

第5章 模拟传输

第3章讨论了数字传输和模拟传输的优点和缺点。已经注意到，尽管我们希望用数字传输，但还是需要低通信道。同时也看到，如果我们只有带通信道，则只能选择模拟传输。第4章讨论了数字传输，本章讨论模拟传输。

将数字数据转换为带通模拟信号传统上称为数-模转换。将低通模拟信号转换为带通模拟信号传统上称为模-模转换。本章用两节讨论这两种类型转换。

□ 第1节讨论数-模转换。当存在带通信道，本节讲述怎样将数字数据转换为模拟信号。

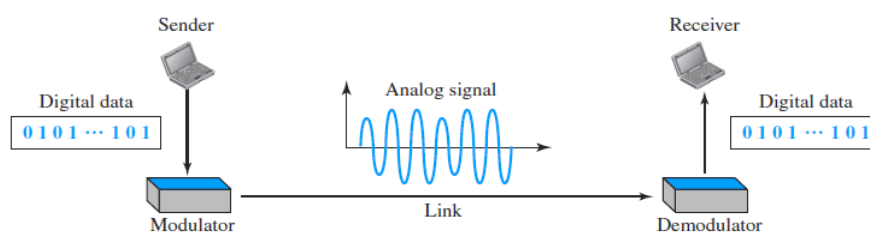
第一种方法是幅移键控（ASK），使用数字数据改变载波振幅。第二种方法讲述频移键控（FSK），使用数字数据改变载波频率。第三种方法讲述相移键控（PSK），使用数字数据改变载波相位。第四种方法讲述正交相移键控（QAM），使用数字数据改变载波振幅和相位。

□ 第2节讨论模-模转换。使用较小带宽，本节描述怎样将一个模拟信号转换为一个新模拟信号。当只有一个带通信道时使用这种转换。第一种方法叫做调幅（AM），基于初始模拟信号的变化改变载波振幅。第二种方法叫做调频（FM），基于初始模拟信号的变化改变载波频率。第三种方法叫做调相（PM），基于初始模拟信号的变化改变载波相位。

5.1 数-模转换

数字到模拟转换（digital-to-analog conversion）是指根据数字数据中的信息而改变模拟信号的某种特性的过程。图 5-1 说明了数字信息、数模调制过程和最终模拟信号之间的关系。

Figure 5.1 Digital-to-analog conversion



原书136页 图中的英文词对照标记

Modulator 调制器

Demodulator 解调器

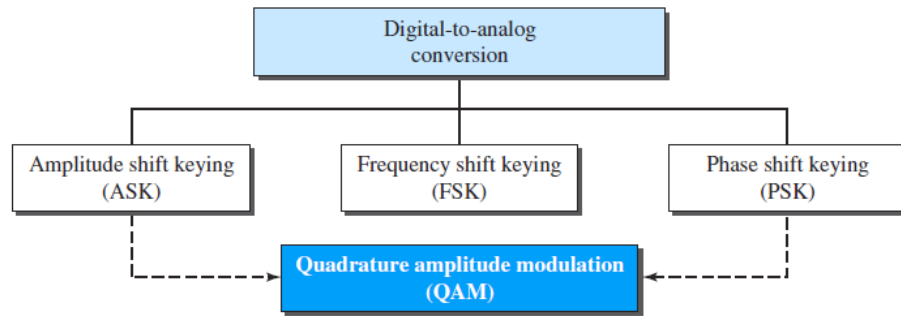
Digital data 数字数据

Analog signal 模拟信号

图 5-1 数字-模拟转换

如第 3 章所述，一个正弦波可通过三个特性定义：振幅、频率和相位。当我们改变其中任意一个，就有了波的另一种形式。所以，改变简单正弦波的某一特性，就可以用它来表示数字数据。波的两个特性中的任意一个都可以用这种方式改变，从而使我们至少有三种将数字数据调制到模拟信号的机制：幅移键控（amplitude shift keying, ASK）、频移键控（frequency shift keying, FSK）和相移键控（phase shift keying, PSK）。另外，还有第四种（更好的）将振幅和相位的变化结合起来的机制，称为正交振幅调制（quadrature amplitude modulation, QAM）。其中正交调幅是效率最高的，也是目前调制解调器普遍采用的技术（见图 5-2）。

Figure 5.2 Types of digital-to-analog conversion



原书 136 页 图中的英文词对照标记

Digital-to-analog conversion 数-模转换

amplitude shift keying (ASK) 幅移键控、

frequency shift keying (FSK) 频移键控

phase shift keying (PSK) 相移键控

quadrature amplitude modulation (QAM) 正交振幅调制

图 5-2 数-模转换的类别

5.1.1 数-模转换的特点

在具体讨论数模调制方法之前,有两个基本问题要说明:比特率和波特率以及载波信号。

数据元素和信号元素

在第 4 章中已讲过数据元素和信号元素的概念。数据元素定义成一块信息的最小实体,即位。而信号元素定义成信号的最小单元。它们是固定的。虽然在本章中继续使用相同的术语,但是我们会看到信号元素与模拟传输中有点不一样。

比特率和波特率

我们可以像数字传输中一样定义数据速率(比特率)和信号速率(波特率)。两者的关系定义如下:

$$S = N \times \frac{1}{r} \text{ band}$$

这里 N 是数据速率 (bps), r 是一个信号元素携带的数据元素个数。模拟传输中 r 值为 $r = \log_2 L$, 这里 L 是不同信号元素的个数。为了易于类比使用同一术语。

Bit rate is the number of bits per second. Baud rate is the number of signal elements per second. In the analog transmission of digital data, the baud rate is less than or equal to the bit rate.

比特率是每秒发送的位数，波特率是每秒发送的信号元素数。

在数字数据模拟传输中，波特率小于等于比特率。

这里使用第 4 章中用于比特率和波特率的相同比喻。在运输中，波特类似车辆，比特类似乘客。每辆车需要最大化乘车人数来减少交通量。

例 5-1

模拟信号的每个信号单元运送 4 位。如果每秒发送 1000 个信号单元，试求比特率。

解答

这里 $r = 4$ ， $S = 1000$ ， N 未知。我们可以从下式中获得 N 的值

$$S = N \times (1/r) \quad \text{或} \quad N = S \times r = 1000 \times 4 = 4000 \text{bps}$$

例 5-2

一个模拟信号的比特率为 8000bps，波特率为 1000 波特。问每个信号元素携带多少个数据元素？需要多少个信号元素？

解答

在这个例子中， $S = 1000$ ， $N = 8000$ ， r 和 L 未知。先得到 r 值，再得到 L 值。

$$S = N \times (1/r) \rightarrow r = N/S = 8000/1000 = 8 \text{bit/band}$$

$$r = \log_2 L \rightarrow L = 2^r = 2^8 = 256$$

带宽

除 FSK 外，数字数据的模拟传输所需的带宽与信号速率成正比。而在 FSK 中还要加上载波信号频率间的差值。我们对每种技术都要讨论其带宽。

载波信号

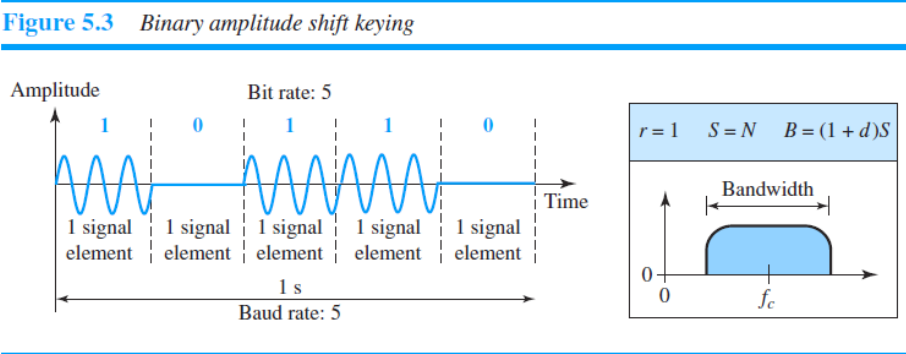
在模拟传输中，发送设备产生一个高频率信号作为基波来承载信息信号。这个基波就称为载波信号（carrier signal）或者载波频率。接收设备要将自己的收听频率调整到与所期望的发送设备的载波信号的频率一致。然后数字信息通过改变载波信号的一个或者多个特性（振幅、频率和相位）来调制载波信号。这种形式的改变称为调制（或移动键控）。

5.1.2 幅移键控

在幅移键控方式中，通过改变载波信号的振幅来生成信号元素。只有振幅变化而频率和相位保持不变。

二进制 ASK (BASK)

虽然有若干种信号元素的电平，每一个有不同的振幅，但是 ASK 常用的信号元素只使用两个电平。这称为二进制幅移键控或开关键控 (OOK)。一个信号电平的振幅峰值是 0，另一个和载波频率振幅一样。图 5-3 给出了二进制 ASK 的概念。



原书 138 页 图中的英文词对照标记

Amplitude 振幅

Time 时间

Bit rate 位速率

Baud rate 波特率

signal element 信号元素

图 5-3 二进制幅移键控

ASK 带宽

图 5-3 也给出了 ASK 的带宽。虽然承载信号只是一个简单正弦波，但调制处理后产生一个非周期性复合信号。正如第 3 章讨论的，这个信号有一个连续频谱。正如我们期望的，带宽与信号速率（波特率）成正比。但是，通常涉及另一个因子称为 d ，它取决于调制和过滤处理。 d 值在 0 和 1 之间。这意味着能用如下公式表示带宽，这里 S 是信号速率而 B 是带宽。

$$B = (1 + d) \times S$$

这个公式说明所需带宽最小值是 S ，最大值是 $2S$ 。最重要的一点是带宽的位置。载波频

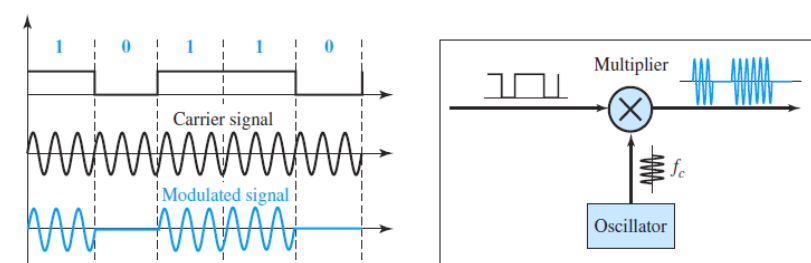
率 f_c 位于带宽中间。这意味着如果有可用的带通信道，就可以选择 f_c 使得调制后的信号能占用该带宽。实际上这是数模转换的最重要优点，可以把发生的带宽平移到可用带宽。

实现

ASK 完整实现的讨论超出了本书的范围。但是，实现的简单想法能帮助我们更好地理解概念本身。图 5-4 说明了如何简化实现二进制 ASK。

如果数字数据表示为一个单极 NRZ（见第 4 章），具有 1V 高电平和 0V 低电平的数字信号，那么实现可以通过 NRZ 数字信号乘以来自振荡器的载波信号获得。当 NRZ 信号的振幅是 1，载波频率的振幅保持不变；如果 NRZ 信号的振幅是 0，载波频率的振幅是零。

Figure 5.4 Implementation of binary ASK



原书 139 页 图中的英文词对照标记

Carrier signal 载波信号

Modulated signal 调制信号

Multiplier 乘法器

Oscillator 振荡器

图 5-4 二进制 ASK 实现

例 5-3

有 100kHz 的可用带宽，范围从 200 到 300kHz。如果通过使用 $d = 1$ 的 ASK 调制数据，那么载波频率和比特率各是多少？

解答

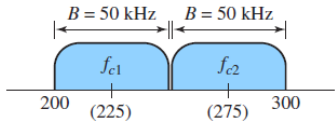
带宽中点是 250kHz，这意味着载波频率可以是 $f_c = 250\text{kHz}$ 。可以使用带宽的公式得到比特率（ $d = 1$ ， $r = 1$ ）

$$B = (1 + d) \times S = 2 \times N \times (1/r) = 1 \times N = 100\text{kHz} \rightarrow N = 50\text{kbps}$$

例 5-4

在数据通信中，通常使用双向通信的全双工链路。需要把带宽分成两部分，每部分各有一个载波频率，如图 5-5 所示。图中给出了两个载波频率和带宽的位置。每个方向可用带宽现在是 50kHz，因此每个方向的数据速率为 25kbps。

Figure 5.5 Bandwidth of full-duplex ASK used in Example 5.4



原书 140 页 图中的英文词对照标记

图 5-5 例 5-4 中全双工 ASK 带宽

多电平 ASK

上面的讨论只使用两个振幅电平。也可以有多于两个电平，信号可以使用 4、8、16 或更多的振幅，对应每次使用 2、3、4 或更多位来调制数据。在这些情况中， $r = 2$ 、 $r = 3$ 、 $r = 4$ 等。这不是用纯 ASK 实现，而是使用 QAM（后面会见到）实现。

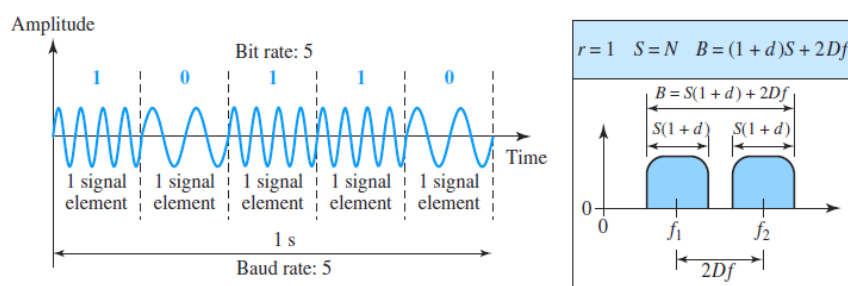
5.1.3 频移键控

在频移键控中，通过改变载波信号的频率来表示数据。调制后信号的频率在一个信号元素持续期间是恒定的，但是如果数据元素改变则在下一个信号元素会改变，而所有信号元素振幅峰值和相位保持不变。

二进制 FSK (BFSK)

理解二进制 FSK（或 BFSK）的一个方法是考虑两个载波频率。在图 5-6 中，已经选择了两个载波频率： f_1 和 f_2 。如果数据元素是 0，使用第一个载波，如果数据元素是 1 则使用第二个载波。但是，注意：这是只用于说明而不是实际的例子。通常这两个载波频率很高，它们的差很小。

Figure 5.6 Binary frequency shift keying



原书 140 页 图中的英文词对照标记

Amplitude 振幅

Time 时间

Bit rate 位速率

Baud rate 波特率

signal element 信号元素

图 5-6 二进制频移键控

正如图 5-6 所示，一个带宽中点的频率是 f_1 ，而另一个带宽中点的频率是 f_2 。 f_1 和 f_2 离这两个带的中点距离都是 Δf ，则两个频率之差是 $2\Delta f$ 。

BFSK 的带宽

图 5-6 还给出了 FSK 的带宽。两个载波信号还是简单正弦波，但是调制产生一个具有连续频谱的非周期复合信号。我们可以把 FSK 看作两个 ASK 信号，每一个有自己的载波频率 (f_1 或 f_2)。如果两个频率的差是 $2\Delta f$ ，那么 BFSK 要求的带宽是

$$B = (1+d) \times S + 2\Delta f$$

$2\Delta f$ 的最小值应该是多少？在图 5-6 中，我们已选择了一个大于 $(1+d)S$ 的值。对于正确的调制解调操作，显然最小值至少应该是 S 。

例 5-5

有一个 100kHz 的可用带宽，范围从 200 到 300kHz。如果使用 $d=1$ 的 FSK 调制数据，那么载波频率和比特率应该是多少？

解答

这个问题类似于例 5-3，但是我们使用 FSK 进行调制。频带的中点是在 250kHz。选择

$2\Delta_f$ 为 50kHz，这意味着

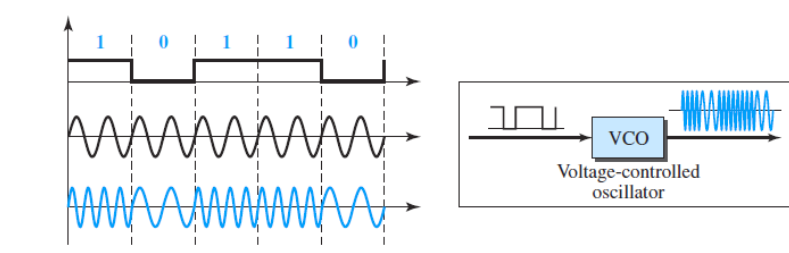
$$B = (1+d) \times S + 2\Delta_f = 100 \rightarrow 2S = 50\text{kHz} \rightarrow S = 25\text{Kband} \rightarrow N = 25\text{Kbps}$$

对比例 5-3，可以看到 ASK 的比特率是 50kbps，而 FSK 的比特率是 25kbps。

实现

BFSK 有两种实现方法：非相干和相干。在非相干 BFSK 中，当一个信号元素结束下一个信号元素开始时相位是不连续。在相干 BFSK 中，两个信号元素的边界处的相位是连续的。非相干 BFSK 可以通过把 BFSK 看作两个 ASK 调制并使用两个载波频率实现。相干 BFSK 可以通过使用一个压控振荡器（VCO）实现，压控振荡器是根据输入电平改变频率。图 5-7 简单说明了 BFSK 实现。振荡器的输入是单极 NRZ 信号。当 NRZ 振幅为零时，振荡器保持它的正常频率；当 NRZ 振幅是正的时，增加频率。

Figure 5.7 Implementation of BFSK



原书 142 页 图中的英文词对照标记

Voltage-controlled oscillator 压控振荡器

图 5-7 BFSK 实现

多电平 FSK

在 FSK 方法中，多电平调制（MFSK）是常见的。我们可以使用多于两个频率。例如，可以使用 4 个不同的频率： f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 每次发送两个位。每次发送 3 个位，可以使用 8 个频率。依次类推。但是，需要记住相邻频率需要相隔 $2\Delta_f$ 。为了调制解调器正常工作，显然 $2\Delta_f$ 的最小值需要是 S 。可以得出带宽是：

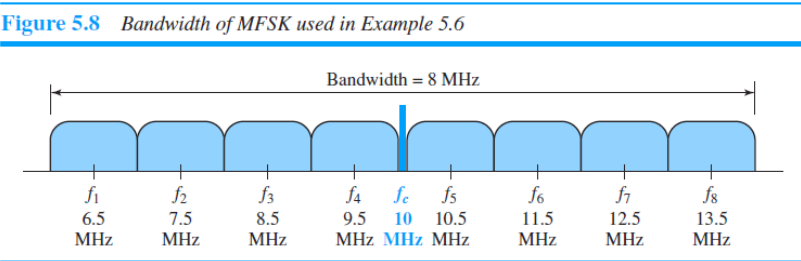
$$B = (1+d) \times S + (L - 1) 2\Delta_f \rightarrow B = L \times S$$

例 5-6

我们需要用 3Mbps 的比特率每次发送 3 位。载波频率是 10 MHz。计算使用不同频率的个数、波特率和带宽。

解答

使用不同频率的个数 $L = 2^3 = 8$ 。波特率 $S = 3 \text{ MHz}/3 = 1 \text{ Mbaud}$ 。这意味着载波频率必须是相隔 1 MHz ($2\Delta_f = 1 \text{ MHz}$)。带宽是 $B = 8 \times 1 = 8 \text{ MHz}$ 。图 5-8 给出了频率和带宽的分配。



原书 142 页 图中的英文词对照标记

Bandwidth 带宽

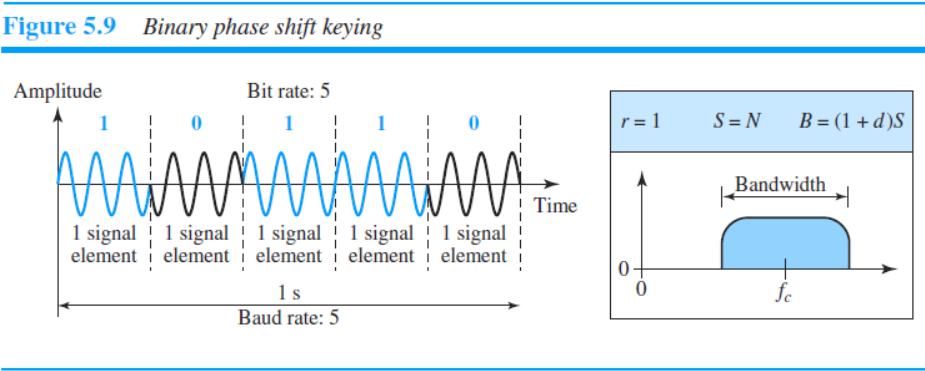
图 5-8 用于例 5-6 的 MFSK 带宽

5.1.4 相移键控

在相移键控中，通过改变载波的相位来表示两个或更多个不同的信号元素。当相位改变时，峰值振幅和频率保持不变。今天，PSK 比 ASK 或 FSK 更通用。很快会看到 QAM（组合了 ASK 和 FSK）是数模转换中占主导的方法。

二进制 PSK (BPSK)

最简单的 PSK 是二进制 PSK，只用两个信号元素，一个相位是 0° ，另一个相位 180° 。图 5-9 给出了 PSK 的概念描述。二进制 PSK 和二进制 ASK 一样简单，但是 PSK 比起 ASK 不易受噪声影响。在 ASK 中，位检测的标准是信号振幅；在 PSK 中则是相位。相比相位而言，噪声更容易改变振幅。换句话说，PSK 比 ASK 更不易受噪声影响。PSK 优于 FSK 是因为不需要两个载波信号。但是，PSK 需要更复杂的硬件来区分相位。



Amplitude 振幅

Time 时间

Bit rate 位速率

Baud rate 波特率

Bandwidth 带宽

signal element 信号元素

图 5-9 二进制相移键控

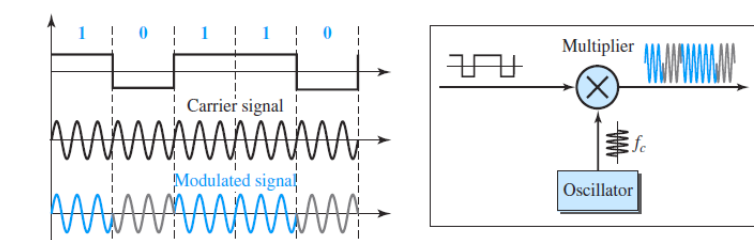
带宽

图 5-9 还说明了 BPSK 的带宽。这个带宽和二进制 ASK 一样，但比 BFSK 少。没有浪费带宽用来分离成两个载波信号。

实现

BPSK 的实现和 ASK 一样简单。原因是相位为 180° 的信号元素可以看成相位 0° 信号元素的补。这给了我们怎样实现 BPSK 的线索。我们使用用于 ASK 相同的想法，但这里是极性 NRZ 信号而不是单极 NRZ 信号，如图 5-10 所示。极性 NRZ 信号乘以载波频率。1（正电平）表示成相位从 0° 开始，0（负电平）表示成相位从 180° 开始。

Figure 5.10 Implementation of BASK



Carrier signal 载波信号

Modulated signal 调制信号

Multiplier 乘法器

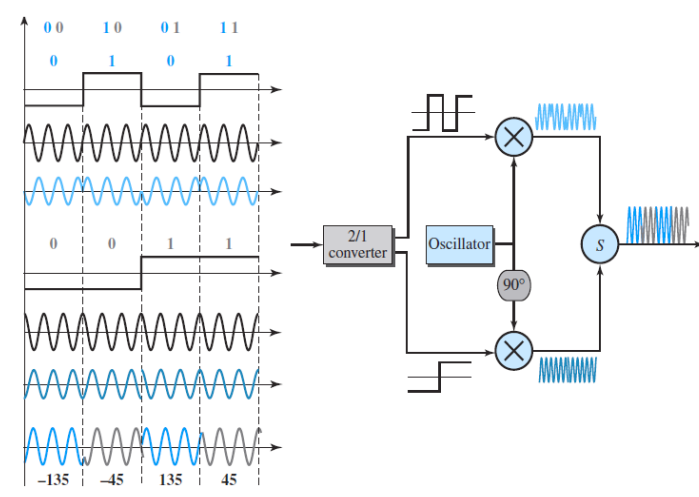
Oscillator 振荡器

图 5-10 BASK 实现

正交 PSK (QPSK)

BPSK 的简单性促使设计者在每个信号元素中一次使用 2 位，因此减小了波特率和所需带宽。这个方案称为正交 PSK 或 QPSK，因为它使用两个独立的 BPSK 调制：一个是同相的，另一个是正交的（异相）。进入的 2 个比特位先经过串行到并行的转换，它发送一个比特位给一个调制器，发送下一个比特位给另一个调制器。如果进入信号中的每个比特位的持续时间是 T ，发送相应 BPSK 信号的每个比特位持续时间就是 $2T$ 。这意味着每个 BPSK 信号中位的频率是原始信号的一半。图 5-11 说明了这个概念。

Figure 5.11 QPSK and its implementation



原书 144 页 图中的英文词对照标记

converter 转换器

Oscillator 振荡器

图 5-11 QPSK 和它的实现

由每个乘法器产生各自的复合信号是频率相同正弦波，但相位不同。当这两个复合信号相加时，其结果是另一个正弦波，相位可能是 45° 、 -45° 、 135° 和 -135° 。在输出信号中有 4 种信号元素 ($L=4$)，使得每个信号元素可以发送 2 位 ($r=2$)。

例 5-7

试求使用 QPSK 以速率 12 Mbps 传输信号的带宽，设 $d=0$ 。

解答

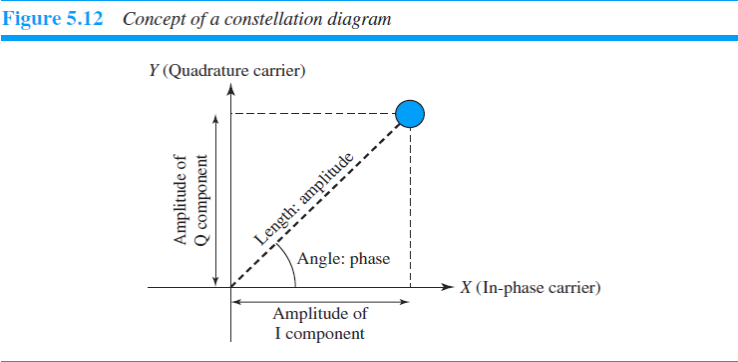
对于 QPSK，每个信号元素携带 2 比特位，即 $r=2$ 。因此，信号速率（波特率）是 $S=N$

$\times(1/r) = 6\text{M}$ 波特。已知 $d = 0$ ，有 $B = S = 6\text{ MHz}$ 。

星座图

星座图（constellation diagram）有助于定义信号元素的振幅和相位，尤其当我们使用两个载波（一个同相，而另一个正交）时。当处理多电平 ASK、PSK 或 QAM（见下一节）时，星座图很有用。在星座图中，一个信号元素用一个点表示。它携带的位或位组合一般写在它的旁边。

星座图有两根轴。水平 X 轴与同相载波相关，垂直 Y 轴与正交载波相关。图中每个点，可以包含 4 条信息。点在 X 轴的投影定义了同相成分的峰值振幅，点在 Y 轴的投影定义了正交成分的峰值振幅。点到原点的连线（向量）长度是该信号元素的峰值振幅（X 成分和 Y 成分的组合），连线和 X 轴之间的角度是信号元素的相位。所有需要的信息都可以从星座图中轻易得到。图 5-12 表示了星座图。



原书 145 页 图中的英文词对照标记

Amplitude of Q component	Q 成分振幅
Length: amplitude	长度：振幅
Angle: phase	角度：相位
Amplitude of I component	I 成分的振幅
In-phase carrier	同相载波

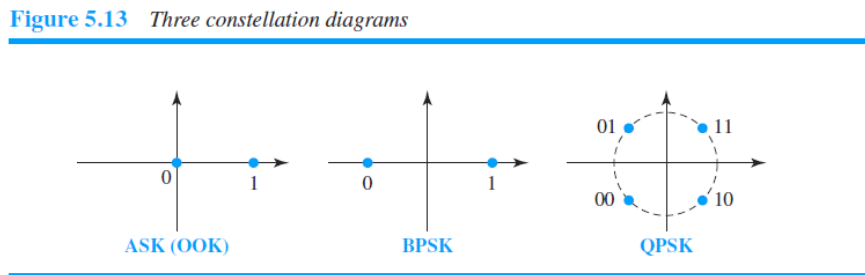
图 5-12 星座图概念

例 5-8

试分别画出 ASK（OOK）、BPSK 和 QPSK 信号的星座图。

解答

图 5-13 分别是这三个星座图。



原书 145 页 图中的英文词对照标记

图 5-13 三个星座图

让我们分别分析每一种情形：

□ 对于 ASK，我们只需要同相载波。因此，两个点应该在 X 轴上。二进制 0 有 0V 的振幅，二进制 1 有（比如）1V 的振幅。这两个点位于原点和单位 1 处。

□ BPSK 也只使用同相载波。但是，我们使用极性 NRZ 信号用于调制。它产生两种类型的信号元素，一种振幅是 1，另一种振幅是-1。换句话说，BPSK 创建两个不同的信号元素，一个振幅为 1 并同相；另一种振幅为 1 并有 180° 偏移。

□ QPSK 使用两种载波：一种同相而另一种正交。表示 11 的点由两个组合信号元素组成，两个都是 1V 的振幅，一个元素由同相载波表示，另一个元素由正交载波表示。发送这个 2 位数据元素的最后信号元素的振幅是 $2^{1/2}$ ，相位是 45°。另外三个点的幅度类似。所以信号成分振幅是 $2^{1/2}$ ，但是它们的相位不同（45°、135°、-135° 和 45°）。当然，我们选择载波振幅 $1/(2^{1/2})$ 以使最后振幅 1V。

5.1.5 正交振幅调制

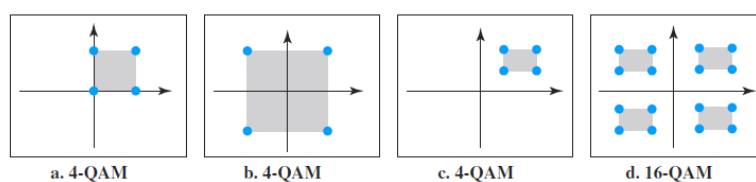
由于 PSK 受到设备辨别相位细小差别能力的限制，所以它限制了其潜在的比特率。到目前为止，每次只是改变正弦波三种特性中的一种特性，那么，改变两种特性会怎样呢？带宽的限制使得 FSK 与其他调制方法无法结合使用。为什么不将 ASK 与 PSK 结合在一起呢？即使用两个载波，一个同相而另一个正交，而且每个载波都用不同的振幅。这就是正交振幅调制（quadrature amplitude modulation, QAM）的概念。

Quadrature amplitude modulation is a combination of ASK and PSK.

正交振幅调制是 ASK 和 PSK 的结合。

QAM 可能的变化有无穷多个。图 5-14 给出了其中一些变化方案。图 5-14a 给出了最简单的 4-QAM 方案（4 个不同信号元素类型），它使用单极 NRZ 信号来调制每个载波。这与 ASK（OOK）的机制一样。图 5-14b 部分给出了另一个使用极性 NRZ 的 4-QAM 方案，但它完全跟 QPSK 一样。图 5-14c 部分给出了另一个 QAM-4，这个方案使用带两个正电平的信号来调制两个载波。最后，图 5-14d 给出了带 8 个电平（4 个正 4 个负）信号的 16-QAM 星座图。

Figure 5.14 Constellation diagrams for some QAMs



原书 146 页 图中的英文词对照标记

图 5-14 一些 QAM 方案的星座图

QAM 的带宽

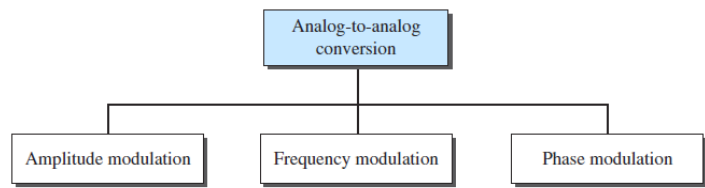
QAM 传输所需的最小带宽与 ASK 和 PSK 传输所需的最小带宽相同。相对于 ASK 来说，QAM 与 PSK 具有同样的优点。

5.2 模拟信号调制

模拟信号调制是通过模拟信号来表示模拟信息的。人们可能会问，既然信号已经是模拟的了，为什么还要调制模拟信号呢？答案是，如果介质具有带通特性或者只有带通带宽可用，那么模拟信号就需要进行调制。这方面的一个实例就是无线电。政府为每一个无线电台分配基带带宽，每个电台生成的模拟信号都是低通信号，都在同一频率范围内。为了能够收听不同电台，需要将低通信号平移，使每一个信号对应不同的频率范围。

模拟-模拟转换 (analog-to-analog conversion) 可以通过三种方法实现：**调幅 (amplitude modulation, AM)**、**调频 (frequency modulation, FM)** 和 **调相 (phase modulation, PM)**。FM 和 PM 通常归在一起。见图 5-15。

Figure 5.15 Types of analog-to-analog modulation



原书 147 页 图中的英文词对照标记

analog-to-analog conversion 模拟-模拟转换

amplitude modulation 调幅

frequency modulation 调频

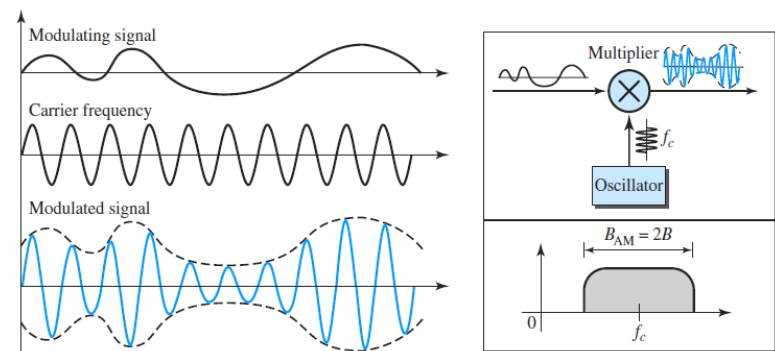
phase modulation 调相

图 5-15 模-模调制类型

5.2.1 调幅(AM)

在 AM 传输中，对载波信号进行调制，使其振幅随着调制信号的振幅变化而被改变。载波的频率和相位保持不变，只有振幅随着信息改变。图 5-16 说明了其工作原理。调制信号变成了载波信号的一个包络线。如图 5-16 所示，AM 通常使用简单乘法器实现，因为载波信号的振幅需要根据调制信号的振幅变化。

Figure 5.16 Amplitude modulation



原书 148 页 图中的英文词对照标记

Modulating signal 调制信号

Carrier frequency 载波频率

Modulated signal 调制后信号

Multiplier 乘法器

Oscillator 振荡器

图 5-16 调幅

AM 带宽

图 5-16 还表示了 AM 信号的带宽。AM 信号的带宽是调制信号带宽的两倍，并且覆盖了以载波频率为中心的频率范围。但是，载波频率上边带和下边带的信号成分携带了完全相同的信息。基于这个原因，一些实现丢弃了一半信号，削减了一半带宽。

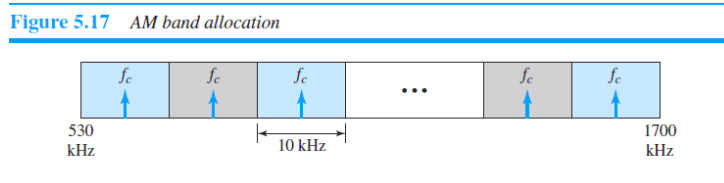
The total bandwidth required for AM can be determined from the bandwidth of the audio signal: $B_{AM} = 2B$.

AM 所需的总带宽可以由音频信号的带宽确定： $B_{AM} = 2B$ 。

AM 无线电的标准带宽分配

音频信号（语音和音乐）的带宽通常是 5kHz。所以一个调幅的无线电台需要的最小带宽是 10 kHz。实际上，联邦通信委员会（FCC）分配给每一个 AM 电台的带宽是 10 kHz。

AM 电台可以使用在 530 ~1700 kHz（1.7 MHz）之间的任何一个频率作为载波频率。但是，每一个调幅电台的载波频率与其他电台的载波频率间隔至少是 10 kHz（一个 AM 带宽），以避免干扰。如果一个电台使用的载波频率是 1100kHz，下一个电台的载波频率不能低于 1110 kHz（见图 5-17）。



原书 148 页 图中的英文词对照标记

图 5-17 AM 频带分配

5.2.2 调频(FM)

在 FM 传输中，载波信号的频率随着调制信号电平（振幅）的改变而调整。载波信号的峰值振幅和相位都保持不变，但是当调制信号的振幅改变时，载波信号的频率相应地改变。图 5-18 说明了调制信号、载波信号和最终得到的 FM 信号的关系。

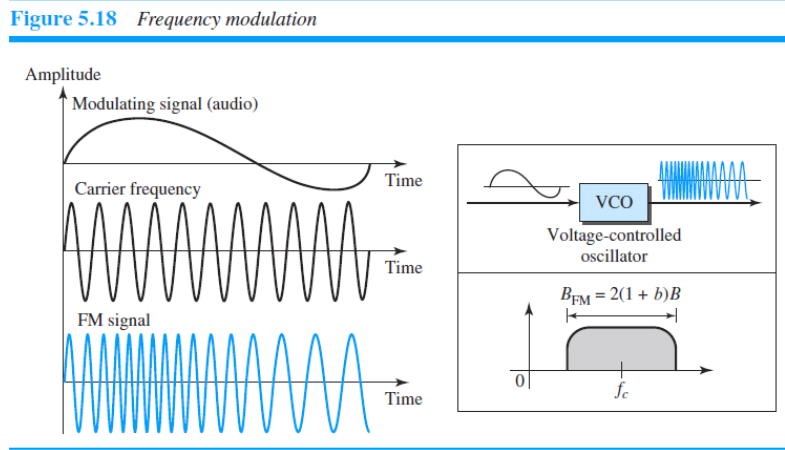
如图 5-18 所示，FM 通常使用用于 FSK 的压控振荡器实现。振荡器的频率根据输入电平（即调制信号的振幅）变化。

FM 带宽

图 5-18 还表示了 FM 信号的带宽。实际带宽很难完全确定，但是可以从经验上得出是模拟信号的若干倍，或者 $2(1 + \beta) B$ ，这里 β 是取决于调制技术的因子，一般为 4。

The total bandwidth required for FM can be determined from the bandwidth of the audio signal: $B_{FM} = 2(1 + \beta)B$.

FM 所需的总带宽可以由音频信号的带宽确定： $B_{FM} = 2(1 + \beta)B$ 。



原书 149 页 图中的英文词对照标记

Amplitude	振幅
Time	时间
Modulating signal (audio)	调制信号（音频）
Carrier frequency	载波频率
FM signal	FM 信号
Voltage-controlled oscillator	压控振荡器

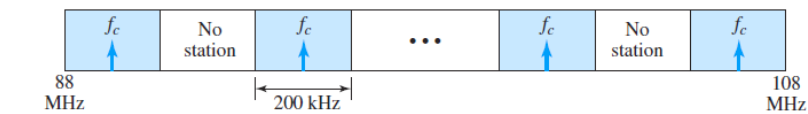
图 5-18 调频

FM 无线电的标准带宽分配

立体声广播里的音频信号（语音和音乐）的带宽接近于 15 kHz。FCC 允许每一个调频电台使用 200 kHz（0.2 MHz）的带宽，这表示具有 $\beta=4$ 的额外的防护频带。FM 电台可以采用 88~108MHz 之间的任何频率作为载波频率。电台之间必须有至少 200 kHz 的频率分隔，以保持电台之间的带宽不重叠。为了提供更强的专用性，FCC 规定在一个给定的区域内只能交替使用分配的波段，其他波段都被保留，以防止任何两个电台之间的相互干扰。比如给定的范围是 88~108MHz，在这个范围共有 100 个潜在的调频波段，其中的 50 个可以随时

使用。图 5-19 说明了这一概念。

Figure 5.19 FM band allocation



原书 150 页 图中的英文词对照标记

No station 无站点

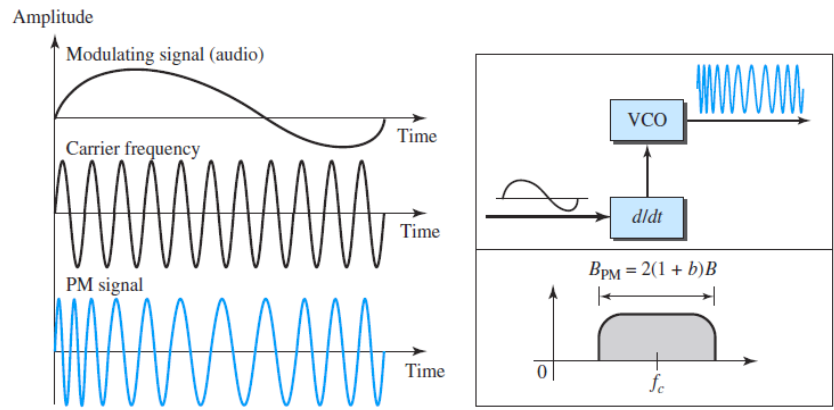
图 5-19 FM 波段分配

5.2.3 调相(PM)

在 PM 传输中，载波信号的相位是根据调制信号的电平（振幅）改变而调整。载波信号的峰值振幅和频率都保持不变，但是当调制信号的振幅改变时，载波的相位也相应地变化。可以从数学上证明 PM 和 FM 除了有一点不同外都相同（见附录 C）。在 FM 中，载波频率的瞬时变化与调制信号的振幅成正比；在 PM 中，载波频率的瞬时变化与调制信号振幅的导数成正比。图 5-20 说明了调制信号、载波信号和最后得到的 PM 信号之间的关系。

如图 5-20 所示，PM 通常使用压控振荡器和导数发生器实现。振荡器的频率根据输入电平（调制信号的振幅）的导数变化。

Figure 5.20 Phase modulation



原书 150 页 图中的英文词对照标记

Amplitude 振幅

Time 时间

Modulating signal (audio) 调制信号（音频）

Carrier frequency 载波频率

PM signal PM 信号 VCO 压控振荡器

图 5-20 调相

PM 带宽

图 5-20 还显示了 PM 信号的带宽。实际带宽很难准确确定，但是从经验上可以得出是模拟信号带宽的若干倍。虽然，公式显示 FM 和 PM 的带宽相同，PM 中 b 较小（窄带大约是 1，宽带大约是 3）。

The total bandwidth required for PM can be determined from the bandwidth and maximum amplitude of the modulating signal: $B_{PM} = 2(1 + \beta)B$.

PM 所需的总带宽可以由调制信号的带宽和最大振幅确定： $B_{PM} = 2(1 + \beta)B$ 。

5.3 本章结束资料

5.3.1 推荐读物

为了更详细地讨论与本章有关的主题，推荐下列读物与网站，在本书末列出了括号[……]内的参考资料。

书籍

数字信号到模拟信号的讨论有[Pea92]的第 14 章，[Cou01]的第 5 章和[Sta04]的 5.2 节。模拟信号到模拟信号的讨论有[Pea92]的第 8 章到第 13 章，[Cou01]的第 5 章和[Sta04]的 5.4 节。[Hsu03]给出本章所有内容的数学方法，更深入的资料可参考[Ber96]。

5.3.2 关键术语

Amplitude modulation (AM)	调幅	frequency modulation (FM)	调频
Amplitude shift keying (ASK)	幅移键控	frequency shift keying (FSK)	频移键控
Analog-to-analog conversion	模-模转换	phase modulation (PM)	调相
Carrier signal	载波信号	phase shift keying (PSK)	相移键控
Constellation diagram	星座图	quadrature amplitude modulation (QAM)	正交幅度调制
Digital-to-analog conversion	数-模转换		

5.3.3 本章小结

数字到模拟的转换是指根据数字数据中信息而改变模拟信号某种特性的过程。数字到模拟转换可以使用下列方法完成：幅移键控（ASK），频移键控（FSK）和相移键控（PSK），以及 ASK 与 PSK 结合的正交振幅调制（QAM）。在幅移键控调制中，载波信号的振幅改变生成信号元素。振幅改变，频率与相位保持不变。在频移键控调制中，载波信号的频率随所表示数据而改变，调制信号的频率在一个信号元素持续期间内保持不变，但如果数据元素改变则下一个信号元素也改变，而所有信号元素峰值振幅和相位保持不变。在相移键控调制中，载波信号的相位改变表示两个或多个不同信号元素。相位变化，峰值振幅和频率保持不变。特别在用两个载波（一个是同相的，另一个是正交的）时，星座图表示信号元素的振幅和相位。正交振幅调制（QAM）是 ASK 与 PSK 结合，QAM 使用两个载波（一个是同相的，另一个是正交），每个载波信号有不同的振幅值。模拟到模拟转换是通过模拟信号来表示模拟

信息。如果介质具有带通特性或者只有带通带宽可用，那么模拟信号就需要调制。

模拟到模拟转换可使用三种方法：调幅（AM），调频（FM）和调相（PM）。在 AM 传输中，载波信号被调制使得其振幅随调制信号的振幅改变而改变，载波的频率和相位保持不变，只有振幅随信息不同而改变。在 FM 传输中，载波信号的频率随调制信号（振幅）的电平变化而调整，载波信号的峰值振幅和相位保持不变，但是当信号的振幅改变时，载波的频率相应地改变。在 PM 传输中，载波信号的相位随着调制信号（振幅）电平改变调整，载波信号峰值振幅和频率保持不变，但信息信号的振幅变化，载波的相位相应地改变。

5.4 练习集

5.4.1 小测试

本书网页上能找到本章的一整套互动测试。强烈推荐，学生继续做习题前，使用这些互动测试检测他们对材料的理解。

5.4.2 问答题

Q5-1. 解释模拟传输。

Q5-2. 解释载波信号及其在模拟传输中的作用。

Q5-3. 解释数字到模拟的转换。

Q5-4. 在下列每种数字到模拟的转换中，模拟信号对哪些特性的修改来表示数字信号？

a. ASK b. FSK c. PSK d. QAM

Q5-5. 数字到模拟转换的四种技术（ASK, FSK, PSK 及 QAM），哪一种最易受噪声影响？

Q5-6. 解释星座图，并说明它在模拟传输中所起的作用？

Q5-7. 信号被表示为星座图，信号的两个分量是什么？水平轴代表什么分量？垂直轴代表什么分量？

Q5-8. 解释模拟到模拟的转换。

Q5-9. 在下列每种模拟到模拟转换中，模拟信号什么特性的改变可表示低通模拟信号？

a. AM b. FM c. PM

Q5-10. 模拟到模拟转换的三种技术（AM, FM 及 PM），哪一种最易受噪声影响？

5.4.3 习题

P5-1. 已给定比特率和调制类型，试计算波特率：

a. 2000bps, FSK

b. 4000bps, ASK

- c. 6000bps, QPSK
- d. 36000bps, 64-QAM

P5-2. 已给定波特率和调制类型, 试计算比特率:

- a. 1000 波特, FSK
- b. 1000 波特, ASK
- c. 1000 波特, BPSK
- d. 1000 波特, 16-QAM

P5-3. 下列技术每波特有多少位?

- a. 具有 4 个不同振幅的 ASK
- b. 具有 8 个不同频率的 FSK
- c. 具有 4 个不同相位的 PSK
- d. 128 点星座图的 QAM

P5-4. 试画出下列各情况的星座图

- a. 峰值振幅为 1 和 3 的 ASK 调制
- b. 峰值振幅为 2 的 BPSK 调制
- c. 峰值振幅为 3 的 QPSK 调制
- d. 具有两个分别为 1 和 3 的峰值振幅以及 4 个相位的 8-QAM

P5-5. 对下列情况试画出星座图, 并对每种情况求出峰值振幅值及确定调制类型 (ASK, FSK, PSK 或 QAM)。注意: 括号内的坐标分别表示 I 和 Q 分量。

- a. 两个数据点 (2, 0) 和 (3, 0)
- b. 两个数据点 (3, 0) 和 (-3, 0)
- c. 四个数据点 (2, 2), (-2, 2), (-2, -2) 和 (2, -2)
- d. 两个数据点 (0, 2) 和 (0, -2) 的星座图

P5-6. 如果星座图具有下列数据点的个数, 试问每个波特发送多少位?

- a. 2 b. 4 c. 16 d. 1024

P5-7. 如果发送速率为 4 000bps, 试问下列情况要求带宽是多少? 设 $d=1$ 。

- a. ASK
- b. 具有 $2\Delta f=4\text{kHz}$ 的 FSK
- c. QPSK
- d. 16-QAM

P5-8. 电话线的带宽是 4kHz，用下列调制技术能发送的最大比特率是多少？设 $d=0$ 。

- a. ASK b. QPSK c. 16-QAM d. 64-QAM

P5-9. 某公司拥有 1MHz 带宽（低通）的介质，需要建立 10 个独立的信道，每个信道至少能发送 10Mbps 的能力，决定用 QAM 调制技术。试问对每个信道，每波特最小位的个数是多少？每个信道星座图点数是多少？设 $d=0$ 。

P5-10. 有线电视公司用有线电视信道（带宽为 6MHz）为每个用户提供数字通信服务。如果公司使用 64-QAM 技术，每个用户的有效速率是多少？

P5-11. 如果需要调制带宽为 5 kHz 的语音信号，对下列情形试求带宽：

- a. AM b. FM ($\beta = 5$) c. PM ($\beta = 1$)

P5-12. 用 FCC 规定的带宽试求下列信道的个数：

- a. AM b. FM

5.5 仿真试验

5.5.1 小程序

我们已经创建了一些 JAVA 小程序，用来说明本章所讨论的主要概念。强烈推荐学生执行本书主页上的这些程序，仔细检查协议的执行。