

现代通信技术概论

第2章 数字通信系统

2.1 数字通信概述

2.2 模拟信号数字化

2.3 数字信号的基带传输

2.4 数字信号的频带传输

2.5 数字同步与复接技术

2.6 数字传输的差错控制

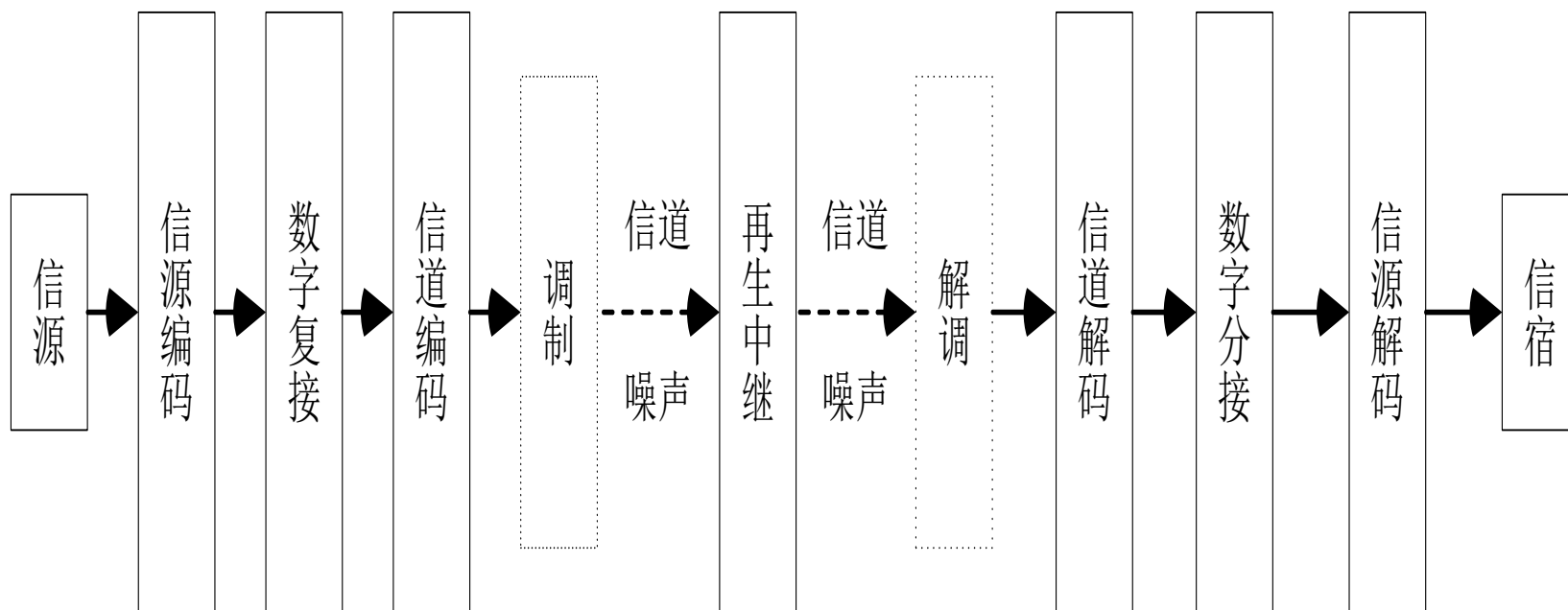
2.1 数字通信概述

传输数字信号的通信系统称为数字通信系统。数字通信以其抗干扰能力强、无噪声累积、便于计算处理、便于加密、易于小型化、集成化等优势，成为当代通信领域的主流技术。

本章将介绍关于数字通信的基本知识，包括数字通信系统的组成及特点、模拟信号数字化方法、数字信号的基带传输和频带传输、数字复接与同步技术、差错控制技术。

2.1.1 数字通信系统的组成

数字通信系统组成框图如下：



数字通信系统各部分的作用

- ◆信源编码与解码：A/D变换+D/A变换。
- ◆数字复接与分接：提高信道利用率。难点是码速同步问题。
- ◆信道编码与解码：即抗干扰编码，目的是提高传输的可靠性。
- ◆调制与解调：频带传输时需要。
- ◆再生中继：放大整形并完全恢复原始数字信号。
- ◆信道噪声：导致误码，难以避免。

2.1.2 数字通信系统的特点

与模拟通信系统相比数字通信系统有下列一些特点：

- ✓ 抗干扰能力强，无噪声累积
- ✓ 数据形式统一，便于计算处理
- ✓ 易于集成化，小型化
- ✓ 易于加密处理
- ✓ 占用较大的传输带宽
- ✓ 技术上较复杂

2.2 模拟信号数字化

数字通信系统的典型特征就是信源和信宿都是模拟信号，因此需要进行模拟/数字（**A/D**）变换，把模拟信号转换成数字信号再行传输。

模拟信号的数字化需经过抽样、量化、编码三个阶段。常用的技术包括脉冲编码调制（**PCM**）、差值脉冲编码（**DPCM**）和增量调制（**DM**）等。

2.2.1 模数（A/D）变换

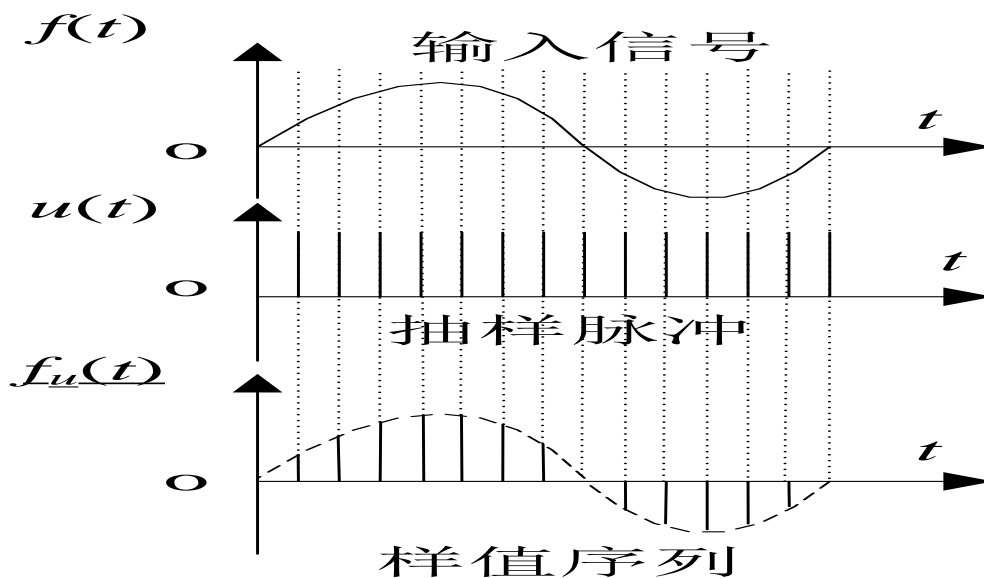
抽样→量化→编码→二进制数字序列：

- ✓ 抽样：在时间上将模拟信号离散化。
- ✓ 量化：在幅度上将抽样信号离散化。
- ✓ 编码：把量化幅度值用二进制数值来表示。

整个过程称为脉冲编码调制（PCM）。

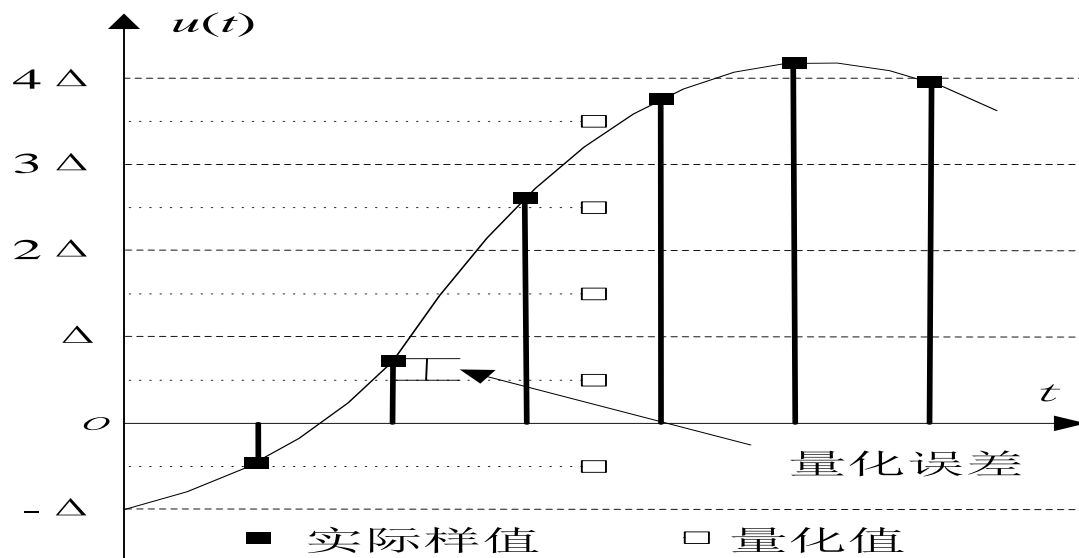
抽样

抽样定理： 如果一个连续信号 $f(t)$ 所含有的最高频率不超过 f_h ，则当抽样频率 $f_s \geq 2f_h$ 时，抽样后得到的离散信号就包含了原信号的全部信息。



量化

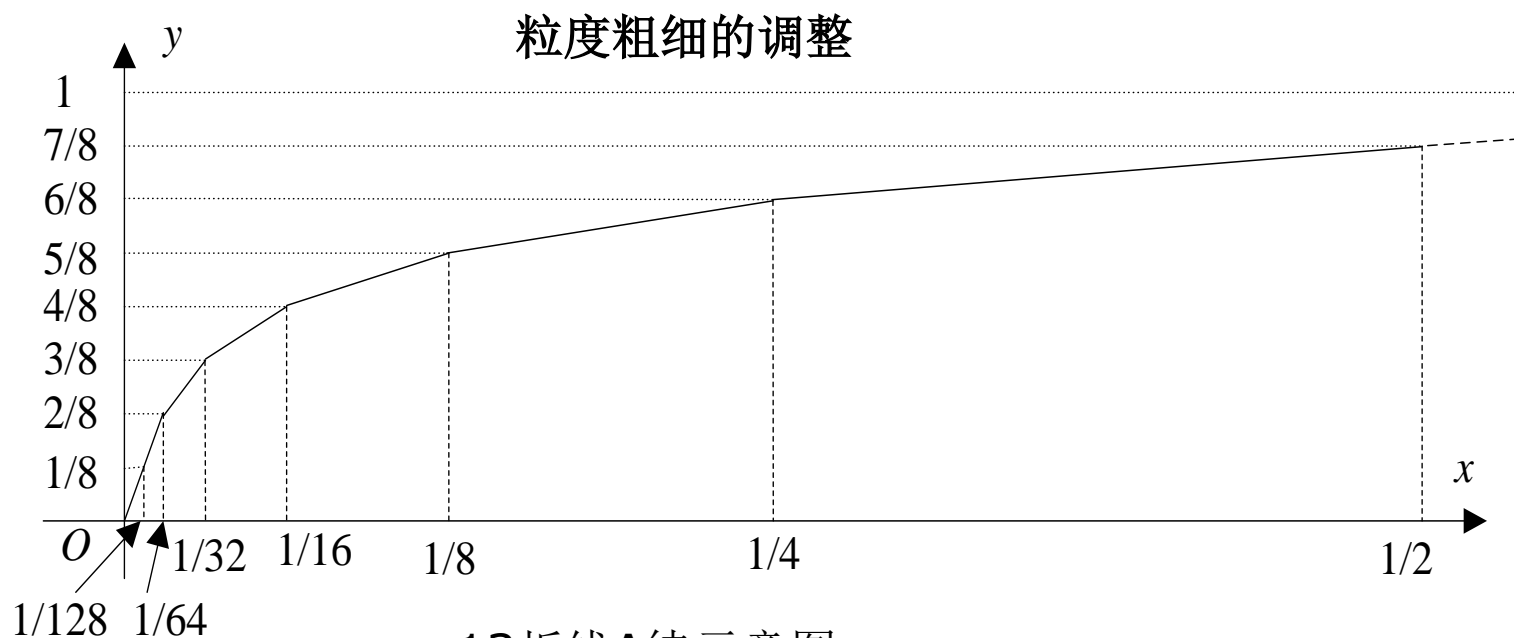
量化就是进行“舍零取整”处理。将抽样信号在某个抽样时间点的瞬时幅度值近似为最接近该点幅值的某个固定整数电平值上就完成了量化。



均匀量化
示意图

非均匀量化—13折线A律

非均匀量化能够让小信号放大，而大信号得到压缩，目的是提高小信号时的量化信噪比。



13折线A律示意图

编码

量化后的离散抽样幅值以二进制数值来表示。

最多需要 $\log_2 N$ 位二进制数， N 是量化级数。

13折线A律二进制编码值（256级，8比特）

量化段号	极性码	数值范围 (Δ)	段落码			段落起始值 (Δ)	量化间隔 Δ_i (Δ)	段内码权值 (Δ)			
	a_7		a_6	a_5	a_4			a_3	a_2	a_1	a_0
1	0/1	0~16	0	0	0	0	1	8	4	2	1
2	0/1	16~31	0	0	1	16	1	8	4	2	1
3	0/1	32~63	0	1	0	32	2	16	8	4	2
4	0/1	64~127	0	1	1	64	4	32	16	8	4
5	0/1	128~255	1	0	0	128	8	64	32	16	8
6	0/1	256~511	1	0	1	256	16	128	64	32	16
7	0/1	512~1023	1	1	0	512	32	256	128	64	32
8	0/1	1024~2047	1	1	1	1024	64	512	256	128	64

2.2.2 数模（D/A）变换

数模变换是模数变换的反过程。接收端通过数模变换把收到的二进制数字信号序列还原成相应幅度的模拟信号。

2.2.3 PCM30/32路数字电话系统

国际上有两种标准化制式的多路数字电话通信系统，即**PCM 30/32**路制式（**E**体系）和**PCM 24**路制式（**T**体系），我国和欧洲采用**E**体系。

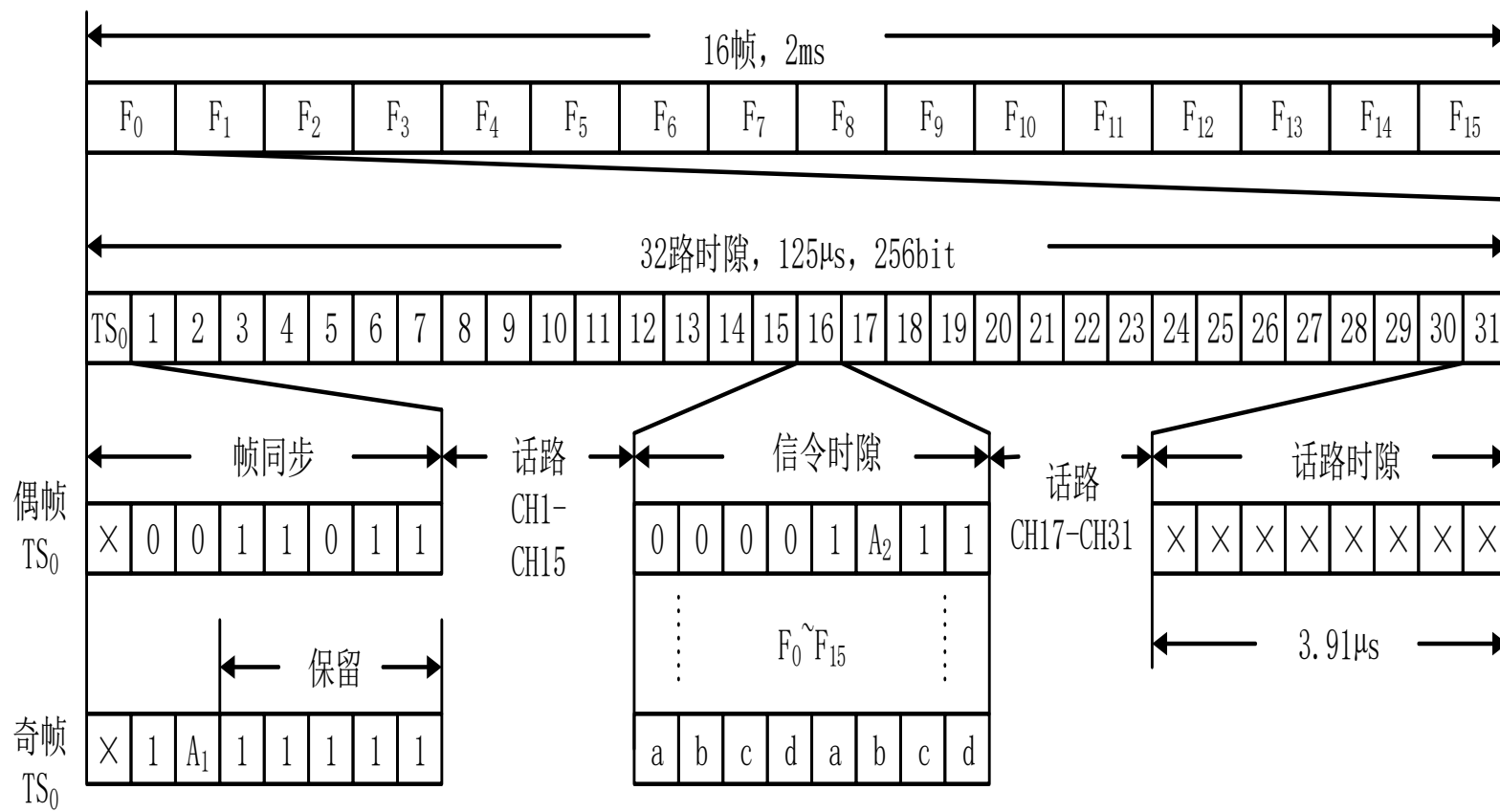
下面以**PCM30/32**多路数字电话通信系统为例，具体说明模拟话音数字化传输过程。

E体系各项关键指标数据

PCM30/32路系统称为基群或一次群，简称E1

指标名称	指标值
话音频带 (Hz)	300-3400
抽样频率 (Hz)	8000
量化级数	256
量化压缩律	A律 (A=87.6)
样值编码位数	8
单路数码率 (kbit/s)	64
帧长 (μs)	125
时隙数/帧	32
话路数/帧	30
一次群复用速率 (kbit/s)	2048

E1体系的帧结构



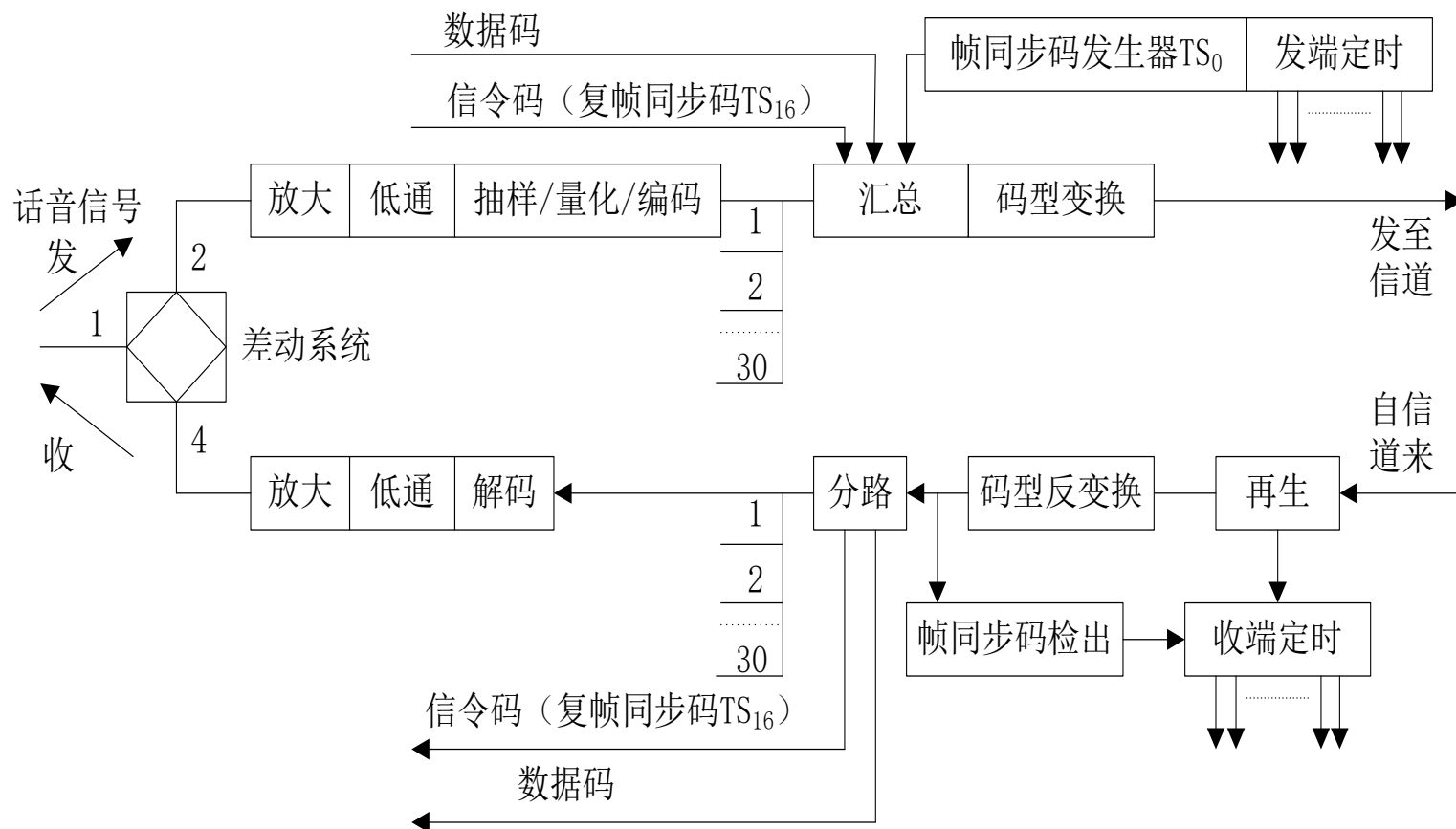
每话路**64kbit/s**的计算

为了正确地传送一路话音信号，每秒必须传送抽样值8000次。按照每个抽样值8bit编码，则每话路要求传输 $8000 \text{次} \times 8 \text{bit} = 64 \text{kbit/s}$ 。

现在每帧中包含32个话路，每话路占其中8bit，必须传送8000帧/秒（500个复帧）。于是，32路PCM基群传输速率是 $8000(\text{帧/秒}) \times 32(\text{时隙/帧}) \times 8(\text{bit/时隙}) = 2.048 \text{Mbit/s}$ 。

高次群以4倍速率增长，即8.448（比8.192略多）Mbit/s...

PCM30/32路数字电话系统终端框图



2.2.4 模拟信号数字化的其它方法

利用相邻抽样幅值的相对变化特性，对抽样信号进行编码也是一类较常用的模数转换方法。常见的有差值脉冲编码（**DPCM**）、自适应差值脉冲编码（**ADPCM**）、增量调制（**DM**）和自适应增量调制（**ADM**）等。

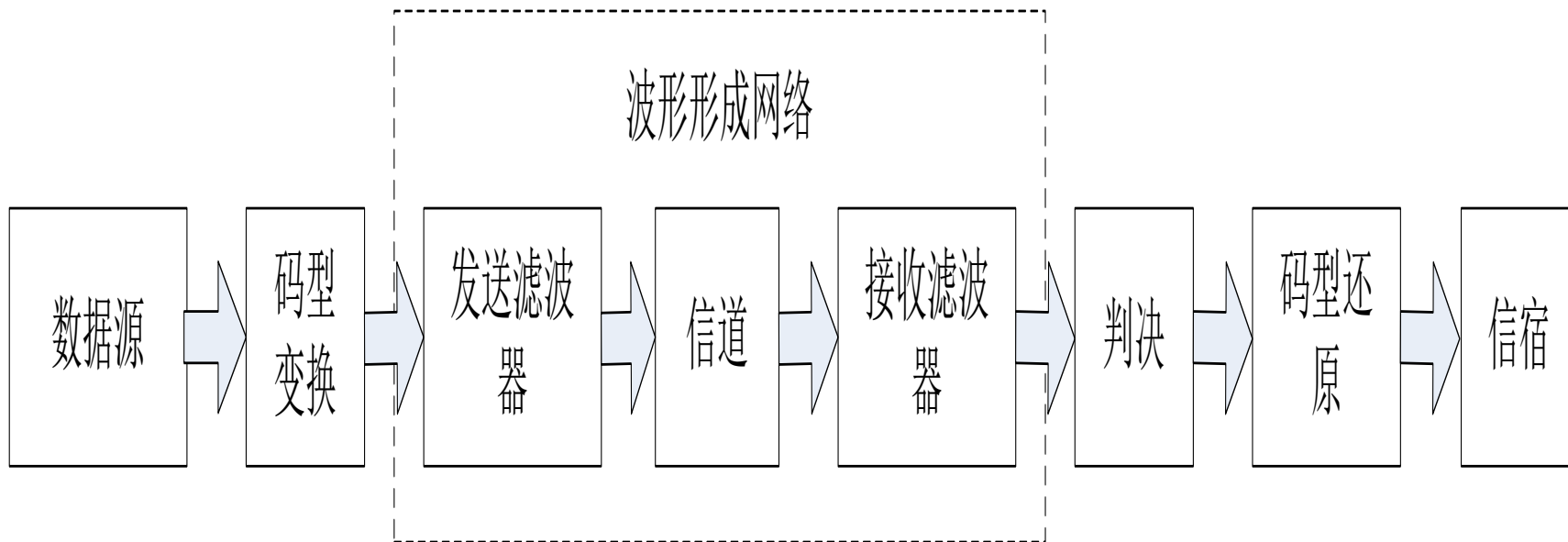
2.3 数字信号的基带传输

模数变换后的数字信号频谱，往往是含有直流、基波、高次谐波等不同频率分量的信号，称为基带数字序列信号，简称基带信号。

把基带数字序列信号经适当码型变换后直接送入信道传输，称为基带数字序列信号传输，简称基带传输。

2.3.1 基带传输系统模型

- ✓ 码型变换：基带信号适应信道特性。
- ✓ 波形形成网络：形成无码间干扰的波形。



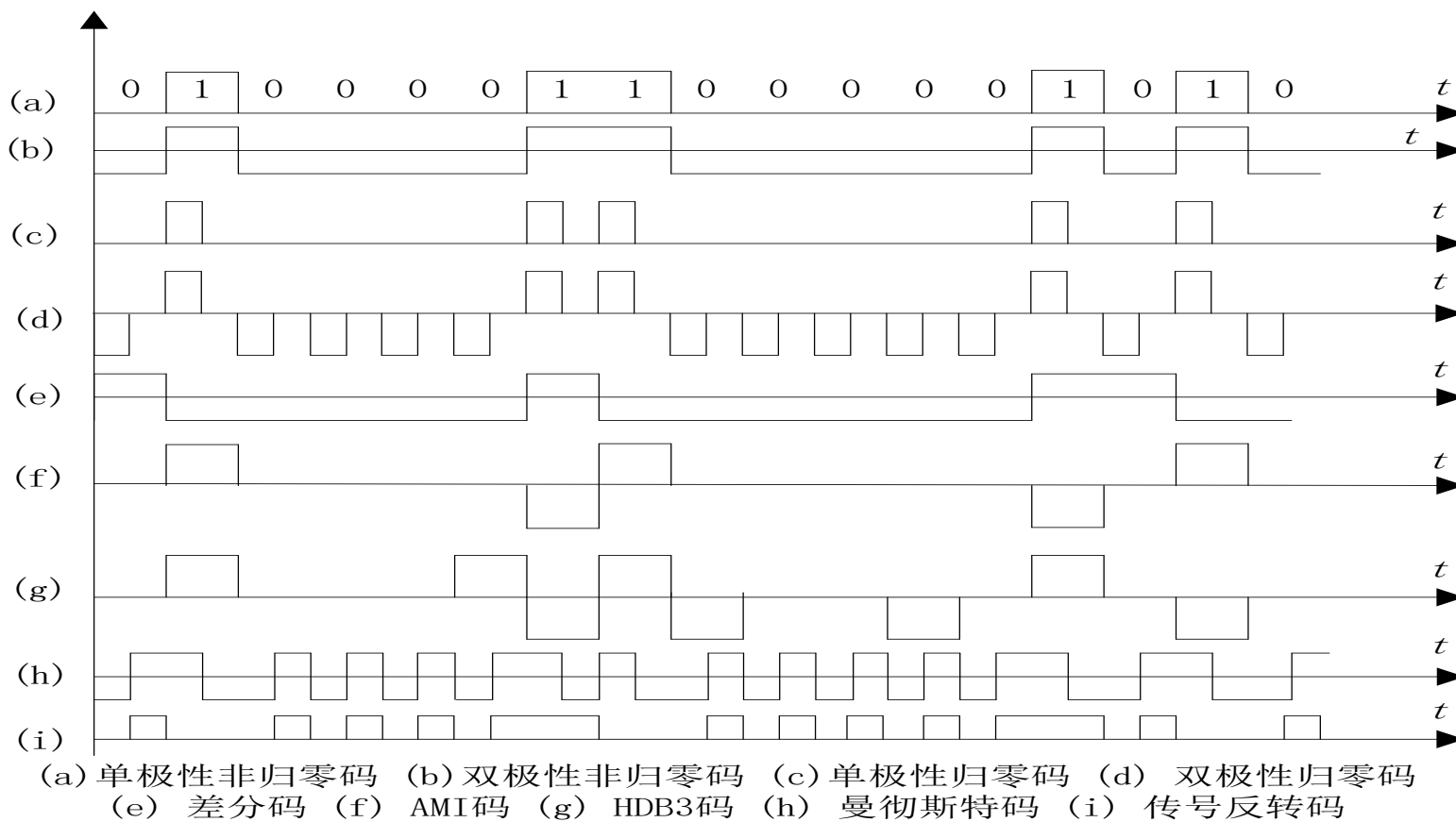
2.3.2 数字基带传输的码型

根据信道频域特性和基带数字信号频域特性匹配的原则，对基带信号进行适当码型变换，使之适合于给定信道的频域特性，有利于延长传输距离、提高可靠性。

1. 数字基带传输码型选择原则

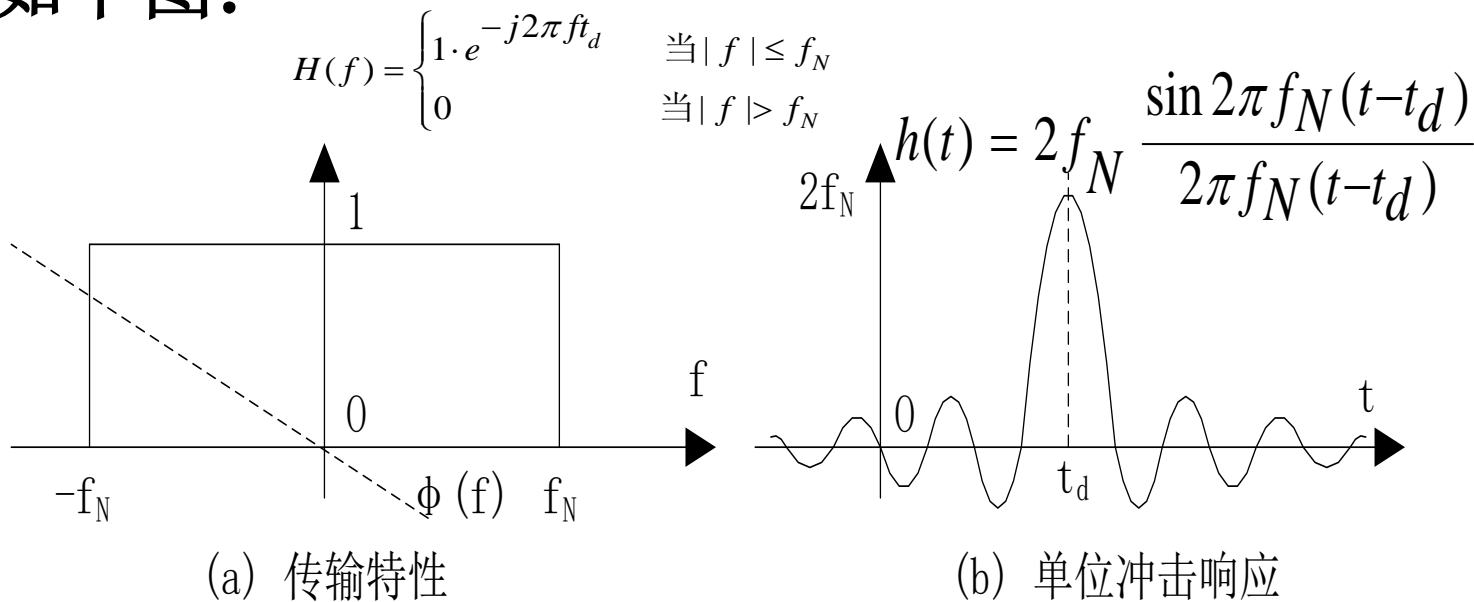
- ◆ 直流或低频信号衰减快，信号传输一定距离后严重畸变，所以不应含直流或低频频率分量。
- ◆ 高频分量越大，对邻近信道产生的干扰就越严重，所以高频分量应尽量少。
- ◆ 为方便从接收到的基带信号中提取位同步信息，应包含定时频率分量。
- ◆ 便于增加冗余码，使码型带有规律性。
- ◆ 码型变换过程与信源的统计特性无关，即对信源消息类型无任何限制并具有透明性。

2. 常用基带数字传输码型



2.3.3 无码间干扰的基带数字传输

基带传输信道（即波形形成网络）可以等效为一个理想低通滤波器，其传输特性及单位冲击响应如下图：

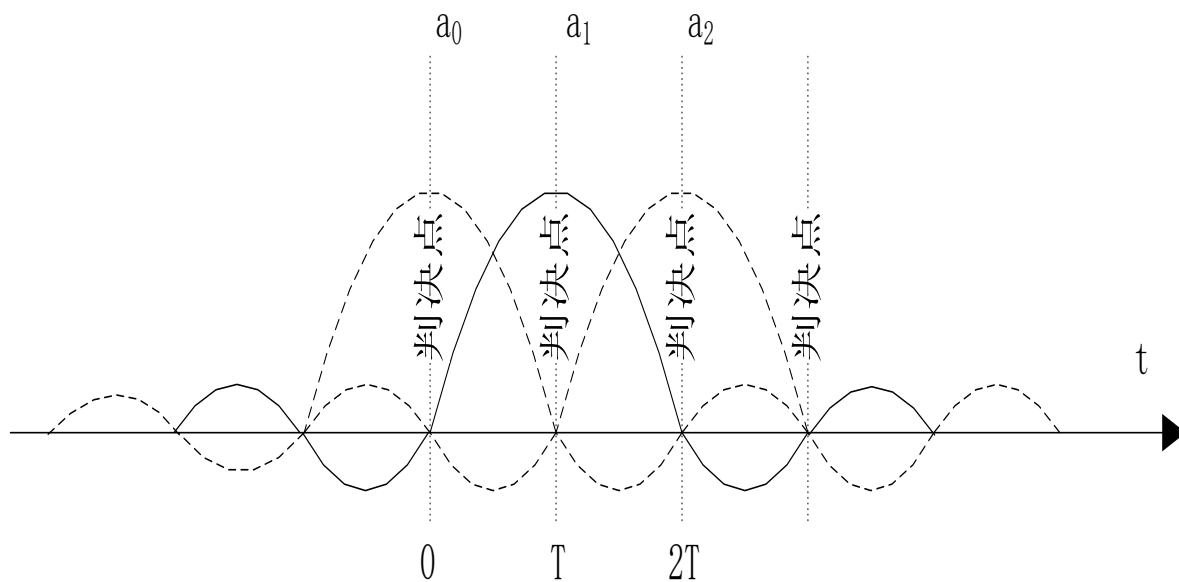


Nyquist准则

如果波形形成网络具有图示理想低通滤波器传输特性，则该系统传输的码元速率为 $2f_N$ （码元周期 $T=1/2f_N$ ）时，系统输出波形在峰值点（即判决抽样点）上不会产生前后码元间的干扰，这一条件称为奈奎斯特准则。

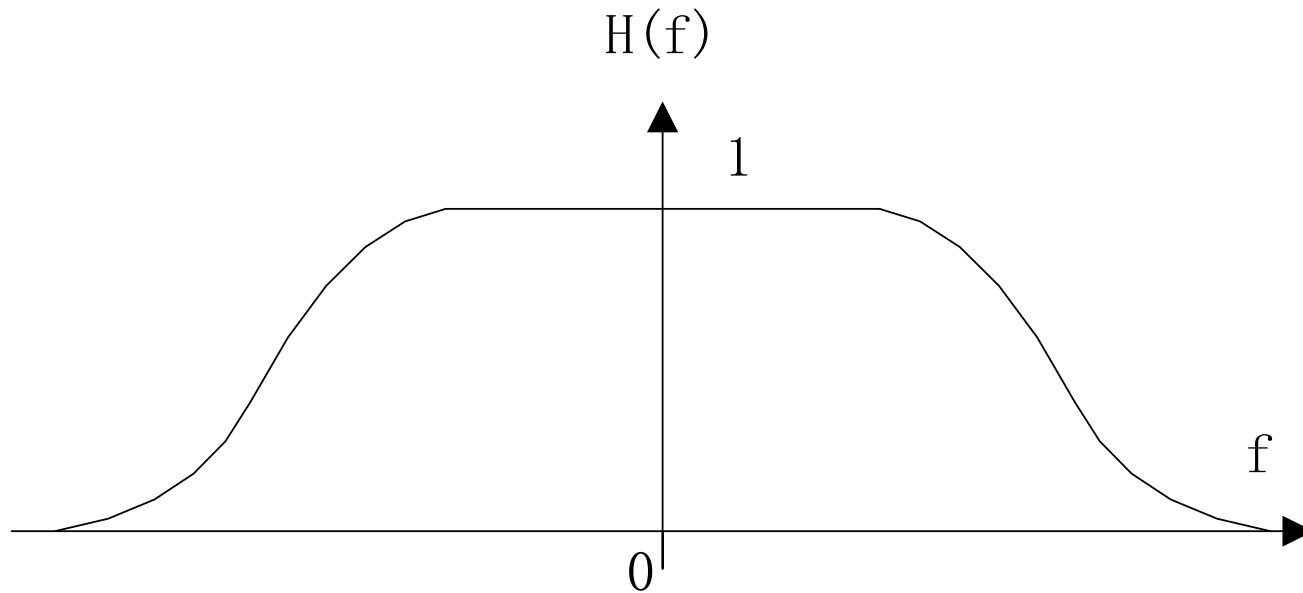
无码间干扰的接收波形

只要按照**Nyquist**准则传输，当处于某个码元的幅度峰值时，恰好其它码元幅值是过零点。



具有滚降特性的波形形成网络

具有滚降特性的波形形成网络，从技术上实现起来比理想低通容易，而且也满足**Nyquist**条件。



2.4 数字信号的频带传输

当基带数字信号频率范围与信道不相匹配时，把基带数字信号进行调制后再行传输，即数字信号的频带传输。

本节将在第**1**章二进制数字调制基础上介绍多进制数字调制和复合调制概念。

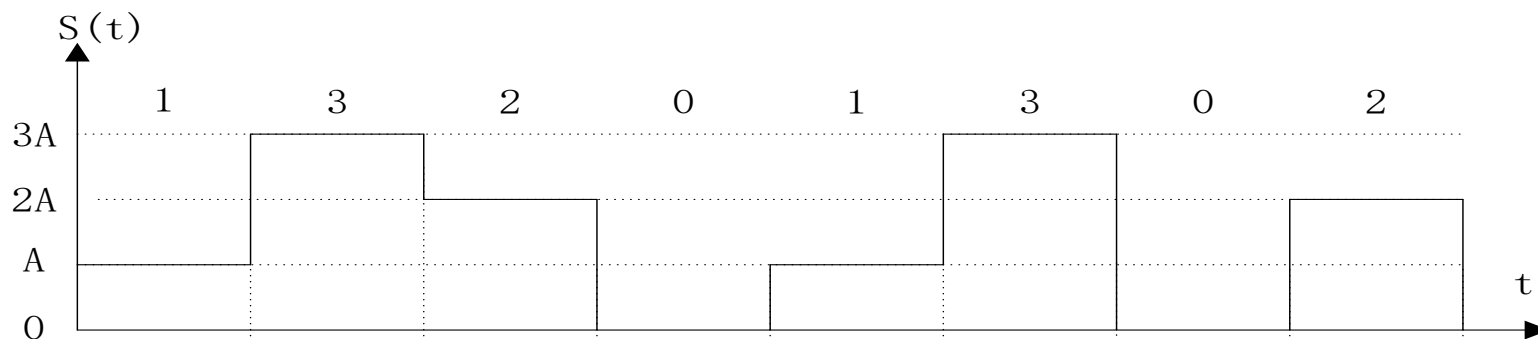
2.4.1 多进制数字调制

多进制数字调制是利用多进制数字信号调制载波信号的幅度、频率或相位。

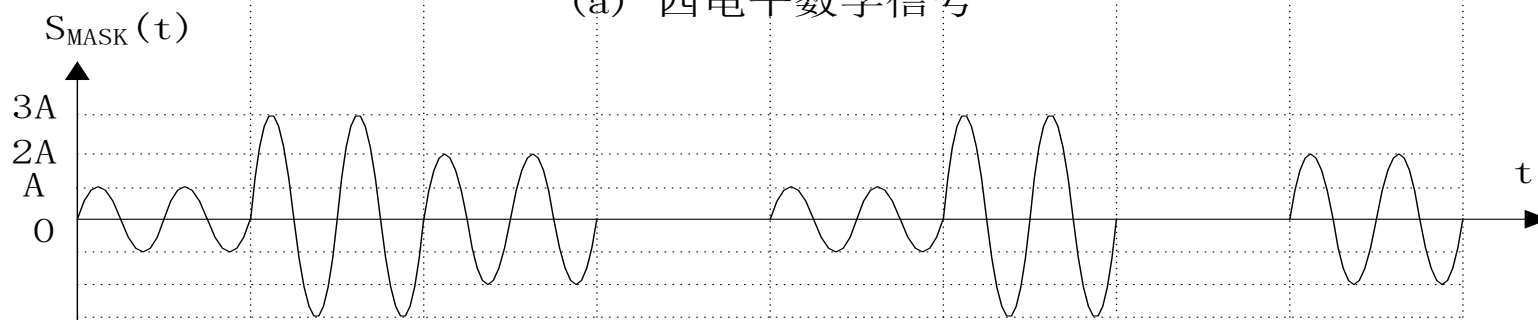
与二进制数字调制相比，多进制数字调制可提高比特率或可靠性，但因为需要多电平来表示信号，因而抗噪声性能较低，实现起来也较复杂。

1. 多进制数字调幅(MASK)

四进制MASK



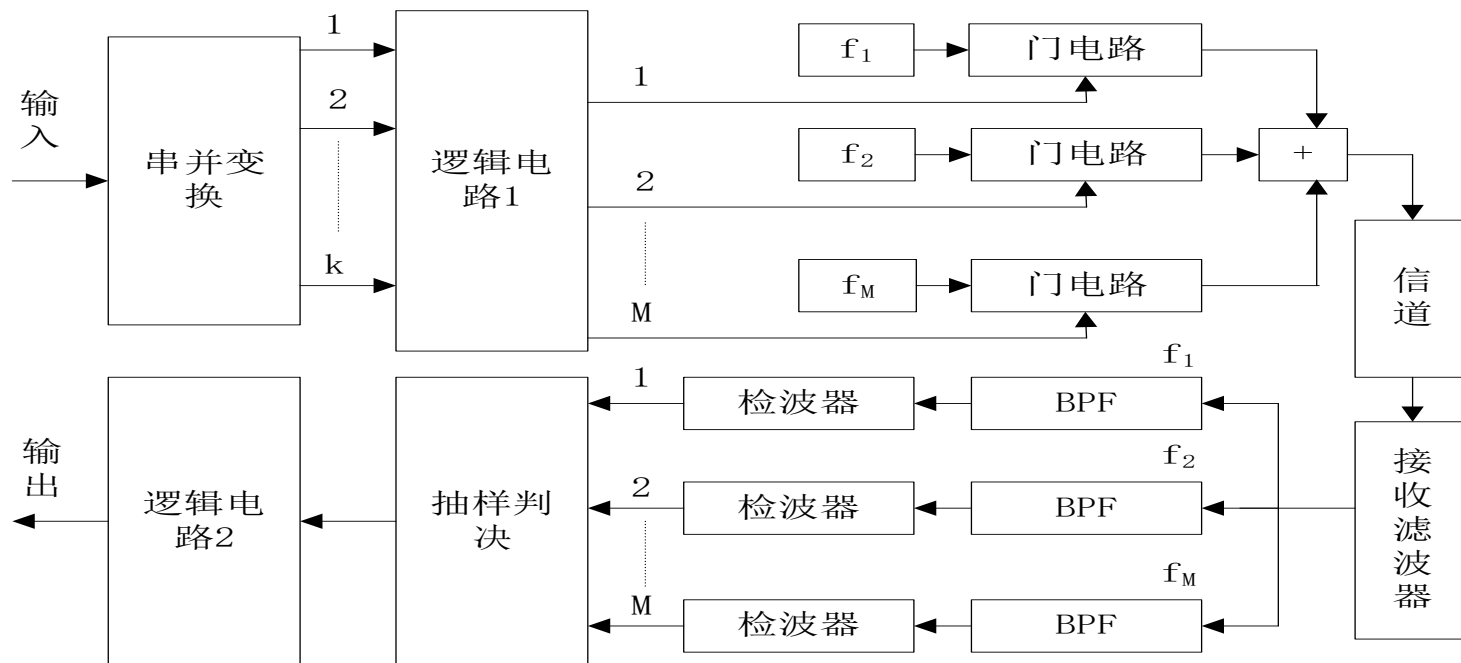
(a) 四电平数字信号



(b) 四进制调幅

2. 多进制数字调频 (MFSK)

$k = \log_2 M$ 位码元为一组对应地转换成有 M 种状态的多进制码。



3. 多进制数字调相（**MPSK**）

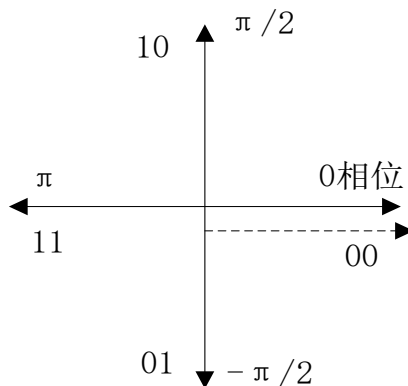
利用载波的各种不同相位状态来表征数字信息。与二进制数字相位调制相同，多进制数字相位调制也有绝对相位调制（**MPSK**）和相对相位调制（**MDPSK**）。

矢量图表示的MPSK (A和B方式)

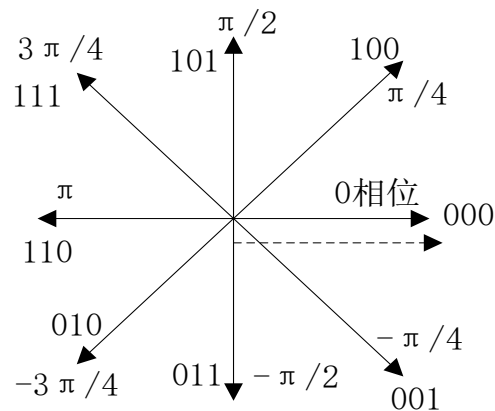
(a) A方式



(二相制)

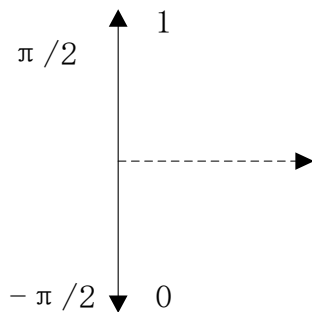


(四相制)

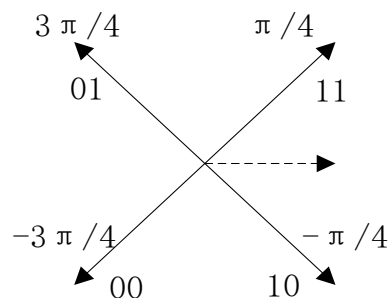


(八相制)

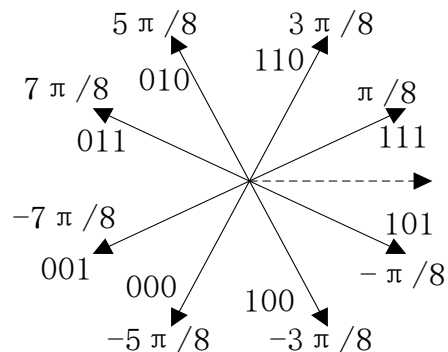
(b) B方式



(二相制)



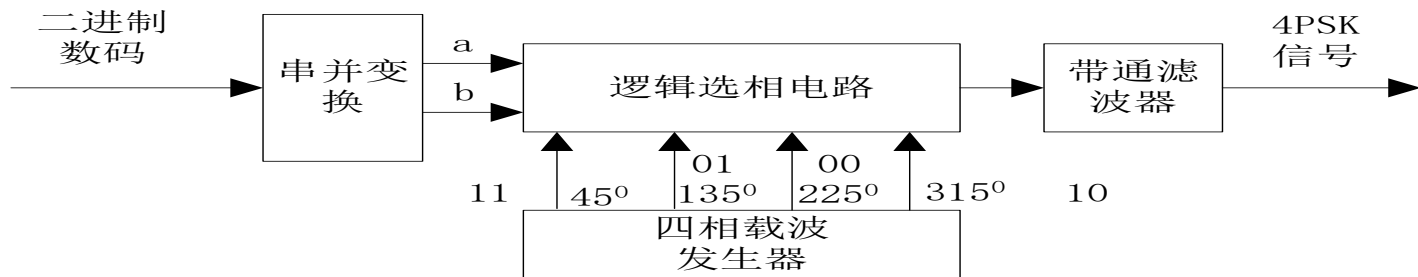
(四相制)



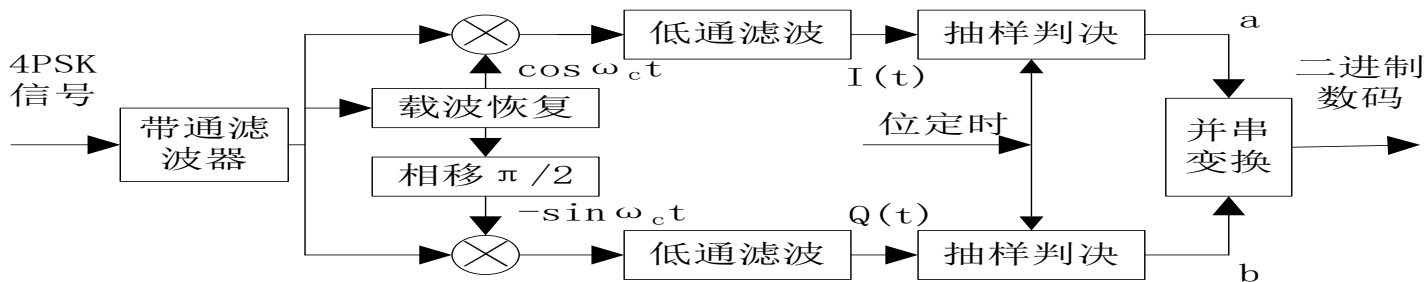
(八相制)

QPSK调制与解调框图

两个相互正交的相干载波 $\cos\omega_c t$ 和 $\sin\omega_c t$ 分别检测出两个分量a和b。



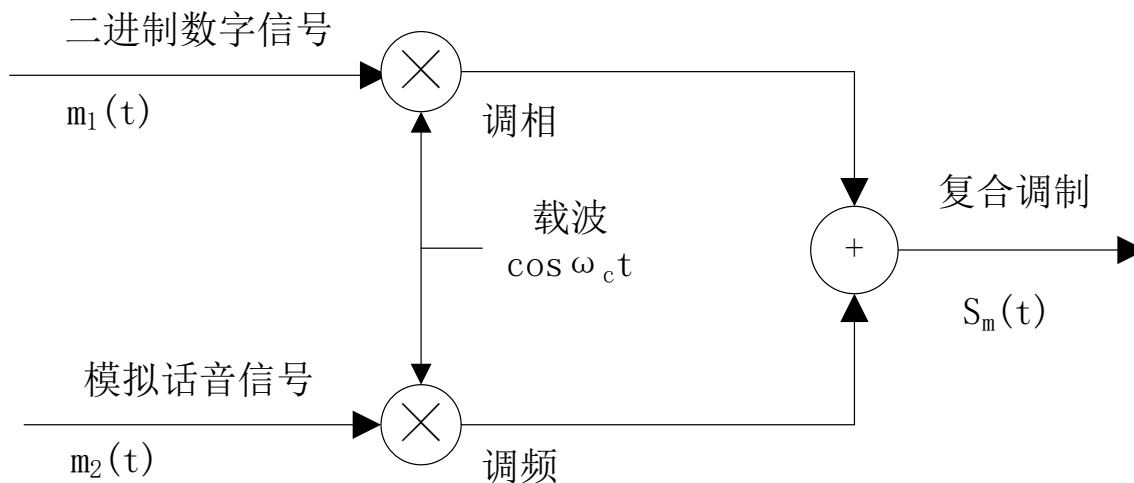
(a) 4PSK信号相位选择法调制



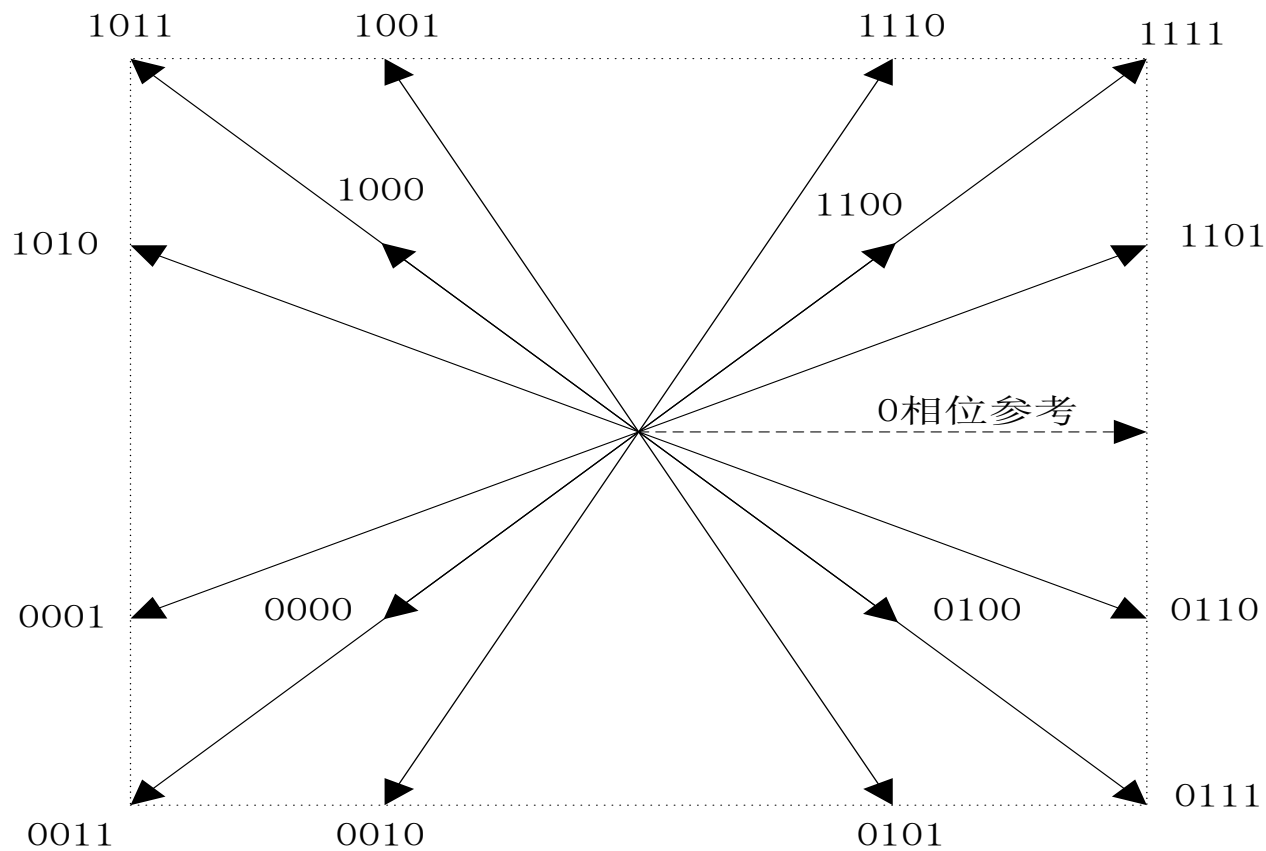
(b) 4PSK信号的相干解调

2.4.2 复合调制与多级调制

对同一载波信号的两个参数同时进行调制称为复合调制，目的是进一步提升信道利用率。例如，数字微波通信中采用的图示复合调制，数字调相用于传送数字信号，模拟调频用于话音通信。

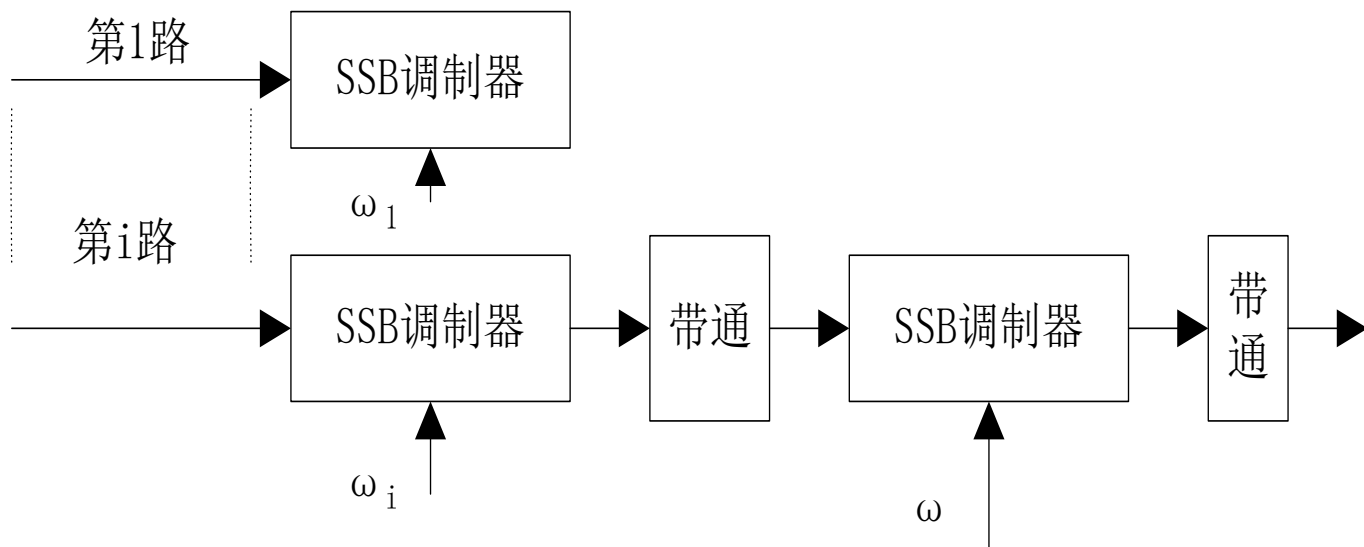


调相加调幅实现**16**进制复合调制



多级调制

多级调制是指把同一基带信号实施两次或更多次的调制过程。



2.5 数字同步与复接技术

数字同步是指数字通信系统中各关键节点位置的动作频率保持一致。

数字复接是把若干个低速率分支数字码流汇接成一路高速数字码流的过程。

为促进数字通信标准化，**ITU-T**早期推荐准同步数字体系（**PDH**）；后期推荐同步数字体系（**SDH**）

2.5.1 数字同步技术

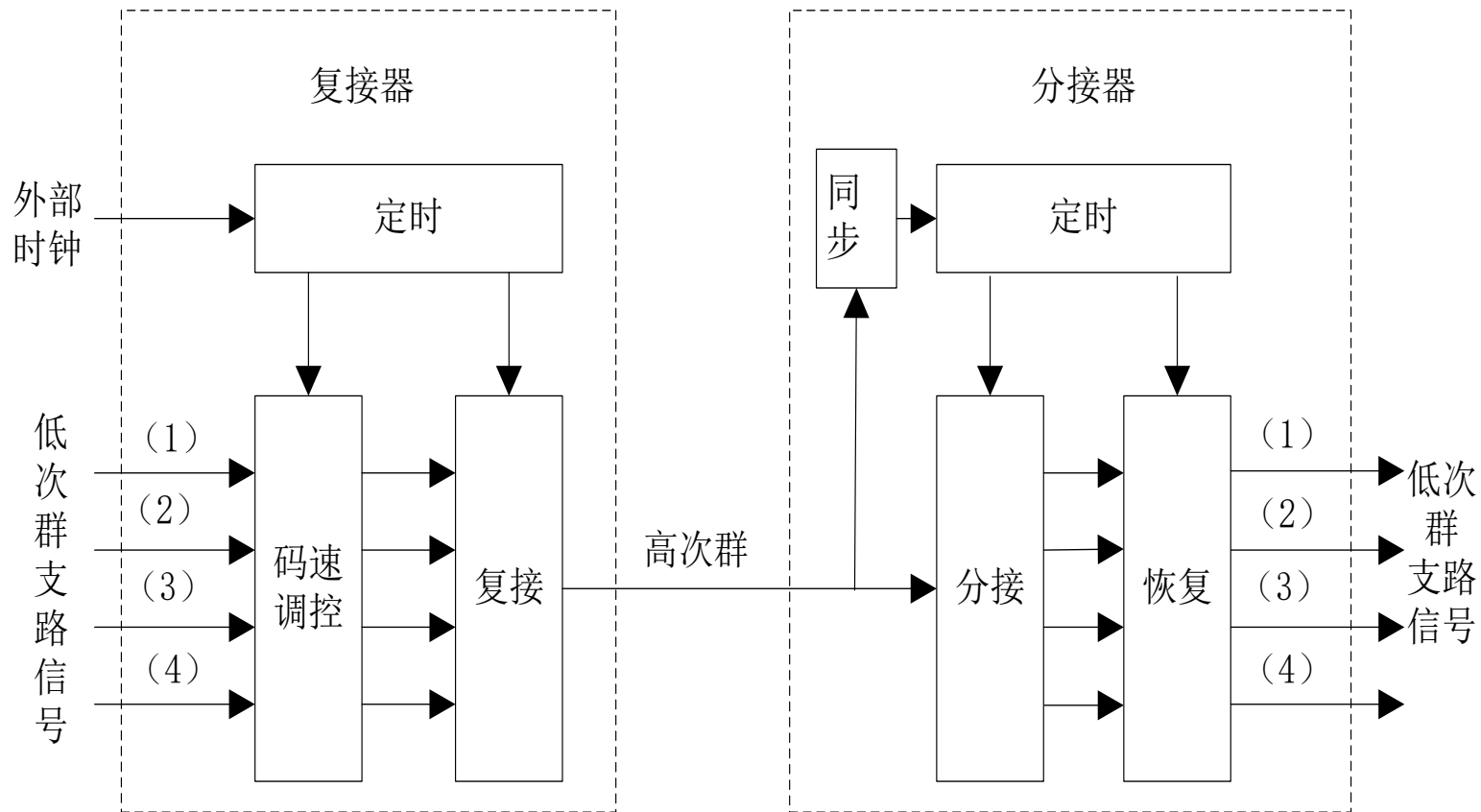
两种同步方式：位同步和帧同步

- ✓ 位同步：收发两端以比特为单位严格对齐
 - 必要条件：双方时钟频率完全同频同相（多采用主从同步方式）
- ✓ 帧同步：收发两端以帧为单位严格对齐。
 - 必要条件：利用帧同步码

2.5.2 数字复接技术

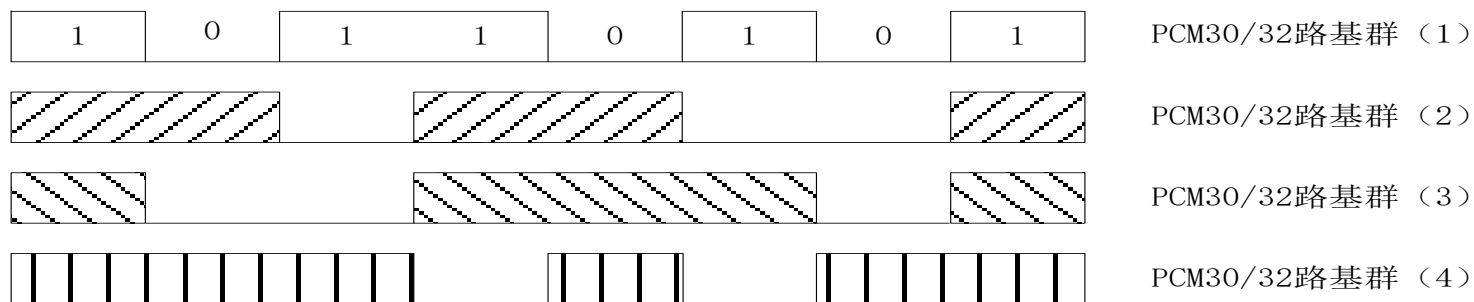
数字复接是把支路低次群按时分复用方式合并成一个单一的高次群，其设备由定时、码速调整和复接单元组成；分接器的功能是把高次群数字信号分解成原来的低次群数字信号，它由同步、定时、分接和码速恢复等单元组成。

1. 数字复接系统框图

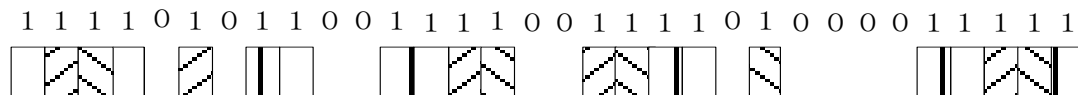


2. 数字复接方法

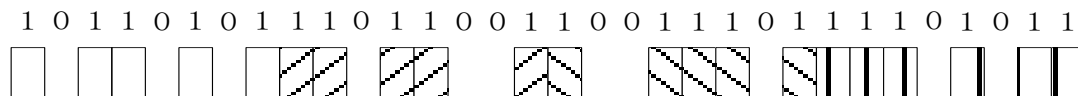
按位、按字、按帧复接，下图是按位和按字复接：



(a) 分别来自四个基群的各8bit时隙信号



(b) 按位数字复接产生的二次群



(c) 按字数字复接产生的二次群

3. 码速调整

被复接的各支路数字信号彼此之间必须同步并与复接器的定时信号同步，否则需要做出适当的码速调整，以实现复接后的高速数据码流的传输同步定时控制。

通常，码速调整后速率高于调整前的结果，称为正码速调整。

2.5.3 准同步数字体系

ITU-T早期推荐了两类从基群到五次群复接等级的数字速率系列。一类以1.544 Mb/s为基群速率，另一类以2.048 Mb/s为基群速率。

因这两类各次群比特率相对于其标准值有一个规定的容差，而且是异源的，各节点时钟允许存在少量的频率漂移误差，因此这是一种准同步复接方式，统称为准同步数字体系（PDH）。

1. 两类PDH系列标准

表2-4 PDH两类标准数字速率系列和复接等级

群号	2M系列		1.5M系列	
	速率 (Mb/s)	话路数	速率 (Mb/s)	话路数
基群	2.048	30	1.544	24
二次群	8.448	$30 \times 4 = 120$	6.312	$24 \times 4 = 96$
三次群	34.368	$120 \times 4 = 480$	32.064	$96 \times 5 = 480$
四次群	139.264	$480 \times 4 = 1920$	97.728	$480 \times 3 = 1440$
五次群	564.992	$1920 \times 4 = 7680$	397.200	$1440 \times 4 = 5760$

2. PDH系列的不足

- ✓两种数字系列互不兼容，导致国际之间电信网的建立及营运管理比较复杂和困难；
- ✓高、低速率信号的复接和分接都需要逐级进行，复接-分接设备复杂，上下话路价格昂贵；
- ✓帧结构中管理维护用的比特位较少，难以适应网络管理灵活、动态、智能化的日益增长需求。
- ✓主要适用于中、低速率点对点传输。

2.5.4 同步数字体系（SDH）

鉴于PDH的不足，国际上迫切需要建立统一的全新体制的数字通信网。为此ITU-T经充分讨论和协商，于上世纪80年代末，接受了美国贝尔通信研究所提出的同步光网络（SONET: Synchronous Optical Network）数字体系标准并进行了适当修改，命名为同步数字体系（SDH）

SDH的特点

1) 由一系列的SDH网元组成，可在光纤网中实现同步信息传输、复用、分插或交叉连接；2) 块状帧结构中安排了丰富的管理比特，大大增强了网络管理能力；3) 网络能在极短的时间内从失效的故障状态自动恢复业务而无需人为干涉；4) 有标准化的信息结构等级规范，称为同步传输模块STM-N。不同厂家的设备只要符合规范就可以在光路上互联，真正实现横向兼容；5) 具有兼容PDH甚至B-ISDN的能力，所以有广泛的适用性。

2.6 数字传输的差错控制

噪声是导致数字通信传输中出现差错（误码）的主要原因。

差错控制的作用就是要检测出数据码元在传输过程中可能发生的误码，并且采取适当的方法加以纠正。

差错控制通过差错控制编码（信道编码）实现，通常有检错编码和纠错编码两种形式。

差错控制编码的基本原理

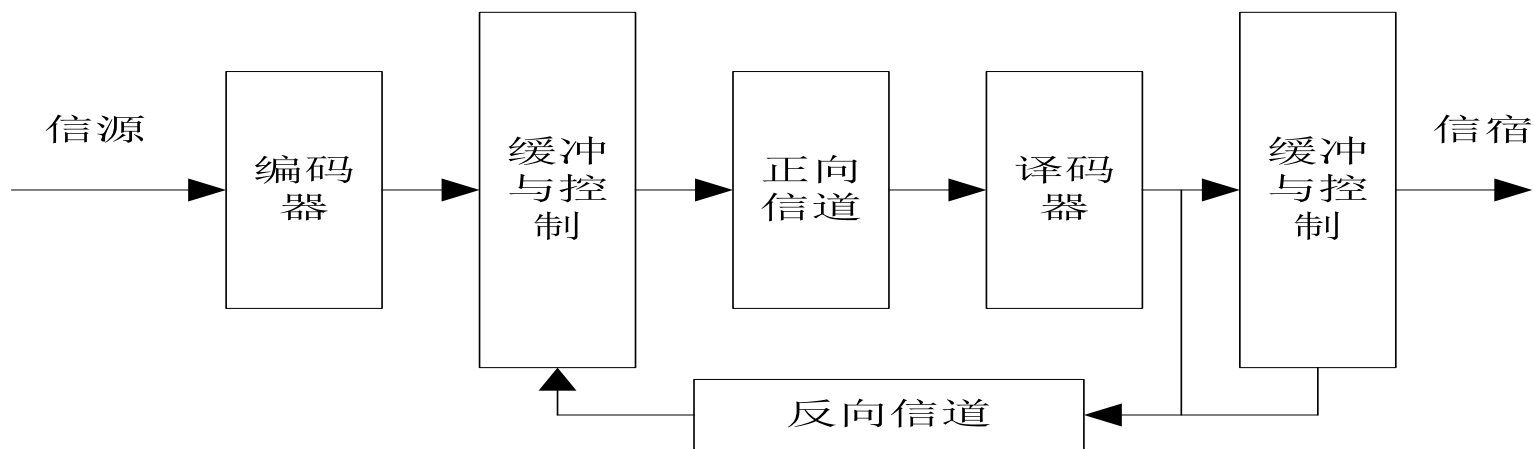
原始数据码元序列本来不带规律性，但通过差错控制编码让其产生规律性并发送出去，接收端根据这一规律性对码元序列进行检测，一旦出现违规情况，就认为出现了传输错误。

2.6.1 噪声的分类

- ◆ 根据噪声和信号之间的混合迭加关系可分为加性噪声和乘性噪声；
- ◆ 根据噪声来源的不同，可分为自然噪声、人为噪声和内部噪声；
- ◆ 根据噪声的表现形式可分为单频噪声、起伏噪声和脉冲噪声。

2.6.2 检错编码

检错编码只能判断出所收到的数据是否有错，但不能判断出哪些是错误码元，最常用的两种检错编码方式是奇偶校验编码和循环冗余校验编码。通常采用反馈重传(**ARQ**)技术来纠错。



(a) 反馈重传

1. 奇偶校验

水平垂直偶校验

位	字符										校验码字
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>j</i>	
W_1 W_2 W_3 W_4 W_5 W_6 W_7 W_8 校验码字	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0

2. 循环冗余校验

$g(x)=x^4+x^3+x^2+1$ （多项式系数是11101），信息码是110，产生的CRC码是1001，发送的码元是110,1001。

										1	0	1		
1	1	1	0	1		1	1	0	0	0	0	0		
						1	1	1	0	1				
								1	0	1	0	0		
								1	1	1	0	1		
										余 数	1	0	0	1

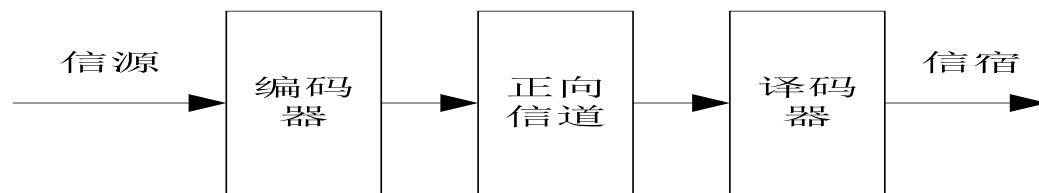
循环冗余校验

接收端进行校验运算，得到的余数应该是0，否则视为传输错误：

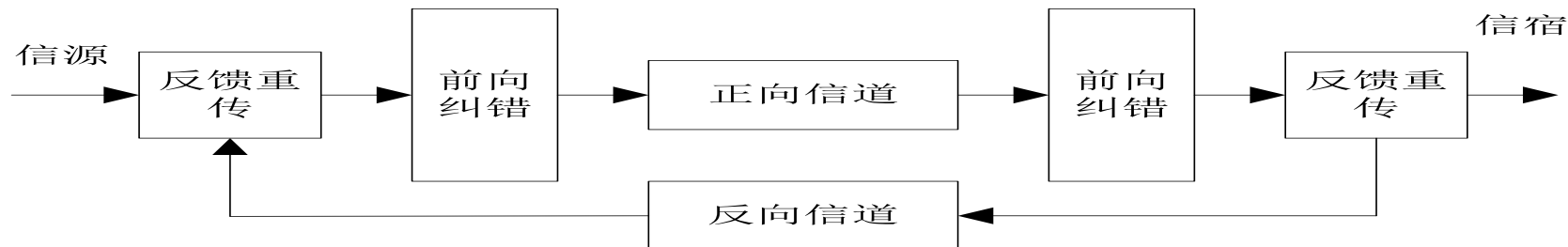
$$\begin{array}{cccccc|cccccc} & & & & & & & & & & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & | & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ & & & & & & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & & \\ & & & & & & & & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ & & & & & & & & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & \text{余数} & & & & & & \end{array}$$

2.6.2 纠错编码

纠错编码能够判断出错码元的准确位置并加以自我改正，纠错编码需要比检错编码增加更多的冗余码元。



(b) 前向纠错



(c) 混合纠错

本章小结和知识点

- ◆ 数字通信的特点
- ◆ 模拟信号的数字化过程：抽样、量化、编码
- ◆ 基带传输与频带传输
- ◆ 数字复接**PDH**与**SDH**标准
- ◆ 差错控制