



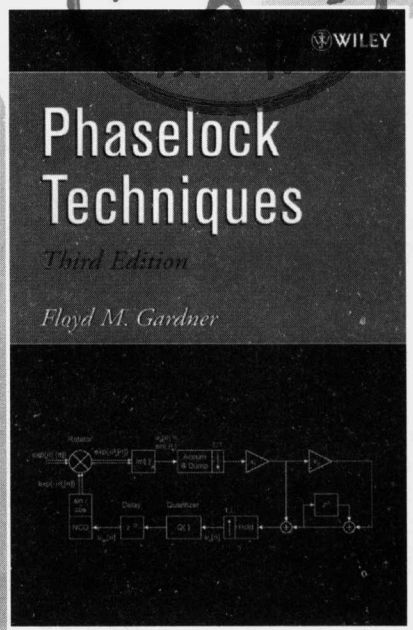
TURING

图灵电子与电气工程丛书

# 锁相环技术

Phaselock Techniques (第3版)  
Third Edition

[美] Floyd M. Gardner 著  
姚剑清 译



人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

锁相环技术: 第3版 / (美) 加德纳 (Gardner, F.M.) 著;  
姚剑清译. —北京: 人民邮电出版社, 2007.11  
(图灵电子与电气工程丛书)  
ISBN 978-7-115-16717-0

I. 锁… II. ①加…②姚… III. 锁相技术 IV. TN911.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 131768 号

## 内 容 提 要

本书是锁相环技术领域的经典著作,在前两版的基础上进行了大幅的改写和扩充。不仅对传统锁相技术重新进行了更深入的考察,并增加了许多从未发表过的新内容,反映了近年来的最新技术进展。本书的重点是讲解基本原理,同时详细介绍了频率捕获、电荷泵锁相环等热点应用问题。

本书主要适用于通信电子行业的工程技术人员以及高等院校相关专业师生。

图灵电子与电气工程丛书

## 锁相环设计(第3版)

- 
- ◆ 著 [美] Floyd M. Gardner
  - 译 姚剑清
  - 责任编辑 朱 巍
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京铭成印刷有限公司印刷  
新华书店总店北京发行所经销
  - ◆ 开本: 700 × 1000 1/16  
印张: 23.5  
字数: 488 千字 2007年11月第1版  
印数: 1-4 000 册 2007年11月北京第1次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2007-3372 号

ISBN 978-7-115-16717-0/TN

定价: 69.00 元

读者服务热线: (010)88593802 印装质量热线: (010)67129223

# 版 权 声 明

Original edition, entitled *Phaselock Techniques (Third Edition)* by Floyd M. Gardner, ISBN 0-471-43063-3, published by John Wiley & Sons, Inc. Copyright © 2005 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

Translation edition published by POSTS & TELECOM PRESS Copyright © 2007.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权人民邮电出版社独家出版。

版权所有,侵权必究。

# 前 言

本书第1版是1966年出版的,第2版于1979年问世。1966年,锁相技术是一门难以想象的神奇技术,其应用范围有限,做这项技术的人几乎没有。现在的锁相技术已经成熟:在全世界的大量电子器件内都有锁相环;无数的应用中都有锁相环;许多人在继续研发锁相技术。在本书第1版问世的时候,还没有其他关于锁相环的书,可今天这样的书已经超过了20本。那么,为什么要在这个时候写第3版呢?

在1966年,锁相技术是一件新奇事物,那时的读者需要一本简短的入门性书籍。而今天的锁相环已经成为电子工程中的主流器件。同时,这些年来锁相环方面积累了大量的新概念,曾经非常重要的内容已经不再那么重要了。经验告诉我,前2版书中的有些内容还应当修改。

我们已经不需要再写一本入门性的书了,因为1.3节中列出的几本书中都有极好的论述,而且也许还有其他的书。本书对传统锁相技术重新进行了更深刻的考察,并增加了许多新内容,其中有些是从未发表过的。增加的内容包括:对传递函数的重新组织和扩充,关于相位噪声的两章,关于数字锁相环的两章,关于电荷泵锁相环的一章,对检相器内容的扩充,以及关于异常锁定的一章。

与前两版一样,电路只占极小的篇幅。本书的重点是讲基本原理,因为基本原理不会因技术进步而过时,而电路的实现方法是日新月异的。第2版中的一些内容被删去了,这些删除的内容包括优化与同步的章节和数学附录等。形式上的优化对设计的重要性并不像原来想象的那么好,设计者更愿意对实际锁相环中为数不多的几个参数进行权衡与折中;删去了数学附录,是因为书中所要求的数学难度不会超过所有电子工程类大学毕业生的水平。同步(从数据信号中恢复载波与时钟)本身是一大课题,随着它的发展,读者一定会觉得这些内容包含在一本关于锁相环的书中是不合适的。17.1节中有关于同步的简单介绍。

仿真是本书未涉及的另一课题。本书的几章中关于仿真的内容取自具体的仿真实验,有些新的数据只能通过仿真才得到,仿真又是IC设计与验证的关键。但本书并没有说明如何进行锁相环仿真。关于仿真的内容值得单独写一本书,如果把仿真也包含在本书中,内容就有些太多了。

这些年来,全世界出现了数以千计关于锁相技术的文章和书籍,我不可能一一列举。虽然本书的各章中已经包含了许多有关的文献,但仍有遗漏之处。而且,在经历了这么多年的工作之后,也很难记起每门技术当初是由谁提出的。我对未能提及的同仁表示歉意,这样的疏漏不是有意的。

本书在选择参考文献时遵循了几个原则:文献应是原创的;它应该尽可能是公开

发表的、存档的出版物；它所论述的是原理性的，而不是只流行一时的电路实现。读者会看到，绝大部分的参考文献来自 IEEE 和在美国出版的书籍。这些文献既反映了 IEEE 出版物的无处不在，也反映了我个人藏书的情况。

我要感谢我的客户们，在这些年里是他们给了我这么多学习锁相这门神奇技术的机会。

Floyd M. Gardner  
加利福尼亚州，帕洛阿尔托市

# 符号表示法<sup>①</sup>

$A$	振幅, 幅度	$j$	$\sqrt{-1}$
$B_i$	输入带通滤波器的带宽(Hz)	$K$	PLL 的环路增益(rad/s)
$B_L$	PLL 的噪声带宽(Hz)	$K'$	归一化的(无量纲的)环路增益, 其值等于 $K\tau_2$
$b$	数字量的位数	$K_d$	检相器的增益(V/rad 或 A/rad)
$b$	极点频率与零点频率之比	$K_{DC}$	PLL 的 DC 增益(rad/s)
$f$	频率(Hz)	$K_i$	模拟 PLL 的增益系数, $i=1, 2, \dots$
$f$	傅里叶变换的变换变量	$K_m$	乘法器的增益( $V^{-1}$ )
$f_c$	检相器的比较频率(Hz)	$K_o$	VCO 的增益(rad/s · V)
$f_{ck}$	时钟频率(Hz)	$K_p$	检相器的增益(V/cycle), 其值等于 $2\pi K_d$
$f_m$	调制频率(Hz)	$K_v$	VCO 的增益(Hz/V), 其值等于 $K_o/2\pi$
$f_s$	采样频率(Hz), 其值等于 $1/t_s$	$k$	整数
$\Delta f$	频率偏离的峰值(Hz)	$L\{x\}$	$x$ 的拉普拉斯变换式
$\Delta f$	相对于载波的频偏(Hz)	$\mathcal{L}(f)$	信号的归一化单边 RF 谱
$\delta f$	量化调谐振荡器的频率步长(Hz)	$m, M$	整数
$D$	延迟(样点间隔数)	$m(t)$	调制波形
$E(f)$	其值等于 $E(s) _{s=j2\pi f}$	$N_o$	白噪声的单边谱( $V^2/\text{Hz}$ )
$E(s)$	PLL 的闭环误差传递函数	$n, N$	整数
$F(s)$	环路滤波器的传递函数	$n(t)$	噪声电压(V)
$FP[x]$	$x$ 的小数部分	$n_c(t), n_s(t)$	带通噪声的基带正交分量(V)
$G(s)$	PLL 的开环传递函数	$o$	表示“输出”或“振荡器”的下标
$H(f)$	其值等于 $H(s) _{s=j2\pi f}$	$P_{RF}(f)$	由谱分析仪输出的 RF 信号的单边谱密度表示
$H(s)$	PLL 的闭环系统传递函数	$P_s$	信号功率(W)
$\text{Im}[x]$	$x$ 的虚部	$p$	归一化的拉普拉斯变量, 其值等于 $s\tau_2$
$\text{IP}[x]$	$x$ 的整数部分	$Q$	谐振器的品质因数
$i$	表示“输入”的下标	$Q$	量化的级数
$i$	整数	$Q$	标度比
$J_n(x)$	以 $x$ 为自变量的第一类 $n$ 阶贝塞尔函数	$\text{Re}[x]$	$x$ 的实部

① 本书保留了原版的图形文字符号表示法, 与国内标注有所不同, 请读者注意。——编者注

(续)

$r(t)$	接收到的信号	$V_s$	输入信号的峰值电压(V)
$s = \sigma + j\omega$	拉普拉斯变换的变换复变量	$v_c(t), V_c(s)$	VCO的控制电压(V)
SNR	信噪比	$v_d(t), V_d(s)$	检相器的输出(V)
$SNR_L$	PLL噪声带宽 $2B_L$ 内的信噪比	$W_n(f)$	检相器等效噪声输出的单边谱密度 ( $\text{rad}^2/\text{Hz}$ )
$t$	时间(s)	$W_{\text{no}}(f)$	由 PLL 的输入噪声引起的 VCO 相位的单边谱密度 ( $\text{rad}^2/\text{Hz}$ )
$t_s$	采样间隔时间(s), 其值等于 $1/f_s$	$W_{\text{RF}}(f)$	测量得到的 RF 信号的单边谱密度 ( $\text{V}^2/\text{Hz}$ )
$u_c[n]$	NCO 的第 $n$ 个控制输入样点(无量纲)	$W_{\omega}(f)$	振荡器输出的理论单边谱密度 ( $\text{V}^2/\text{Hz}$ )
$u_d[n]$	数字检相器的第 $n$ 个输出样点(无量纲)	$W_{\phi}(f)$	相位噪声的单边基带谱 ( $\text{rad}^2/\text{Hz}$ )
$V_o$	VCO 的峰值输出电压(V)	$z$	$z$ 变换的变换变量

## 希腊符号

$\alpha$	限幅器的信号抑制因子(无量纲)	$\rho$	信噪比
$\beta$	角度调制的调制度(rad)	$\sigma_x$	$x$ 的标准偏差
$\gamma$	信号的峰顶因子	$\tau$	定时误差(s)
$\epsilon[n]$	第 $n$ 个相位样点(cycle)	$\tau$	延迟(s)
$\zeta$	二阶 PLL 的阻尼因子	$\tau_i$	时间常数(s), $i=1, 2, \dots$
$\theta$	相位角(rad)	$\tau_2$	2类 PLL 中起稳定作用的零点的时间常数(s)
$\theta_s$	由频率斜升输入引起的稳态相位误差(rad)	$\phi(t)$	相位噪声(rad)
$\theta_e$	输入信号与 VCO 之间的相位误差(rad), 其值等于 $(\theta_i - \theta_s)$	$\psi$	沿单位圆的角度(rad)
$\theta_i$	输入信号的相角(rad)	$\psi$	归一化频率(无量纲), 其值等于 $\omega t_s$
$\theta_{\omega}$	由噪声引起的 VCO 相位的波动(rad)	$\psi(s)$	传递函数的相位(rad)
$\theta_o$	VCO 的相位(rad)	$\psi_{gc}$	采样 PLL 开环传递函数的归一化单位增益穿越频率 $\omega_{gc} t_s$ , $ G(e^{j\omega_{gc}}) =1$
$\theta_v$	由频率偏移引起的稳态相位误差(静态相位误差; 环路应力)	$\omega$	角频率(rad/s), 其值等于 $2\pi f$
$\Delta\theta$	相位偏离(rad)	$\omega_c$	检相器的比较频率(rad/s), 其值等于 $2\pi f_c$
$\Delta\theta$	相位阶跃的幅度(rad)	$\omega_{gc}$	开环传递函数的单位增益穿越频率(rad/s), $ G(j\omega_{gc}) =1$
$\kappa$	数字 PLL 的环路增益(无量纲)	$\omega_m$	调制频率(rad/s)
$\kappa_d$	数字检相器的增益( $\text{rad}^{-1}$ )	$\omega_n$	二阶 PLL 的固有频率(rad/s)
$\kappa_i$	数字 PLL 的增益系数, $i=1, 2, \dots$	$\omega_x$	相位穿越频率(rad/s), $\text{Arg}[G(j\omega_x)] = -\pi$
$\kappa_o$	NCO 的增益(rad)	$\Delta\omega$	频率偏移或频率阶跃(rad/s)
$\kappa_p$	数字检相器的增益( $\text{cycle}^{-1}$ ), 其值等于 $2\pi\kappa_d$	$\Delta\omega_H$	PLL 的保持极限(rad/s)
$\kappa_v$	NCO 的增益(cycle), 其值等于 $\kappa_o/2\pi$	$\Delta\omega_L$	PLL 的锁定极限(rad/s)
$\Lambda$	频率的变化率( $\text{rad}/\text{s}^2$ ), 其值等于 $d\omega/dt$	$\Delta\omega_P$	PLL 的拉入极限(rad/s)



# 目 录

第1章 简介 .....	1	第3章 图示法 .....	24
1.1 PLL的性质 .....	1	3.1 根轨迹图 .....	24
1.1.1 带宽 .....	1	3.1.1 根轨迹图的描述 .....	24
1.1.2 线性 .....	2	3.1.2 稳定性判据 .....	27
1.2 本书结构 .....	2	3.1.3 1类PLL的根轨迹 .....	27
1.3 文献及注释 .....	3	3.1.4 2类PLL的根轨迹 .....	27
1.3.1 推荐书目 .....	3	3.1.5 3类PLL的根轨迹 .....	28
1.3.2 技术文集 .....	4	3.1.6 高阶PLL的根轨迹 .....	29
1.3.3 杂志专刊 .....	4	3.1.7 环路延迟对根轨迹的影响 .....	31
第2章 模拟PLL的传递函数 .....	5	3.2 伯德图 .....	31
2.1 基本传递函数 .....	5	3.2.1 不同的图示方法 .....	31
2.1.1 基本单元电路的传递函数 .....	5	3.2.2 稳定性 .....	32
2.1.2 合成的传递函数 .....	6	3.2.3 1类PLL的伯德图 .....	33
2.1.3 特征方程 .....	7	3.2.4 2类PLL的伯德图 .....	34
2.1.4 命名法、系数和单位 .....	7	3.2.5 3类PLL的伯德图 .....	38
2.2 二阶PLL .....	8	3.3 奈奎斯特图 .....	39
2.2.1 环路滤波器 .....	8	3.4 尼科尔斯图 .....	40
2.2.2 阶数和类型 .....	9	3.4.1 稳定性准则 .....	40
2.2.3 环路参数 .....	10	3.4.2 $M$ 等值线 .....	40
2.2.4 频率响应 .....	12	3.4.3 尼科尔斯图举例 .....	41
2.3 其他环路阶数和类型 .....	16	3.5 闭环频率响应曲线 .....	42
2.3.1 环路增益 $K$ 的一般性 定义 .....	16	附录3A 根轨迹的特点 .....	43
2.3.2 1类PLL举例 .....	18	3A.1 根轨迹的分支 .....	43
2.3.3 2类PLL举例 .....	20	3A.2 轨迹在实轴上的部分 .....	43
2.3.4 更高类的PLL .....	23	3A.3 轨迹与轴的交点 .....	44
参考文献 .....	23	附录3B 开环传递函数 $G(s)$ 的 形式 .....	45
		3B.1 比例加积分环节 .....	46
		3B.2 高频环节 .....	48
		3B.3 计算 .....	49

附录 3C 闭环频率响应 .....	49	4A.1 1 类 DPLL .....	77
3C.1 频率响应公式 .....	49	4A.2 2 类 DPLL .....	77
3C.2 频率响应图举例 .....	50	参考文献 .....	80
参考文献 .....	52	<b>第 5 章 跟踪 .....</b>	<b>81</b>
<b>第 4 章 数字 PLL: 传递函数与     相关工具 .....</b>	<b>53</b>	5.1 线性跟踪 .....	81
4.1 数字 PLL 的特性 .....	53	5.1.1 稳态相位误差 .....	81
4.2 数字传递函数 .....	54	5.1.2 瞬态响应 .....	83
4.2.1 数字 PLL 的结构 .....	54	5.1.3 正弦角调制的响应 .....	92
4.2.2 差分方程 .....	54	5.2 非线性跟踪: 锁定极限 .....	94
4.2.3 环路单元的 $z$ 变换 .....	56	5.2.1 检相器的非线性 .....	94
4.2.4 环路滤波器 .....	56	5.2.2 稳态极限 .....	94
4.2.5 环路传递函数 .....	57	5.2.3 瞬态极限 .....	96
4.2.6 极点与零点 .....	58	5.2.4 调制极限 .....	99
4.3 环路稳定性 .....	59	参考文献 .....	102
4.3.1 1 类 DPLL .....	59	<b>第 6 章 加性噪声的影响 .....</b>	<b>103</b>
4.3.2 2 类 DPLL .....	60	6.1 线性操作 .....	103
4.3.3 3 类 DPLL .....	60	6.1.1 检相器的噪声模型 .....	103
4.4 根轨迹图 .....	60	6.1.2 噪声传递函数 .....	107
4.4.1 1 类 DPLL 的根轨迹 .....	61	6.1.3 噪声带宽 .....	108
4.4.2 2 类 DPLL 的根轨迹 .....	62	6.1.4 PLL 的信噪比 .....	109
4.4.3 3 类 DPLL 的根轨迹 .....	64	6.1.5 最优值 .....	110
4.5 DPLL 的频率响应: 公式推导 .....	65	6.2 非线性操作 .....	110
4.6 伯德图和尼科尔斯图 .....	66	6.2.1 观察到的行为 .....	111
4.6.1 伯德图基础 .....	66	6.2.2 相位误差的非线性分析 .....	113
4.6.2 伯德稳定性判据 .....	67	6.2.3 概率密度和方差 .....	113
4.6.3 DPLL 伯德图举例 .....	67	6.2.4 周期滑步 .....	114
4.6.4 尼科尔斯图举例 .....	69	6.2.5 实验结果和仿真结果 .....	115
4.7 DPLL 的连续时域近似 .....	71	6.2.6 近似分析 .....	115
4.8 频率响应举例 .....	71	6.2.7 其他特点 .....	116
4.8.1 延迟的影响 .....	71	参考文献 .....	117
4.8.2 带宽的影响 .....	72	<b>第 7 章 相位噪声的影响 .....</b>	<b>119</b>
4.9 环路中的低通滤波器 .....	73	7.1 相位噪声的性质 .....	119
4.9.1 无限冲击响应低通滤 波器 .....	73	7.1.1 振荡器模型 .....	119
4.9.2 有限冲击响应低通滤 波器 .....	75	7.1.2 忽略振幅噪声 .....	120
附录 4A 数字锁相环的稳定性 .....	76		

7.1.3 方差·····	120	7C.3 数据调整·····	143
7.1.4 非平稳性·····	120	7C.4 数据的滤波·····	144
7.2 相位噪声谱·····	121	7C.5 数值积分·····	145
7.2.1 理论谱 $W_w(f)$ ·····	121	附录 7D 相位噪声谱中离散谱线 的积分·····	146
7.2.2 归一化谱 $\mathcal{L}(\Delta f)$ ·····	122	附录 7E 定时抖动·····	147
7.2.3 RF 谱 $W_{RF}(f)$ 和 $P_{RF}(f)$ ·····	122	7E.1 抖动的定义·····	147
7.2.4 相位噪声谱 $W_\phi(f)$ ·····	124	7E.2 PLL 中的抖动·····	148
7.2.5 频率噪声谱 $W_w(f)$ ·····	126	参考文献·····	150
7.2.6 相位噪声谱举例·····	126		
7.3 相位噪声谱的性质·····	127	<b>第 8 章 锁相捕获</b> ·····	152
7.3.1 典型的连续谱·····	128	8.1 主要特点·····	152
7.3.2 $W_\phi(f)$ 的意义·····	128	8.2 相位捕获·····	152
7.3.3 对频谱显示的解釋·····	129	8.2.1 一阶环路·····	152
7.3.4 $W_\phi(f)$ 与 $\mathcal{L}(\Delta f)$ 的关系·····	131	8.2.2 挂停·····	154
7.4 相位噪声的传播·····	132	8.2.3 锁入·····	155
7.4.1 相位噪声在辅助器件中的 传播·····	132	8.2.4 辅助相位捕获·····	156
7.4.2 相位噪声在 PLL 中的 传播·····	134	8.3 频率捕获·····	157
7.5 PLL 中的积分相位噪声·····	134	8.3.1 频率拉入·····	157
7.5.1 基本公式·····	135	8.3.2 频率扫描·····	162
7.5.2 过大的相位噪声·····	135	8.3.3 借助鉴频器的频率捕获·····	166
7.5.3 对相干解调的影响·····	135	8.3.4 鉴频器的实现·····	169
7.5.4 带宽的权衡·····	135	8.4 其他问题·····	170
7.5.5 积分·····	136	8.4.1 锁定指示器·····	170
7.5.6 一个悖论·····	137	8.4.2 宽带法·····	171
7.5.7 谱线的积分·····	138	8.4.3 环路记忆法·····	172
7.5.8 相位噪声的规范·····	138	参考文献·····	172
7.6 定时抖动·····	139		
附录 7A 硬限幅器中的干扰分析·····	139	<b>第 9 章 振荡器</b> ·····	174
附录 7B 未跟踪相位噪声的积分·····	140	9.1 要求的性质·····	174
7B.1 积分步骤·····	140	9.2 振荡器的种类·····	174
7B.2 积分结果·····	140	9.3 振荡器的相位噪声:简化方法·····	175
7B.3 讨论·····	142	9.3.1 Leeson 模型·····	175
附录 7C PLL 相位噪声的数值 积分·····	142	9.3.2 振荡器的设计原则·····	177
7C.1 积分相位噪声的定义和 应用·····	142	9.3.3 相位噪声谱举例·····	177
7C.2 数据格式·····	143	9.3.4 Leeson 模型的不足·····	179
		9.4 振荡器的分类·····	179

9.5 振荡器中的相位噪声:深入分析	181	10A.1 纹波的模型	220
9.5.1 冲击敏感函数	182	10A.2 分析的基础	220
9.5.2 相位噪声的非线性分析	183	10A.3 纹波举例	221
9.6 其他扰动	185	10A.4 纹波滤波器	222
9.7 振荡器的调谐类型	186	参考文献	222
9.7.1 连续调谐振荡器	186	<b>第 11 章 环路滤波器</b>	225
9.7.2 离散调谐振荡器	187	11.1 有源与无源环路滤波器	225
9.8 模拟 VCO 的调谐	189	11.2 DC 偏移	225
9.8.1 调谐曲线	189	11.3 瞬时过载	226
9.8.2 调谐方法	190	11.3.1 PD 纹波引起的过载	226
9.8.3 调谐速度	193	11.3.2 捕获中的过载	227
参考文献	193	<b>第 12 章 电荷泵锁相环</b>	228
<b>第 10 章 检相器</b>	199	12.1 电荷泵模型	228
10.1 乘法器检相器	199	12.2 环路滤波器	229
10.1.1 开关检相器:原理	199	12.3 静态相位误差	230
10.1.2 开关检相器:举例	201	12.4 稳定性问题	231
10.1.3 混合变压器 PD	204	12.5 非线性	232
10.1.4 非正弦 $s$ 曲线	205	12.6 纹波抑制	234
10.2 时序检相器	205	12.7 近期进展	236
10.3 相频检测器	207	参考文献	236
10.3.1 PFD 的结构	207	<b>第 13 章 数字(采样)锁相环</b>	238
10.3.2 PFD 中的延迟	209	13.1 准线性 PLL	238
10.3.3 PFD 的状态图	210	13.1.1 数控振荡器	238
10.3.4 PFD 的 $s$ 曲线	211	13.1.2 混合检相器	241
10.3.5 PFD 的频率检测	212	13.1.3 复信号数字检相器	243
10.3.6 PFD 延迟的影响	212	13.1.4 数字数据接收器中的 DPLL	244
10.3.7 边沿的多出和丢失	213	13.1.5 环路稳定性	248
10.3.8 PFD 用作锁定指示器	214	13.2 量化	248
10.4 检相器在噪声中的行为	214	13.2.1 来自相关研究的经验	248
10.4.1 带通限幅器	215	13.2.2 混合 PLL 中的量化	249
10.4.2 检相器的噪声阈值	216	13.2.3 频率(NCO)量化的影响	249
10.4.3 噪声中的 $s$ 曲线形状	216	13.2.4 检相器和积分器的量化	263
10.4.4 抖动与 $s$ 曲线形状的关系	218	13.3 非线性 PLL	264
10.5 两相(复数)检相器	218		
附录 10A 由检相器纹波引起的相位调制	220		

13.3.1 非线性 PLL 的结构 .....	264	15.1.2 其他结构 .....	303
13.3.2 PLL 各单元的操作 .....	266	15.2 分频器 .....	305
13.3.3 PLL 状态图 .....	268	15.2.1 模拟分频器 .....	305
13.3.4 非线性 PLL 的操作 .....	270	15.2.2 数字计数器用作分频器 .....	305
13.3.5 2 类非线性 PLL .....	273	15.3 分数 $N$ 计数器 .....	306
13.3.6 加性噪声的影响 .....	274	15.3.1 双模计数器 .....	306
13.3.7 用于位同步器 .....	276	15.3.2 带有模拟补偿的分数 $N$ 锁相环 .....	307
附录 13A 多速率 DPLL 的传递 函数 .....	276	15.3.3 带有 Delta-Sigma 调制器 的分数 $N$ 锁相环 .....	310
13A.1 关于符号的说明 .....	277	15.4 噪声在 PLL 中的传播 .....	312
13A.2 检相器的操作 .....	277	15.4.1 振荡器噪声的传递函数 .....	312
13A.3 累加转储电路和环路 滤波器 .....	277	15.4.2 带宽的权衡 .....	314
13A.4 保持操作 .....	278	15.4.3 其他噪声源 .....	316
13A.5 NCO、相位旋转器和 $M:1$ 下 采样 .....	278	参考文献 .....	318
13A.6 传递函数 .....	280		
13A.7 保持滤波器的传递函数 .....	281		
参考文献 .....	281		
<b>第 14 章 异常锁定 .....</b>	<b>284</b>	<b>第 16 章 锁相调制器与解调器 .....</b>	<b>322</b>
14.1 边带锁定 .....	284	16.1 锁相调制器 .....	322
14.1.1 周期性调制 .....	285	16.1.1 调制器基础 .....	322
14.1.2 循环平稳调制 .....	285	16.1.2 用调制对 PLL 进行 测量 .....	323
14.1.3 混叠锁定 .....	288	16.1.3 Delta-Sigma PLL 调 制器 .....	324
14.2 谐波锁定 .....	288	16.2 锁相解调器 .....	324
14.3 寄生锁定 .....	289	16.2.1 PLL 用于 AM 解调 .....	324
14.4 假锁定 .....	290	16.2.2 相位解调 .....	326
14.4.1 IF 滤波器的分析 .....	291	16.2.3 频率解调 .....	328
14.4.2 假锁定的根源 .....	293	16.2.4 FM 噪声 .....	329
14.4.3 假锁定的性质 .....	295	16.3 FM 阈值 .....	330
14.4.4 假锁定的补救办法 .....	297	16.3.1 阈值的特征描述 .....	331
14.5 PLL 链路中的锁相失败 .....	299	16.3.2 FM 尖峰 .....	331
参考文献 .....	300	16.3.3 PLD 的喀咧声 .....	333
		16.3.4 形式上的优化 .....	338
		16.3.5 修改后的 PLD .....	340
		16.3.6 FM PLD 阈值总结 .....	342
		参考文献 .....	342
<b>第 15 章 PLL 频率合成器 .....</b>	<b>302</b>		
15.1 合成器的结构 .....	302		
15.1.1 基本结构 .....	302		

---

<b>第 17 章 锁相环的其他应用</b> .....	344	17.5 数字系统中的 PLL .....	349
17.1 数据信号的同步 .....	344	17.5.1 定时歪斜的补偿 .....	349
17.2 网络时钟 .....	344	17.5.2 抖动衰减电路 .....	350
17.3 各种锁相振荡器 .....	345	17.6 PLL用于电机速度控制 .....	351
17.3.1 振荡器的稳定方法 .....	345	17.6.1 基本工作原理 .....	351
17.3.2 倍频器 PLL .....	346	17.6.2 机电结构的考虑 .....	352
17.3.3 频率搬移 PLL .....	346	17.6.3 其他结构 .....	352
17.4 电视接收机中的 PLL .....	349	参考文献 .....	353
		索引 .....	355

# 第 1 章 简 介

锁相环(PLL)包含 3 个必不可少的单元电路(如图 1-1 所示):检相器(PD)、环路滤波器(LF)和压控振荡器(VCO)。检相器把周期性输入信号的相位与 VCO 信号的相位进行比较;PD 的输出信号是这两个输入信号之间相位误差的度量。之后,该误差电压由环路滤波器进行滤波,而环路滤波器的输出被用作控制电压送入 VCO。控制电压改变了 VCO 的频率,以减小输入信号与 VCO 之间的相位误差。

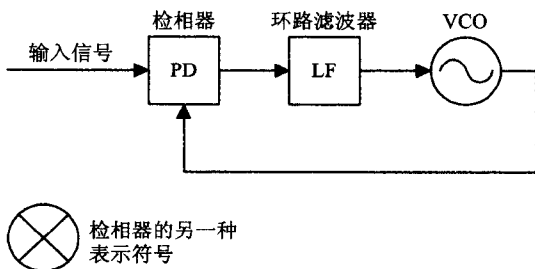


图 1-1 基本的锁相环

当环路锁定时,控制电压把 VCO 频率的平均值调整到与输入信号频率的平均值完全一样。对于输入信号的一个周期,振荡器仅输出一个周期。锁相并非意味着零相位误差;恒定的相位误差和起伏的相位误差都可能存在于锁相环中。过大的相位误差会导致失锁。

1

## 1.1 PLL 的性质

在本节中,我们将简单介绍锁相环的一些基本性质,这些性质将在本书中反复出现。

### 1.1.1 带宽

带宽是一个最基本的特性;窄带 PLL 与宽带 PLL 使用起来非常不一样。

#### 1. 窄带

我们假设输入信号携带的信息是包含在相位或频率中的,而且假设输入信号因加入了加性(additive)噪声而变坏。锁相接收器的任务是正确地重建原始信号,并尽可能

多地去除噪声。为了重建信号,接收器使用了一个本地振荡器,而这个振荡器的频率非常接近于预期的输入信号频率。本地振荡器的波形与输入信号的波形在检相器中进行比较。从 PD 输出的误差信号表示了瞬时相位差。为了抑制噪声,PLL 求出一段时间内的误差平均值,并用这个平均值调整振荡器的频率与相位。

如果原始的输入信号是行为规矩的(即其频率是稳定的),那么本地振荡器只需要很少的一点信息就可以实现跟踪,而这个信息可以通过在一个长时间内求平均值得到,从而去除了可能会很大的噪声。PLL 的输入信号含有很大的噪声,而 VCO 的输出信号是滤除噪声后的输入信号。因此,PLL 可以看成是一种让信号通过、把噪声滤除的滤波器。

作为一种滤波器,PLL 有两个重要的特性:第一,它的带宽可以很窄;第二,它能自动跟踪信号的频率。自动跟踪和窄带这两个特性是在接收器中采用锁相技术的主要原因。很窄的带宽可以剔除大量的噪声;对于 PLL 而言,把输入到检相器的混有大量噪声的信号恢复出来的情况并不少见。

## 2. 宽带

我们来考察一个带有某些有用特性的振荡器,比如大功率输出或者高频输出,但它的频率稳定性很差。这样一个振荡器的频率可以用锁相技术锁定到一个功率比较小的基准振荡器上来得以稳定,这个基准振荡器的频率也许低一些,但极其稳定。PLL 的作用就好比一个伺服机构,用来抑制已被锁定振荡器中的不希望出现的频率波动和相位波动。这样的 PLL 应当有快速的响应,即很宽的带宽,以便最大限度地抑制振荡器的波动。

2

### 1.1.2 线性

每一个 PLL 都是非线性的。与线性系统的分析工具相比,非线性系统的分析工具极其难用,且优点也太少。还算幸运的是,我们感兴趣的大多数(但不是全部)PLL 在锁定状态下是可以使用线性系统的分析技术的。本书自始至终都在说服读者接受这样一个观点,即把线性方法用于解决大多数 PLL 中大量的分析和初步设计问题,是完全够用的。因此,只要可行,我们都将使用线性近似的方法。

关于 PLL 的无法回避的非线性的若干个重要实例,我们将在后面几章中进行讨论。在我们试图理解非线性操作而遇到障碍的时候,就完全地显现出了线性分析方法的相对简单性。

## 1.2 本书结构

本书分为若干个部分。第一部分包括第 2 章到第 8 章,解释了 PLL 的基本原理。第二部分讲述了 PLL 的基本单元:振荡器(第 9 章)、检相器(第 10 章)、环路滤波器(第 11 章)和电荷泵(第 12 章)。第 13 章(关于数字锁相环)和第 14 章(关于 PLL 的不规则



行为)是各自独立的章节。最后一个部分,即第15章到第17章,讨论了PLL的各种应用。

需要说明的是:对一种技术的第一次介绍,即使不是过分简化的,一般也总是非常简化的,几乎没有提及严密性,也不会对一些复杂的因素提出警示。在读者打下了足够的基础后,这些复杂的因素会在必要的地方提及。PLL中的那些必不可少的电路单元未必特别晦涩难懂,虽然对它的诸多方面的分析也许是难以掌握的。读者更可能是被大量的细节所困扰,而不是因为无法理解和掌握某些技术要点。像图1-1所示的系统,在第一次出现时显得这么简单,读者会觉得有些小题大做了:就这么一点儿东西为什么可以写出这么多页的一本书?请接着往下读,你会找到答案的。

### 1.3 文献及注释

本节列出了专门论述PLL的书目、技术文集和杂志专刊。在同一标题下的文献以年代排序。所罗列的文献主要是关于PLL的共性方面的内容;它们并不一定很完整。在后面的章节中还引用了更专业的文献。

#### 1.3.1 推荐书目

- A. J. Viterbi, *Principles of Coherent Communications*, McGraw-Hill, New York, 1966, Chaps. 2-4.(一位电子工程界的著名先驱对PLL领域各种贡献的叙述。)
- W. C. Lindsey, *Synchronization Systems in Communications and Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1972.(关于噪声的详细阐述。包括随机过程和非线性分析的深入理论。)
- W. C. Lindsey and M. K. Simon, *Telecommunication Systems Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ, 1973.(关于PLL在外太空接收机中应用的高层次论述。)
- A. Blanchard, *Phase-Locked Loops: Application to Coherent Receiver Design*, Wiley, New York, 1976.(书中包含的数据是在其他关于PLL接收机性能的文献中找不到的。)
- H. Meyr and G. Ascheid, *Synchronization in Digital Systems: Phase-, Frequency-Locked Loops, and Amplitude Control*, Wiley, New York, 1990.(书中包含大量的资料,对每个真正的PLL工作者都是极其宝贵的。)
- D. H. Wolaver, *Phase-Locked Loop Circuit Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.(一本关于PLL的实用性导论,提供了许多简捷的近似方法。)
- J. Encinas, *Phase Locked Loops*, Kluwer Academic, Boston, MA, 1993.
- P. V. Brennan, *Phase-Locked Loops: Principles and Practice*, McGraw-Hill, New York, 1996.
- J. L. Stensby, *Phase-Locked Loops: Theory and Applications*, CRC Press, Cleveland, OH, 1997.(书中包括了在别处找不到的关于非线性操作的记述。)
- W. Egan, *Phase-Lock Basics*, Wiley, New York, 1998.(源自大学PLL课程讲义,提供PLL仿真实验的在线访问。)
- D. R. Stephens, *Phase-Locked Loops for Wireless Communications*, Kluwer Academic,