第 1 章

通信的基本概念

画 说通信原理

第 ***1.1***讲 “通信原理”是一门什么课

1.1.1 课程地位

“通信原理”课程不仅是国内众多高等学校“通信工程”“电子信息工程”“网 络工程”和“物联网工程”等本科专业的一门重要专业核心课程，同时，也是很 多高等学校相关专业硕士研究生的入学必考科目，在本科生培养阶段占有极其重 要的地位。

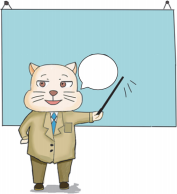
1.1.2 课程内容

经典“通信原理”课程的核心内容可用“调 制、解调、编码、译码、同步”十个字概括，主要 介绍的是支撑各种模拟和数字通信技术的数学理 论及电路原理基础知识。

1.1.3 课程难度

该课程是相关专业中最难教、最难学也最难 考的一门课，原因在于它包含的知识点较多，涉 及“高等数学”“概率论”“数理统计”“线性代

数”“电路分析”“模拟电路”“数字电路”“信号与系统”共八大课程。



通信原理

调制、解调、编码、译码、同步

请记住！

不瞒各位同学，当年我的“通信原理”课就没考好，也就是个“中”，丢人 呀！！因此，在本科阶段能够学好这门课的同学都是我眼中的“牛人”！

老师，我考 糊啦！

不好意思！ 见笑啦！

1.1.4 课程学习方法

按理说，学习方法因人而异，不存在针对所有人的普适之道。但根据前人的 经验，还是可以提炼并总结出一些适合多数人的基本方法。

第 1 章 通信的基本概念

我认为要学好这门课程必须具备以下条件：

（1 ）良好的数学基础。因该课程一般在第六或第七学期开设，对多数同学而 言，数学知识已经尘封两年，所以，需要扒出来复习、巩固和提高，尤其是“概 率论”和“数理统计”。

（2）良好的电路基础。从实际上看，通信系统是各类电子元器件的集合，因 此，必须对“电路分析”、“模拟电路”和“数字电路”课程有较好的记忆和掌握。

（3 ）良好的信号与系统基础。从理论上看，各种通信系统（模块）大都可认 为是一个 LTI 系统。对通信系统的研究及分析，其实就是对 LTI 系统的研究及分 析。因此，“信号与系统”是“通信原理”课程的重要基础课或前导课。

（4）良好的演算能力。该课程与“信号与系统”一样，既需要理解和掌握不 少数学、物理概念，又需要进行大量的习题演算。只有多算、多练才能发现问题 并解决问题，从而达到对理论知识融会贯通和学以致用之目的。

1.1.5 结语

（1）“通信原理”是重要的专业课和考研课。

（2）“通信原理”是涉及知识较多的综合课。

（3）“通信原理”是需要深入思考的理论课。

（4）“通信原理”是需要多做习题的演算课。

（5）“通信原理”是现代人应该了解的常识。

1.1.6 问答



问 题 1

皮皮 谁能用自己的语言描述一下你理解的“通信原理”课程？ 静静 是一把披荆斩棘的“利剑”。

壮壮 是一盘五颜六色的“水果”。 蛋蛋 是一条崎岖不平的“山路”。 圆圆 是一棵枝繁叶茂的“大树”。 皮皮 为什么是大树呀？

圆圆 “挂”人呀。我估计如果不玩 命，咱们都得“挂”！

众人呜呜呜……好害怕！

(- 3 (-

画 说通信原理





问 题 2

蛋蛋 老师，学完这门课，我是不是就知道了收音机的工作原理？

皮皮 岂止是收音机！目前大家看到、用到的通信设备（电话、电视等）的 原理几乎都可以从中找到答案。这也就是为什么说“通信原理是当代人应该了解 和学习的常识”的原因。

蛋蛋 那我可要下点功夫了，我就喜欢学这些。 第 ***1.2***讲 什么是通信

1.2.1 通信的定义

通常，可认为“通信是人与人或人与自然界之间通过某种媒介进行的空间信 息传递或交流的过程”。或者说，“通信是需要信息的双方或多方采用某种方法、 通过某种媒介将信息从一方准确传送到另一方或多方的过程”。而大家平常挂在嘴 上的“通信”特指利用电（光）信号进行的信息传输或交换过程。因此，“通信原 理”课程中的“通信”可定义如下。

通信：利用电（光）信号将含有信息的消息进行空间传递的过程或方法。 简单地说，通信就是信息的空间传递。

那么，为什么要进行通信活动呢？美国数学家香农这样说过：“人们只有在两 种情况下有通信的需要。其一，是自己有某种形式的消息要告知对方，而估计对 方不知道这个消息；其二，是自己有某种疑问要询问对方，而估计对方能作出一

第 1 章 通信的基本概念

定的解答。”显然，通信的目的或结果就是“获取信息”，从而消除通信前双方存 在的疑问，也就是“不确定性”。

1.2.2 信息、消息及信号的概念

在通信（communication）的定义中有三个专业术语：信息、消息和信号。

1. 信息

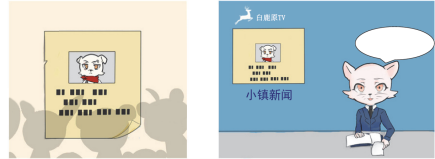
信息（information）：事物运动状态或存在方式的不确定性描述，是人们欲知 或想表达的事物运动规律。

信息是抽象的，是消息的内涵，可泛指人们欲知而未知的一切内容。信息通 常是不可数的，但为了便于叙述，也用量词“个、条、种”等表述。

2. 消息

消息（message）：语音、文字、音乐、数据、图片或活动图像等能够被人所 感知的信息表达形式。

显然，消息是信息的形式载体。消息类似容器，信息好比容器中的物品。一 条消息可以包含丰富的信息，也可以不包含信息。某种信息可以由多种消息形式 表示，比如寻狗启事可以在报纸上以文字形式出现，也可以在广播或电视上以语 音或音像形式发布，如图 1-1 所示。

丢失狗名叫

寻狗启事

寻狗启事

“汪汪”

图 1-1 不同的消息形式

消息可以分为连续（模拟）消息和离散（数字）消息两类。连续消息是指消 息的状态连续变化或不可数，如语音、图像等；离散消息则是指消息的状态是离 散变化或可数的，如符号、字母和数据等。

在大多数通信应用场合中，信息和消息不用严格区分，可等同看待。

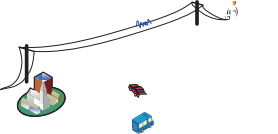
3. 信号

信号（signal）的定义后面会给出，这里可认为它是消息的物理载体，是通信 任务实施的具体对象，而消息是信息的形式载体。三者关系的类比图如图 1-2 所示。

画 说通信原理



图 1-2 信息、消息与信号的关系类比图

因为交通与通信具有较强的类比性（严格地讲，电信是交通的一个分支），所 以可用一些公路和铁路交通实例作为比较对象（见图 1-3），比如：交通 - 通信； 运输 - 传输；乘客、货物 - 信息；箱、筐、袋 - 消息；运载工具 - 信号；道路 - 信道等，旨在帮助读者更透彻地理解通信原理中许多概念和问题。





<>



<>





J





图 1-3 通信与交通类比图

1.2.3 结语

（1）一种信息（水果）可被装入多种消息（箱、袋、筐等）。

（2）一条消息（箱）也可以携带多种信息（水果、书籍、衣服等）。

（3）信号可以有多种（车、船、飞机等）。

（4）通信的目的是传递或获取信息，进而消除通信各方存在的信息或内容的 “不确定性”，但要借助于物理信号的传输才能实现。

1.2.4 问答



问 题 1

皮皮 蛋蛋，你能否讲一个一种信息可以用多种消息携带的例子？

第 1 章 通信的基本概念

蛋蛋 嗯，我觉得天气预报是一种信息，可以被报纸（文字）、广播（声 音）、电视（图像）等消息携带。

皮皮 很好。





问 题 2

静静 老师，从刚才您讲的内容可知，信息与消息是可以分离的，或者说， 它们之间不是一一对应的关系。那么，从图 1-2 上看，我觉得信息与信号好像也 可以分离，对吗？

皮皮 嗯，等我们讲到“数据通信”时，就可以全面地回答这个问题。但现 在可先用交通实例类比信号与信息的分离，从而加深对通信概念的理解。谁能举 例说明？

圆圆 老师，我试试。比如，我要把 10 吨苹果用货车拉到城里卖，首先必 须保证汽车可以从我家开到城里的水果市场，也就是先要进行信号传输，而车上 可以装有苹果，也可以不装，对吗？

怎么是空车？ 我的货呢？

对不起， 忘装了！

请您给个 好评！

我的苹果！

画 说通信原理

皮皮 嗯，对的。

圆圆 老师，那我就不明白了！我妈给我打电话时，肯定是我听到信号也就 知道了信息，信息与信号不可分呀？！

皮皮 哈哈，圆圆说得也有道理。这个问题涉及模拟通信与数据通信的区 别，我们后面会专门介绍。

第 ***1.3***讲 什么是通信系统

1.3.1 通信系统的概念

交通是把货物 / 乘客从出发地搬移 / 运输到目的地，通信是把信息从信源传输 到信宿。若把用于运输货物 / 乘客的人、车、路的集合称为交通系统（见图 1-4） 的话，那么，通信系统可定义如下。

通信系统：用于进行信息传输的设备（硬件）、协议（软件）和传输介质的 集合。



图 1-4 交通系统

从硬件上看，各种通信系统（communication system）主要由信源、发送设 备、传输介质、接收设备、信宿五部分组成（见图 1-5）。

|  |
| --- |
| 信宿 |

|  |
| --- |
| 信源 |

|  |
| --- |
| 接收设备 |

传输介质

|  |
| --- |
| 发送设备 |

|  |
| --- |
| 噪声 |

图 1-5 通信系统的一般模型

图 1-5 宏观地描述了一般通信系统的组成，反映的是各种通信系统的共性。 根据不同的通信任务，图中各方框可细分且名称和作用也会有所差异，从而形成 不同的实际通信系统模型。比如，普通电话通信系统就包括信源 / 信宿、交换机、

第 1 章 通信的基本概念

载波机、电缆（有线介质）等；无线广播通信系统包括话筒、放大电路、调制电 路、发射电路、空间（无线介质）、接收电路、解调电路、扬声器等。两个常见通 信系统实例如图 1-6 所示。

信源/信宿

交换机 载波机

电缆

载波机 交换机

信源/信宿

（a）普通电话通信系统

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 放大 电路 |  | 调制 电路 |  | 发射 电路 |
|  |  |  |

话筒



|  |
| --- |
| 接收 电路 |

|  |
| --- |
| 解调 电路 |

空间

|  |
| --- |
| 放大 电路 |

扬声器

（b）无线广播通信系统 图 1-6 两个通信系统实例

通信系统各部分的含义如下。

（1）信源：通信系统的起点，指能把欲传送的消息转换成原始电信号的人、 设备或装置。根据消息的种类不同，信源可分为模拟信源和数字信源。模拟信源 输出连续（模拟）信号，如话筒（声音→音频信号）、摄像机（图像 →视频信号）； 数字信源则输出离散（数字）信号，如计算机的键盘（字符 / 数据→数字信号）。

（2）信宿：通信系统的终点，其功能与信源相反，指能把原始电信号（如上 述的音频信号、视频信号、数字信号）还原成原始消息的人、设备或装置，如扬 声器将音频信号还原成声音，显示屏可将视频信号还原成图像。

（3）传输介质：指能够传输电信号、光信号或无线电信号的物理实体。比如 电缆、光纤、空间或大气。

（4）发送设备：指能将原始电信号变换为适合信道传输的信号的设备或装置。 主要功能是使发送信号的特性与信道特性相匹配，能够抗干扰且具有足够的功率 以满足远距离传输的需要。发送设备可能包含变换器、放大器、滤波器、编码器、 调制器、复用器等功能模块。



画 说通信原理

（5）接收设备：与发送设备作用相反，指能够接收信道传输的信号并将其转 换为原始电信号的设备或装置。其主要功能是将信号放大及反变换（如译码、解 调、解复用等），目的是从受到减损的接收信号中正确恢复出原始信号。

（6）噪声：指一切可能会影响有用信号的信号。噪声存在于信号传输的整个 过程之中。为方便计，通常将全部噪声集中作用于传输介质上（但并不意味着只 有传输介质存在噪声）。噪声形式多样，大多会破坏信号传输（改变信号波形）， 引发信息错误。



图 1-7 用邮政通信系统类比通信系统，以加深大家对通信系统的理解。

怎么迟 到了？

注意 安全！

堵车

发送 传输 接收

图 1-7 邮政通信系统类比通信系统

1.3.2 结语

（1）交通运输任务需要一个交通系统完成，同样，通信任务也需要一个通信 系统实施。

（2）通信系统是由电子元器件构成的各种信号处理电路的集合。因此，“电路 分析”、“模拟电路”和“数字电路”等课程内容是设计、分析、构建、运行和维 护它的基本知识。

（3）通信系统在宏观上可抽象为一个输入为信源、输出到信宿的信号处理模 块。在具体分析研究时，可根据不同功能划分为若干子系统（单输入 + 单输出）， 比如，编 / 译码系统、调制 / 解调系统、发射 / 接收系统等。因大多数子系统具

第 1 章 通信的基本概念

有线性时不变特性，所以它们的分析方法可沿用“信号与系统”中的 LTI 系统分 析法。

1.3.3 问答



问 题 1

皮皮 谁能举出一个生活中有输入和输出的系统实例？

蛋蛋 我觉得压面条机算一个。输入是面团，输出是面条。

壮壮 我也说一个—邮政系统。输入是信件或包裹，输出还是信件或包 裹，但输出可能会有破损和丢失。



问 题 2

皮皮 壮壮的回答引出另一个概念—破损和丢失。谁能用通信概念描述破 损和丢失？

静静 是不是噪声？

皮皮 对！邮件的破损和丢失可以类比噪声对信号的损害。这个问题后面会

专门讨论。



第 ***1.4***讲 什么是模拟通信、数字通信

1.4.1 什么是模拟通信

模拟通信：以模拟信号携带模拟消息的通信过程或方法。

其特征是信源和信宿处理的都是模拟消息，信道传输的是模拟信号。比如普

画 说通信原理

通电话通信系统和广播系统都是模拟通信实例。根据信号调制与否，模拟通信系 统可分为调制通信系统和基带通信系统，如图 1-8 所示。

|  |
| --- |
| 模拟信宿 |

|  |
| --- |
| 调制 |

|  |
| --- |
| 模拟信源 |

传输介质

|  |
| --- |
| 解调 |

|  |
| --- |
| 噪声 |

（a）调制通信系统

|  |
| --- |
| 模拟信源 |

|  |
| --- |
| 发送 |

|  |
| --- |
| 模拟信宿 |

传输介质

|  |
| --- |
| 接收 |

|  |
| --- |
| 噪声 |

（b）基带通信系统

图 1-8 模拟通信系统模型



1.4.2 什么是数字通信

数字通信：以数字信号携带模拟消息的通信过程或方法。

其特征是信源和信宿处理的都是模拟消息，但信道传输的是数字信号。比如 数字电话通信系统就是典型的数字通信系统。根据信号调制与否，数字通信系统 也可分为调制通信系统和基带通信系统，如图 1-9 所示。

可见，图 1-9 的通信系统与图 1-8 的相比，多了“信源编码 / 译码”和“信道 编码 / 译码”功能模块，而这正是数字通信系统的特点所在。通常，信源编码完 成的是将模拟信息转换成数字信号的功能（模拟信息→消息码元），而信源译码则 功能相反（消息码元→模拟信息）；信道编码是将信源编码输出的数字信号变成具 有检 / 纠错功能的脉冲序列（消息码元 + 冗余码元），信道译码功能完成纠正传输 错码的任务（错误消息码元→正确消息码元）。

第 1 章 通信的基本概念

|  |
| --- |
| 模拟信源 |

|  |
| --- |
| 信源编码 |

模拟信宿

|  |
| --- |
| 信道编码 |

信道译码

调制

|  |
| --- |
| 解调 |

|  |
| --- |
| 传输介质 |

A

|  |
| --- |
| 信源译码 |

|  |
| --- |
| 噪声 |

（a）调制通信系统

|  |
| --- |
| 模拟信源 |

|  |
| --- |
| 信源编码 |

模拟信宿

|  |
| --- |
| 信道编码 |

信道译码

发送

|  |
| --- |
| 接收 |

|  |
| --- |
| 传输介质 |

A

|  |
| --- |
| 信源译码 |

|  |
| --- |
| 噪声 |

（b）基带通信系统

图 1-9 数字通信系统模型



1.4.3 为什么要引入数字通信

电信号（光信号）在传输时的一个主要变化是衰减，即信号强度的减小，传 输距离越长衰减越大，信号频率越高衰减越快；另一个变化是信号波形的畸变 （主要由衰减和噪声引起）。高质量的模拟通信系统要求衰减和畸变都比较小，但 实际系统难以满足人们对通信质量越来越高的指标要求。为此，人们发明了数字 通信技术，以提高模拟信息的传输质量。

通常，模拟通信系统在信号传输上采用逐级放大方法，而数字通信系统多 采用再生。比如：一队游客在导游的带领下，沿着窄小的山道拾阶而上，最前面 的导游（信源）拿起话筒对着最后面的人（信宿）喊：“张先生，快跟上，别掉 队！ ”这是模拟通信的信号传输方法；他也可以用传口令的方法让游客们依次将 “张先生，快跟上，别掉队！”的命令传下去，这就是数字通信的信号传输方法。

从信息传输的角度上看，可以认为模拟通信系统是一种信号波形传输系统， 而数字通信系统是一种信号状态传输系统。

图 1-10 是两种通信系统信号传输示意图。图 1-11 是两种信号传输类比图。

画 说通信原理

模拟电话机

|  |
| --- |
| 放大器 |

|  |
| --- |
| 放大器 |



模拟电话机

（a）模拟通信系统信号传输



数字电话机



|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 中继器 |  |  |  | 中继器 |
|  | | |

（b）数字通信系统信号传输

图 1-10 两种通信系统信号传输示意图



数字电话机



往后传！ 张先生， 别掉队！

张先生， 别掉队！

图 1-11 模拟通信与数字通信类比图

1.4.4 数字通信的优缺点

相较于模拟通信技术，数字通信技术有如下优缺点。 优点：

（1）抗干扰能力强。因数字信号的取值个数有限（大多数情况下只有 0 、1 两 个值），所以在传输过程中，可不关心信号幅度的绝对大小，只注意相对于某个 判断阈值的大小即可。同时，各种信号传输或变换电路是以“抽样—判决—再生” 的方法处理信号，可消除噪声积累。

（2）便于进行信号加工及处理。因为信号可以存储，故可以像处理照片一样 随意加工处理（在技术允许的范围内）。

（3）传输中出现的差错（误码）可以设法控制，提高了通信质量。

（4）数字消息易于加密且保密性强。

（5）可传输语音、图像、图片、数据等多种消息，增加了通信系统的灵活性 和通用性。

缺点：

（1）系统较复杂、成本较高。

(- 14 (-

第 1 章 通信的基本概念

（2）系统所需带宽较大，频带利用率较低。比如，一路模拟电话信号的带宽 为 4kHz，而一路数字电话信号要占 20 ～ 60kHz 的带宽。

1.4.5 结语

（1）数字通信技术得以实现的先决条件是模数转换（ADC）和数模转换 （DAC）。

（2）数字通信技术抗干扰能力强的根本原因有两点：一是码元判决的电平容 错限度较大；二是再生传输的码元质量好。

（3）因为没有 ADC 技术，所以，贝尔发明了最早的模拟通信系统—电话 系统。

1.4.6 问答



问 题 1

皮皮 壮壮，能否举一个生活中的数字通信实例？

壮壮 我晚上做作业时不希望被别人打扰，但圆圆除外。若她找我，我就让 她按我俩约好的“一长两短”的暗号敲门。这算不算实例？

皮皮 准确地说，这是一个数据通信实例。有关数据通信的概念我们会在第 4 章介绍。



问 题 2

皮皮 蛋蛋，你能用一句成语或俗语描述两种通信的特点吗？

蛋蛋 合起来说，可用“各有千秋”描述；分开来说，可用“甘蔗没有两头 甜”表述。

皮皮 很好，很准确，有辩证思想。



问 题 3

圆圆 老师，模拟和数字通信系统都包含调制系统和基带系统，那么，什么 是调制系统？什么是基带系统？

皮皮 简单地说，基带通信类似人走路，调制通信类似人坐车。详细解释以 后会讲。

(- 15 (-

画 说通信原理





问 题 4

皮皮 静静，你能否简单地画个图描述一下两种通信系统？

静静 嗯，我试试。老师，您看这样画对不对（见图 1-12）？

皮皮 非常好！不但画出了模拟和数字系统的特点，还突出了基带与调制系 统的区别。

基带信号

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | 调制信号 |  |
|  | 信道 | | |  |

信源 信宿

（a）模拟通信

基带信号

调制信号

|  |
| --- |
|  |
|  |

|  |
| --- |
|  |
|  |



信道

信源 信宿

（b）数字通信

图 1-12 两种通信系统示意图

第 ***1.5***讲 什么是信号、噪声和干扰

信号和噪声是通信技术发展过程中永恒的主题，就像一对欢喜冤家难舍难分。 哪个通信工程师的嘴上不是天天挂着信噪比和误码率！甚至在一些特殊或关键通 信系统中，噪声已成为工程师们挥之不去的梦魇！下面跟大家聊聊它们俩的那些 事儿。

第 1 章 通信的基本概念

1.5.1 信号的定义

通信的根本任务是传递信息，但必须以传输信号为前提。比如，古时的烽火、 抗战年代的消息树、军队中的冲锋号、信号弹、信号灯及信号旗等都是携带信息 的信号实例。而近代一切通信系统都是把信息 / 消息转化为电压、电流或无线电 波（光波）等信号形式，再利用各种传输手段进行传输，从而完成通信任务。

通过对上述信号实例的抽象及概括，可以给出信号的基本定义如下。

信号：可以携带消息的各种物理量、物理现象、符号及图形等。

在现代通信系统中，信号主要指变化的电压、电流、无线电波或光波。

普通信号必须具有可观测性和可变化性，而用于通信的信号还必须具有可控 制性。大家知道，信息的最终使用者是人或相关的机器设备。作为信息的物理载 体，信号必须能被人的视觉、听觉、味觉、嗅觉、触觉感受到或被机器设备检测 到，否则就失去了传输意义；而信号若不可变，则无法携带丰富多彩的信息；最 后，信号必须能够人工控制或实现。比如，打雷和闪电具有信号的前两个特性， 但无法由人控制、产生，因此它们不能作为通信信号使用。

信号可类比卡车（火车或飞机），消息就是卡车上的集装箱，信息则是集装箱

中的货物。



1.5.2 信号的分类

通信信号有以下几个主要类型。

（1）根据消息载体的不同，信号可分为电信号和光信号两大类。电信号主要 包括电压信号、电流信号和无线电信号等；而光信号则是利用光亮度的强弱或有 无来携带信息。

(r- 17 (-

画 说通信原理

（2）根据携带信息的种类不同，信号主要可分为声音（音频）信号、活动图 像（视频）信号和数据信号等。音频信号指频率在 20Hz ～ 20kHz 内的携带语音、 音乐和各种声效的电信号，其中包含频率在 300Hz ～ 3.4kHz 内的话音信号（电话 系统专用术语）。视频信号指直接携带活动图像信息的 0 ～ 6MHz 的电信号。数据 信号主要指携带 0 、1 数据的数字电信号（通常以电脉冲序列形式出现），通常它 不能直接携带信息，而需要根据协议通过编码技术赋予。

（3）根据频谱位置的不同，信号可分成基带信号和带通信号。通常，把频谱 最低值*f*L 小于频谱宽度*B* = *f*H − *f*L 的信号称为基带信号，常见的基带信号是不经 过调制处理的原始信号；而把*f*L 大于频谱宽度 *B* = *f*H − *f*L 的信号称为带通信号， 常见的带通信号就是经过调制处理的已调信号。两种信号频谱示意图见图 1-13。

*F*（*f*）



 *B* 



A

*O f*L *f*H *f*

A *F*（*f*）



*B*

*O f*L *f*H *f*

（a）基带信号频谱 （b）带通信号频谱 图 1-13 基带信号频谱及带通信号频谱示意图

基带信号一般直接携带信息（比如音频和视频信号），收信端收到基带信号也 就收到了信息；而已调信号虽然也携带信息，但收信端必须对接收到的已调信号 进行解调处理才能还原原始信息。典型的基带信号通信系统是单位内部的有线广 播系统，扬声器可直接将语音信号播放出来；典型的带通信号通信系统是无线电 广播系统，收音机收到的是已调信号，虽然它也包含语音信息，但不能直接通过 扬声器播放出来，必须经过解调才行。

（4）根据外在表现的不同，信号可分为模拟信号和数字信号两大类。

模拟信号：参量（因变量）取值随时间（自变量）的连续变化而连续变化的 信号。

模拟信号如图 1-14（a）所示。时间轴 *t* 上的任意一点都对应有*y* 轴上的一个 确定值。通俗地讲，波形为连续曲线的信号就是模拟信号。模拟信号的主要特点 是在其出现的时间内具有无限个可能的取值，而正是这一特点使得模拟信号难以 存储。现实生活中模拟信号的例子很多，如电话机话筒输出的信号和 AM 广播信 号等。

离散信号：在时间上离散取值的信号。

离散信号如图 1-14（b）所示。可见，*t* 取 0 、1 、2 、3 等离散值，而 *y* 的取值

第 1 章 通信的基本概念

随函数的关系而定，即为离散自变量所对应的函数值，是多少就是多少，没有做 任何限制，可以连续，也可以离散。它与模拟信号的主要区别是自变量的取值不 连续。

A *v*（*t*） 5

0 1 2 3 4 5 6 7 8 *t*

（a）模拟基带信号

A *v*（*t*） 5

0 1 2 3 4 5 6 7 8 *t*

（b）离散信号

A *v*（*t*）

5



0 1 2 3 4 5 6 7 8 *t*

（c）数字基带信号

5



*v*（*t*）

0 1 2 3 4 5 6 7 8 *t*

（d）数字带通信号

图 1-14 不同信号示意图

在“信号与系统”课程中，自变量离散，因变量取值个数有限的信号叫数 字信号。在通信领域，除了这种常见的具有高低两种电平被叫作数字基带信号的 数字信号外，还有一种以模拟信号形式出现、携带数字消息的数字信号，可称为 “数字带通信号”，如后面要讲到携带 0 和 1 数据的 ASK 、FSK 和 PSK 等。可见， “信号与系统”课程中数字信号的定义就不够宽泛了。因此，在通信领域，可以 认为

数字信号：用一个参量的有限个取值携带数字消息的信号。

这里的参量指信号的幅度、频率和相位。按照这个定义，数字信号包含数字

(- 19 (-

画 说通信原理

基带信号和数字带通信号两种，见图 1-14（c）和图 1-14（d）。通常，数字信号 多指数字基带信号。

（5）根据变化规律的不同，信号可分为确知信号和随机信号两大类。确知信 号的变化规律是已知的，比如正弦型信号、指数信号等；随机信号的变化规律是 未知的，比如人们打电话时的语音信号、电视节目中的图像信号及各种噪声等。

显然，各种分类可以重叠，也就是说，一个信号可以分属不同的类型，比如 话筒输出的信号就是模拟、基带、随机、声音、电信号。

1.5.3 噪声的定义

噪声（noise），是生活中出现频率颇高的一个词，也是通信领域中与信号齐 名的专业术语。但通信领域中所谓的噪声不同于大家所熟悉的以音响形式反映出 来的各种噪声，如交通噪声、风声、雨声、人们的吵闹声、建筑工地的机器轰鸣 声等。噪声可定义如下。

噪声：一种不携带有用信息的电信号，是对除有用信号外其他信号的统称。

简言之，不携带有用信息的信号就是噪声。显然，噪声是相对于有用信号而 言的。

1.5.4 噪声的分类

根据来源的不同，噪声可分为以下类型。

（1）自然噪声。存在于自然界的各种电磁波，如闪电、雷暴及其他宇宙噪声。

（2）人为噪声。来源于人类的各种活动，如电焊产生的电火花、车辆或各种 机械设备运行时产生的电磁波和电源的波动，尤其是为某种目的而特制的干扰源 （如下述的电子对抗）。

（3）内部噪声。通信设备内部由元器件本身产生的热噪声、散弹噪声及电源 噪声等。

根据表现形式的不同，噪声可分为单频噪声、脉冲噪声和起伏噪声。

（1）单频噪声。一种以某一固定频率出现的连续波噪声，如 50Hz 的交流电 噪声。

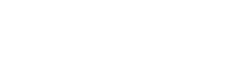
（2）脉冲噪声。一种随机出现的无规律噪声，如闪电、车辆通过时产生的 噪声。

（3）起伏噪声。主要指系统的内部噪声，它也是一种随机噪声，其研究方法 必须运用概率论和随机过程知识。因为它普遍存在且对通信系统有着长期影响， 所以是噪声研究的主要对象。另外，元器件本身的热噪声、散弹噪声都可看成无

第 1 章 通信的基本概念

数独立的微小电流脉冲的叠加且服从高斯分布，即热噪声、散弹噪声都是高斯过 程，因此，这类噪声也被称为“高斯噪声”。

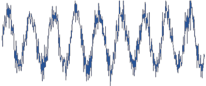
除了用概率分布描述噪声的特性外，还可用功率谱密度加以描述。若噪声的 功率谱密度在整个频率范围内都是均匀分布的，类似于包含所有可见光光谱的白 色光光谱，则称其为“白噪声”。不是白噪声的噪声被称为“带限噪声”或“有色 噪声”。通常，把统计特性服从高斯分布、功率谱密度服从均匀分布的噪声称为 “高斯白噪声”。图 1-15 是噪声实例。





*t*





*t*

（a）热噪声 （b）正弦信号+噪声

图 1-15 噪声实例

1.5.5 干扰的定义

与噪声紧密相关的一个概念是干扰（disturb）。

干扰：一类不携带信息的电信号或由噪声引起的对通信产生不良影响的效应。

干扰通常指来自通信系统内、外部的噪声对接收信号造成的骚扰或破坏。或 者说在接收所需信号时，由非所需能量造成的扰乱效应。简言之，干扰就是能够 降低通信质量的噪声。

干扰一定来自噪声，而噪声不一定产生干扰。

从通信的角度上看，干扰是一件坏事，应尽量避免和消除。但在军事上却有 一种叫作“电子对抗”的技术专门制造或产生各种干扰，以破坏敌方的无线通信， 借以取得战争的主动权。

信号在通信系统中传输时，通常会受到两类干扰。

第一类干扰是由系统或信道本身特性不良而造成的。比如，各种线性、非线 性畸变，交调畸变和衰落畸变等系统不良特性对信号的干扰，这类干扰可类比为 坡度、弯度、平整度等道路本身特性不良对交通的不利影响。

第二类干扰是指通信系统内部和外部噪声（信道噪声）对接收信号造成的干 扰或破坏，或者说，在接收所需信号时，由非所需能量造成的扰乱效应。比如导 线内部的热噪声和系统外部的雷电噪声都会干扰通信，影响通信质量；又比如大 家通过收音机正在收听新闻，忽然有一个其他电台的音乐窜了进来，影响了收听

画 说通信原理

新闻，这个音乐也是一种干扰。这类干扰可用车道中的人力车、畜力车及横穿马 路的行人或突降的雨雪对行车的影响类比。

两类信道干扰可用图 1-16 类比。



外部干扰

良好信道

不良信道 内部干扰

图 1-16 信道干扰类比图

根据在信道中的表现形式，噪声通常可分为乘性噪声和加性噪声两种。

若设信道输入信号为 *vi* (*t*) ，输出信号为 *vo* (*t*) ，则信道输入与输出的关系可描 述为

*vo* (*t*) = *f* [*vi* (*t*)] + *n*(*t*) （1-1） 式中，*f* [*vi* (*t*)] 表示信道对输入信号的变换，即输入信号 *vi* (*t*) 通过信道发生变化 后的波形，*f* 表示某种变换关系。为讨论方便，设*f*[*vi* (*t*)] 可表示为 *k*(*t*)*vi* (*t*) ，则 式（1-1）就变成

*vo* (*t*) = *k*(*t*)*vi* (*t*) + *n*(*t*) （1-2） 式中， *k*(*t*) 和 *n*(*t*) 各表示一种信道噪声。由于 *k*(*t*) 与 *vi* (*t*) 相乘，所以称为乘性噪 声，也就是上述的第一类干扰；因为 *n*(*t*) 与 *vi* (*t*) 是相加的关系，故称为加性噪声， 即上述的第二类干扰。这样，就把不同信道对信号的干扰抽象为乘性和加性两种。 也就是说，站在抗干扰的角度上看，所谓信道的不同，其实质就是 *n*(*t*) 与 *k*(*t*) 的 不同。

抗干扰是通信系统要研究的主要问题之一。除了在理论与方法上寻求解决之 外（比如角调制比幅度调制抗干扰性好，数字通信系统比模拟通信系统抗干扰性 好），在实用技术上也有很多措施，比如屏蔽、滤波等。

注意：在通信原理中，通常认为“噪声”与“干扰”同义且多用“噪声”。

1.5.6 结语

（1）信号的本质是随时间变化的波形。记住：不变化，无信息！

（2）噪声的本质也是随时间变化的波形，但不携带人们感兴趣的信息。

（3）在一个通信系统中，一种信号的出现相对于另一种信号可能是噪声。

第 1 章 通信的基本概念

1.5.7 问答



问 题 1

蛋蛋 老师，根据您对基带信号的介绍，我觉得在生活中，常见的原始信号 应该大都是基带信号，比如：声音信号、视频信号、键盘输出信号等，换句话说， 鲜有原始信号是带通信号的，对吗？

皮皮 嗯，可以这么理解。



问 题 2

静静 老师，如果我想用水管运送水，那么这条水流是否可以比喻为模拟 信号？

皮皮 嗯，不错，比喻挺形象！



问 题 3

壮壮 老师，如果我用桶提水运送，那么， 一桶桶水是不是就类似数字 信号？

皮皮 你倒挺会触类旁通的。但桶是消息，水是信息，而提桶的人才是数字 信号。



问 题 4

圆圆 老师，如果我们排队进教室比喻为信号的话，那么，蛋蛋突然从路边 横穿打乱了队伍，蛋蛋就是噪声或干扰，对吗？

皮皮 对！



问 题 5

蛋蛋 老师，按“信号与系统”的定义，数字基带信号的波形应该是谱线形 式，而常见的数字基带信号波形自变量 *t* 并不离散，比如图 1-27（c）所示，这如

画 说通信原理

何解释呢？

皮皮 问得好！其实，让波形连续有利于传输。因为在实际传输时，每个中 继节点都需要在规定时刻对波形抽样，如果信号值在一段时间内保持，则抽样时 刻就不必非常精确，否则，很容易漏抽。另外， 一旦抽样成功，则只有抽样时刻 的信号值是有用的，其余时间的信号值没有用，从这个意义上讲， 自变量是离散 的。这也就是为什么说模拟通信是“波形通信”，而数字通信是“状态传输”的主 要原因了。

蛋蛋 嗯，明白了！老师。 第 ***1.6***讲 什么是信道

1.6.1 信道的概念

如同交通系统需要为车辆（飞机）提供行驶（飞行） 的道路（航线）一样， 通信系统也需要为信号的传输提供通道或路径。因此，信道可以定义如下。

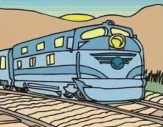
信道：为信号提供的物理传输通道或路径。 信道的类比图如图 1-17 所示。



图 1-17 信道的类比图

显然，要完成通信任务，首先，信号必须依靠传输介质传输。传输介质一般 可分为有线介质和无线介质两类。有线介质主要是各种线缆和光缆（类比铁路、 公路）；无线介质主要指可以传输无线电波和光波的空间或大气。从通信系统的角 度上看，传输介质就是连接通信双方收、发信设备并负责信号传输的物理实体。 因此，传输介质可被定义为“狭义信道”。

狭义信道：可以传输电信号（光信号）的物体或物质。

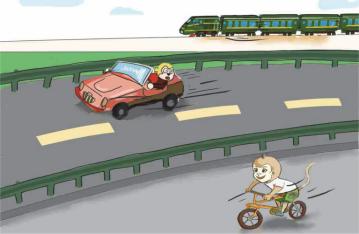
其次，因为信号还必须经过很多设备（发送机、接收机、调制器、解调器、 放大器等）进行各种处理，这些设备显然也是信号经过的通道，所以，把传输介 质（狭义信道）和信号必须经过的各种通信设备统称为“广义信道”。

第 1 章 通信的基本概念

广义信道：可以传输电信号（光信号）的物体或物质以及电路或设备的集合。 在通信系统的分析及研究中，若无说明，信道多指广义信道。

1.6.2 有线介质

有线介质：双绞线、同轴电缆、架空明线、多芯电缆和光纤等。



（1）双绞线 TP（twisted pair）。它由若干对两条相互绝缘的铜导线按一定规 则绞合而成，简称 UTP（非屏蔽双绞线）。采用绞合结构是为了减少对邻近线对 的电磁干扰。为了进一步提高双绞线的抗电磁干扰能力，还可以在双绞线的外面 再加上一个用金属丝编织而成的屏蔽层，形成 STP（屏蔽双绞线）。两种双绞线如 图 1-18 所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 屏蔽箔 |  |
| 屏蔽双绞线 | 非屏蔽双绞线 |

图 1-18 双绞线

（2）同轴电缆（coaxial cable）。它由内部导线（单股实心或多股绞合铜 质芯线）、内部绝缘层、网状编织的金属丝屏蔽层以及保护塑料外层组成（见 图 1-19）。这种结构使其具有高带宽和较好的抗干扰特性，适合传输频分复用的 多路信号。按特性阻抗数值的不同，同轴电缆又分为 50Ω 的基带同轴电缆和 75Ω 的宽带同轴电缆两种。

画 说通信原理

塑料外层  内部导线 带连接器的同轴电缆

/ 内部绝缘层

金属丝屏蔽层 同轴电缆

图 1-19 同轴电缆及其结构

（3）光导纤维（optical ﬁber）。简称光纤，是光纤通信系统的传输介质。

光纤呈圆柱形，主要由外套、绝缘层、封套和纤维芯四部分组成（见 图 1-20）。芯由一条或多条非常细的玻璃丝或塑料纤维线构成，每根纤维线都有 自己的封套。由于这一玻璃或塑料封套涂层的折射率比芯线低，故可保证光线在 纤芯内部传输。一束或多束有封套纤维的外套由塑料或其他材料构成，用以防止 外部的潮湿气体侵入以及磨损或挤压等伤害。

外套

绝缘层

/

封套

/

纤维芯

图 1-20 光纤及其结构

根据传输数据的模式不同，光纤可分为多模光纤和单模光纤两种。

多模光纤中，有多条不同入射角的光线同时传播，如图 1-21（a）所示。这种 光纤的芯直径较粗，其范围是 50 ～ 100μm 。

单模光纤中，光没有反射，沿直线传播，如图 1-21（b）所示。这种光纤的直 径比多模光纤细得多（直径在 7 ～ 9μm ），只传输一条光线。显然，单模光纤的 信号传输质量比多模光纤好。



输入端光脉冲



输入端光脉冲

（a）多模光纤

（b）单模光纤

图 1-21 两种光纤传输示意图

吸收护套 包层

纤芯



输出端光脉冲

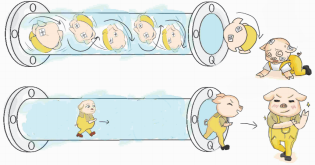
吸收护套

包层 纤芯



输出端光脉冲

第 1 章 通信的基本概念



多模光纤

单模光纤

1.6.3 无线介质

如果通信任务要经过一些高山、岛屿、沼泽、湖泊、偏远地区或穿过鳞次栉 比的楼群时，用有线介质铺设通信线路就非常困难；另外，对于处于移动状态的 用户来说，有线传输也无法满足他们的通信要求，而采用无线介质就可以解决这 些问题。

无线介质：可以传输电磁波（光波和无线电波）、超声波等无线信号的空间或 大气。

在光波中，红外线、激光是常用的信号类型，前者广泛地用于短距离通信， 如电视、录像机、空调器等家用电器使用的遥控装置；后者可用于建筑物之间的 局域网连接。超声波信号主要用于工业控制与检测中，如液位检测、距离检测等。

因为无线电波容易产生，传播距离远，能够穿过建筑物，既可以全方向传播， 也可以定向传播，所以绝大多数无线通信采用无线电波作为传输信号。

为合理利用电磁波资源，根据其频率的高低或波长的长短，可将其分为 9 个 大波段（见表 1-1）。不同频率（波长）电磁波的传播特性各异，应用场合也不尽 相同。波长指信号在一个周期内传播的距离，数值上等于信号两个相邻波峰（波 谷）之间的距离，通常用*λ*表示。波长（m）、频率（Hz）、光速（ 3×108 m/s）三

者满足公式  。

表 1-1 电磁波资源划分表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 频段 名称 | 频 率 范 围 | 波长范围 | 波段 名称 | 传 输 介 质 | 用 途 |
| 甚低频 VLF | 3Hz ～ 30kHz | 108 ～ 104m | 甚长波 | 导线  长波无线电 | 音频、电话、数据终端、 长距离导航、时标 |
| 低频 LF | 30 ～ 300kHz | 104 ～ 103m | 长波 | 导航、信标、电力线通信 |

(r- 27 (-

画 说通信原理

续表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 频段 名称 | 频 率 范 围 | 波长范围 | 波段 名称 | 传 输 介 质 | 用 途 |
| 中频 MF | 300kHz ～3MHz | 103 ～ 102m | 中波 | 同轴电缆 中波无线电 | 调幅广播、移动陆地通信、 业余无线电通信 |
| 高频 HF | 3 ～ 30MHz | 102 ～ 10m | 短波 | 同轴电缆 短波无线电 | 移动无线电话、短波广播、 军用定点通信、业余无线 电通信 |
| 甚高频 VHF | 30 ～ 300MHz | 10 ～ 1m | 超短波 | 同轴电缆 米波无线电 | 电视、调频广播、空中管 制、车辆通信、导航 |
| 特高频 UHF | 300MHz ~ 3GHz | 1m ～ 10cm | 微波 | 波导  分米波无线电 | 电视、空间遥测、雷达导 航、点对点通信、移动通 信 、专用短程通信、微波 炉、蓝牙技术 |
| 超高频 SHF | 3 ～ 30GHz | 10 ～ 1cm | 波导  厘米波无线电 | 微波接力、雷达、卫星和 空间通信、专用短程通信 |
| 极高频 EHF | 30 ～ 300GHz | 1cm ～ 1mm | 波导  毫米波无线电 | 微波接力、雷达、射电天 文学 |
| 紫外线、 红外线、 可见光 | 105 ～ 107GHz | 3 × 10-4 ~ 3 × 10-6cm | 光波 | 光纤  激光空间传播 | 光通信 |

1.6.4 无线电波的传播方式

无线电波的传播方式主要有地面波传播、天波传播、地 - 电离层波导传播、 视距传播、散射传播、外大气层及行星际空间电波传播等几种。

（1）地面波传播：即无线电波沿地球表面传播。

（2）天波传播：是利用电离层对电波的一次或多次反射进行的远距离传播， 是短波的主要传播方式。所谓电离层是大气中具有离子和自由电子的导电层。

（3）地 - 电离层波导传播：是指电波在从地球表面至低电离层下缘之间的球 壳形空间（地 - 电离层波导）内的传播。

（4）视距传播：发射天线辐射的电波像光束一样，直接传到接收点的传播方 式。另外，发射天线发射、经地面反射到达接收点的传播方式被称为大地反射波 传播。

（5）散射传播：是利用对流层或电离层介质中的不均匀体或流星余迹对无线 电波的散射作用而进行的传播方式。实际的流星余迹通信除了散射传播外，还可 利用反射进行传播。

（6）外大气层及行星际空间电波传播：是以宇宙飞船、人造地球卫星或星

(r- 28 (-

第 1 章 通信的基本概念

体为对象，在地 - 空、空 - 空间进行的电波传播。卫星通信利用的就是这种传播 方式。

上述传播方式示意图见图 1-22。

外大气层及行星 际空间电波传播

通信卫星

地-电离层 波导传播

电离层

对流层散射传播

电离层

A

天波传播

地面波 传播



视距传播



地球

地球

电离层散射传播

图 1-22 无线电波传播方式示意图

1.6.5 结语

（1）建立信道是实施通信任务的先决条件。

（2）有线信道可靠性高，但便捷性差、覆盖面小、成本高。

（3）无线信道便捷性好、覆盖面大，但可靠性和保密性差。

1.6.6 问答



问 题 1

壮壮 老师，我们知道道路的宽窄对交通是有影响的，那么，信道是否也有 宽窄的要求？

皮皮 嗯，动脑筋啦！有，就是“通频带”的大小，后面会讲到。



(- 29 (-

画 说通信原理



问 题 2

蛋蛋 老师，那道路的平整度对交通也有影响，信道是否也有相应的概念？ 皮皮 嗯，会举一反三啦，很好。有的，就是衰减和干扰。



问 题 3

静静 老师，如果用车类比信号的话，车辆的宽度可以比作信号的什么参 数呢？

皮皮 就是信号频谱宽度。大家今天思维敏捷，很好！望继续保持。 第 ***1.7***讲 什么是信号频谱和信道通频带

通常，人们习惯于在时间域研究信号幅度（因变量）与时间（自变量）的关 系。而在通信领域还常常需要了解信号幅度和相位与频率（自变量）之间的关系， 即要在频率域中研究信号。因此，这一讲就聊聊信号和系统在频率域的特性问题。

需要声明两点，一是通信原理课程中，不严格区分频率*f*和角频率 *ω* ;二是 术语“函数”和“信号”可以互换，信号可认为是具有物理意义的函数。

1.7.1 什么是频谱

用于通信的信号大多包含多个频率分量，比如一个周期方波信号就是由不同频 率的正弦信号分量叠加构成。生活中，一架钢琴的 88 个键分别对应 88 个不同频率 的声波，当演奏者按下一个和弦时，所发出的声波就是几个单音声波的合成，如 图 1-23 所示。



*O*

*O*

*O*



*A*1 *f*1



*A*2 *f*2

*A*3 *f*3





*A*1

*A*2



*A*3

*O f*1 *f*2 *f*3

图 1-23 和弦的频谱图 (r- 30 (-

第 1 章 通信的基本概念

在时间轴上看，该声波是一个幅度不停变化的曲线，但在频率轴上看，就是几 个位于不同频率的直线段（分量信号的幅度）。可以用下面的例子解释这个问题。

假设现在有四个不同频率、振幅和初相的余弦信号，它们的时域表达式分别为

*f*1 (*t*) = 4 cos(100*t*) ，*f*2 (*t*) = 3cos(200*t*+ ) *f*3 (*t*) = 2 cos(300*t*+ ) ，*f*4 (*t*) = 1cos(400*t*+ )

显然，它们都是时间*t* 的函数。但是我们注意到，如果把四个信号的振幅和初相 看作因变量的话，那么它们和另一个变量—频率 *ω*也呈函数关系，如图 1-24 所示。

4 *f*1（*t*）=4cos（100*t*）



0 *T/*2 *t*

（*t*）=3cos（200*t*+）

A*f*2 3



0

*t*

*f*3（*t*）=2cos（300*t*+）

2



*t*

0

*f*4（*t*）= 1cos（400*t*+）



1



*t*

0

振幅

A

4

2

0 100 200 300 400 *ω*

初相

τ τ

2



4

0 100 200 300 400 *ω*

振幅

3

0 100 200 300 400 *ω*

初相

A

τ τ

2



4

0 100 200 300 400 *ω*

振幅 2

A

0 100 200 300 400 *ω*

初相

A

τ τ

2



4

0 100 200 300 400 *ω*

A 振幅 1

0 100 200 300 400 *ω*

初相

A

τ τ

2



4

0 100 200 300 400 *ω*

图 1-24 正弦信号时域及频域波形

可见，振幅与频率构成一个函数，简称“幅频函数”，相位（初相）与频率

画 说通信原理

也构成一个函数，简称“相频函数”。也就是说，任意一个正弦信号除了时域波 形外，还可用幅频波形和相频波形在频域中表示。简言之，正弦信号的频域波形 （频谱）由幅值和初相两个垂直线段构成。

注意：通常，幅频波形和相频波形要分开画。只有当相频波形只取 0 和 τ 两 个值时，两者才可以画在一起。

若把上述 4 个信号加起来，就构成信号*f*5 (*t*) ，即有

τ τ τ

*f*5 (*t*) = 4 cos(100*t*)+3cos(200*t*+  )+2 cos(300*t*+  )+1cos(400*t*+  ) 6 4 3

其时域波形如图 1-25（a）所示。而在频域，把图 1-24 中的 4 个幅频函数和 4 个 相频函数分别相加，即可构成*f*5 (*t*) 的幅频函数和相频函数，见图 1-25（b）。显然， *f*5 (*t*) 的幅频函数和相频函数呈谱线状波形，类似大家熟悉的光谱波形。因此，也 被称为“幅频谱”和“相频谱”，二者可统称为“频谱”。

*f*5（*t*）

10



0

τ

τ

*T t*

-4



振幅

1

4

0 100 200 300 400 *ω*

2

4

A 初相



0 100 200 300 400 *ω*

（a）时域波形 （b）频谱

图 1-25 合成信号*f*5(*t*) 的时域波形及频谱

图 1-26 给出了一个时域方波及其频谱。图 1-27 给出了白光的光谱分解示意图。

*F*（*nω*0）

A

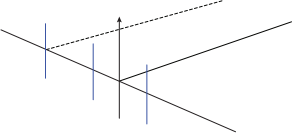
*a*1 *ω*

7*ω*0

*a*5 o

*a*7

3*ω*0



5*ω*0

*a*3 !

0

-*a*7 cos 7*ω*0*t*

*a*5 cos 5*ω*0*t* -*a*3 cos 3*ω*0*t*

*a*1 cos *ω*0*t*

*ω*0

0

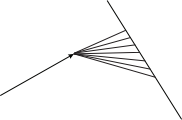
*t*

*f*（*t*）

图 1-26 对称方波的时域和频域波形

(r- 32 (-

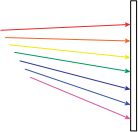
第 1 章 通信的基本概念



白色光

三棱镜

（傅里叶级数）



屏幕

（周期信号）

红光（基波）

橙光（2次谐波） 黄光（3次谐波） 绿光（4次谐波） 青光（5次谐波） 蓝光（6次谐波） 紫光（7次谐波）

图 1-27 三棱镜分光原理图

1.7.2 什么是信道通频带

大家知道，通信就是信号在信道中的传输过程。因为信号都有频谱，所以信 道的频率特性会直接影响信号的传输质量。这个概念类似于道路的不同质量指标 （比如宽度、平整度等）对车辆行驶产生的不良影响。

车辆需要在宽度大于车宽的道路上才能正常行驶，同样，信号也需要在频率 宽度大于信号频谱宽度的信道或系统中才能不失真传输。这个信道或系统的频率 宽度就叫“通频带”。

若把一个幅值恒定、频率连续可调的正弦信号加到一个信道的输入端，那么 当把该信号的频率从小到大连续改变时，所对应的信道输出信号与频率的变化关 系就是信道的频响特性。频响特性可分为两种。

幅频特性：输出信号幅度随频率变化的关系。

相频特性：输出信号相位随频率变化的关系（它反映了输出对输入的延迟）。

在多数情况下，人们只关心信号幅频特性，因此，把信道输出信号幅频率特 性也称为频率响应曲线。大多数信道的频响曲线都是带通型的，也就是说，信道 对某一频率段的信号幅度影响不大且基本上一致，而对大于或小于该频率段的信 号衰减很大，甚至到零，其曲线形状像一个不太规则的“扁方形门”。

通常，以幅频曲线的最大值为标准（一般是曲线中心频率所对应的值），定义 通频带如下。

通频带：信号幅度值下降到最大值的 70% 时所对应的两个频率之间的频段。

其中，低频率点叫“下截止频率”，高频率点叫“上截止频率”。因为这两点 的幅值与最大值之比为 0.7，对应的分贝值是 -3（dB），所以，截止频率也叫“3 分贝频率”，通频带也叫“3分贝带宽”，见图 1-28。从概念上讲，通频带是指一 个信道为信号传输所能提供的频带宽度。注意：“分贝”原是一个衡量声压强度的 单位。

画 说通信原理

 |*F*(*ω*)|

1

3dB

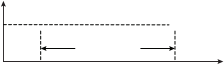
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  | |  |
| 通频带*B* |  | |

*ω*L *ω*H *ω*

0

50Hz 18kHz （a）一放大器频响曲线

1



|*F*(*ω*)|

通频带*B*

*ω*L *ω*H *ω*

0

50Hz 18kHz （b）高频提升的放大器频响曲线

|*F*(*ω*)| 1

0. 7

A

*B*



0 *ω*L *ω*H *ω*

（c）一调谐器频响曲线

图 1-28 通频带实例示意图

对一般传输信道而言，人们希望通频带越宽越好（对于模拟信号来说，意味 着频分复用的信号路数就越多，或者信号的保真程度就越高；对于数字信号来说， 意味着波特率就越大，可以传输更多的信息），频响曲线越平越好（输出信号的一 致性好）。比如高保真音响设备（主要包括音源、放大器和音箱三部分），就要求 各部分的频响曲线在通频带内尽可能平，否则，在听音乐时就可能会出现特别强 的笛声或特别弱的鼓声，因为某一频率的放大量比其他频率大得多或小得多。同 时，还要求通频带在低频段最好低于 20Hz，在高频段最好高于 20kHz，这是因为 音频的范围为 20Hz ～ 20kHz，如果音响设备的通频带达不到这个要求，人们就听 不到震人心魄的低音鼓声和清脆悦耳的三角铁声。

显然，信号的高保真（Hi-Fi）传输除了要求信道通频带大于信号带宽之外， 还必须要求通频带内的频响特性保持平坦，见图 1-28（a）。如果放大器的通频带 变成图 1-28（b）形状，则在播放音乐时，就会感觉到高音部分特别强，即高频信 号出现了失真。

生活中很多音响设备，比如汽车音响、家庭影院等都设有音调控制旋钮或均 衡器。音调控制旋钮的作用就是人为地改变放大器频响特性，提升或降低音频信

第 1 章 通信的基本概念

号中的某些频率成分（通常是高音、中音或低音部分），以满足人们的不同听觉需 求；而均衡器是通过改变多段频响曲线的方式，以弥补放大器频响特性的不平坦 或起到与音调控制旋钮相同的作用。

在应用中，也有要求通频带窄一点的场合，如收音机、电视机和电台等设备 中的调谐电路以及一些带通滤波器为提高选择性都希望通频带尽可能地窄，如 图 1-28（c）所示。

信号频谱宽度可类比汽车的车身宽度，信道通频带可类比道路宽度。显然， 一条道路要想让汽车顺利通过其宽度必须大于车身宽度，否则，车辆就无法在道 路上行驶；而信道通频带小于信号带宽时，虽然信号仍可在信道中传输，但已丢 失了很多信息，信号在信道中是以失真的形式传输，就好像把汽车超宽部分切掉 在路上跑一样。因此，一条信道要不失真地传送一个信号，必要条件就是其通频 带大于信号的频谱宽度。



1.7.3 结语

（1）频谱就是信号幅度（或相位）随频率变化的关系（图）。

（2）任何一个用于通信的信号都有频谱。通常包含幅度谱和相位谱。

（3）任何一个工程信号的频谱都有一定的频率宽度，类比运输车辆的宽度。

（4）要保证信号在通信系统中不失真传输，就必须保证频谱不丢失、不受 损害。

（5）在通信领域，人们还关心信号能量或功率的大小随频率的变化关系，比 如随机信号和噪声，这就引出了能量谱和功率谱的概念。通常，对于能量信号用 能量谱描述，而功率信号用功率谱描述，它们的概念与频谱类似。

（6）通信系统或信道的通频带是衡量通信任务完成质量或系统性能的重要 指标。

(- 35 (-

画 说通信原理

1.7.4 问答



问 题 1

圆圆 老师，信号的时域波形我们在示波器上见过，可信号的频谱在哪儿能 看到？

皮皮 在一种名叫频谱仪或频率分析仪的仪器上可以看到。它的长相跟普通 示波器差不多，甚至有的就是二合一，见图 1-29。



图 1-29 频谱分析仪



问 题 2

静静 老师， 通频带与道路宽度的类比我理解了， 但道路平整度怎么类 比呢？

皮皮 前面说过，可以类比衰减。比如，如果道路的路面平整，车辆行驶过 程就平稳快速，磨损小，货物损坏率也小；若不平整，行驶速度慢，颠簸大，磨 损大，货物损坏率也大。若信道幅频特性不平坦，则不同频率分量会有不同的衰 减（类似于磨损），引起信号失真（类似货物破损）。明白了吗？

静静 明白了。



第 1 章 通信的基本概念

第 ***1.8***讲 如何理解香农公式

1.8.1 香农公式

在交通理论中有一个重要概念—道路通行能力，它是指一条道路某一断面 上单位时间能够通过的最大车辆数，亦称道路容量，单位为“辆 / 小时”。注意： 也可描述通过的行人数。道路交通量示意图如图 1-30 所示。



图 1-30 道路交通量示意图

类比道路容量，可定义一个衡量信道性能的指标—信道容量。

信道容量：单位时间内信道上所传输的最大信息量。可用信道最大信息传输 速率表示。

一个给定连续信道的信道容量与什么因素有关呢？

大家知道，一个频带受限的模拟信号所携带的信息量与其带宽有关。比如， 电话系统中话音信号的带宽约为 4kHz（类比小汽车），而电视系统中图像信号的 带宽为 6MHz（类比大汽车）。可见，信号的频带越宽，意味着携带的信息量越 大，传输该信号的信道带宽也要随之增大。显然，信道容量与信道通频带有直接关 系。另外，在一个实际信道中，除了被传输的有用信号之外，不可避免地还混有各种 噪声，而噪声也会直接影响信号传输质量。因此，信道容量受到噪声和带宽的双重 制约。

1948 年美国数学家香农在论文《通信的数学理论》中提出了著名的香农公 式。该公式给出了信道容量与信道带宽和白色高斯噪声或信道输出信噪比之间的 关系

*C* = *B*log2  （1-3）

式中，*C* 为信道容量（bit/s），*B* 为信道带宽（Hz），*S* 是信号功率，*N* 是噪声功率。 (- 37 (-

画 说通信原理

信噪比是通信技术中一个重要的概念，其定义如下。 信噪比：信号功率与噪声功率之比，简记为 SNR 。 信噪比通常取分贝值（dB），有

SNR =  = 10lg  （dB） （1-4）

1.8.2 对香农公式的解释

式（1-3）可用下面的实例帮助理解。

设有一段公路（类比一个信道），用每秒通过这段公路的汽车数作为交通量 （类比信息量 *C*）， 公路的宽度类比信道宽度 *B* ，*S* 代表汽车数，*N* 表示公路上行人 的数量（类比干扰信号）。显然，交通量与道路宽度成正比，路越宽，单位时间通 过的车辆数越多；交通量还与路上车辆数与行人数之比有关系，行人越多， 占据 的路面就越宽，可供车辆通行的路面也就越窄，*S*/*N* 就小，反之，*S*/*N* 变大，交通 量就大。

因噪声功率 *N* 与信道的频带宽度有关，设单边噪声功率谱密度为 *n*0 且有 *n*0 *B*=*N*，则可得到香农公式的另一种形式

*C* = *B*log2  （1-5）

1.8.3 结语

（1）一个给定信道的信道容量受 *B* 、*S*、 *n*0 三要素的约束或三要素决定信道 容量。

（2）提高信噪比，可提高信道容量。

（3）一个给定信道的信道容量既可以通过增加信道带宽减少信号发射功率 也可通过减少信道带宽增加信号发射功率来保证。也就是说，信道容量可通过带 宽与信噪比的互换而保持不变。比如，若 *S*/*N*=7 ，*B*=4kHz，由香农公式可算出 *C*=12×103bit/s；同样的 *C* 值，还可由*S*/*N*=15 和 *B*=3kHz 来保证。

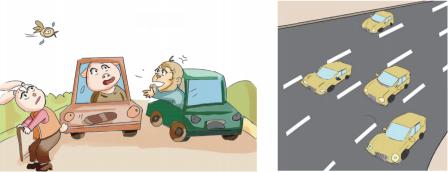
（4）虽然 *C* 与 *B* 成正比关系，但 *B* →∞时，*C* 却不能随之趋于无穷大。

带宽与信噪比互换的概念非常重要，香农公式虽未给出具体的实现方法，但 却在理论上阐明了这一概念的极限情况，为后人指出了努力的方向。比如，编码、 调制等技术就可在一定程度上实现带宽与信噪比的互换。

在实际应用中，具体以谁换谁要视情况而定。比如，在地面与卫星或宇宙飞 船的通信中，因信噪比很低且功率十分宝贵，所以常用加大带宽来保证通信容量； 而在有线载波通信中，因信道频带很紧张，这时就要考虑用提高信号功率来减少

第 1 章 通信的基本概念

各路信号的带宽，以增大载波路数，保证信道容量。



信道容量小 信道容量大

1.8.4 问答



问 题 1

皮皮 谁能再用生活实例描述香农公式？

壮壮 馒头和营养液都能让我存活。如果坐船在河里旅行，就少吃馒头多喝 营养液；如果骑骆驼在沙漠里旅行，就多吃馒头少喝营养液。馒头与营养液可以 互换。

静静 哈哈，你就忘不了吃！不过我觉得你的比喻还挺贴切。



问 题 2

皮皮 通信系统的噪声有内部噪声和外部噪声之分。谁能举例说明？

蛋蛋 老师，我试试。我觉得进入道路的人、畜和人力车可类比外部噪声， 而道路本身的路面硬度、平整度可类比内部噪声，对吗？



皮皮 嗯，不错！继续努力！



现在吃、 喝都行！

营养液

馒头

(- 39 (-

画 说通信原理

第 ***1.9***讲 什么是信道复用

1.9.1 信道复用的概念

为了更好地理解信道复用（多路复用）原理，我们提出物理信道和抽象信道 两个概念。物理信道是具象的，指信号经过的、可见的通信设备和传输介质，强 调信道的物质存在性；而抽象信道是指在一个物理信道中利用各种信号处理技术 划分出来的多个不可见的子通道。一个物理信道可以包含多个抽象信道，抽象信 道依附物理信道而存在。比如一对导线是一条物理信道，利用频分复用技术可将 导线通频带分为多个小频段，就可构成多个按频率划分的抽象子信道；利用时分 复用技术，该导线传输信号过程中的不同小时隙也可构成多个按时隙划分的抽象 子信道；利用码分复用技术，该导线也可以构成多个按码型划分的抽象子信道。 显然，抽象信道存在于物理信道之中，是为理解信道复用而提出的专用术语。

有了上述概念，就可给出信道复用的定义。

信道复用：在同一个物理信道（如一对线缆、一条光纤或空间）中利用复用 技术传输多路信号的过程或方法。

即在一条物理信道内产生多个抽象信道，每个抽象信道传送一路信号，如图 1-31 所示。

*n* 

*n* 路信号输入

|  |
| --- |
| 1  2 |
| 3 |
| *n* |
|  |

1

2

3

解复用

一条物理信道

 复

; 用

*n*个抽象信道

*n* 路信号输出

图 1-31 多路复用示意图

1.9.2 几种常用的复用技术

常用的复用技术主要有：频分复用、时分复用、码分复用和波分复用。

（1）频分复用（FDM）。指在一个具有较宽通频带的物理信道中，通过调制 技术将多路频谱重叠的信号分别调制到不同的频带上使得它们的频谱不再重叠的 一种多路传输方式。其特点是各路信号在时间上相互重叠，而在频率上各占其位 互不干扰。

（2）时分复用（TDM）。指在一个物理信道中，利用抽样定理和调制等技术 将多路频谱重叠的信号分时在信道中传输的一种多路传输方式。其特点是各路信

第 1 章 通信的基本概念

号在时间上相互不重叠，而在频率上频谱重叠；任意时刻信道上只有一路信号， 各路信号按规定的时隙轮流传送。

（3）码分复用（CDM）。指利用一种特殊的调制技术将多路时间和频谱都重 叠的信号变为传输码型不同的信号在信道中传输的一种多路传输方式。其特征是 多路信号无论在时间上还是频谱上都重叠，但它们的码型不一样。

（4）波分复用（WDM）。是光通信中的复用技术，其原理与频分复用类似。

可用图 1-32 来说明三种常用复用方式的异同点。图中方框 1 、2 、3 、4 表示 4 路信号。

时间

1 2 3 4



0 FDM

频率

时间

4

3

2

1

0 TDM

时间





频率

4

频率

|  |  |
| --- | --- |
| 123 |  |
|  |
|  |

CDM

码型

图 1-32 三种复用示意图

上述复用概念可以用交通现象类比理解，如图 1-33 所示。

（1）频分复用相当于把一条道路分为几个车道，不同的车辆（信号）可以同 时在不同的车道上跑，靠车道区分不同出发地和目的地的车辆。

（2）不同出发地和目的地的车辆分时在一个车道（一条道路）顺序行驶，靠 不同的时隙区分就是时分复用。

（3）不同出发地和目的地的车辆垂直叠在一起（信号是混在一起）同时在一 个车道（一条道路）上运行，最后靠车型加以区分就是码分复用。



图 1-33 三种复用类比图

1.9.3 结语

（1）复用的实质是提高信道的时空利用率。

（2）信道复用是各种通信系统提高有效性的常用手段。

（3）为满足人们的需求，多种复用技术同时出现于一个通信系统的情况日益 增多。

画 说通信原理

1.9.4 问答





问 题 1

皮皮 谁能举例说明信道复用概念？

圆圆 老师，我爱看电视。我觉得电视通过一根接在墙上有线电视端口的电

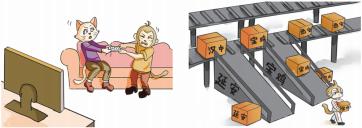
缆就可以看很多频道节目的现象应该是信道复用的结果吧？ 皮皮 嗯，很好，是频分复用的实例。



问 题 2

蛋蛋 老师，从一条传送带上分拣到不同地方的邮件算不算信道复用？

皮皮 问得好！准确地说，这是标签复用，但具有一点时分复用的特征。所谓 标签复用，就是在一个信道中，分时传输具有不同地址标签的数据信号。





问 题 3

静静 老师，我觉得模拟信号传输，比如打电话，应该不能时分复用， 对吗？

皮皮 是的。多路模拟信号传输通常只能进行频分复用。但通过模 / 数转换 变为数字信号后，就可以进行其他形式的复用了，比如时分复用。



问 题 4

壮壮 老师，如果用一条多芯电缆作为信道，其中每一对芯线传输一路电话 信号，这是不是信道复用？如果是，应该叫什么复用？

第 1 章 通信的基本概念



皮皮 问得好！这是一种信道复用，通常，称之为“空分复用”。类似的实

例还有卫星通过多个覆盖不同地区的天线与多个地面站进行的多路信号传输。

第 ***1.10***讲 什么是随机过程及为什么要研究它

“信号与系统”课程主要讨论的是 LTI 系统对确知信号的变换或处理问题，而一个 通信系统虽然可认为是 LTI 系统，但其传输 或处理的信号却是随机信号，无法直接利 用“信号与系统”课程的系统分析方法对其 进行分析研究。因此，在分析研究各种通信 系统之前，大家首先要了解随机信号与随机 过程。



随机信号

确知信号 分析方法

1.10.1 什么是随机信号



随机信号

确知信号

随机信号的参照物是确知信号。

为了更好地理解随机信号，可以先给出 确知信号的定义。

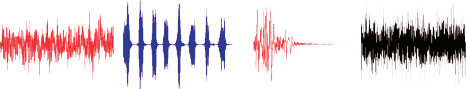
确知信号：变化规律已知或取值大小可 预知的信号。

确知信号虽然不能直接用于通信，但可 以作为随机信号的参照物或分析基础出现。

基于确知信号的概念，可以给出随机信号的定义。

随机信号：变化没有规律或取值大小无法预知的信号。

其特征是不能用一个确定的数学表达式加以描述，如话筒送出的音频信号、 摄像机输出的视频信号等。随机信号实例见图 1-34。



0.03 0.02 0.01 0

0.01 0.02 0.03

0 0.2 0.4 0.6 0.8

4

2

0

2

4

0

100 200 400 400 500

雷达接收机输出噪声 鸟叫声 爆破声 白噪声

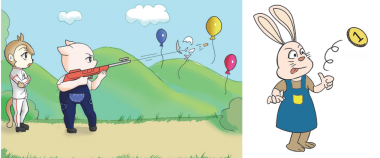
图 1-34 随机信号实例

(- 43 (-

画 说通信原理

对于通信系统而言，由信源发出的信号相对于信宿必须要有一定的不确定性 或随机性，即信号要携带一定的信息量。因此，在通信系统中传输的信号都是随 机信号。另外，通信系统的噪声大小、信道特性的起伏也都是随时间做随机变化 的。这样，人们把随机信号和噪声就都纳入一个特殊的时间过程—随机过程中 加以分析研究。

一个随机信号一旦产生，就变成确知信号了，其随机性只体现在产生的过程 中。比如，一个演讲者演讲时，听众并不知道他下一秒要讲什么，其声波的变化 就是随机的。但当他演讲完毕，其演讲的全部声波信号就是确定的了。再比如， 一个射击运动员准备射击，你不知道他能打几环，他每次打靶的结果事先都是未 知的，因此，他能打几环就是个随机事件，但当他射击完毕，结果已知，随机事 件就变成确知事件。



随机变量

1.10.2 什么是随机变量

用不同取值表达一个随机试验中不同结果的变量被称为随机变量。比如在掷 硬币试验中，假设出现正面用变量*X* 的取值 1 表示，出现背面用取值 0 表示，显 然，*X* 取 1 或 0 是随机的，因此，*X* 就是一个随机变量。若随机变量的取值个数 有限，就被称为离散随机变量；若可能的取值充满一个有限区间或无限区间，则 该变量就是连续随机变量。

1.10.3 什么是随机过程

因为通信系统传输的信号都是随机的，所以，无法对它们进行分析研究。但 幸运的是，人们研究发现，很多信号源单看一次发出的信号是随机的，但 *n* 次发 出 *n* 个信号的变化过程却是有规律的。比如，一个运动员每一次打靶的成绩事先 都是未知的，但通过搜集他几万次或几十万次的以往成绩，发现打 9 环的次数比 较多，大概占总次数的 85%，平均误差为 2 环。因此，根据这些统计（数据）规

律，可以预测他每次打 9 环的可能性 较大。

如果把一次随机信号的产生或一个 随机事件的发生称作一个样本（即确知信 号或事件）的话，那么，就可把一个信号 源多次产生的样本或多个同类信号源在同 一时间产生的信号样本集合称为“随机过 程”。这样，就有以下结论：

（1）一个随机信号指的是一个变量 随时间做无规律变化的过程。比如，扬 声器发出声波信号的过程。

（2）一次变量随机变化过程（随机 信号产生过程） 的结束，意味着一个样 本（确知信号）的产生。

（3）一个随机过程（注意：是一个 专用名词，有特定的含义，不是一个随 机变化过程）是多个样本的集合。即一 个信号源在不同时段输出的样本集合或 若干信号源在同一时段输出的样本集合。 因此，一个随机过程可以来自一个信源 的多次输出，也可以来自多个同类信源 的一次输出。

（4）随机信号以个体形式出现，而 随机过程以群体形式存在。

随机信号与随机过程类比图见图 1-35。

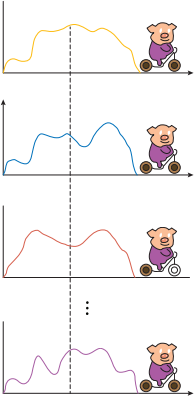
1.10.4 如何理解随机过程

第 1 章 通信的基本概念

*y*

A

*O t*

*y* A



*O*

*t*

*y*



*O*

*t*

*y*

A





*O*

*t*

*y*

A



*O t*0 *t*

图 1-35 随机信号与随机过程类比图

随机过程的概念可从以下两方面加以理解。

随机过程

（1）随机过程是若干对应不同随机试验结果的时间过程的集合。例如：设 有 *n* 台性能和工作条件都完全相同的接收机同时工作并用 *n* 台示波器同时观测并 记录这些接收机的输出噪声波形（或对一台接收机，在 *n* 个不同时段进行观测记 录）。测试结果表明，尽管设备和测试条件相同，但是所记录的 *n* 条随时间变化的 波形曲线却形态各异（如图 1-36（a）中的 *x*1 (*t*) ，…，*xn* (*t*) ），这说明每台接收机

(- 45 (-

画 说通信原理

输出的噪声电压随时间的变化规律都是不可预知的，是随机噪声（信号）。但是， 测试结果的每一个记录（图 1-36（a）中的每一个波形曲线）都是一个确定的时 间函数*xi* (*t*) ，被称为样本函数或随机过程的一次实现。全部样本函数构成的总体 { *x*1 (*t*), *x*2 (*t*),**…** , *xn* (*t*) } 就是一个随机过程，见图 1-36（b）。

简言之，一个随机过程是所有样本函数的集合，记作*ξ*(*t*) 。

1 *t*

（a）样本函数与随机过程的关系 *ξ*（*t*1）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 样本函数*x*1（*t*） *x*1（*t*1） | | |  |
|  |  |  |  |
| 样本函数*x*2（*t*） | | *x*2（*t*1） |  |
|  |  |  |  |
| 样本函数*x*3（*t*） | | *x*2（*t*1） |  |
|  |  |  |  |
| 样本函数*xn*（*t*） | | *xn*（*t*1） |  |

*ξ*（*t*）

0



*t*1 *t*

（b）随机变量与随机过程的关系

图 1-36 样本函数、随机变量与随机过程的关系

（2）随机过程是随机变量概念的延伸，即随机过程是依赖参量 *t* 的随机变 量*ξ*(*t*) 。因为在任一给定时刻 *t*1 上，每个样本函数*xi* (*t*) 都有一个确定数值*xi* (*t*1 )，但 由于每个样本 *xi* (*t*) 的出现及变化都是不可预知的（这正是随机过程随机性的 体现），所以，全体样本 *ξ*(*t*) （即随机过程）在 *t*1 时刻（任意时刻）的取值 {*xi* (*t*1 ), *i* = 1*,*2*,* **…***,n*}就是一个随机变量，记为 *ξ*(*t*1 ) 。因此，随机过程还可看作是一 组在时间进程中处于不同时刻的随机变量的集合。

上述两个随机过程概念在本质上是一样的，但后一种可把分析随机过程的问 题转化为分析随机变量问题，因而更便于理论分析。

1.10.5 什么是随机过程的数字特征

工程实践中，人们常用数字特征描述随机过程的主要特性。对于通信系统而 言，这样做不仅可以满足其研究需求而且也便于计算和测量。

随机过程的数字特征是由随机变量的数字特征推广得到的，最常用的是均值、 方差和相关函数。注：相关函数的问题这里不讨论。

(r- 46 (-

第 1 章 通信的基本概念

（1）均值（数学期望）。随机过程*ξ*(*t*) 的均值或数学期望被定义为

 （1-6）

显然， *ξ*(*t*) 的均值*E*[*ξ*(*t*)]是时间的确定函数，常记作 *a*(*t*) ，表示随机过程的 *n* 个样本函数曲线的摆动中心（如图 1-36（a）中白粗线所示）。

（2）方差。 随机过程的方差被定义为

 （1-7）

*D*[*ξ*(*t*)] 常记为 *σ*2 (*t*) 。这里也把任一时刻 *t*1 直接写成了 *t* 。方差等于均方值与 均值平方之差，表示随机过程在时刻 *t* 对于均值 *a*(*t*) 的偏离程度。

数学期望表示一个随机过程中所有样本的趋向值，而方差则表示所有样本的 值与趋向值的误差大小。比如在射击中，把 8 环定为 *n* 次射击的趋向值，可类比 为数学期望；而 *n* 次射击的结果与趋向值的平均误差（如2 环），可比喻为方差。

利用数字特征分析通信系统中的随机过程是对随机过程研究方法的简化，也 是在科学研究中经常用到的一种避繁就简思路的具体体现。



随机信号

随机过程 期望

方差

1.10.6 结语

（1）若 *t* 和 *ζ*均为变量时，*ξ*(*t*) 是一个时间函数簇。

（2）若 *t* 为变量， *ζ*不变时，*ξ*(*t*) 是一个确定的时间函数。

（3）若 *t* 不变， *ζ*为变量时，*ξ*(*t*) 是一个随机变量。

（4）若 *t* 和 *ζ*均不变时，*ξ*(*t*) 是一个确定值。

（5）在研究随机过程时，必须透过表面的偶然性找出其内在的必然性规律， 并以统计理论描述这些规律。也就是说，随机过程是从偶然性中寻找必然性的一 种数学方法。

因随机过程是一个随机变量簇，故其统计特性可用分布函数或概率密度函数 描述。

(r- 47 (-

画 说通信原理

（6）对随机过程的分析可在时域和频域进行。

在时域，主要以均值和方差为分析抓手；在频域，主要以能量谱和功率谱为 分析内容。

1.10.7 问答





问 题 1

皮皮 圆圆，请给出这节课的内容总结。 圆圆 今天主要讲了以下几点。

（ 1） 通常， 通信系统传输的是随机信号， 通信系统中的噪声（干扰）也是随机信号。

（2 ）为了设计通信系统或分析通信系统性 能（比如，信噪比），必须研究随机信号。

（3）随机信号因其变化无规律而无法研究， 所以，人们找到了其替身—随机过程。

（4 ）随机过程具有统计规律，如数学期望、方差等，因此可在理论上进行分 析研究。

皮皮 嗯嗯，“替身”一词用得好。挺全面！



问 题 2

圆圆 老师，我觉得人的一生可以比喻为随机信号，因为我们无法预知明天 会发生什么，但多数人的人生轨迹就构成随机过程。我们可以通过对大量人生轨 迹（样本）的分析研究，得出一些规律性的东西，以帮助或指导每个人走好自己 的人生之路，您说对吗？

皮皮 嗯，有点意思。大家可以再仔细思考一下这个比喻。



问 题 3

皮皮 蛋蛋，结合“信号与系统”知识，说说人们主要研究信号和随机过程 的什么内容？

第 1 章 通信的基本概念

蛋蛋 对信号而言，主要研究其时域和频域特性。具体地说，就是信号大小 随时间的变化规律和信号大小及相位与频率的变化关系。简言之，就是研究信号 波形及频谱。

对随机过程而言，应该也是其时域和频域特性。具体地说，就是随机过程的 分布函数或数字特征随时间的变化规律以及随机过程功率谱密度与频率的变化关 系。简言之，就是研究随机过程的数字特征和功率谱密度。

皮皮 嗯，不错，下课！

第 ***1.11***讲 如何研究随机过程

1.11.1 各态历经性

前面讲过，为了设计通信系统并分析其性能，必须研究随机过程，即要研究 一簇随机变量或一组样本函数的集合。但在实践中，要获得一簇随机变量或一组 样本函数却并非易事。因此，人们试图用一个样本函数取代一组样本函数来决定 随机过程的数字特征，从而简化随机过程的研究方法。幸运的是，“各态历经性” 也称“遍历性”满足了人们的愿望。

各态历经性：是指随机过程中的任何一次实现都经历了随机过程的所有可能 状态。

因此，在求解随机过程的统计平均值（均值或自相关函数等）时，无须作多 次考察，只需用一次实现的时间平均值代替过程的统计平均值即可，从而使测量 和计算过程大为简化。

各态历经性的重要意义在于：在分析一个处理随机过程的系统时，只需要找 到系统在一种状态下（一个样本下）的解，就可以了解全部状态下（随机过程下） 的系统活动特性，从而大大降低系统分析的复杂程度。

各态历经性虽好，但不是所有的随机过程都具备该特性。通过研究，人们发 现一种叫作“平稳随机过程”的随机过程在一定条件下会具有各态历经性，而通 信系统中的信号和噪声均可认为是这样的平稳随机过程。因此，对随机过程的研 究可以聚焦到平稳随机过程上来。

1.11.2 平稳随机过程

随机过程可分为平稳和非平稳两大类。

平稳随机过程：在时间进程中，统计特性不变或变化极小的随机过程。

(- 49 (-

画 说通信原理

平稳随机过程意味着随机过程*ξ*(*t*) 和*ξ*(*t* +Δ*t*) 具有相同的统计特性。 非平稳随机过程：在时间进程中，统计特性随时间变化的随机过程。

平稳特性意味着不管什么时候去研究一个通信系统的噪声，噪声的统计特性 都是一样的，虽然，噪声的样本千变万化。平稳随机过程的一个特性是，若线性 系统的输入随机过程是平稳的，则输出随机过程也是平稳的。

结合“信号与系统”内容可知，随机过程的平稳特性与系统的时不变性在概 念上类似。但对象不同，平稳特性是随机过程（信号）特性，而时不变特性是系 统特性。

1.11.3 窄带随机过程

根据功率谱函数所占频带宽度的不同，随机过程可分为宽带和窄带随机过程两 种。若随机过程 *ξ*(*t*) 的谱密度集中在中心频率*f*c 附近相对较窄的通频带范围 Δ*f* 内， 即满足 Δ*f* << *f*c 条件，且*f*c 远离零频率点，则称该 *ξ*(*t*) 为窄带随机过程。因实际通 信系统多为窄带带通型，故通过窄带系统的信号或噪声必然是窄带随机过程。

1.11.4 高斯随机过程

平稳随机过程是根据分布函数时间起点特性的不同而归纳出的一类随机过程。 而根据分布函数“长相”的不同，还可定义另一类随机过程—高斯随机过程。 因实际中的噪声大多是高斯型的，故高斯或正态随机过程就是本课程研究的一个 重点，其定义如下。

高斯随机过程：任意 *n* 维分布函数均服从正态分布的随机过程*ξ*(*t*) 。

从通信角度看，高斯随机过程具有一个重要特点：高斯过程经过线性变换后 仍是高斯过程。或者说，若线性系统的输入为高斯过程，则系统的输出也是高斯 过程，见图 1-37。

*v*i（*t*）· *h*（*t*） · *v*o（*t*） *ξ*i（*t*）· *h*（*t*） · *ξ*o（*t*）

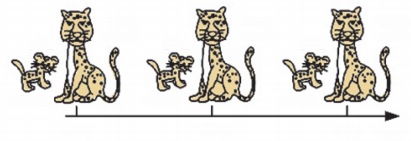
确知信号 确知信号 平稳过程/高斯过程 平稳过程/高斯过程

（a）确知信号通过线性系统 （b）随机过程通过线性系统 图 1-37 确知信号和随机过程通过线性系统

（1）平稳随机过程与非平稳随机过程的主要区别是平稳随机过程的分布函数 的“长相”与其时间起点无关。就好像一个豹妈不管是今天、明天还是后天生孩 子，孩子的长相都一样。

(r- 50 (-

第 1 章 通信的基本概念



豹妈 豹妈 豹妈

平稳过程

豹娃

分布函数

今天 明天 后天 时间

分布函数

分布函数

平稳过程

平稳过程

豹娃

豹娃

（2）高斯随机过程的主要特点是分布函数长相相同，都是正态分布曲线。非 高斯随机过程的主要特点是分布函数的长相各异，如豹娃娃、虎娃娃和狮娃娃的 长相都不同。

（3）高斯随机过程可以是平稳的也可以是不平稳的。通信中的高斯噪声是平稳的。

1.11.5 白噪声

根据谱密度的长相不同（频带是否 受限），噪声可分为白噪声和带限噪声两 种。白噪声 *n*(*t*) 是指其功率谱密度*pn* (*f*) 在所有频率上（频带不受限）为一常数 的噪声。频带受限的噪声就是带限噪声。 带限噪声可分为低通白噪声和带通白噪 声（多为窄带噪声）两种。另外，人们 还常见到高斯白噪声，频域中的功率谱 为一常数，时域中的分布函数服从正态 分布的噪声就是高斯白噪声。图 1-38 给 出了三种噪声的示意图。

1.11.6 结语

（1）研究随机过程可通过遍历性转 换为研究平稳随机过程。

（2）“白不白”由噪声（随机过程） 频域特性的长相（功率谱）决定；“高不 高”由噪声（随机过程）的时域特性的 长相（分布函数）决定；“稳不稳”由噪 声（随机过程）与时间起点的关系决定。

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | A | *Pn*（*f* | ) |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  | *n*0  2 |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

0 *f*

（a）白噪声功率谱密度

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | |  |  | *Pn*（*f* | ) |  | |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  | |  |  | *n*0  2 |  |  | |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

-*fH* 0 *fH f*

（b）低通白噪声功率谱密度

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | A | *Pn*（*f* | ) |  |  |
|  |  |  |  | *n*0  2 |  | B |  |
|  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

-*fH* -*fL* 0 *fL fH f*

（c）带通白噪声功率谱密度 图 1-38 三种噪声功率谱

画 说通信原理

（3）平稳、高斯、白色都是根据不同标准对随机过程的分类，彼此之间没有 包含关系，但可以兼备，即它们可以单独存在，也可以组合存在。

（4）在通信系统中，主要研究平稳、高斯、白色和窄带噪声（随机过程）。

（5）对于信号或噪声随机过程，主要研究其数字特征和功率谱。研究结果体 现在信噪比、谱带宽和谱成分三个指标上。

（6）通信系统分析与随机过程分析关系图见图 1-39。

通信系统分析

↓需要求得

输出信噪比、谱成分、谱带宽 来自

信号和噪声的数字特征和功率谱

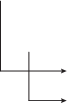
|  |
| --- |
| 噪声分析 |

A 来自 A 来自

|  |
| --- |
| 信号分析 |

v 归为

|  |
| --- |
| 随机过程分析 |

功率谱 功率谱 遍历性 分布函数

|  |
| --- |
| 平稳 随机 过程 |

|  |
| --- |
| 高斯 随机 过程 |

|  |
| --- |
| 白噪声 |

|  |
| --- |
| 窄带 随机 过程 |



|  |
| --- |
| 窄带白 噪声 |

|  |
| --- |
| 信号 |

|  |
| --- |
| 高斯白噪声 |

|  |
| --- |
| 窄带信号 |

|  |
| --- |
| 高斯噪声 |

|  |
| --- |
| 窄带高斯白噪声 |

图 1-39 通信系统分析与随机过程分析关系示意图

1.11.7 问答





问 题 1

皮皮 圆圆，你总结一下描述噪声或随机过程的方法？

圆圆 嗯，我觉得可以从三个维度用三个特性描述。三个维度是：频域、时

域和时不变性。三个特性是“白不白”“高不高”“稳不稳”。 皮皮 那么能否给出简单的判断方法呢？

第 1 章 通信的基本概念



圆圆 嗯，我用个口诀试试：“白不白，千频一线就是白；高不高，分布如山

就是高；稳不稳，隔天不变就是稳”。对吗？老师！ 皮皮 很好，挺准确。



问 题 2

静静 老师，从图 1-39 看，白噪声的特性就是功率谱（谱密度）是一条贯穿 所有频率的直线，类似于白色光的光谱。可窄带意味着部分频率， 而不是所有频 率，那么，窄带白噪声应该不算白噪声吧？

皮皮 嗯，是这样。其实，严格地讲，窄带白噪声不是白噪声，而是在部分 频率上借用贯穿和直线概念，描述低通和带通噪声。



问 题 3

皮皮 壮壮，你把这节课的内容顺一遍。 壮壮 今天的内容如下。

（ 1）因为随机信号和噪声的变化特性不可知，所以，人们要研究随机过程。

（2）因为随机过程是一簇随机变量或一组样本函数的集合，所以，在实践中， 既不便于测量获取，也不便于理论分析和计算。

（3）人们发现如果一个随机过程具有遍历性，则可以简化研究过程。而具有 这种特性的平稳随机过程就进入了人们的“法眼”。

（4）通信系统中的信号和噪声都可认为是平稳随机过程。

（5 ）人们发现通信系统中的噪声在时域上满足正态分布，因此，把这种噪声 称为高斯噪声。高斯噪声是平稳的，具有遍历性。

（6）为便于分析，人们根据白光概念提出了白噪声，进而有了高斯白噪声。

（7） 因为任何一个通信系统都是频带受限的， 即通频带不是无穷大。所以， 通过通信系统的噪声都是窄带噪声，进而出现了窄带白噪声概念。

（8）对通信系统的分析主要集中在计算信号和噪声（随机过程） 的数字特征、

功率比（信噪比）、功率谱的带宽和组成成分（有无直流分 量）以及系统的通频带几方面。这里的噪声主要指窄带高斯 白噪声。

皮皮 壮壮用心了，很好！看把你高兴的。

(- 53 (-

画 说通信原理

第 ***1.12***讲 通信系统性能的评价指标是什么

1.12.1 基本概念

因为通信系统的构成多种多样，性能千差万别，所以，如何评价系统性能的 优劣就是设计和选用一个通信系统所面临的首要问题。为此，人们需要找出能够 反映通信系统性能的各种技术指标，然而，研究通信系统性能指标又是一个非常 复杂的问题。因为涉及的内容很多，包括通信的有效性、可靠性、标准性、快速 性、方便性、经济性以及使用维护等诸多方面，另外，很多性能之间是有矛盾的， 此消彼长，如果把所有因素都考虑进去，面面俱到，不但系统的设计及实现难以 完成，对系统的评价也无法开展。所以，在评价通信系统时，就要从诸多矛盾中 找出具有代表性、起主要作用的主要矛盾作为评价标准。



因为在设计和使用通信系统时，通信的有效性和可靠性常常是人们着重考虑 的问题，所以，就把它们作为评价通信系统性能的主要指标。有效性反映信息传 输的速率大小，而可靠性则代表信息传输的质量（准确程度）高低。信息传输得 越快，出错的概率就越大，因此，速率与质量是一对矛盾，就如同汽车运输一样， 速度越快，运送的货物越多，效率也就越高，但也越容易出事故，可靠性也就越 差。在实际工程中，可在一定的可靠性要求前提下，尽量提高信息传输速率；也 可保持一定的有效性，而设法提高信息的准确性。从香农公式中可以看到二者能 够在一定的条件下互相转换。

有效性和可靠性是根据对通信质量的要求而定义出的客观标准，但它们是抽 象的，既没有可操作性也很难量化。因此，必须在通信系统中找到具体的、可以 操作且能够反映有效性和可靠性的参数或指标。

1.12.2 模拟通信系统的性能指标

对于模拟通信系统，有效性用系统的传输频带宽度来衡量，而可靠性则常用 系统最终输出的信噪比来评价。

第 1 章 通信的基本概念

系统的传输带宽（广义信道带宽）主要取决于两方面：一是传输介质，二是 对信号的处理方式。通常，传输介质的带宽都比较大，完全能够满足传输要求， 因此，系统的带宽主要由对信号的处理方法决定。而系统输出信噪比不但与信号 的处理方式有关，还与系统的抗干扰措施或技术有关。

为便于理解，可把系统带宽比喻为道路的路面宽度。路面宽度越宽，允许同

时通过的车辆也就越多，有效性就越高。若把 车辆的宽度（信号的频谱宽度）加大，则路面 宽度（系统带宽）也必须随之加大。信噪比可 以类比到达目的地汽车数与自行车数的比值。 该比值越大，说明道路的通行状况越好，外界 的干扰越小。类比图见图 1-40。

1.12.3 数字通信系统的性能指标



图 1-40 通信系统有效性类比图

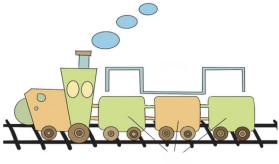
为了评价数字通信系统，需要了解如下概念。

（1）码元。表示 *M* 进制数字信号每一个状态的电脉冲被称为码元。

理论研究中，因为用于通信的数字信号需要被由若干符号或元素构成的数据 序列 { *ai* } 编码，则码元也可认为是构成数据序列的一个基本符号或元素。

每个码元只能被赋予有限个取值。在 *M* 进制中，任何一个码元 *ai* 只能取 0，1， 2 ，… ，*M*-1 中的一个值。当一个数据序列被赋予信息后（编码后），就可称为 *M* 进制信息码，或 *M* 进制数据码。可见，码元也是承载信息的基本（最小）单位。

码元与数字信号的关系可以类比车厢与火车。在这个概念下，数字信号可以 理解为由一系列码元构成的时间序列。通常，数字通信系统传输的是表示 0 、1 的 码元序列（数据序列），即二进制数字信号。类比图见图 1-41。



数据

1 0 1

数字信号

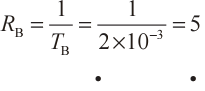
码元

图 1-41 数字信号类比图

（2）码元传输速率*R*B 。通信系统单位时间传输的码元个数被称为“码元传

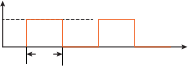
画 说通信原理

输速率”，用*R*B 表示，单位为波特（baud），故也称为“波特率”。波特率可类比 汽车站单位时间内发出的车辆数。比如一个系统 1s 传送了 1200 个二进制码元， 其波特率就是 1200 baud。再比如，若图 1-42（a）中信号的一个码元持续时间 *T*B = 2 ms ，即该信号以 *T*B 为重复间隔，则其码元速率为

00 baud · （1-8）

单位“波特”是以法国工程师琼 莫里斯 埃米尔 波特（1845—1903）的

3V 0



0

码元1 码元2

*T*B

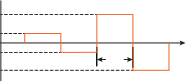
*f*（t）

0 1

1

*t*

（a）二进制信号

A*f*（t） 3V

11

码元4 10

00

码元3

码元

1

码元

2

01 *T*B

*t*

1V 0 -1V

-3V

（b）四进制信号

图 1-42 二 / 四进制信号示意图

名字命名的。

（3）信息传输速率 *R*b 。波特率仅仅 反映系统传输数字信号快慢的能力，人们 还不知其传输信息量的多少，就好像只知 道一条路一小时能过多少辆车，而不知道 运送了多少吨货物或多少名乘客一样。因 此，人们又定义了一个物理量—信息传 输速率。

通信系统单位时间传输的信息量被称 为“信息传输速率”，用 *R*b 表示，单位是 比特 / 秒（bit/s），因此也称为“比特率”。

比特率可类比汽车站单位时间内发出的货物吨数。

通常，对于 0 、1 等概出现的二进制数字信号，规定一个码元携带 1 比特 （1bit）的信息量，则二进制数字信号的码元速率和信息速率在数值上相等。

（4）频带利用率。任何一个通信系统都需要一定的传输带宽进行信号传输， 而数字系统的传输带宽直接制约着传输速率。为了表示在一定的传输带宽下数字 通信系统的信息传输能力，即有效性，人们又定义了一个物理量—频带利用率。

频带利用率：系统信息传输速率*R*b 或码元传输速率*R*B 与系统传输带宽*B* 的比 值，用*η*b 和*η*B 表示，单位是 b/(s ·Hz) 或 B/Hz。

 （1-9）

 （1-10）

（5）有效性的衡量。显然，对于数字通信系统，在不考虑系统占用频带资源 多少的前提下，波特率或比特率的大小可以反映系统的有效性。但因为频带资源 有限，常常需要以尽可能小的频带资源浪费，传输尽可能多的信息量，所以，频 带利用率也就成为衡量系统有效性的另一个重要指标。

第 1 章 通信的基本概念

为了提高有效性，在技术和成本允许的情况下，数字通信系统也常采用多进 制（*M* 进制）数字信号（通常 *M* 取 2 的各次幂，比如 4 、8 、16 等）进行传输。 *M* 进制数字信号可以理解为由 *M* 种不同码元构成的时间序列。

多进制信号的每一种码元都可用多位二进制码表示（编码），比如四进制信号 的 4 种码元都可用2 位二进制码表示，见图 1-42（b）；八进制码元的每个状态可 用 3 位二进制码表示。因为一个二进制码元携带 1bit 信息量，所以，一个四进制 或一个八进制信号码元就包含 2bit 或 3bit 信息量。可见，传输多进制信号的好处 是可在波特率不变的情况下提高比特率。比如，波特率为 1200baud 的通信系统传 输四进制信号时，其信息传输速率就为 2400bit/s，比二进制信号提高了一倍。由 此得到波特率*R*B 、比特率 *R*b 与数制*M* 三者之间的关系。

*R*b = *R*B log2 *M* （bit/s） （1-11）

如果用一辆只坐一个人的小车对应一个二进制码元的话，那么，一个能坐 2 个人的大车就像一个四进制码元。显然，在单位时间通过车辆数相同的前提下， 大车运送的乘客是小车的 2 倍。利用多进制信号传输信息的目的，就如同寻求用 更大的车载客一样。



二进制码元 四进制码元 八进制码元

（6）可靠性的衡量。数字通信系统的可靠性用差错率表示。差错率包括两 个内容：误码率和误信率，其概念类似于交通事件中的车辆损失率和货物损失率 （人员伤亡率）。

误码率指错误接收的码元数在传输的总码元数中所占的比例，或者说是码元 在传输中被传错的概率，用式（1-12）表示。

误码率*P*e = 错误的码元数*N*e / 传输的总码元数*N* （1-12）

误信率也称为误比特率，它是指接收错误的信息量在传输总信息量中所占的 比例，即信息量在传输中被丢失的概率，用式（1-13）表示。

误信率*P*b = 错误的比特数*I*e / 传输的总比特数*I* （1-13）

注意：对于二进制系统，有 *P*e = *P*b ；对于多进制系统，有 *P*e < *P*b 。显然，误 码量可类比车辆损坏的数量，误信量可类比货物破损的吨数。

(- 57 (-

画 说通信原理



误码量 =2 误信量 =2 误码量 =2 误信量 =4

1.12.4 结语

（1）数字通信系统用传输速率和频带利用率衡量其有效性，用差错率衡量其 可靠性。

（2）“通信原理”课程对模拟通信系统的定量分析内容，主要是计算系统的输 出信噪比和通频带；对数字通信系统则是计算系统的误码率 / 误信率和波特率 / 比 特率。

（3）因为被系统传输（处理）的信号和系统内外部的噪声都是随机信号，它 们的特性需要用随机过程描述，所以，随机过程的分析方法是计算信噪比和误码 率的主要理论工具。

1.12.5 问答



问 题 1

皮皮 谁能对码元的概念作一个总结？

蛋蛋 老师，我觉得可以从三方面理解码元。

（ 1 ）码元是一个脉冲波形，这是它的物理存在形式。比如：矩形、三角形、 钟形。

（2）码元是一个数据符号，这是它的理论研究形式。比如： 1 、0。

（3）码元是一个信息最小载体，这是它的存在价值。比如： 1 → 开灯，0 → 关灯。

皮皮 嗯，不错！挺准确。



问 题 2

皮皮 衡量一个数字 / 数据传输系统的传输能力（有效性）用波特率或比特 率为标准是很自然的事情。但是在计算机网络中，人们却常用“带宽”这个术语

第 1 章 通信的基本概念

来衡量网络的信息传输能力。比如，人们常常不说“高速网”而说“宽带网”，为 什么呀？

静静 我看过的一本书上好像说主要原因恐怕就是人们习惯于模拟通信中的 “带宽”概念，而它又可间接表示信道或系统传输数字信号的能力。同时，书上还 说，需要注意的是，尽管在计算机网络中使用“宽带网”或“窄带网”表示信息 传输能力，但它们言下之意的单位却不是赫兹（ Hz）而是比特 / 秒（bit/s）。

皮皮 对，是有这本书，我写的，哈哈 … …



问 题 3

壮壮 老师，为什么信号频率越高，携带的信息量就越大呢？

皮皮 频率越高，单位时间内的码元个数就越多，携带的信息量就越大。我 们用图 1-43 说明这个问题，懂了吗？

低频信号 高频信号

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | | | 0 | | |  |
|  | |  | | | | *t* |
|  | 0 |  | 0 |  | 0 | *t* |
| 1 | 1 | 1 |
|  | | | | | | *t* |
| *T* | | | | | | *t* |

图 1-43 高频信号携带信息量大的示意图

壮壮 懂了，老师。

第 ***1.13***讲 “通信原理”课程的主要内容是什么

前面讲过，“通信原理”课程的主要内容可用十个字概括，即调制、解调、编 码、译码、同步。围绕着“十字”主线，课程的主要内容见图 1-44。

(- 59 (-

画 说通信原理

|  |
| --- |
| 通信原理 |

分析

|  |
| --- |
| 模拟通信系统 |

|  |
| --- |
| 数字通信系统 |

 计算 

计算 

掌握

掌握

|  |
| --- |
| 系统指标 |

|  |
| --- |
| 关键技术 |

|  |
| --- |
| 系统指标 |

|  |
| --- |
| 关键技术 |



|  |
| --- |
| 调制与解调 |

|  |
| --- |
| 基带传输 |

|  |
| --- |
| 系统通频带 |

|  |
| --- |
| 系统波特率 |

|  |
| --- |
| 系统误码率 |

|  |
| --- |
| 同步 |

|  |
| --- |
| 编码与译码 |

|  |
| --- |
| 系统信噪比 |

|  |
| --- |
| 最佳接收 |

|  |
| --- |
| 调制与解调 |

|  |
| --- |
| 基带传输 |

|  |
| --- |
| 同步 |

|  |
| --- |
| 模数转换 |

|  |
| --- |
| 以信号与系统知识、概率论、随机过程为理论基础和分析工具 |

图 1-44 通信原理课程主要内容示意图

随着计算机技术、网络技术及微电子技术的飞速发展，单纯的模拟和数字通 信应用已经很少见到了，而基于计算机网络的数据通信技术已经成为当前通信领 域的霸主。依我管见，上述经典通信原理的“十字”内容恐怕要再加上“协议”二 字，才能完整地代表当前通信技术的全部主干知识。这样，新时期的通信原理课程 内容用“调制、解调、编码、译码、同步、协议”十二字表述才更为准确和全面。

有 效 性

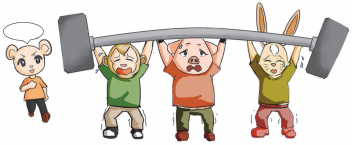
可 靠 性

模拟和数字通信系统

调制 / 调解 编码 / 译码 同步

有 效 性

可 靠 性

加上我！

数据通信系统

编码 / 译码 同步

调制 / 调解

协议

为此，我们专门在第 4 章介绍数据通信知识，以期大家可以通过本书的学习 全面了解或掌握当前主流通信技术及相关理论基础知识。

(r- 60 (-