

通信原理

第二章 信道与噪声

电信学院通信工程系
杨絮

← 上一页 下一页 →

目的要求

- 理解信道的基本概念，知道信道的分类及信道模型。
- 知道噪声的分类和常见加性噪声，并了解噪声在生活中的应用。
- 会计算信道容量及信道带宽。

授课内容

- **2.1 信号与调制解调** →
- **2.2 信道** →
- **2.3 噪声** →
- **2.4 信道容量**

2.1 信号与调制解调

- **2.1.1 信号的频谱**
- **2.1.2 信号的带宽**
- **2.1.3 调制解调的基本原理**

[返回目录](#)

2.1.1 信号的频谱

- 通信原理中有一个很重要的基本概念就是信号的频谱。
- 通常，我们习惯于在时间域(简称时域)考虑问题，研究函数(信号)幅度(因变量)与时间(自变量)的关系。而在通信领域我们常常需要了解信号幅度和相位与频率(自变量)之间的关系。也就是说，要在频率域(简称频域)中研究信号。
- 这里需要声明一点，我们一般谈论信号频率的时候，多是指信号单位时间变化的次数 f 。而在频域研究中，多以角频率 ω 为自变量，由于两者在数值上只差一个常数 2π ，因此在后续的讨论中，为方便起见，我们一般不再严格区分频率和角频率。

5

2.1.1 信号的频谱

确知信号的频谱为其傅氏变换：

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad \text{或} \quad X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

$$\text{傅氏反变换: } x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad \text{或} \quad x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df$$

随机信号的频谱常用其功率谱密度表示：

$$P_x(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X_T(\omega)|^2}{T}$$

功率谱密度与信号平均功率的关系：

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} P_x(\omega) d\omega$$

返回

2.1.1 信号的频谱

表 2-1 常用傅里叶变换对

序号	$f(t)$	$F(\omega)$	名称和性质
1	$\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n f_n(t)$	$\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n F_n(\omega)$	线性叠加
2	$f(t-t_0)$	$F(\omega)e^{-j\omega t_0}$	时延
3	$f(t)e^{j\omega_0 t}$	$F(\omega-\omega_0)$	频移
4	$f(at)$	$F(\omega/a)/ a $	比例
5	$F(f)$	$2\pi f(-\omega)$	对偶 (互易性)
6	$- \frac{d}{dt} f(t)$	$(j\omega) F(\omega)$	时域微分
7	$(-jt)^n f(t)$	$\frac{d^n F(\omega)}{d\omega^n}$	频域微分
8	$\delta(t)$	1	时域冲激函数
9	1	$2\pi\delta(\omega)$	频域冲击函数
10	$e^{j\omega_0 t}$	$2\pi\delta(\omega-\omega_0)$	频移冲击函数
11	$\text{sgn}(t)$	$2/(j\omega)$	时域符号函数
12	$j \frac{1}{\pi t}$	$\text{sgn}(\omega)$	频域符号函数

7

2.1.1 信号的频谱

表2-1续

序号	$f(t)$	$F(\omega)$	名称和性质
13	$u(t)$	$\pi\delta(\omega) + 1/(j\omega)$	单位阶跃函数
14	$\sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t}$	$2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \delta(\omega - n\omega_0)$	周期函数
15	$\text{rect}(t/\tau)$	$\tau \text{Sa}(\omega\tau/2)$	时域矩形函数
16	$\frac{W}{2\pi} \text{Sa}(Wt/2)$	$\text{rect}(\omega/W)$	频域矩形函数
17	$\text{tri}(t/\tau)$	$\tau \text{Sa}^2(\omega\tau/2)$	时域三角函数
18	$\cos\omega_0 t$	$\pi[\delta(\omega-\omega_0) + \delta(\omega+\omega_0)]$	连续余弦
19	$\sin\omega_0 t$	$\frac{\pi}{j}[\delta(\omega-\omega_0) - \delta(\omega+\omega_0)]$	连续正弦
20	e^{-at}	$\frac{2a}{a^2 + \omega^2}$	指数衰减
21	$\frac{e^{-t^2}}{2\sigma^3}$	$\sigma\sqrt{2\pi} e^{-\frac{\omega^2}{2\sigma^2}}$	钟形函数
22	$u(t)e^{-at}$	$\frac{1}{a + j\omega}$	单边衰减

8

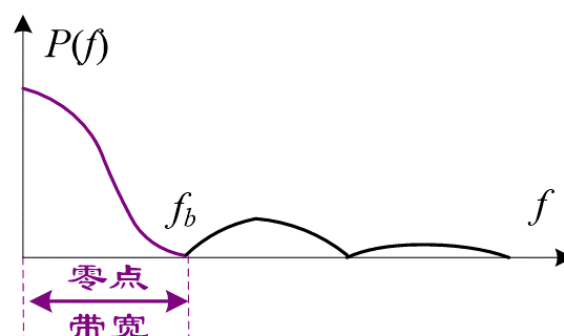
2.1.2 信号的带宽

- 信号带宽是信号频谱的宽度，也就是信号的最高频率分量与最低频率分量之差。实际上，带宽是衡量信号频带宽度的一个量，它表示我们通过测量仪器可以感受到的频率范围，也就是说，一个信号在频域看上去有多宽。

2.1.2 信号的带宽

● 1、零点带宽

数据信号频谱主要能量是集中在第一个零点之内的（主瓣），当其旁瓣不足以引起信号失真时，定义 f_b 为信号的零点带宽。



2.1.2 信号的带宽

● 2、百分比带宽

百分比带宽由下式来定义：

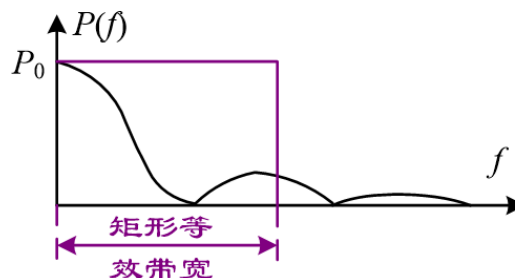
$$\frac{\int_0^{f_r} P(f) df}{\int_0^{+\infty} P(f) df} = \gamma \%$$

其中 f_r 称为百分比带宽，可以取**96%**、**98%**、**99%**等值，其含义是，在该带宽范围内信号的功率占总功率的比例

2.1.2 信号的带宽

● 3、矩形等效带宽

对于具有在零点或中心频率处取最大值频谱结构的信号，如下图所示，可以定义矩形等效带宽 B_C 。



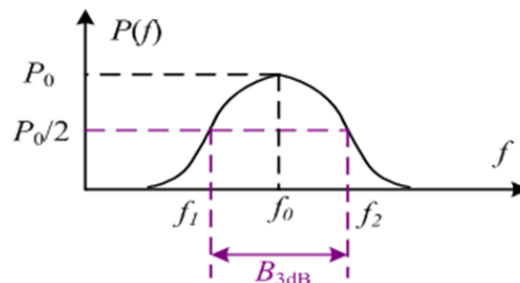
其含义为：

$$P_0 B_C = \int_0^{+\infty} P(f) df$$

2.1.2 信号的带宽

● 4、3dB带宽

3dB带宽又称半功率带宽，如下图所示：



信号频谱在 f_0 处取最大值，

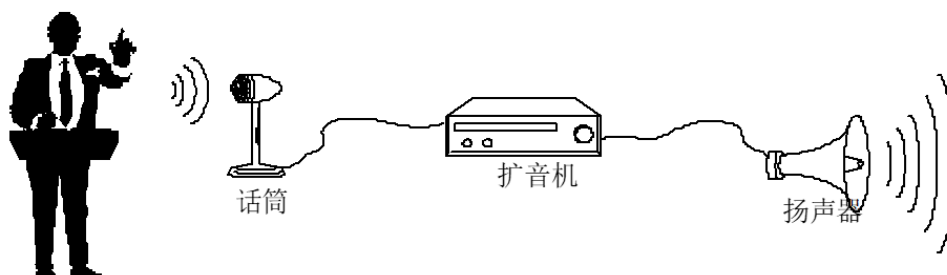
$$f_0 \in (f_1, f_2) \text{ 且 } P(f_1) = P(f_2) = P(f_0)/2$$

返回

2.1.3 调制解调的基本概念

调制是通信原理中一个十分重要的概念，是一种信号处理技术。无论在模拟通信、数字通信还是数据通信中都扮演着重要角色。

那么为什么要对信号进行调制处理？什么是调制呢？我们先看看下面的例子。



扩音示意图

2.1.3 调制解调的基本概念

我们知道，通信的目的是为了把信息向远处传递（传播），那么在传播人声时，我们可以用话筒把人声变成电信号，通过扩音机放大后再用喇叭（扬声器）播放出去。由于喇叭的功率比人嗓大得多，因此声音可以传得比较远（见上页扩音示意图）。但如果我们还想将声音再传得更远一些，比如几十千米、几百千米，那该怎么办？大家自然会想到用电缆或无线电进行传输，但会出现两个问题，一是铺设一条几十千米甚至上百千米的电缆只传一路声音信号，其传输成本之高、线路利用率之低，人们是无法接受的；

15

● 2.1.3 调制解调的基本概念

二是利用无线电通信时，需满足一个基本条件，即欲发射信号的波长（两个相邻波峰或波谷之间的距离）必须能与发射天线的几何尺寸可比拟，该信号才能通过天线有效地发射出去（通常认为天线尺寸应大于波长的十分之一）。而音频信号的频率范围是300Hz~3400Hz，最小的波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 10^3} = 7.5 \times 10^4 (m)$$

式中， λ 为波长（m）； c 为电磁波传播速度（光速）（m/s）； f 为音频（Hz）。

16

2.1.3 调制解调的基本概念

可见，要将音频信号直接用天线发射出去，其天线几何尺寸即便按波长的百分之一（ $75000\text{m}/100=750\text{m}$ ）取也要750米高（不包括天线底座或塔座）。因此，要想把音频信号通过可接受的天线尺寸发射出去，就需要想办法提高欲发射信号的频率（频率越高波长越短）。

17

2.1.3 调制解调的基本概念

- 第一个问题的解决方法是在一个物理信道中对多路信号进行频分复用（FDM, Frequency Division Multiplex）；第二个问题的解决方法是把欲发射的低频信号“搬”到高频载波上去（或者说把低频信号“变”成高频信号）。两个方法有一个共同点就是要对信号进行调制处理。
- 对于调制，我们给出一个概括性的定义：让载波的某个参数（或几个）随调制信号（原始信号）的变化而变化的过程或方式称为调制。而载波通常是一种用来搭载原始信号（信息）的高频信号，它本身不含有任何有用信息。

18

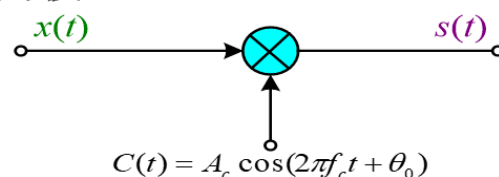
2.1.3 调制解调的基本概念

● 一、调制的定义：

- (1) 时域定义：调制就是用基带信号去控制载波信号的某个或几个参量的变化，将信息荷载在其上形成已调信号传输，而解调是调制的反过程，通过具体的方法从已调信号的参量变化中将恢复原始的基带信号。
- (2) 频域定义：调制就是将基带信号的频谱搬移到信道通带中或者其中的某个频段上的过程，而解调是将信道中来的频带信号恢复为基带信号的反过程。

2.1.3 调制解调的基本概念

● 二、调制器的模型



$x(t)$ 调制信号，即数据终端产生的基带信号

$C(t)$ 是载波， A_c 是载波幅度， f_c 是载波频率简称载频， θ_0 是载波的初始相位。

$s(t)$ 是已调信号，即调制后的频带信号，其中包含了 $x(t)$ 的全部信息，信道中传输的就是该信号。

$$s(t) = A_c x(t) \cos(2\pi f_c t + \theta_0)$$

2.1.3 调制解调的基本概念

三、调制的功能：

1. 频率变换

把低频信号变换成高频信号以利于无线发送或在信道中传输。关于无线发送前面已经讲过, 在信道中传输主要指有线通信中的高频对称电缆要求传输信号的频率为12~252kHz, 显然, 频率为0.3~3.4kHz的话音信号(考虑保护带, 通常将带宽定义为4kHz)不能直接在其中传输, 必须经过调制。

21

2.1.3 调制解调的基本概念

三、调制的功能：

2. 信道复用

信号必须通过信道才能传输, 而每一种物理信道的频率特性一般都比所传的基带信号带宽要大很多(如同轴电缆的带宽约为0~400MHz, 若只传送一路普通语音信号, 则显得非常浪费!), 但若对信号不加处理, 直接传输多路语音信号又会造成相互干扰, 致使接收端无法分清各路信号, 因此必须用调制技术使得多路信号在同一个信道中同时传输, 以实现信道多路复用。

22

2.1.3 调制解调的基本概念

三、调制的功能：

3. 改善系统性能

从香农公式中可知，当一个通信系统的信道容量一定时，其信道带宽和信噪比可以互换，即为了某种需要可以降低信噪比而提高带宽，也可以降低带宽而提高信噪比。这种互换可以通过不同的调制方式来实现。比如当信噪比较低时，可选择宽带调频方式增加信号的带宽以提高系统的抗干扰能力（提高信息传输的可靠性）。

23

2.1.3 调制解调的基本概念

四、调制的分类

（1）按照调制信号的类型：

模拟调制：一般指调制信号和载波都是连续波的调制方式。它有调幅、调频和调相三种基本形式。

数字调制：一般指调制信号是离散的，而载波是连续波的调制方式。它有四种基本形式：振幅键控、移频键控、移相键控和差分移相键控。

2.1.3 调制解调的基本概念

四、调制的分类

(2) 按照载波类型：

连续载波调制：载波是连续波形信号，例如正弦高频信号

脉冲载波调制：载波是脉冲序列，常用的是矩形脉冲序列

(3) 按照调制器功能：

幅度调制：调制信号控制载波幅度变化，例如AM、ASK等

频率调制：调制信号控制载波瞬时频率变化，例如FM、FSK等

相位调制：调制信号控制载波瞬时相位变化，例如PM、PSK等。

2.1.3 调制解调的基本概念

● 五、解调方式

(1) 相干解调

通过本地相干载波进行相干运算，从已调信号的相位变化中恢复原始信号的方法。

(2) 非相干解调

其原理是从已调信号的幅度变化中提取调制信号，因为其不需要同步载波，所以又称之为非同步解调。

2.2 信道

- 2.2.1 信道定义
- 2.2.2 信道分类
- 2.2.3 信道模型

[返回目录](#)

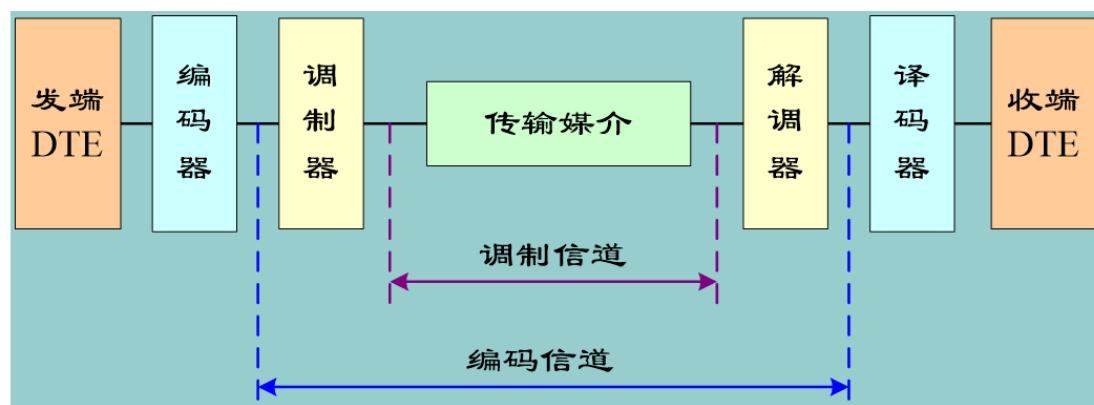
2.2.1 传输信道的定义及分类

- **信道**的定义：信道，通俗地说，是指以传输媒质为基础的信号通路。具体地说，信道是指由有线或无线电路提供的信号通路。信道的作用是传输信号，它提供一段频带让信号通过，同时又给信号加以限制和损害。

2.2.1 传输信道的定义及分类

- 信道可以分为狭义信道和广义信道两种。
- 1、狭义信道
狭义信道是指在发端设备和收端设备中间的传输媒介，它包括有线信道和无线信道。
- 2、广义信道
广义信道通常也可分成两种，调制信道和编码信道。如下图所示。

2.2.2 传输信道的模型



调制信道与编码信道示意图

2.2.2 传输信道的模型

● (1) 调制信道模型

调制信道的范围是从调制器输出端到解调器输入端。通常它具有如下性质：

- ①有一对(或多对)输入端和一对(或多对)输出端；
- ②绝大部分信道都是线性的，即满足叠加原理；
- ③信号通过信道会出现迟延时间；
- ④信道对信号有损耗它包括固定损耗或时变损耗；
- ⑤即使没有信号输入，在信道的输出端仍可能有一定的功率输出（噪声）。

2.2.2 传输信道的模型

对于二对端的信道模型来说，其输出与输入之间的关系式可表示成：

$$e_0(t) = f[e_i(t)] + n(t)$$

将上式进一步简化可以写成：

$$e_0(t) = k(t) \cdot e_i(t) + n(t)$$

这样信道对信号的影响可归纳为两点：一是乘性干扰 $k(t)$ ，二是加性干扰 $n(t)$ 。

不同特性的信道，仅反映信道模型有不同的 $k(t)$ 及 $n(t)$ 。

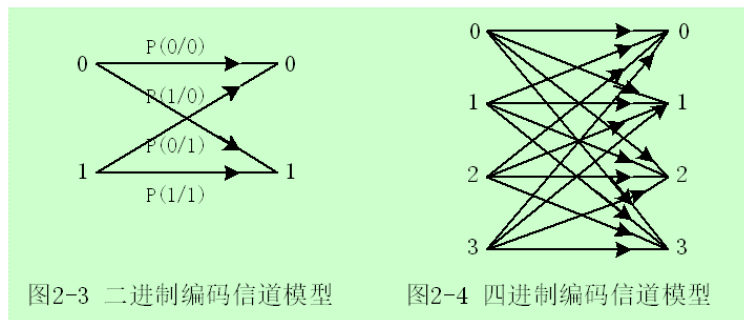
根据信道中 $k(t)$ 的特性不同，可以将信道分为：恒参信道和变参信道。

2.2.2 传输信道的模型

● (2) 编码信道模型

从编码器输出端到译码器输入端的所有转换器及传输媒质可用一个完成数字序列变换的方框加以概括，此方框称为编码信道。

编码信道的模型可用数字信号的转移概率来描述。



2.2.2 传输信道的模型

模型中，把 $P(0/0)$ 、 $P(1/0)$ 、 $P(0/1)$ 、 $P(1/1)$ 称为信道转移概率。以 $P(1/0)$ 为例，其含义是“经信道传输，把0转移为1的概率”。

转移概率由编码信道的特性决定，一个特定的编码信道就会有相应确定的转移概率。

编码信道可进一步分为无记忆编码信道和有记忆编码信道。

2.3 噪声

- 2.3.1 噪声分类
- 2.3.2 常见加性噪声

[返回目录](#)

2.3 信道噪声

- 噪声是我们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高频度术语。但通信领域中所谓的噪声不同于我们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等)，它其实是一种不携带有用信息的电信号，是对有用信号以外的一切信号的统称。概括地讲，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，一种信号在某种场合是有用信号，而在另一种场合就有可能是噪声。

2.3.1 噪声分类

一、若根据噪声的来源进行分类，一般可以分为三类。

(1) 人为噪声。

人为噪声是指人类活动所产生的对通信造成干扰的各种噪声。其中包括工业噪声和无线电噪声。工业噪声来源于各种电气设备，如开关接触噪声、工业的点火辐射及荧光灯干扰等。无线电噪声来源于各种无线电发射机，如外台干扰、宽带干扰等。

(2) 自然噪声。

自然噪声是指自然界存在的各种电磁波源所产生的噪声。如雷电、磁暴、太阳黑子、银河系噪声、宇宙射线等。可以说整个宇宙空间都是产生自然噪声的来源。

37

2.3.1 噪声分类

(3) 内部噪声。

内部噪声是指通信设备本身产生的各种噪声。它来源于通信设备的各种电子器件、传输线、天线等。如电阻一类的导体中自由电子的热运动产生的热噪声、电子管中电子的起伏发射或晶体管中载流子的起伏变化产生的散弹噪声等。

38

2.3.1 噪声分类

二、如果根据噪声的波形是否可以预测，噪声可以分为可预测噪声和随机噪声。

(1) 可预测噪声：电源哼声，自激振荡，各种内部的谐波干扰等等，虽然消除这些噪声不一定很容易，但至少可以在原理上消除或基本消除。

(2) 随机噪声：不能准确预测其波形。

39

2.3.1 噪声分类

三、如果根据噪声的性质分类，噪声可以分为单频噪声、脉冲噪声和起伏噪声。这三种噪声都是随机噪声。

(1) 单频噪声。

单频噪声一种连续波干扰，它可视为一个已调正弦波，但其幅度、频率或相位是事先不能预知的。单频噪声的特点是占有极窄的频带，但在频率轴上的位置可以实测。因此，单频噪声并不是在所有通信系统中都存在，而且可以通过合理设计系统来避免单频噪声的干扰。

40

2.3.1 噪声分类

(2) 脉冲噪声。

脉冲噪声是在时间上无规则的突发脉冲波形。包括工业干扰中的电火花、汽车点火噪声、雷电等。脉冲噪声的特点是以突发脉冲形式出现、干扰持续时间短、脉冲幅度大、周期是随机的且相邻突发脉冲之间有较长的安静时间。由于脉冲很窄，所以其频谱很宽。但是随着频率的提高，频谱强度逐渐减弱。可以通过选择合适的工作频率、远离脉冲源等措施减小和避免脉冲噪声的干扰。

(3) 起伏噪声。

起伏噪声是一种连续波随机噪声，包括热噪声、散弹噪声和宇宙噪声。对其特性的表征可以采用随机过程的分析方法。起伏噪声的特点是具有很宽的频带，并且始终存在，它是影响通信系统性能的主要因素。在以后各章分析通信系统抗噪声性能时，都是以起伏噪声为重点。

41

2.3.1 噪声分类

- 四、根据噪声在信道中的表现形式，通常分为加性噪声和乘性噪声两类。比如，对于一个实际信道，若设信道输入信号为 $v_i(t)$ ，输出信号为 $v_o(t)$ ，则信道输入与输出的关系可用下式描述

$$\square \quad v_o(t) = f[v_i(t)] + n(t) \quad (2-1)$$

- 式中， $f[v_i(t)]$ 表示信道对输入信号的变换作用(或影响)，或者说是输入信号 $v_i(t)$ 通过信道发生变化后的波形。

“ f ”表示某种变换(函数)关系。为讨论方便，假设 $f[v_i(t)]$ 可表示为 $k(t)v_i(t)$ ，则式(2-1)就变成

$$v_o(t) = k(t)v_i(t) + n(t)$$

42

2.3.1 噪声分类

- 式中， $k(t)$ 和 $n(t)$ 都表示一种信道噪声，由于 $k(t)$ 与 $v_i(t)$ 相乘，所以叫做乘性噪声， $n(t)$ 与 $v_i(t)$ 是相加的关系，因此称为加性噪声。这样我们就把不同信道对信号的干扰抽象为乘性和加性两种。从抗干扰的角度上讲，所谓信道不同，其实质就是 $n(t)$ 和 $v_i(t)$ 的不同。如果从信号传输的角度上看，不同的信道，其实质就是传输方式(有线或无线)的不同、传输损耗的不同和频响特性的不同。

43

2.3.1 噪声分类

- 乘性噪声(干扰)一般是一个复杂的函数，常常包括各种线性畸变、非线性畸变、交调畸变和衰落畸变等，通常只能用随机过程进行描述。
- 加性噪声包括上述的人为噪声、自然噪声和内部噪声，是信道噪声的主要研究内容。抗干扰是通信系统所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)。

44

2.3.2 常见加性噪声

- 通信中的常见噪声

- 1、白噪声

定义：白噪声是指它的功率谱密度函数在整个频域内是常数，即服从均匀分布。

白噪声的功率谱密度函数为：

双边谱密度：
$$P_n(\omega) = \frac{n_o}{2} \quad (-\infty < \omega < +\infty)$$

单边谱密度：
$$P_n(\omega) = n_o \quad (0 < \omega < +\infty)$$

2.3.2 常见加性噪声

- 2、高斯噪声

定义：高斯噪声是指它的概率密度函数服从高斯分布（即正态分布）的一类噪声。其一维概率密度函数可用数学表达式表示为：

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right]$$

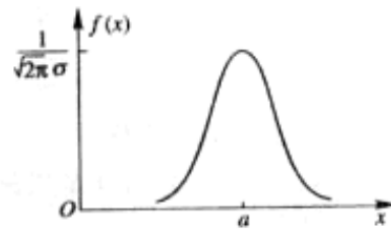
a 为噪声的数学期望值，也就是均值； σ^2 为噪声的方差。

2.3.2 常见加性噪声

正态分布

● 如下特征：

● a. $f(x)$ 对称于 $x=a$ 这条直线。



正态分布的概率密度

● b. $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$ $\int_{-\infty}^a f(x)dx = \int_a^{\infty} f(x)dx = \frac{1}{2}$

● c. a 表示分布中心， σ 表示集中程度， $f(x)$ 图形将随着 σ 的减小而变高和变窄。当 $a=0$, $\sigma=1$ 时，称为标准正态分布的密度函数。

47

2.3.2 常见加性噪声

● 3、高斯型白噪声

定义：高斯型白噪声也称高斯白噪声，是指噪声的概率密度函数满足正态分布统计特性，同时它的功率谱密度函数是常数的一类噪声。

信道的噪声常假设的此类型。主要原因是它有具体的数学表达式，便于推导分析和计算；较准确地反应信道噪声的特性。

2.3.2 常见加性噪声

4、窄带高斯白噪声

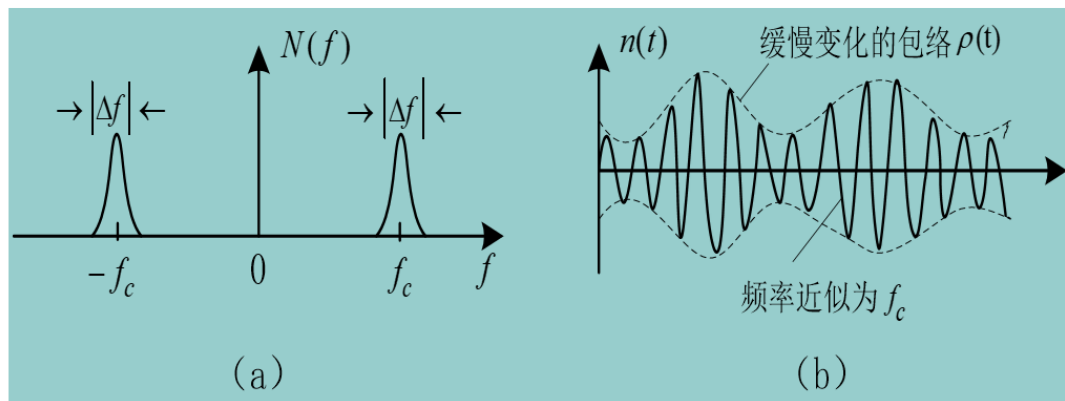
定义：当高斯噪声通过以 ω_c 为中心角频率的窄带系统时，就可形成窄带高斯噪声。其频谱局限在 ω_c 附近很窄的频率范围内，其包络和相位都在作缓慢随机变化。见下所示：

2.3.2 常见加性噪声

窄带高斯噪声可表示为：

$$n(t) = \rho(t) \cos[\omega_c t + \varphi(t)]$$

式中， $\rho(t)$ 为噪声的随机包络； $\varphi(t)$ 为噪声的随机相位，相对于载波的变化而言，它们的变化要缓慢的多。



2.4 信道容量

- **信道容量**是指信道在单位时间内所能传送的最大信息量，即指信道的最大传信率，记为**C**。单位是每秒多少比特。

也许有人会问，信道容量是用比特率来衡量的，也就是说，是针对数字信道而言的，而模拟信道没有比特率的概念，如何衡量信道容量？其实，不光是模拟信道的容量，包括模拟信息的信息量在内都是基于离散(数字)信息理论或分析方法得出的。其要旨就是，模拟信号可以通过抽样定理变为离散(数字)信号。

2.4 信道容量

- 1、模拟信道的信道容量

模拟信道的信道容量是可以根据香农定理来计算。香农定理指出：在信号平均功率受限的加性高斯白噪声信道中，信道的极限信息传输速率即信道容量。

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) (b/s)$$

其中**C**为信道容量，**B**为带宽，单位是**Hz**，**S/N**为信噪功率比。

2.4 信道容量

□ 对于一个给定的有扰信道，如果信息源的信息发出速率小于或等于信道容量，即 $R \leq C$ ，则理论上存在一种方法可使信息以任意小的差错概率通过该信道传输。反之，若 $R > C$ ，则该信道将无法正确传递该信息。

若噪声 $n(t)$ 的单边功率谱密度为 n_0 ，则在信道带宽 B 内的噪声功率 $N = n_0 B$ 。因此，香农公式的另一形式为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \quad (b/s)$$

53

2.4 信道容量

由香农公式可得以下结论：

(1) 增大信号功率 S 可以增加信道容量，若信号功率趋于无穷大，则信道容量也趋于无穷大，即

$$\lim_{S \rightarrow \infty} C = \lim_{S \rightarrow \infty} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \rightarrow \infty$$

(2) 减小噪声功率 N (或减小噪声功率谱密度 n_0) 可以增加信道容量，若噪声功率趋于零 (或噪声功率谱密度趋于零)，则信道容量趋于无穷大，即

$$\lim_{N \rightarrow 0} C = \lim_{N \rightarrow 0} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \rightarrow \infty$$

54

2.4 信道容量

(3) 增大信道带宽**B**可以增加信道容量，但不能使信道容量无限制增大。信道带宽**B**趋于无穷大时，信道容量的极限值为

$$\begin{aligned}\lim_{B \rightarrow \infty} C &= \lim_{B \rightarrow \infty} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) = \frac{S}{n_0} \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{n_0 B}{S} \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \\ &= \frac{S}{n_0} \log_2 e \approx 1.44 \frac{S}{n_0}\end{aligned}$$

(4) 若传输速率小于信道容量，则理论上可以实现无差错传输。若传输率大于信道容量，则不可能实现无差错传输。

55

2.4 信道容量

香农公式给出了通信系统所能达到的极限信息传输速率，达到极限信息速率的通信系统称为理想通信系统。但是，香农公式只证明了理想通信系统的“存在性”，却没有指出这种通信系统的实现方法。因此，理想通信系统的实现还需要我们不断努力。

56

2.4 信道容量

由香农公式 $C = B \log_2(1 + \frac{S}{N})$ 可以看出：对于一定的信道容量**C**来说，信道带宽**B**、信号噪声功率比**S/N**及传输时间三者之间可以互相转换。若增加信道带宽，可以换来信号噪声功率比的降低，反之亦然。如果信号噪声功率比不变，那么增加信道带宽可以换取传输时间的减少，等等。如果信道容量**C**给定，互换前的带宽和信号噪声功率比分别为**B₁**和**S₁/N₁**，互换后的带宽和信号噪声功率比分别为**B₂**和**S₂/N₂**，则有 $B_1 \log_2(1 + S_1/N_1) = B_2 \log_2(1 + S_2/N_2)$

57

2.4 信道容量

由于信道的噪声单边功率谱密度**n₀**往往是给定的，所以上式也可写成

$$B_1 \log_2(1 + \frac{S_1}{n_0 B_1}) = B_2 \log_2(1 + \frac{S_2}{n_0 B_2})$$

例如：设互换前信道带宽**B₁=3kHz**，希望传输的信息速率为**10⁴b/s**。为了保证这些信息能够无误地通过信道，则要求信道容量至少要**10⁴b/s**才行。

互换前，在**3kHz**带宽情况下，使得信息传输速率达到**10⁴ b/s**，要求信噪比**S₁/N₁≈ 9**倍。如果将带宽进行互换，设互换后的信道带宽**B₂=10kHz**。这时，信息传输速率仍为**10⁴ b/s**，则所需要的信噪比**S₂/N₂= 1**倍。

58

2.4 信道容量

可见，信道带宽**B**的变化可使输出信噪功率比也变化，而保持信息传输速率不变。这种信噪比和带宽的互换性在通信工程中有很大的用处。例如，在宇宙飞船与地面的通信中，飞船上的发射功率不可能做得很大，因此可用增大带宽的方法来换取对信噪比要求的降低。相反，如果信道频带比较紧张，如有线载波电话信道，这时主要考虑频带利用率，可用提高信号功率来增加信噪比，或采用多进制的方法来换取较窄的频带。

59

2.4 信道容量

- 在实际应用中，一般并不用 S/N 直接来表示信噪比，而是对它取对数变成分贝值，即用公式 $10\lg S/N$ 计算。比如， $S/N=10$ 时，分贝数为10； S/N 为100的分贝数是20；30dB对应的 S/N 为1000。典型的模拟电话系统信噪比为30dB ($S/N=1000$)，带宽 $B=3000\text{Hz}$ ，根据香农公式可得它的信道容量约为 30kb/s 。这个值是理论上限，实际的信息(数据)传输速率都要低于 30kb/s 。

60

2.4 信道容量

- 例2-1 某计算机网络通过同轴电缆相互连接，已知同轴电缆每个信道带宽为8MHz，信道输出信噪比为30dB，试求计算机无误码传输的最高信息速率为多少？

解：

$$10\log_{10} \frac{S}{N} = 30 \quad \frac{S}{N} = 1000$$

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right) = 8 \times 10^6 \times \log_2 (1 + 1000) = 79.69 \text{ Mb/s}$$

61

2.4 信道容量

- 例2-2 已知仅存在加性高斯白噪声的信道容量为33.6kbit/s，其信号噪声功率比为30dB，求此模拟信道的带宽为多少？

- 解： $10\lg(S/N) = 30\text{dB}$ $S/N = 10^3 = 1000$

$$C = B \log_2 (1 + S/N) = B \log_2 (1001) = 33.6 \text{ kbit/s}$$

$$B = 33.6 / \log_2 1001 = 3.37 \text{ kHz} = 3371 \text{ Hz}$$

若一帧电视图像的信息量为960000bit，电视的帧频为30Hz，为使接收端能收到良好的图像，要求信道的信噪比 $S/N=30\text{dB}$ ，求信道的带宽 B 。

2.4 信道容量

例2-4 电视图像大致由300000个小像元组成，每一像元取16个可辨别的亮度电平，假设16个亮度电平独立等概出现，每秒发送30帧图象，且要求信噪比为1000，计算传输上述信号所需的最小带宽。

2.4 信道容量

● 2、数字信道的信道容量

典型的数字信道是平稳、对称、无记忆的离散信道，它可以用二进制或多进制传输

离散——是指信道内传输的信号是离散的数字信号

对称——是指任何码元正确传输和错误传输的概率与其他码元一样

平稳——是指对任何码元来说，错误概率的取值都是相同的

无记忆——是指接收到的第*i*个码元仅与发送的第*i*个码元有关，而与第*i*个码元以前的发送码元无关

2.4 信道容量

根据奈奎斯特准则，带宽为**B**的信道所能传送的信号最高码元速率为**2B**波特。因此，无噪声数字信道容量为

$$C = 2B \log_2 M \text{ (bit/s)}$$

其中**M**为传输时数据信号的取值状态，也就是进制数

2.4 信道容量

- 例2-5 假设一个传四进制数字信号的无噪声数字信道，带宽为**3000Hz**，求其信道容量
- 解： $C=2B\log_2 M$
 $=2 \times 3000 \times \log_2 4$
 $=12000 \text{ (bit/s)}$

返回