



Chapter 4

数字传输

(Digital Transmission)

4-1 DIGITAL-TO-DIGITAL CONVERSION

本章说明以数字方式传输数据所用的机制和技术，包括三种技术：**line coding** (线性编码), **block coding** (块编码或分组编码) 和 **scrambling** (扰码) 。

Topics discussed in this section:

Line Coding(线性编码)

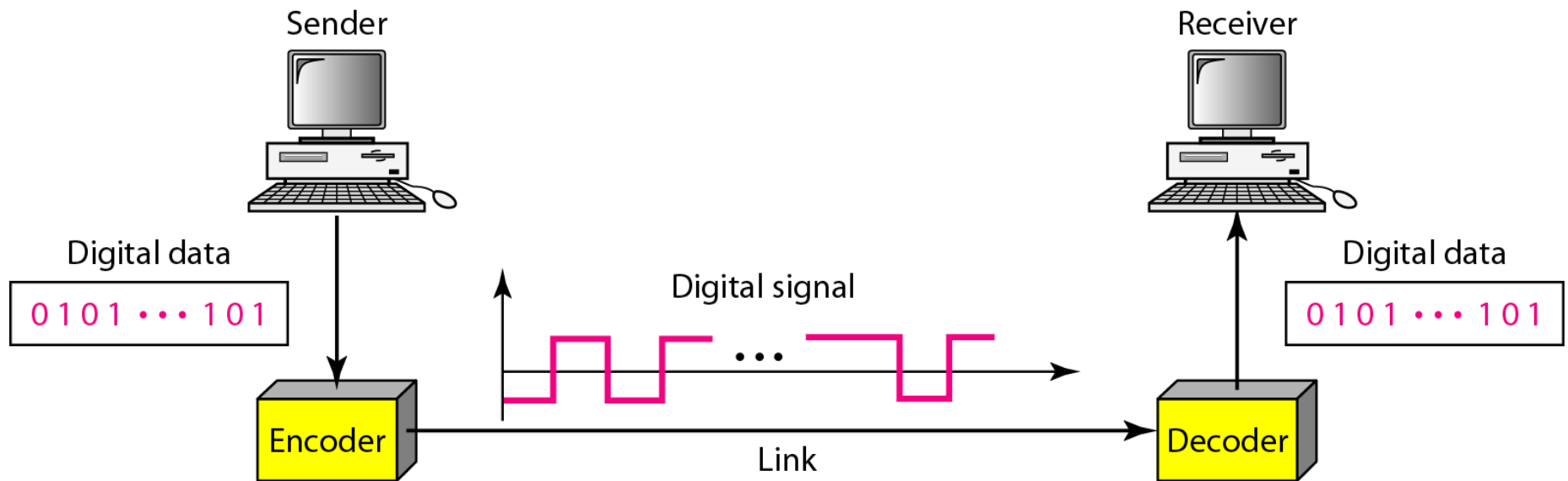
Line Coding Schemes(线性编码方案)

Block Coding(块编码)

Scrambling(扰码)

Figure 4.1 *Line coding and decoding*

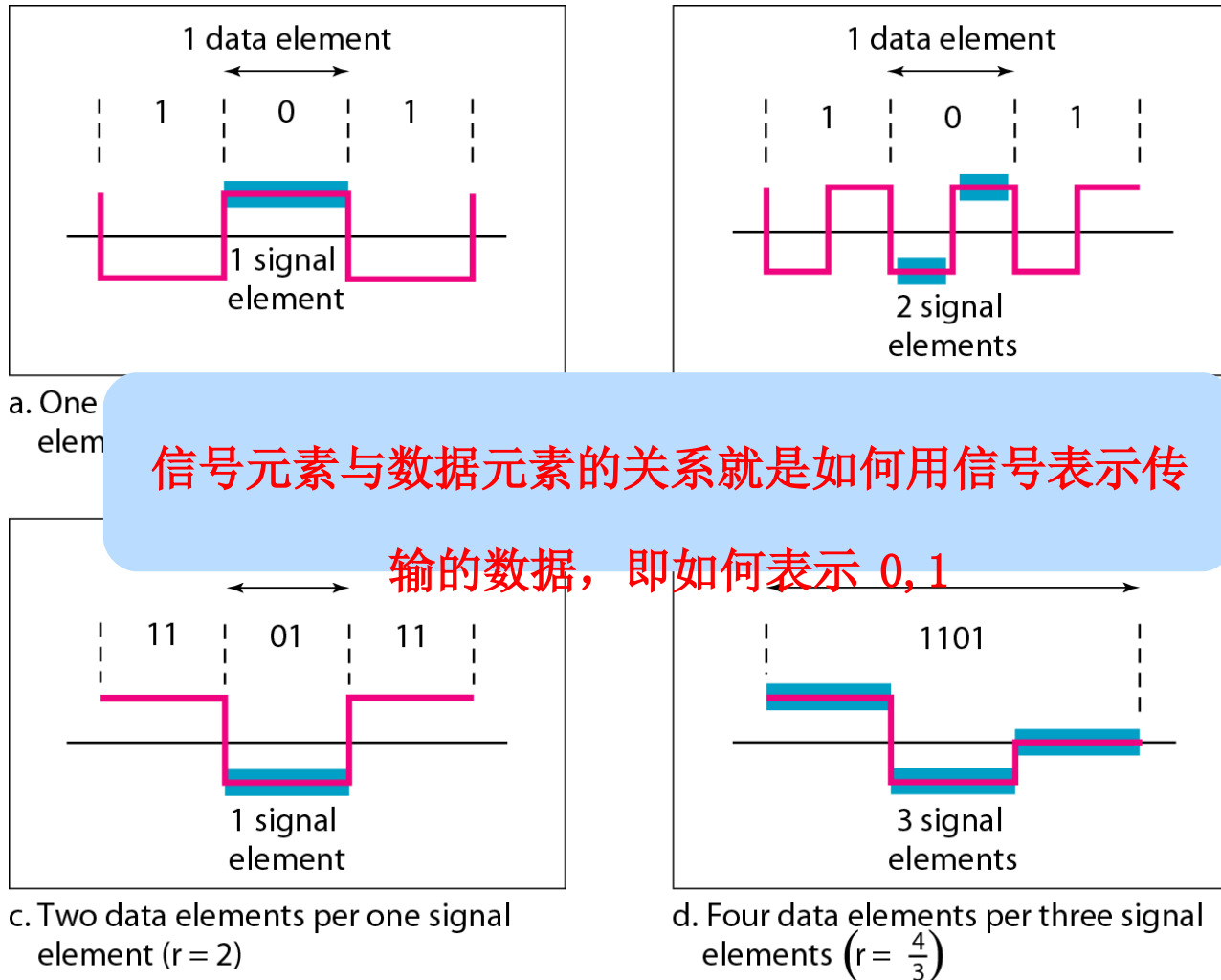
- 线性编码是将数字数据转换为数字信号的过程
- 数据元素 (data element): 表示一块信息的最小实体即位 (bit)，是被承载的
- 信号元素 (signal element)：是数字信号的最小单元，是传输载体



比率 r : 每个信号元素承载的数据元素的个数

- 如果一个数据元素被一个信号元素承载, 则 $r = 1$
- 如果一个信号元素承载两个数据元素, 则 $r = 2$
- 如果两个信号元素承载 1 个数据元素, 则 $r = 1/2$
- 如果三个信号元素承载四个数据元素, 则 $r = 4/3$
- 如果 $r = 1$, 意味着 1 个人驾驶一辆车
- 如果 $r > 1$, 意味着多个人乘坐一辆车
- 如果 $r = 1/2$, 意味着 1 个人驾驶一辆车和一辆拖车

Figure 4.2 *Signal element versus data element* （信号元素和数据元素）



信号元素与数据元素的关系就是如何用信号表示传
输的数据，即如何表示 0, 1

数据速率与信号速率 (Data rate vs Signal Rate)

- 数据速率： 1 秒钟发送的数据元素 (位) 的数量，即 bps(bits per second) 或 b/s ，也叫比特率。
- 信号速率： 1 秒钟发送的信号元素的数量，单位是波特率 (baud) ， 或者叫做脉冲速率 (pulse rate) 、 调制速率 (modulation rate) 或波特率 (baud rate) 。
- 目标： 增加数据速率而降低信号速率。

数据速率与信号速率 (Data rate vs Signal Rate)

$$S = c \times N \times \frac{1}{r}$$

- N : 数据速率, 单位 bps
- c : 情形因子 (case factor), 会根据情形改变, 一般取值 1/2
- S : 是信号元素速率
- r : 比率



Example 4.1

一个信号携带数据，一个数据元素编码成一个信号元素（ $r = 1$ ）。如果比特率是 100kbps， c 在 0 和 1 之间，那么波特率的平均值是多少？

Solution

假定 c 的平均值是 $1/2$ ，那么波特率是：

$$S = c \times N \times \frac{1}{r} = \frac{1}{2} \times 100,000 \times \frac{1}{1} = 50,000 = 50 \text{ kbaud}$$



虽然数字信号的真实带宽是无限的，
但有效带宽是有限的。

- 是波特率而不是比特率决定了数字信号的带宽
- 波特率和带宽是有关系的
- 若给定通道带宽，则可以得到最大数据速率

$$B_{\min} = c \times N \times \frac{1}{r}$$

$$N_{\max} = \frac{1}{c} \times B \times r$$



Example 4.2

通道的最大数据速率是 $N_{\max} = 2 \times B \times \log_2 L$ （由奈奎斯特公式定义），与前面定义的 N_{\max} 公式一致吗？

Solution

有 L 个电平信号，每个电平可以携带 $\log_2 L$ 个比特。如果每个电平与一个信号元素对应，假定一般情形 ($c = 1/2$)，则

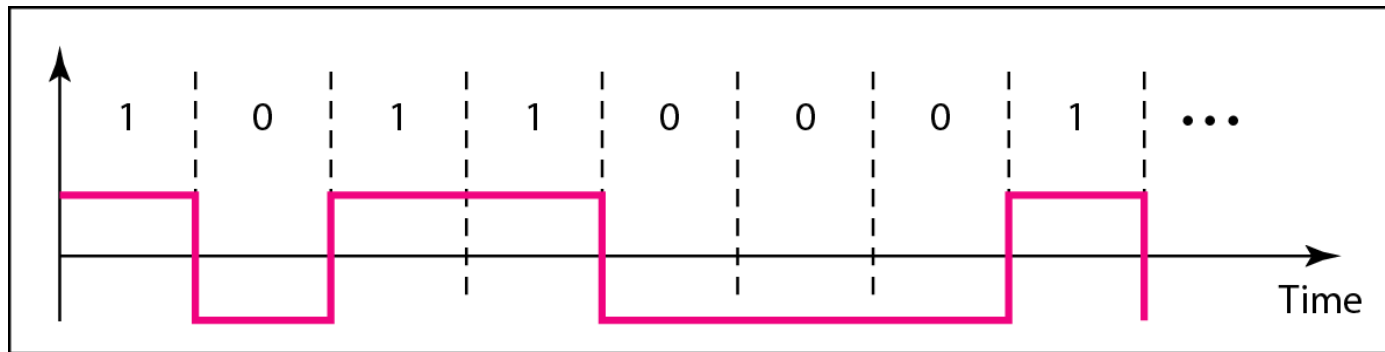
$$N_{\max} = \frac{1}{c} \times B \times r = 2 \times B \times \log_2 L$$

线路编码需要解决的问题

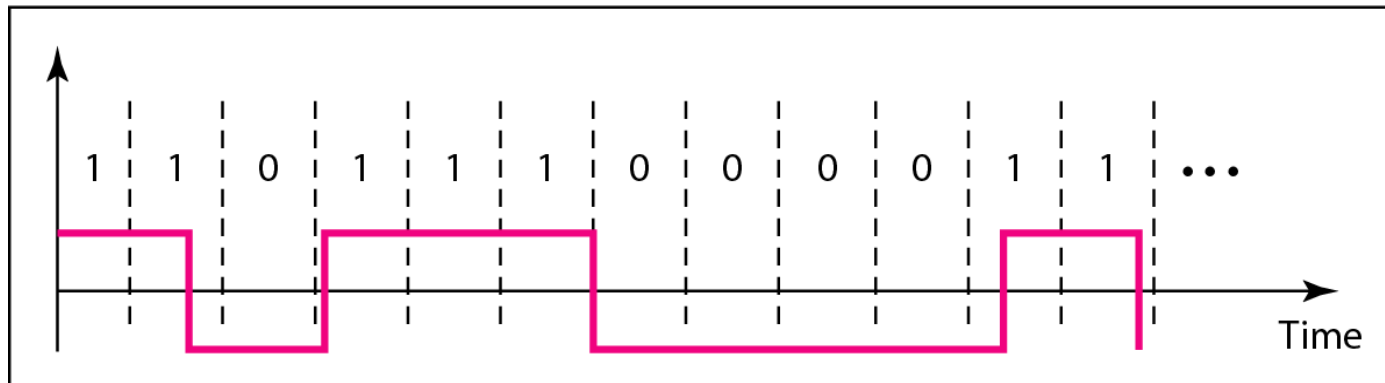
- **基线偏移** (Baseline Wandering)：基线是指接收方计算收到信号功率的运行平均值。信号代表的高低电平根据信号的功率与基线比较得到，0 或 1 的长字串会引起基线偏移，使接收方不能正确地进行解码。好的线路编码方案需要防止基线偏移。
- **直流分量** (DC Components): 接近于零的频率成为直流分量，会给不允许通过低频率的系统，或者使用电子耦合的系统带来问题（直流信号不能通过电容，不能远距离传输，会造成器件老化）。

-
- **自同步** (self-synchronization): 接收方的位间隔与发送方的位间隔严格对应与匹配。数字信号在传输的数据中包含有定时信息，通常是使用信号中包含有提示接收方起始、中间和结束位置的脉冲的跳变 (transition)。
 - **差错检测**
 - **抗噪声和抗干扰**
 - **复杂性**

Figure 4.3 缺乏自同步的效果



a. Sent



b. Received

Example 4.3

在数字传输中，接收方时钟比发送方时钟快 0.1%，如果数据速率是 1 kbps，则接收方每秒钟可以接收到多少额外的位？如果数据速率是 1 Mbps 呢？

Solution

在 1 kbps 时，接收方接收的速率是 1001 而不是 1000 bps。

1000 bits sent	1001 bits received	1 extra bps
----------------	--------------------	-------------

在 1Mbps 时，接收方接收的速率是 1,001,000 而不是 1,000,000 bps。

1,000,000 bits sent	1,001,000 bits received	1000 extra bps
---------------------	-------------------------	----------------

线路编码方案 (Line coding schemes)

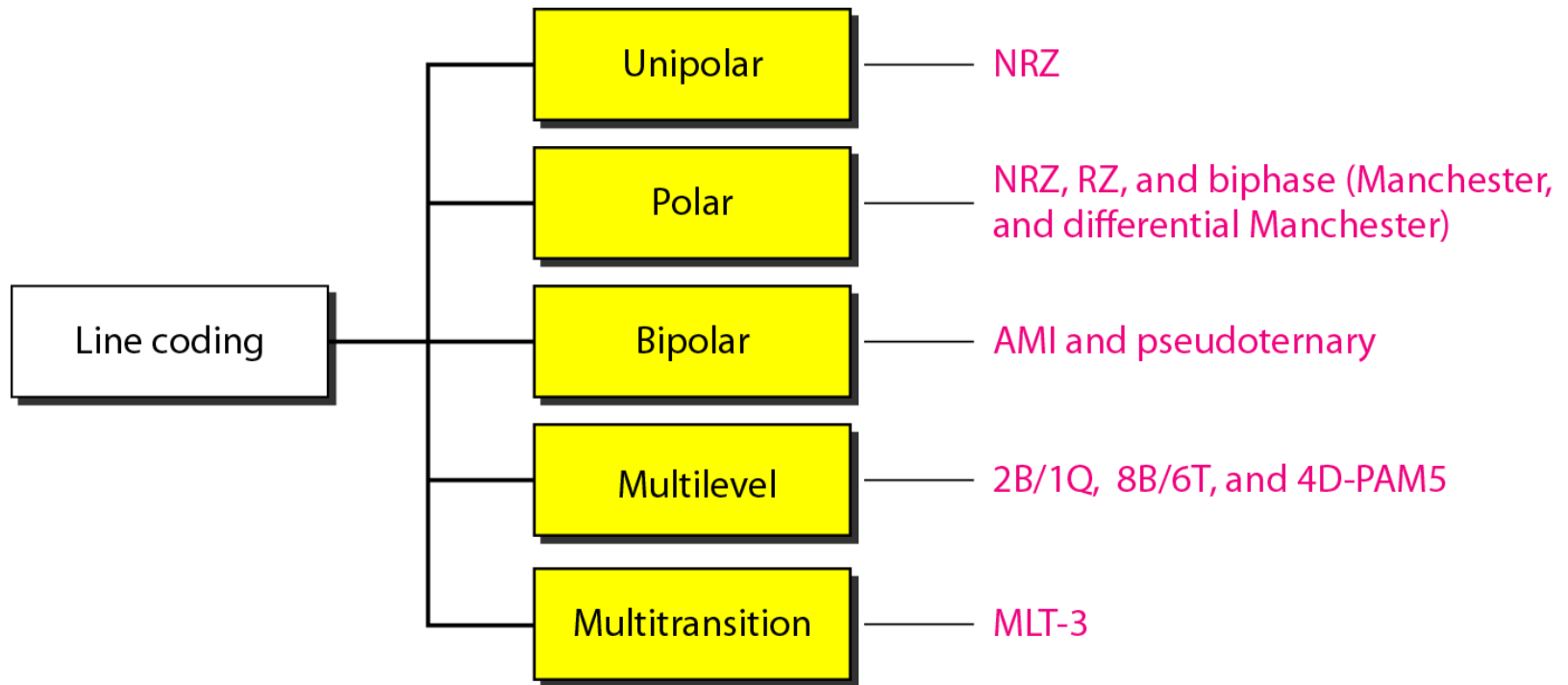


Figure 4.4 *Line coding schemes*

单极性编码 (Unipolar)—— 不归零 (NRZ)

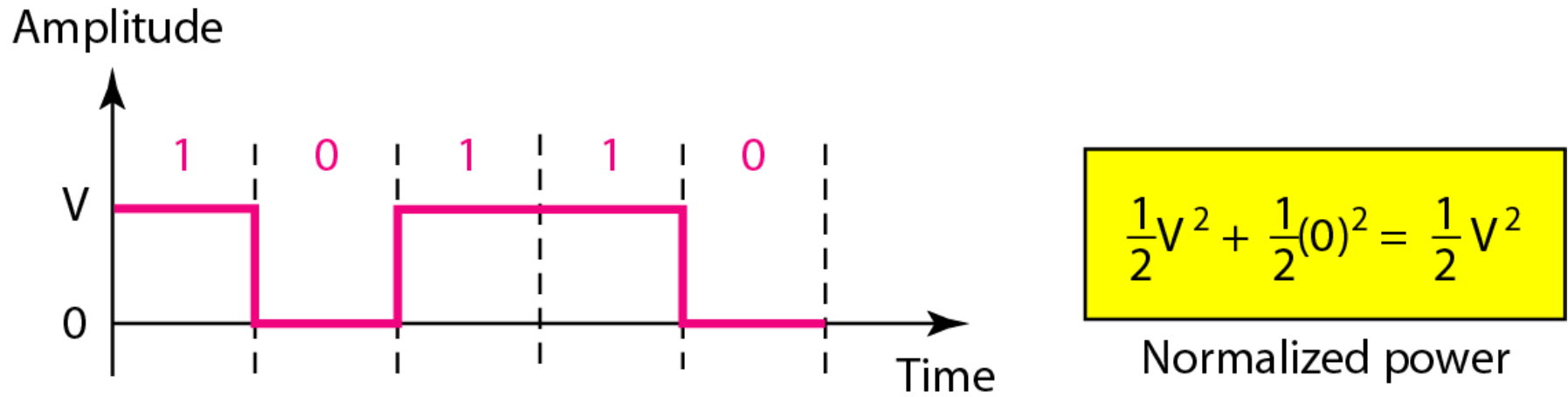
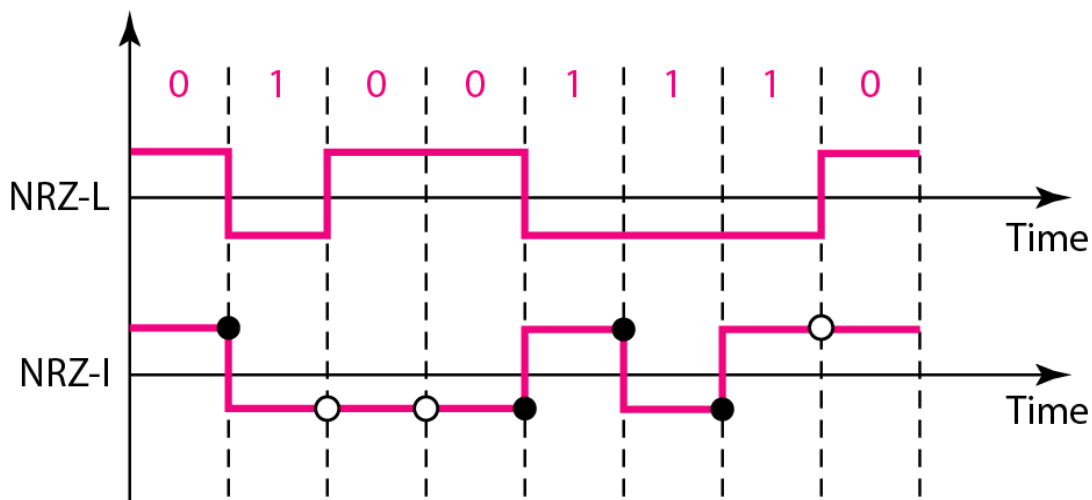


Figure 4.5 *Unipolar NRZ scheme*

极性编码 —— 不归零编码 (NRZ)



○ No inversion: Next bit is 0 ● Inversion: Next bit is 1

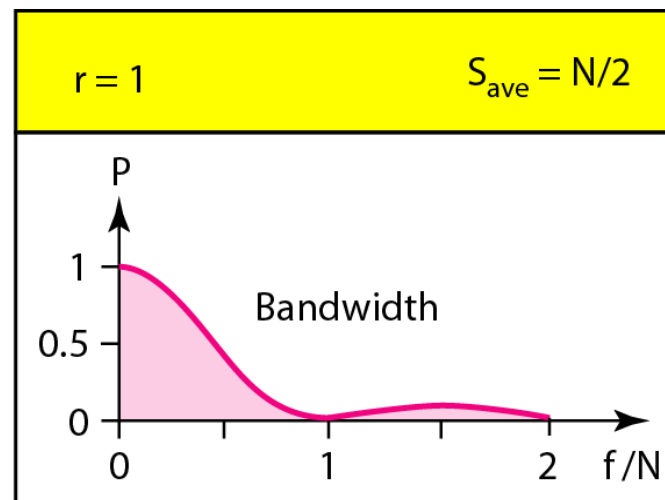


Figure 4.6 Polar NRZ-L and NRZ-I schemes

在极性 NRZ(polar NRZ) 编码中，信号有两个电平，常有 NRZ-L（NRZ-Level, NRZ 电平编码）和 NRZ-I（NRZ-Invert, NRZ 反相编码）。



Note

- ◆ 在 NRZ-L 中，电平决定了位值；在 NRZ-I 中电平是否反相决定了位值。
- ◆ NRZ-L 和 NRZ-I 都有 $N/2$ Baud 的平均信号速率。
- ◆ 能量集中在 $0 \sim N/2$ 之间的频率。
- ◆ NRZ-L 和 NRZ-I 都有基线偏移、同步和 DC 问题。

Example 4.4

系统使用 NRZ-I 传输 1Mbps 的数据，试问平均信号速率和最小带宽是多少？

Solution

平均信号速率是 $S = N/2 = 500 \text{ kbaud}$ ，平均波特率的最小带宽是 $B_{\min} = S = 500 \text{ kHz}$ 。

极性编码 —— 归零码 (Polar RZ)

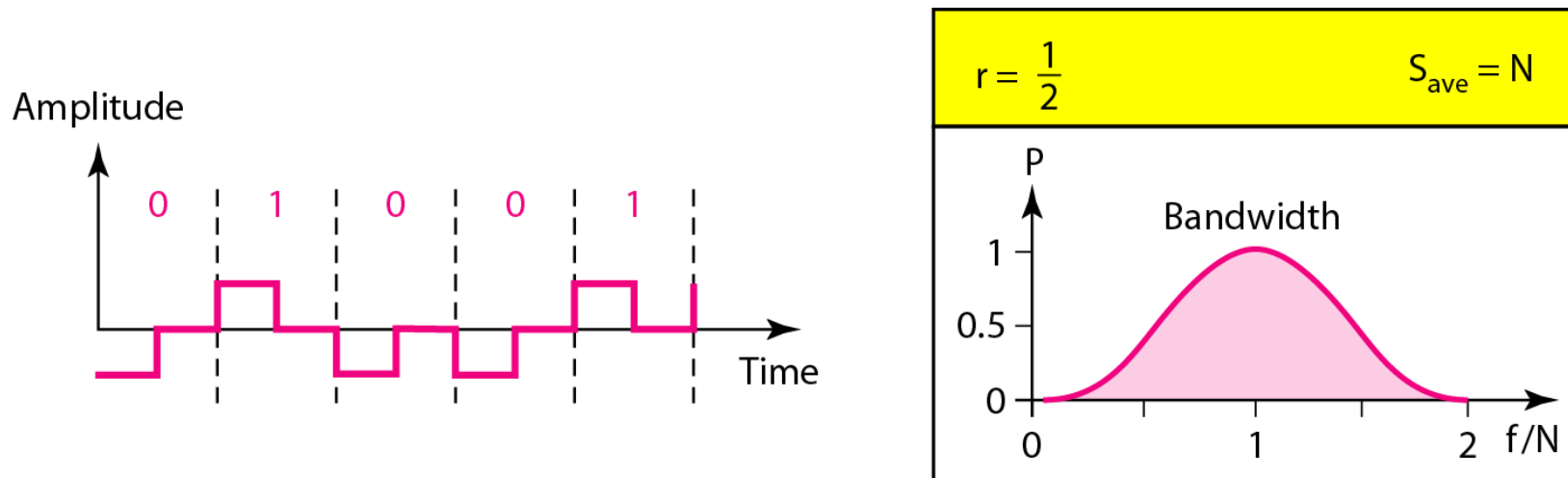


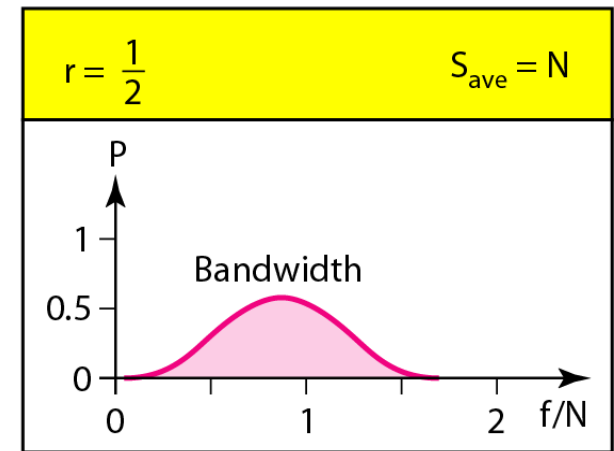
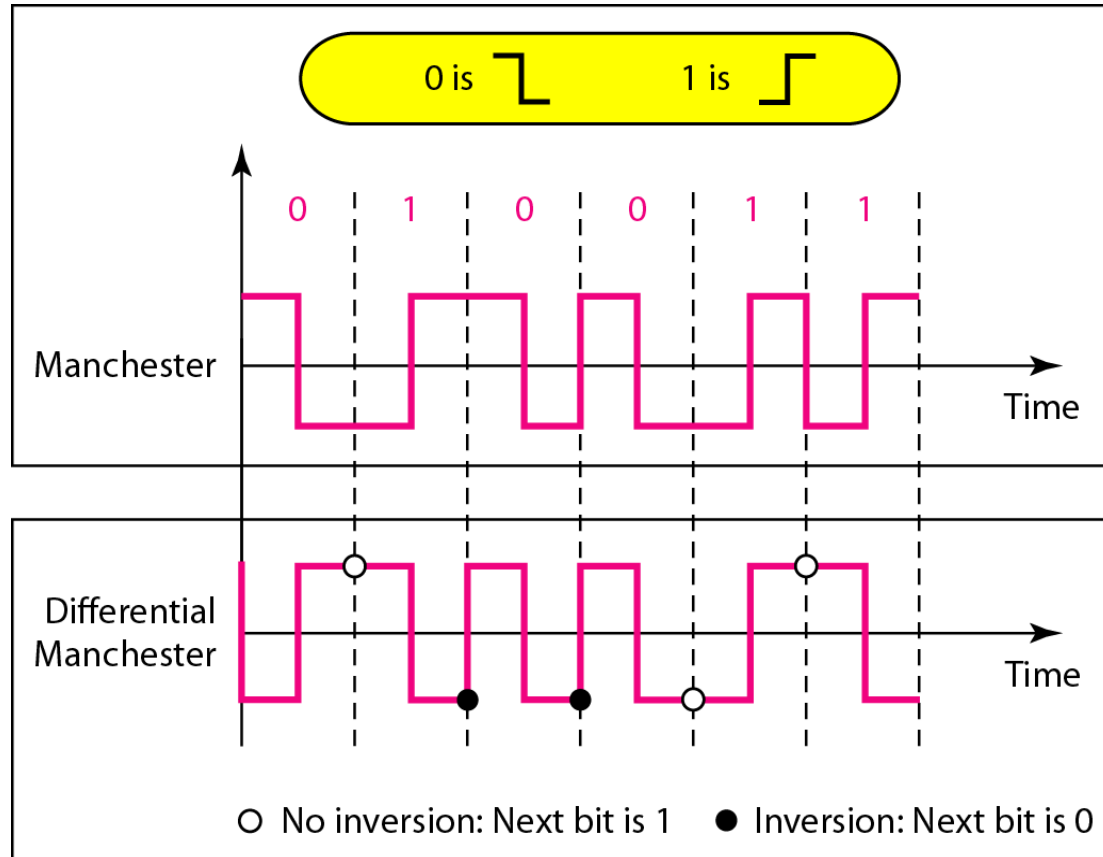
Figure 4.7 *Polar RZ scheme*

- 在每个位中间信号变为 0 ；
- 信号有三个值：正值，负值和零；
- 优点：自同步、无 DC 成分；
- 缺点：占用的带宽大，三个电平的生成和辨别更加困难。

极性编码 —— 双相码 (biphase)

- 曼彻斯特 (Manchester) 编码和差分曼彻斯特 (Differential Manchester) 编码
- 曼彻斯特编码： RZ 的位中间跳变 + NRZ-L
 - 位的持续时间被二等分，前半部分电平保持一个水平，后半部分变成另外一个水平
 - 位中间的跳变提供了同步
 - 0：由高→低， 1：由低→高
- 差分曼彻斯特编码： RZ + NRZ-I
 - 中间总有跳变，在位起始位置如果下一位为
 - 1：起始不跳变； 0：起始有跳变

Figure 4.8 *Polar biphase: Manchester and differential Manchester schemes*





Note

- ◆ 优点：没有基线偏移，没有 **DC** 成分，自同步。
- ◆ 缺点：曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码的最小带宽是 **NRZ** 的两倍。

双极性编码 (bipolar)

- 也称为多电平二进制 (multilevel binary) 编码。
- 一个数据元素的电平是 0 ， 另一个数据元素的电平在正值和负值间交替。
- 在双极性编码中，使用三种电平：正电平、负电平、

双极性编码 (bipolar)——AMI 和伪三元编码

- AMI：交替传号反码 (Alternate Mark Inversion)
 - 传号就是 1
 - 交替 1 的翻转替换
 - 0: 零电平, 1: 交替正负电平
- 伪三元编码 (Pseudoternary)
 - 是 AMI 的一个变形
 - 1 编码成 0 电平, 0 编码成正负交替电平

Figure 4.9 *Bipolar schemes: AMI and pseudoternary*

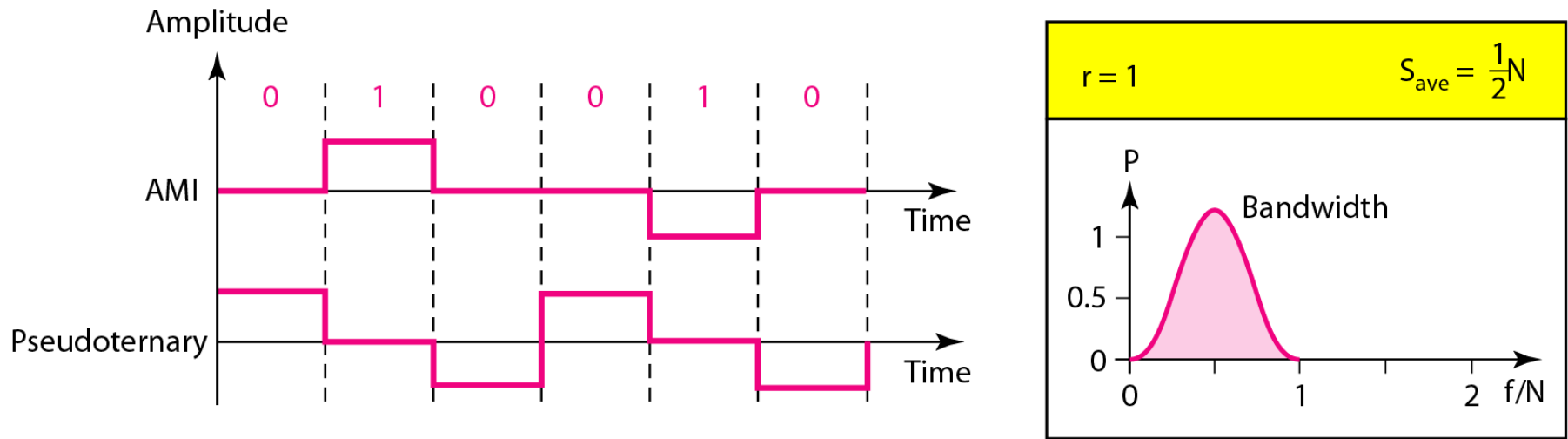


Figure 4.9 *Bipolar schemes*

- 信号速率与 NRZ 一样，但没有 DC 成分；
- 能量集中于频率 $N/2$ 处；
- AMI 存在长序列 0 时有同步问题。

多电平编码 (multilevel schemes)

- 通过把 m 个数据元素的模式编码成 n 个信号元素的模式，增加每波特的位数。
- 只有两种数据元素 (0,1), 表示 m 个数据元素组可以产生 2^m 个数据模式组合。
- 不同信号元素可以用不同的电平表示， L 个不同的电平，可以产生 L^n 个信号模式组合。
- 若 $2^m = L^n$ ，每个数据模式编成一个信号模式
- 若 $2^m < L^n$ ，每个数据模式只能占据一个信号模式的子集
- 若 $2^m > L^n$ ，无法数据编码



$mBnL$

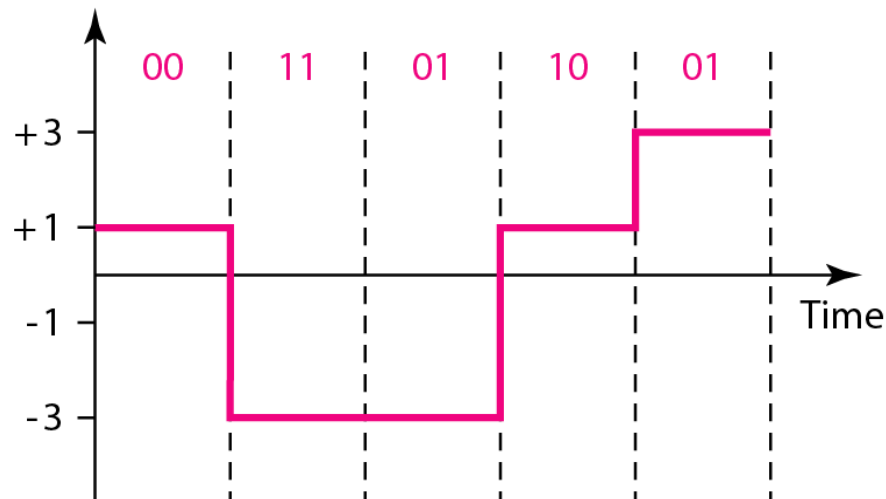
- m 表示二进制模式的长度
- B 表示二进制数据
- n 是信号模式的长度
- L 是信号的电平数，若 $L=2$ ，用 B 替换；若 $L=3$ ，则用 T 替换；若 $L=4$ ，则用 Q 替换。

在 $mBnL$ 方案中， m 个数据元素模式编码成
 n 信号元素模式， $2^m \leq L^n$ 。

Figure 4.10 *Multilevel: 2B1Q scheme*

	Previous level: positive	Previous level: negative
Next bits	Next level	Next level
00	+1	-1
01	+3	-3
10	-1	+1
11	-3	+3

Transition table



Assuming positive original level

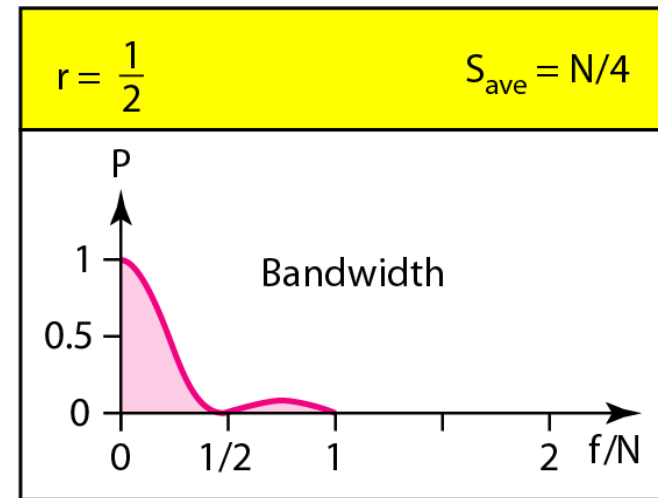
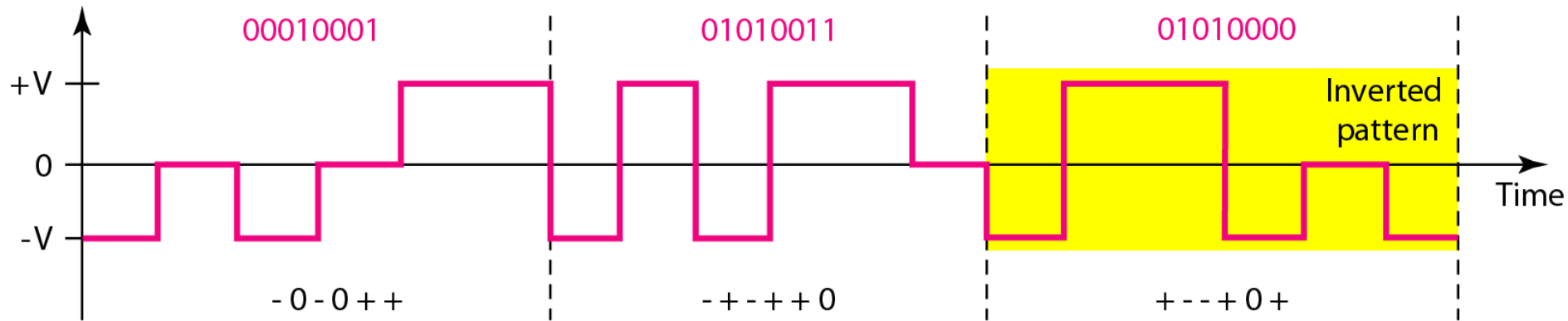


Figure 4.11 *Multilevel: 8B6T scheme*



平均信号速度理论值:

$$S_{ave} = \frac{1}{2} \times N \times \frac{6}{8}$$

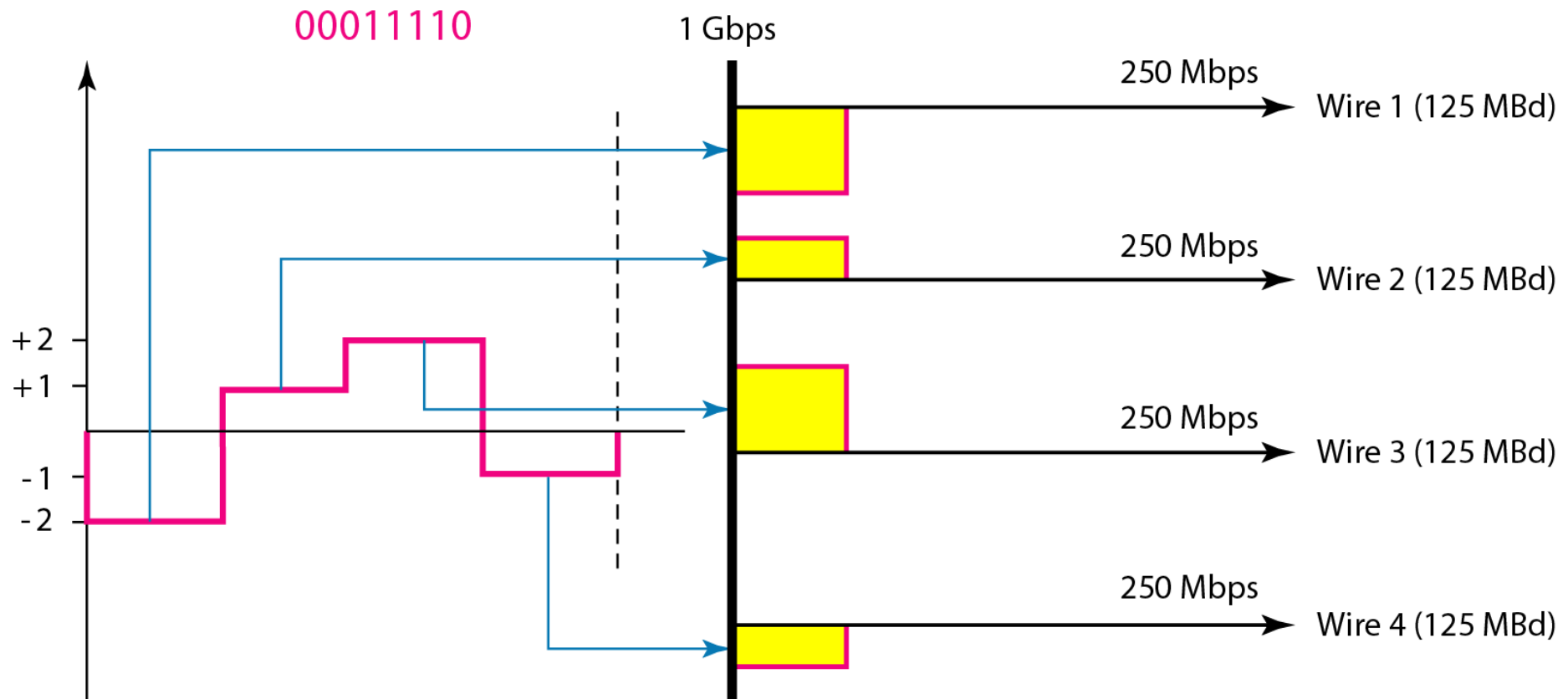
最小带宽接近:

$$6N / 8$$

4D-PAM5(了解)

- 4 维 5 级脉冲振幅调制 (four dimensional five-level pulse amplitude)
- 4D: 数据同时通过 4 条线路发送
- 5 个电平: -2 , -1, 0, 1, 2
- 0 只用于发送差错检测
- 若编码是一维的, 4 个电平产生类似于 8B4Q
- 信号速率可以降低到 $N/8$
- G 比特 LAN 使用此技术来通过 4 条铜线 (能处理 125MBd) 发送 1Gbps 的数据。

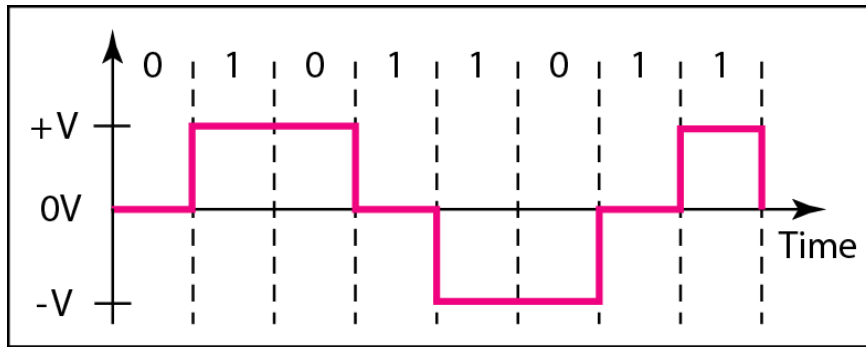
Figure 4.12 *Multilevel: 4D-PAM5 scheme*



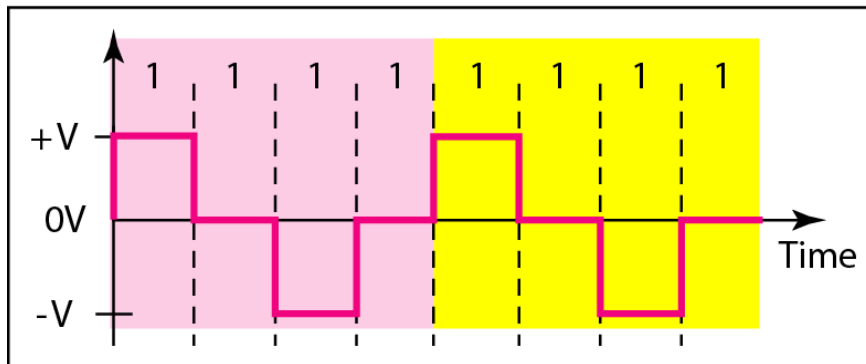
多线路传输 MLT-3

- 三电平多线路传输 (multiline transmission, three level)
- 是一种多于两个跳变规则的差分编码
- 三种电平是： $+V, 0, -V$
- 规则：
 - 如果下一位是 0，没有跳变
 - 如果下一位是 1 且当前电平是 0，下一个电平是最后一个非零电平的相反值
 - 如果下一位是 1 且当前电平不是 0，下一个电平是 0

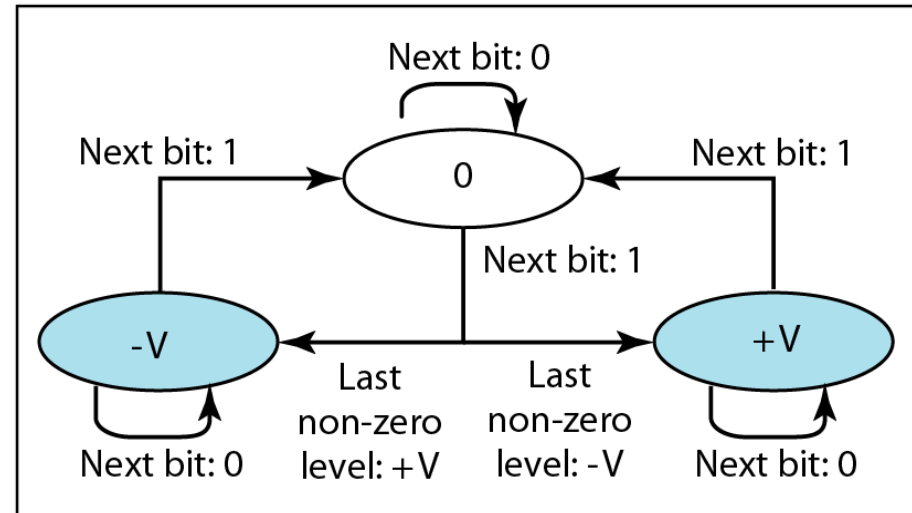
Figure 4.13 *Multitransition: MLT-3 scheme*



a. Typical case



b. Worse case



c. Transition states

线路编码方案小结

<i>Category</i>	<i>Scheme</i>	<i>Bandwidth (average)</i>	<i>Characteristics</i>
Unipolar	NRZ	$B = N/2$	Costly, no self-synchronization if long 0s or 1s, DC
Polar	NRZ-L	$B = N/2$	No self-synchronization if long 0s or 1s, DC
	NRZ-I	$B = N/2$	No self-synchronization for long 0s, DC
	Biphase	$B = N$	Self-synchronization, no DC, high bandwidth
Bipolar	AMI	$B = N/2$	No self-synchronization for long 0s, no DC
Multilevel	2B1Q	$B = N/4$	No self-synchronization for long same double bits
	8B6T	$B = 3N/4$	Self-synchronization, no DC
	4D-PAM5	$B = N/8$	Self-synchronization, no DC
Multiline	MLT-3	$B = N/3$	No self-synchronization for long 0s

Table 4.1 *Summary of line coding schemes*

4.1.3 块编码 (block coding)

- ◆ 块编码通常称为 mB/nB 编码技术，把 m -bit 位组变成 n -bit ($n > m$) 。
- ◆ 利用冗余确保同步和差错检测。

Figure 4.14 *Block coding concept*

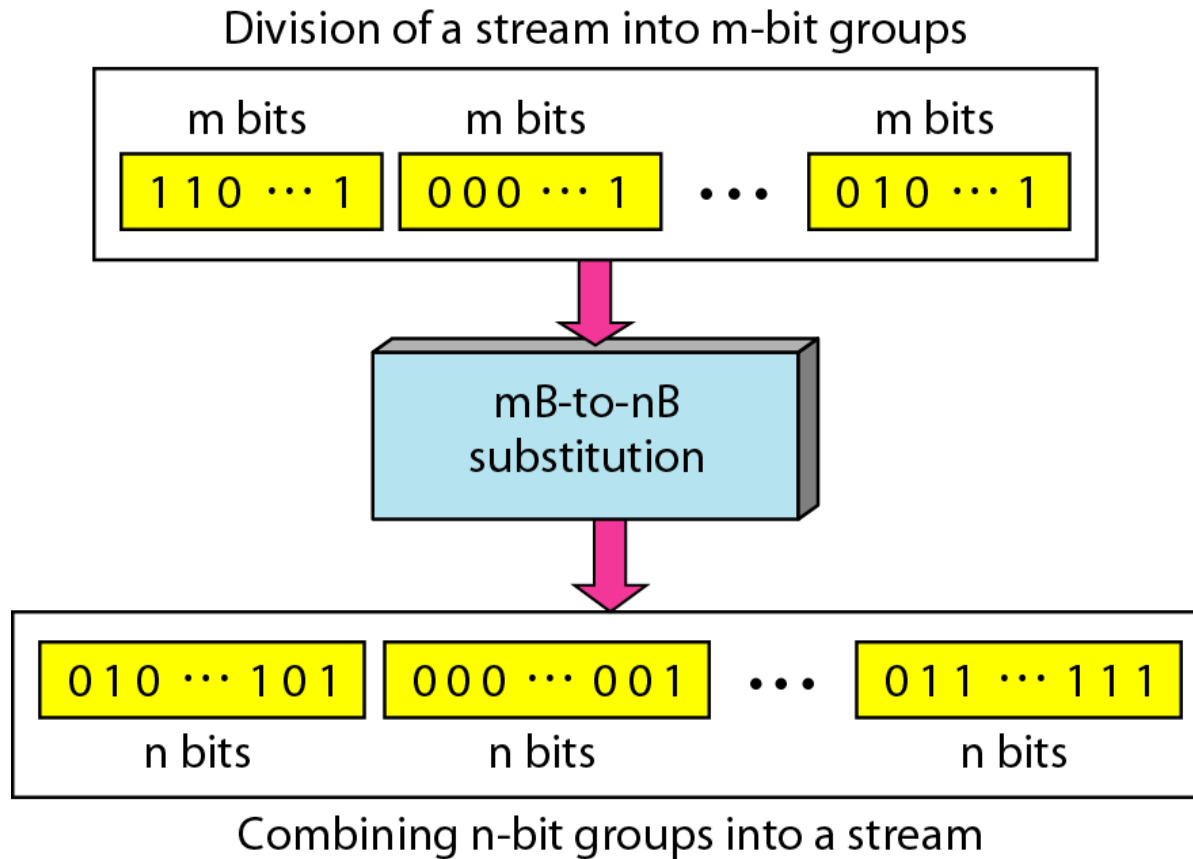


Figure 4.15 *Using block coding 4B/5B with NRZ-I line coding scheme*

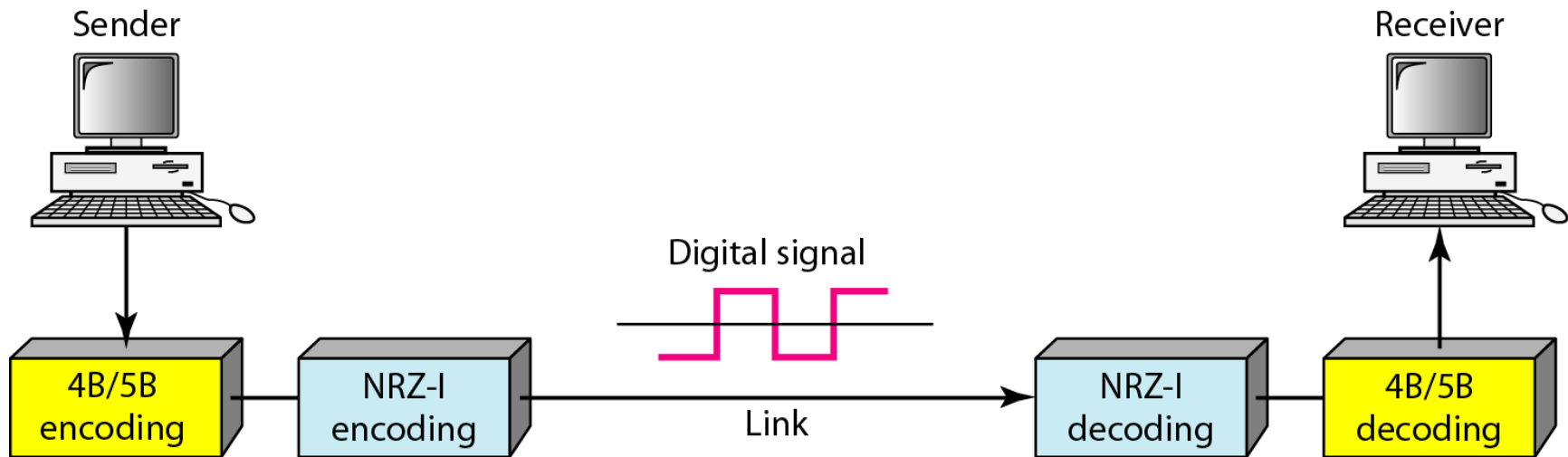
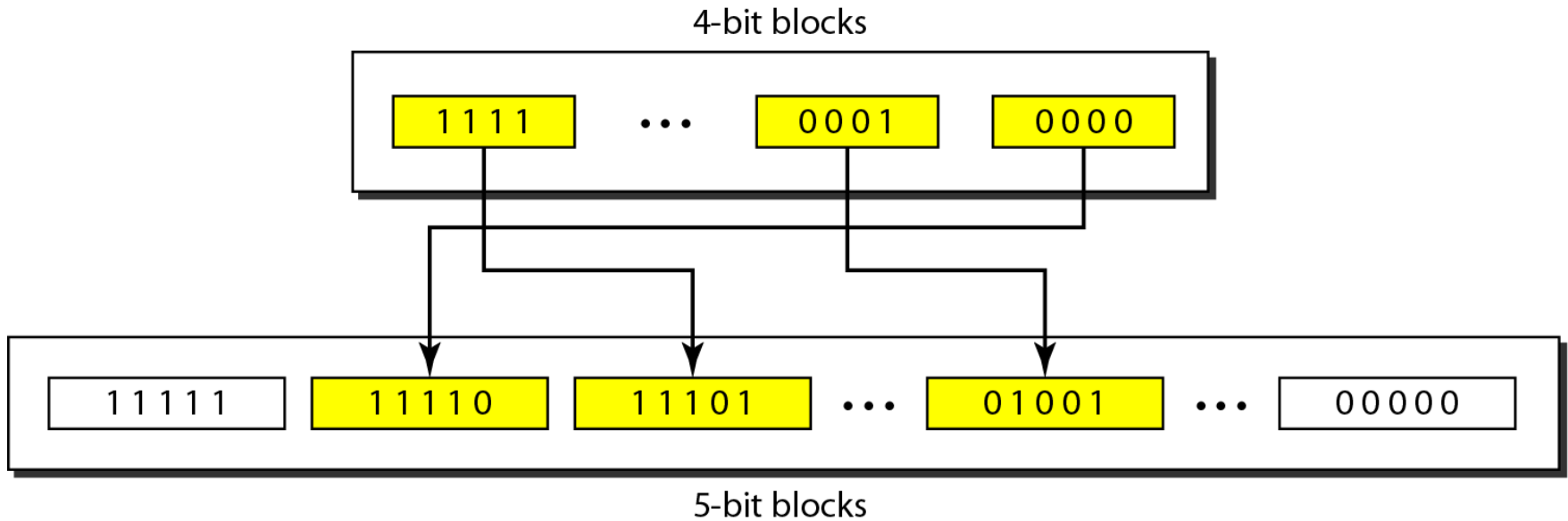


Table 4.2 *4B/5B mapping codes*

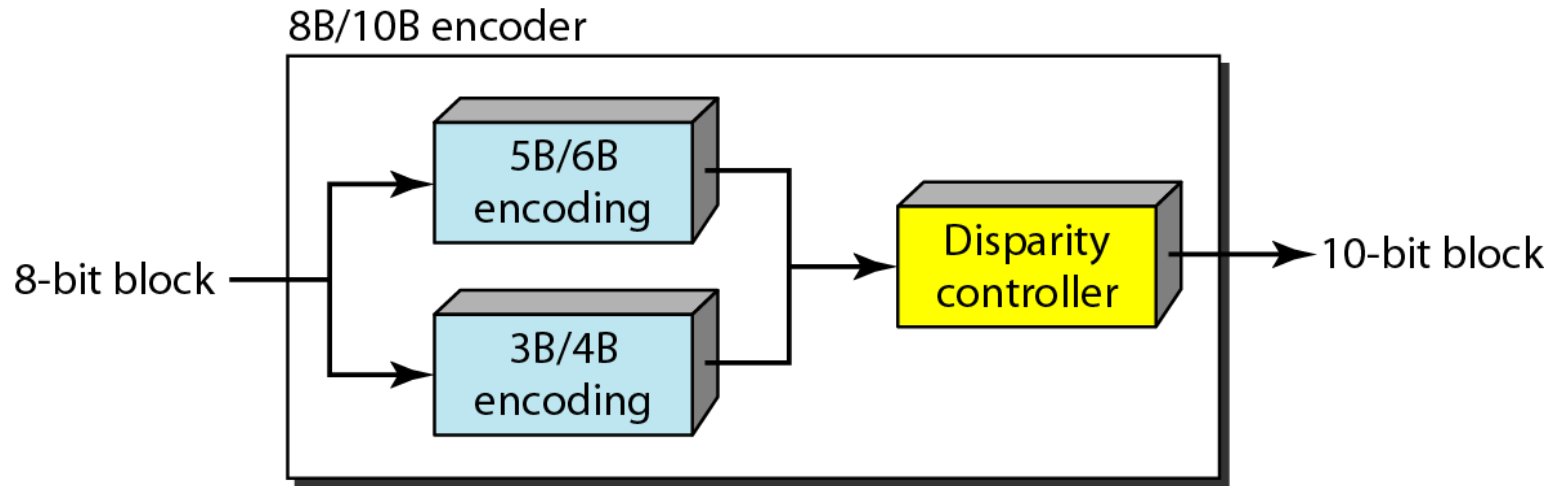
<i>Data Sequence</i>	<i>Encoded Sequence</i>	<i>Control Sequence</i>	<i>Encoded Sequence</i>
0000	11110	Q (Quiet)	00000
0001	01001	I (Idle)	11111
0010	10100	H (Halt)	00100
0011	10101	J (Start delimiter)	11000
0100	01010	K (Start delimiter)	10001
0101	01011	T (End delimiter)	01101
0110	01110	S (Set)	11001
0111	01111	R (Reset)	00111
1000	10010		
<div><ul style="list-style-type: none">● 4B/5B 编码方案，将 4 位输入置换为 5 位输出仅包含不超过一个前导 0（左边的位）和两个后缀 0（右边的位）；● 不同组合形成新的序列时，最多只会有连续 3 个 0。</div>			
1101	11011		
1110	11100		
1111	11101		

Figure 4.16 *Substitution in 4B/5B block coding*



- 4B/5B 编码解决了同步问题，克服了 NRZ-I 的缺陷；
- 增加了 NRZ-I 的信号速率，冗余位增加 20% 的波特；
- 没有解决 NRZ-I 的 DC 分量问题。

Figure 4.17 *8B/10B block encoding*



- 8B/10B 编码类似于 4B/5B 编码，8 位数据组被置换成 10 位编码；
- 提供了更高的差错控制能力；
- 实际上 5B/6B 编码和 3B/4B 编码的组合；
- 为了防止连续 0 或者 1 的长串，使用不均等性控制器；
- 编码有： $2^{10}-2^8=768$ 个冗余组。

4.1.4 扰码 (Scrambling)

- 双相码适用于 LAN 中间站的专用链路，不适用于长距离通信；
- 块编码和 NRZ 编码的组合有 DC 分量，也不适合于长距离通信；
- 双极性 AMI 带宽窄且没有 DC 分量，但连续 0 的长序列会失去同步；
- 修改部分 AMI 规则引入扰码 B8ZS 和 HDB3 。

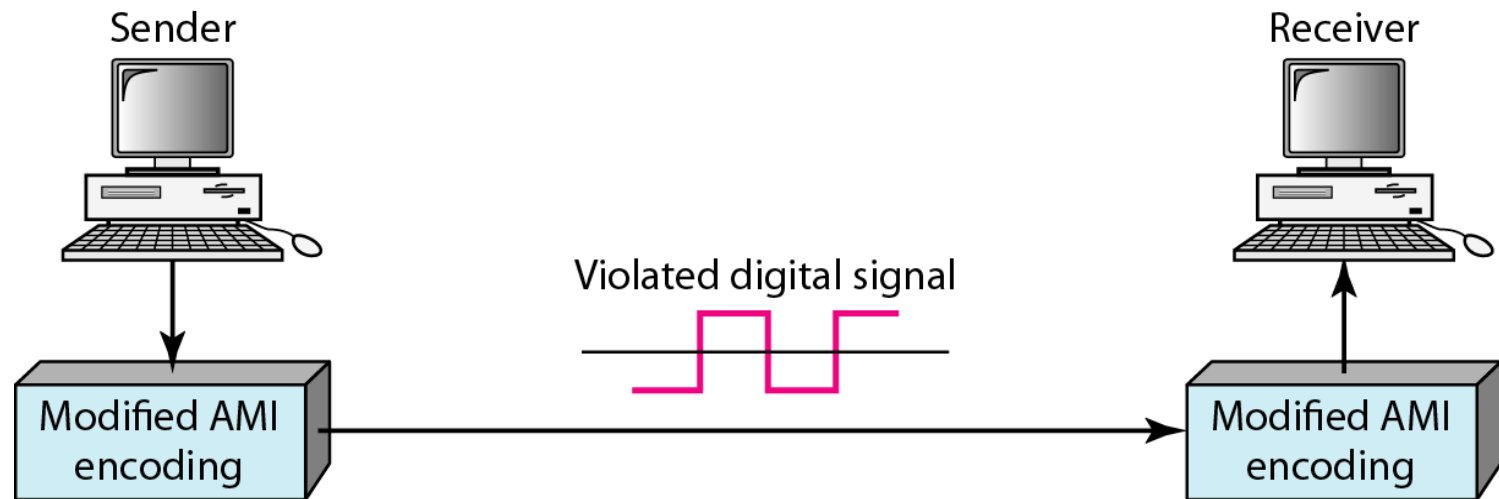
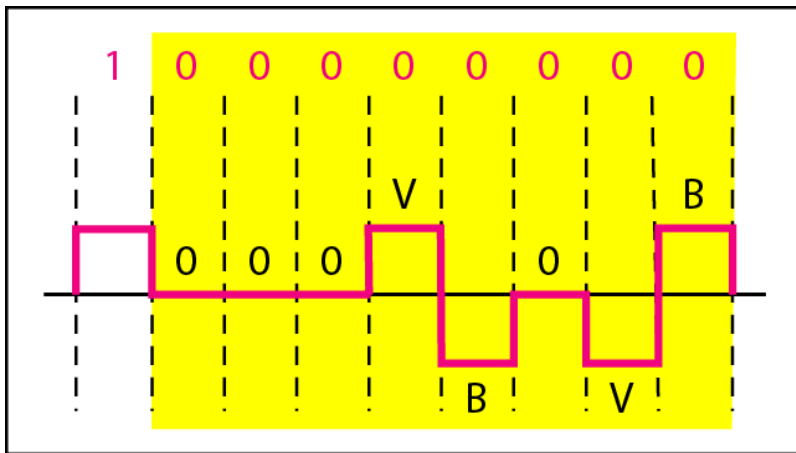


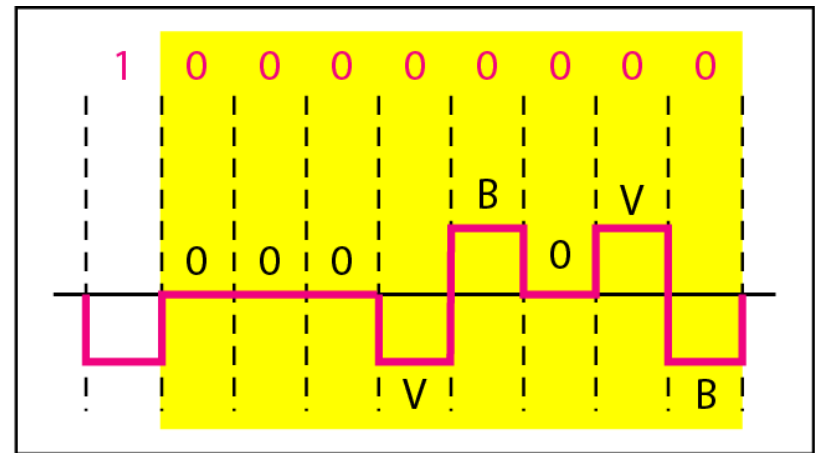
Figure 4.18 *AMI used with scrambling*

8 零置换的双极性码 B8ZS(bipolar with 8-zero substitution)

- 8 个连续 0 电平会被替换成 000VB0VB；
- V 表示违反 (Violation)，是个非零电平，与前一个非零脉冲极性相同的极性，违反了 AMI 编码规则；
- B 表示双极，表示与 AMI 相一致的非零电平，即与一个非零脉冲极性相反的极性。



a. Previous level is positive.



b. Previous level is negative.

Figure 4.19 *Two cases of B8ZS scrambling technique*

HDB3(high density bipolar 3-zero)

- 4 个连续 0 电平被置换成 000V 或 B00V ；
- 两个不同的置换是由于为了维持每次置换后非零脉冲为偶数；
- 如果最后一次置换后的非零脉冲数是奇数，置换为 000V ，使得非零脉冲总数为偶数；
- 如果最后一次置换后的非零脉冲数是偶数，置换为 B00V ，使得非零脉冲总数为偶数。

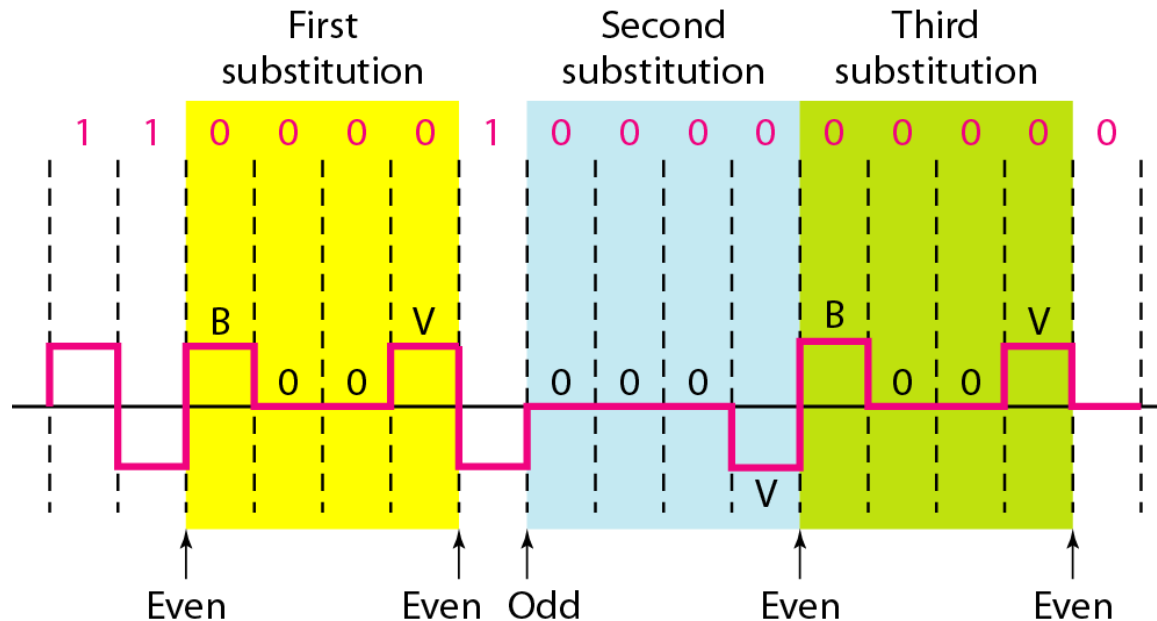


Figure 4.20 *Different situations in HDB3 scrambling technique*

4-2 模拟到数字转换

ANALOG-TO-DIGITAL CONVERSION

在第三章，我们已经看到数字信号优于模拟信号，今天的趋势是把模拟信号转换成数字信号，有两种方案——**脉冲码调制 (pulse code modulation)** 和 **Delta 调制 (delta modulation)**。

Topics discussed in this section:

Pulse Code Modulation (PCM)

Delta Modulation (DM)

4.2.1 脉码调制 PCM

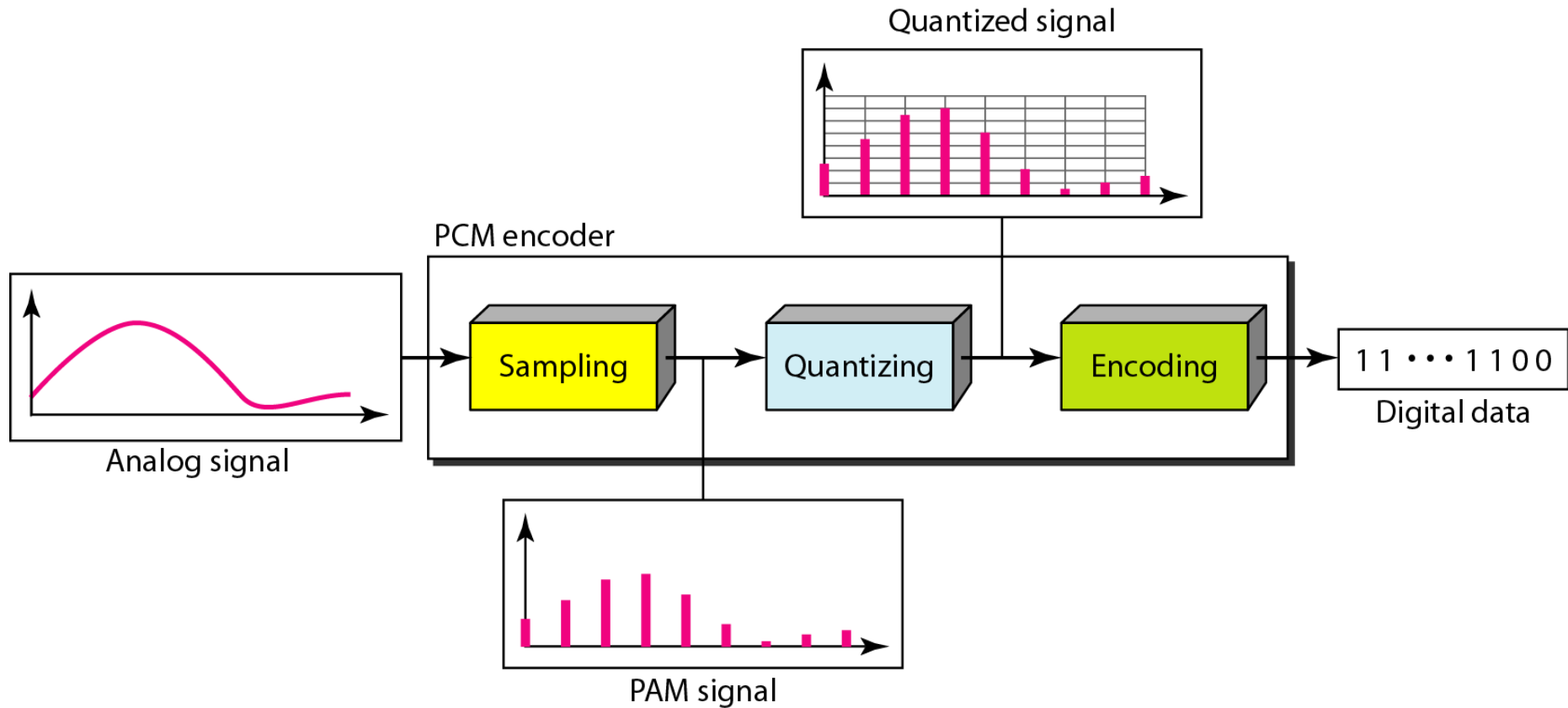
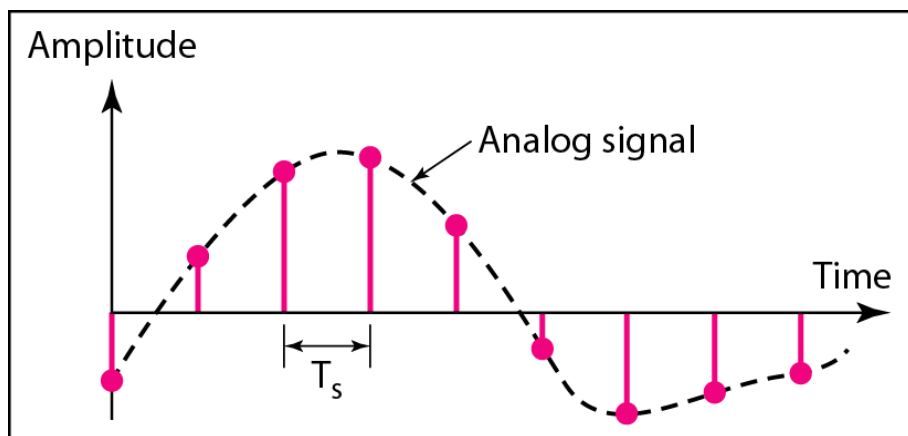
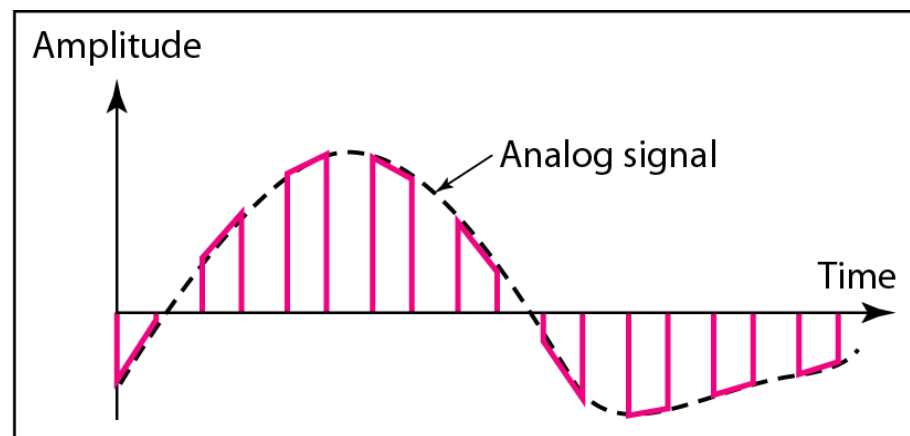


Figure 4.21 *Components of PCM encoder*

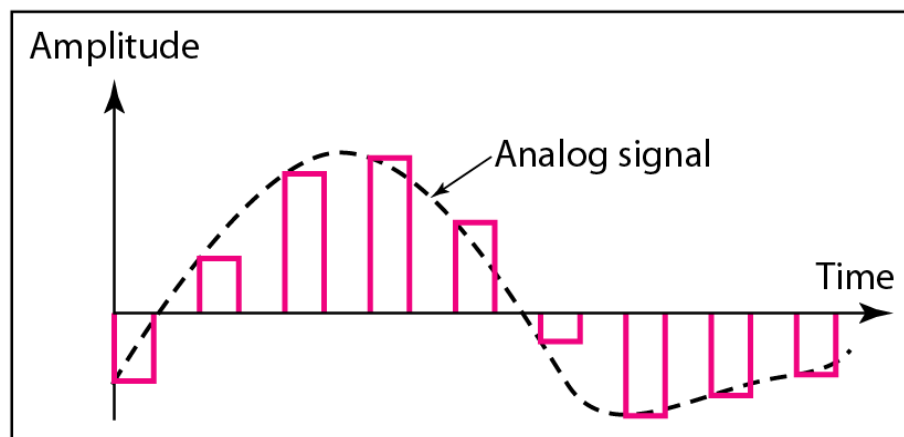
Figure 4.22 *Three different sampling methods for PCM*



a. Ideal sampling



b. Natural sampling

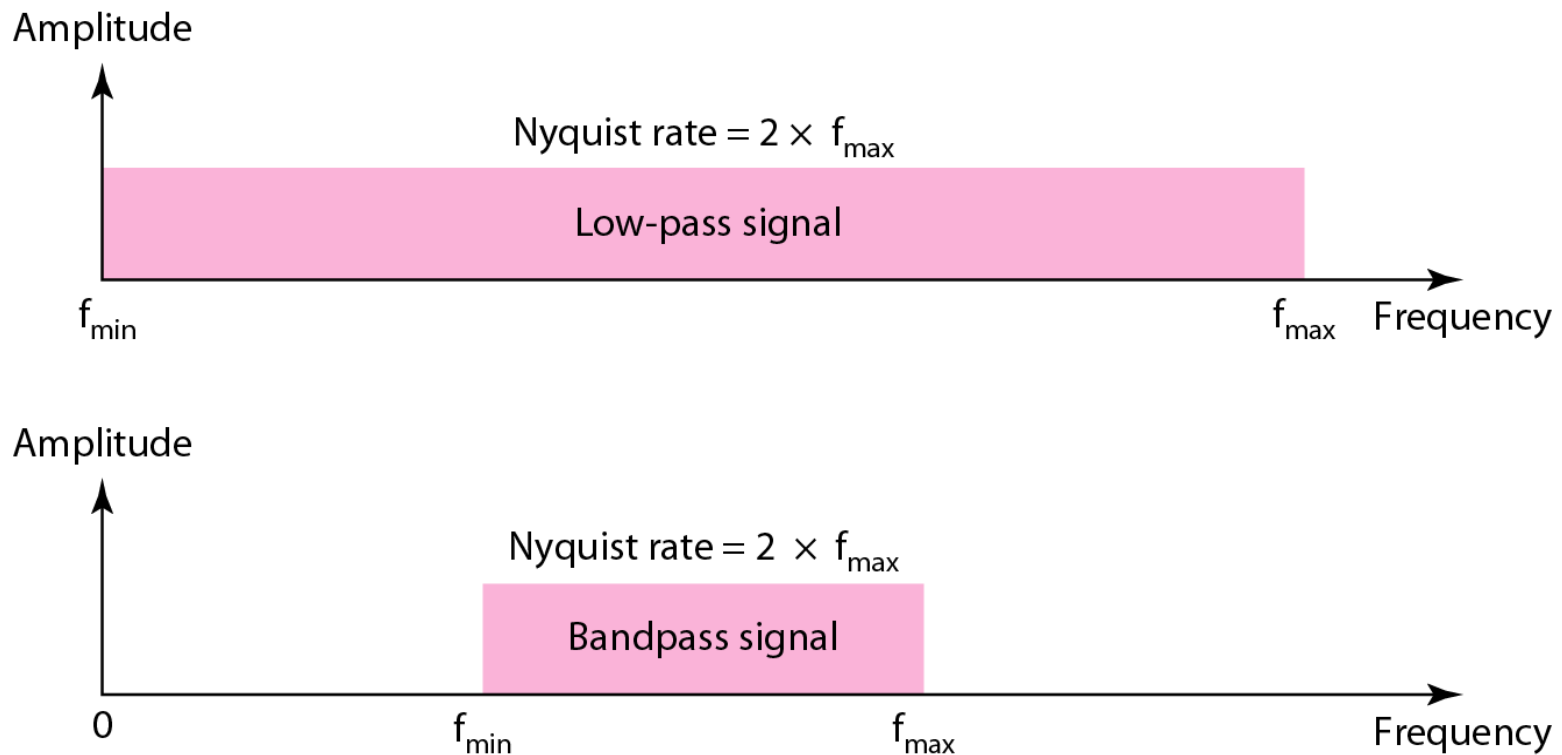


c. Flat-top sampling

采样 (Sample)

- ◆ 采样率：也称采样速度或者采样频率，定义了单位时间内从连续信号中提取并组成离散信号的采样个数，单位是赫兹（Hz）。采样频率的倒数是采样周期或者叫作采样时间。
- ◆ 根据 Nyquist 定理，采样率必须至少是信号所含最高频率的 2 倍。

Figure 4.23 *Nyquist sampling rate for low-pass and bandpass signals*



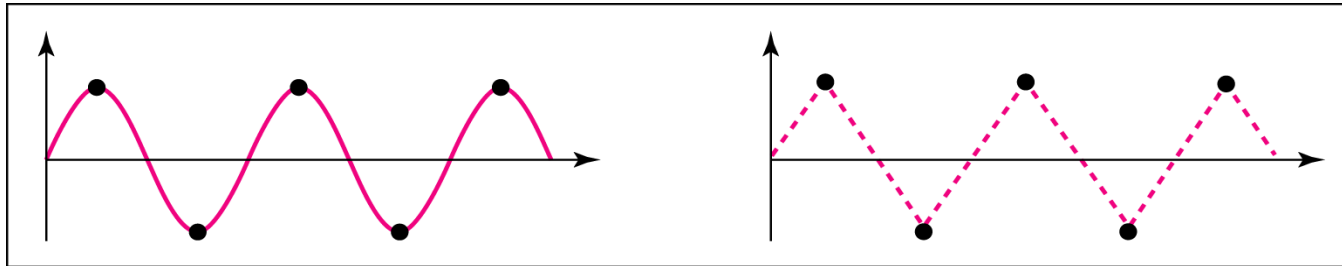
Example

4.6

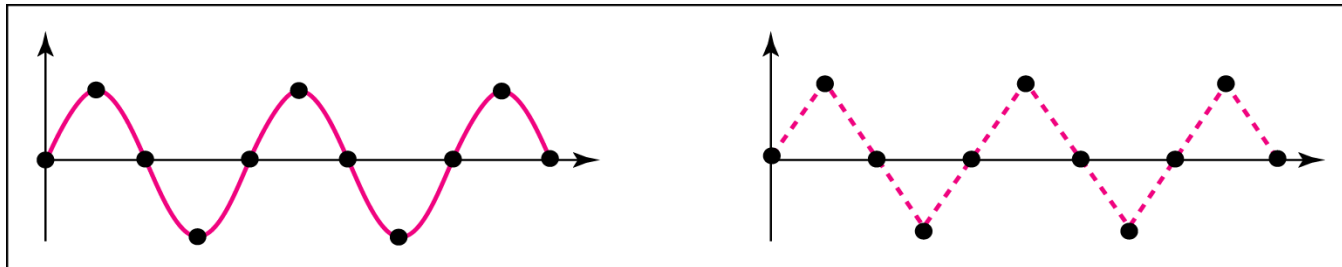
Nyquist 定理的一个实例，以三种采样率对简单正弦波进行采样： $f_s = 4f$ （2 倍奈奎斯特速率）， $f_s = 2f$ （奈奎斯特速率）和 $f_s = f$ （一半奈奎斯特速率）。

以奈奎斯特速率进行采样可以得到与原始正弦波较好近似的信号（图 4.24a），图 4.24b 部分过采样得到相同的近似，但它是冗余的，没必要。低于奈奎斯特速率的采样（图 4.24c）不能产生与原始正弦波相似的信号。

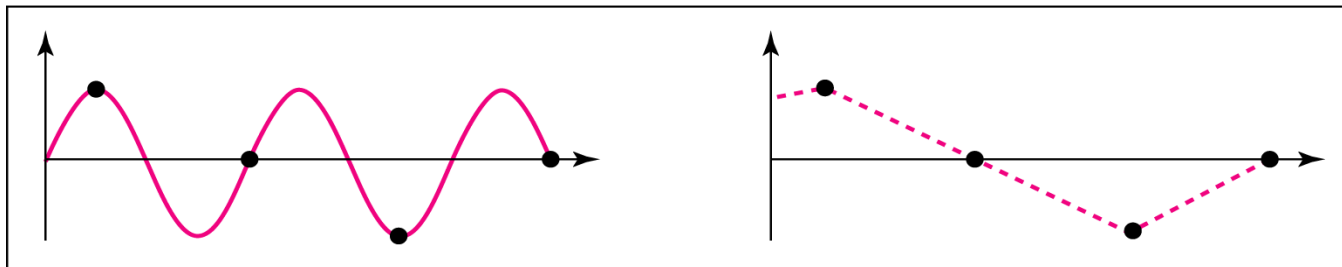
Figure 4.24 *Recovery of a sampled sine wave for different sampling rates*



a. Nyquist rate sampling: $f_s = 2f$



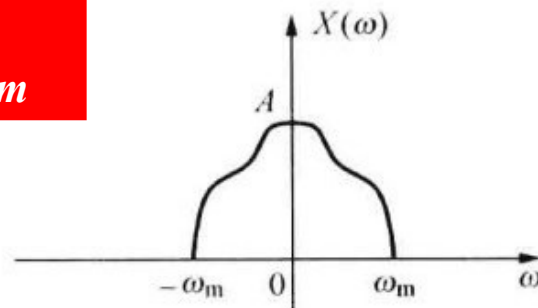
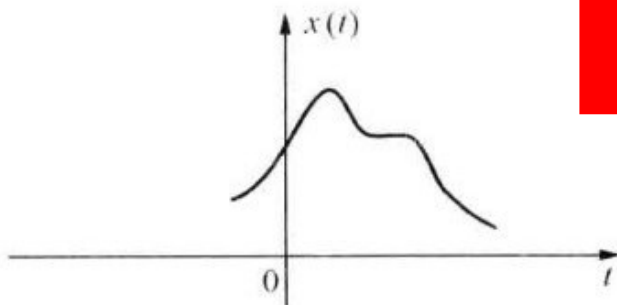
b. Oversampling: $f_s = 4f$



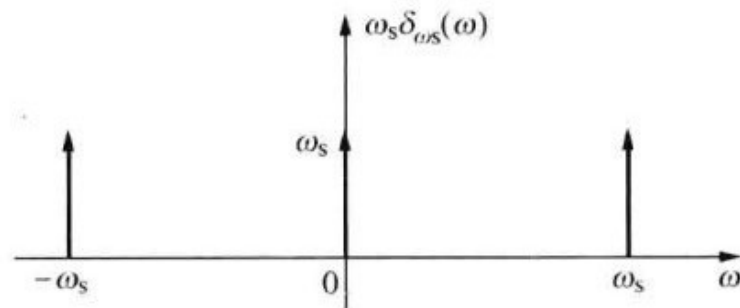
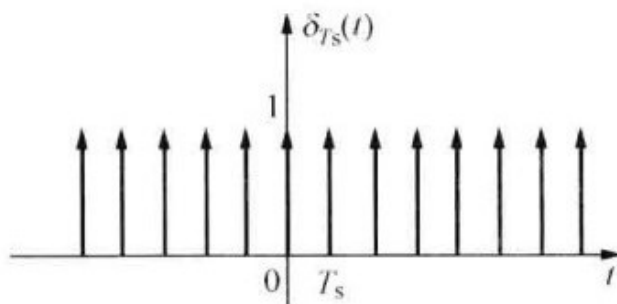
c. Undersampling: $f_s = f$

采样定理 $\omega_s = 2\pi f_s = 2\pi/T_s$

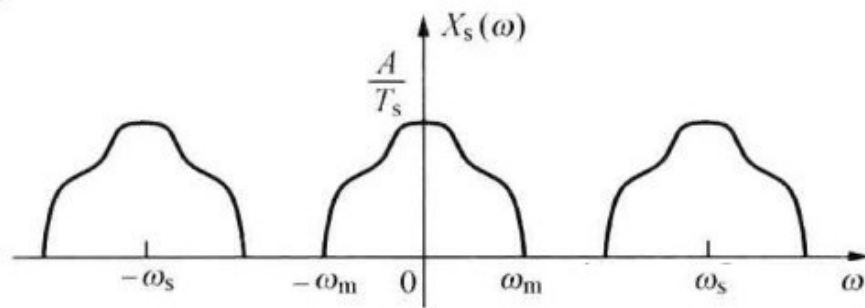
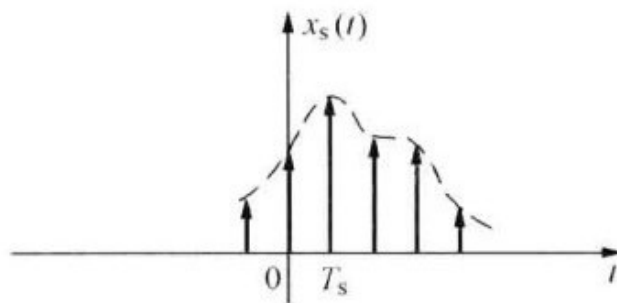
$$\omega_s \geq 2\omega_m$$



(a)



(b)



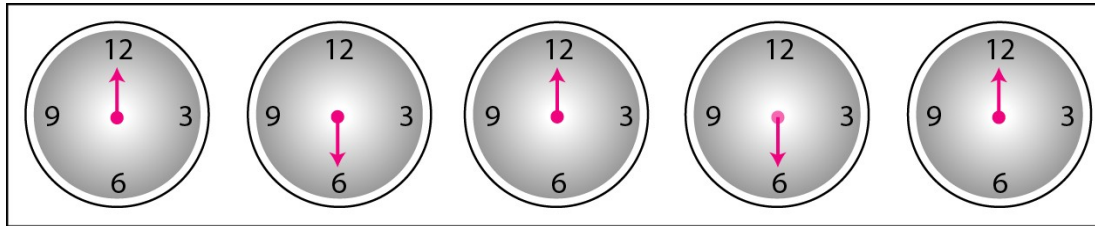
(c)



Example 4.7

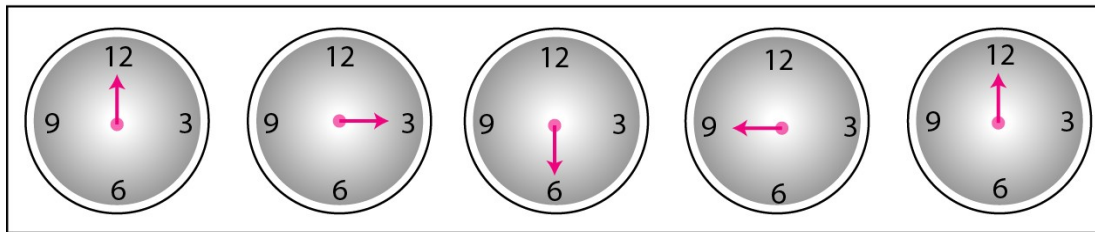
有趣的例子：如果对诸如时钟指针旋转的周期性事件进行采样会看到什么？时钟的分针周期为 60 秒，根据奈奎斯特定理，需要每隔 30 秒 ($T_s = 1/2 T$ or $f_s = 2f$) 对分针进行采样（拍照并发送）。在图 4.25a 中，样本点依次为 12, 6, 12, 6, 12 和 6。样本的接收方无法知道时钟是向前走还是向后走。在图 4.25b 部分，以两倍奈奎斯特（每隔 15 s）进行采样，样本点依次是 12, 3, 6, 9 和 12。在图 4.25c 中，以低于奈奎斯特速率的采样率 ($T_s = 3/4 T$ or $f_s = 4/3 f$) 进行采样，样本点依次是 12, 9, 6, 3 和 12。虽然时钟在向前走，但接收方认为时钟在往后走。

Figure 4.25 *Sampling of a clock with only one hand*



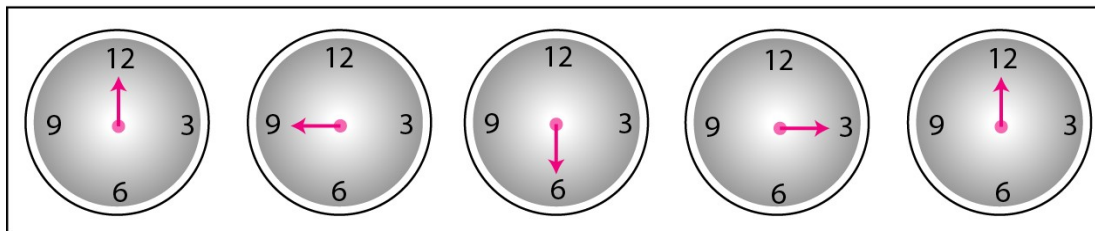
Samples can mean that the clock is moving either forward or backward.
(12-6-12-6-12)

a. Sampling at Nyquist rate: $T_s = T \frac{1}{2}$



Samples show clock is moving forward.
(12-3-6-9-12)

b. Oversampling (above Nyquist rate): $T_s = T \frac{1}{4}$



Samples show clock is moving backward.
(12-9-6-3-12)

c. Undersampling (below Nyquist rate): $T_s = T \frac{3}{4}$

Example 4.8

与例子 4.7 相似的一个例子是电影中向前移动的汽车看起来车轮向后转。这可以用欠采样解释。电影以每秒 24 帧的速度拍摄，如果车轮以高于每秒 12 次的速度旋转，欠采样就会产生向后旋转的印象。

Example 4.9

电话公司假定语音的最高频率为 4000 Hz，对语音进行采样，采样率是每秒 8000 个样本。

量化 (Quantization)

采样后的结果是一系列振幅值介于信号最大振幅和最小振幅间的脉冲。

- 假设原始模拟信号振幅介于 V_{\min} 和 V_{\max} 之间；
- 分成 L 个区间，每个区间高度为 $\Delta = (V_{\max} - V_{\min})/L$ ， L 即为量化等级，与信号振幅范围及恢复信号的准确程度有关；
- 分配 0 到 $L-1$ 的量化值给每个区间的中点；
- 样本振幅值近似为量化值。

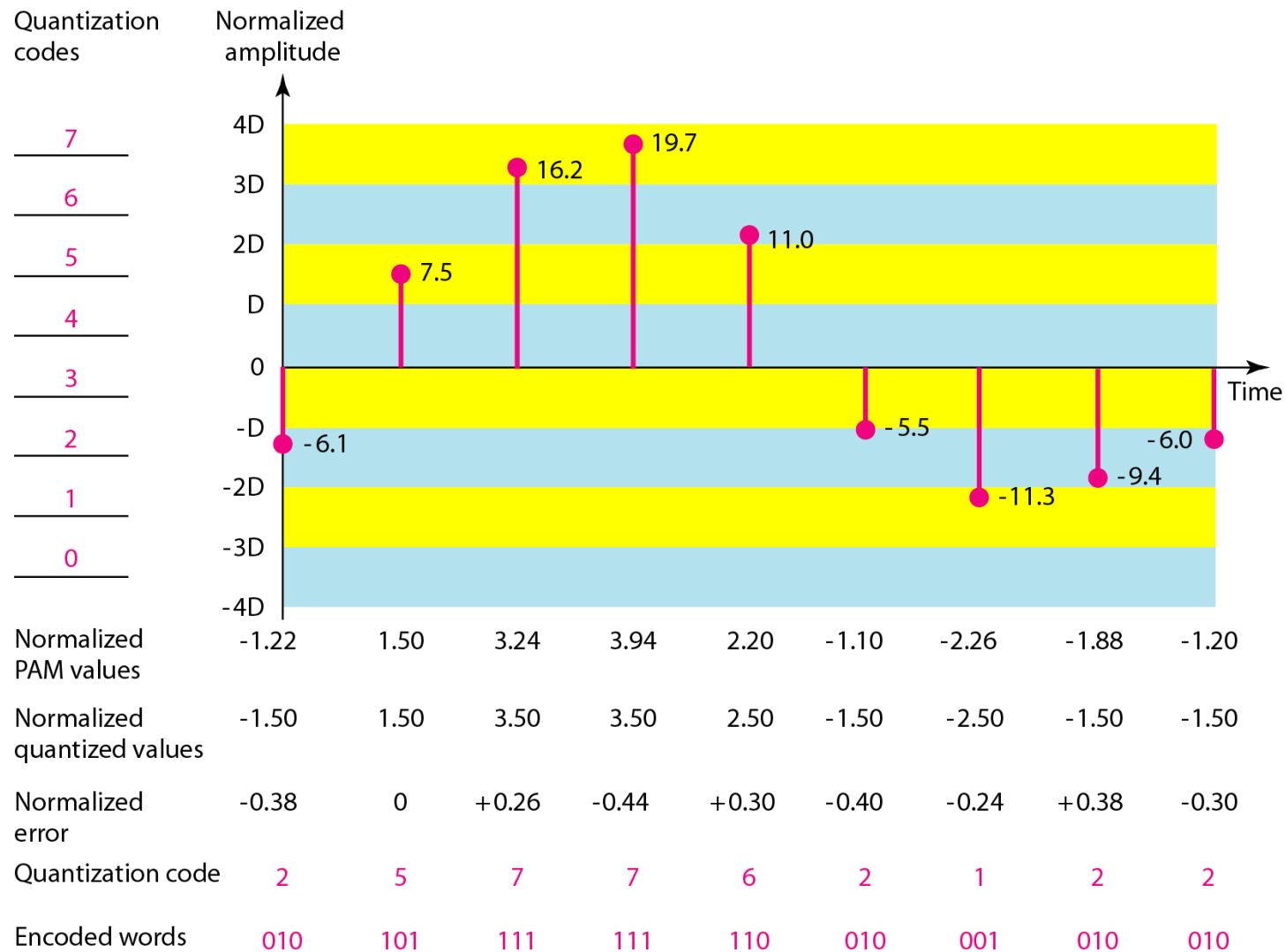


Figure 4.26 *Quantization and encoding of a sampled signal*

■ 量化误差 (Quantization errors)

- 量化是一个近似过程
- 输出值与实际输入值之间差值
- 可以证明量化误差对信号 SNR_{dB} 的影响取决于量化级别 L 或每个样本位数 n_b

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 6.02n_b + 1.76\text{dB}$$

■ 量化方式

- 均匀量化: Δ 的高度是固定的。
- 非均匀量化: Δ 的高度不固定, 低振幅时 Δ 较大, 接近高振幅时 Δ 较小。

Example 4.12

图 4.26 例子中的 SNR_{dB} 是多少？

Solution

可以使用公式来解决这个量化值。有 8 个级别，每个样本有 3 位，所以

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 6.02 \times 3 + 1.76 = 19.82 \text{ dB}$$

结论：增加级别数就会增加 SNR。

编码 (Code)

编码：采样后的数据用多少位比特表示。如果每个样本可以转换成 n_b 个位的码字，量化等级是 L ，则

$$n_b = \log_2 L$$

$$\text{比特率} = \text{采样速率} \times \text{每个样本位数} = f_s \times n_b$$

Example 4.14

要数字化人的语音，假定每个样本有 8 个位，那么比特率是多少？

Solution

人的语音通常包含 0 到 4000 Hz 的频率，因此采样率和比特率可以计算如下：

$$\begin{aligned}\text{Sampling rate} &= 4000 \times 2 = 8000 \text{ samples/s} \\ \text{Bit rate} &= 8000 \times 8 = 64,000 \text{ bps} = 64 \text{ kbps}\end{aligned}$$

PCM 带宽

$$B_{\min} = c \times N \times \frac{1}{r}, \text{ 置换 } N$$

$$B_{\min} = c \times f_s \times n_b \times \frac{1}{r} = c \times n_b \times 2 \times B_{\text{analog}} \times \frac{1}{r}$$

$$\text{当 } \frac{1}{r} = 1 \text{ (对于NRZ或双极信号)}, \quad c = \frac{1}{2} \text{ (平均情况)}$$

$$B_{\min} = n_b \times B_{\text{analog}}$$

结论：数字信号的最小带宽是模拟信号带宽的 n_b 倍。这是数字化的代价！

原始信号恢复 (Original signal recovery)

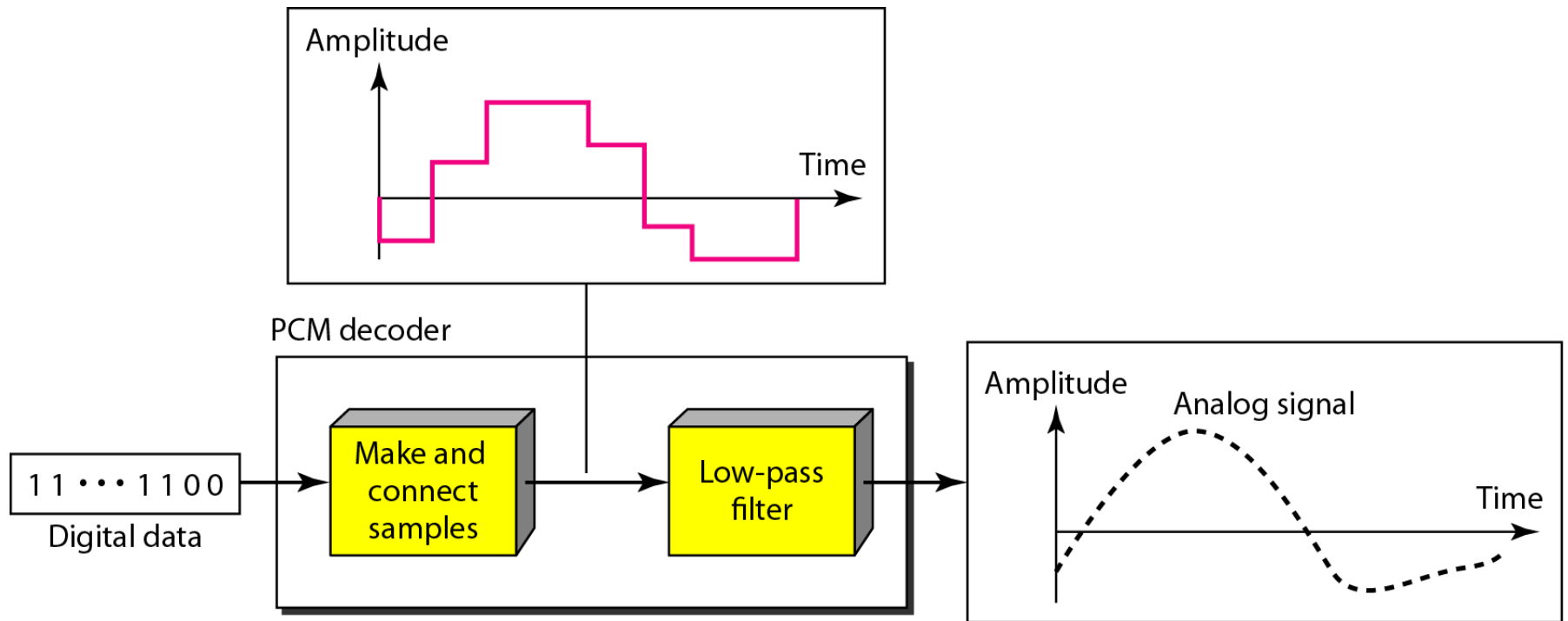


Figure 4.27 *Components of a PCM decoder*

Example 4.15

有一个 4kHz 的低通信号，如果发送这个模拟信号，需要最小带宽是 4kHz 的通道。如果数字化这个信号并且每个样本发送 8 个位，需要最小带宽是 $8 \times 4 \text{ kHz} = 32 \text{ kHz}$ 的通道。

通道的最大数据率 (Maximum data rate)

- 通道的数据速率是 $N_{\max} = 2 \times B \times \log_2 L$
- 设发送的数字信号有 L 个电平，每个电平是一个信号元素，这表示 $r = \log_2 L$
- 比特率，即最大带宽是

$$N = f_s \times n_b = 2 \times B \times \log_2 L$$

- 如果数据速率和信号电平数一定，所需最小带宽为

$$B_{\min} = \frac{N}{2 \times \log_2 L} \text{ Hz}$$

Delta 调制 (DM)

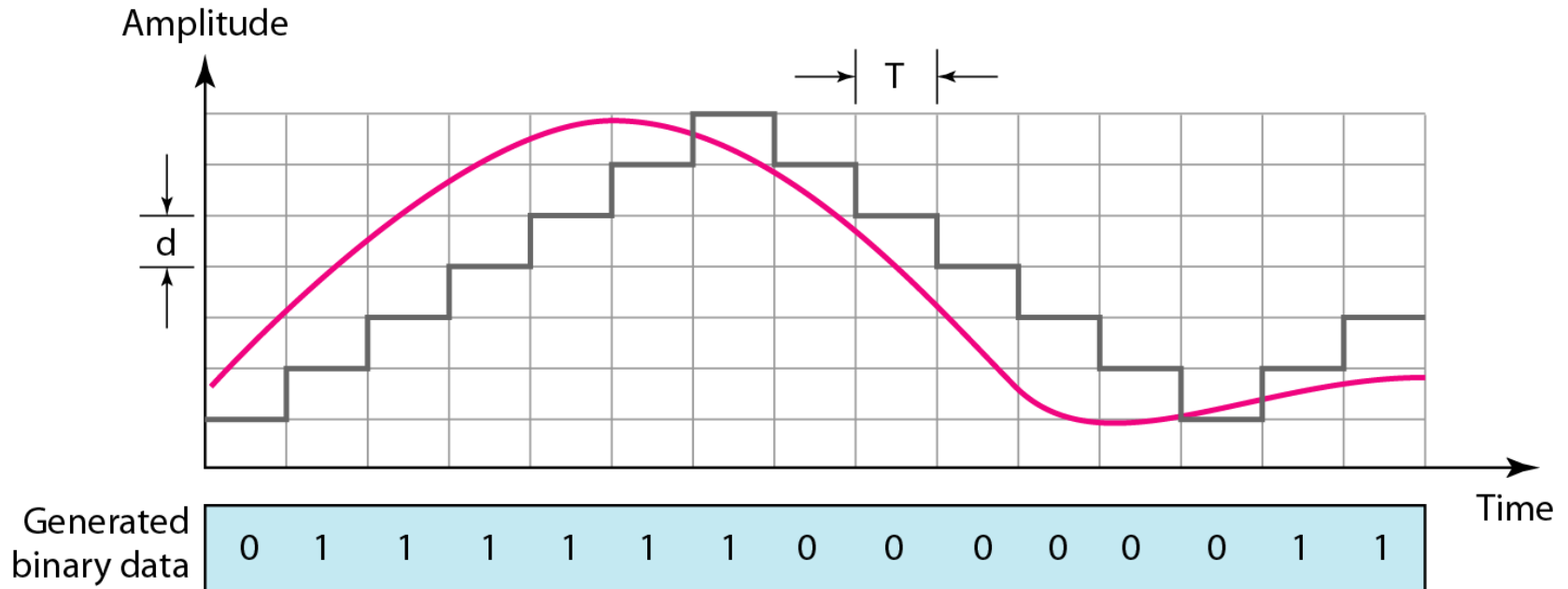


Figure 4.28 *The process of delta modulation*

Figure 4.29 *Delta modulation components*

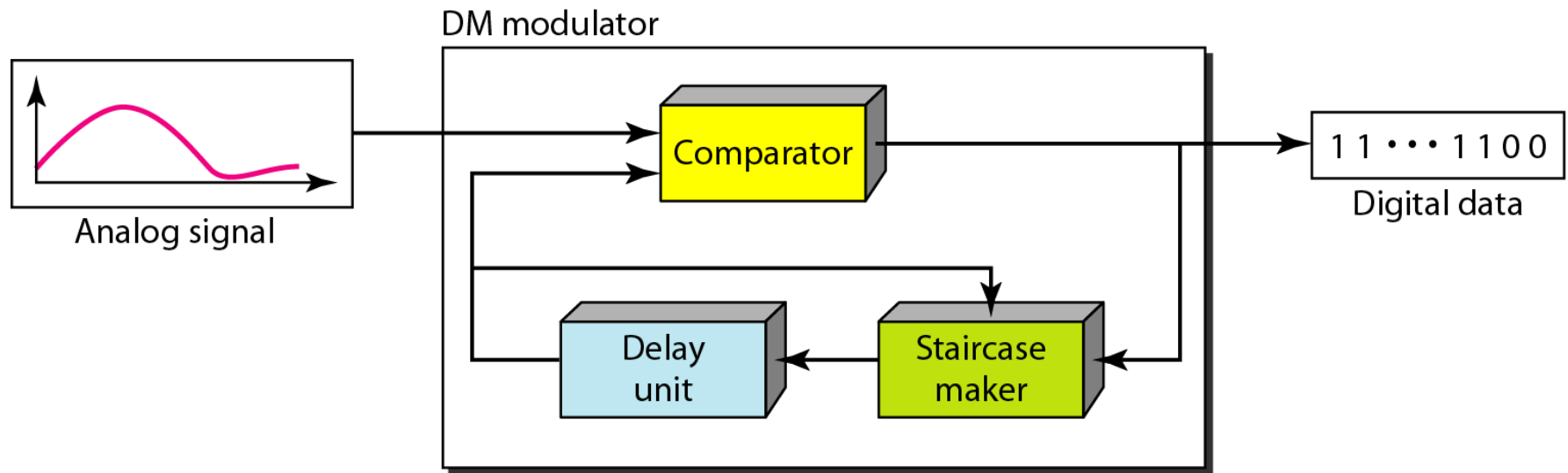
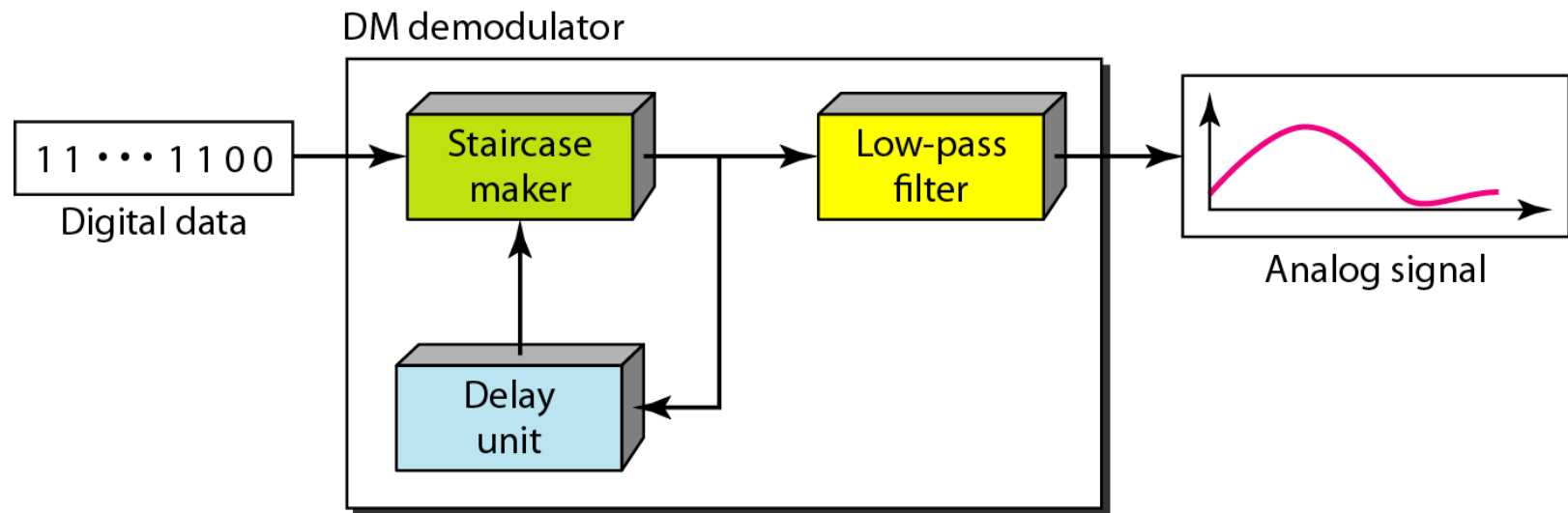


Figure 4.30 *Delta demodulation components*



4-3 传输模式 (TRANSMISSION MODES)

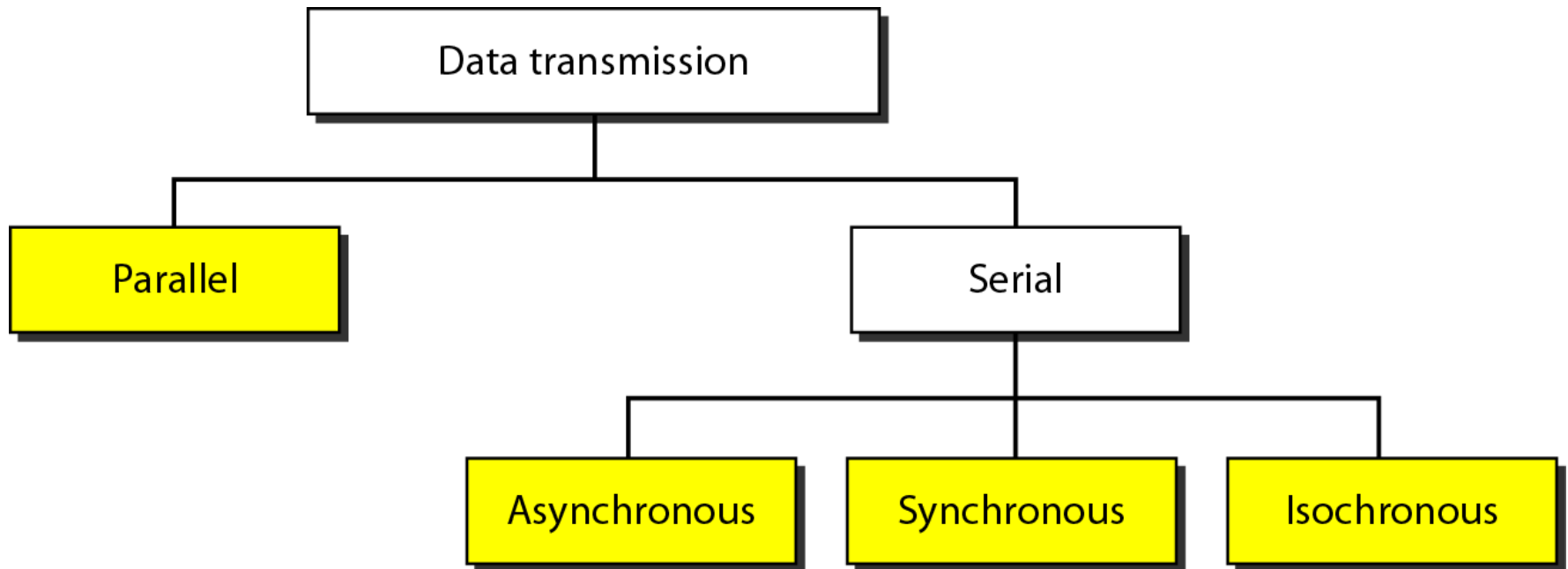
通过链路传输二进制数据可以采用并行模式或者串行模式。在并行模式中，每个时钟脉冲发送多位。在串行模式中，每个时钟脉冲发送 1 位。并行传输只有一种方式，串行传输则分为三类：**异步** (asynchronous)、**同步** (synchronous) 和 **等时** (isynchronous)。

Topics discussed in this section:

并行传输 (Parallel Transmission)

串行传输 (Serial Transmission)

Figure 4.31 *Data transmission and modes*



并行传输 (parallel transmission)

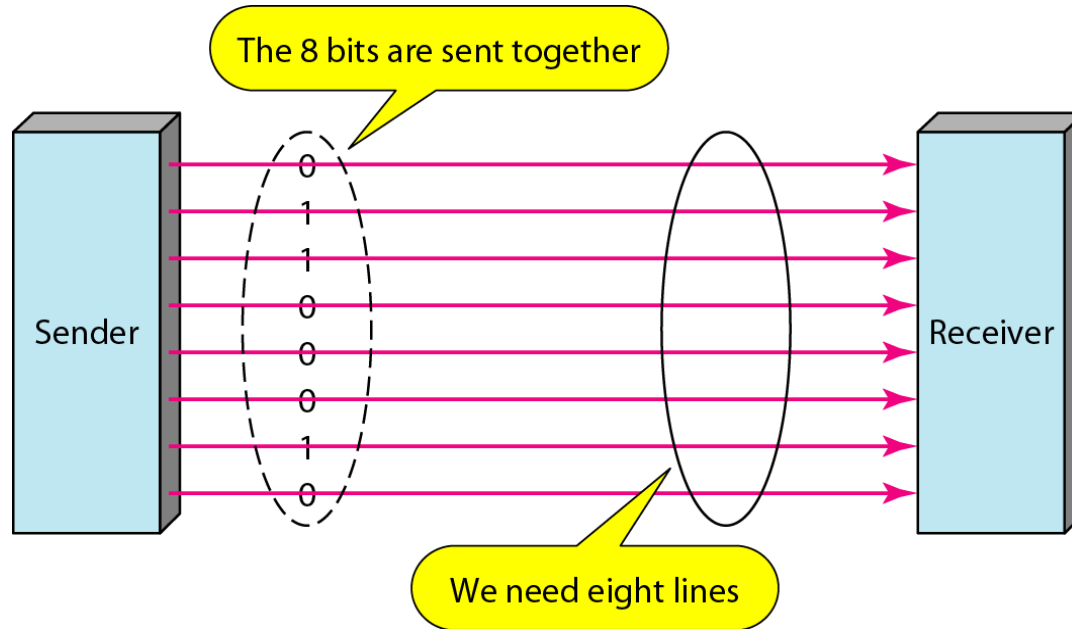
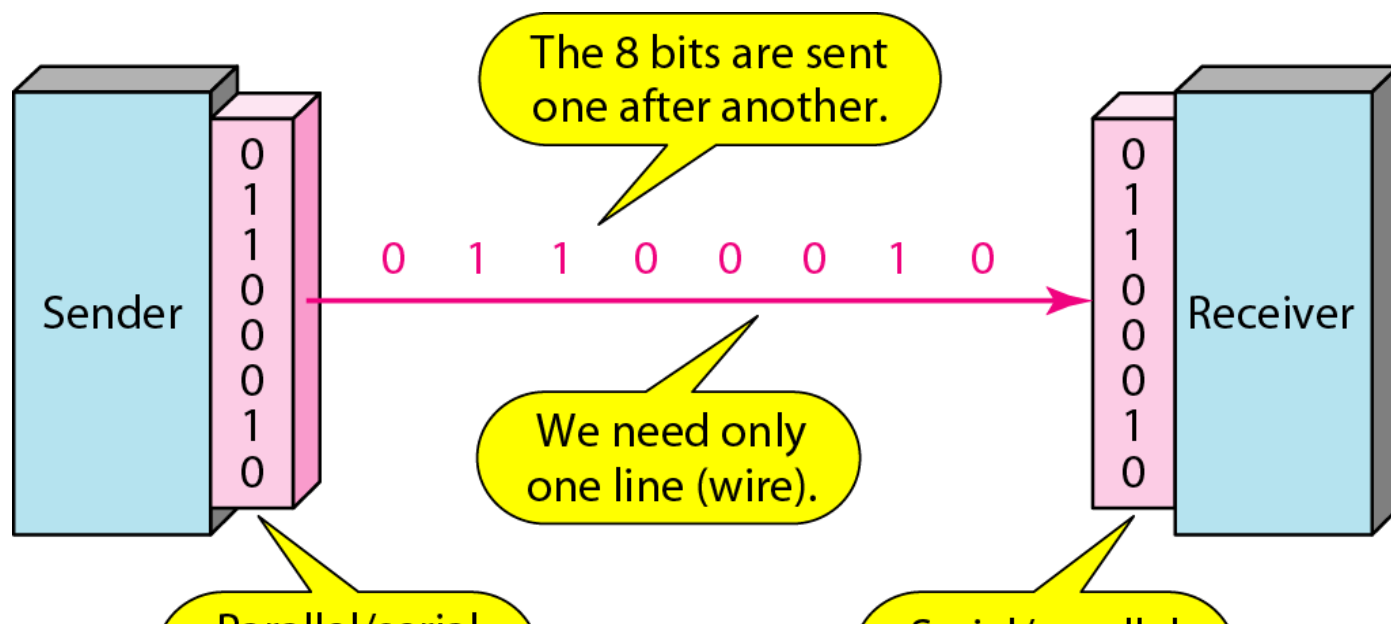


Figure 4.32 *Parallel transmission*

- 每次使用 n 条线路传送 n 位
- 并行传输的优点是速度快
- 缺点是成本高，需要 n 条线路

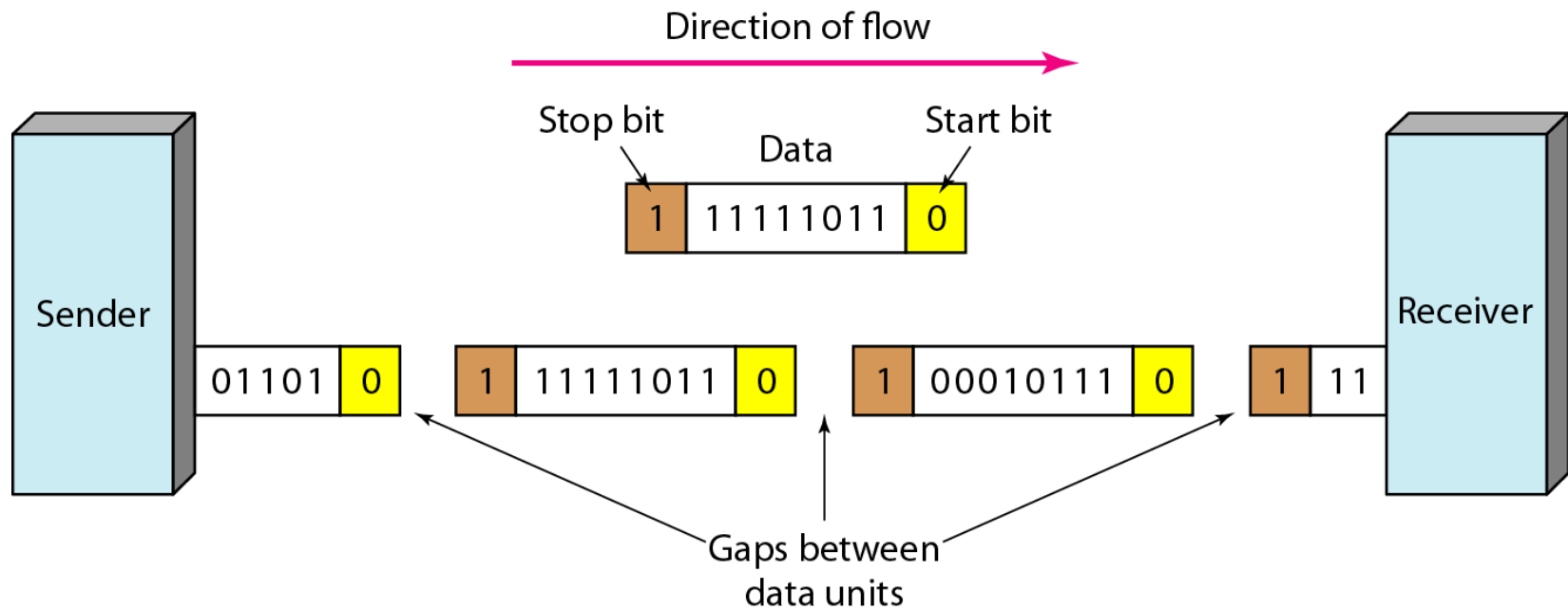
Figure 4.33 *Serial transmission*



- 位是一个一个依次传输的
- 两个通信设备之间只需要一条通道
- 串行传输的优点是只要一条通信信道，成本只有并行的 $1/n$

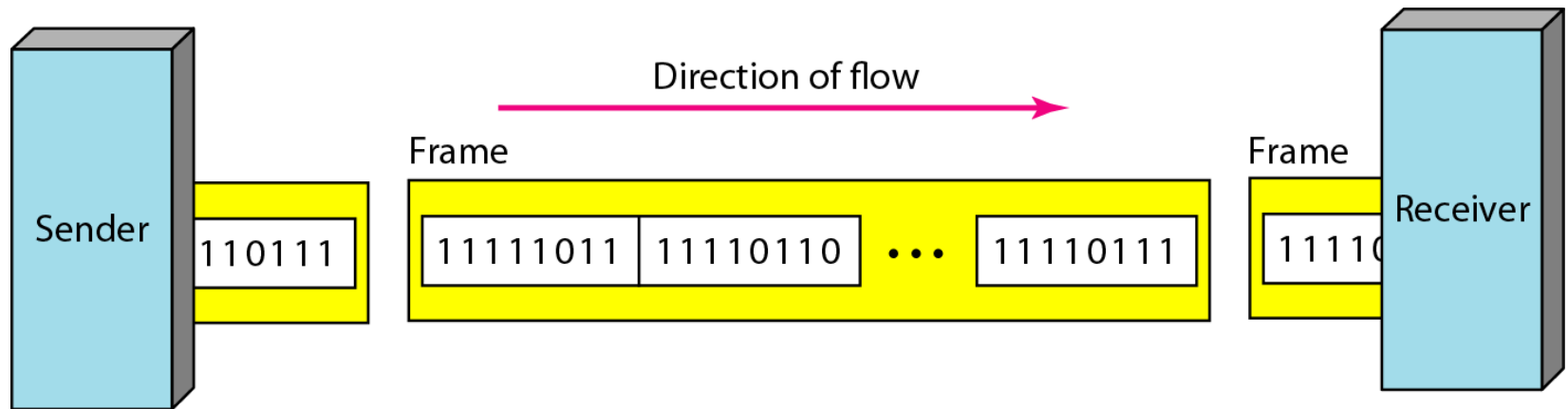
- 在传输中信号的时序并不重要，信息的接收和转换通过约定的模式进行。
- 约定模式基于将位流组成字节的方式建立，作为一个单位沿着链路传输。
- 没有同步时钟，增加起始位和停止位。在每个字节开始时发送 1 个起始位，结束时发送 1 个或者多个停止位。
- 在每个字节之间会有一个时间间隔。
- 异步在这里是指在**字节级上的异步**，但是**每位仍然要同步**，它们的持续时间是相同的。

Figure 4.34 *Asynchronous transmission*



在同步传输模式中，依次发送位流
而不含起始位、停止位和间隙，
接收方负责将位流分解为字节。

Figure 4.35 *Synchronous transmission*



- 同步传输的优点是速度快
- 同步传输通常多用于传输大块二进制数据。

等时 (isochronous)

- 保证数据以固定速率到达；
- 在实时音频和视频中，帧间的不等延迟是不可接受的；
- 整个流必须同步。

作业

- P90 页 13 、 14 、 21
- 补充：分别用 NRZ-I、曼彻斯特和差分曼彻斯特编码做出以下数据的编码，假设最近一个信号电平为正。

(a) 01010101 (b) 00110011