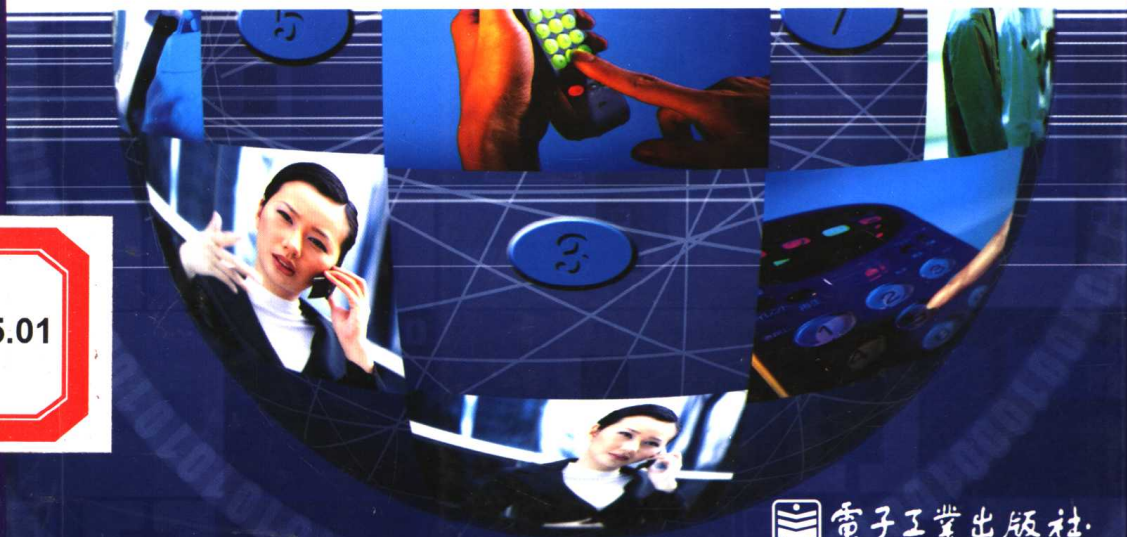




同步理论与技术

郑继禹 林基明 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
[Http://www.phei.com.cn](http://www.phei.com.cn)



本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书。

ISBN 7-5053-8584-4



9 787505 385849 >



责任编辑：竺南直

封面设计：欧美尼设计

ISBN 7-5053-8584-4/TN·1769

定 价：16.00 元



同步理论与技术

郑继禹 林基明 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统、简明地阐述了同步技术在现代通信及电子技术中的地位与作用,从最佳估值理论出发构造了同步跟踪电路,导出了具有锁相环形式的各类同步跟踪环路。详细地论述了现代通信系统中载波跟踪、码位同步、测距码同步、扩频码同步以及网同步的技术原理与性能。全书内容新颖,概念清晰,对通信与电子技术领域从事教学、科研及工程应用工作的教师、学生与技术人员均有参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

同步理论与技术/郑继禹,林基明编著. —北京:电子工业出版社,2003.3

ISBN 7-5053-8584-4

I. 同… II. ①郑… ②林… III. 同步—技术 IV. TN915.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 017009 号

责任编辑:竺南直

印 刷:北京天竺颖华印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:850×1 168 1/32 印张:8.75 字数:226 千字

版 次:2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:16.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077

前 言

同步始终是通信技术(尤其是数字通信技术)领域一个重要而又令人头痛的技术问题。随着现代通信与网络技术的飞速发展,同步的重要性更加突出。许多先进的通信技术与系统,如扩频通信、CDMA 和 OFDM 等,都要求精确地实现载波同步、时钟同步与码序列同步,否则系统的优越性能将得不到保证,先进性也无从发挥。

鉴于目前专门论述同步技术的著作还不多,本书不揣冒昧,企图从同步基本理论入手,结合扩频码同步、测距码同步及网络同步等实际系统,给同步技术一个较为完整的论述。本书第 1 章比较全面地概述了同步技术涉及的理论基础及其应用,从信号参数估值理论导出了载波同步器与码位同步器的锁相环路结构;第 2 章与第 3 章概括性叙述了锁相环路基本理论与性能,并着重地介绍了数字锁相环的结构与性能;第 4 章与第 5 章对载波同步跟踪环与码位同步环的理论及性能给予了专门的论述,它们是系统实际应用的直接基础;第 6、7、8 章结合空间通信中测距码同步、扩频通信中扩频码同步与数字通信网络的网同步等实际应用作了较为全面的叙述。

全书力求理论与实际相结合,概念深入浅出,使读者受益。本书从参考文献及作者过去的著作中吸取了许多有益的内容。在写作过程中,得到学院领导的大力支持与鼓励,受到学院通信研究所的尹锁柱、仇洪冰、王玫、张德安等老师的鼎力相助以及唐林芳、张文辉老师的热情支持,在此表示衷心的感谢。

由于水平有限,缺点与不妥之处在所难免,希望广大读者批评指正。

郑继禹、林基明

2002 年 12 月于桂林电子工业学院

内 容 简 介

本书系统、简明地阐述了同步技术在现代通信及电子技术中的地位与作用，从最佳估值理论出发构造了同步跟踪电路，导出了具有锁相环形式的各类同步跟踪环路。详细地论述了现代通信系统中载波跟踪、码位同步、测距码、扩频码以及网同步的同步技术原理与性能。

全书内容新颖，概念明晰，对从事通信与电子技术领域的教学、科研及工程应用的教师、学生与技术人员均有参考价值。

目 录

第 1 章 同步技术基础	1
1.1 导论	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 相干通信系统中的同步功能	2
1.1.3 扩频通信系统的同步功能	6
1.1.4 其他同步技术	8
1.2 信号参数估值	10
1.2.1 参数估值理论	10
1.2.2 似然函数	12
1.3 载波相位估值	14
1.3.1 载波相位估值似然函数	14
1.3.2 估值导出的环路结构	14
1.4 码位定时估值	17
1.4.1 最大似然函数定时估计	17
1.4.2 非定向判决的 ML 定时估值	19
第 2 章 锁相环原理与性能	21
2.1 锁相环基本理论	21
2.1.1 环路的同步过程简述	21
2.1.2 环路基本方程	22
2.1.3 等效噪声电压 $N[t, \theta_e(t)]$	25
2.1.4 环路跟踪方程与模型	27
2.2 线性锁相环性能表征	30
2.2.1 环路传递函数	31
2.2.2 动态响应	34

2.2.3	噪声性能	35
2.3	环路的非线性捕获与跟踪性能	37
2.3.1	环路的捕获性能	38
2.3.2	环路跟踪相差的统计特性	44
2.4	前置带通限幅器的二阶环	48
2.4.1	基本组成与原理	49
2.4.2	信号抑制系数 α	52
2.4.3	限幅器性能因数 Γ_p	53
2.5	连续波(CW)干扰对环路载波跟踪的影响	57
2.5.1	系统模型	57
2.5.2	一阶环的统计特性	58
2.5.3	失锁门限点的干扰值	58
第3章	数字锁相环	62
3.1	数字锁相环导论	62
3.1.1	数字锁相环发展与分类	62
3.1.2	DPLL 与 MAP 估值之间关系	63
3.2	数字锁相环的实现	67
3.2.1	环路部件的原理与功能	67
3.2.2	DPLL 构成实例	78
3.3	ZC ₁ -DPLL	82
3.3.1	环路差分方程	83
3.3.2	环路基带相位模型	86
3.3.3	无噪环路跟踪性能	87
3.3.4	有量化的 ZC ₁ -DPLL	95
3.4	ZC ₂ -DPLL	104
3.4.1	环路组成	104
3.4.2	环路工作原理	105
3.4.3	随机徘徊模型	106

3.4.4	模 1 周稳态概率	108
3.4.5	平均跳周时间	111
3.5	单片集成全数字锁相环	115
3.5.1	工作原理	117
3.5.2	环路性能分析	122
3.5.3	应用举例	125
第 4 章	载波同步跟踪环	129
4.1	平方环与同相-正交环	129
4.1.1	平方环的工作原理	129
4.1.2	同相-正交环与平方环的等效性	134
4.1.3	输出噪声相位方差	137
4.2	同相-正交环与平方环中假锁	141
4.2.1	假锁形成机制	141
4.2.2	假锁现象分析	142
4.2.3	随机数据下的假锁防护	144
4.3	判决反馈环	149
4.3.1	环路组成	149
4.3.2	环路原理分析	150
4.3.3	等效鉴相特性 $D(\theta_e)$	153
4.4	多相 PSK 信号的载波跟踪	155
4.4.1	N 次幂环	155
4.4.2	N 相同相-正交环	156
4.4.3	N 相判决反馈环	157
第 5 章	码位同步环	161
5.1	数据转换跟踪环	161
5.1.1	环路结构形式	161
5.1.2	DTTL 环的工作原理	163
5.1.3	DTTL 环路跟踪性能	166

5.2	早-迟门型同步环(ELGTL)	172
5.2.1	早-迟门型同步环一般构成	172
5.2.2	绝对值式早-迟门型同步环工作原理	174
5.3	两种高速码位同步环	181
5.3.1	按最小似然率的码位同步环(MINL)	181
5.3.2	次最佳码位同步环(SML)	185
第 6 章	测距码同步	192
6.1	测距的基本概念	192
6.1.1	测距原理	192
6.1.2	侧音组合的测距信号	195
6.1.3	伪随机码测距信号	196
6.2	延迟锁定环(DLL)	200
6.2.1	DLL 组成与原理	200
6.2.2	环路相关特性 $R_{DLL}(\tau_e)$	201
6.2.3	DLL 的噪声性能	203
6.2.4	DLL 的数学模型	206
6.3	双环跟踪装置	208
6.3.1	双环构成特点	208
6.3.2	等效相关器特性	209
第 7 章	扩频码同步	212
7.1	扩频系统基本组成与原理	212
7.2	直扩序列的捕获	216
7.2.1	滑动相关捕获	217
7.2.2	DS 序列的 SAW 器件捕获	221
7.3	直扩序列的同步跟踪	230
7.3.1	扩频序列调制的延迟锁定跟踪环	230
7.3.2	抖动跟踪环(TDL)	235
7.4	跳频信号的捕获与跟踪	239

7.4.1	跳频信号的捕获	239
7.4.2	跳频信号的同步跟踪	241
第 8 章	网同步	243
8.1	网同步的基本概念	243
8.2	网同步的方法	248
8.2.1	准同步	248
8.2.2	主从同步	249
8.2.3	互同步	250
8.2.4	外基准同步方式	252
8.3	主从同步的主钟、从钟与定时链路	254
8.3.1	基准时钟(PRC)	254
8.3.2	从钟	256
8.3.3	定时链路	261
参考文献		266

第 1 章 同步技术基础

1.1 导论

1.1.1 引言

任何一个通信系统都必须有发送信号与接收信号的过程,而接收信号实际上就是从噪声、干扰与畸变中提取信号,获取发送信息。提取信号就是估计信号的某个或数个特征参数,如振幅、频率、相位与时间等。信号参数的估值过程就是同步。

模拟通信系统如抑制载波双边带(DSB-SC)方式就是一种相干调制方式,接收端解调时必须提供一个频率与相位同发送载波完全同步的本地相干载波。通常相干载波是靠对接收信号的频率与相位的估值来取得的。单边带(SSB)调制也是如此,它是用频谱下搬移加滤波的解调方式估计调制信号谱。在 SSB 方式中,精确地估值调制信号谱,必须对信号频谱有精确的定位搬移,搬移不到位,就会产生估值失真。频谱下搬移就是一种频率相干的解调方式,接收机提供一个本地相干载波,经过相乘与低通滤波获取调制信号谱,相干载波的频率精确度直接影响着估值的谱失真。本地载波可以由频率合成器产生,也可以是单边带发射信号中的残留载波分量,经接收机同步处理后提取出来用。

数字通信系统中,同步功能显得尤为重要。数字通信中发送的信息信号是编码的码元序列,再用该序列去改变载波的某个或数个参数,实施数字载波调制。通常从提高抗干扰性能与频带利用率出发,广泛应用相移键控(PSK、DPSK、MPSK)、最小频移键控(MSK)、正交幅度调制(QAM)等调制方式。通常,这类方式的通信系统属于

相位相干通信系统，接收端解调时必须提供相干参数载波。归结起来，数字通信系统中要求完成多种同步功能，基本的同步有载波同步、码元(位)同步与码组(字)同步，有些系统还要求有帧同步或信息包同步等。

除通信系统外，许多类似的电子技术系统也要求同步功能。例如遥测遥控与定位系统，同样也要发送数据与接收数据，再处理与运用这些数据来确定距离、位置、轨道或实施遥控。在此过程中，接收信号与发送信号的同步仍然是关键功能。

此外，系统在取得同步之前实施的信号捕获与同步之后的跟踪，也应当视作同步功能的部分。

1.1.2 相干通信系统中的同步功能

相干通信指接收信号解调用相干解调的通信方式，在模拟和数字通信中都有采用，尤其数字通信用得最多。通信系统中，接收端必须在有噪声污染的环境下完成信号的解调与码元识别两个基本功能。通常，相干解调系通过对接收信号的频率与相位的精确估值来提取出相干参数载波，再与接收信号相乘、积分完成相干解调过程，把数字载波调制信号变换成数字信号。显然，叠加在信号上的噪声影响着频率与相位的估值误差，关系到信号解调的质量。如何抵御噪声的干扰，从噪声中高质量提取相干载波乃是同步的一个关键技术问题。由于有噪声干扰及信道传输失真，解调出的数字码元波形是有畸变的，必须通过抽样判决来恢复码元波形。抽样判决必须知道各个码元的起止时刻，产生同步的码元时钟序列，依靠时钟序列在每个码元终止时刻抽样、判决、恢复出码元波形。同步时钟序列也是依靠对解调出的数字波形序列的起止时刻估值来获取的，称之为码元(位)同步。

图 1-1 为一二元 PSK(2PSK)信号相干解调与码元波形恢复电路的组成框图。图中 $x(t)$ 为有加性噪声 $n(t)$ 污染的接收信号

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(t-kT) \sin[\omega_0 t + \theta_k(i) + \theta] + n(t) \quad (1-1)$$

式中, $g(t)$ 是码元间隔 $[0, T]$ 内的码元波形; ω_0 和 θ 分别为载波角频率与载波相位; $\theta_k(i)$ 为载波中对应第 k 个码元的相位, 它在 $[0, 2\pi]$ 范围内随机地离散取值。在二元 PSK 中, $\theta_k(i)$ 通常随机地取 0° 与 180° 值, 对应二元数码 “1” 与 “0”。

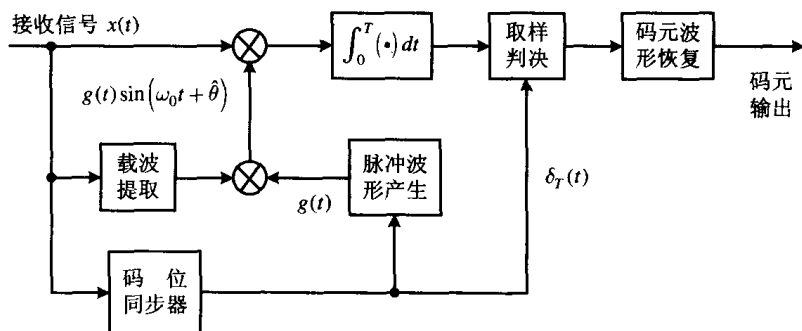


图 1-1 2PSK 同步接收组成

载波提取得到的信号为 $\sin(\omega_0 t + \hat{\theta})$, $\hat{\theta}$ 为载波相位 θ 的估值。脉冲波形产生电路产生数字码元波形 $g(t)$ 。所以进入相干解调器的本地相干载波为带有码元波形的参考载波 $g(t) \sin(\omega_0 t + \hat{\theta})$ 。码位同步器产生同步时钟序列

$$\delta_T(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT) \quad (1-2)$$

送到码元波形产生电路与抽样判决器, 通过抽样判决及波形恢复电路形成码元输出。

图 1-2 是一个 M 元 PSK(MPSK) 信号相干解调与码元恢复电路的

组成框图。图中 MPSK 信号的表示式仍如(1-1)式所示, 只是 $\theta_k(i)$ 表示在 $[0, 2\pi]$ 范围内随机地取 M 个离散值, 即

$$\theta_k(i) = 2\pi i/M, \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (1-3)$$

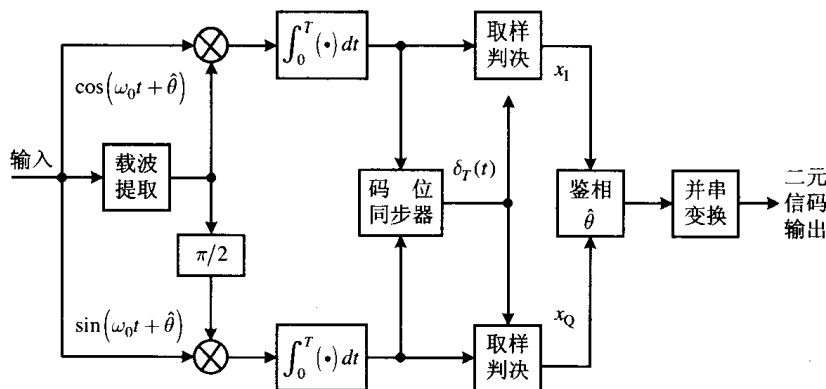


图 1-2 MPSK 同步接收组成

为分析简便, 均假设码元波形为矩形, 这样, MPSK 信号又可表示为

$$S_{\text{MPSK}}(t) = V_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{rect}(t - kT) \cos[\omega_0 t + \theta_k(i) + \theta] \quad (1-4)$$

式中

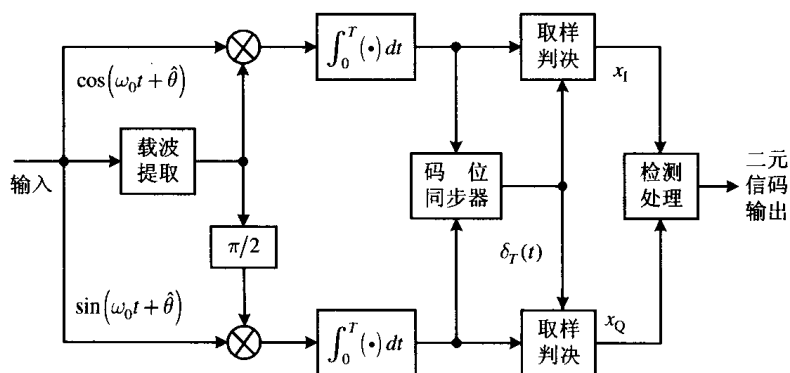
$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

这样, 图 1-2 中省去了图 1-1 中的码元波形产生器。上下两个支路的相干解调器要求本地提供互为正交的两个相干载波 $\cos(\omega_0 t + \hat{\theta})$ 与 $\sin(\omega_0 t + \hat{\theta})$, 其中 $\hat{\theta}$ 为载波相位估值。经抽样判决后两支路输出 x_I 与 x_Q 送入鉴相器, 首先计算出相位估值 $\hat{\theta}$

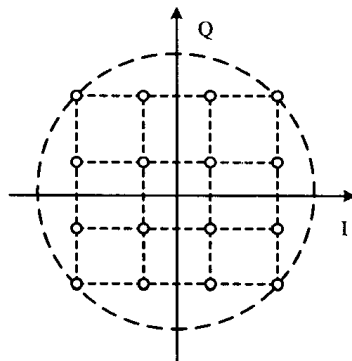
$$\hat{\theta} = \arctan(x_Q/x_I) \quad (1-5)$$

然后从有 M 个相位的信号集中选择一个最接近于估值的信号输出，经并-串变换为二元信息输出。

图 1-3(a) 为一个 M 元正交振幅调制(MQAM)解调器的组成框图。正交振幅调制(QAM)是同时利用载波信号幅度与相位的一种数字调制方式，载波信号矢量端点位置反映出调制的某个状态，信号矢量端点的分布图称为星座图，图 1-3(b) 为 16QAM 的星座图。接收端解



(a) 解调器组成框图



(b) 16QAM 的星座图

图 1-3 MQAM 同步解调组成

调同 MPSK 解调一样, 需提供互为正交的本地载波分量。检测处理器计算两判决器的输出 x_I 与 x_Q 的振幅与相位, 估值星座图中矢量端点位置, 确定对应的二进制码输出。显然, 载波相位估值误差与码位定时估值误差都将影响信号矢量端点位置的判断。

1.1.3 扩频通信系统的同步功能

扩频通信是一种利用高速扩频码序列扩展低速信息码序列频谱的宽带通信方式, 它有抗干扰能力强、低功率谱密度工作等优点。目前在码分多址(CDMA)通信中有着广泛应用。直接运用扩频码序列(通常用伪随机码 PN 序列产生)来扩展频谱的方式称为直接序列扩频(DS)方式。若运用伪随机码序列生成跳频图案, 使信息码序列调制的载波数字调制信号的载频按跳频图案发生跳变的扩频方式, 称为跳频(FH)通信方式。无论直扩(DS)方式还是跳频(FH)方式, 接收机检测信码必须先解扩、解跳, 然后才是解调输出信码。为正确解扩与解调, 接收端本地必须提供一个与发送端序列变化规律相同的且时间上同步的扩频码或跳频码。由于传输时延, 以及发送端与接收端启动码序列的时间不同, 进入解扩器的输入信号扩频码序列与本地提供的码序列存在时间差 τ_e , 捕获就是通过对本地码序列的步进控制使时差 $|\tau_e| \leq T$ (码元宽度); 捕获过程结束就进入同步跟踪状态。进入跟踪状态后, 时差 $|\tau_e|$ 还可能因干扰、时钟不稳等因素发生漂移变化, 此时就要通过同步跟踪环路线性跟踪 $|\tau_e|$ 变化, 使 $|\tau_e|$ 始终处于接近于零的数值范围内。图 1-4 为直扩通信接收机解扩解调的组成框图, 图 1-5 为跳频通信方式的解跳解调组成。图 1-4 与 1-5 显示了扩频通信中同步功能的重要地位。

新发展的 SCDMA 技术将同步 CDMA 技术与智能天线、软件无线电结合起来, 可通过空间信道分割来抑制多址干扰的影响, 其中同步 CDMA 要求所有来自用户终端的 CDMA 信号的码元, 在到达