.4.

内 容 简 介

锁相环路与调频负反馈环路在无线电通信工程技术中有着相当广泛的应用。本书详细地介绍了锁相环路在稳频、鉴频、相干载波与位同步提取、测速与测距,以及调频负反馈环路在自动频率控制、鉴频等方面的应用。

国防工业出版社出版的工科电子类无线电通信专业统编教材《同步控制原理》为本书提供了理论基础。本书具体地将其理论应用到通信工程中。两本书互相补充,系统地反映了当前锁相环路的理论与应用的状况。

本书可做通信、雷达等专业教材及有关工程技术人员参考。

通 信 工 程 中 的 锁 相 环 路

万心平 张厥盛 郑继禹 编

*

西北电讯工程学院出版

西北电讯工程学院印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 13 1/2

印刷字数 337 千字 印数 1—2700

1980 年第一版 1980 年 4 月第一次印刷

库号技 80001 (01) 定价 1.90 元

前 言

本书系按照高等院校工科电子类无线电通信专业“同步控制原理”课程的需要而编写的一本教学参考书。对该课程，编者已编写了《同步控制原理》（国防工业出版社 1980）一书作为基本教材，它结合着自动控制基本原理，详细地叙述了锁相环路的原理、分析方法、无噪与有噪情况下的线性与非线性同步跟踪性能。这里，为适应各专业的不同需要，我们又编写了本书，分章详细地介绍了锁相环路在稳频、鉴频、相干载波与位同步提取、测速与测距，以及调频负反馈环路在自动频率控制、鉴频等方面的应用。

本书一、五、六章由郑继禹执笔，二章由万心平执笔，三、四章由张厥盛执笔，初稿经三人相互审阅、反复修改，共同定稿的。本书初稿曾与“同步控制原理”一书初稿一道送主审单位上海交通大学审阅，并经 1979 年 6 月在西安召开的教材审稿会议通过。在此，对参加审稿会议及对本书提供过热情帮助的同志表示感谢。

由于编者学术水平有限，不妥之处定然难免，热切盼望读者批评指正。

编 者

1979.8.

主要符号表

A	运算放大器放大量	$h(t)$	脉冲响应函数
A/D	模拟—数字转换器	$H_0(s)$	系统开环传递函数
AFC	自动频率控制	$H(s)$	系统闭环传递函数
AGC	自动增益控制	$H_e(s)$	系统误差传递函数
$a(t)$	归一化寄生调幅	$H_{opt}(s)$	环路最佳传递函数
B	位同步器输入信号码元速率	$H_{L1}(j\Omega)$	中频滤波器的等效低通特性
B_c	位同步器输出信号码元速率	h_{-1}	与闪烁调频噪声有关的系数
B_i	环路前置带通滤波器带宽 (Hz)	h_0	与白调频噪声有关的系数
B_h	压控振荡器与可变数字分频器之间隔离放大器的等效低通滤波器 上限截止频率 (Hz)	h_2	与白调相噪声有关的系数
B_L	环路单边等效噪声带宽 (Hz)	$I^2(\tau)$	平均相对频率起伏的真方差
CK(t)	时钟码信号	$J_n(x)$	以 x 为自变量的第一类 n 阶贝塞尔函数
D/A	数字—模拟转换器	K	环路增益 (1/s)
$D(\theta_e)$	平方环, 同相—正交环和反调制环的等效鉴相特性	K_m	相乘器的系数 (1/V)
$D(\tau_e/T)$	数据转换跟踪环的等效鉴相特性	K_d	鉴相器灵敏度或鉴相特性斜率 (V/rad)
E	码元能量	K_{d1}	电流型鉴相器灵敏度或鉴相特性斜率 (A/rad)
E^2_T	信号产生的积分暂态误差	K_0	压控振荡器灵敏度或控制特性斜率 (rad/sV)
$e(\infty)$	反馈系统稳态误差	K_H	环路高频总增益 (1/s)
$evf(x)$	互补误差函数	K_t	调制器灵敏度或调制特性斜率 (Hz/V)
f	频率 (Hz)	K_f	鉴频器灵敏度或鉴频特性斜率 (V/Hz)
f_i	输入信号频率 (Hz)	K_D	调频解调系数
f_0	压控振荡器输出信号频率 (Hz)	K_s	取样器效率
f_r	频率合成器的参考频率 (Hz)	$\mathcal{L}$	拉普拉斯变换符号
f_N	频率合成器中可变分频器的输出频率 (Hz)	LF	环路滤波器
F_{ch}	多路通道中的每路中心频率 (Hz)	LD	限幅鉴频器
F_m	最高调制频率 (Hz)	$m(t)$	归一化调制信号
$F(s)$	环路滤波器传递函数	$\hat{m}(t)$	$m(t)$ 的估值
$F_{opt}(s)$	最佳环路滤波器传递函数	m_A	调幅度
F_{av}	跳周频率 (Hz)	m_f	调频指数
F_N	放大器噪声系数	m_θ	调相指数
FM	调频信号	m_e	有效调频指数
FSK	移频键控信号		
$G_h(s)$	理想保持电路传递函数		

$M(\Delta f)$	振荡器噪声倍增系数	s	拉普拉斯算子
$n(t)$	环路输入窄带白高斯相加噪声电压 (V)	$S(f)$	随机信号或噪声电压的功率谱密度 (W/Hz)
$n_c(t), n_s(t)$	在 $\omega_0 t$ 上由 $n(t)$ 分解成的两个互为正交的窄带白高斯噪声电压分量 (V)	$S_1(f)$	单边功率谱密度
$N_c(t), N_s(t)$	在 $[\omega_0 t + \theta_1(t)]$ 上由 $n(t)$ 分解成的两个互为正交的窄带白高斯噪声电压分量 (V)	$S_2(f)$	双边功率谱密度
N_0	热噪声或 $n(t)$ 的单边功率谱密度 (W/Hz)	$S_{ni}(f)$	输入噪声电压单边功率谱密度 (W/Hz)
$N(t)$	等效相加噪声电压 (V)	$S_{no}(f)$	输出噪声电压单边功率谱密度 (W/Hz)
N	可变数字分频器的分频比	$S_{\theta_{ni}}(f)$	环路等效输入相位噪声功率谱密度 (rad^2/Hz)
NPR	噪声功率比	$S_{\theta_{no}}(f)$	环路输出相位噪声功率谱密度 (rad^2/Hz)
P_s	信号功率 (W)	$S_{\theta_n}(f)$	频率噪声功率谱密度 (Hz^2/Hz)
P_{si}	输入信号功率 (W)	$S_y(f)$	相对频率起伏功率谱密度
P_{so}	输出信号功率 (W)	$(S/N)_{in}$	输入信噪比 (dB)
P_N	噪声功率 (W)	$(S/N)_{out}$	输出信噪比 (dB)
P_{Ni}	输入噪声功率 (W)	$(S/N)_L$	环路信噪比 (dB)
P_{No}	输出噪声功率 (W)	$(S/N)_{AM}$	振幅检波器输出信噪比 ($m_A = 1$) (dB)
$p = d/dt$	微分或海维赛德算子	$(S/N)_L$	限幅鉴频器输出信噪比 (dB)
PM	调相信号	S_{ri}	鉴相器输出纹波在环路输出端引起的寄生边带抑制比 (dB)
PSK	移相键控信号	S_a	压控振荡器输入端交流干扰在环路输出端引起的寄生边带抑制比 (dB)
PD	鉴相器	t	时间变量
$P(\omega)$	$H(j\omega)$ 的实部	t_p	同步建立时间 (s)
P_e	二元 PSK 信号的误码率	t_c	同步保持时间 (s)
PN	伪随机码	T	码元间隔 (s)
$P(T)$	经时间 T 后发生一次跳周的概率	T_i	输入信号周期 (s)
Q	质量因素	T_0	压控振荡器输出信号周期 (s)
$Q(\omega)$	$H(j\omega)$ 的虚部	T_N	可变数字分频器输出信号周期 (s)
$Q[\theta_e(k)]$	量化特性	T_c	时钟脉冲周期 (s)
R	频率变化速率或频率斜升速率 (rad/s^2)	T_p	捕捉时间 (s)
R_{max}	最大允许扫描速率 (rad/s^2)	T_L	快捕时间 (s)
R_e	复数的实部	T_r	参考信号周期 (s)
$R(\tau)$	相关函数	T_{av}	跳频平均时间 (s)
$R_{\theta_n}(\tau)$	相位噪声 $\theta_n(t)$ 的自相关函数		
$R_{v_n}(\tau)$	噪声电压 $v_n(t)$ 的自相关函数		
$R_{DLL}(\tau_e)$	延迟锁定环相关器的输出特性		

$v_i(t)$	环路输入信号电压瞬时值(V)	$\theta_e(t)$	$\theta_1(t)$ 与 $\theta_2(t)$ 的瞬时相差(rad)
$v_r(t)$	合成器参考电压瞬时值(V)	$\theta_e(\infty)$	稳态相差(rad)
$v_d(t)$	鉴相器输出电压瞬时值(V)	$\dot{\theta}_e(t)$	瞬时相差 $\theta_e(t)$ 对时间的导数或瞬时频差(rad/s)
$v_c(t)$	环路滤波器输出电压瞬时值(V)	$\theta_n(t)$	相位噪声(rad)
$v_o(t)$	压制振荡器输出电压瞬时值(V)	$\theta_{ni}(t)$	环路等效输入相位噪声(rad)
$v_N(t)$	合成器中可变变频器输出电压瞬时值(V)	$\theta_{n0}(t)$	环路输出相位起伏(rad)
$v_n(t)$	噪声电压(V)	$\overline{\theta_{n0}^2(t)}$	环路输出均方相位起伏(rad ²)
$v_\Omega(t)$	正弦调制信号电压瞬时值(V)	$\theta_v(t)$	压控振荡器输出瞬时相位(rad)
VCO	压控振荡器	$\theta_{rms}(\tau)$	取样时间为 τ 的均方根相位抖动或毫秒度指标
$x(t)$	系统输入量	λ	拉格朗日常数
$y(t)$	系统输出量; 以 ω_0 为参考的相对频率起伏	ρ_i	输入信噪比(dB)
α	s 的实部; 限幅器信号抑制系数	ρ_o	输出信噪比(dB)
β	反馈系数	ρ_L	环路信噪比(dB)
$\delta(t)$	冲击函数	σ^2	随机变量 n 的方差; 环路准(非)线性分析得到的相位差方差(rad ²)
$\Delta\omega_0$	固有频差(rad/s)	$\sigma^2_{\theta_{ni}}$	等效输入相位噪声 $\theta_{ni}(t)$ 的方差(rad ²)
$\Delta\omega_H$	同步带(rad/s)	$\sigma^2_{\theta_{n0}}$	环路输出相位方差(rad ²)
$\Delta\omega_p$	捕捉带(rad/s)	$\sigma^2_{\theta_e}$	环路相位差方差(rad ²)
$\Delta\omega_L$	快捕带(rad/s)	σ^2_Σ	总均方误差
Δf_e	有效频偏(Hz)	$\sigma^2_{\Delta t}$	触发噪声总的时间增量方差(S ²)
Δf_m	最大频偏(Hz)	σ^2_{h-1}	由闪烁调频噪声产生的输出相位方差(rad ²)
Δf_d	多卜勒频移(Hz)	σ^2_{h0}	由白调频噪声产生的输出相位方差(rad ²)
Δv_R	测速误差(m/s)	σ^2_{p2}	由白调相噪声产生的输出相位方差(rad ²)
ϵ	失步系数	$\sigma^2_{\theta_{nomin}}$	最小输出相位方差(rad ²)
$\langle \epsilon^2 \rangle$	系统均方误差	$\langle \sigma^2_1(N, T, \tau) \rangle$	时间取样方差的第一个定义
ζ	阻尼系统	$\langle \sigma^2_2(N, T, \tau) \rangle$	时间取样方差的第二个定义
ζ_{opt}	最佳阻尼系统	$\sigma^2_y(\tau)$	无间阿仑方差(简称阿仑方差)
ζ_0	系统开环阻尼系统	$\sigma^2_\tau(\tau)$	有间隔阿仑方差
θ	随机相位(rad)	τ	时间常数; 相关函数自变量; 取样时间间隔(s)
$\hat{\theta}$	随机相位估值(rad)	τ_r	取样脉冲宽度(s)
$\theta_i(t)$	环路输入信号以 $\omega_i t$ 为参数的瞬时相位(rad)	τ_e	压控振荡器输出同步信号在时间
$\theta_o(t)$	压控振荡器输出信号以 $\omega_0 t$ 为参考的瞬时相位(rad)		
$\theta_1(t)$	环路输入信号以 $\omega_0 t$ 为参考的瞬时相位(rad)		
$\theta_2(t)$	压控振荡器输出信号以 $\omega_0 t$ 为参考的瞬时相位(rad)		

	上的迟延量(s)	$\omega_v(t)$	压控振荡器瞬时角频率(rad/s)
τ_s	测距信号传播时间的真实值(s)	Ω	音频调制信号角频率(rad/s)
$\varphi(\omega)$	系统相频特性	ω_r	合成器参加信号角频率(rad/s)
ψ	环路附加相移(rad)	ω_N	可变数字分频器输出信号角频率(rad/s)
$\psi_i(k)$	位同步提取环路以 $2\pi k$ 为参考的输入相位(rad)	ω_n	环路自然角频率(rad/s)
$\psi_o(k)$	位同步提取环路以 $2\pi k$ 为参考的输出相位(rad)	ω_{opt}	环路最佳自然角频率(rad/s)
ω	角频率(rad/s)	ω_c	低通或辅助滤波器截止角频率(rad/s)
ω_i	环路输入信号载波角频率(rad/s)	$\langle \cdot \rangle$	统计平均
ω_0	压控振荡器输出信号中心角频率(rad/s)	$\overline{(\cdot)}$	时间平均

目 录

前 言 主要符号表

第一章 绪 论

§ 1-1 在相干解调技术中的应用	1
1-1 调频、调相解调器	2
1-2 同步检波器	2
1-3 抑制载波的 PSK 信号相干解调器	4
1-4 位同步提取	5
§ 1-2 在稳频技术中的应用	6
2-1 锁相倍频与分频	6
2-2 频率变换	7
2-3 频率合成	7
§ 1-3 在微波与测量技术中的应用	8
3-1 微波锁相频率源	8
3-2 微波锁相功率放大器	9
3-3 自动调谐跟踪	10
§ 1-4 在通信的其它方面的应用	11
4-1 测速与测距	11
4-2 锁相调频、调相调制器	12
结 束 语	12

第二章 锁相稳频

§ 2-1 概述	15
§ 2-2 脉冲取样锁相环	16
2-1 环路组成及工作原理	16
2-2 正弦形取样保持鉴相器	18
2-3 环路相位模型	22
2-4 取样锁相倍频器性能讨论	23
§ 2-3 取样鉴相数字式合成器锁相环	25
3-1 环路组成	25
3-2 锯齿形取样保持鉴相器	26
3-3 环路相位模型	29
3-4 环路性能讨论	30
§ 2-4 电流型鉴频鉴相数字式合成器锁相环	32
4-1 数字式电流型鉴频鉴相器电路组成	32
4-2 鉴相原理与环路同步性能分析	33
4-3 鉴频原理与环路捕捉性能分析	36
§ 2-5 合成器输出纹波	37

5-1 寄生边带抑制比	38
5-2 辅助滤波器	40
5-3 其它寄生输出	44
§ 2-6 合成器的相位噪声	45
6-1 相位噪声的一般概念	45
6-2 合成器噪声的来源	47
6-3 各种输入相位噪声的谱密度	49
6-4 环路噪声响应	55
6-5 环路最佳参数选择	57
§ 2-7 短期频率稳定度	60
7-1 长期频率稳定度和短期频率稳定度	60
7-2 短期频率稳定度的频域表征	61
7-3 短期频率稳定度的时域表征	62
7-4 频域表征与时域表征的关系	66
7-5 压控振荡器短期稳定度与环路输出相位方差的关系	71
§ 2-8 多环数字式频率合成器	73

第三章 锁相鉴频

引言	76
§ 3-1 锁相环路对调频信号的响应	77
§ 3-2 各种锁相环路的鉴频输出	79
2-1 一阶环	80
2-2 采用简单 RC 积分滤波器的二阶环	81
2-3 采用有源或无源比例积分滤波器的二阶环	83
§ 3-3 锁相鉴频器的输出信噪比	86
3-1 限幅鉴频器的输出信噪比	87
3-2 一阶环	88
3-3 采用简单 RC 积分滤波器的二阶环	89
3-4 采用有源或无源比例积分滤波器的二阶环	90
§ 3-4 鉴频器的门限效应	92
4-1 限幅鉴频器的门限机理及门限载噪比的计算	93
4-2 锁相鉴频器的门限	97
§ 3-5 随机调频信号的鉴频与滤波器的最佳设计	100
5-1 信号的功率谱	100
5-2 门限以上的鉴频器输出信噪比	101
5-3 滤波器的最佳设计	103

§ 3-6 非线性失真·····	106	1-1 多普勒效应·····	153
6-1 鉴相器失真·····	106	1-2 锁相环路的作用·····	154
6-2 压控振荡器非线性失真·····	110	1-3 多普勒测速系统的基本型式·····	155
第四章 用于提取相干载波与 位同步的锁相环路		§ 5-2 锁相接收机的分析与设计举例·····	157
引言·····	113	2-1 基本原理·····	157
§ 4-1 平方环与同相—正交环·····	113	2-2 带通限幅器的作用·····	162
1-1 平方环·····	113	2-3 环路性能与误差分析·····	166
1-2 同相—正交环及其与平方环的等效性·····	117	2-4 设计举例·····	169
1-3 输出噪声相位方差·····	120	§ 5-3 跟踪测距环路·····	172
1-4 滤波器的最佳设计·····	122	3-1 测距的基本概念·····	172
§ 4-2 反调制环·····	124	3-2 伪随机码测距信号·····	174
§ 4-3 数据转换跟踪环·····	129	3-3 延迟锁定环路 (DLL) ·····	176
3-1 各部件的作用·····	129	3-4 双环跟踪装置·····	181
3-2 环路的工作情况·····	131	第六章 调频负反馈环路	
3-3 性能说明·····	134	§ 6-1 基本原理·····	184
§ 4-4 早—迟积分清除同步环·····	136	1-1 环路组成·····	184
§ 4-5 全数字同步锁相环·····	140	1-2 环路方程与模型·····	185
5-1 组成与工作原理·····	141	1-3 应用原理·····	188
5-2 组成部件·····	142	§ 6-2 环路线性响应·····	190
5-3 性能分析·····	147	§ 6-3 捕捉过程图解分析·····	193
第五章 测速与测距用的跟踪环路		§ 6-4 环路噪声效应与门限·····	196
§ 5-1 多普勒测速的基本概念与基本型式·····	153	4-1 环路噪声分析·····	196
		4-2 环路噪声门限·····	198
		主要参考资料·····	204

第一章 绪 论

“同步控制原理”^[10]一书,详细地叙述了锁相环路的原理与分析方法,有噪与无噪情况下环路的线性与非线性同步跟踪性能,使我们懂得锁相环路能够有效地提取相位信息,这无疑对于人们研究信息提取与信息处理是相当有用的技术手段。此外,它的许多优良性能,已使它在无线电技术领域内受到愈来愈多的重视,获得日益广泛的应用。其中有三个突出特性引人注目:一为载波跟踪特性,即锁相环路对输入信号的相位变化而言,可等效为一个窄带跟踪滤波器,不但能有效地利用窄带来滤除噪声与干扰,而且环路输出能跟踪输入信号的载波变化,从受噪声污染的、未调或已调(有载波调制或抑制载波调制)的输入信号中提取出纯净的载波;二为调制跟踪特性,适当设计环路可使输入信号调制频谱落在环路的通频带内,那么环路输出频率和相位能够准确地跟踪输入信号的频率与相位的调制变化;三为低门限特性,我们知道,锁相环路不象一般的非线性器件那样,门限取决于输入载噪比,而是由环路信噪比决定,一般环路通频带总比环路输入端的前置通频带窄得多,较高的环路信噪比可取得低门限性能。这样,将环路设计成窄带,就可把淹没在噪声中的微弱信号提取出来,而环路用于解调调频、调相信号时,可取得门限扩展效果;用于解调移相键控(PSK)与移频键控(FSK)信号,可使误码率降低。本书从第二章起,将具体地应用这些特性于无线电通信工程技术中,详细地介绍锁相环路在通信技术的频率合成、鉴频、相干载波与位同步提取、测速与测距等方面的应用。为着说明它应用的广泛性,本章将给予一个综合性概述。

目前,锁相技术的应用已几乎遍及整个无线电技术领域,从空间探测、卫星与导弹的跟踪测距、雷达、导航、通信、计算机、激光到电讯仪表,以及近年来,一些工业生产部门,冶金、水文地质、电力、机械加工、生产自动化等方面都广泛地使用着锁相环路技术,完成诸如频率合成、窄带滤波、相干解调、自动频率控制、位同步、自动调谐、作微波固态频率源与功率放大器、标准频率源、测速与测距等多种技术功能。与功能相似的其它电路技术相比,它有性能好、成本低等优点。此外,组成环路的基本部件易于集成化与数字化,环路集成化与数字化为减小体积、降低成本、增加可靠性、扩大使用面等提供了有利的条件。随着体积小、成本低、多功能的单片集成锁相环的出现,它的应用就会更加广泛。

此外,环路的同步控制理论对自然界与生物物理学等方面的研究也有一定的促进作用。因为在那里,同步与失步现象是惯常的,而且其规律与锁相环路的锁定与失锁是完全类似的,所以应用环路的同步控制理论可以进一步探讨生物与自然界一些复杂的现象。

下面重点介绍锁相环路在无线电通信领域的几种主要应用。

§1-1 在相干解调技术中的应用

锁相环路在通信、雷达、导航、仪表测量、遥测与遥控等系统的解调技术中有着非常广泛的应用。如用以解调模拟的调幅(AM)、调频(FM)与调相(PM)信号;解调数字的振幅键控(ASK)、移频键控(FSK)与移相键控(PSK)信号;在遥测遥控等空间通信系统中,常用于解调 N 个正弦付载波与 L 个方波付载波组合调制的信号;在数字卫星通信

系统中，使用反调制环路可获得快速捕捉与移相键控信号相干解调相结合的良好性能。下面对各种环路解调方式加以简单的介绍。

1-1 调频、调相解调器

通常，调频、调相信号有模拟调制（FM、PM）与数字调制（FSK、PSK）两种形式。对于窄带 FM、PM 与 FSK 信号，它的频谱中常含有较强的载波分量，可供环路载波跟踪用。因此，将环路设计成载波跟踪环，利用环路的窄带特性，能以较高的输出信噪比从鉴相器输出端解调出 FM、PM 与 FSK 信号来，如图 1-1 所示。对于 FSK 信号，还应当在输出端后置一个积分-判决电路，进一步提高信号的抗干扰性。

对于宽带 FM 与 PM 信号，其频谱中载频分量比较弱，环路无法进行载波跟踪，加之宽带 FM 与 PM 信号的调制指数（即最大相位偏移）大，当环路设计成载波跟踪环时，此调制指数成为环路鉴相器相位误差一部分，易使鉴相器工作到鉴相特性的非线性区域。因此，一般都使用调制跟踪环路来解调宽带 FM 与 PM 信号，环路设计成宽带，从环路滤波器输出端输出解调信号，如图 1-1 所示。由于压控振荡器的输出相位跟踪输入的调制变化，且负反馈到鉴相器输入端，故最大相位误差偏移会减小，从而使鉴相器不会工作到非线性区域。

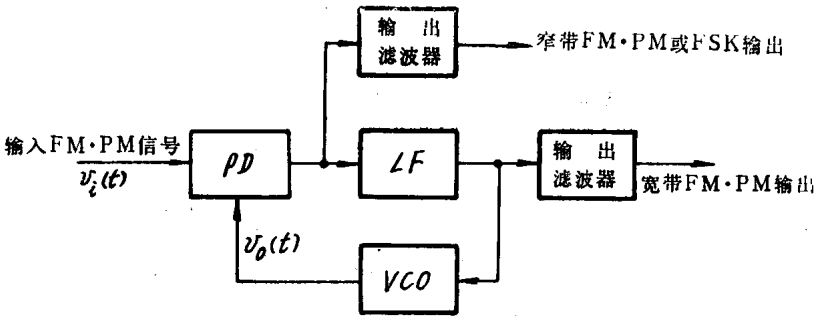


图 1-1 调频调相解调环路

由于环路的滤波作用，噪声引起的环路每秒钟跳周次数远小于限幅鉴频器输出端每秒钟出现的脉冲数，所以门限电平低，与限幅鉴频器相比约有 4~5dB 的门限改善。关于利用调制跟踪特性的锁相鉴频器的原理与性能分析，在第三章要作详细介绍。

锁相鉴频器可用在小型移动式调频电台中，更广泛地用在调频制微波接力系统与卫星通信系统中作频分多路（FDM）信号与电视信号的门限扩展解调器用。在遥测遥控等系统中，角调制信号可以是 N 个相位调制的正弦付载波与 L 个方波付载波的相加组合形式。正弦付载波用来传输遥测、遥控与测距等信息，方波付载波用来传输数据信息。这种复杂的角调制信号可用窄带的载波跟踪环来提取。调制信号由鉴相器输出端取出，然后用付载波带通滤波器进行分割提取，再加之各自的解调器上，将调制在正弦付载波与方波付载波上的信息与数据最终解调出来，如图 1-2 所示。

1-2 同步检波器

普通的调幅（AM）信号频谱中，除包含调制信息的边带成分外，还含有强的载波分量，使用载波跟踪环可将载波分量提取出来，再经 90° 相移，可用作同步检波器的相干基准

信号。这种同步检波器如图 1-3 所示。

同步检波可避免一般包络检波器检波弱信号时存在门限、效率低与失真大等问题。图

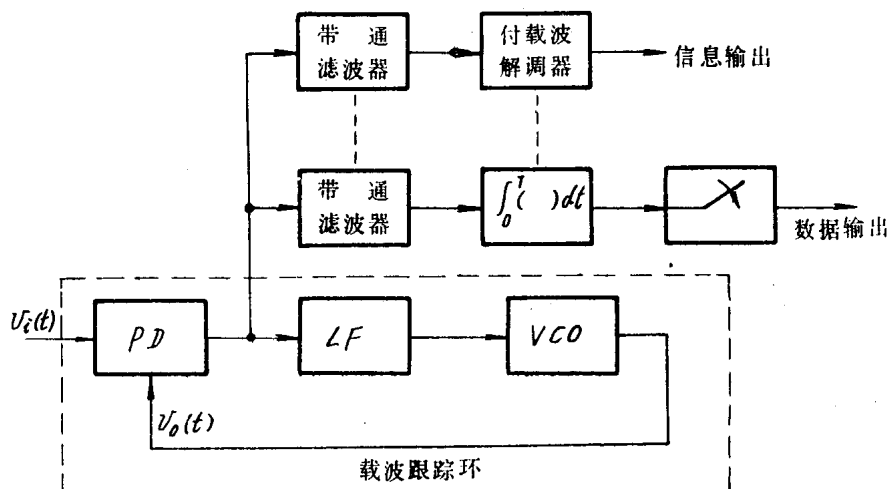


图 1-2 遥测遥控系统中信息与数据解调环路

1-3 亦可用来解调含有载波分量的振幅键控 (ASK) 信号。此外, 图 1-3 还可作相干式自动增益控制的振幅检波器使用, 在相乘器输出端的直流成分为

$$\frac{1}{2} K_m V_i V_o \cos \theta_e(\infty)$$

当环路处于锁定状态时, $\cos \theta_e(\infty) \approx 1$, 所以直流成分与输入信号载波振幅 V_i 成正比, 用窄带低通滤波器取出这个成分, 可作自动增益控制电压。相干式自动增益控制的特点是即

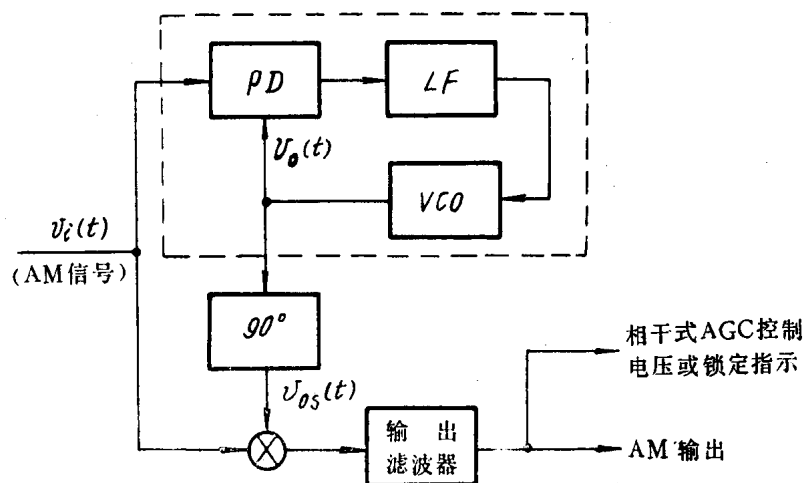


图 1-3 AM 信号同步检波方案

使信号被噪声淹没的情况下, 只要环路仍能正常工作, 就可提供一个与信号强度成正比的自动增益控制电压。

抑制载波的双边带调幅信号 (DSB/SC) 通信与单边带通信有同等的优点, 如有载波功率的节约, 没有载波的选择性衰落而引起的强烈非线性失真, 与普通调幅制相比有 3dB 的

输出信噪比增益等。但是这种信号只能以同步检波方式进行解调，用锁相环从抑制载波的双边带调幅信号中恢复出载波分量，供同步检波用。这种同步检波方案如图 1-4 所示，它的工作原理与第四章叙述的同相——正交环是一样的。

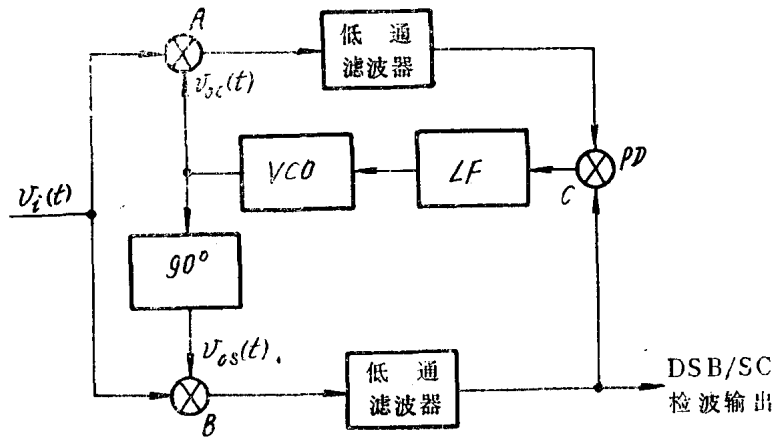


图 1-4 DSB/SC 信号同步检波方案（同相—正交环）

用同步检波器组成的同步接收机，可进行直接式检波，因而没有镜像与中频干扰，而且接收机选择性主要由环路的低通滤波特性决定，比一般接收机中频滤波器容易获得高选择性，所以抑制邻道干扰与噪声能力强，此外，除检波前的前端电路外，几乎不用电感元件，为接收机集成化，数字化提供了发展前景。显然，用锁相环作同步检波器的同步接收机是大有发展前途的。

1-3 抑制载波的 PSK 信号相干解调器

目前，数据传输系统中，受数字调制的载波或付载波信号，还采用抗干扰性较强的二相或四相移相键控（PSK）信号的形式。按照信号检测理论，平均误码率最小的移相键控信号最佳相干解调器有锁相环路的构成形式。由于移相键控信号的频谱中不包含有载频及其倍频分量，不能直接利用载波跟踪环来提取载波，必须运用非线性变换，将 PSK 信号中的载波信息变换成载波分量，再用载波跟踪环提取出来，作相干解调载波使用。这种抑制载波的载频提取环路形式很多，如有平方环，同相——正交环，反调制环（判决反馈环）等。图 1-5 为平方环原理组成，它利用平方律器件的非线性完成变换功能。图 1-4 也是同相——正交环的组成，它由两个互为正交的环路通路所组成，利用相乘器 C 的相乘非线性完成变换功能，环路设计成窄带，起提取相干载波的作用。

反调制环主要用在卫星通信中。使用时分多址（PCM-PSK-TDMA）与频分多址（PCM-PSK-FDMA）等工作方式的卫星数字通信系统中，各个地面站解调移相键控信号都需要一个本地相干基准载波。由于这两种工作方式，相干载波信息的传送都是间歇性的，若用锁相环路来提取相干载波，就要求环路捕捉时间极短，一般为微秒级，否则环路还未进入锁定，输入信号就没有了。一般的抑制载波跟踪环达不到这个要求，必须使用能快速捕捉的反调制环。

图 1-6 为一个解调二相移相键控信号的反调制环原理图。它使用了判决——反馈的原理，把检波出的数字信号再反馈去抵消接收信号中的调制，这样可恢复出载波，用锁相环提

取出来可作相干载波使用。此时，环路可设计成宽带，快捕带宽，能进行快速捕捉。

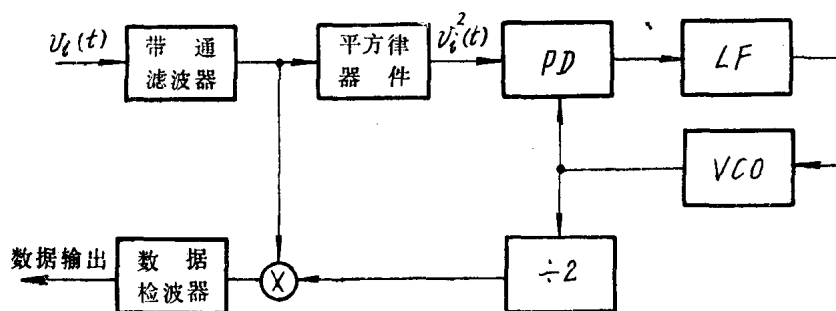


图 1-5 平方环相干解调器

1-4 位同步提取

在数字通信接收系统中，首先应建立载波与付载波同步，获得相干解调，然后就是建立位同步（或称比特同步）以确定每一个数字码元的起止时刻，使之能对数字信息作出正确的判断。用锁相环路直接地从接收的数字信号中提取位同步信号的自同步技术，无论从经济、可靠性、抗扰度等方面来看都是很有有效的。锁相式位同步器又有连续同步器与数字同步器两种形式。

连续同步器是将鉴相得到的误差电压，经适当滤波后去连续调整压控振荡器的频率与相位而实现位同步的。通常有数据转换跟踪环，早—迟积分消除同步环等多种形式。

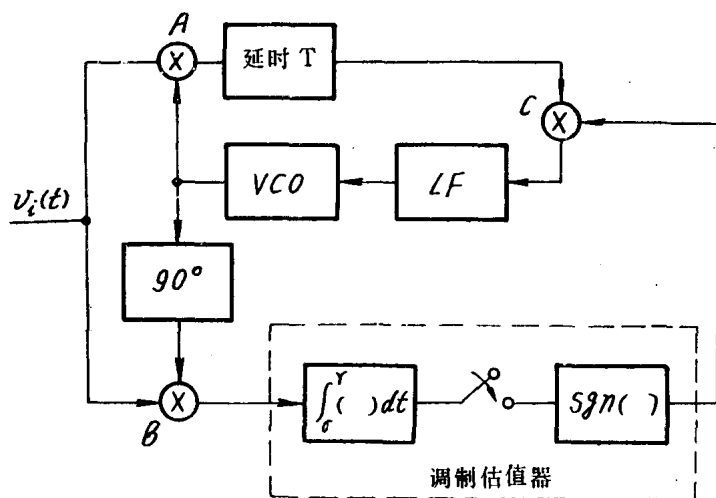


图 1-6 反调制环

数字同步器则是通过信号钟送出的本地参数信号进行相位的量化调整来实现位同步的。数字同步器通常有全数字锁相环的形式，如图 1-7 所示。

数字鉴相器是一种超前——滞后门的形式，根据相位差的极性输出“超前”或“滞后”脉冲到环路滤波器上。环路滤波器使用数字序列滤波器，如有“N先于M”和随机徘徊等形式，它能提高环路相位调整的准确性，减少噪声与干扰的作用。受控振荡器通常由不直接受控的信号钟与控制器所组成。环路滤波器输出的控制脉冲通过控制器可在信号钟输出脉冲序

列中“加”一个或“扣”一个脉冲，使环路输出的参考信号脉冲获得位同步。这是一种按最大后验概率准则建立起来的同步系统，在数字通信系统中有广泛的应用。

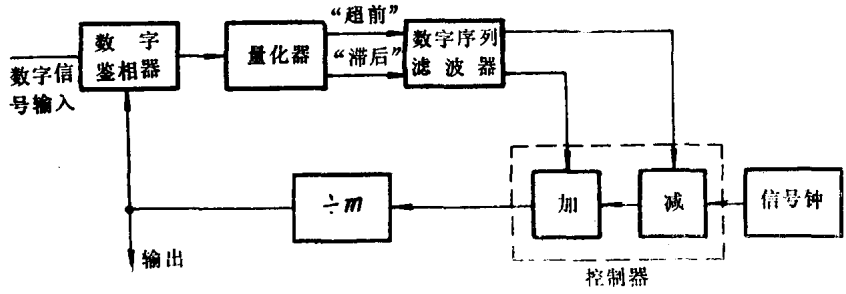


图 1-7 数字同步器

关于平方环、同相-正交环、反调制环与上述各种位同步环的原理与性能在第四章有详细的叙述。

§ 1-2 在稳频技术中的应用

锁相环路可用于分频、倍频与进行频率变换，这几种技术的组合又可构成良好的锁相式频率合成器与标准频率源，在现代通信、雷达及电讯仪表中有着广泛的用途。

2-1 锁相倍频与分频

锁相倍频与分频就是通过环路，将压控振荡器频率锁在输入信号的某次谐波与分谐波上。常用的是环路鉴相器使用采样-保持电路组成的脉冲取样鉴相器，通过取样可方便地实现倍频与分频。图 1-8 与图 1-9 分别是锁相倍频器与分频器的组成形式。

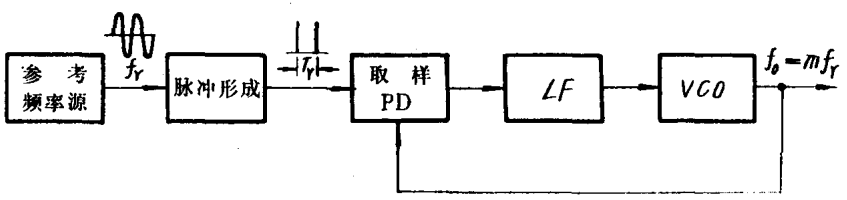


图 1-8 锁相倍频器

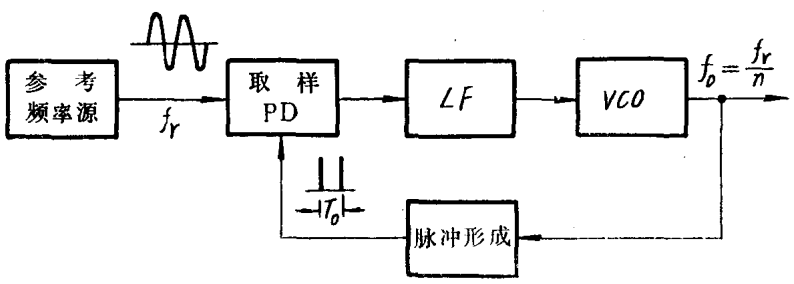


图 1-9 锁相分频器

锁相倍频器与分频器同一般的倍频、分频器相比，环路对无用谐波的抑制能力强，输出纯净，调节压控振荡器的频率就可简便地改变倍频与分频次数，而且倍频与分频次数可做得

比较高。

2-2 频率变换

采用锁相环路进行频率变换或频率搬移, 可将弱信号转换为强的高稳定性与高纯度的信号输出。图 1-10 为频率变换方框图。在基本的锁相环路中加进一级混频器 (MX) 与低通滤波器 (LF), 即可将输入频率 f_1 变换为 $f_0 = f_1 + f_2$ 的信号输出。

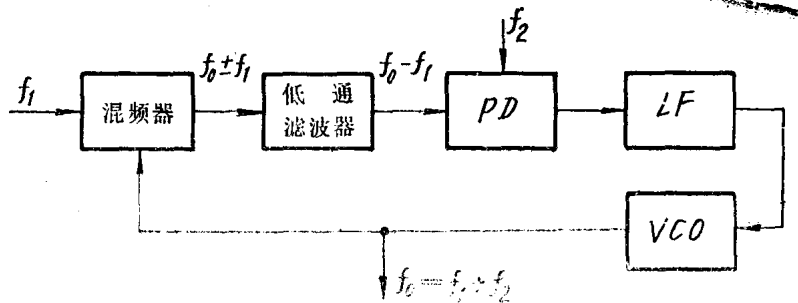


图 1-10 频率变换器

在图 1-10 上, 输入信号 (f_1) 与压控振荡器信号 (f_0) 经混频后, 产生和频与差频分量 $f_0 \pm f_1$, 用低通滤波器很容易地滤除和频、取出差频 ($f_0 - f_1$) 分量加至鉴相器输入端。当环路锁定时, $f_0 - f_1$ 应等于偏移信号频率 f_2 。由于

$$f_0 - f_1 = f_2$$

故压控振荡器输出频率为

$$f_0 = f_1 + f_2$$

显然, 若进行频率的微量搬移, 因和频与差频靠得太近, 用普通的混频滤波技术对无用分量的抑制是相当困难的。而在这里, 主要靠低通滤波器抑制无用分量, 抑制比可做得高, 这在单边带技术、电讯伏表与频率合成技术中相当有用。

图 1-11 是一精密仪表中一个连续振荡器单元, 利用频率变换的原理, 将稳定度只能做到 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 量级的频率连续可变振荡器, 变换为稳定度达到晶体振荡器稳定度量级 (10^{-8} 以上) 的输出。显然, 频率连续可变振荡器频率低, 尽管稳定度只有 $10^{-3} \sim 10^{-4}$, 但是绝对频率偏移小, 因而对频率搬移后的高频输出的频率稳定度影响极小, 所以高频输出的频率稳定度基本取决于晶振频率稳定度。

2-3 频率合成

数字式频率合成器是目前通信与仪表技术中广泛使用的一种间接式频率合成技术, 它的基本组成如图 1-12 所示。

数字式频率合成器的构成特点是在锁相环路的反馈支路上插入一个数字程序分频器, 改变分频比 N , 就可改变频率输出。它能提供长期频率稳定度与短期频率稳定度都比较高、杂波少的输出信号, 而且体积小, 信道数目多, 易于数字化与集成化。

关于锁相式频率合成技术, 第二章将有详细的叙述。

锁相式频率合成技术还可用在计算机中, 从一单个时钟信号源合成多个钟频。