

# 第 1 章

## 数字信号处理简介

Robert Oshana

### 1.1 何谓数字信号处理

数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 是一种处理信号与数据的方法, 目的在于通过增强、更改、分析信号以确定其中包含的具体信息, 主要处理从现实世界中转换而成的数列或信号。这些信号经数学技术处理后, 可提取出一定的信息, 或者以较优的方式转换。

DSP 中的术语“数字”表示需要以容易处理的数字形式来处理用离散信号表示的数据。换句话说, 信号会数字化表示。这种表示方式意味着对信号 (包括时间) 一个或多个属性某种形式的量化。

这仅仅是其中一种类型的数字数据; 其他的类型还包括用数字表示的 ASCII 数字和字母。

DSP 中的术语“信号”是一种可变参数, 这个参数可视为在电路中传输的信号。这个信号一般起始于模拟世界里不停变化的信息<sup>⊖</sup>。现实世界里的信号包括:

- 大气温度
- 声音
- 湿度
- 速度
- 位置
- 流量
- 光
- 压力
- 容积

我们可以把信号看成一个理论上无限个值的电压。它代表某种物理数量的变化。其他信号的实例还有正弦波, 用于表示真人发声的波形, 以及普通电视的信号。信号是一个

---

⊖ 通常因为某些信号也可能是离散形式, 离散形式的一个示例可以是开关, 它以或开或关的形式离散地表示。

## 2 DSP 嵌入式实时系统权威指南

可检测到的物理量。消息或信息可以通过信号来传输。

一维信号使用只有一个自变量的函数来描述一个物理量的变化。语音信号是一维信号，它表示一个空气压力随时间连续变化的函数。

最后，“处理”这个词，在 DSP 里涉及软件程序的使用，而不直接以硬件来处理数据。DSP 是一个执行信号处理的设备或系统，主要用软件操纵信号。软件程序的优势在于可以相对简单地改变信号处理行为或性能，而这很难用模拟电路做到。

由于 DSP 在环境下与信号相互作用，因此 DSP 系统必须要对环境做出反应。换句话说，DSP 必须要能够跟上环境的变化，这就是稍后要讲到的“实时”处理。

### 1.2 DSP 的优势

数字信号处理方案相对模拟方案有许多优势，其中包括如下几个。

- 可变性：数字系统可以通过简单的重新编程来变更应用，或微调现有的应用。DSP 可以很容易地修改和更新应用程序。
- 可重复性：模拟器件在时间里或温度变化中会有细微的变化。由于系统的可编程特性，一个可编程数字解决方案有更多的可重复性。例如，一个系统中的多个 DSP 芯片可以运行完全一样的程序，并且非常容易实现可重复性。通过模拟信号处理，系统中的每个 DSP 芯片都需要单独调谐。
- 体积、重量、功耗：相对于全硬件元器件的方案，DSP 方案大部分为软件，设备功耗更低。
- 可靠性：模拟系统的可靠性取决于硬件设备工常工作的程度。由于一些物理条件造成的设备失效会影响整体系统，可能使其退化甚至失效。用软件实现的 DSP 方案，在软件正确实现的前提下，都可以正常工作。
- 可扩展性：在一个模拟系统中加入新的功能，工程人员必须加入更多硬件。有时即使加入更多硬件也无法实现。在一个 DSP 系统里加入新功能只涉及加入软件代码，更加便捷。

### 1.3 DSP 系统

DSP 处理的信号来自现实世界，由于 DSP 必须对这些信号作出反应，它必须能够根据现实世界的变化而变。我们生活在模拟世界中，周边的信息快速变化着。一个 DSP 系统能够及时处理这些模拟信号并反馈结果。一个典型的 DSP 系统（图 1-1）包含：

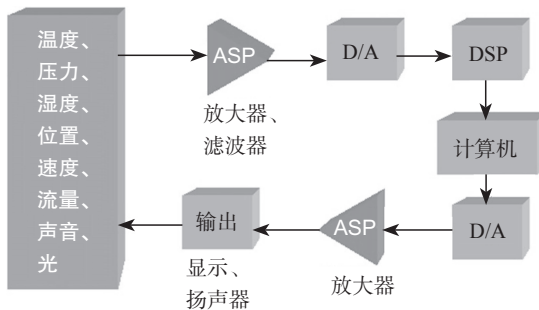


图 1-1 一个 DSP 系统

- 信号源：一个用来产生信号的设备，如麦克风、雷达传感器、流量计。
- 模拟信号处理（Analog Signal Processing, ASP）：在信号源端对信号放大或滤波的电路。
- 模数转换（Analog-to-Digital Conversion, ADC）：一种电子化的过程，即将一个持续变化的信号变换成多量级（数字）信号，而不改变其携带的基本内容。ADC 的输出有确定的量级或状态，状态的数量为 2 的幂——2, 4, 8, 16 等。最简单的数字信号只有两个状态，即二进制。
- 数字信号处理：用来提高现代数字通信精度及可靠性的多种方法。DSP 的工作原理为清晰及标定数字信号的量程或状态。比如，一个 DSP 系统能够分辨出有序的人造信号和紊乱的噪声。
- 计算机：为需要的额外信号处理提供更多的计算资源。比如，如果需要格式化 DSP 处理后的信号以向用户显示，额外的计算机可以用来完成这个工作。
- 数模转换（Digital-to-Analog Conversion, DAC）：一个信号从几个（一般为两个）定义的量程或状态转换为理论上无限多个状态的信号。一个普遍的例子为使用调制解调器将计算机数据处理成能够通过双核电话线路传输的音频信号。
- 输出：一个可以表示处理后信号的系统。例如显示终端、扬声器或另一个计算机。

系统通过运算信号来生成新的信号。例如，麦克风将空气压力转换为电流，扬声器将空气压力转换成电流。

### 1.3.1 模数转换

信号处理系统的第一步是将现实世界中的信息输入系统。这也要求转换模拟信号为数字信号以便于数字系统的处理。模拟信号通过一个叫作模数转换器（A/D 或 ADC）的器件。模数转换器通过采样将模拟信号转换成数字信号，采样即等时间间隔地测量信号。每个信号都赋予一个数码（图 1-2）。这些数码可以用 DSP 来处理。这些数码的数量通常为 2 的幂（2, 4, 8, 16 等）。最简单的数字信号只有两个状态，即为二进制信号。

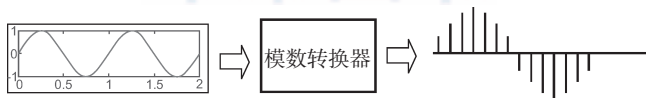


图 1-2 数字信号中的模数转换器

模拟信号的例子有代表人声（语音）的电波，及电视摄像机的信号。这些模拟信号都可以使用模数转换器转换成数字信号，然后由可编程数字信号处理器处理。

相对于模拟信号，数字信号处理更加高效。数字信号普遍有明确的定义且顺序，这使电路更容易将它从噪声中区分出来。噪声是不需要的信息。噪声可以是任何信号：从汽车发动机的背景噪声到数字化后的照片上的划痕。在模拟世界里噪声可以表示为让信号及数据品质降低的电或电磁能。数字及模拟系统里都会有噪声。采样错误（我们稍后会提到更多）也会让数字信号的品质下降。噪声太大时会把所有信息（包括文字、程序、影像、音频、视频及遥测信号）的品质下降。数字信号处理提供一个有效降低噪声影响的方法，以便

## 4 DSP 嵌入式实时系统权威指南

捷地从信号中过滤掉“坏”信号。

举个例子，假设要将一个如图 1-2 的模拟信号转换成数字信号，以进行更多处理。第一个要考虑的问题就是要多快的采样或测量模拟信号，才能准确地数字域来表示它。采样率以每秒取得的模拟事件（如声音）采样值在数字域代表它。再假设我们将以  $T$  秒为周期来采样。如此看来：

$$\text{采样周期}(T) = 1 / \text{采样频率}(f_s)$$

采样频率使用赫兹 (Hz)<sup>Ⓐ</sup> 为单位。

如果采样率是 8kHz，即每秒 8000 个周期，采样周期为：

$$T = 1/8000 = 125\text{ms} = 0.000125\text{s}$$

这告诉我们，当信号以这样的采样率采样时，在下一个采样信号到达前我们有 0.000125s 的时间来对此信号执行所有需要的处理（要记得这些采样值会不断地到来，我们不能在处理时出现延迟）。这是“实时系统”的普遍原则，我们会很快在下面讨论。

如果知道时间上的限制，我们就可以将能赶上采样率所需要的处理器速度确定下来。处理器速度并不以时钟速度来衡量，而以执行指令的速度来衡量。当我们知道处理器的指令周期时，我们就能够确定能有多少个指令来处理采样信号：

$$\text{采样周期}(T) / \text{指令周期} = \text{每个采样的指令数}$$

对于一个 100MHz 的处理器，每个周期执行一条指令，它的指令周期将是：

$$1/100\text{MHz} = 10\text{ns}$$

$$125\mu\text{s} / 10\text{ns} = 12500 \text{ 条指令} / \text{秒}$$

$$125\mu\text{s} / 5\text{ns} = 12500 \text{ 条指令} / \text{秒} \text{ (200MHz 处理器)}$$

$$125\mu\text{s} / 2\text{ns} = 12500 \text{ 条指令} / \text{秒} \text{ (500MHz 处理器)}$$

这个例子表明，更高的指令执行速度能够让我们对采样值进行更多处理。如果只是这样简单，我们只要选择可有的最高处理速度即可以有丰富的裕量。遗憾的是，事情并不如此简单。很多其他因素（如成本、准确度、功耗限制）也必须一并考虑。嵌入式系统有众多类似的限制，还有体积及重量限制（对于便携式设备很重要）。例如，我们怎么知道我们对输入的模拟信号进行多快的采样才能在数字域准确地表示信号携带的信息呢？如果采样次数不够多，我们获得的信息将无法表征真实的信号。如果采样次数太多，系统会“过度设计”，同时会过多地约束我们自己。

### 1.3.2 奈奎斯特准则

奈奎斯特定理<sup>Ⓑ</sup>是最重要的采样准则之一，它指出可准确表达出来的最高信号频率是采样率的一半。奈奎斯特采样率指能够完整表达一个信号的最低采样率。遵守奈奎斯特采样率能够准确地对初始信号进行还原。实际的采样率要比奈奎斯特采样率高，因为在采样过

Ⓐ 赫兹是频率（状态变化或声波、交流电或其他周期性波形中的周期）的单位。赫兹这个单位是为了纪念德国物理学家海因里希·赫兹。

Ⓑ 在 1933 年为了纪念科学奈奎斯特而命名。

程还会带来各种量化错误。

例如，人类能听到的声音频率范围是 20 ~ 20000Hz，所以将声音记录到 CD 上，采样频率必须为 40000 才能恢复 20000Hz 的信号。CD 标准采样率是每秒 44100 次，即 44100Hz。

如果信号不使用奈奎斯特采样率来采样，采样后的数据将无法准确地代表真正的信号。请看以下正弦波：

垂直虚线是采样区间。每个点是信号交叉处。这些代表着转换过程中的实际采样（例如模数转换器）。如果图 1-3 所示的采样率低于所需的奈奎斯特采样率，问题就出现了。当信号恢复时，波形结果将可能如图 1-4 所示。

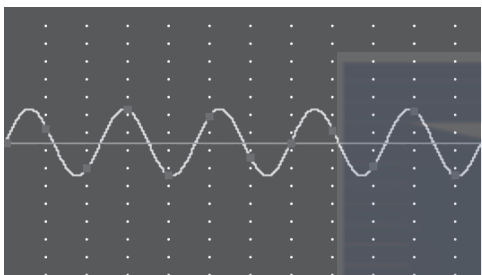


图 1-3 如果一个信号用低于奈奎斯特采样率的速率来采样将无法完整地代表原来的信号

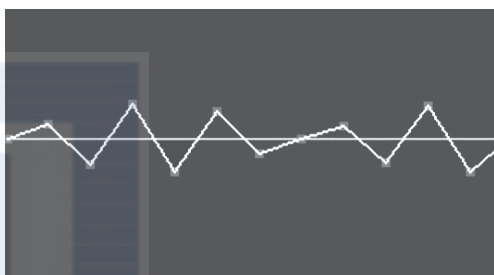


图 1-4 未能按照奈奎斯特采样定理来采样，重建的波形就存在问题

这个信号一点都不像原来的输入。这个不良的特性称为“混叠”。混叠为采样一个信号时，同正确频率一起产生出来的虚假（或混叠）频率。

混叠会因信号不同而有所不同。混叠在图像中出现的锯齿边际或阶梯效应，在声音上产生“嗡嗡”声。为了减少或消除这种噪声，模数转换器的输出一般会以低通滤波来去除比奈奎斯特采样率高的信号。低通滤波也能去除在采样前引入的高频噪声及干扰。第 2 章将详细介绍相关知识。

我们假设要将模拟音频转换为数字信号，以进行更多处理。在音频信息中，我们用“模拟信号”一词来表示在空气中传播的声波。一个简单的音频信号（如正弦波），会让空气形成间隔均匀、高低变换的气压波纹。这些信号进入一个麦克风（或耳鼓膜），能让传感器前后均匀移动，产生同频电压。根据从麦克风测量的电压而绘出的图形会与图 1-5 很相像。

如果我们要编辑、操作或用通信链路发送这个信号，这个信号必须先数字化。进来的模拟电压需要模数转换成二进制数值。这里两个重要的约束是采样率（测量这个电压的频率）及分辨率（衡量电压数位值的长短，具体就是模数转换器的位宽）。

更大的 ADC 拥有加长的输入动态范围。当一个模拟信号被数字化时，我们其实就像在一定的间隔（也就是以采样率），连续拍下这个波形的快照，然后将这些快照另存为二进制编码或数值。

当这个波形从数列恢复后，结果将是原来波形（图 1-6）的“阶梯”近似值。

## 6 DSP 嵌入式实时系统权威指南

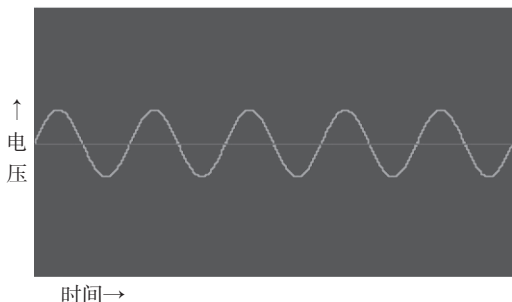


图 1-5 模拟数据随时间轴变化的波形

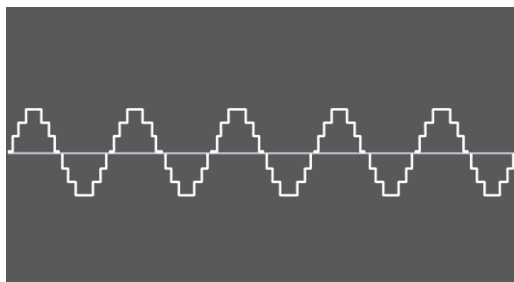


图 1-6 由数字化的采样值重建模拟信号

要将这个数字数据转换为模拟电压，这个“阶梯”近似值要用一个滤波器来作“平滑”处理。这样将会产生一个类似于输入的输出（假设没有经过其他的处理）。一旦采样率、解析度（或两者）均太低，恢复后波形的品质会变差。若不按照采样率（或更高）来处理数据，结果等同于硬实时系统（如 CD 播放器）出现计算错误。一般可以如此计算：

$$(\text{需处理的指令数量} \times \text{采样率}) < f_{\text{clk}} \times \text{每时钟周期处理的指令数 (MIPS)}$$

其中  $f_{\text{clk}}$  为数字信号处理器的时钟频率。

对采样率的需求取决于应用。采样率的应用范围很大，从高端的雷达及信号处理（使用高至及高于 1GHz 的采样率），到采样率需求低得多的控制及仪器应用（在 10 ~ 100Hz 范围）。算法的复杂度也必须顾及。普遍来说，更复杂的算法需要更多的指令周期来获得计算结果，所以必须要用更低的采样率来满足处理这些复杂算法所需要的时间。

### 1.3.3 数模转换

在许多应用里，一个信号经过数字信号处理器的处理、增强及变换后必须送回现实世界。数模转换是这样—个过程，即把有若干（通常为 2）量级或状态的数字信号转换成状态数量极多的模拟信号。

DAC 及 ADC 在数字信号处理的应用中都非常重要。经 ADC（输出直流电压的单一数字输出）将模拟输入转换为数字，再对数字信号滤波或增强，最后经 DAC 将增强的数字脉冲转换成模拟的形式，这样，模拟信号的品质通常会有所提升。

图 1-7 所示为一个数字信号通过数模转换器（DAC）将数字信号转换成模拟信号之后送到外部环境。

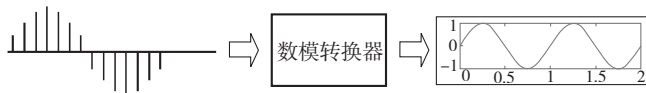


图 1-7 数模转换过程

## 1.4 DSP 的应用

本节将会探索一些常见的 DSP 应用。虽然 DSP 有众多不同的应用，这里重点讨论以下三类应用：

- 低成本并且性能优越的 DSP 应用
- 低功耗的 DSP 应用
- 高性能的 DSP 应用

## 低成本 DSP 应用

DSP 在很多领域里正逐渐变成普遍的低成本应用方案。DSP 电机控制就是一种普遍的应用。从洗衣机到电冰箱的许多消费产品里都有电机。在这些用品里，电动机的能耗在总能耗里占很大比重。

控制电动机的速度在能耗上有着直接的作用。生产商们使用三相变速驱动系统来改善性能而达到低能耗的目标。DSP 电动机控制系统有着足够的带宽以为家电应用开发先进的电机驱动系统。

从简单的数字控制到先进的噪声及振动消除，应用的复杂度在不断提升。随着应用复杂度的增加，控制也由模拟变迁到了数字，于是增加了系统的可靠性、效率、灵活性和集成度，降低了整个系统的成本。

许多早期的控制功能都使用微控制器。但随着电动机控制算法复杂度增加后，对更高性能、更多可编程解决方案的需求也在增加。数字信号处理器为这些应用提供了充足的带宽和可编程的要求。如今，可以在许多更先进的电动机控制技术上找到 DSP 应用：

- 电动机变速控制
- 无传感器控制
- 磁场导向控制
- 软件中的电动机建模
- 控制算法改善
- 软件取代昂贵的硬件

电动机控制是低成本 DSP 的一种应用。在这里，DSP 用于提供转换器快速且精确的 PWM 开关。DSP 还向系统提供快速准确的电动机模拟参数的反馈，如电流、电压、速度、温度等。有两种电动机控制方式：开环控制和闭环控制。开环控制系统最为简单。开环系统有着良好的稳态性能，但没有电流反馈限制了其瞬态响应的性能。用一个低成本的 DSP 来变速控制三相感应电动机可以提供更好的系统效率。

闭环方案比较复杂，要用性能更高的 DSP 控制电流、速度及位置的反馈，这样可以提高系统瞬态响应的性能并提供严密的速度 / 位置控制。其他更加复杂的电动机控制算法也可以用更高性能的 DSP 实现。

许多其他的应用也使用低成本 DSP，例如冷却压缩机使用低成本 DSP 控制压缩机变速能显著提高其能效。低成本 DSP 在多种洗衣机内使用，控制电动机变速，省去机械齿轮的应用。DSP 可为这些器件提供无传感器控制，省去了速度及电流传感器的需求。更佳的失衡监控使更高的转速成为可能，让衣物甩水更干并减少噪声及振动。加热、通风、空调系统在送风机及进风机的变速控制中使用 DSP，这可以提高能效及用户的舒适度。

## 8 DSP 嵌入式实时系统权威指南

### 1.5 低功耗 DSP 应用

我们生活在一个便携社会。从手机到个人数字助理（Personal Digital Assistant, PDA），我们在行动中工作及娱乐！这些系统的动力来自电池。电池寿命越延长越好。设计人员对处理器功耗敏感是有意义的。更低功耗的处理器让电池使用时间加长，也让这些系统和应用成为可能。

降低功耗后，系统散热更少。这样便省去了价格高昂的散热器件，如散热片。由于器件减少，系统成本会更低，体积会更小。根据同一思路，如果系统能够更简单，组件更少，设计人员就能更快地将系统推向市场。

低功耗机型能够带给设计人员一些其他新的选择，如潜在的备用电池允许系统不间断运行，而且在同等的功耗（或成本）预算下做更多的处理，带来更多的功能及更高的性能。

一些系统类别适宜用低功耗 DSP。便携式消费电子产品使用电池作为能源。普遍来说，消费者期望更少更换电池，电池能够使用越久越好。这类用户也在乎产品大小。消费者需要能够随身携带的产品，要让产品别在腰上，放在口袋里。

某种类别的系统需要设计者限制在严格的功耗预算内。它们包括有定额的功耗预算的系统，它们工作依赖有限的电力线、电池备份，或是定额电源。这类系统的设计人员在电源的约束之下设计功能，例如防御及航天系统。这些系统还有着紧凑的大小、重量、功耗限制。低功耗处理器能够在前面列出的三种限制下给设计人员更多的弹性。

另一类对功耗敏感的系统包括高密度系统。这些系统通常为高性能系统，或多处理器系统。电源效率对这些系统来说，除了电源限制之外，还与散热有关。这些系统电路布局紧密，每块电路板上都有大量的器件，有时多个板卡装在很小的空间里。这些系统的设计师正在关注如何降低功耗，以及如何散热。低功耗的 DSP 可以带来更高的性能和更好的集成度。更少的散热器及冷却系统可以减低系统成本，使系统更加易于设计。这些系统主要的问题是：

- 在每个通道产生更多功能
- 用每平方厘米实现更多功能
- 避免散热问题（散热器、风扇、噪声）
- 降低整体功耗

在今天的很多系统内，功耗是限制因素。设计人员必须要在设计的每一步都对功耗做出优化。选择处理器是系统设计起始步骤之一。处理器的选择要基于功耗优化的架构及指令集。在信号处理密集的系统，数字信号处理器是一个常见的选择。

低功耗 DSP 解决方案的一个例子是固态音频播放器。该系统需要大量以 DSP 为核心的算法来处理信号，从而产生高保真品质的乐声。低功耗的 DSP 可以处理音频数据的解压、解密和加工。这些数据可以存储在外部的存储设备中，比如可以更替使用的个人 CD。这些存储设备也可以进行重新编程，并且用一个微控制器实现用户界面的功能。存储音频数据的存储设备与微控制器相连，微控制器可从中读取数据并将其传输到 DSP 中。另外，数据



可以从 PC 机或网站上下载，并直接播放，或者写入存储设备空白的区域。数模转换芯片会将 DSP 输出的数字信号转化成模拟形式，最终在用户的耳机上播放出来。整个系统必须由电池供电（例如两节 AA 电池）。

对于这类产品，关键的设计约束在于功耗。顾客不喜欢给他们的便携式设备更换电池。因此，电池的使用时间是一个重要的考虑因素，而这跟系统的功耗有直接的关联。由于不带任何移动部件，固态音频播放器比上一代的播放器（如磁带机、CD 机）功耗更低。因为这是一款便携式产品，尺寸和重量显然也是关键因素。如这里所介绍的固态设备，由于整个系统所包含的器件更少，所以空间利用率会更高。

对于系统设计师来说，可编程性是一个关键问题。采用可编程 DSP 解决方案，这种便携式音频播放器才能及时从互联网或者存储设备上立即更新到最新的压缩、加密和音频处理算法。在这里所介绍的低功耗基于 DSP 的系统解决方案可将系统功耗降低至 200mW。这大大延长了便携式音频播放器电池的使用时间。同样使用两节 AA 电池供电，便携式播放器电池使用时间是 CD 播放机的 3 倍。

## 高性能 DSP 应用

在性能范围的高端，DSP 利用先进的架构来进行高速信号处理。先进的架构，如超长指令字（Very Long Instruction Word, VLIW）广泛使用并行和流水线实现高性能。这些先进的架构利用其他技术（如优化编译器）达到高性能。高性能计算的需求一直不断增加。涉及应用包括：

- DSL 调制解调器
- 基站的收发器
- 无线局域网
- 多媒体网关
- 专业音响设备
- 联网摄像机
- 安防鉴定
- 工业用扫描器
- 高速打印机
- 先进加密系统

## 1.6 总结

即便模拟信号可以用模拟硬件（包含有源及无源器件的电路）来处理，使用数字信号处理还是有许多优势：

- 模拟电路一般局限于线性操作，而数字信号处理可以实现非线性操作。
- 数字硬件系统可编程，信号处理过程实时或非实时的更改都更加简单。

## 10 DSP 嵌入式实时系统权威指南

- 数字硬件系统相对模拟电路对环境变化（例如温度）不那么敏感。

这些优势可以带来更低的成本，这也是很多应用如无线电话、消费类电子产品，及工业控制从模拟变为数字处理的原因。

信号处理，无论是数字或模拟可分为两种归类：

- 信号分析 / 获取：将信号内的有用信息提取出来，例如语音识别、雷达目标定位及识别、天气及地震信息，等。
- 信号的滤波 / 整形：可改善信号的质量。有时，这是分析和特征提取之前的第一步。这方面的技术包括使用滤波算法消除噪声和干扰，将信号分离到一个更简单的组件中，以及其他时域和频域求均值。

一个完整的信号处理系统通常有多个组件组成，会采用多种信号处理技术。

