



第3章

数据和信号



Note

数据要进行传输，必须被转换成电磁信号。

3-1 模拟与数字

数据可以是模拟的也可以是数字的。模拟数据指的是连续状态的信息；而数字数据指的是离散状态的信息。模拟数据采用连续值。数字数据采用离散值。

本节讨论的主题:

模拟数据和数字数据

模拟信号和数字信号

周期信号和非周期信号



Note

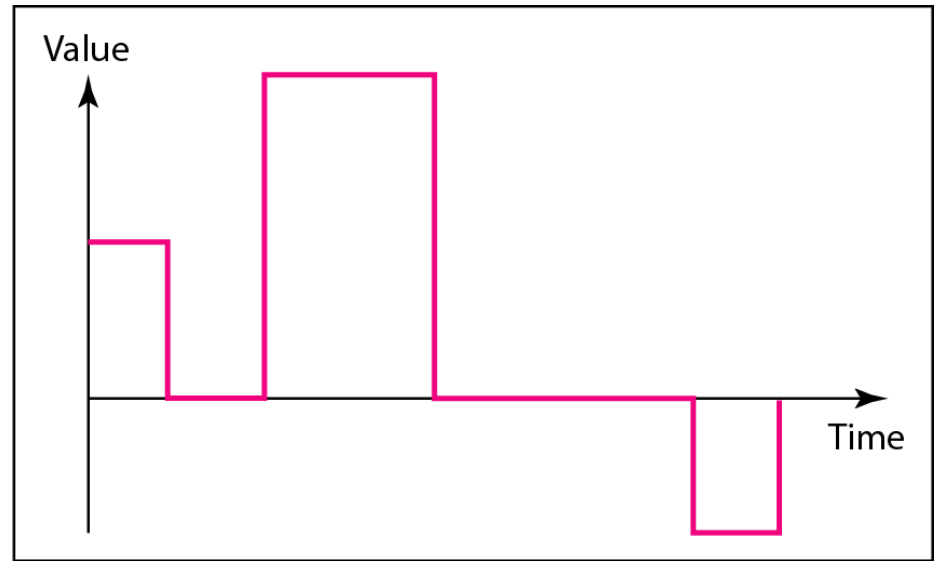
数据可以是模拟的也可以是离散的。
模拟数据是连续的，它采用连续值。
数字数据有离散状态，它采用离散值。

信号可以是模拟的也可以是数字的。
模拟信号在一个范围内可以有无穷多个取值；而数字信号只能有有限个数值。

图3.1 模拟信号和数字信号的比较



a. Analog signal



b. Digital signal

Note

在数据通信中，通常使用周期模拟信号和非周期数字信号。

3-2 周期模拟信号

周期模拟信号可以分为简单类型或复合类型两种。简单类型模拟信号，即正弦波(sine wave)，不能再分解为更简单的信号。而复合型模拟信号则是由多个正弦波信号组成的。

本节讨论的主题:

正弦波

波长

时域和频域

复合信号

带宽

图 3.2 正弦波

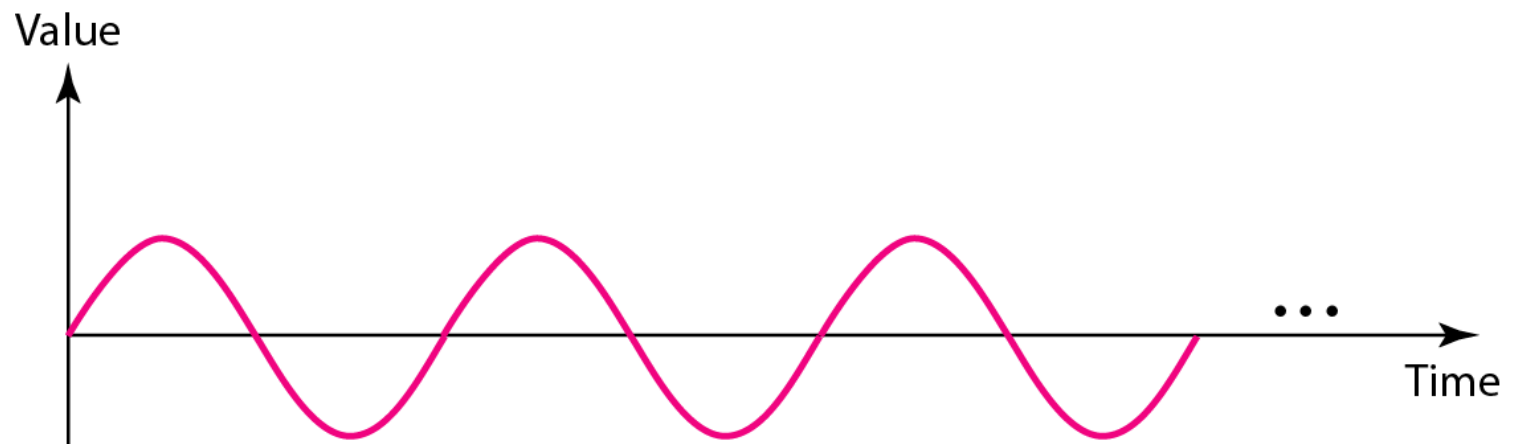
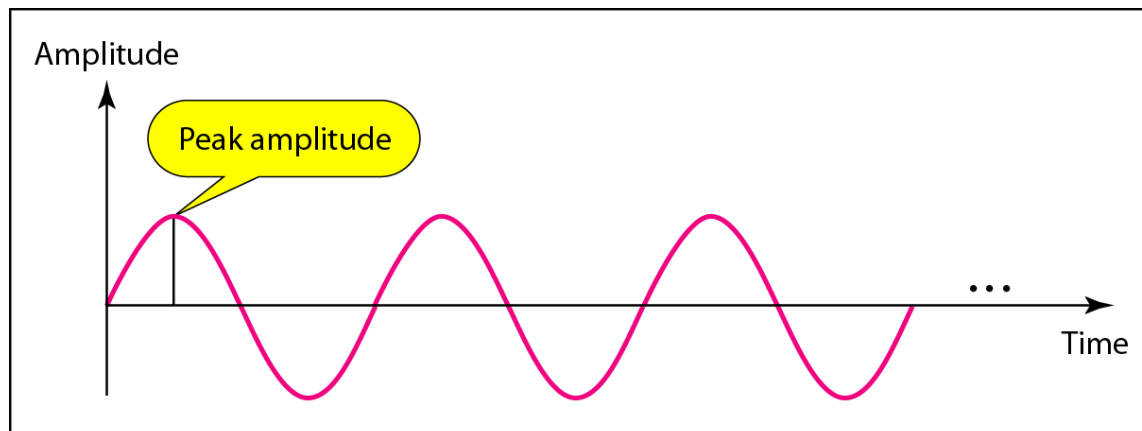
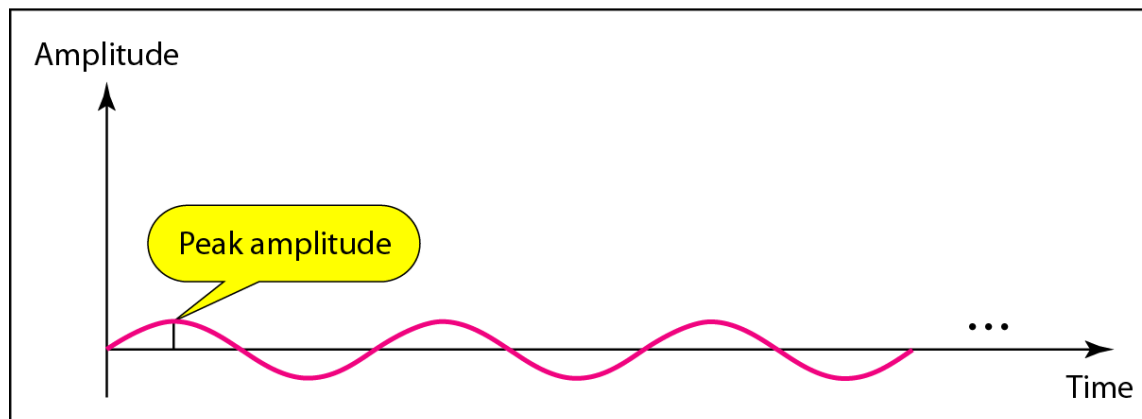


图 3.3 相位和频率相同但振幅不同的两个信号



a. 高峰值振幅的信号



b. 低峰值振幅的信号

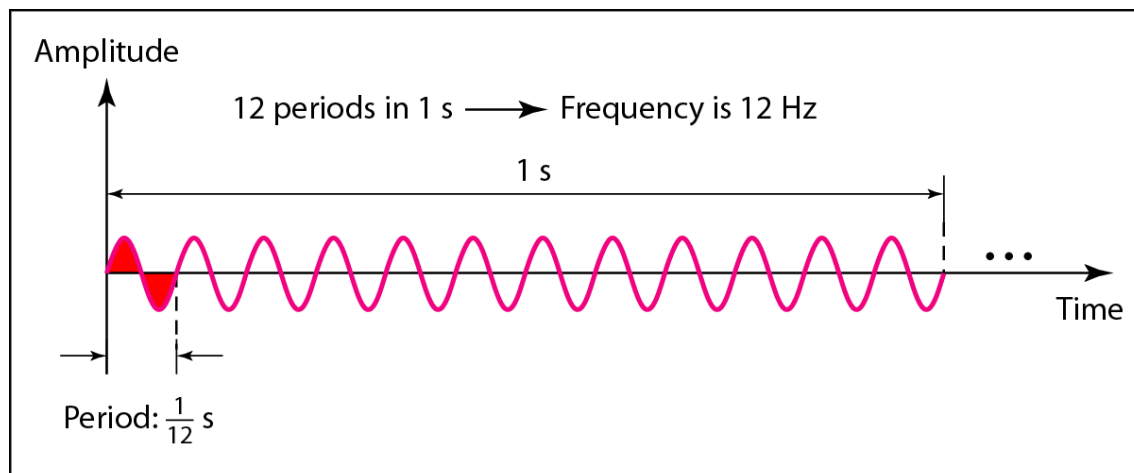


Note

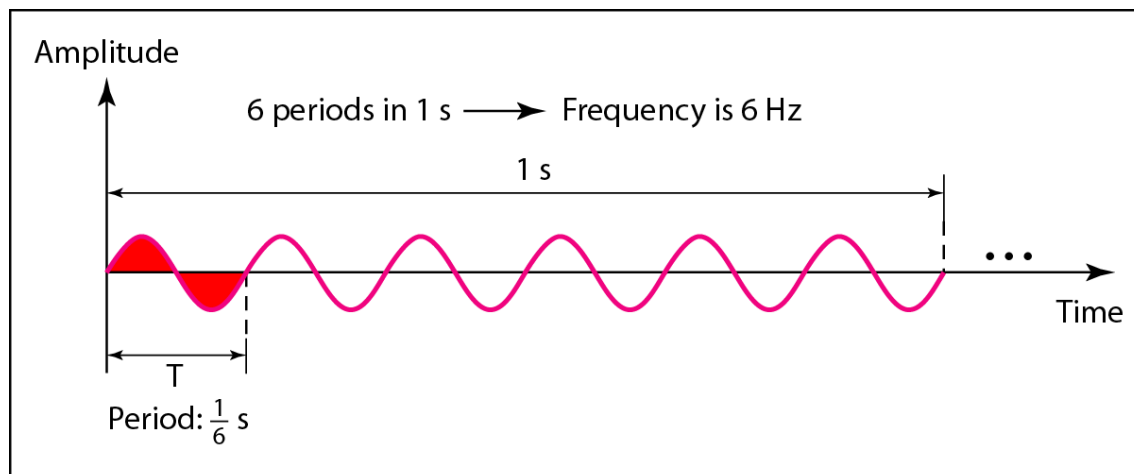
频率与周期互为倒数。

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{and} \quad T = \frac{1}{f}$$

图 3.4 振幅和相位相同但频率不同的两个信号



a. 频率为12Hz的信号



b. 频率为6Hz的信号

表 3.1 周期和频率的单位

单位	等价值	单位	等价值
秒(s)	1s	赫兹(Hz)	1Hz
毫秒(ms)	10^{-3} s	千赫(kHz)	10^3 Hz
微秒(μ s)	10^{-6} s	兆赫(MHz)	10^6 Hz
纳秒(ns)	10^{-9} s	吉赫(GHz)	10^9 Hz
皮秒(ps)	10^{-12} s	太赫(THz)	10^{12} Hz

Note

频率是相应于时间的变化速率。

变化占用的时间短意味着频率高。

变化占用的时间长意味着频率低。

Note

如果信号始终不变化，则其频率是0。

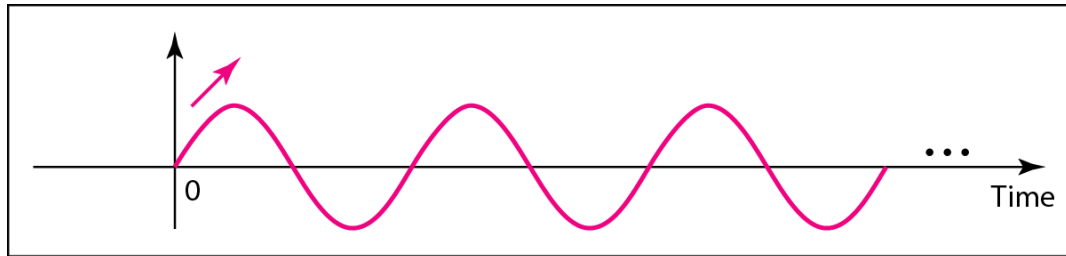
如果信号瞬间发生变化，则其频率值是无穷大。



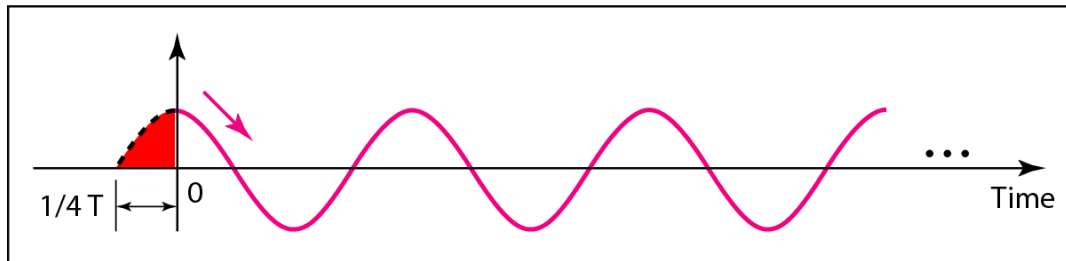
Note

相位描述了波形相对于时间0的位置。

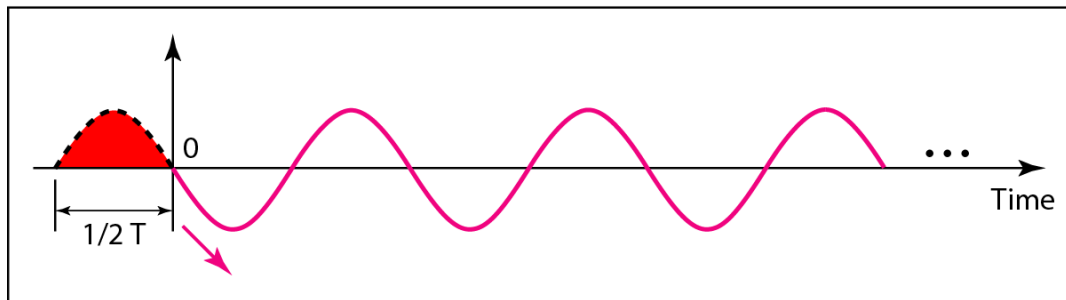
图 3.5 振幅和频率相同但相位不同的三条正弦波



a. 0 degrees



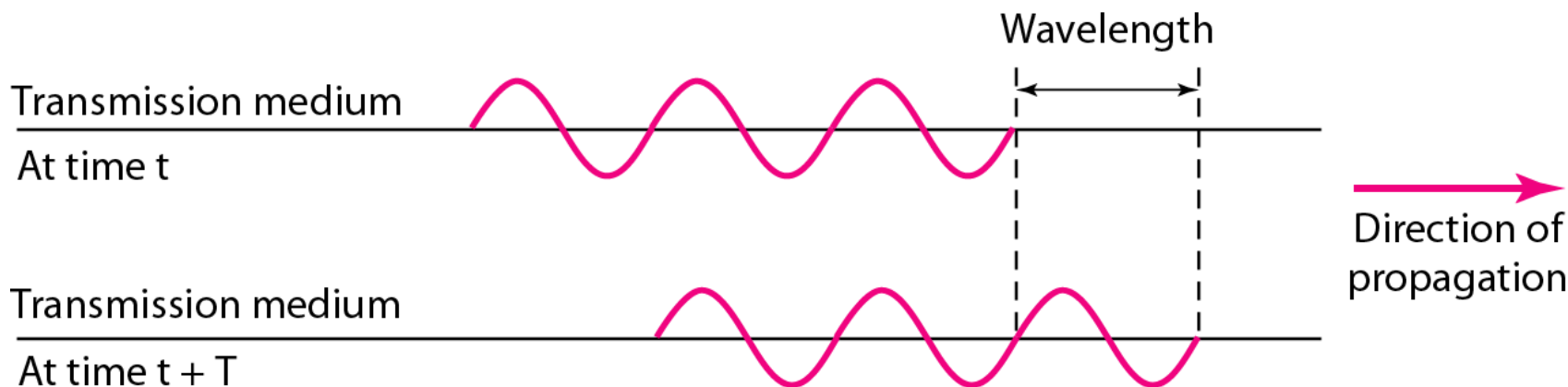
b. 90 degrees



c. 180 degrees

图 3.6 波长和周期

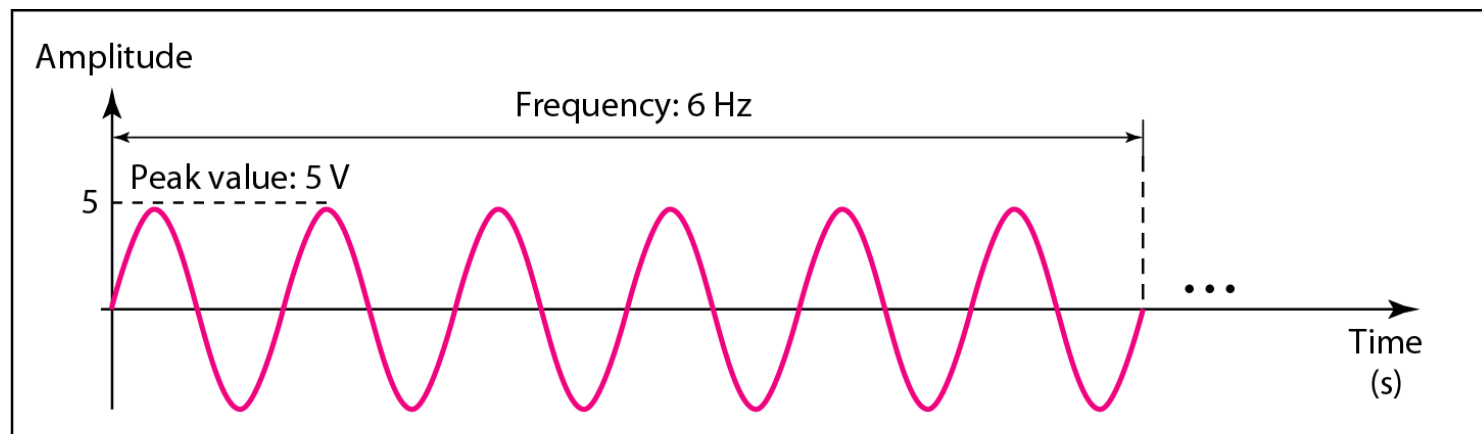
波长将正弦波的周期或频率与介质的传播速度结合在一起。
信号的频率与介质无关，但波长取决于频率和介质。
波长是简单信号在一个周期能传播的距离



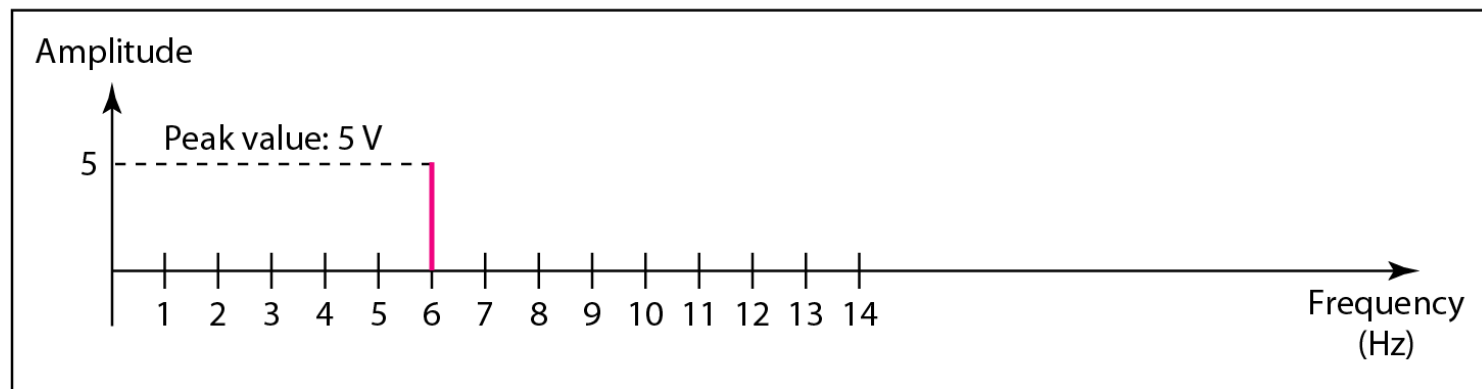
波长 = 传播速度 $\times$ 周期 = $\frac{\text{传播速度}}{\text{频率}}$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

图 3.7 正弦波的时域图和频域图



a. 时域图中的正弦波（峰值：5V 频率：6Hz）

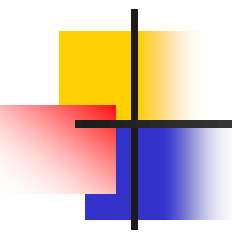


b. 频域图中的相同正弦波（峰值：5V 频率：6Hz）



Note

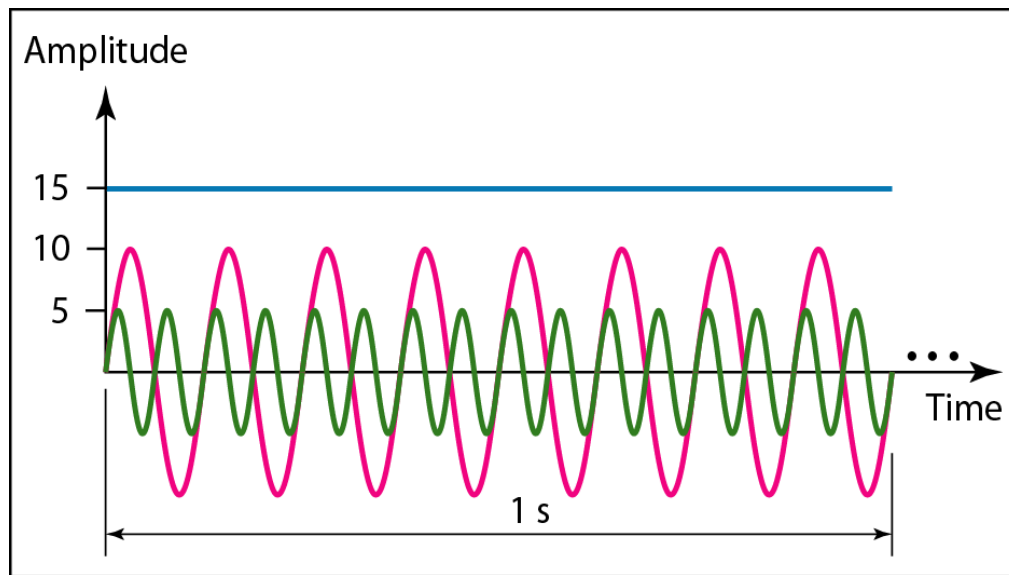
用频域图中单个峰值可表示时域图中一个完整正弦波。



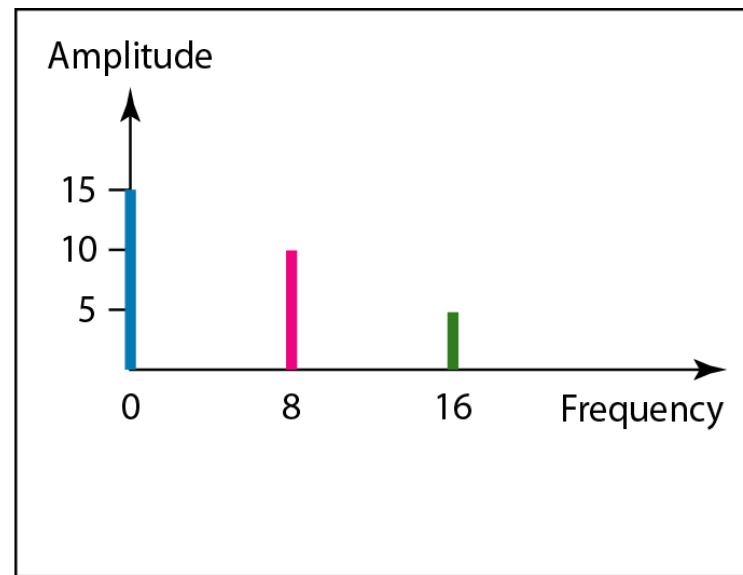
例 3.7

当我们处理多个正弦波时，频域更简洁更有用。例如，图3.8显示了三个不同振幅和频率的正弦波。它们通过频域中的三个尖峰表示。

图 3.8 三个正弦波的时域和频域



a. 三个频率分别为0、8和16的正弦波的时域表示



b. 三个相同信号的正弦波的频域表示

用频域图中的单个峰值表示时域图中一个完整正弦波

Note

单一频率的正弦波在数据通信中没有用处，
我们需要发送复合信号，复合信号由许多简单正弦波组成。

Note

按照傅里叶分析，任何复合信号是由具有不同频率，相位和振幅的简单正弦波的组合而成。

在附录C讨论傅里叶分析。



Note

如果复合信号是周期性的，分解得到的是
一系列具有离散频率的信号。

如果复合信号是非周期性的，分解得到的是
具有连续频率的正弦波组合。

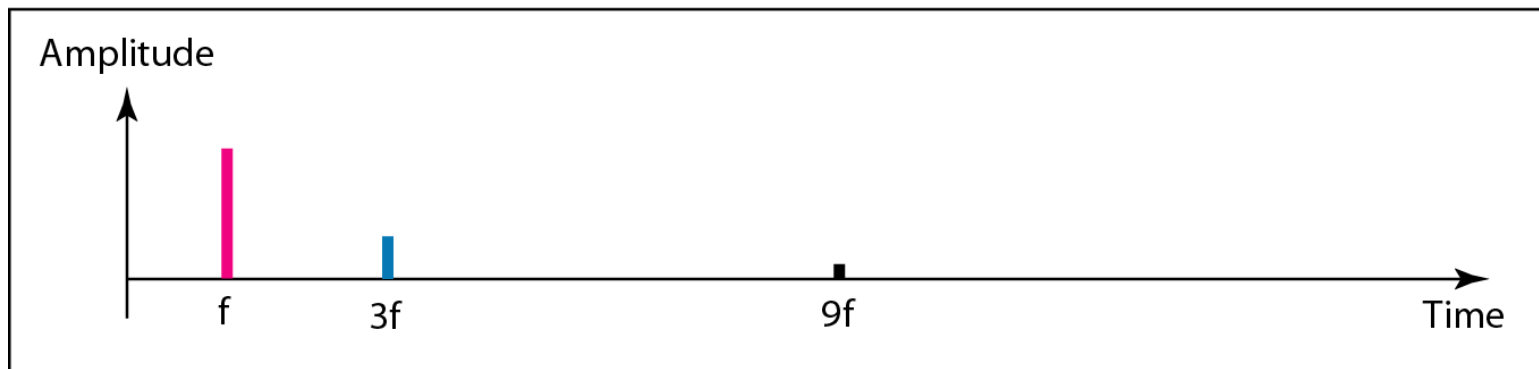
图 3.10 复合周期信号在时域和频域中的分解

频率为 f 的正弦波的频率与复合信号的频率一样，称为基础频率，或者第一谐波

频率为 $3f$ 的正弦波的频率为基础频率的3倍，称为第三谐波

频率为 $9f$ 的正弦波的频率为基础频率的9倍，称为第九谐波

a. 复合信号的时域分解

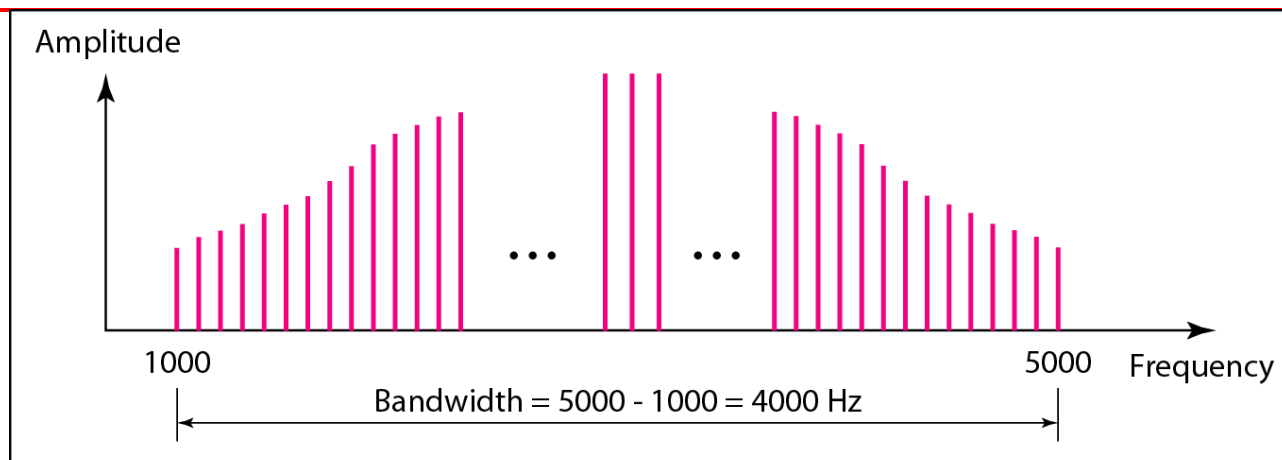


b. 复合信号的频域分解

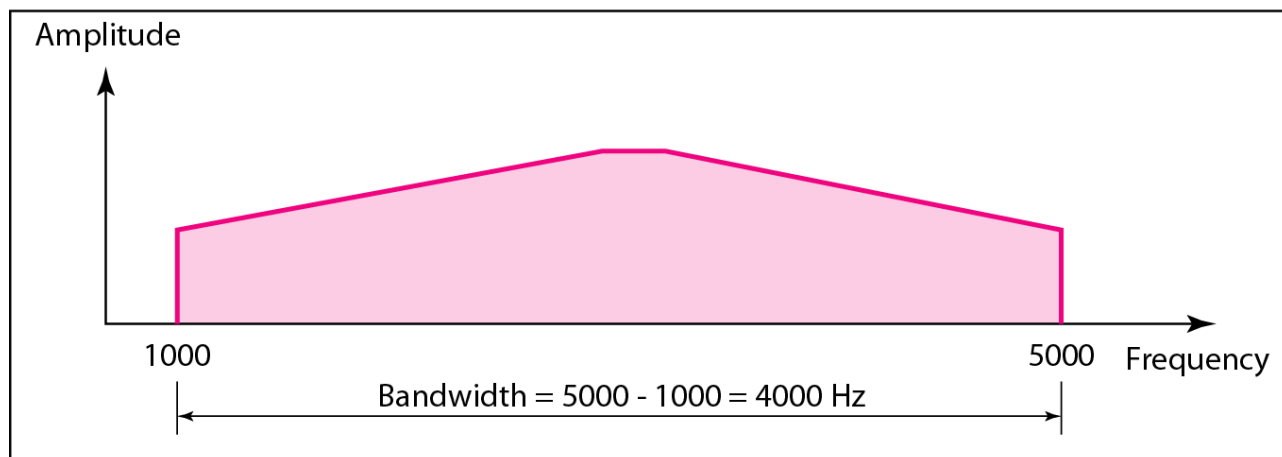
Note

复合信号的带宽是信号最高频率与最低频率的差值。

图 3.12 周期复合信号和非周期复合信号的带宽



a. 周期信号的带宽



b. 非周期信号的带宽

例 3.10

如果一个周期信号分解为5个正弦波信号，频率分别为100,300,500,700和900Hz，那么其带宽是多少？假定所有分量的最大振幅都为10V，试画出该信号的频谱。

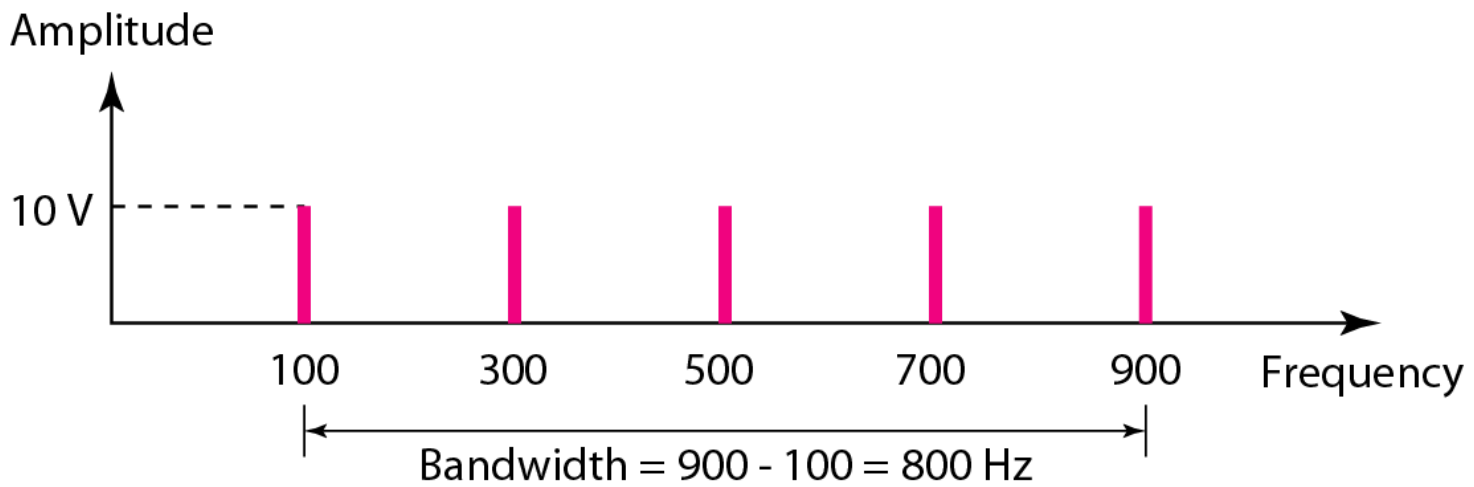
解：

设 f_h 为最高频率， f_l 为最低频率， B 为带宽，则：

$$B = f_h - f_l = 900 - 100 = 800 \text{ Hz}$$

频谱只有5个尖峰，分别位于100,300,500,700和900Hz的位置(见图3.13)。

图 3.13 例3.10的带宽



3-3 数字信号

数据除了可以用模拟信号表示外，还可以使用数字信号表示。例如，1可以编码为正电平，0可以编码为零电平。一个数字信号可以多于两个电平。在这种情况下，每个电平就可以发送多个位。

本节讨论的主题:

比特率

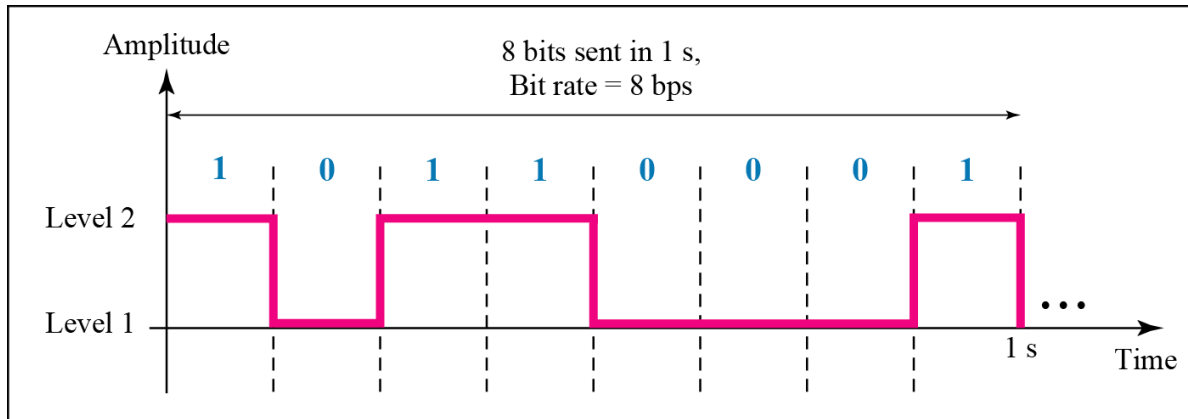
位长

数字信号是一种复合模拟信号

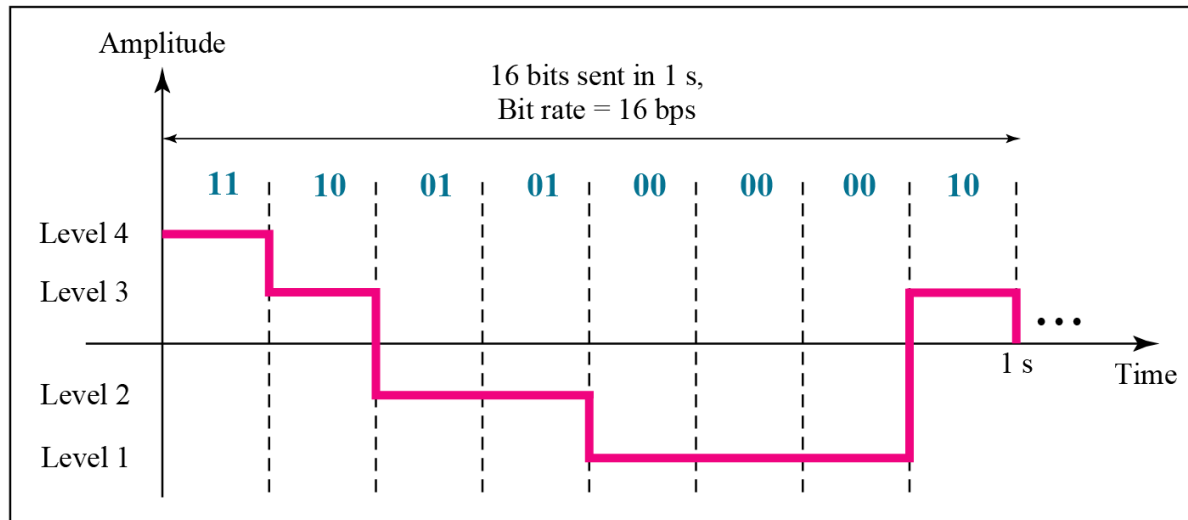
应用层

图 3.16 两个数字信号: 一个有两个电平而另一个有四个电平

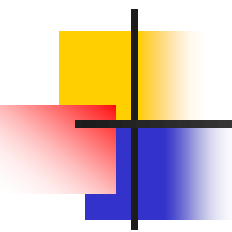
比特率



a. 两个电平的数字信号



b. 四个电平的数字信号



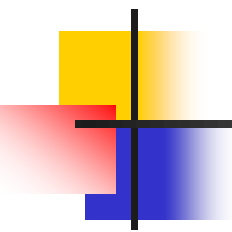
例 3.16

一个数字信号有8个电平。那么每个电平需要多少个位？我们根据下面公式进行计算：

$$\text{Number of bits per level} = \log_2 8 = 3$$

每个信号电平用3位表示。

比特率是1秒钟发送的位数，单位是bps，或者b/s



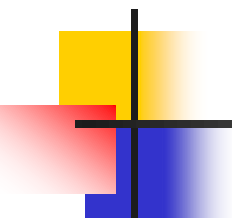
例 3.18

假定我们需要每分钟100页的速率下载文本文档。
所需的通道比特率是多少？

解：

一页平均24行，每一行80个字符。如果我们假定每个字符需要8位，比特率：

$$100 \times 24 \times 80 \times 8 = 1,636,000 \text{ bps} = 1.636 \text{ Mbps}$$



例 3.20

高清晰电视(HDTV)的比特率是多少?

解:

HDTV使用数字信号广播高质量视频信号。

HDTV屏幕通常为16:9。每屏有 1920×1080 个像素,每秒刷新30次。24位代表一种颜色像素。我们计算比特率如下:

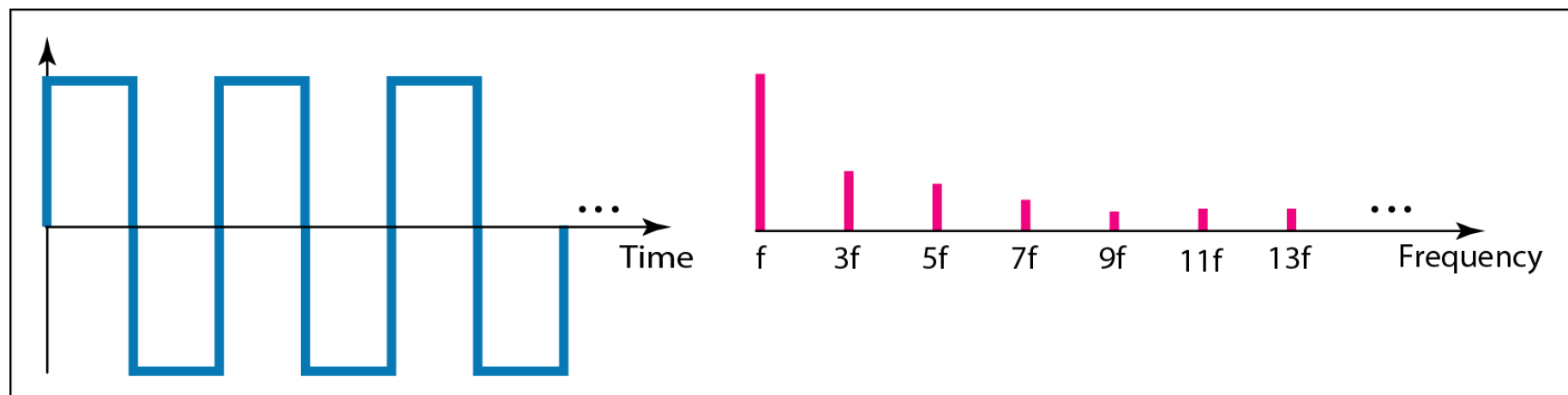
$$1920 \times 1080 \times 30 \times 24 = 1,492,992,000 \text{ or } 1.5 \text{ Gbps}$$

电视台通过压缩把比特率降为20Mbps到40Mbps。

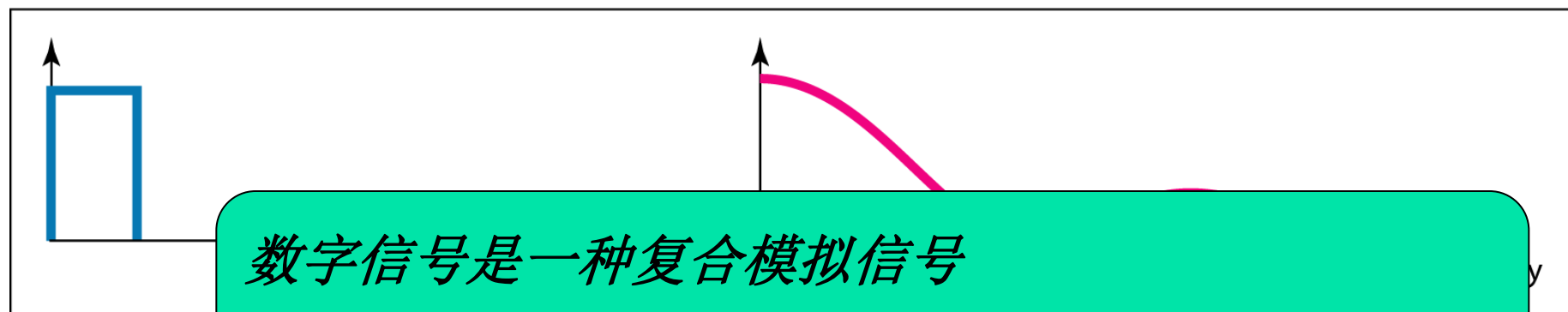
比特长度

- 是一个比特在传输介质上的距离
- $\text{比特长度} = \text{传播速度} \times \text{比特持续时间}$
- 是一个近似概念

图 3.17 周期数字信号和非周期数字信号的时域和频域



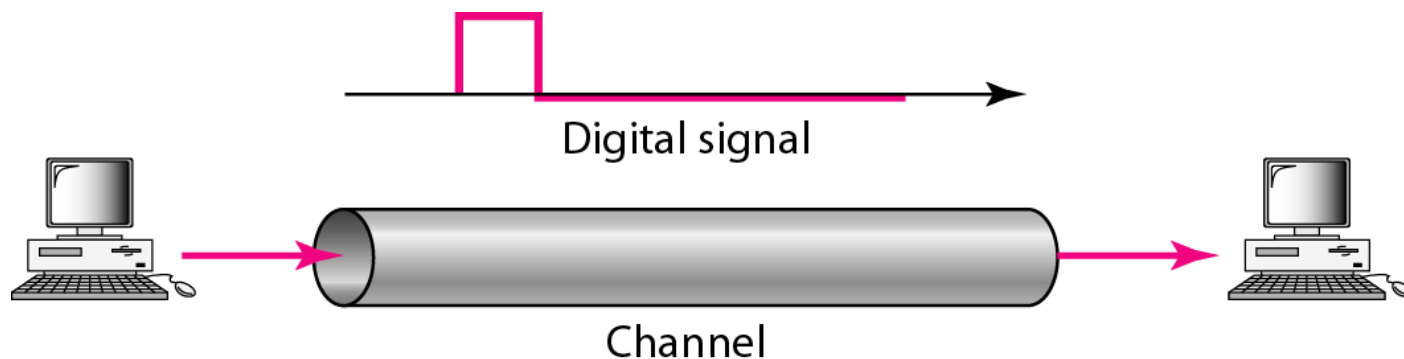
a. 周期数字信号的时域和频域



b. 非周期数字信号

数字信号是一种复合模拟信号

图 3.18 基带传输



基带传输是通过信号传输数字信号，不转换为模拟信号

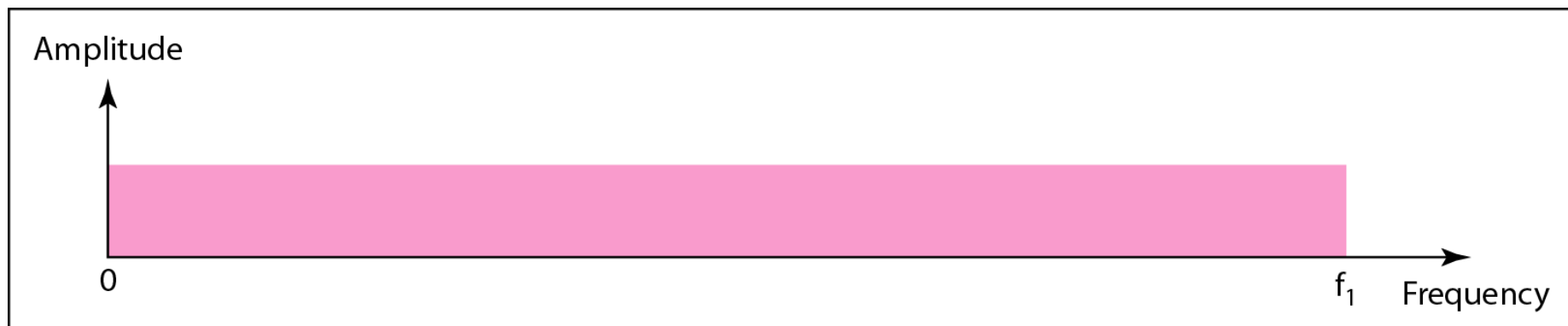
基带传输需要一个带宽下限是0的低通通道



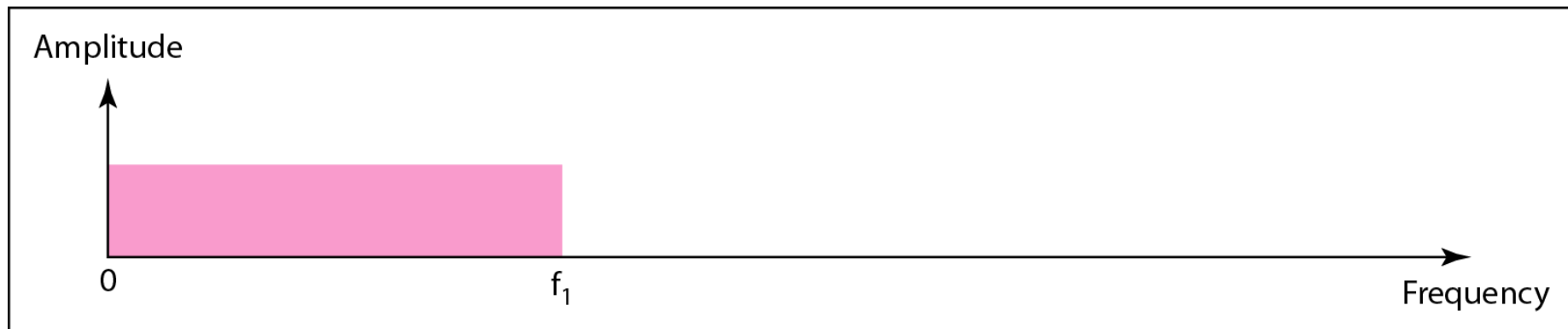
Note

数字信号是无穷大带宽的复合模拟信号。

图 3.19 两条低通通道的带宽

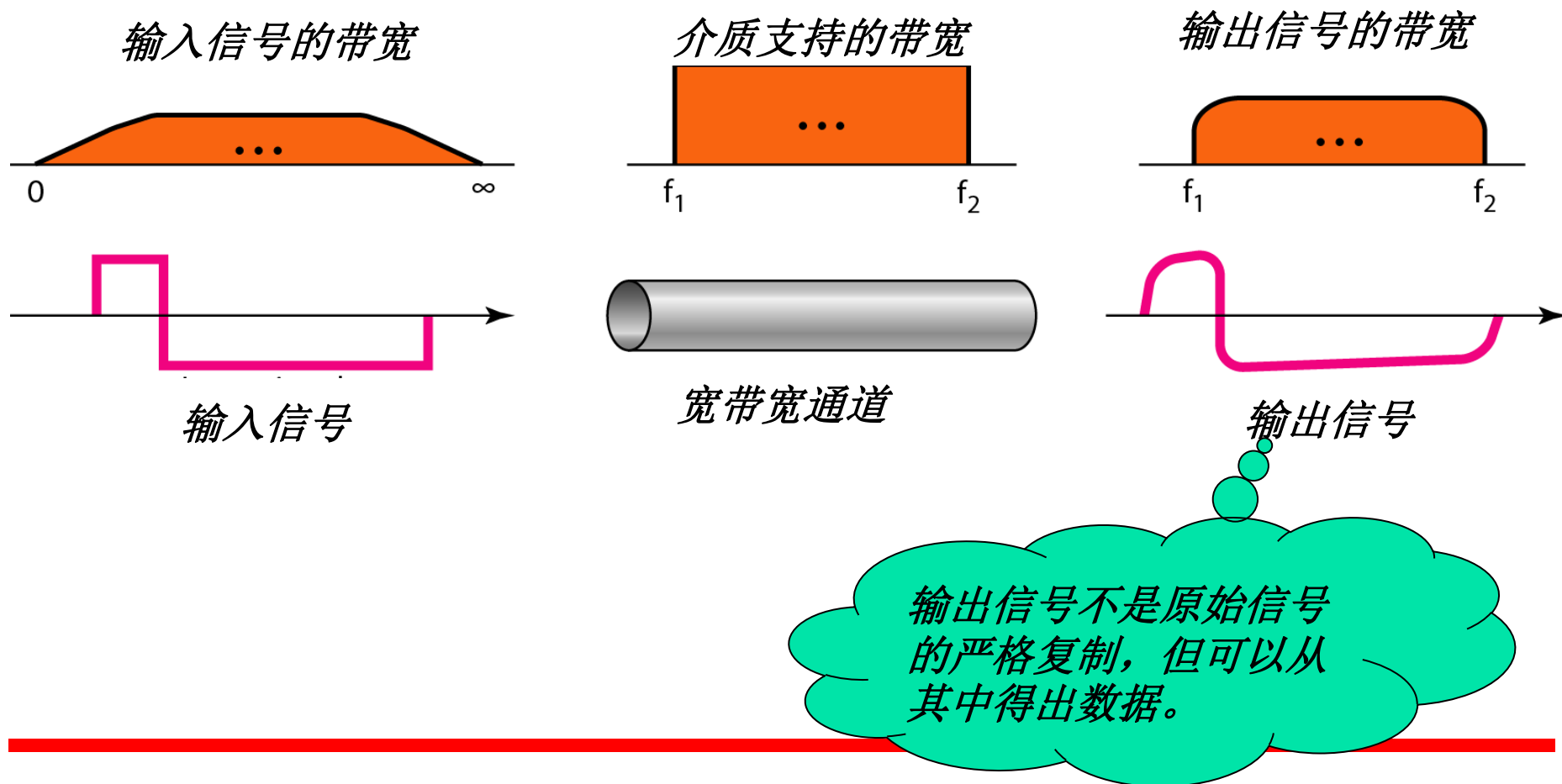


a. 低通通道、宽带宽



b. 低通通道、窄带宽

图 3.20 使用专用介质的基带传输



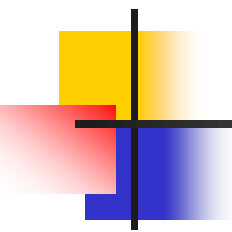


Note

只有我们有无穷大或非常大带宽的低通通道，保持数字信号形状的数字信号基带传输才是可能的。

Note

在基带传输中，所需的带宽与比特率成正比；如果我们需要更快地发送位，我们就需要更大的带宽。



例 3.22

如果我们需要使用基带传输发送 1 Mbps，那么低通通道所需的带宽是多少？

解：

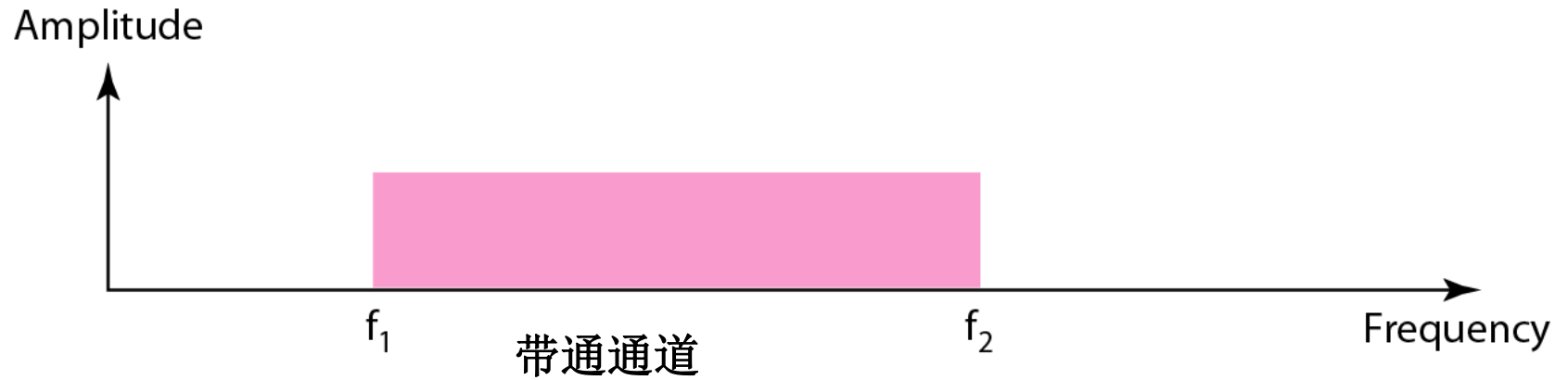
答案取决于所需的准确性。

a. 最小带宽, 是 $B = \text{比特率}/2$, 即 500 kHz。

b. 使用第一和第三谐波可以得到更好的结果，所需带宽是 $B = 3 \times 500 \text{ kHz} = 1.5 \text{ MHz}$ 。

c. 使用第一、第三和第五谐波仍然可以得到更好的结果，所需带宽是 $B = 5 \times 500 \text{ kHz} = 2.5 \text{ MHz}$ 。

图 3.23 带通通道的带宽





Note

如果可用通道是带通通道，我们不能直接发送数字信号到通道；我们需要在传输前把数字信号转换成模拟信号。

3-4 传输减损(Impairment)

信号通过介质进行传输，但是其传输并非完美无缺的。不完美的地方导致了信号减损。这意味着信号在介质的开始一端和结束一端是不相同的。发送的信号并非就是接收到的信号。通常会发生三种类型的减损：衰减、失真和噪声。

本节讨论的主题:

衰减
失真
噪声

图 3.25 减损的原因

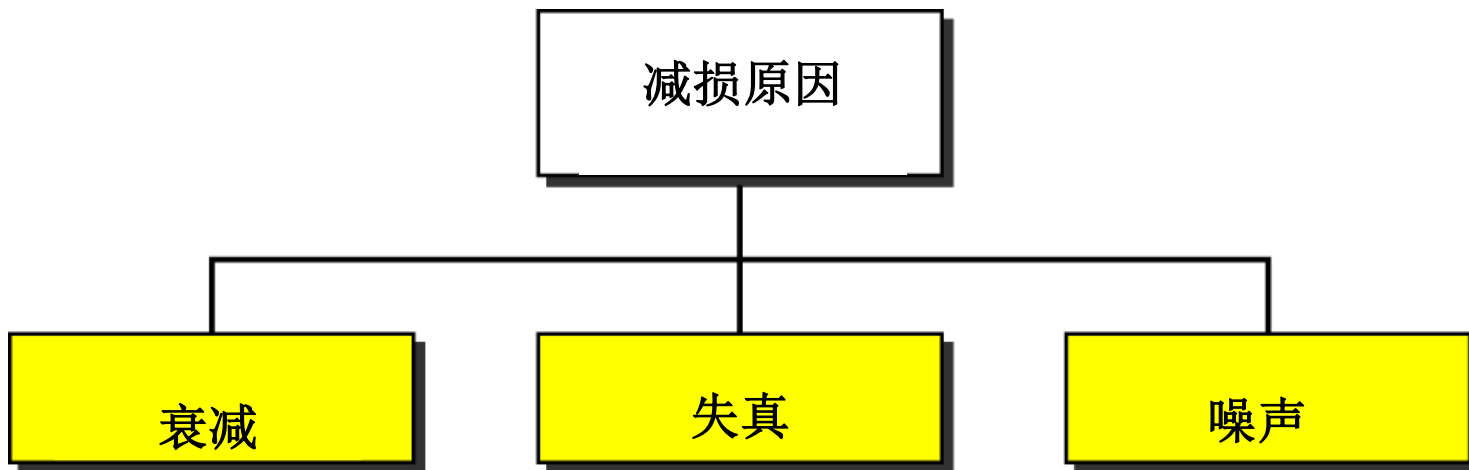
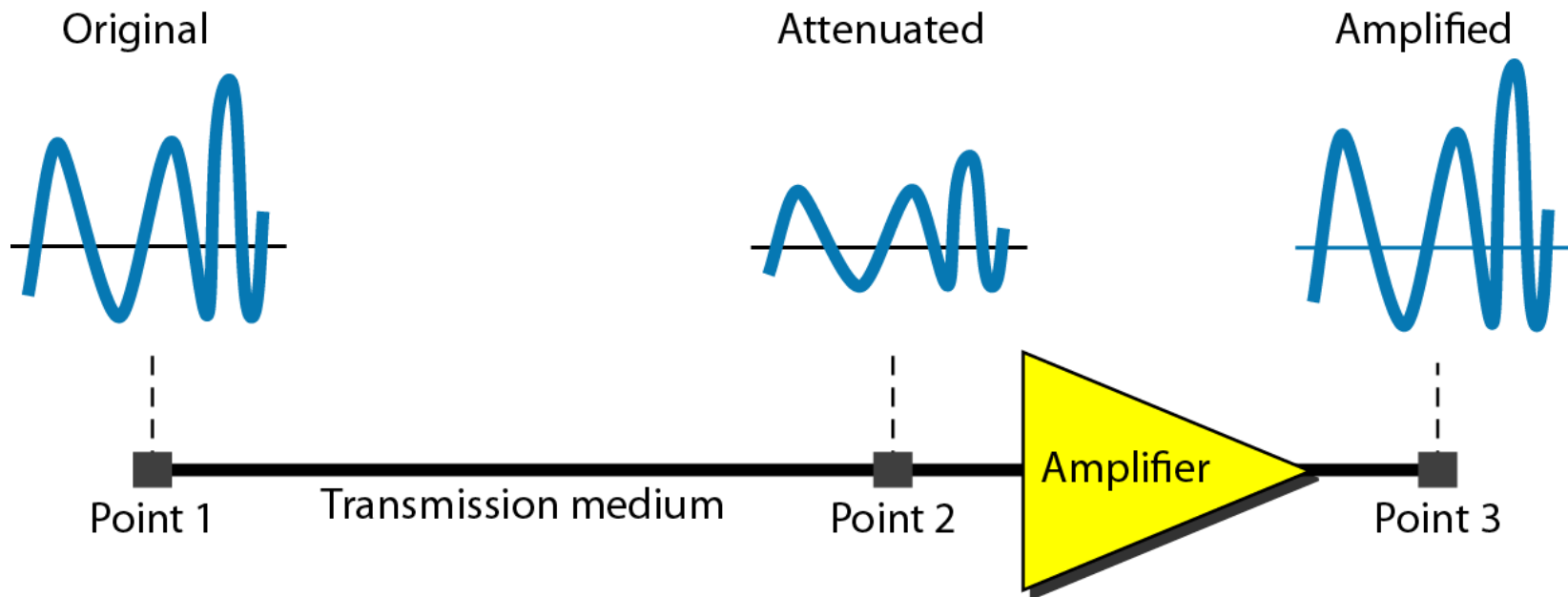
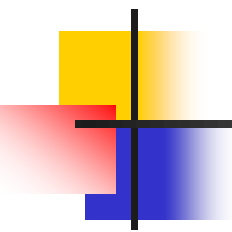


图 3.26 衰减



衰减就意味着能量损失

通常使用分贝来表示

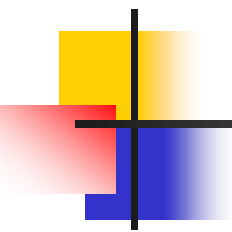


例 3.26

假设信号通过一种传输介质传输后，它的功率降低了一半。这可以表示为 $P_2 = (1/2)P_1$ ，这种情况下衰减(损失的能量)可以计算为：

$$10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \log_{10} \frac{0.5 P_1}{P_1} = 10 \log_{10} 0.5 = 10(-0.3) = -3 \text{ dB}$$

-3 dB或者3 dB衰减等价于功率损失了一半。



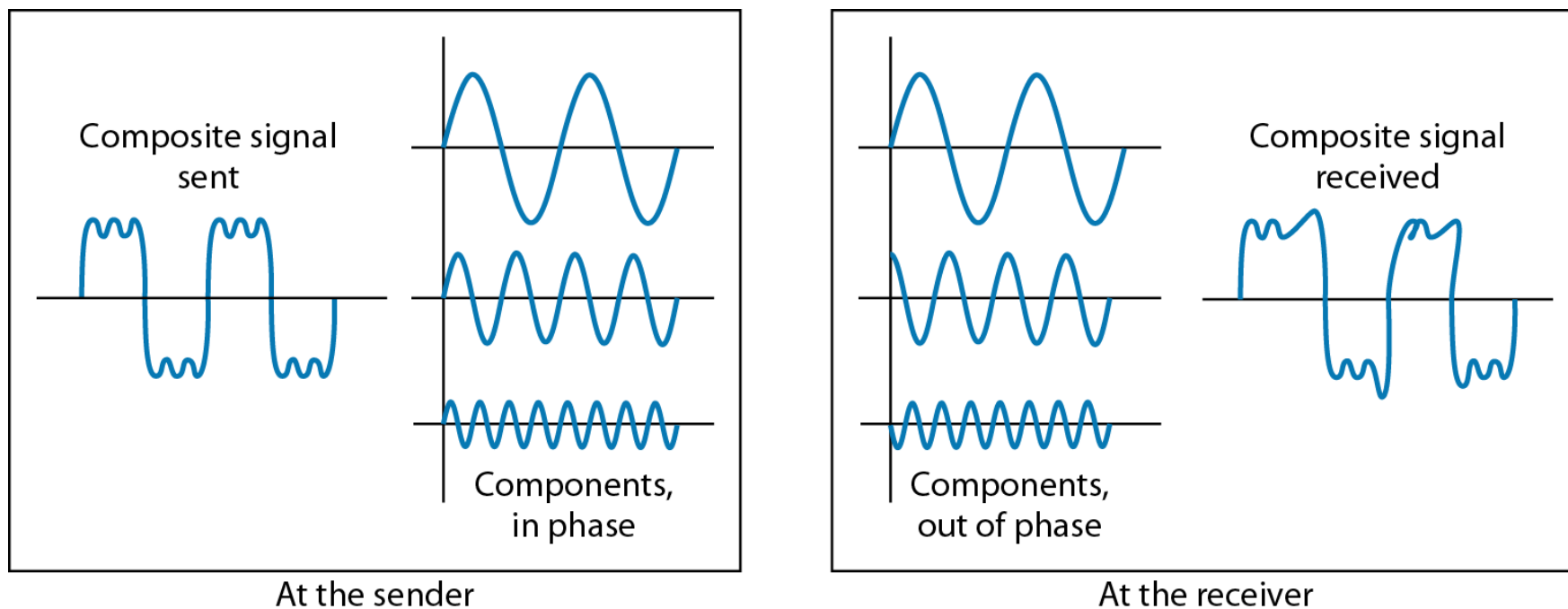
例 3.27

假定信号通过一个放大器，它的功率增大为原来的10倍。这表示 $P_2 = 10P_1$ 。在这种情况下，放大量(功率增益)可以计算为：

$$10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \log_{10} \frac{10P_1}{P_1}$$

$$= 10 \log_{10} 10 = 10(1) = 10 \text{ dB}$$

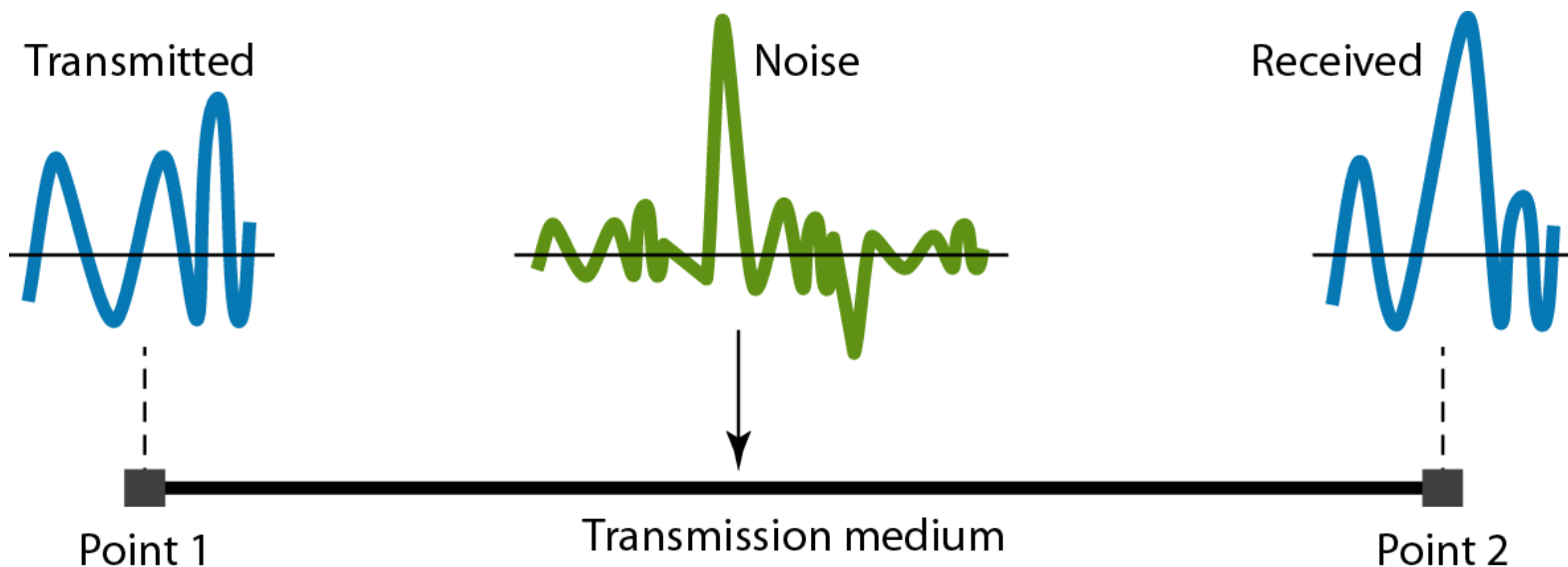
图 3.28 失真



失真就意味着信号改变了形状或形态

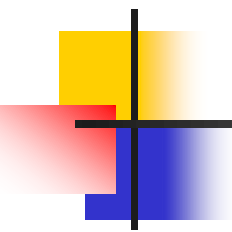
通常使用分贝来表示

图 3.29 噪声



噪声有热噪声、感应噪声、串扰和脉冲噪声。

用信噪比来衡量：
$$\frac{\text{平均信号功率}}{\text{平均噪声功率}}$$
通常用分贝来表示。



例 3.31

信号的功率是10 mW，噪声的功率是1 μ W，那么SNR和SNR_{dB}是多少？

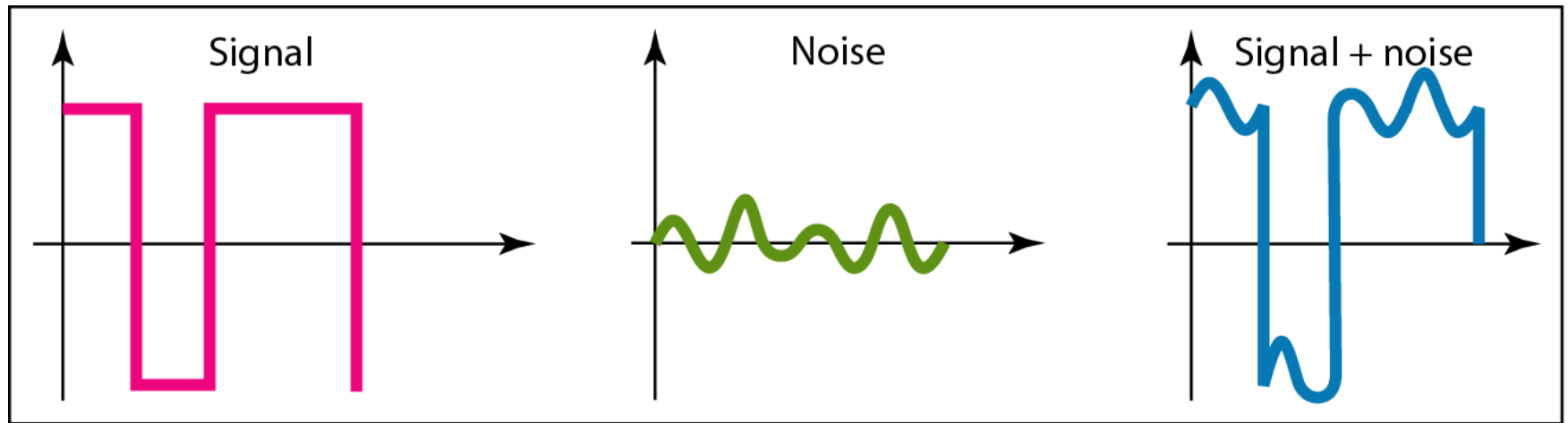
解：

SNR 和 SNR_{dB} 可以计算如下：

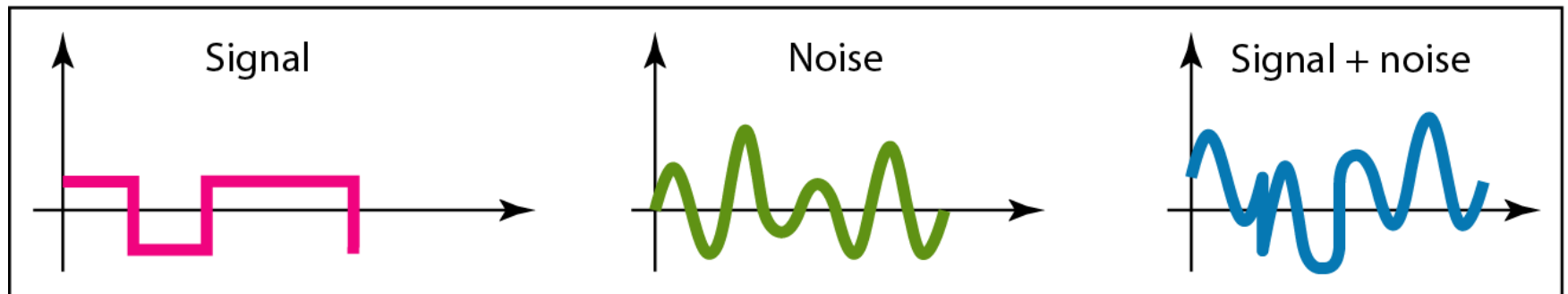
$$\text{SNR} = \frac{10,000 \mu\text{W}}{1 \text{ mW}} = 10,000$$

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} 10,000 = 10 \log_{10} 10^4 = 40$$

图 3.30 SNR的两种情形: 高 SNR 和低 SNR



a. Large SNR



b. Small SNR

3-5 数据速率限制

数据通信中一个非常重要的问题是：在一个通道中能够以多快的速率发送数据，即每秒钟的比特数。数据速率取决于三种因素：

1. 有效带宽
2. 使用的信号电平数
3. 通道的质量(噪声电平)

本节讨论的主题:

无噪声通道: 奈奎斯特比特率

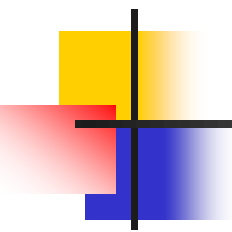
噪声通道: 香农容量定理

使用两种限制条件



Note

增加信号电平数会减弱系统的可靠性。



例 3.34

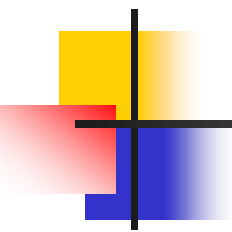
无噪声信道：奈奎斯特比特率

考虑带宽为3000Hz的无噪声通道，传输两种电平的信号，则最大比特率计算为：

$$\text{BitRate} = 2 \times 3000 \times \log_2 2 = 6000 \text{ bps}$$

$$\text{比特率} = 2 \times \text{带宽} \times \log_2 L$$

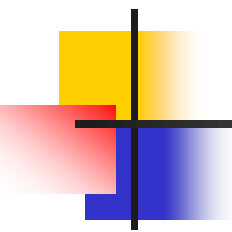
L 是电平的数量



例 3.35

考虑同样的无噪声通道，传输具有四种信号电平的信号(每一种电平发送两个位)。最大比特率可以计算为：

$$\text{BitRate} = 2 \times 3000 \times \log_2 4 = 12,000 \text{ bps}$$



例 3.36

我们需要通过带宽为20kHz的无噪声通道发送265kbps。我们需要多少信号电平？

解：

我们使用奈奎斯特公式如下：

$$\begin{aligned} 265,000 &= 2 \times 20,000 \times \log_2 L \\ \log_2 L &= 6.625 \quad L = 2^{6.625} = 98.7 \text{ levels} \end{aligned}$$

因为结果不是2的幂，所以我们需要增加电平数或者减小比特率。如果我们有128个电平，比特率是280kbps。如果我们有64个电平，比特率是240kbps。

例 3.37

有噪声信道：香农定理

考虑一个极端的噪声通道，其信噪比的值接近于0。
换句话说，噪声很强而信号很弱，对于该通道，其容量C计算为：

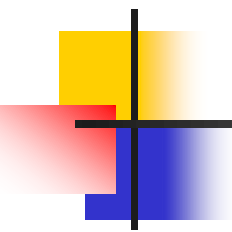
$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR}) = B \log_2 (1 + 0) = B \log_2 1 = B \times 0 = 0$$

这意味着通道的容量为0，与带宽无关。换句话说，通过该通道不能接收到任何数据。

通道的容量=带宽 $\times \log_2 (1+\text{SNR})$

Shannon Capacity

1944年，Claude Shannon提出

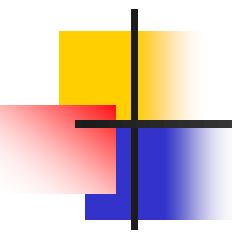


例 3.38

我们可以计算一条常规电话线路理论上的最高比特率。通常情况下，电话线路的带宽为3000Hz。信噪比通常为3162。对于这一通道，其容量计算为：

$$\begin{aligned} C &= B \log_2 (1 + \text{SNR}) = 3000 \log_2 (1 + 3162) = 3000 \log_2 3163 \\ &= 3000 \times 11.62 = 34,860 \text{ bps} \end{aligned}$$

这表示电话线路的最高比特率是34,860 kbps。如果要使数据发送速率比这更快，则可增大线路的带宽或者提高信噪比。



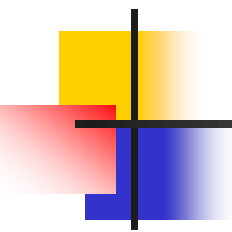
例 3.40

为了实际操作方便，当SNR很大时，假定 $\text{SNR} + 1$ 几乎与SNR相等，理论通道容量可以简化为：

$$C = B \times \frac{\text{SNR}_{\text{dB}}}{3}$$

例如，我们可以计算前一例子的理论容量为：

$$C = 2 \text{ MHz} \times \frac{36}{3} = 24 \text{ Mbps}$$



例 3.41 (continued)

尽管香农公式计算结果是6 Mbps,但这是上限。为了获得更好的性能,可选择低一些的值,如4 Mbps。然后使用奈奎斯特公式计算信号电平的数量:

$$4 \text{ Mbps} = 2 \times 1 \text{ MHz} \times \log_2 L \quad \rightarrow \quad L = 4$$

Note

香农容量定理给出数据速率的上限，奈奎斯特公式给出所需的信号电平数。

3-6 性能

网络中的一个重要问题是网络的性能——网络怎么好？我们会在第24章更详细地讨论服务质量、网络性能的整体衡量。这一节，我们介绍以后章节会用到的术语。

本节讨论的主题:

带宽

吞吐量

延迟

带宽与延迟的乘积

Note

在网络中，我们在两种情况下使用术语
带宽。

- ❑ 第一种，以赫兹衡量的带宽指复合信号包含的频率范围或者通道能通过的范围。
- ❑ 第二种，以每秒比特数衡量的带宽指通道或链路中位传输的速率。

例 3.44

吞吐量

带宽为10Mbps的网络每分钟只能平均传输12,000个帧，每个帧平均携带10,000个位。那么这个网络的吞吐量是多少？

解：

我们可以计算吞吐量为：

$$\text{Throughput} = \frac{12,000 \times 10,000}{60} = 2 \text{ Mbps}$$

这个例子中的吞吐量几乎是带宽的五分之一。

延迟

- 传播时间(propagation time)
- 传输时间(transmission time)
- 排队时间(queueing time)
- 处理延迟(processing time)

延迟 = 传播延迟 + 传输时间 + 排队时间 + 处理延迟

- 传播时间是指传输一个比特从源到目标的时间
- 取决于电磁信号的传播速度
- $\text{传播延迟} = \text{距离} / \text{传播速度}$

传输时间 = 报文长度 / 带宽，是发送报文所需的时间。

例 3.45

传播时间

如果两点之间的距离是12,000 km，传播时间是多少？
假定电缆中的传播速度是 2.4×10^8 m/s。

解：

我们可以计算传播速度为：

$$\text{Propagation time} = \frac{12,000 \times 1000}{2.4 \times 10^8} = 50 \text{ ms}$$

这个例子说明如果源和目标之间有直接电缆，一个位经过大西洋只需要50 ms。

例 3.46

传输时间

如果网络的带宽是1 Gbps，那么2.5千字节的报文（一封电子邮件）的传播时间和传输时间是多少？假定发送方和接收方之间的距离是12,000 km，光以速度 2.4×10^8 m/s 传输。

解：

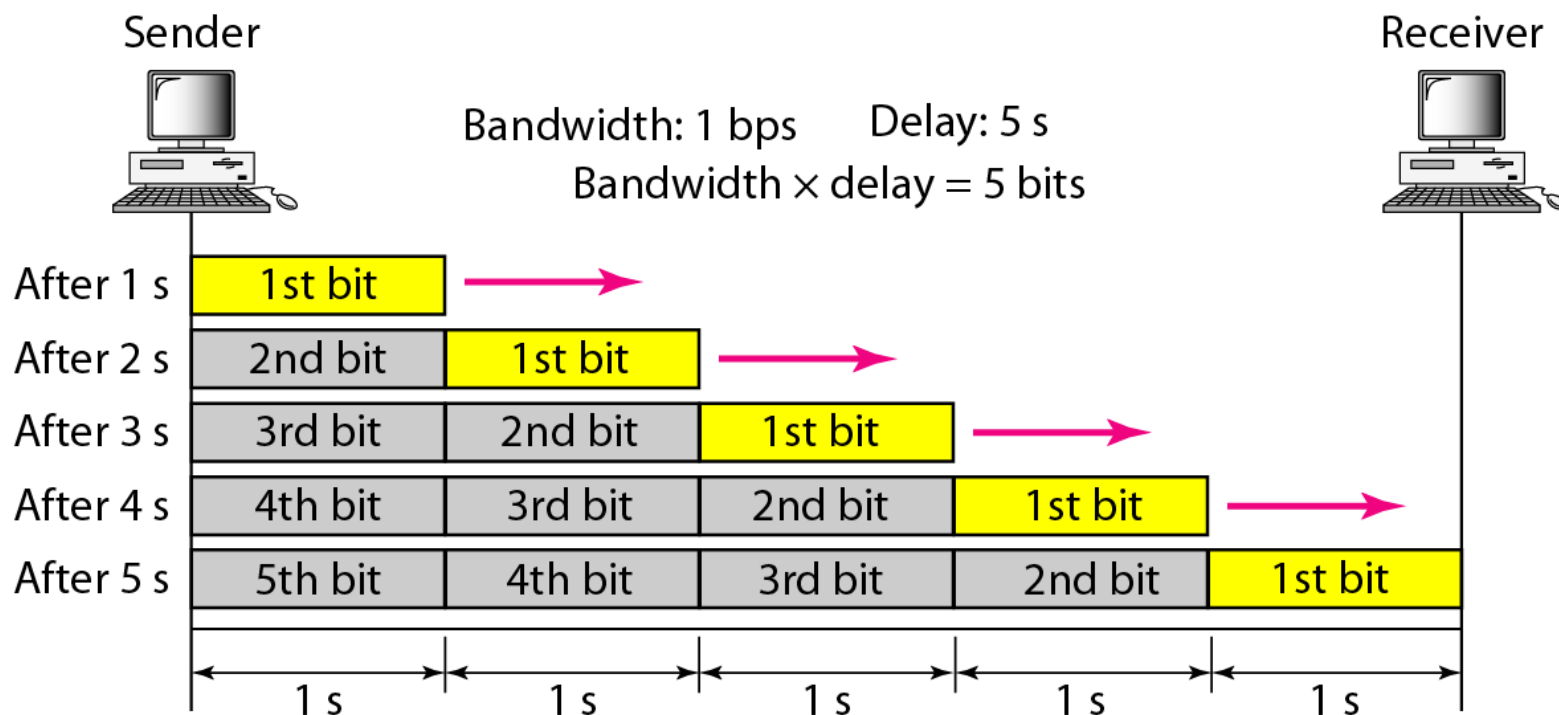
我们计算传播时间和传输时间如下所示：

$$\text{Propagation time} = \frac{12,000 \times 1000}{2.4 \times 10^8} = 50 \text{ ms}$$

$$\text{Transmission time} = \frac{2500 \times 8}{10^9} = 0.020 \text{ ms}$$

在这个例子中，因为报文较短而带宽较高，主导因素是传播时间而不是传输时间。传输时间可以忽略不计。

图 3.31 在情形1 中用位充满链路



例 3.48

我们把两点间的链路看做管道。管道的横截面表示带宽，管道的长度表示延迟。我们可以说管道的容量定义了带宽延迟乘积，如图3.33所示。

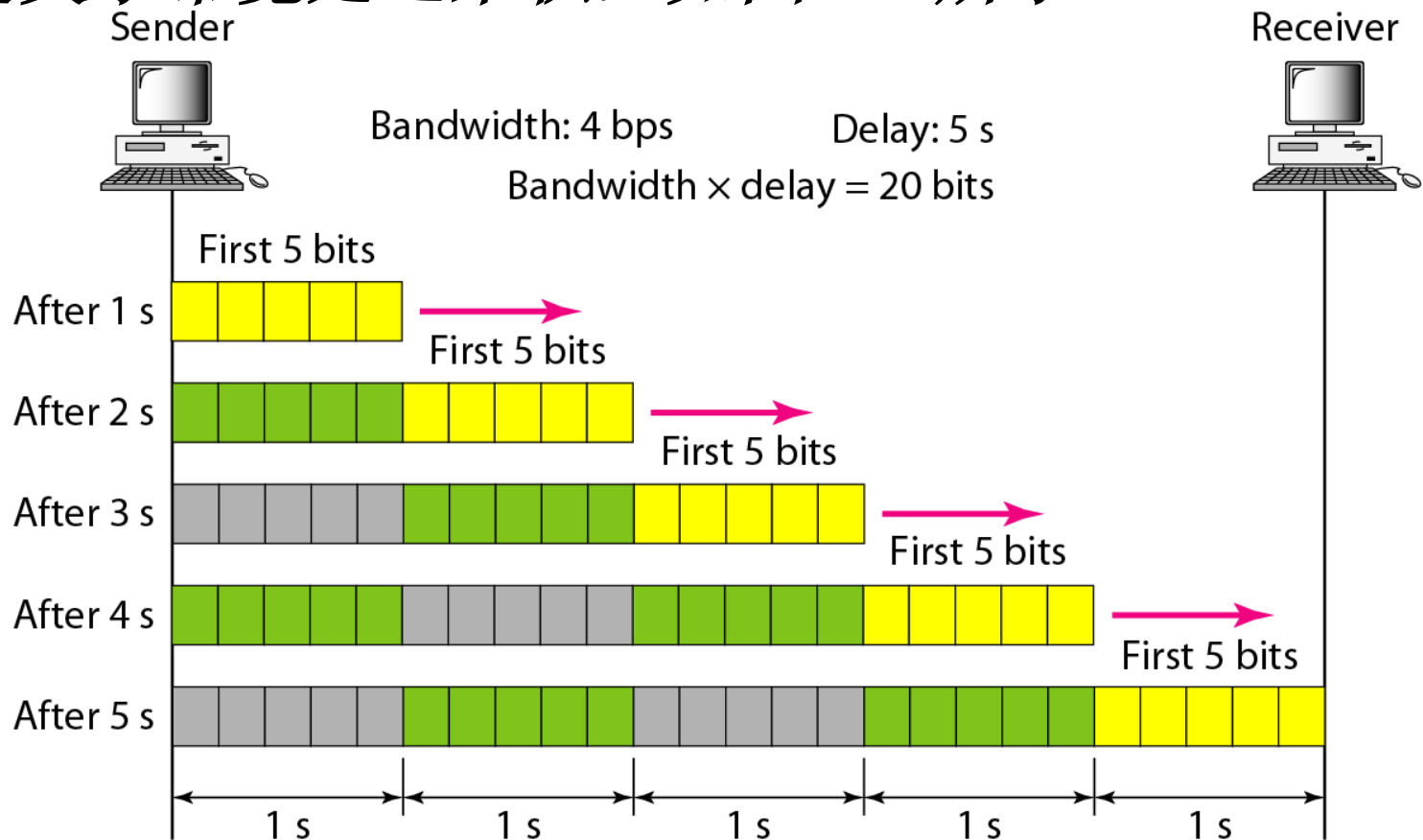


图 3.32 在情形2 下用位充满链路

Note

带宽延迟乘积定义了能充满链路的位数。

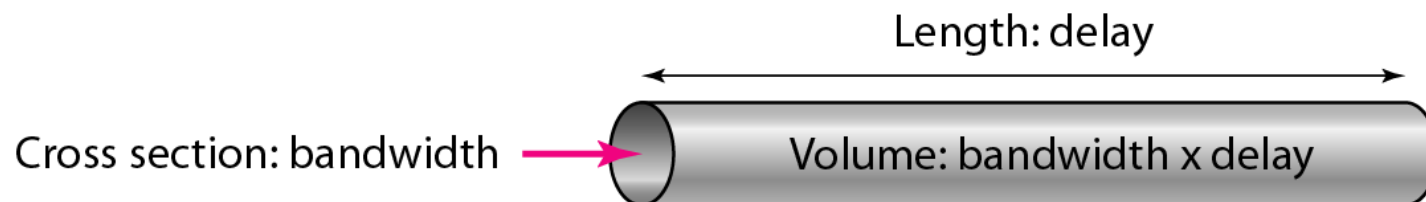


图 3.33 带宽延迟乘积的概念

作业:

- P65页
- 36,42,43,46,47