

第二部分 概述

本书第二部分讨论物理层，包括该层的传输媒介。这部分包括六章。第 3 章介绍了物理层用到的所有实体。第 4 章和第 5 章介绍传输。第 6 章讨论了如何利用可用带宽。第 7 章介绍传输媒介。第 8 章讨论交换，尽管它是可以发生在所有层的，但我们放到这一章。

第 3 章 物理层概述

第 4 层 数字传输

第 5 章 模拟传输

第 6 章 带宽利用率：多路复用和扩频

第 7 章 传输介质

第 8 章 交换

第3章 物理层概述

物理层的一个主要功能是通过传输介质以电磁信号的形式传输数据。无论是从另一台计算机中收集统计数据，还是从一台设计工作站发送动画图片，或者是使远程控制中心响铃，都需要通过网络连接传输**数据（data）**。

一般情况下，对于个人或者应用程序有用的数据并非都是能够通过网络进行传输的形式。例如，一张照片必须先转换为传输介质可以接受的形式。传输介质通过沿着物理路径传导能量的方式进行工作。为了传输，数据需要转换成**信号（signal）**。

本章分为六节。

□ 第1节阐述了数据和信号是怎样可以为模拟或者数字的。模拟意味是连续的；数字意味是离散的。

□ 第2节阐述了只有周期模拟信号才能被用在数据通信中。本节讨论了简单和复合信号，并解释了模拟信号的属性，如周期，频率和相位。

□ 第3节阐述了只有非周期数字信号能够用在数据通信中。本节讨论了数字信号的属性，如位速率和位长，并说明了数字数据是怎样使用模拟信号发送的，讨论了基带和宽带传输。

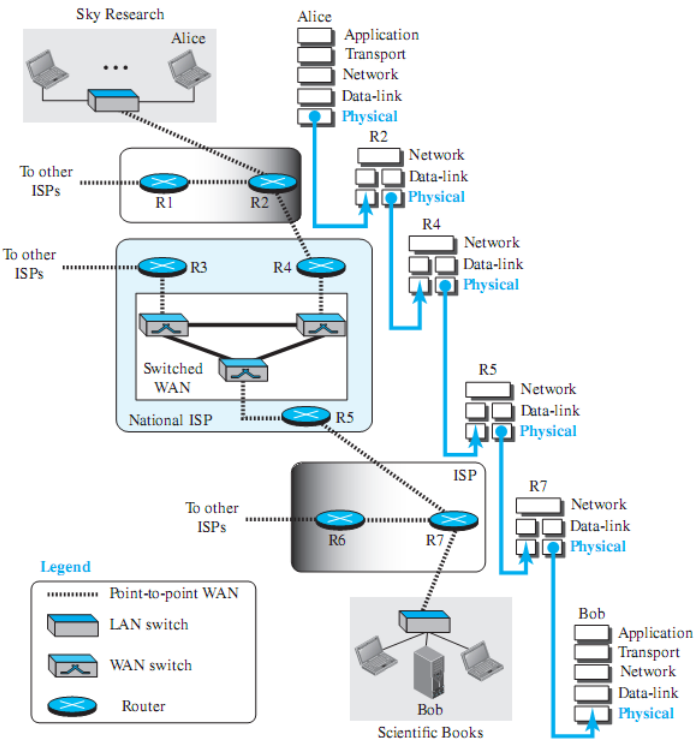
□ 第4节阐述了传输损害。本节讲解了衰减、畸变和噪声是怎样损害信号的。

□ 第5节讨论了数据速率限制：可用信道每秒能够传输多少位，测试和比较了无噪声和有噪声信道的数据速率。

□ 第6节讨论了数据传输性能。测试了几个信道测度，包括带宽、吞吐率，延迟和抖动。性能在后面几章还会涉及到。

3.1 数据和信号

图 3-1 表示了一个科学家在一家研究公司工作的场景，需要从在线书店订购一本与其研究相关的书。



原书第 54 页 下面为图中中英文对照翻译

Sky Research 天空研究

Application 应用层

Network 网络层

Data-link 数据链路层

Physical 物理层

To other ISPs 到其他 ISP

Point-to-point WAN 点到点广域网

LAN switch 局域网交换

WAN switch 广域网交换

Router 路由器

to other ISPs 到其他 ISP

National ISP 国家 ISP

ISP 因特网服务提供商

Legend 图例

Point-to-point WAN 点到点 WAN

LAN switch LAN 交换机

WAN switch WAN 交换机

Router 路由器

Scientific Book 科学书

图 3-1 物理层的通信

我们可以设想 Alice（科学家的工作的电脑）和 Bob（提供在线服务的电脑）之间通信的不同层次。应用、传输、网络或者数据链路层通信是逻辑的；物理层通信是物理的。简而言之，我们仅仅表示出了主机到路由器，路由器到路由器和路由器到主机，但交换也存在于物理通信中。

尽管 Alice 和 Bob 需要交换数据，物理层的通信意味着交换信号。数据需要传输和接收，但媒介不得不把数据变换成信号。数据和信号可以是**模拟（analog）**或者**数字（digital）**形式。

3.1.1 模拟数据和数字数据

数据可以是模拟或数字数据。模拟数据（analog data）指连续的信息；数字数据（digital data）指离散状态的信息。例如，一个模拟时钟有时针、分针和秒针，它们以连续的方式给出时间信息，针的移动是连续的。与此不同的是，报告小时和分钟的数字时钟会突然从 8:05 变成 8:06。

模拟数据，比如人类语音产生的声音，采用连续值。当人说话时，会在空气中形成模拟形式的声波。这个声波能被麦克风捕获并转换成模拟信号，或者采样转换成数字信号。

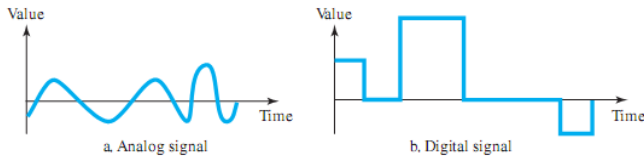
数字数据采用离散值。例如，数据以 0 和 1 的形式存储在计算机内存中。它们可以被转换成数字信号或者被调制成模拟信号，在介质中传输。

3.1.2 模拟信号与数字信号

就像它们所表示的数据一样，**信号（signal）**可以是模拟信号也可以是数字信号。**模拟信号（analog signal）**在一段时间内有无穷多个强度等级。当信号波由值 A 变为值 B 时，沿着它变化的路径有无穷多个值。相反，**数字信号（digital signal）**只有有限个已定义的数值。

虽然每个值可以是任何数字，但通常情况下如 0 和 1 那样简单。

表示信号的最简单方法是将它们绘制在直角坐标系中。垂直坐标表示信号值或者强度，水平坐标轴表示时间。图 3-2 描绘了一个模拟信号和一个数字信号。表示模拟信号的曲线通过了无限多个数值点。然而，数字信号的垂直线表示了信号值到值的突变。



原书第 55 页 下面为图中中英文对照翻译

Analog signal 模拟信号

Digital signal 数字信号

Time 时间

Value 值

图 3-2 模拟与数字信号的比较

3.1.3 周期信号与非周期信号

模拟与数字信号都可能以两种形式之一出现：周期信号或者非周期信号。

周期信号 (periodic signal) 在一个可测量的时间范围内（称为一个**周期 (period)**）完成一种模式，并且在后续的相同时间范围内重复这一模式。一个完整模式的实现称为一个循环（cycle）。而**非周期信号 (nonperiodic signal)** 的变化则不会在时间上重复一个模式或循环。模拟和数字信号可以是周期的或者非周期的。然而，在数据通信中，通常使用周期模拟信号和非周期数字信号，这我们将在后面章节见到。

In data communications, we commonly use periodic analog signals and nonperiodic digital signals.

在数据通信中，我们通常使用周期模拟信号和非周期数字信号。

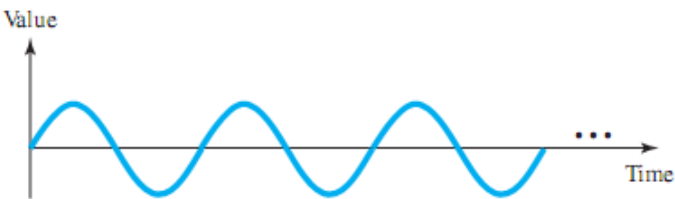
3.2 周期模拟信号

周期模拟信号可以分为简单或复合两种。简单模拟信号，如**正弦波 (sine wave)**，不能再分解为更简单的信号。一个复合模拟信号则可以看做是由多个正弦波信号组成的。

3.2.1 正弦波

正弦波是周期模拟信号的最基本形式。当看做一条简单的振荡曲线时，正弦波在一个循

环内的变化是光滑的和一致的，是一根连续和波动的曲线。图 3-3 表示了一个正弦波。每个循环由时间轴上方的单弧和紧跟的时间轴下方的单弧构成。



原书 56 页

Time 时间

Value 值

图 3-3 正弦波

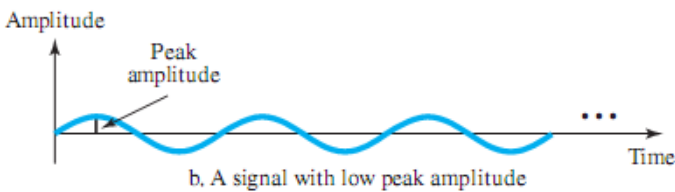
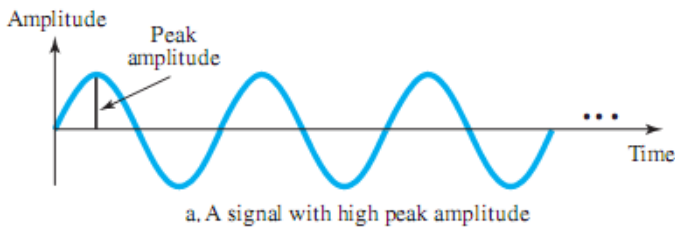
We discuss a mathematical approach to sine waves in Appendix E.

我们在附录 E 中讨论正弦波的数学方法。

正弦波可用三个参数表示：**峰值振幅**、**频率**和**相位**。这三个参数完全描述了一个正弦波。

峰值振幅

信号的**峰值振幅**（**peak amplitude**）是其最高强度的绝对值，与其携带的能量成比例。对于电信号，峰值振幅通常用伏特数来测量。图 3-4 表示了两个信号和它们的峰值振幅。



原书 57 页

A signal with high peak amplitude 高峰值振幅的信号

A signal with low peak amplitude 低峰值振幅的信号

Peak amplitude 峰值振幅

Time 时间

Amplitude 振幅

图 3-4 相同相位和频率但振幅不同的两个信号

例 3-1

家用电源的功率可以用峰值振幅为 155V 到 170V 的正弦波表示。但是，大家都知道美国家用的电压是 110V 到 120V。不一样的原因在于这些是均方根（rms）值。信号平方后再计算平均振幅。峰值等于 $2^{1/2} \times \text{rms}$ 。

例 3-2

电池电压是恒定的，这个恒定值可以看作是一个正弦波，我们会在后面看到。例如 AA 电池的峰值通常是 1.5V。

周期与频率

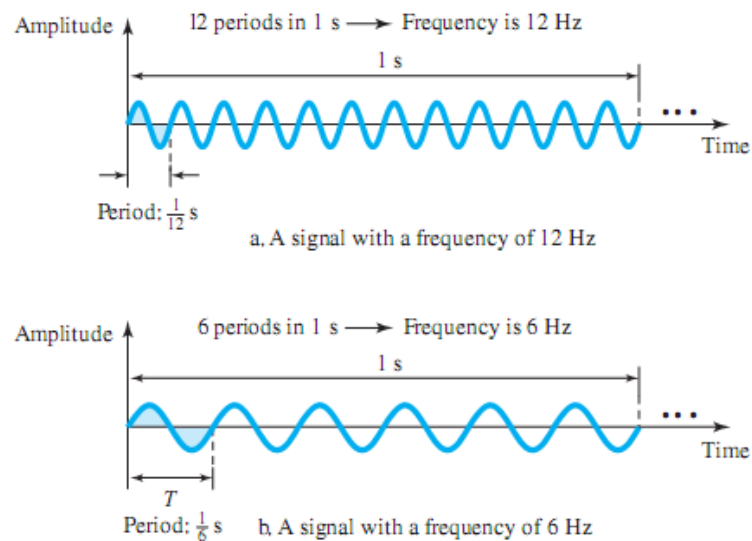
周期（Period）是信号完成一个循环所需要的时间，以秒为单位。**频率（frequency）**是指 1 秒内的周期数。注意周期与频率是按两种方式定义的同一种特性。周期是频率的倒数，频率是周期的倒数，如下列公式所示。

$$f = \frac{1}{T} \text{ 和 } T = \frac{1}{f}$$

Frequency and period are the inverse of each other.

频率与周期互为倒数。

图 3-5 显示了两个信号和它们的频率。通常周期用秒（s）来表示。频率用**赫兹（Hz）**来表示，它是每秒的循环数，周期和频率的单位如表 3-1 所示。



原书第 58 页

12 periods in 1 s → Frequency is 12 Hz 1 秒 12 个周期→频率为 12Hz

6 periods in 1 s → Frequency is 6 Hz 1 秒 6 个周期→ 频率为 6Hz

A signal with a frequency of 12 Hz 一个频率 12Hz 的信号

A signal with a frequency of 6 Hz 一个频率 6Hz 的信号

Period 周期

$1/12\text{ s}$ $1/12$ 秒

$1/6\text{ s}$ $1/6$ 秒

Amplitude 振幅

Frequency 频率

Time 时间

图 3-5 振幅和相位相同但频率不同的两个信号

原书第 58 页

Table 3.1 Units of period and frequency

Period		Frequency	
Unit	Equivalent	Unit	Equivalent
Seconds (s)	1 s	Hertz (Hz)	1 Hz
Milliseconds (ms)	10^{-3} s	Kilohertz (kHz)	10^3 Hz
Microseconds (μs)	10^{-6} s	Megahertz (MHz)	10^6 Hz
Nanoseconds (ns)	10^{-9} s	Gigahertz (GHz)	10^9 Hz
Picoseconds (ps)	10^{-12} s	Terahertz (THz)	10^{12} Hz

表 3-1 周期和频率单位

周期	频率
----	----

单位	等量	单位	等量
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

例 3-3

家用电源的频率是 60Hz (欧洲是 50Hz)。这个正弦波的周期就可以确定如下：

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0.0166\text{s} = 0.0166 \times 10^3 \text{ms} = 16.6\text{ms}$$

这就是说，我们家用电的周期是 0.0166s，或 16.6ms。我们的眼睛不够敏感，觉察不出振幅的快速变化。

例 3-4

用微秒表示周期为 100ms。

解答

从表 3-1 中找到 1ms 的等价值 ($1\text{ms} = 10^{-3}\text{s}$) 和 1s 的等价值 ($1\text{s} = 10^6\mu\text{s}$)，做以下替换：

$$100\text{ms} = 100 \times 10^{-3}\text{s} = 100 \times 10^{-3} \times 10^6\mu\text{s} = 10^2 \times 10^{-3} \times 10^6\mu\text{s} = 10^5\mu\text{s}$$

例 3-5

一个信号的周期是 100ms。那么它以千赫为单位表示的频率是多少？

解答

先把 100ms 表示为秒，然后从周期计算出频率 ($1\text{Hz} = 10^{-3}\text{kHz}$)。

$$100\text{ms} = 100 \times 10^{-3}\text{s} = 10^{-1}\text{s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10^{-1}} \text{Hz} = 10\text{Hz} = 10 \times 10^{-3}\text{kHz} = 10^{-2}\text{kHz}$$

关于频率的其他内容

我们已经知道，频率是信号与时间的关系，而一个波形的频率是一秒钟内完成的周期的次数。但从另一种角度可把频率看作变化速率的计量单位。电磁信号是振荡的波形，也就是说，它们会在平均能量级上下持续而且可预测地波动。40Hz 的信号是 80Hz 信号频率的一半，完成一个循环的时间是 80Hz 信号的两倍，所以每一个循环也需要两倍长的时间从最低电压变化到最高电压。所以，尽管将频率描述为每秒内的循环次数，通常也用于计量信号对于时间的变化速率。

Frequency is the rate of change with respect to time. Change in a short span of time means high frequency. Change over a long span of time means low frequency.

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。

如果信号值在非常短的时间跨度内发生变化，则其频率高；如果在较长的时间跨度内发生变化，则其频率低。

两个极端

若信号持续不变化会怎样呢？若信号在整个存在的时间内始终保持稳定的电平值会怎样呢？在这种情况下，频率值为 0。从概念上来讲，这个想法很简单。如果信号始终没有变化，则它永远不能完成一个循环，所以它的频率为 0。

如果信号瞬间发生变化会怎么样呢？如果信号瞬间由一个电平跳变到另一电平情况又会怎么样呢？在这种情况下，其频率值是无穷大。换句话说，当信号瞬间发生变化时，它的周期是 0，既然频率是周期的倒数，因而频率等于 $1/0$ ，或者是无穷大（无边界）。

**If a signal does not change at all, its frequency is zero.
If a signal changes instantaneously, its frequency is infinite.**

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。

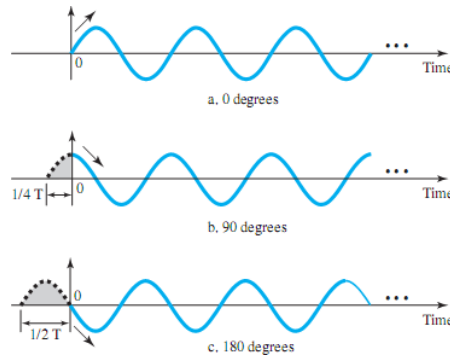
3.2.2 相位

术语**相位（phase）**或相位漂移，是指波形相对于时间零的位置。如果我们将波形想像为能够沿着时间轴向后或者向前平移，则相位描述的就是这种偏移的数量。它指明了第一个循环的状态。

Phase describes the position of the waveform relative to time 0.

相位描述了波形相对于时间零的位置。

相位使用角度或者弧度进行计量 [360° 等于 2π 弧度； 1° 等于 $2\pi/360$ 弧度，1 弧度等于 $360/(2\pi)$]。一个 360° 相位漂移对应于一个完整周期；一个 180° 相位漂移对应于半个周期；一个 90° 相位漂移对应于四分之一周期（见图 3-6）。



原书第 60 页

Time 时间

Degree 度

图 3-6 振幅和频率相同但相位不同的三个正弦波

从图 3-6 中，我们可以看出：

- a. 相位为 0° 从 0 时刻以零振幅开始，然后振幅递增。
- b. 相位为 90° 从 0 时刻以峰值振幅开始，然后振幅递减。
- c. 相位为 180° 从 0 时刻以零振幅开始，然后振幅递减。

另一种看相位的方式是位移或偏移。我们可以看出：

- a. 相位为 0° 的正弦波没有偏移。
- b. 相位为 90° 的正弦波偏移 $1/4$ 周期。但是，注意在 0 时刻前信号并不真的存在。
- c. 相位为 180° 的正弦波偏移 $1/2$ 个周期。但是，注意在 0 时刻前信号并不真的存在。

例 3-6

正弦波相对于 0 时刻的偏移量是 $1/6$ 周期，相位的角度值和弧度值是多少？

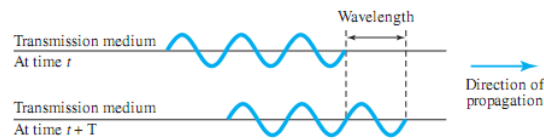
解答

一个完整的周期是 360° ，所以 $1/6$ 周期是：

$$\frac{1}{6} \times 360 = 60^\circ = 60 \times \frac{2\pi}{360} \text{ rad} = \frac{\pi}{3} \text{ rad} = 1.046 \text{ rad}$$

3.2.3 波长

波长 (wavelength) 是信号通过传输介质传播的另一个特性。波长将简单正弦波的周期或频率与介质的**传播速度 (propagation speed)** 结合在一起 (见图 3-7)。



原书 61 页

Direction of propagation 传播方向

Wavelength 波长

Transmission medium 传输介质

At time 时间

图 3-7 波长和周期

尽管信号的频率与介质无关，但波长取决于频率和介质。波长是任何信号的一个属性。在数据通信中，我们一般使用波长来描述光纤中的光传输。波长是一个简单信号在一个周期能传播的距离。

如果给定了传播速度（光速）和信号周期，就可以计算出波长。但是，因为周期和频率相关，如果我们用 λ 表示波长、用 c （光速）表示传播速度、用 f 表示频率，那么我们可以得到：

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

$$\lambda = c / f$$

电磁信号的传播速度取决于介质和信号频率。例如，在真空中，光以 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 的速度传播。在空气中速度会低些，而电缆中速度更低。

波长通常以微米而不是米为单位计量。例如，空气中红光（频率 = 4×10^{14} ）的波长是：

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 10^{14}} = 0.75 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.75 \mu\text{m}$$

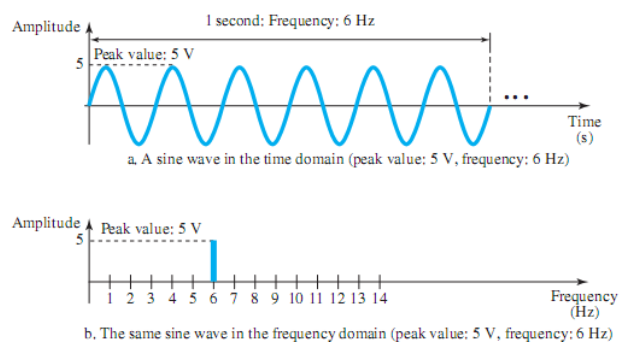
但是，在同轴电缆或光纤电缆中，因为线缆中的传播速度降低了，所以波长更短（0.5

μm)。

3.2.4 时域和频域

一个正弦波可以通过它的振幅、频率和相位完整定义。前面已经使用**时域图** (**time-domain plot**) 来表示正弦波。时域图显示了信号振幅随时间的变化情况 (振幅时间图)。在时域图中, 相位并未显式地表示出来。

为了表示振幅与频率的关系, 可以使用**频域图** (**frequency-domain plot**)。频域图只和峰值和频率相关, 不显示一个周期中的振幅变化。图 3-8 显示了信号的时域图和频域图。



原书 62 页

Amplitude 振幅

Time 时间

a. A sine wave in the time domain (peak value: 5 V, frequency: 6 Hz)

正弦波的时域 (峰值: 5 V, 频率: 6 Hz)

b. A same sine wave in the frequency domain (peak value: 5 V, frequency: 6 Hz)

正弦波的频域 (峰值: 5 V, 频率: 6 Hz)

Peak value 峰值

Frequency 频率

图 3-8 正弦波的时域图和频域图

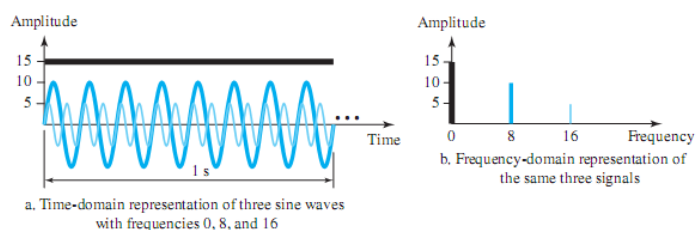
很明显频域图更容易画, 并且传递了时域图中能找到的信息。频域的优点是我们能马上看到频率值和峰值振幅值。完整的正弦波通过一个尖峰表示。尖峰的位置表示了频率, 尖峰的高度表示了峰值振幅。

A complete sine wave in the time domain can be represented by one single spike in the frequency domain.

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 3-9 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。



原书 62 页

Amplitude 振幅

Time 时间

Frequency 频率

a. Time-domain representation of three sine waves with frequencies 0, 8, and 16

频率为 0、8 和 16 的三个正弦波的时域表示

b. Frequency-domain representation of the same three signals

同样三个信号的频域表示

图 3-9 三个正弦波的时域和频域

3.2.5 复合信号

到目前为止，我们主要讨论的是简单正弦波。简单正弦波在日常生活中有很多应用。可以发送单一正弦波将电能从一个位置传送到另一个位置。例如，电力公司通过发送频率为 60Hz 的单一正弦波将电能分送到我们的住所和商业部门。另一个例子是在夜贼打开我们住所的房门或者窗户时，我们可以使用单一正弦波向安全中心发送警报。第一种情况下，正弦波是携带运送能量；第二种情况下，正弦波是危险信号。

如果使用单一正弦波来传输电话的谈话，就毫无意义，因为它不会携带任何信息，我们只会听到嗡嗡声。我们将在第 4 章和第 5 章中看到，我们需要复合信号来进行数据通信。**复合信号（composite signal）**由许多简单正弦波构成。

A single-frequency sine wave is not useful in data communications;
we need to send a composite signal, a signal made of many simple sine waves.

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。

在 20 世纪早期，法国数学家 Jean-Baptiste Fourier 证明了任何复合信号都是由具有不同频率、相位和振幅的简单正弦波信号组成的。在附录 E 中讨论了傅里叶分析（Fourier analysis），这里我们只给出这个概念。

According to Fourier analysis, any composite signal is a combination of simple sine waves with different frequencies, amplitudes, and phases. Fourier analysis is discussed in Appendix E.

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 E 讨论了傅里叶分析。

复合信号可以是周期性的也可以是非周期性的。周期复合信号可以分解成一系列具有离散频率（取整数值 1、2、3 等的频率）的简单正弦波。非周期复合信号可以分解成具有连续频率（取实数值的频率）的无穷简单正弦波的组合。

If the composite signal is periodic, the decomposition gives a series of signals with discrete frequencies; if the composite signal is nonperiodic, the decomposition gives a combination of sine waves with continuous frequencies.

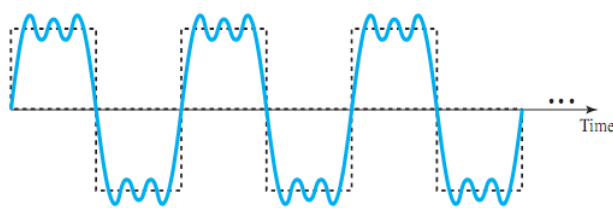
如果复合信号是周期性的，分解得到的是一系列具有离散频率的信号。

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。

例 3-8

图 3-10 显示了频率为 f 的周期复合信号。这种信号不是数据通信中的典型信号。我们可以把它看成三个告警系统，每一个有不同的频率。这个信号的分析可以让我们理解如何分解信号。

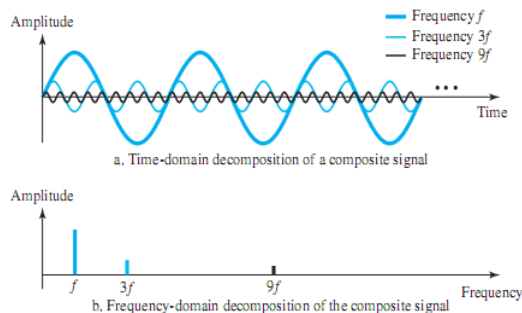
用人工把这个信号分解成一系列简单正弦波是困难的。但是，有工具（软硬件）可以帮助我们做到。我们不关心它是如何做到的，我们只对结果感兴趣。图 3-11 显示了上面信号在时域和频域中的分解结果。



原书 64 页

Time 时间

图 3-10 复合周期信号



原书 64 页

Time 时间

Amplitude 振幅

Frequency 频率

Time-domain decomposition of a composite signal 复合信号的时域分解

Frequency-domain decomposition of a composite signal 复合信号的频域分解

图 3-11 复合周期信号在时域和频域中的分解

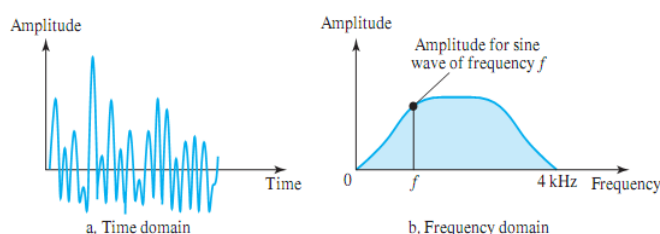
频率为 f 的正弦波的振幅几乎和复合信号的峰值一样。频率为 $3f$ 的正弦波的振幅是第一个的三分之一，频率为 $9f$ 的正弦波的振幅是第一个的九分之一。频率为 f 的正弦波的频率和复合信号的频率一样，称为**基础频率**（**fundamental frequency**）或者**第一谐波**（**harmonic**）。

频率为 $3f$ 的正弦波的频率是基础频率的 3 倍，称为第三谐波。频率为 $9f$ 的正弦波的频率是基础频率的 9 倍，称为第九谐波。

注意：分解后信号的频率是离散的，频率为 f 、 $3f$ 和 $9f$ 。因为 f 是整数，所以 $9f$ 也是整数。没有诸如 $1.2f$ 或 $2.6f$ 的频率。周期复合信号的频域总是由离散尖峰组成。

例 3-9

图 3-12 表示了一个非周期复合信号。它可以在一个或两个词发音时由麦克风或电话机产生。这种情况下，复合信号不可能是周期的，因为我们不可能以完全相同的音调重复相同的词或语句。



原书 65 页

Time 时间

Amplitude 振幅

Frequency 频率

Time domain 时域

Frequency domain 频域

Amplitude for sine wave of frequency f 频率 f 正弦波的振幅

图 3-12 非周期信号的时域和频域

在这个复合信号的时域表示中，有无数个简单正弦频率。虽然人类语音中的频率数量是无限的，但是范围是有限制的。普通人会产生 0Hz 到 4kHz 之间的频率。

注意：信号的频率分解后得到的是一条连续曲线。在实数区间 $[0.0, 4000.0]$ 内有无数个（实数值）频率。为了找到频率为 f 的振幅，我们在 f 处画一条垂直线与曲线相交。垂直线的高度就是相应频率的振幅。

3.2.6 带宽

复合信号包含的频率范围称为**带宽（bandwidth）**。带宽通常是两个数的差值。例如，如果一个复合信号包含 1000 到 5000 的频率，它的带宽就是 5000-1000，或为 4000。

The bandwidth of a composite signal is the difference between the highest and the lowest frequencies contained in that signal.

复合信号的带宽是信号最高频率与最低频率的差值。

图 3-13 说明了带宽的概念。图中描述了两个复合信号，一个是周期信号而另一个是非

周期信号。周期信号的带宽包含 1000 到 5000 之间（1000、1001、1002、…）的所有整数频率。非周期信号的带宽有相同的范围，但频率是连续的。

例 3-10

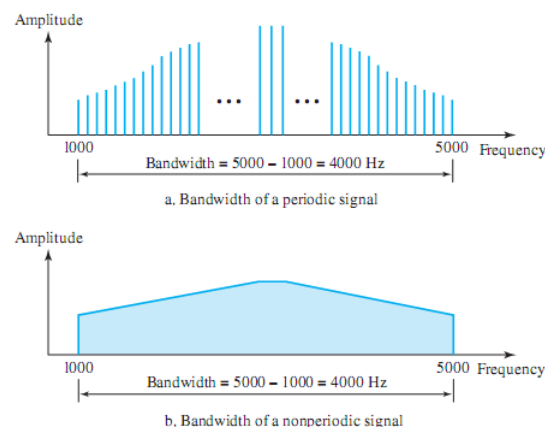
如果一个周期信号分解为 5 个正弦波信号，频率分别为 100，300，500，700 和 900Hz，那么其带宽是多少？假定所有分量的最大振幅都为 10V，试画出该信号的频谱。

解答

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 3-14）。



原书 66 页

Amplitude 振幅

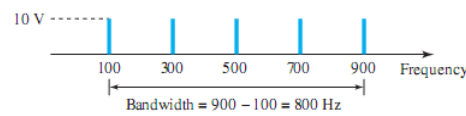
Frequency 频率

Bandwidth 带宽

Bandwidth of a periodic signal 一个周期信号的带宽

Bandwidth of a nonperiodic signal 一个非周期信号的带宽

图 3-13 周期和非周期复合信号的带宽



原书 66 页

Frequency 频率

Bandwidth 带宽

图 3-14 例 3-10 的带宽

例 3-11

一个周期信号的带宽是 20Hz，其最高频率是 60Hz，最低频率是多少？如果信号包含具有相同振幅的所有整数频率，试画出其频谱。

解答

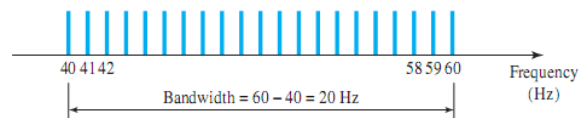
设 f_h 为最高频率， f_l 为最低频率， B 为带宽，则：

$$B = f_h - f_l \rightarrow 20 = 60 - f_l \rightarrow f_l = 60 - 20 = 40\text{Hz}$$

频谱包含所有整数频率。用一系列尖峰表示（见图 3.15）。

例 3-12

一个非周期复合信号的带宽为 200kHz，中间频率为 140kHz，峰值振幅为 20V。两个频率极值的振幅为 0。画出这个信号的频域。



原书 67 页

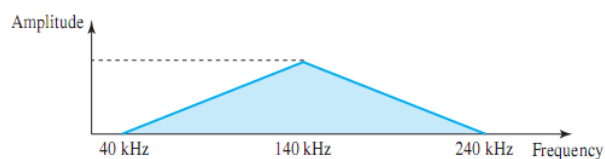
Frequency 频率

Bandwidth 带宽

图 3-15 例 3-11 的带宽

解答

最低频率一定是 40kHz，而最高频率一定是 240kHz。图 3-15 显示了频域和带宽。



原书 67 页

Frequency 频率

Amplitude 振幅

图 3-16 例 3-12 的带宽

例 3-13

非周期复合信号的一个例子是调幅（AM）无线电站传播的信号。在美国，分配给每个 AM 无线电站 10kHz 的带宽。AM 无线电的总带宽从 530kHz 到 1700kHz。我们会在第 5 章说明这个 10kHz 带宽后面的基本原理。

例 3-14

非周期复合信号的另一个例子是调频（FM）无线电站传播的信号。在美国，分配给每个 FM 无线电站 200kHz 的带宽。FM 无线电的总带宽从 88MHz 到 108MHz。我们会在第 5 章说明这个 200kHz 带宽后面的基本原理。

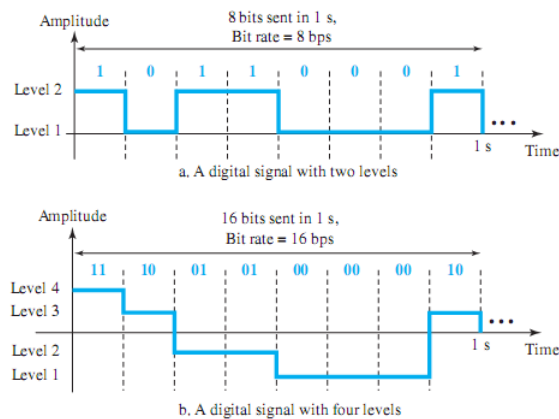
例 3-15

非周期复合信号的另一个例子是老式模拟黑白电视接收的信号。电视屏幕由像素（图像元素）组成，每个像素要么白要么黑。屏幕每秒扫描 30 次。（实际上每秒扫描 60 次，但是隔行扫描的，一个回合扫描奇数线，下一个回合扫描偶数线）。如果我们假定分辨率为 525×700 （525 条垂直线，700 条水平线），比率为 3:4，那么每个屏幕就会有 367500 个像素。如果屏幕每秒扫描 30 次，每秒就是 $367500 \times 30 = 11025000$ 个像素。最坏的情况是黑色像素和白色像素交替。这种情况下，我们需要用最低振幅表示一种颜色而用最高振幅表示另一种颜色。每个周期我们能发送两个像素。因此，每秒我们需要 $11025000/2 = 5512500$ 个周期（或 Hz）。所需的带宽是 5.5124MHz。最坏情况发生的可能性很小，假定只需要这个带宽的 70%，即 3.85MHz。因为还需要音频和同步信号，为每个黑白电视频道留出了 4MHz 带宽。模拟彩色电视频道的带宽为 6Mhz。

3.3 数字信号

信息除了可以用模拟信号表示以外，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 0 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位。图 3-17 表示了两个信号，一个信号有两个电平而另一个信号有四个电平。

图 3-17a 中，每个电平可以发送 1 位，而图 3-17b 中每个电平可以发送 2 位。一般，如果信号有 L 个电平，则每个电平需要 $\log_2 L$ 位。因为这，图 3-17b 能发送 $\log_2 4 = 2$ 位。



原书 68 页

8 bits sent in 1 s, 1 秒发送 8 比特

Bit rate = 8 bps 比特率=8bps

16 bits sent in 1 s, 1 秒发送 16 比特

Bit rate = 16 bps 比特率=16bps

Amplitude 振幅

Time 时间

Level 等级

a. A digital signal with two levels a.两个电平值得数字信号

b. A digital signal with four levels b.四个电平值得数字信号

图 3-17 两个数字信号：一个有两个电平而另一个有四个电平

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。
每个信号电平用 3 位表示。

$$\text{每个电平的位数} = \log_2 8 = 3$$

例 3-17

一个数字信号有 9 个电平，问每个电平可表示多少位？我们根据公式计算，得出每个信号电平用 3.17 个位表示。但是，这个答案是不现实的。每个电平发送的位数必须是整数并且是 2 的幂。这个例子中，4 位用来表示一个电平。

3.3.1 比特率

大多数数字信号都是非周期性的,这样周期和频率就不再适用。另一个术语—比特率(而不是频率)用来描述数字信号。**比特率 (bit rate)** 是 1 秒中发送的位数,以**每秒比特位 (bits per second, bps)** 表示。图 3-17 表示了两个信号的比特率。

例 3-18

假定我们需要每分钟 100 页的速率下载文本文档。所需的信道比特率是多少?

解答

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, 比特率为:

$$100 \times 24 \times 80 \times 8 = 1536000 \text{ bps} = 1.536 \text{ Mbps}$$

例 3-19

我们会在第 4 章中看到, 数字化语音信道是通过数字化 4kHz 带宽的模拟语音信号形成的。我们需要以最高频率的 2 倍对信号进行采样 (即每赫兹两个样本)。我们假定每个样本需要 8 位。那么所需的比特率是多少?

解答

比特率计算如下:

$$2 \times 4000 \times 8 = 64000 \text{ bps} = 64 \text{ kbps}$$

例 3-20

高清晰电视 (HDTV) 的比特率是多少?

解答

HDTV 使用数字信号广播高质量视频信号。HDTV 屏幕通常为 16:9 (普通电视为 4:3), 表示屏幕更宽。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:

$$1920 \times 1080 \times 30 \times 24 = 1492992000 \approx 1.5 \text{ Gbps}$$

电视台通过压缩把比特率降为 20Mbps 到 40Mbps。

3.3.2 位长

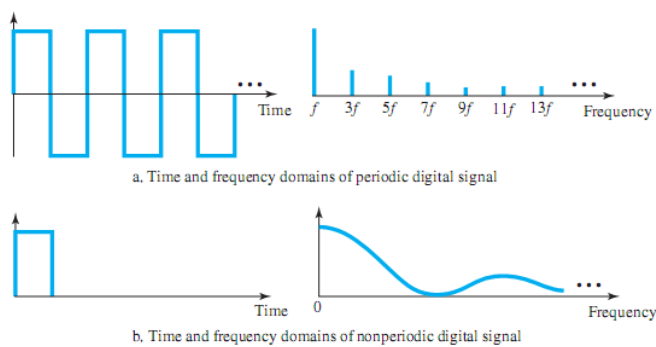
我们已经讨论过模拟信号的波长概念：一个周期在传输介质上的距离。我们可以为数字信号定义相似的概念：位长。**位长（bit length）**是一位在传输介质上的距离。

$$\text{位长} = \text{传播速度} \times \text{位持续时间}$$

3.3.3 数字信号是一种复合模拟信号

基于傅里叶分析（见附录 E），数字信号是复合模拟信号。正如你猜想的，带宽是无穷大的。当我们考虑一个数字信号时，可以直观地提出这个概念。在时域中，数字信号由连接的垂直和水平线段组成。时域中的垂直线表示为无穷大的频率（随时间突变），而时域中的水平线表示为 0 的频率（不随时间变化）。从频率 0 变为频率无穷大（以及反之）暗示两者间的所有频率都是域的一部分。

傅里叶分析可以用来分解数字信号。如果数字信号是周期性的（在数据通信中较少见），分解后的信号可以表示为无穷大带宽和离散频率的频域。如果数字信号是非周期性的，分解后的信号仍然是无穷大带宽，但频率是连续的。图 3-18 显示了周期数字信号和非周期数字信号以及它们的带宽。



原书第 70 页

Frequency 频率

Time 时间

Time and frequency domains of periodic digital signal 周期数字信号的时域和频域

Time and frequency domains of nonperiodic digital signal 非周期数字信号的时域和频域

图 3-18 周期和非周期数字信号的时域和频域

注意：两个带宽都是无穷大的，但是周期信号有离散频率而非周期信号有连续频率。

3.3.4 数字信号的传输

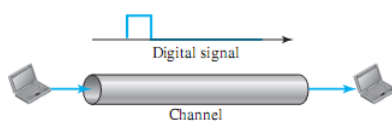
前面的讨论断言数字信号（周期性或非周期性）是由零到无穷大范围内的频率组合成的复合模拟信号。对于下面的讨论，考虑非周期数字信号的情况，类似于我们在数据通信中碰到的信号。基本问题是我们如何从 A 点发送数字信号到 B 点？我们使用两种不同的方法传输数字信号：基带传输和宽带传输（使用调制）。

A digital signal is a composite analog signal with an infinite bandwidth.

数字信号是带宽无穷的复合模拟信号。

基带传输

基带传输就是通过信道发送数字信号，该信号不转换成模拟信号，图 3-19 表示了**基带（baseband）**传输。



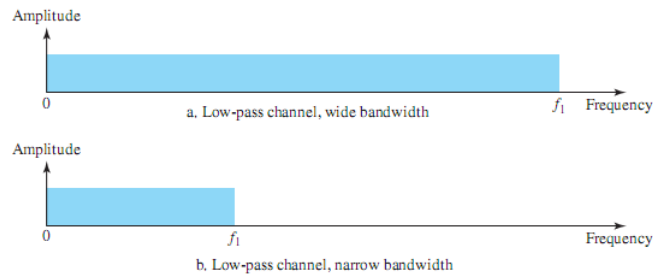
原书第 71 页

Digital signal 数字信号

Channel 信道

图 3-19 基带传输

基带传输需要一个**低通信道（low-pass channel）**，即带宽从 0 开始的信道。如果我们的带宽只组成一条信道的专用介质，就是这种情况。例如，连接两台计算机的电缆的整个带宽就是一条单信道。另一个例子，我们可以连接多台计算机到一条总线上，但是不允许同一时刻超过两个站进行通信。我们有低通信道，我们就可以用它来进行基带传输。图 3-20 显示了两条低通信道：一条是窄带而另一条是宽带。我们需要记住无穷大带宽的低通信道仅是理想情况，我们不可能在现实中有这样的信道。但是，我们可以接近。



原书 71 页

Amplitude 振幅

Frequency 频率

Low-pass channel, wide bandwidth 低通信道，高带宽

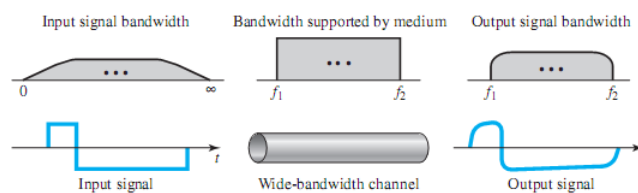
Low-pass channel, narrow bandwidth 低通信道，窄带宽

图 3-20 两条低通信道的带宽

让我们考察基带传输的两种情况：宽带宽的低通信道和有限带宽的低通信道。

情形 1：宽带宽的低通信道

如果我们想保持垂直段垂直而水平段水平的非周期数字信号的准确形式，我们需要发送整个频谱（零和无穷大之间频率的连续范围）。如果我们在发送方和接收方之间有一条无穷大带宽的专用介质，并保持复合信号的每个成分的准确振幅，这是可能的。尽管这在计算机里是可能的（比如在 CPU 和内存之间），但在两个设备间是不可能的。幸运的是，带宽边界的频率振幅太小以至于可以忽略不计。这意味着如果我们的介质具有很宽的带宽（比如同轴电缆或光纤），两个站就可以使用具有非常好准确性的数字信号进行通信，如图 3-21 所示。注意 f_1 接近于 0 而 f_2 很大。



原书 72 页

Input signal bandwidth 输入信号带宽

Input signal 输入信号

Bandwidth supported by medium 介质支持带宽

Wide-bandwidth channel 宽带信道

output signal bandwidth 输出信号带宽

output signal 输出信号

图 3-21 使用专用介质的基带传输

虽然输出信号不是原始信号的严格复制品，但是仍然可以从接收到的信号中得出数据。注意，虽然一些频率会被介质阻止，但它们不是主要的。

Baseband transmission of a digital signal that preserves the shape of the digital signal is possible only if we have a low-pass channel with an infinite or very wide bandwidth.

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

例 3-21

专用信道（介质的整个带宽用于一条单信道）的一个例子是 LAN。几乎现在的每一个有线 LAN 使用专用信道用于两个站之间的互相通信。在多点连接的总线拓扑结构 LAN 中，每个时刻只有两个站可以互相通信（时间共享），而其他站限制发送数据。在星型拓扑结构 LAN 中，每个站和集线器之间的整个信道用于这两个实体间的通信。我们会在第 13 章学习 LAN。

情形 2：有限带宽的低通信道

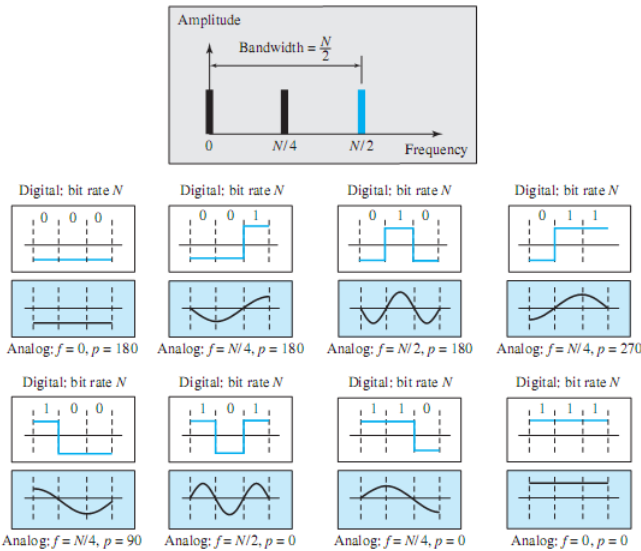
在有限带宽的低通信道中，我们把数字信号近似成模拟信号。近似的程度取决于可用的带宽。

大致近似

让我们假定我们有比特率为 N 的数字信号。如果我们想发送模拟信号来大致近似这个信号，我们需要考虑最坏情况，即数字信号中变化的最大数。这发生在信号携带了序列 01010101... 或者序列 10101010...。为了模拟这两种情况，我们需要频率为 $f = N/2$ 的模拟信号。1 为正尖峰值，0 为负尖峰值。我们每个周期发送 2 位，那么模拟信号的频率是这个比特率的一半，即 $N/2$ 。但是，只有这个频率不能模拟出所有的模式，我们需要更多的成分。最大的频率是 $N/2$ 。作为这个概念的一个例子，让我们先看看如何使用模拟信号模拟 3 位模式的数字信号。图 3-22 说明了这个设想。对两个相似情形（000 和 111）做了仿真，000 用频率 $f = 0$ 与相位为 180° ，111 用频率 $f = 0$ 与相位为 0° 。对两种最坏情形（010 和 101）的模拟信号做了仿真，频率 $f = N/2$ 与相位为 180° 和 0° 。其余四种情形只能采用 $f = N/2$

仿真，相位分别取 180° ， 270° ， 90° 和 0° 。换言之，需要一个信道来处理 0， $N/4$ 和 $N/2$ 。
这个大致近似称为第一谐波（ $N/2$ ）频率。所需的带宽是：

带宽 = $N/2 - 0 = N/2$



原书 73 页

Amplitude 振幅

Bandwidth 带宽

Digital: bite rate 数字：位速率

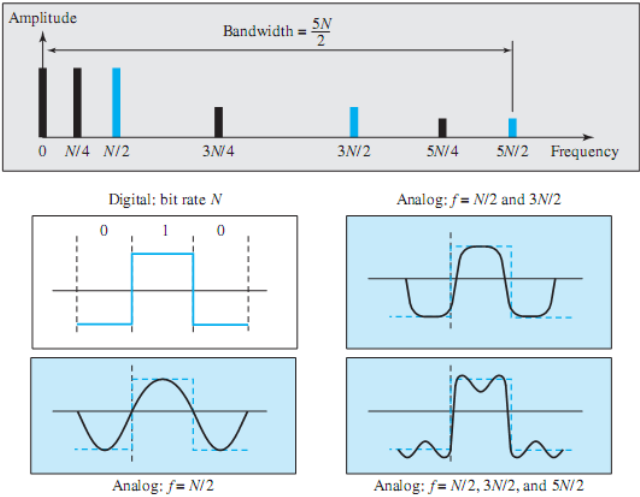
Analog 模拟

图 3-22 对于最坏情形的数字信号使用第一谐波的大致近似

更好近似

为了使得模拟信号的形状更像数字信号，我们需要增加频率的更多谐波。我们需要增加带宽。我们可以增加带宽到 $3N/2$ 、 $5N/2$ 、 $7N/2$ 等。图 3.23 说明了这种增加对于一种最坏情形（模式 010）的影响。注意我们显示的只是每个谐波的最高频率。我们使用第一、第三和第五谐波。所需的带宽现在是 $5N/2$ ，即最低频率 0 和最高频率 $5N/2$ 之间的差值。正如我们前面强调的，我们需要记住所需带宽与比特率成比例。

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。



原书 74 页

Amplitude 振幅

Frequency 频率

Bandwidth 带宽

Digital: bit rate 数字：位速率

Analog 模拟

图 3-23 使用三个第一谐波模拟数字信号

通过使用这种方法，表 3-2 显示了我们以不同速率发送数据所需的带宽。

原书 74 页

Table 3.2 Bandwidth requirements

Bit Rate	Harmonic 1	Harmonics 1, 3	Harmonics 1, 3, 5
$n = 1 \text{ kbps}$	$B = 500 \text{ Hz}$	$B = 1.5 \text{ kHz}$	$B = 2.5 \text{ kHz}$
$n = 10 \text{ kbps}$	$B = 5 \text{ kHz}$	$B = 15 \text{ kHz}$	$B = 25 \text{ kHz}$
$n = 100 \text{ kbps}$	$B = 50 \text{ kHz}$	$B = 150 \text{ kHz}$	$B = 250 \text{ kHz}$

表 3-2 带宽需求

比特率	谐波 1	谐波 1, 3	谐波 1, 3, 5
n=1kbps	B=500Hz	B=1.5kHz	B=2.5kHz
n=10kbps	B=5kHz	B=15kHz	B=25kHz
n=100kbps	B=50kHz	B=150kHz	B=250kHz

例 3-22

如果我们需要使用基带传输发送 1Mbps，那么低通信道所需的带宽是多少？

解答

答案取决于所需的准确性。

a. 最小带宽、大致近似，是 $B = \text{比特率}/2$ ，即 500kHz。我们需要 0 到 500kHz 范围频率的低通信道。

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 $B = 5 \times 500\text{kHz} = 2.5\text{MHz}$ 。

例 3-23

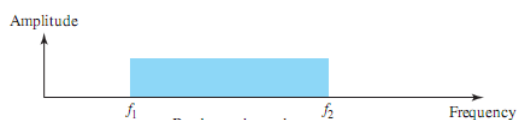
我们有一条带宽为 100kHz 的低通信道。该信道的最大比特率是多少？

解答

如果我们使用第一谐波可以得到最大比特率。比特率是 2 倍有效带宽，即 200kbps。

宽带传输（使用调制）

宽带传输或调制就是把数字信号转换成模拟信号传输。调制允许我们使用**带通信道**（**bandpass channel**），即带宽不从 0 开始的信道。这种信道比低通信道更可用。图 3.24 显示了带通信道。



Amplitude 振幅

Bandpass channel 带通信道

Frequency 频率

图 3-24 带通信道的带宽

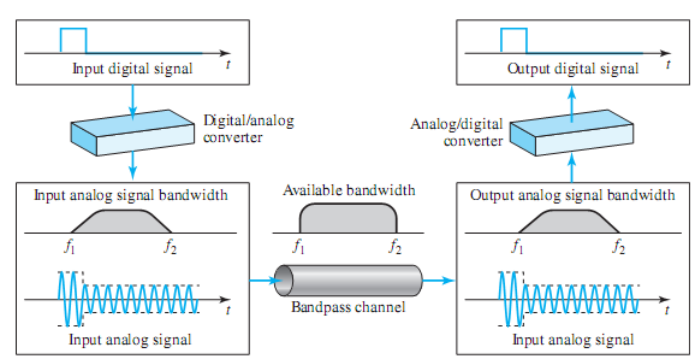
注意：低通信道可以看做是较低频率从 0 开始的带通信道。

图 3-25 说明了数字信号的调制。在该图中，数字信号转换成复合模拟信号。我们使用

单频率模拟信号（称为载波），载波振幅的改变使其看起来像数字信号。但是，结果不是单频率信号，它是复合信号，正如我们将在第 5 章看到的。在接收方，接收到的模拟信号转换成数字信号，结果是被发送信号的复制品。

If the available channel is a bandpass channel, we cannot send the digital signal directly to the channel; we need to convert the digital signal to an analog signal before transmission.

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



原书 76 页

Input digital signal 输入数字信号

output digital signal 输出数字信号

Digital/analog 数模转换器

Analog / digital 模数转换器

Input analog signal bandwidth 输入模拟信号带宽

Input analog signal 输入模拟信号

Available bandwidth 可用带宽

Bandpass channel 带通信道

Output analog signal bandwidth 输出模拟信号带宽

图 3-25 数字信号在带通信道传输前的调制

例 3-24

使用调制的宽带传输的一个例子是通过电话用户线传输计算机数据，电话用户线连接住所到中心电话局。这些线路在许多年前就安装了，设计用有限带宽（0 到 4kHz 间的频率）承载语音（模拟信号）。虽然这个信道能用作低通信道，但是通常被看做带通信道。一个原因是带宽太小（4kHz），以至于如果我们把它看作低通信道用于基带传输，那么最大的比特

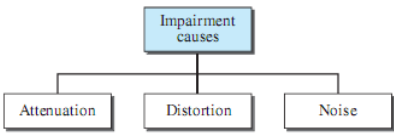
率只有 8kbps。解决方案是把它看作带通信道，从计算机把数字信号转换成模拟信号，然后发送模拟信号。我们要安装两个转换器用来在发送端把数字信号转换成模拟信号以及在接收端把模拟信号转换回数字信号。在这种情况下，转换器称为调制解调器（调制器/解调器），我们会在第 5 章更详细地讨论调制解调器。

例 3-25

第二个例子是数字蜂窝电话。为了更好地接收，数字蜂窝电话把模拟信号转换成数字信号（见第 16 章）。虽然分配给公司提供数字蜂窝电话服务的带宽很广，但是我们不能不经转换发送数字信号。原因是，我们在主叫方和被叫方之间只有一条可用的带通信道。例如，如果有效带宽是 W ，并且我们允许 1000 对用户同时交谈，这意味着有效带宽是 $W/1000$ ，只是整个带宽的一部分。我们需要在发送前把数字信号转换成复合模拟信号。数字蜂窝电话把模拟音频信号转换成数字信号，然后再把数字信号转换成模拟信号通过带通信道传输。

3.4 传输减损

信号通过介质进行传输，但是其传输并非是完美无缺的。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。三种减损原因是衰减、失真和噪声（见图 3-26）。



原书 77 页

Impairment causes 减损原因

Attenuation 衰减

Distortion 畸变

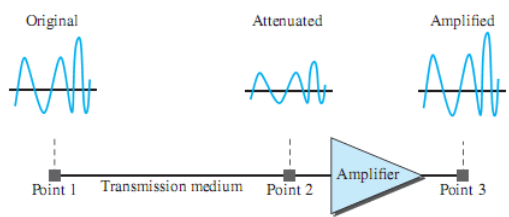
Noise 噪声

图 3-26 减损原因

3.4.1 衰减

衰减（attenuation）意味着能量的损失。当一个简单或者复合的信号通过某种介质传输时，它会失去一些能量用于克服介质的阻抗。这就是为什么传输电信号的电缆会变热的原因，

如果不热，过一段时间也会发热。信号中的一些电能转换为热能。为了补偿能量损失，用放大器放大信号。图 3-27 说明了衰减与放大的效果。



原书 77 页

Original 原始信号

Attenuated 衰减后

Amplified 放大后

Transmission medium 传输介质

Point 节点

Amplifier 放大器

图 3-27 衰减

分贝

为了说明信号损失或增益的强度，工程上使用分贝作为单位。分贝（**decibel, dB**）用于测度两个信号或者同一信号在两个不同位置之间的相对强度。若信号被衰减了，则分贝为负值；若信号被放大了，则分贝为正值。

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

变量 P_1 和 P_2 分别是信号在位置 1 和位置 2 的功率。注意一些工程书籍中以电压而不是功率定义分贝。这种情况下，因为功率与电压的平方成正比，所以公式变为 $dB = 20 \log_{10} (V_2/V_1)$ 。本书中我们以功率表示分贝。

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：

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

-3dB 或者 3dB 衰减等价于功率损失了一半。

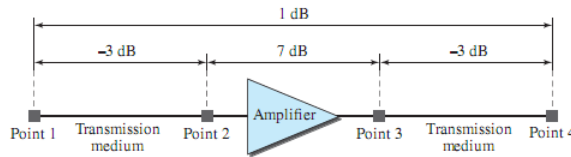
例 3-27

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：

$$10\log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10\log_{10} \frac{10P_1}{P_1} = 10\log_{10} 10 = 10(1) = 10\text{dB}$$

例 3-28

工程人员使用分贝来计量信号强度变化的原因之一是，当涉及计量多处（级联）而不仅仅是两处的信号强度时，分贝数可以相加（或相减）。在图 3-28 中，一个信号从位置 1 传输到位置 4。信号在到达位置 2 时衰减了。在位置 2 与位置 3 之间，信号被放大了。在位置 3 与位置 4 之间信号再次衰减。只需要将各位置之间的分贝值相加，就可以得到信号最终的分贝数。



原书 78 页

Transmission medium 传输介质

Point 节点

图 3-28 例 3.28 的分贝

在这种情况下，分贝可以计算为：

$$\text{dB} = -3 + 7 - 3 = +1$$

表示信号的功率增大了。

例 3-29

有时候分贝用毫瓦来计量信号功率。这种情况下，它成为 dB_m ，计算为 $\text{dB}_m = 10\log_{10} P_m$ ，这里 P_m 是以毫瓦为单位的功率。如果信号的功率为 $\text{dB}_m = -30$ ，计算它的功率。

解答

我们计算信号的功率如下：

$$dB_m = 10 \log_{10} \rightarrow dB_m = -30 \rightarrow \log_{10} P_m = -3 \rightarrow P_m = 10^{-3} mW$$

例 3-30

电缆中的损耗一般定义为每公里分贝数 (dB/km)。如果电缆每公里分贝数为 -0.3dB/km，信号在电缆开始端的功率为 2mW，则在 5km 处信号的功率是多少？

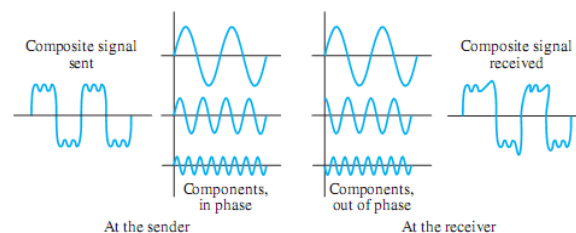
解答

电缆中的损耗为 $5 \times (-0.3) = -1.5\text{dB}$ 。我们计算功率如下：

$$dB = 10 \log_{10} (P_2 / P_1) = -1.5 \rightarrow (P_2 / P_1) = 10^{-0.15} = 0.71$$
$$P_2 = 0.71 P_1 = 0.7 \times 2mW = 1.4mW$$

3.4.2 失真

失真 (distortion) 意味着信号改变了形态或形状。失真产生在由不同频率成分组成的复合信号当中。每一种信号成分在通过介质时有自己的传播速度 (见 3.5 节)，所以到达最终目的节点时有各自的延迟。如果延迟与周期时间不完全一致，那么延迟的差异就会产生相位的差异。换言之，接收方的信号成分与发送方的信号成分存在相位差异。因此复合信号的形状会不一样。图 3-29 说明了复合信号中失真的影响。



原书 79 页

Composite signal sent 发送的复合信号

Composite signal received 接收的复合信号

At the sender 发送端

At the receiver 接收端

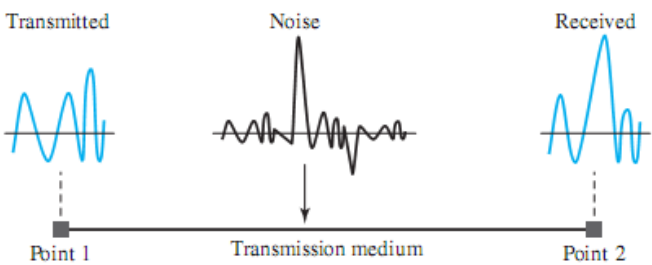
Components in phase 同相成分

Components out of phase 不同相成分

图 3-29 失真

3.4.3 噪声

噪声（noise）是另一个损伤原因。有几种类型的噪声，如热噪声、感应噪声、串扰和脉冲噪声，都会损害信号。热噪声是电缆中的电子随机移动而产生的额外信号，而不是信号发送装置发送的。感应噪声的来源是发动机和设备。这些设备工作时相当于发射天线，而传输介质成为接收天线。串扰则是电缆之间的互相影响。一根电缆作为发射天线而另一根电缆作为接收天线。脉冲噪声是一种尖峰信号（在非常短时间内有很高能量的一种信号），来自输电线、闪电等。图 3-30 说明了信号中噪声的影响。我们会在第 10 章讨论差错。



原书 80 页

Transmitted 传输信号

Received 接收信号

Noise 噪声

Transmission medium 传输介质

Point 节点

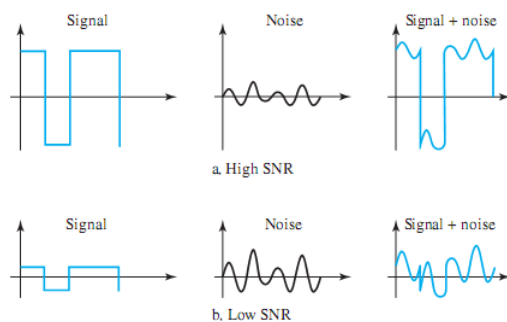
图 3-30 噪声

信噪比（SNR）

我们稍后会看到，为了找到理论上的比特率限制，我们需要知道信号功率与噪声功率的比率。信噪比（signal-to-noise ratio）定义如下：

$$\text{信噪比SNR} = \frac{\text{平均信号功率}}{\text{平均噪声功率}}$$

我们需要考虑平均信号功率和平均噪声功率，因为这些会随时间变化。图 3-31 说明了 SNR 的概念。



原书 80 页

Signal 信号

Noise 噪声

High SNA 高信噪比

Low SNA 低信噪比

Signal + noise 信号+噪声

图 3-31 SNR 的两种情形：高 SNR 和低 SNR

SNR 实际上是我们需要的（信号）和我们不需要的（噪声）之间的比率。较高的 SNR 意味着信号较少地被噪声破坏，较低的 SNR 意味着信号被噪声更多地破坏。

因为 SNR 是两个功率的比率，所以一般用分贝数描述。SNR_{dB} 定义如下：

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} SNR$$

例 3-31

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

解答

SNR 和 SNR_{dB} 可以计算如下：

$$SNR = (10,000 \mu W) / (1 \mu W) = 10,000 \quad SNR_{dB} = 10 \log_{10} 10,000 = 10 \log_{10} 10^4 = 40$$

例 3-32

对于无噪声信道的 SNR 和 SNR_{dB} 是：

$$SNR = (\text{signal power}) / 0 = \infty \rightarrow SNR_{dB} = 10 \log_{10} \infty = \infty$$

我们在现实中不会得到这样的比率，它是理论上的。

3.5 数据速率限制

数据通信中一个非常重要的考虑是：在一个信道中能够以多快的速率发送数据，即每秒的比特数。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. 信道的质量（噪声电平）。

有两个理论上的公式用于计算数据速率：一个是由奈奎斯特提出的，用于无噪声信道；另一个是由香农提出的，用于噪声信道。

3.5.1 无噪声信道：奈奎斯特比特率

对于无噪声信道，奈奎斯特位率（Nyquist bit rate）公式定义了理论上的最大比特率：

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

公式中，带宽是指信道的带宽， L 是用于表示数据的信号电平的数量，比特率是每秒中的位数。

根据这个公式，我们可以认为：给定特定的带宽可以通过增加信号电平数来获得任何我们想要的比特率。虽然这个思想在理论上是正确的，但是实际上有局限。当我们增加信号电平数时，我们增加了接收方的负担。如果信号的电平数只是 2，接收方可以轻易地区分 0 和 1。如果信号的电平数是 64，接收方必须很复杂才能区分 64 个不同的电平。换言之，增加信号电平数减弱了系统的可靠性。

增加信号电平数会减弱系统的可靠性。

例 3-33

奈奎斯特公式是否适用于基带传输中描述的直觉上的比特率？

解答

当只有两个电平时它们匹配。我们说，在基带传输中，如果我们在最坏情况只使用第一谐波，那么比特率是 2 倍带宽。但是，奈奎斯特公式比我们直觉上得到的更通用，它可以应用到基带传输和调制，也可以应用到有两个或多个信号电平的情况。

例 3-34

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

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

例 3-35

考虑同样的无噪声信道，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：

$$\text{比特率} = 2 \times 3000 \times \log_2 4 = 12000 \text{bps}$$

例 3-36

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

解答

我们使用奈奎斯特公式如下：

$$265000 = 2 \times 20000 \times \log_2 L \rightarrow \log_2 L = 6.625 \rightarrow L = 2^{6.625} = 98.7 \text{个电平}$$

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。

3.5.2 噪声信道：香农容量

实际情况中，不可能有无噪声信道，信道总是有噪声的。1944 年，Claude Shannon 引进了一个公式，称为香农容量（Shannon Capacity），能够确定噪声信道理论上的最高数据速率：

$$\text{信道容量} = \text{带宽} \times \log_2(1 + \text{SNR})$$

公式中，带宽是指信道的带宽，SNR 是信噪比，信道容量是指信道的传输容量，即每秒的比特数。注意：香农公式中没有指出信号电平，这意味着无论使用多少个电平，都不可能获得比信道容量更高的数据速率。换句话说，公式定义了信道的特性，而不是传输方式。

例 3-37

考虑一个极端的噪声信道，其信噪比的值接近于 0。换句话说，噪声很强而信号很弱，

对于该信道，其容量 C 计算为：

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

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

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（300Hz~3300Hz）。信噪比通常为 3162。对于这一信道，其容量计算为：

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR}) = 3000 \log_2 (1 + 3162) = 3000 \log_2 3163 = 3000 \times 11.62 = 34860 \text{bps}$$

这表示电话线路的最高比特率是 34860bps。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 3-39

信噪比通常以分贝给定。假定 $\text{SNR}_{\text{dB}} = 36$ ，信道带宽是 2MHz。理论上的信道容量计算为：

$$\begin{aligned} \text{SNR}_{\text{dB}} &= 10 \log_{10} \text{SNR} \rightarrow \text{SNR} = 10^{\text{SNR}_{\text{dB}} / 10} \rightarrow \text{SNR} = 10^{3.6} = 3981 \\ C &= B \log_2 (1 + \text{SNR}) = 2 \times 10^6 \times \log_2 3982 = 24 \text{Mbps} \end{aligned}$$

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，理论信道容量可以简化为： $C = B \times \text{SNR}_{\text{dB}} \cdot 3$ 。例如，我们可以计算前一例子的理论容量为：

$$C = 2 \text{MHz} \times (36 / 3) = 24 \text{Mbps}$$

3.5.3 使用两种限制条件

在实际应用中，两种方法都要使用，以确定所需要的带宽以及信号电平数。下面通过一个实例说明这一点。

例 3-41

有一个 1MHz 带宽的信道。信道的信噪比是 63，合适的比特率以及信号电平是多少？

解答

首先，使用香农公式确定上限：

$$C = B \log_2(1 + SNR) = 10^6 \log_2(1 + 63) = 10^6 \log_2 64 = 6Mbps$$

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

$$4Mbps = 2 \times 1MHz \times \log_2 L \rightarrow L = 4$$

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

到目前为止，我们已经讨论了在网络上传输数据（信号）的工具以及如何传输数据。联网的一个重要问题是网络的性能—网络好到什么程度？我们会在第 30 章更详细地讨论服务质量，作为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。

3.6.1 带宽

衡量网络性能的一个特性就是带宽。但是，这个术语在两种不同情况下将使用不同的衡量值：以赫兹衡量的带宽和以每秒比特数衡量的带宽。

以赫兹衡量的带宽

我们已经讨论过这个概念。以赫兹衡量的带宽是复合信号包含的频率范围或者信道能通过的频率范围。例如，我们可以说用户电话线的带宽是 4kHz。

以每秒比特数衡量的带宽

术语带宽还可以指信道、链路或者甚至网络每秒能发送的位数。例如，我们可以说快速以太网（或者这种网络中的链路）的带宽最高达 100Mbps。这意味着这种网络能发送 100Mbps。

两者关系

在以赫兹衡量的带宽和以每秒比特数衡量的带宽之间有明显的关系。基本上，以赫兹衡量的带宽的增长意味着以每秒位数衡量的带宽的增长。它们之间的关系取决于是否有基带传输或者调制传输。我们会在第 4 章和第 5 章讨论这个关系。

In networking, we use the term *bandwidth* in two contexts.

- The first, *bandwidth in hertz*, refers to the range of frequencies in a composite signal or the range of frequencies that a channel can pass.
- The second, *bandwidth in bits per second*, refers to the speed of bit transmission in a channel or link.

在网络中，我们在两种情形下使用术语带宽。

- 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信道能通过的频率范围。
- 第二种，以每秒比特数衡量的带宽指信道或链路中位传输的速率。

例 3-42

用于语音或数据的用户线带宽是 4kHz。使用复杂的调制解调器把数字信号转换成模拟信号，这种线路用于数据传输的带宽可以达到 56000bps。

例 3-43

如果电话公司提高线路的质量，把带宽增加到 8kHz，通过例 3-42 提到的相同技术，可以发送 112000bps。

3.6.2 吞吐率

吞吐率 (throughput) 用于衡量通过网络发送数据的快慢。虽然，第一感觉上，以每秒位数衡量的带宽和吞吐率看起来一样，但是它们是不同的。一条链路可以有 B bps 的带宽，但是我们只能通过这条链路发送 T bps，T 永远小于 B。换言之，带宽是链路的潜在衡量值，而吞吐率是发送速度快慢的实际衡量值。例如，我们可以有一条带宽为 1Mbps 的链路，但是连接到链路末端的设备只能处理 200kbps。这意味着我们不能通过这条链路发送数据高于 200kbps。

想像一下，一条高速公路设计从一点到另一点每分钟运送 1000 辆汽车。但是，如果在路上有拥塞，这个数字会降低到每分钟 100 辆汽车。带宽是每分钟 1000 辆汽车，而吞吐率是每分钟 100 辆汽车。

例 3-44

带宽为 10Mbps 的网络每分钟只能平均传输 12000 个帧，每个帧平均携带 10000 个位。那么这个网络的吞吐率是多少？

解答

我们可以计算吞吐率为：

$$\text{吞吐率} = (12000 \times 10000) / 60 = 2 \text{ Mbps}$$

这个例子中的吞吐率几乎是带宽的五分之一。

3.6.3 延迟

延迟定义了第一个位从源开始发出到整个报文完全到达目标所经历的时间。我们可以说延迟由四个部分组成：**传播时间**（**propagation time**）、**传输时间**（**transmission time**）、**排队时间**（**queuing time**）和**处理延迟**（**processing delay**）。

$$\text{延迟} = \text{传播时间} + \text{传输时间} + \text{排队时间} + \text{处理延迟}$$

传播时间

传播时间衡量一个位从源传输到目标所需的时间。传播时间通过距离除以传播速度计算而得。

$$\text{传播时间} = \text{距离} / \text{传播速度}$$

电磁信号的传播速度取决于介质和信号频率。例如，在真空中，光以速度 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 传播。它在空气中速度较低，在电缆中更低。

例 3-45

如果两点之间的距离是 12000km，传播时间是多少？假定电缆中的传播速度是 $2.4 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

解答

我们可以计算传播时间为：

$$\text{传播时间} = (12000 \times 1000) / (2.4 \times 10^8) = 50 \text{ ms}$$

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 50ms。

传输时间

在数据通信中我们不只发送 1 个位，我们需要发送报文。第一个位可能会花费跟传播时

间相等的时间到达目标，最后一个位也可能需要相同的时间。但是，在第一个位离开发送方到最后一个位到达接收方之间有个时间。第一个位较早离开到达也较早，最后一个位较晚离开也较晚到达。传输一个报文所需时间取决于报文的长度和信道的带宽。

$$\text{传输时间} = \text{报文长度} / \text{带宽}$$

例 3-46

如果网络的带宽是 1Gbps，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 12000km，光以速度 $2.4 \times 10^8 \text{m/s}$ 传输。

解答

我们计算传播时间和传输时间为：

$$\text{传播时间} = (12000 \times 1000) / (2.4 \times 10^8) = 50 \text{ ms}$$

$$\text{传输时间} = (2500 \times 8) / 10^9 = 0.020 \text{ ms}$$

注意：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。

例 3-47

如果网络带宽是 1Mbps，那么 5M 字节的报文（一张图像）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 12000km，光以速度 $2.4 \times 10^8 \text{m/s}$ 传输。

解答

我们计算传播时间和传输时间为：

$$\text{传播时间} = (12000 \times 1000) / (2.4 \times 10^8) = 50 \text{ ms}$$

$$\text{传输时间} = (5000000 \times 8) / 10^6 = 40 \text{ s}$$

注意这个例子中，因为报文较长而带宽不是很高，所以主导因素是传输时间而不是传播时间。传播时间可以忽略不计。

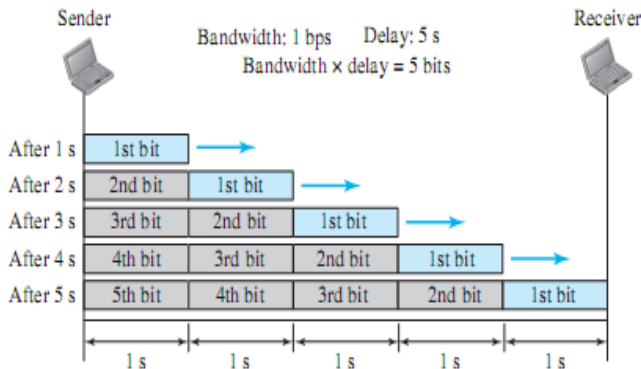
排队时间

延迟中的第三个成分是排队时间，即每个中间或端设备在处理报文前保持报文所需的时间。排队时间不是固定因素，它会根据网络负载改变。当网络上负载较重时，排队时间增长。一个中间设备（比如路由器）对到达报文进行排队然后一个接一个处理。如果有许多报文，每个报文就不得不等待。

3.6.4 带宽与延迟的乘积

带宽和延迟是链路的两个性能度量。但是，正如我们将在本章和以后章节中看到的，数据通信中十分重要的是两者的乘积。让我们使用两个假想情形作为例子详细阐述这个问题。

□情形 1：图 3-32 说明了情形 1。



原书 87 页

Sender 发送端

Receiver 接收端

After 1 s 1 秒后（其余类同）

Bandwidth 带宽

Delay 延迟

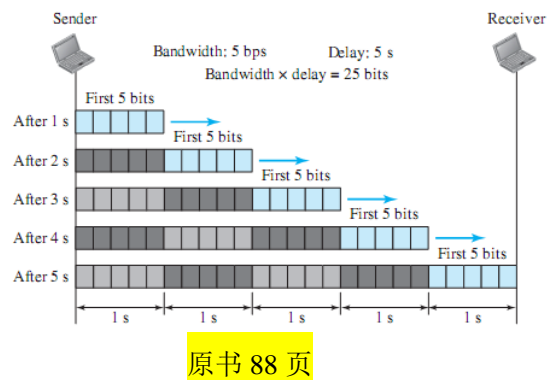
Bit 比特位

图 3-32 在情形 1，比特位充满链路

假定我们有一条带宽是1bps（不现实，但用于说明目的）的链路。还假定链路的延迟是5s（也是不现实的）。我们想看这个情形中带宽延迟乘积意味着什么。从图中，我们可以说这个乘积1 \times 5是能充满链路的最大位数。链路上在任何时都不可能多于5位。

□情形2：现在假定带宽是5bps。图3-33说明了链路上最多可以有5 \times 5=25位。原因是每

一秒钟链路上有5位，每位的持续时间是0.20s。



Sender 发送端

Receiver 接收端

After 1 s 1 秒后 (其余类同)

Bandwidth 带宽

Delay 延迟

bit 比特位

图 3-33 在情形 2，比特位充满链路

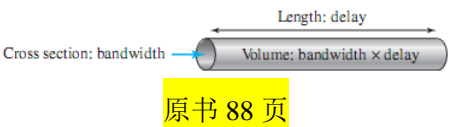
上述两种情形说明带宽和延迟的乘积是能充满链路的位的个数。如果我们需要以脉冲发送数据并在发送下一个脉冲前等待每个脉冲的确认，这个度量是重要的。为了使用链路的最大容量，我们需要脉冲长度是带宽和延迟乘积的两倍，我们需要充满全双工信道(两个方向)。发送者应该发送一个($2 \times \text{带宽} \times \text{延迟}$)位的数据脉冲。然后发送方在发送下一个脉冲前等待这个脉冲部分的接收方的确认。数量 $2 \times \text{带宽} \times \text{延迟}$ 是任何时刻转换的位数。

The bandwidth-delay product defines the number of bits that can fill the link.

宽带延迟乘积定义了能充满链路的位数。

例 3-48

我们把两点间的链路看作管道。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宽带延迟乘积，如图 3-34 所示。



Length: delay 长度: 延迟

Cross section: bandwidth 截面: 带宽

Volume: $\text{bandwidth} \times \text{delay}$ 容积: 带宽 \times 延迟

图 3-34 带宽乘积概念

3.6.5 抖动

另一个与延迟有关的性能问题是**抖动 (jitter)**。如果数据的不同分组碰到不同的延迟并且接收方使用数据的应用是时间敏感的 (例如音频和视频数据), 我们可以大致说抖动是个问题。如果第一个分组的延迟是 20ms, 第二个是 45ms, 第三个是 40ms, 那么使用这些分组的实时应用会遭遇抖动。我们会在第 28 章更详细地讨论抖动。

3.7 本章结束材料

3.7.1 推荐读物

为了深入讨论与本章有关的主题，推荐下列读物，在本书末列出了括号[……]中的参考资料。

书籍

数据和信号在[Pea92]中有详细的讨论。[Cou01]给出有关信号完整的讨论。[Ber96]给出进一步深入研究的资料。[Hsu03]给出信号严格的数学方法描述。[Spi74]讨论傅里叶分析。[Sta04]和[Tan03]讨论数据和信号。

3.7.2 关键术语

Analog 模拟的	Hertz(Hz) 赫兹(Hz)
analog data 模拟数据	jitter 抖动
analog signal 模拟信号	latency 延迟
attenuation 衰减	low-pass channel 低通信道
bandpass channel 带通信道	noise 噪声
bandwidth 宽带	nonperiodic signal 非周期信号
baseband transmission 基带传输	Nyquist bit rate 奈奎斯特位率
bit length 位长	peak amplitude 峰值振幅
bit rate 位率	period 周期
bits per second (bps) 位每秒(bps)	periodic signal 周期信号
broadband transmission 宽带传输	phase 相位
composite signal 复合信号	processing delay 处理延迟
cycle 周期	propagation speed 传播速度
data 数据	propagation time 传播时间
decibel (dB) 分贝(dB)	queuing time 排队时间
digital 数字的	shannel capacity 香农容量
digital data 数字数据	signal 信号
digital signal 数字信号	signal-to-noise ratio (SNA) 信噪比(SNA)
distortion 失真	sine wave 正弦波

fourier analysis 傅里叶分析	throughput 吞吐率
frequency 频率	time-domain 时间域
frequency-domain 频率域	transmission time 传输时间
fundamental frequency 基础频率	wavelength 波长
harmonic 谐波	

3.7.3 本章小结

数据在通过网络传输之前必须转换为电磁信号。数据可以是模拟的也可以是数字的。模拟数据是连续状态，取连续的值。数字数据具有离散状态，取离散的值。信号可以是模拟的也可以是数字的。模拟信号具有在某范围内无限个数值，数字信号仅具有有限个值。

在数据通信中，常用周期模拟信号和非周期数字信号。频率和周期是互逆的。频率是单位时间的变化率。相位是波形相对于时间零的位置。用频域图中的一个振幅峰值表示时域图中的一个完整正弦波。在数据通信中，单一频率的正弦波是没有用的。我们需要发送由多个简单正弦波组成的复合信号。按照傅里叶分析，任何复合信号是由具有不同频率、振幅和相位的正弦波叠加而成。复合信号的带宽是该信号的最高频率与最低频率的差值。

数字信号是一个具有无穷带宽的复合信号。仅当具有无穷大带宽或很大带宽的低通信道时，基带传输才能保持数字信号的形状。如果一个有效信道是带通信道，则它不能直接发送数字信号，在传输之前需将数字信号转换成模拟信号。

奈奎斯特公式能够确定无噪声信道理论上的最大比特率。香农容量原理能够确定噪声信道理论上的最大比特率。衰减、失真和噪声会损伤信号。衰减是由于介质的阻抗所导致的信号能量的损失。失真是由于构成信号的不同频率成分的传播速度不同而引起的信号改变。噪声是损害信号的外部能量。带宽与延迟的乘积定义了充满链路的位数。

3.8 练习集

3.8.1 小测验

针对本章的一组交互型测试题可以在本书的网站找到。在继续做练习前，强烈建议学生做这个测验来检查他/她对教材的理解。

3.8.2 问答题

Q3-1. 周期与频率有什么关系？

- Q3-2. 信号振幅的度量是什么？信号频率的度量是什么？信号周期的度量是什么？
- Q3-3. 复合信号如何分解成单独的频率成分？
- Q3-4. 试说出传输损伤三种类型的名称。
- Q3-5. 基带传输与宽带传输的区别。
- Q3-6. 低通信道与带通信道的区别。
- Q3-7. 奈奎斯特公式在通信中有什么作用？
- Q3-8. 香农容量原理在通信中有什么作用？
- Q3-9. 光缆中的光信号为什么是甚短波长？
- Q3-10. 是否可用频域观察一个信号是周期的还是非周期的？为什么？
- Q3-11. 语音信号的频域图是离散的还是连续的？
- Q3-12. 报警系统的频域图是离散的还是连续的？
- Q3-13. 语音信号从麦克风到录音机的发送是基带传输还是宽带传输？
- Q3-14. 在局域网中，一个数字信号从一个站到另一个站的发送是基带传输还是宽带传输？
- Q3-15. 调制一些语音信号并通过空气发送它们，是基带传输还是宽带传输？

3.8.3 习题

P3-1. 给定下列频率，计算相应的周期。

- a. 24Hz b. 8MHz c. 140kHz

P3-2. 给定下列周期计算相应的频率。

- a. 5s b. 12ms c. 220ns

P3-3. 下列各题中相移是多少？

- a. 在时间 0 具有最大振幅的正弦波 b. 经过 $1/4$ 周期达到最大振幅的正弦波
c. 经过 $3/4$ 周期，上升段振幅达到 0 值的正弦波

P3-4. 一个信号被分解成 5 个正弦波，它们频率分别为 0、20、50、100 和 200Hz，该信号的带宽是多少？它们的峰值振幅都相同，试画出该带宽。

P3-5. 一个带宽为 2000Hz 的复合信号由两个正弦波组成，其中一个频率为 100Hz，最大振幅为 20V，另一个最大振幅为 5V，画出其带宽。

P3-6. 一个频率为 100Hz 的正弦波，另一个频率为 200Hz 的正弦波。试问哪一个正弦波带宽较大？

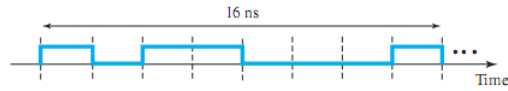
P3-7. 下列信号的比特率各是多少？

- a. 一个位持续 0.001s b. 一个位持续 2ms
- c. 一个位持续 2ms

P3-8. 一个设备以 1 000bps 发送数据

- a. 发送 10 位需要多长时间？ b. 发送一个字符（8 位）需要多长时间？
- c. 发送 100 000 个字符的文件需要多长时间？

P3-9. 图 3-35 的信号比特率是多少？



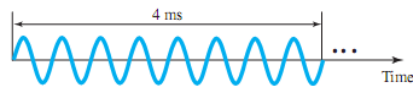
原书 92 页

ns 纳秒

Time 时间

图 3-35 练习题 24

P3-10. 图 3-36 的信号频率是多少？



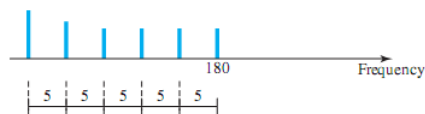
原书 92 页

ns 纳秒

Time 时间

图 3-36 练习题 25

P3-11. 图 3-37 的复合信号的带宽是多少？



原书 92 页

Frequency 频率

图 3-37 练习题 26

P3-12. 周期复合信号包含 10kHz 到 30kHz 的频率成分，每一个成分的振幅为 10V，试画出其频谱。

P3-13. 非周期复合信号包含 10kHz 到 30kHz 的频率成分，信号的最低频率成分和最高频率成分的振幅是 10V，20kHz 信号的振幅是 30V。假定振幅由最小值到最大值是渐变的，试画出其频谱。

P3-14. TV 频道的带宽是 6MHz，如果用一个信道发送数字信号，分别用第一谐波、第三谐波和第五谐波的数据速率是多少？

P3-15. 信号从 A 点到达 B 点，在 A 点时功率是 100W，在 B 点时功率是 90W。问它衰减多少分贝？

P3-16. 信号衰减是 10dB，如果信号的初始功率是 5W，问衰减后的功率是多少？

P3-17. 信号通过三级放大器，每级的增益是 4dB，问总增益是多少？信号放大了多少倍？

P3-18. 如果信道的带宽是 5kbps，那么从设备发送 100000 位的帧需要多长时间？

P3-19. 太阳光到达地球大约需要 8 分钟，问太阳与地球之间距离是多少？

P3-20. 信号在空气中的波长是 1mm，1600 个周期波的前端能传输多远？

P3-21. 一条线路的信噪比是 1000，带宽是 4000kHz，该线路能支持的最大数据速率是多少？

P3-22. 要测试电话线路（带宽 4kHz）的性能，信号为 10V，噪声是 5mV。该电话线路支持的最大数据速率是多少？

P3-23. 一个文件有 2 兆字节，用 56kbps 信道下载该文件需要多少时间？用 1Mbps 下载需多少时间？

P3-24. 一台计算机显示器的分辨率是 1200×1000 个像素，如果每个像素使用 1024 个颜色，发送一个完整屏幕需要多少位？

P3-25. 具有 200 毫瓦功率的信号通过 10 个设备，每个设备平均噪声是 2 微瓦，问 SNR 是多少？ SNR_{dB} 是多少？

P3-26. 如果信号峰值电压值是噪声峰值的 20 倍，问 SNR 是多少？ SNR_{dB} 是多少？

P3-27. 下列各情形的信道，理论上的容量是多少？

a. 带宽:20kHz, $SNR_{dB} = 40$ b. 带宽:200kHz, $SNR_{dB} = 4$

c. 带宽:1MHz, $SNR_{dB} = 20$

P3-28. 需要提高信道的带宽，问题是：

a. 如果提高带宽两倍，如何改进速率？ b. 如果提高 SNR 两倍，如何改进速率？

P3-29. 信道具有 4kHz 的带宽，如果想以 100kbps 发送数据，则最小的 SNR_{dB} 是多少？SNR 是多少？

P3-30. 如果一个分组的长度是 1 兆字节，而信道的带宽是 200kbps，一个站发送一个分组要多少传输时间？

P3-31. 信道的传播速率是 2×10^8 m/s，如果信道速率如下：

a. 1Mbps b. 10Mbps c. 100Mbps

问信道内的一位的长度是多少？

P3-32. 如果链路具有 2ms 的延迟，带宽如下：

a.1Mbps b.10Mbps c.100Mbps

问在链路上填满有多少位？

P3-33. 一条链路有 10 个路由器，每个路由器排队的时间是 2ms，处理时间为 1ms，在其上发送具有 5 兆字节的一个帧，问总的延迟是多少？链路长为 200km，链路中内的光速是 2×10^8 m/s，带宽是 5Mbps。决定总延迟的是哪个成分？哪些成分可忽略不计？

3.9 仿真实验

3.9.1 小程序

我们已经创建了一些 JAVA 小程序（Applet）来帮助学生理解本章讨论过的主要概念。

强烈建议学生执行本书主页提供的这些小程序，仔细检查协议。