

本笔记概述

- 参考往年（2019~2022）的保研面试题，总结常见的（一般老师问到的都是比较重要的）知识点；以这些知识点为基础，较为完整地整理了通信原理这门学科的知识体系。
- 本笔记不单针对保研面试，科研上的查缺补漏，考研，毕业找工作面试都很适用。当然为了保证笔记知识体系的完整性，笔记的内容要多于问题中涉及到的知识点。所以临时抱佛脚的同学可以直接怼着问题看，这些问题的答案都能在笔记中找到。
- 本笔记不涉及某些结论的公式推导（除非非常重要的结论），如果想要深入了解一些结论，可以去参考一些通信原理的教材（当你看到这句话的时候，我应该已经把电子书分享给你了哈~）

1 通信基本知识

1.0 问题

模拟通信和数字通信的优缺点

们衡量一个通信系统的好坏主要用哪些指标？

通信系统的基本组成

给了一道题，根据上面的要求设计一个数字系统，简略说下思路就可以，然后老师会再根据你回答的追问几个点。

1.1 信息

信息：描事物运动状态或存在方式的不确定性。消息之所以含有信息，正是因为它具有不确定性。信息既不是物质，也不是能量，是物质或能量的状态的描述。（物理本质）

我们的**通信**就是信息的传递；**电信**就是利用电信号传输信息；而**消息**是信息的表现形式，例如天气情况可以用图片，文字来描述；**信号**是消息的载体，图片通过电信号传输，就需要把图片上的信息转化为电信号

信息的度量：信息是描述事情的不确定性，直观上：

1：事情发生的概率越大，不确定性越低，信息量应该越低，所以信息量与事情发生的概率成反比；

2：俩个不相关的事件 x 和 y ，那么我们观察到的俩个事件同时发生时获得的信息应该等于观察到的事件各自发生时获得的信息之和，即： $h(x, y) = h(x) + h(y)$ ；由于 x, y 是俩个不相关的事件，那么同时发生的概率 $p(x, y)$ 等于各自概率的乘积 $p(x) * p(y)$ 。因此信息量和对数有关；

因此定义：事件发生概率的倒数的对数 $\log_a \frac{1}{p(x)} = -\log_a p(x)$

信息熵：对于一个随机变量 X ， X 不同的取值对应不同的概率。想要知道这个随机变量 X 信息量的平均值就得对

信息量求期望，因此定义信息熵 $H(X) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log p(x_i)$

信息量度量的是一个具体事件发生了所带来的信息，而熵则是在结果出来之前对可能产生的信息量的期望——考虑该随机变量的所有可能取值，即所有可能发生事件所带来的信息量的期望。

1.2 通信的一般模型:

1.2.1 通信系统模型

信源: 需要将消息转化为原始电信号

发射机: 通信系统的起点, 它将信息通过编码 加密 ,调制 后转换成适合于在通信信道上传输。

通信信道: 通信信道是信息从发射机传输到接收机的媒介。它可以是有线或无线介质, 如光纤电缆、同轴电缆、无线电波或卫星链路。

接收机: 接收机是通信系统的端点, 对接收到的信号进行解调, 恢复原始信息。接收器放大接收到的信号, 并消除传输过程中引入的任何噪声或失真。

噪声源: 噪声是干扰信息传输和接收的无用信号。噪音可能是由自然现象如大气干扰引起的, 也可能是由人造源如电子设备引起的 (一般噪声是来自接收机端的热噪声, 是由分子热运动造成, 满足高斯分布)。

反馈: 反馈是将部分输出信号反馈给系统的输入以提高其性能的过程。反馈可以是正的, 也可以是负的, 用来调整系统参数以保持稳定运行。

终端设备: 终端设备用于与通信系统连接, 它可以包括电话、传真机、调制解调器、路由器和交换机等设备。

1.2.2 通信方式:

单工: 消息只能单方向传输;

半双工: 双方都能收发消息, 但是不能同时;

全双工: 双方可以同时收发消息;

串行: 码元一个接一个地在一条信道上传输;

并行: 包含信息的码元序列在并行信道上同时传输。

上行: 用户像基站发送信息;

下行: 基站向用户发送信息。

FDD(频分双工): 上下行使用不同的频段通信, 因此发射机和接收机可以同时相互通信; 这种技术常用于 4G LTE 和 5G 等蜂窝网络

TDD(时分双工): 上下行使用相同的频段通信, 但是使用不同的时隙 (比如前 5ms 传输上行数据, 下 5ms 传输下行数据), 因为时间非常短, 所以看起来好像是同时传输。 F

DD 或 TDD 的选择取决于各种因素, 包括无线系统的类型、带宽要求和成本。一般来说, FDD 优先用于需要大量带宽的高速数据传输应用, 而 TDD 优先用于数据速率较低、带宽要求较小的应用。

1.3 通信系统的主要性能指标

有效性: 关注的是通信系统的信息传输效率。传输一定信息所需的频谱带宽越小、时间越短, 有效性越好; 反之, 所需频谱带宽越大、时间越长, 有效性越差。 即**频带利用率**

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad R_B \text{ 为波特率即码元传输速率, 单位时间内传输码元的数目}$$

$$\eta = \frac{R_b}{B} \quad R_b \text{ 为比特率即信息比特的传输速率, } R_b = R_B \log_2 M$$

如果传输的信息相同, 传输时间也相同, 则有效性只与频谱带宽有关: 频谱带宽越窄, 有效性越好; 反之, 频谱带宽越宽, 有效性越差。因此可以认为有效性用带宽来衡量;

可靠性: 关注的是通信系统的信息传输质量。信息在传输过程中的失真越小, 可靠性越高; 反之, 失真越大, 可靠

性越低。

$$\text{误码率: } P_e = \frac{\text{error_Baud}}{\text{总码元数}} \quad \text{误信率: } P_e = \frac{\text{error_bit}}{\text{总比特数}}$$

误码率/误信率与信噪比有关，信噪比越高，错误率越低，因此可靠性用输出信噪比来衡量。信号带宽：信号频谱的宽度，也就是信号最高频率与最低频率分量之差。单一频率的正弦信号无频率分量，但是方波信号有很多频率分量。

1.4 模拟与数字信号

1.4.1 模拟信号与数字信号的区别

模拟信号和数字信号是两种基本的信号类型，它们之间的主要区别如下：

连续性和离散性

模拟信号是一种连续的信号，其数值可以在一定范围内任意取值，即使在很小的时间间隔内也存在无限多个可能的值。而数字信号则是一种离散的信号，其数值只能取有限的几个值，通过采样、量化和编码将连续信号转化为离散信号。

带宽和精度

模拟信号具有无限制的带宽和精度，可以表达非常细微的信号变化。而数字信号的带宽和精度受到采样率和量化精度的限制，无法表达模拟信号中非常细微的变化。

抗干扰能力

模拟信号容易受到外界干扰，如噪声、信号衰减等，抗干扰能力较差。而数字信号可以通过差错校验等方式检测和纠正传输中的错误，具有较强的抗干扰能力。

处理和传输

模拟信号需要经过一系列滤波、放大等处理才能得到可用的信号，传输距离受到信号衰减等因素的影响。而数字信号可以通过计算机等设备进行处理、存储和传输，传输距离相对较远且质量稳定。

总体来说，模拟信号具有精度高、响应速度快、稳定性好的优点，但抗干扰能力差，处理复杂；数字信号具有抗干扰能力强、可靠性高、处理方便的优点，但精度有限、响应速度较慢、传输距离受限。在实际应用中，应根据具体情况选择适合的信号类型。

1.4.2 模拟通信与数字通信的优缺点

模拟通信的优点

传输质量高：模拟信号是连续的，可以无限分辨率地表达各种细节和差异，传输质量较高。

响应速度快：模拟信号是连续的，信号处理速度快，响应速度较快。

传输距离远：模拟信号可以传输的距离较远，不受数字信号传输中遇到的一些问题（如时钟漂移、串扰等）的影响。

模拟通信的缺点：

抗干扰能力差：模拟信号容易受到外部环境（如电磁干扰、噪声等）的影响，抗干扰能力差。

可靠性差：模拟信号容易发生衰减、失真等问题，可靠性较差。

难以处理：模拟信号的处理较为复杂，需要使用各种电路和滤波器进行处理和调整。

数字通信的优点:

抗干扰能力强: 数字信号不容易受到外部环境的影响, 抗干扰能力较强。

可靠性高: 数字信号不容易发生衰减、失真等问题, 可靠性较高。

处理方便: 数字信号可以使用计算机进行处理和调整, 处理方便, 便于大规模集成。

数字通信的缺点:

传输质量有限: 数字信号是离散的, 不能无限分辨率地表达各种细节和差异, 传输质量有限。

响应速度慢: 数字信号是离散的, 信号处理速度慢, 响应速度较慢。

传输距离短: 数字信号传输的距离较短, 需要使用中继器等设备进行信号放大和延迟。

综上所述, 模拟通信和数字通信各有优缺点, 选择合适的通信方式需要根据具体情况进行综合考虑。

2 随机过程 (见数学笔记)

3 信道

3.0 本节的问题

什么是随参信道、恒参信道?

恒参信道是否会发生多径效应?

信道的含义?

说一下信道的一些知识?

AWGN 中 W 是什么意思?

什么是高斯信道?

什么是白噪声?

高斯加性白噪声的含义

关于噪声的概念

噪声和干扰的区别等。

什么是多径效应?

3.1 信道的概念与分类

信道就是信息传输的通道, 信息是通过电磁波传递的, 而电磁波可以在空间中传播 (无线信道), 也可以在光纤、电缆中传播 (有线)。另外根据参数的变化也可以分类为随参信道信道和恒参信道。

无线信道

天波: 利用电离层反射

地波: 无线电沿地表面传播

视线传播: 两天线直接对视传播

有线信道: 明线; 双绞线; 同轴电缆; 光纤

恒参信道: 信道的特性 (参数) 不随时间变化, 或者基本不随时间变化, 或者变化极慢。 有线信道: 明线、对称电缆和同轴电缆等;

光纤信道： 光纤信道是以光导纤维为传输媒质、以光波为载波的信道，具有极宽的通频带，能够提供极大的传输容量。光纤的特点是：损耗低、通频带宽、重量轻、不怕腐蚀以及不受电磁干扰等。

无线电视距中继信道： 中继站之间采用定向天线实现点对点的传输，并且距离较短，因此传输条件比较稳定，可以看作是恒参信道。这种系统具有传输容量大、发射功率小、通信可靠稳定等特点。

卫星中继信道： 同步卫星通信的电磁波直线传播，因此其信道传播性能稳定可靠、传输距离远、容量大、覆盖地域广。

随参信道： 信道参数随时间变化的信道，大部分无线信道都是随参信道。

3.2 信道中的噪声

噪声： 信道中存在的不需要的电信号

人为噪声： 由人类活动产生的噪声（家用电器等）；

自然噪声： 自然界中存在的各自噪声。典型的是热噪声（来自于电阻性器件中电子的热运动，满足高斯分布）；然后就是其他类型的噪声（大气噪声、宇宙噪声等）

白噪声： 噪声功率谱密度在所有频率上均匀分布。这里的白指的是可见范围内电磁辐射的所有频率分量相等。

高斯白噪声： 瞬时值服从高斯分布，而它的功率谱密度又是均匀分布的，则称它为高斯白噪声。

热噪声： 热噪声是由大量自由电子的运动产生的，其统计特性服从高斯分布，故常将热噪声称为高斯白噪声。

加性噪声： 噪声是叠加在信号上的， \therefore 称为加性噪声，可用差错控制编码（就是信道编码）消除。

通信系统中的噪声一般来自接收机的热噪声，因此噪声一般都是建模成高斯白噪声。

3.3 信道中的干扰

噪声可以算是一种干扰，但是干扰不一定由噪声引起；干扰可以包括很多方面，例如信道对信号的影响可以看作乘性干扰，可用均衡的方法消除；

3.4 无线通信中的衰落

电波传播方式

直射波： 从发射点经直线传播到达接受点，采用自由空间损耗模型；

大气折射： 原本直线前进的电磁波在穿越大气层时，因空气密度随高度变化而产生偏折；**绕射：** 电波传播途径中遇到障碍物时，电波会绕过障碍物向前传播；

反射波： 电波在不同性质的交界处，会有一部分反射；

散射波： 粗糙的表面会向所有方向散射电磁波

衰落信道： 无线信道是一种时变信道，信号在传播过程中会受到不同类型的损耗（即信号包络因传播有了起伏）

3.4.1 自由空间路径损耗：

即使发射机，接收机之间没有任何障碍，信号沿直线传播，电磁波也会以距离的平方衰减。这个有个著名的自由空间路径损耗公式（弗里斯传输公式）

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}$$

很显然 $d \rightarrow 0$ ，接收功率为 ∞ 在实际中是不可能的，因此需要对这个公式进行修正。具体修正步骤就不详细描述了，最后反正是又得到了一个常见的公式

$$P_r = P_t G_t G_r K \left[\frac{d_0}{d} \right]^\gamma \quad K = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d_0^2}$$

d_0 是天线远场的参考距离（室内是 1~10m，室外是 10~100m）， λ 是路径损耗指数 路径损耗写成 dB 形式比较方便（信道干扰一般都是乘性干扰，写成 dB 形式就变成了加性）

$$path_loss = \left[10 \log_{10} G_t G_r + 10 \log_{10} K - 10 \gamma \log_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right] \right] dB$$

3.4.2 阴影衰落：

信号遇到障碍物会使信号发生随机变化，从而造成给定距离处信号功率的随机变化。最常用的是用**对数正态阴影模型**来表征这种随机衰减（根据实测数据得到的结论，因为实际环境太过复杂，没有精确的数学推导）。对数正态分布：衰减值若以对数表示时，服从正态分布，然后直接加到路径损耗公式里就行。

$$PL = [path_loss + X_{sh}] dB$$

3.4.3 多径衰落

我个人理解的多径衰落包括时延扩展（即时间色散）造成的**频率选择性衰落**和**平坦衰落**；也包括频率扩展（频率色散）造成的**快衰落**和**慢衰落**，频率扩展是由多普勒效应造成的。如果大家有更好的理解请按大家的理解来，这个应该没有统一标准答案，有自己的想法就行。

对抗多径效应的方法： 信道均衡、MIMO 分集、OFDM（后面会介绍）

3.4.3.1 多径效应造成时延扩展

信号经过多条路径到达接收机；到达接收机的多径信号：**如果同相（相位差是 2π 的整数倍时），叠加后信号会增强**；**如果反相（相位差是 π 的奇数倍时），叠加后信号会减弱**。由此造成接收信号的幅度变化，这就是多径衰落。发射机和接收机之间没有稳定的信号 → 瑞利 离基站较近的位置存在稳定信号 → 莱斯分布

- (1) 时延扩展 delay spread 发射信号会经过多条路径到达接收机，若发送信号的持续时间为 T ，那么接收端收到的信号会扩展成 $T + \tau$ ，这个 τ 就是时延扩展。
- (2) 相关带宽 Coherence bandwidth 下面有个特例可以帮助大家理解相干带宽的来源。

$$\text{直射信号: } s_1 = A_1 \cos(2\pi f t) \quad \text{反射信号: } s_2 = A_2 \cos[2\pi f(t - \tau) + \pi]$$

合成信号： $s_1 + s_2 = A_1 \cos(2\pi f t) + A_2 \cos[2\pi f(t - \tau) + \pi]$ 经过积化和差、和差化积，合成信号的幅度

$$A = \sqrt{[A_2 \sin(2\pi f \tau)]^2 + [A_1 - A_2 \cos(2\pi f \tau)]^2} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1 A_2 \cos(2\pi f \tau)}$$

注意：公式里时延扩展 τ 是定值，和信道有关，因此也叫信道时延扩展。 f 是自变量，因此多径合成信号的幅度随着信号频率会发生变化。变化的周期为 $1/\tau$ 。

因此在 $\Delta f = \frac{1}{\tau}$ 的频率范围内，合成信号的幅度会经过一轮完整的变化（例如从波谷到波峰再到波谷）

因此将 $\Delta f = \frac{1}{\tau}$ 定义为相干带宽。

个人理解：以上只是简化版的描述，实际一个信号里包含多个频率成分。一开始发送的时候肯定各个成分都有着相同的幅度，但是经过多径合成，不同频率的信号幅度变化不一样。

因此又有了下面两个概念

频率选择性衰落：信号的带宽（一个信号可以由多个频率的谐波组成，而一个信号所包含谐波的最高频率与最低频率之差，即该信号所拥有的频率范围）远大于信道的相干带宽，信号中不同频率成分经多径传输后到达接收机时的幅度增益差别很大，这种衰落就是频率选择性衰落。

平坦衰落：信号的带宽 B 小于信道的相干带宽，这样信号中不同频率成分经多径传输后到达接收机时的幅度增益差别不大

3.4.3.1 多径效应造成频率扩展

多普勒效应指出，波在波源移向观察者时接收频率变高，而在波源远离观察者时接收频率变低。当观察者移动时也能得到同样的结论。

以下行链路（基站向用户发送信息）为例 当观察者（用户）走近波源（基站）时观察到的波源频率 频率变高 ；当观察者（用户）远离波源（基站）时观察到的波源 频率变低 。

(1) 多普勒频移 由多普勒效应造成的接收信号频率和发射信号频率之差被称为多普勒频移。

当移动台以速度 v 向着波源移动时，多普勒频移： $f_d = v / \lambda$

当移动台以速度 v 远离波源移动时，多普勒频移： $f_d = -v / \lambda$

越靠近频率越高，越远离频率越低。频率的偏移为 v / λ

注意是 向着波源的直线方向移动，如果不是的话

当移动台以速度 v 向着波源移动时，多普勒频移： $f_d = v \cos \theta / \lambda$

当移动台以速度 v 远离波源移动时，多普勒频移： $f_d = -v \cos \theta / \lambda$

越靠近频率越高，越远离频率越低。频率的偏移为 $v \cos \theta / \lambda$

(2) 多普勒扩展

由于多径传播，不同径的多普勒频移不同，造成了接收信号的频率扩展。即原本的频率 f 扩展为了

$[f - f_d, f + f_d]$ 假设频率扩展为 f_d ，和时延扩展类似，接收端的合成信号幅度是周期变化的，变化周期为

$1 / f_d$ 因此定义 $1 / f_d$ 为信道的相干时间，即 $T_c = 1 / f_d$

和信道的相干带宽造成的频率选择性衰落和平坦衰落类似，信道的相干时间引出了快衰落和慢衰落。

快衰落：符号持续时长远大于信道的相干时间，那么符号不同的频率成分在接收端的幅度变化大；

慢衰落：符号持续时长远小于信道的相干时间，那么符号不同的频率成分在接收端的幅度变化小；

3.4.4 总结各种衰落

小尺度衰落：特指多径效应造成的衰落，这是在小尺度区间内发生（极短的时间，例如数个或数十个波长）

大尺度衰落：路径损耗和阴影衰落

快衰落和慢衰落：由多径效应造成的频率扩展（多普勒扩展）引起

3.5 信道的数学模型

信道特性可以用几种数学方法来描述，包括：

频率响应：这描述了信道的幅值和相位响应作为频率的函数。它通常由信道的传递函数表示，并可用于确定信道的频率选择行为。

脉冲响应：这描述了通道对单时间脉冲信号的响应。脉冲响应函数可用于计算通道对任何输入信号的响应。

概率密度函数：描述信道对随机输入信号响应的分布。不同的概率密度函数可以用来描述不同类型的衰落，如瑞利衰落或瑞斯衰落。

信道状态方程和协方差矩阵：这些是使用随机过程理论描述信道特性的数学工具。信道状态方程是描述信道时间演化的时域模型，协方差矩阵用于描述不同信道状态变量之间的相关性。

4 模拟调制系统

4.0 问题

解释一下调制以及调制的意义

调幅的英文是？

调幅都包括什么？

根据调制问相干解调和非相干解调；

简述一下模拟调制的方式有哪些？

卡森公式

预加重、去加重？ 信

噪比的影响因素

4.1 调制的概念

调制的概念：把信号转化为适合在信道中传输的一种过程，可分为模拟调制和数字调制。

调制的原因：

1.物理实现上：天线长度 L 应至少等于信号波长 λ 的一半，而原始信号的频率范围比较小，例如人耳能听到的音频信号的频率范围通常为 20hz 至 20khz，转化为电信号的话，波长最长为 $1.5 \times 10^7 m$ ，这在实际中不可能到达，因此需要将原始信号通过调制搬到较高频率上。

2.提高信道利用率：可以将信号调制到不同频率处，同时传输多路信息，提高信道利用率

3.减少干扰：调制可以将干扰限制在特定频段，从而减少干扰对信号的影响。

模拟调制的分类：模拟调制通常使用幅度、频率或相位变化来载荷信息信号，使其能够在信道上传输。调制后的信号通常称为调制信号。模拟调制分为不同的类型，其中包括：

频率调制 (FM)：信息信号的频率变化被载荷到载波上。

相位调制 (PM)：信息信号的相位变化被载荷到载波上。

幅度调制 (AM)：信息信号的振幅变化被载荷到载波上。

4.2 幅度调制 (Amplitude Modulation, AM)

幅度调制 (AM): 用调制信号控制高频载波的幅度。因为频谱完全是基带信号频谱在频域内的简单搬移, \therefore 又称为线性调频。频谱只有载频分量+上下边带, 总功率有载波功率+边带功率。

$$s(t) = [A_0 + m(t)] \cos \omega_c t \rightarrow \pi A_0 [\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)] + \frac{1}{2} [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]$$

A_0 的意义: 原始信号 $m(t)$ 需要 >0 , 这样与 $\cos \omega_c t$ 相乘后的信号才会随着 $m(t)$ 的幅度变化而变化。

AM 信号的非相干解调:

- 第一步: 利用二极管的单向导通性对信号进行处理
- 第二步: 利用电容的高频旁路特性进行低通滤波
- 第三步: 利用电容的隔直特性将基带信号搬回零电平附近

门限效应: 对于包络检波系统, 输入信噪比小于一个门限值时, 输出信噪比会急剧恶化。相关解调不会出现这种情况, 相干解调可以分别解调噪声和信号, 信噪比不会受影响。门限效应是由包络检波的非线性解调引起的, 所以可以用加重方法解决

预加重: 调制前提高调制信号的高频分量

去加重: 调制后降低输出信号的频率分量

最终只会降低输出噪声, 提高信噪比 (杜比降噪系统就采用了加重技术)

双边带幅度调制 (Double SideBand amplitude modulation, DSB-AM) : 去掉 AM 信号中的直流成分, 频谱只有上, 下边带。此时 DSB 信号的变化不和原始信号的变化规律一致, 因此不可以用简单的包络检波来恢复原始信号, 需要采用相干解调。

$$s_{\text{DSB}}(t) = m(t) \cos \omega_c t \rightarrow \frac{1}{2} [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]$$

相干解调 : 振动频率相同、相差恒定的叫做相干性。在接收端, 利用与发送端同频同相的载波进行解调, 就是相干解调 (又叫做同步检波)。DSB 信号的相干解调: 即利用 $\cos \omega_c t$ 与调制后的信号 $s_{\text{DSB}}(t) = m(t) \cos \omega_c t$ 相乘, 得到

$$m(t) \cos \omega_c t \cos \omega_c t = m(t) \cos^2 \omega_c t = \frac{1}{2} m(t) + \frac{1}{2} \cos 2\omega_c t$$

然后再用低通滤波器滤除 $\frac{1}{2} \cos 2\omega_c t$

单边带幅度调制 (Single SideBand amplitude modulation, SSB-AM): DSB 两个边带中的任意一个都包含了原始信号的频率成分, 因此只需要传输其中一个边带。这样既能节省发射功率, 又能节省一半的传输带宽。这种就是单边带调制。只要在双边带调制的基础上, 用理想低通滤波器截取下边带或用理想高通滤波器截取上边带即可。

残边带幅度调制 (Vestigial-SideBand amplitude modulation, VSB-AM): 针对 SSB 理想滤波器实现困难的缺点, 提出残边带调制

4.3 角度调制

角度调制: 用调制信号控制高频载波的角度或相位。 $s(t) = A_c \cos[\omega_c t + \varphi(t)]$ 。 $s(t) = A_c \cos \omega_c t$ 是载波, $\varphi(t)$ 是相对于载波相位 $\omega_c t$ 的瞬时频偏。

相位调制 (phase modulation; PM): 瞬时相位偏移 $\varphi(t)$ 随原始信号 $m(t)$ 做线性变化: $\varphi(t) = K_p m(t)$ K_p 为调相灵敏度 (rad/V), 即单位调制信号幅度引起 PM 信号的相位偏移量。

频率调制 (frequency modulation; FM): 瞬时频率偏移随原始信号 $m(t)$ 做线性变化: $\frac{d\varphi(t)}{dt} = K_f m(t)$ K_f 为调频灵敏度 (rad/V)。显然: PM 是相位偏移随 $m(t)$ 做线性变化而 FM 是相位偏移随 $m(t)$ 的积分做线性变化。因此预先不知道 $m(t)$ 的具体形式则无法区分 PM 和 FM

窄带调频: FM 信号的最大瞬时相位偏移远小于 $\pi/6$ (0.5), $\varphi(t) = K_f \int m(\tau) d\tau \ll \pi/6$ 。认为此时 FM 信号为窄带调频信号, 否则为宽带调频信号。

宽带调频: 此时调频信号的有效带宽可以根据卡森公式计算得到: $B_{FM} = 2(m_f + 1)f_m$ m_f 是调频指数, f_m 是调制信号频率。(公式的证明比较麻烦, 樊昌信的通信原理第 7 版的第 110 页有解释, 因为这个基本不怎么问到, 所以我这里不做解释。)

调频的方法

直接调频: 直接用原始信号控制载波振荡器的频率; 可以由外部电压控制振荡频率的振荡器称为压控振荡器 (VCO)

间接调频: 现将原始信号进行积分然后对载波进行调相, 就可以得到窄带调频信号; 经过 n 次变频器就可以得到宽带调频信号。

4.4 模拟系统的调制性能对比

4.4.1 信噪比

加性噪声被认为只对已调信号的接收产生影响, \therefore 通信系统的抗噪声性能可用解调器的抗噪声性能来描述。信噪比的影响因素

信号功率: 信号的功率越大, 信噪比越高。因此, 在设计系统时, 需要尽量提高信号的功率, 以提高信噪比。

噪声功率: 噪声功率越小, 信噪比越高。噪声是不可避免的, 但是可以通过降噪等方法来提高信噪比。

信号带宽: 信号带宽越窄, 信噪比越高。在相同的信号功率和噪声功率下, 窄带信号的信噪比比宽带信号高, 因为噪声功率会被集中在更窄的频率范围内。

接收机的灵敏度: 接收机的灵敏度越高, 信噪比越高。接收机的灵敏度可以通过使用更好的接收机或增加天线增益等方法来提高。以上是直接由信噪比的定义得到的, 其他的还要:

信号调制方式: 不同的信号调制方式对信噪比的影响不同。例如, 相位调制和频率调制比振幅调制更容易受到噪声的干扰, 因此需要更高的信噪比来确保信号的可靠传输。

传输距离: 信号的传输距离也会影响信噪比。信号的传输距离越远, 受到的噪声就越大, 信噪比就越低。

信道的衰落: 信道的衰落越小, 信噪比越高。信道的衰落可以通过使用多径效应、增加天线数量等方法来减小。

4.4.2 性能对比

角度调制抗噪性能高, \therefore 它可以通过增加带宽 B 改善抗噪声性能; 而调幅系统信号带宽是固定的。由于已调信号的频谱不是原始信号频谱的线性搬移, 是非线性变换, 因此又称为非线性调制。

抗噪声性能: WBFM 最好; DSB,SSB,VSB 次之, AM 最差

频带利用率: SSB 最高; FM 最低 超外差式接收机: 有较高的选择性和较好的频率特性 (一般是问为什么要用超外

差)

5 数字调制

当下最主要的还是数字调制，因此本章需要认真看，看完后最好还是要对照着自己的教材再彻底搞懂。

5.0 问题

眼图是什么？

从眼图可以得到的信息？

眼睛斜边反映了什么信息？

数字调制的分类？（一定要记得首先是分为基带调制和带通调制，带通调制里才是 ASK 等等）

QAM 和 4PSK 的联系？

随着进制数越高，误码率怎么变化；接上一问，为什么？

那你学过星座图吗？用星座图来解释误码率的变化。数字通信系统，频分多址，频分复用；FDM？

什么是 OFDM

均衡的概念。

5.1 数字基带传输系统

数字基带传输系统就是直接传输基带信号（原始信号）的系统，而数字带通系统是包括调制和解调的系统。

5.1.1 数字基带信号

计算机中处理的都是 0101 这样二进制表示的数字信息，但是在物理层的话就需要用波形去表示 0101，而数字基带信号就是表示数字信息的电波形。

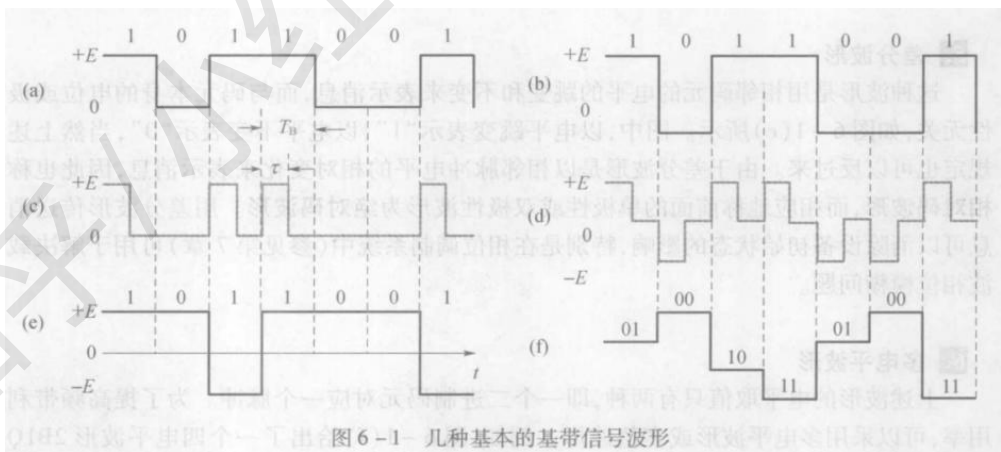


图 6-1 几种基本的基带信号波形

基本波形： 单极性，双极性，单极性归零，双极性归零，差分波形，多电平波形

注： 以上是用矩形波形来表示 0101，实际系统里还会选择高斯脉冲、升余弦脉冲来表示。

5.1.2 数字基带信号的信道编码

原始消息码元必须编成适合于传输的码型（我觉得可以理解为信道编码），常用的基带传输编码方式有：

AMI：传号交替反转码：1 交替变换为 ± 1 ，0 不变

HDB3 码：1 交替变为 ± 1 ，每 4 个 0 化为一小节定义为 B00V，V 与前一个相邻的非 0 脉冲极性相同且相邻 V

极性交替。

CMI 码：1 交替用 11, 00； 0 固定用 01；

双相码（曼彻斯特码）：0→01, 1→10 或 0→10, 1→01

差分双向码：有跳变为 1，无跳变为 0 块编码：nBmB 码和 nBmT 码

5.1.3 数字基带信号的传输波形选择

传输码元的波形也得适合于在基带系统中传输， **生成波形的过程就叫做脉冲成形** 。

一、矩形脉冲 ×

矩形脉冲无失真传输是不可能的，因为 矩形脉冲信号的带宽无限大 ，带宽无限的信号通过带宽有限的信道进行传输时会发生失真。

带宽有限： 通信系统的接收机有滤波器，只允许某个频段的信号进入，其他频率成分会被滤除；

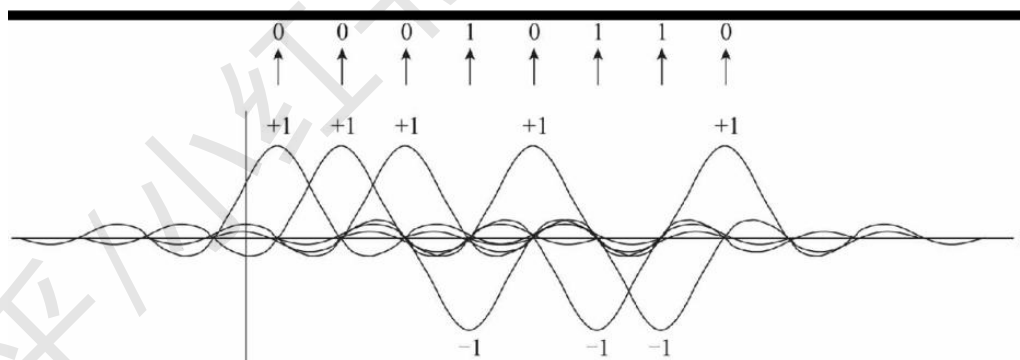
带宽无限的信号： 信号的最高频率成分和最低频率成分的差值为无穷大，换句话说 带宽无限的信号中有无穷多的频率成分，而其中的很多频率成分在经过接收机的滤波器后会被滤除，因此会有失真 。

$$f(t) = E \left[u\left(t + \frac{\tau}{2}\right) - u\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right] \rightarrow F(\omega) = E\tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)$$

矩形脉冲的傅里叶变化是 $\text{Sa}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ 函数， 横坐标 x 可以取无穷多个，每个 x 都代表一个频率分量 ，对应的纵坐标是该频率成分的幅度，虽然幅度趋近于 0，但还是有幅度的，所以可以认为矩形脉冲的带宽无限大。

二、sinc 脉冲 √

很有意思的是，sinc 函数的傅里叶变换就是矩形函数，因此 **sinc 脉冲信号的带宽是有限的，经过带宽有限的信道进行传输时不会出现失真**。另外 当一个码元达到最大幅值时其他所有码元幅值刚好为零，码元之间不会相互影响，实现了无码间串扰 。



三、sinc 脉冲波形的生成

只要**将单位冲激信号输入理想低通滤波器，即可得到 sinc 脉冲信号**。既然是理想的，说明实际不太可能实现，采用理想低通滤波器对单位冲激信号进行滤波得到的 sinc 脉冲信号，拖尾振荡幅度比较大、衰减速度比较慢，当时出现偏差时，码间串扰会比较大。

考虑到实际的系统总是存在一定的定时误差，所以 脉冲成形一般不采用理想低通滤波器，而是采用升余弦滚降滤波器，这种滤波器拖尾振幅小、衰减快，对于减小码间串扰和降低对定时的要求都有利。

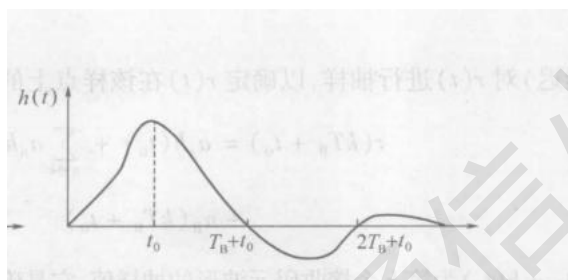
5.2 数字基带信号的传输

5.2.1 码间串扰

码间串扰： 所谓的码间串扰就是相邻码元发生看重叠，因为接收端是对信号抽样然后恢复信号的，因此只需要考虑是否在抽样时刻发生了重叠。

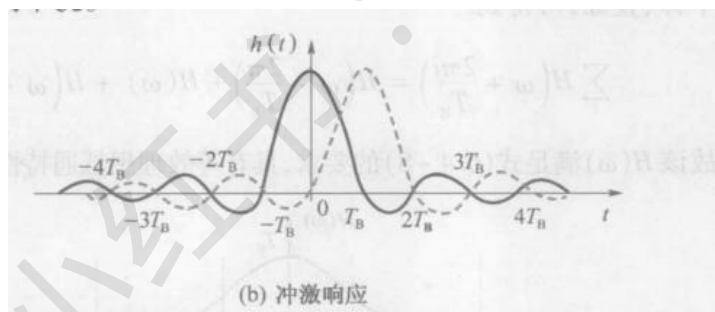
无码间串扰的时域条件：使波形在其他波形判决时刻上刚好为 0，防止影响其他波形的判决。假设码元之间的时间间隔为 T_B ，也就是 0 时刻采样得到的是码元 1， T_B 时刻采样得到的是码元 2，...， kT_B 时刻采样得到的是码元 $k-1$ 。

因此对于第一个码元波形来说
$$h(kT_B) = \begin{cases} 1 & k=0 \\ 0 & k \text{ 为其他整数} \end{cases}$$
 只需要他在时刻 0 采样不为 0，其他 T_B 的整数倍时刻的值为 0 就行，这样就不影响其他码元的采样。

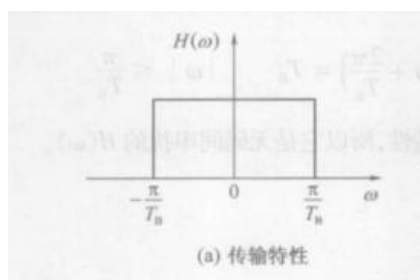


无码间串扰的频域条件：波形 $h(t)$ 的傅里叶变换 $H(\omega)$ 等效为理想低通滤波器。

奈奎斯特速率



sinc 函数的傅里叶变换就是矩形波就是一个低通滤波器，因此 sinc 脉冲波形就可以实现无码间串扰；两个码元符号的发送时间刚好等于 T_B ，那就刚好没有码间串扰，此时码元的传输速率（又叫 奈奎斯特速率）为 $1/T_B$ (Baud/s)；前面提到，这个 sinc 函数是 将单位冲激信号输入理想低通滤波器得到的，这个滤波器长这么样子：



因此系统带宽（又叫奈奎斯特带宽）就是 $B = 1/2T_B$ (Hz)，其他频率成分都被过滤掉了。所以基带系统能提供

的最高频带利用率 是 $\eta = R_B / B = 2$ (Baud/Hz)

5.2.2 抗噪声性能

二进制中，噪声引起的误码有两种：发1判0和发0判1；在抽样时刻电平与噪声电压一定的情况下，双极性基带系统的误码率比单极性低，抗噪声性能好。大家先记住这个就行了~数字基带系统的抗噪声性能目前还没见到有老师问过，就不整理了。

5.2.3 眼图

理论上肯定是能实现无码间串扰，但是实际系统中的滤波器设计肯定是有误差的，无法实现理想的传输特性进而导致系统性能下降；此外 由于码间串扰和噪声同时存在，无法对系统进行定量分析，因此 需要用实验手段来评价系统的性能。眼图就是用实验手段评价系统性能的方法，传输二进制波形时，示波器显示的图像很像人的眼睛：眼睛睁的越大，码间串扰越小。

眼睛张开最大的时刻：就是最佳抽样时刻

眼图斜边的斜率：表示位定时误差灵敏度，斜率越大，位定时误差越敏感。

当存在噪声时，眼图的线迹变成了比较模糊的带状的线，噪声越大，线条越粗，越模糊，“眼睛”张开的越小；

5.2.4 部分响应（提高频带利用率）

奈奎斯特第二准则：人为，有规律地在码元抽样时刻引入码间串扰，在接收端判决前消除，可改善频谱特性，从而提高频带利用率。

5.2.5 均衡（减小码间串扰）

在实际实现时，由于难免存在滤波器的设计误差和信道特性的变化，无法实现理想的传输特性，所以在抽样时刻上总会存在一定的码间串扰，从而导致系统性能的下降。为了减小码间串扰的影响，通常需要在系统中插入一种可调滤波器来校正或补偿系统特性。这种补偿作用的滤波器称为均衡器。

频域均衡：频域上改善系统的幅频特性（提高被衰落的分量，抑制被增强的分量）

时域均衡：时域上使系统的冲激响应满足无码间串扰条件

5.3 数字带通传输系统

数字信号的传输方式分为基带传输和带通传输，实际中的大多数信道（如无线信道）不能直接传输基带信号（无线通信具有带通特性：只能传输某个频率段的信号，其他的理由同模拟调制，需要进行调制）。一般来说，数字调制与模拟调制的基本原理相同，但是数字信号是离散取值，因此数字调制有两种方法：

①：利用模拟调制的方法去实现数字式调制，即把数字调制看做是模拟调制的一个特例，把数字基带信号当做模拟信号的特殊情况处理；

②：键控法：利用数字信号的离散取值特点通过开关键控载波，从而实现数字调制 振幅键控（ASK）：利用载波的幅度变化传递信息 频移键控（FSK）：利用载波的频率变化传递信息 相移键控（PSK）：利用载波的相位变化传递信息

5.3.1 二进制数字调制

每个波形要么表示0，要么表示1，因此：

2ASK：幅度只有两种取值，即通-断键控（OOK）；设备简单，频带利用率高，但抗噪声性能差

2FSK：频率只有两种取值；抗噪声性能好，但占用频带较宽；更适合随参信道

2PSK：相位只有两种取值，注意 2PSK 有“倒 π 现象”，存在相位模糊，所以一般不用 2DPSK（二进制差分相移键控）：针对 2PSK 的缺点，利用前后相邻码元的载波相对相位变化传递数字信息。

5.3.2 多进制数字调制

一个波形（码元）只表示 0 或 1（也就是携带 1bit 的信息）的话就造成频谱资源的浪费，为了提高频带利用率，最有效的方法就是 一个波形（码元）传输多个比特信息。

这里顺便解释一下为什么 M 个波形的话，每个波形能携带 $\log_2 M$ bit 信息。首先信息量是用来衡量一种不确定性，对于 M 进制的话，每个波形都有 M 种可能（ M 种幅度， M 种相位或是 M 种频率），因此波形的具体取值可以看做一个随机变量 X ；若每种幅度/相位/频率都是等概率出现的话，那么这个随机变量的信息熵就是 $-\sum p(x_i)\log(p(x_i))=\log_2 M$ ，所以每个波形都携带 $\log_2 M$ bit 信息。

反过来，每个波形携带 k bit 的信息的话，那么总共应该有 2^k 个波形，因为这 k 个 0101 比特有 2^k 种排列方式。

多进制振幅键控（MASK）： M 个不同振幅表示不同的码元

多进制频移键控（MFSK）： MFSK 中采用 M 个不同的频率表示不同的码元

多进制相移键控（MPSK）： M 个不同的相位表示不同的码元（4MPSK 就是 QPSK）。在 MPSK 体制中，随着 M 的增大，相邻相位的距离逐渐减小，噪声容限随之减小，误码率越大（抗噪声性能用误码率来表示）。

以 4PSK 为例，4PSK 又叫做 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying，正交相移键控)，总共 4 个相位对应 4 个波形（码元），每个波形能携带 $\log_2 4=2$ bit 信息

$$00 \text{ 对应的载波相位为 } \frac{\pi}{4}, \text{ 对应的载波为: } \cos(\omega_c t + \frac{\pi}{4}) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \omega_c t - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \omega_c t$$

$$01 \text{ 对应的载波相位为 } \frac{3\pi}{4}, \text{ 对应的载波为: } \cos(\omega_c t + \frac{3\pi}{4}) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos \omega_c t + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \omega_c t$$

$$10 \text{ 对应的载波相位为 } \frac{5\pi}{4}, \text{ 对应的载波为: } \cos(\omega_c t + \frac{5\pi}{4}) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos \omega_c t - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \omega_c t$$

$$11 \text{ 对应的载波相位为 } \frac{7\pi}{4}, \text{ 对应的载波为: } \cos(\omega_c t + \frac{7\pi}{4}) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \omega_c t + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \omega_c t$$

5.3.3 最小频移键控（MSK）

MSK 是 2FSK 的改进，针对 2FSK 占用频带比 2PSK 大；相邻码元波形的相位可能不连续，信号波形的包络产生较大起伏进行改进。MSK 是一种包络恒定，相位连续，带宽最小且严格正交的 2FSK 信号（两种码元相互正交，误码率性能会更好）

5.3.4 正交振幅调制（QAM）

振幅，相位都表示信息，也就是对振幅，相位联合键控。一个 QAM 波形（码元）可以表示为

$$e_k(t) = A_k \cos(\omega_c t + \theta_k) = A_k \cos \theta_k \cos \omega_c t - A_k \sin \theta_k \sin \omega_c t$$

令 $X_k = A_k \cos \theta_k$, $Y_k = -A_k \sin \theta_k$, 则 QAM 信号最终表示为 $e_k(t) = X_k \cos \omega_c t + Y_k \sin \omega_c t$ 对比一下 QPSK,

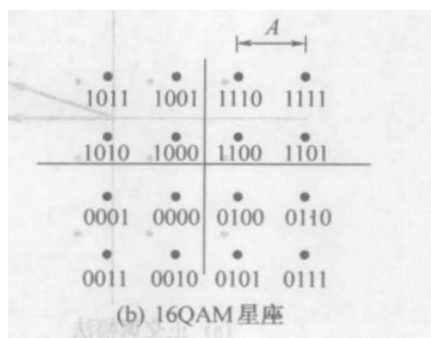
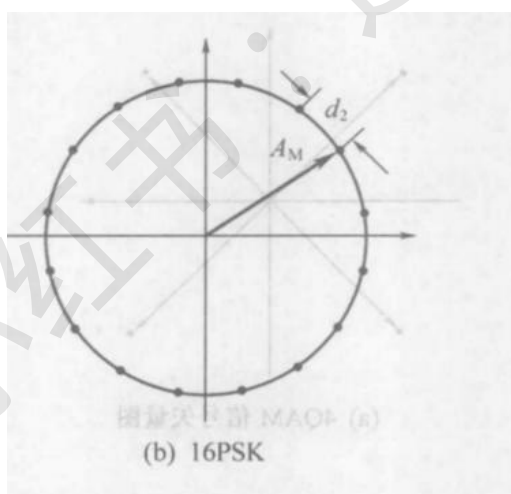
发现 QAM 取相位为 θ_k , 幅值为 ± 1 的话, $4\text{QAM} = \text{QPSK}$; 因此 **QPSK 信号是一种最简单的 QAM 信号**。

5.3.5 信号的空间表示法

每个 MPSK/MQAM 信号都是 $\cos \omega_c t$ 和 $\sin \omega_c t$ 的线性组合, 且 $\cos \omega_c t$ 和 $\sin \omega_c t$ 相互正交。因此将任意一个 MPSK/MQAM 信号看做一个向量的话, 所有向量组成的向量空间的基就是 $\cos \omega_c t$ 和 $\sin \omega_c t$; 而所有 MPSK/MQAM 向量在这组基下的坐标就是 (X_k, Y_k) , 因此 MPSK/MQAM 信号可以在坐标系中表示, 坐标系中的每个点都对应 (X_k, Y_k) , 这些点构成星座图。

樊昌信教材上的描述: 对于 MQAM 调制, 它的矢量图看起来像是星座, \therefore 称为星座调制。相邻点的距离代表噪声容限的大小。随着 M 的增大, 相邻相位的距离逐渐减小, 噪声容限随之减小, 误码率越大 (抗噪声性能用误码率来表示)。

总之: **星座图是调制信号的空间表示法, 星座图上的每个点都对应一个调制信号的波形, 对于 M 进制调制, 总共有 M 个点**。



信号解调: 接受信号也能在星座图中表示出来, 只不过由于干扰和噪声, 不会是预定好的那 M 个星座点, 因此解调时需要进行判决, 找出最近的那个星座点, 作为判决输出。数字通信质量的度量准则主要是接收码元错误判决的概率。按错误概率最小为“最佳”准则。按最大似然准则和最大后验概率准则判决都可得到理论上的最佳误码率。

信号解调时的误码率： $P_e \leq (M-1)Q\left(\frac{d_{\min}}{\sqrt{2N_0}}\right)$ ， d_{\min} 为星座图上的最小距离； 因此进制数越高，星座图

上的点之间的距离越小，误码率越高。

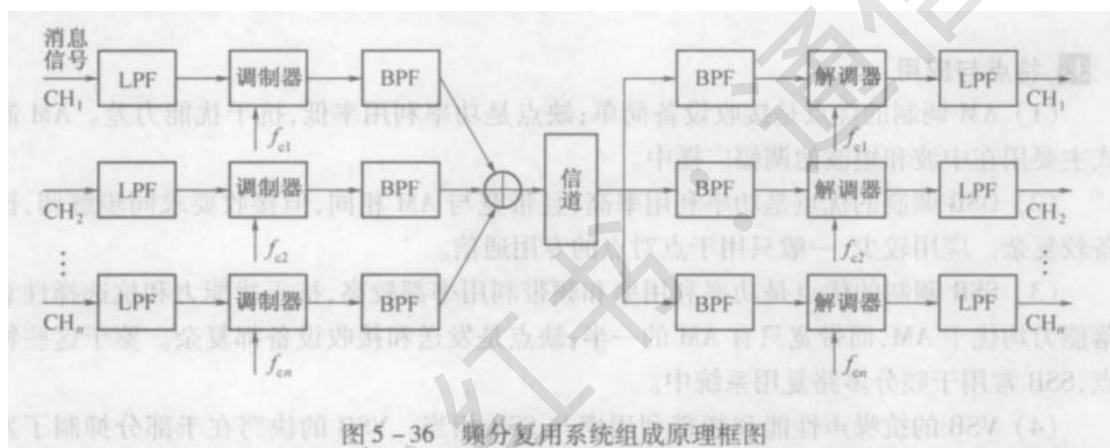
5.4 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)

OFDM 太过重要（虽然面试不会问的太深，但我还是想认真整理整理，因为这个对未来科研可能非常有帮助，重要性仅次于信道容量） 应付面试的话可能背会下面一段就够了： **频分复用和正交频分复用又叫做多载波调制，基本思想是将传输比特流分成多个子比特流，再调制到不同的子载波上进行传输**。这个一方面能提高频谱利用率，另一方面 每个子信道的带宽小于信道的相干带宽，使得每个子信道经历的衰落是相对平坦的（抗频率选择性衰落），从而让子信道上的码间串扰比较小。

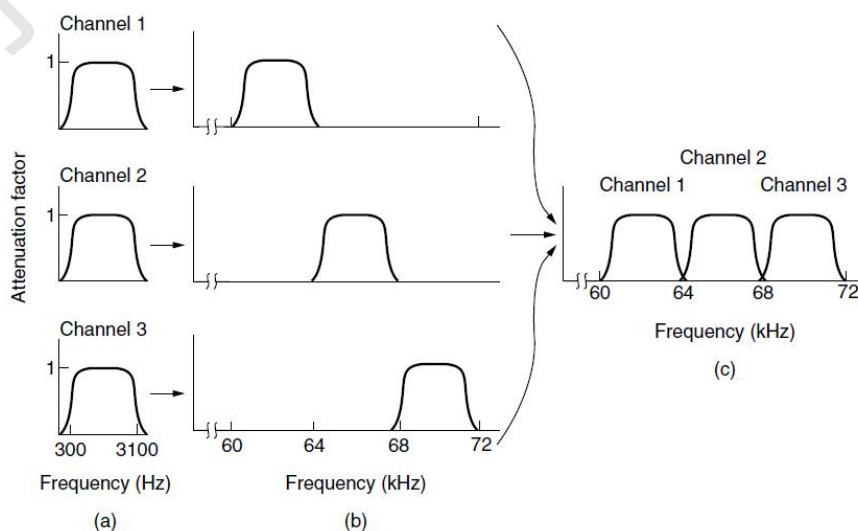
5.4.1 频分复用（Frequency Division Multiplexing, FDM）

所谓的频分复用就是将一个频段进行划分，每个小频段都能传输一路数据；因此这个大的频段就能同时传输多路数据，这就叫做复用。信号通过电磁波在这些频段中进行传递，所以这些频段也叫做信道，小频段叫做子信道。

学术一点：频分复用是一种将多基带信号调制到不同频率载波上再进行叠加形成一个复合信号的多路复用技术。



为了防治相邻频段的信号之间的干扰，需要选择合理的 各个频段的载波频率 f_{c_n} ；此外，各个频段之间需要有保护频带(保护频带就是各个频段之间需要有足够大的间隔，否则相邻频段就会干扰)。

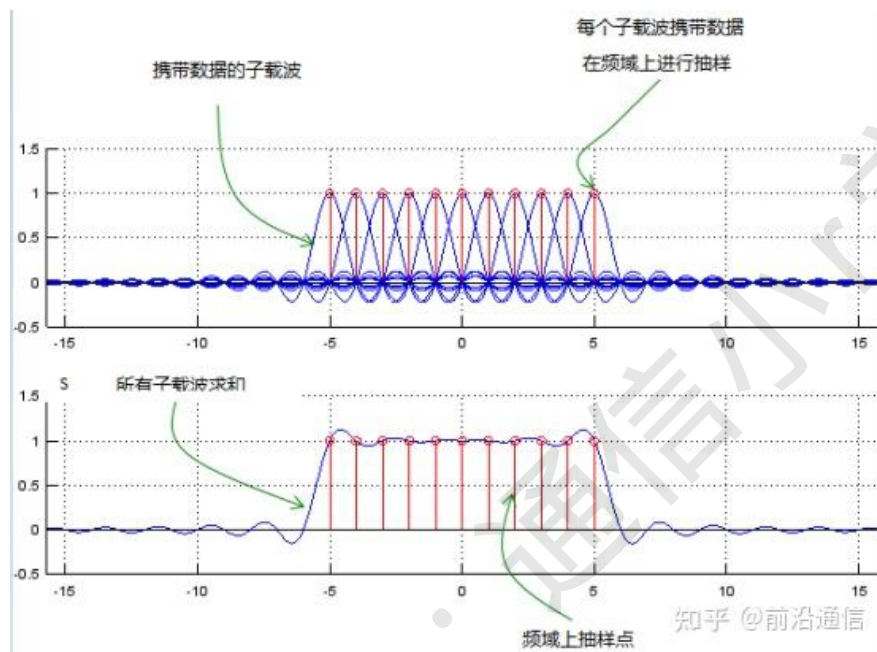


有了频分复用，我们就可以考虑不同的子信道传输不同用户的数据，这就是频分多址（Frequency Division Multiple Access, FDMA）。

5.4.2 OFDM

首先 OFDM 是一种频分多址，也是将信道分为 N 个子信道，然后将串行数据流转换为 N 路并行的子数据流，用每个子信道上的载波（称为子载波）去调制各路信号。但是 OFDM 与 FDM 不同的是，OFDM 的子载波之间是相互正交的，不需要保护频带也能保证子信道之间不会发生干扰。

5.4.2.1 OFDM 的正交性



这是很常见的 OFDM 的示意图，所有子载波的波形都是叠加在一起的，并没有保护频道加以区分。单由于子载波之间的正交性，接收端是能够成功区分不同的子载波的。

每个子载波都是前面提到的调制波形（常用的就是 QAM 波形）： $e_k(t) = a_k \cos 2\pi f_c t + b_k \sin 2\pi f_c t$

波形是固定好的，用不同的系数组合 (a_k, b_k) 来表示不同的比特流，对于 M 进制调制，每 $\log_2 M$ bit（即 $\log_2 M$ 个 0101 比特）的数据流映射为一个系数组合 (a_k, b_k) ； (a_k, b_k) 可以用一个复数来表示

$X_k = a_k + jb_k$ （复数只是用来简化表示，通信系统中传递的都是实数信息）

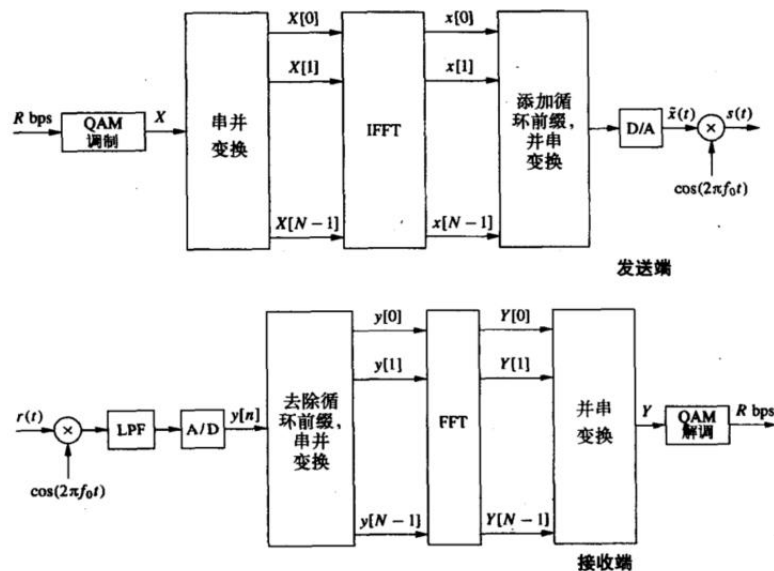


图12-7 用IFFT/FFT实现OFDM

OFDM 方式同时发送多个子载波的叠加信号，假设所使用的频段的起始频率就是 f_c ，相邻子载波间的间隔为 Δf ，所以空中叠加的波形为

$$f(t) = \sum_{k=1} a_k \cos(2\pi(f_c + \Delta f(k-1))t) + \sum_{k=1} b_k \sin(2\pi(f_c + \Delta f(k-1))t)$$

是不是和离散时间傅里叶变化很像！ $\sum_{k=1} F_k \cdot e^{j2\pi\Delta f \cdot kt}$ (F_k 是复数的形式，我们就不考虑具体的取值了)

多个子载波调制和的信号可以写成傅里叶的形式

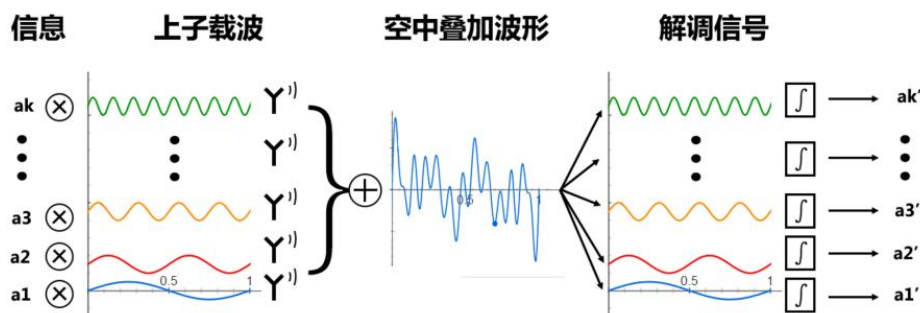
通过 OFDM 调制，信息比特流被映射为一组组 $(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_k, b_k), \dots$ ，写成复数形式就是映射为一个 $X(1), X(2), \dots, X(k) \dots$ 映射关系是已知的，也就是 $X(1), X(2), \dots, X(k) \dots$ 是已知的

所以实际信道中传输的信号就是 序列 $X(1), X(2), \dots, X(k) \dots$ 的离散时间傅里叶变换

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \quad 0 \leq n \leq N-1$$

接收端直接通过 $x[n]$ 序列（直接采样得到）计算所有的 $X[k]$ 就能还原

$$\text{出原始信息比特流 } X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \quad 0 \leq k \leq N-1$$



原理上是使用 IDFT, DFT, 实际肯定是使用 IFFT 和 FFT; 使用 IFFT 模块就不需要发送 N 个子载波信号再叠加, 我们可以直接算出在空中会叠加成啥样子; 然后接收端再用 FFT 模块还原出原始的信息 (这是并行计算的, 接收端能一次性恢复出 N 个原始数据)

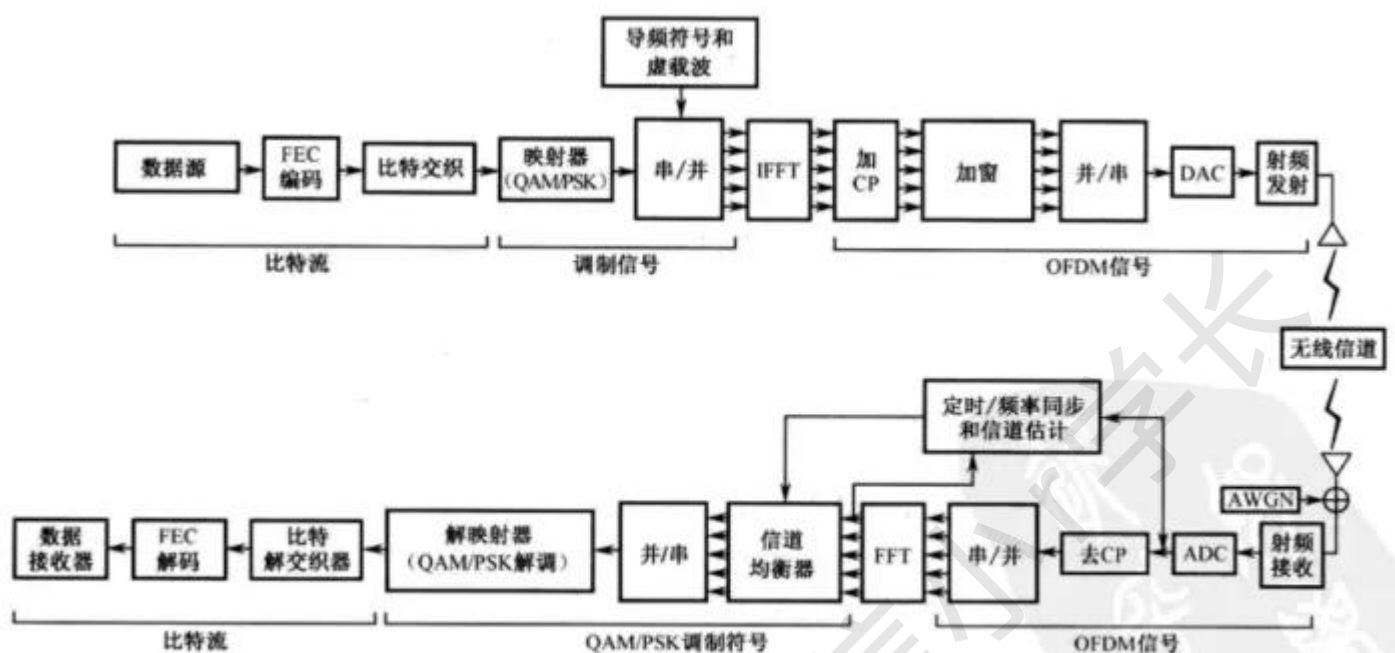


图 4.10 OFDM系统的发射机和接收机框图

加 CP 目的: CP 能解决时延扩展带来的 ISI (符号间干扰) 和 ICI (子载波间干扰), 保证 CP 长度大于等于最大多径时延扩展, 但是时延扩展带来的频选衰落该均衡还是要均衡, 并且 CP 不能解决由频偏带来的 ICI 问题。

优点: 调制效率高, 频带效率高 可以克服多径效应和码间串扰的问题, 抗干扰能力强

缺点:

OFDM 对子载波 **正交性要求十分严格**, 对可能影响子载波之间的正交性的相位噪声和频率偏移十分敏感, 而引起子载波间干扰(ICI)

OFDM 信号在时域中由多个子载波信号叠加组成, 同相叠加在幅度上 可能会产生**很大的瞬时峰值幅度**, 可对白光 LED 光源及其照明质量产生不利影响

数据处理相对复杂, 目前大多研究人员围绕离线处理开展相关算法和提高峰值速率的研究, 不能实时连续地理和传输数据。

5.4.3 建议

如果大家要是留在通信领域的话, OFDM 系统建议大家好好了解了解, 当前 5G 使用的其实也是 OFDM 技术。TDM 是 1G 的革命性技术, FDM 是 2G 的革命性技术, CDM 是 3G 的革命性技术, OFDM 是 4G 的革命性技术, 而 5G 呢? 5G 并没有引入新的革命性技术, 依旧用的是 OFDM, 所以 5G 的性能指标相对于 4G 并没有提升多少 (当然也不止这一个原因)。把整个 OFDM 系统弄懂了, 那么整个通信系统也就搞明白了, 对以后科研很有帮助。我这边算是扫盲, 还没有入门哦~建议可以去看 Gold Smith 的无线通信, 上面比较简单详细地讲了 OFDM 的原理, 更重要的是上面有 OFDM 系统的矩阵表示 (以后科研论文里可能会经常遇到)。

5.5 数字带通信号的传输

信号在传播的过程中会发生 码间干扰 (ISI)，主要是 时延扩展 (多径信号到达接收机的时延不同，然后叠加在一起就可能引发衰落) 引起的。想要对抗 ISI，可以采用前面提到的 多载波调制，也可以采用 扩频 技术 (多载波调制和扩频是在发送端进行的)，另外在接收端还可以使用 均衡 技术。 以上技术并不是通信系统的必备 (大概率是需要有的)，要结合实际情况引入。

5.5.1 均衡

对信道中的某些特性 (多径衰落) 进行补偿和校正的技术就称之为均衡。具体来说，均衡是指 接收端 的均衡器产生与信道相反的特性，用来 抵消信道的时变多径传播特性引起的码间干扰。由于移动衰落信道具有随机性和时变性，这就要求均衡器必须能够实时地跟踪移动通信信道的时变特性，这种均衡器称为自适应均衡器。

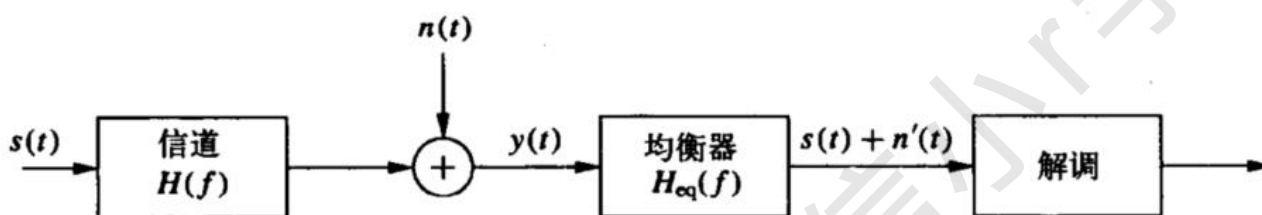


图11-1 通过模拟均衡器说明噪声增强

均衡是消除信道干扰，假设信号 $s(t)$ 经过了频率响应为 $H(f)$ 的信道，接收机的噪声为 $n(t)$ 那么信号通过信道在接收机处的信号为：

$$Y(f) = S(f)H(f) + N(f)$$

信道的影响为 $H(f)$ ，直观上，想去掉信道的影响，可以搞一个滤波器，该滤波器的频率响应为 $\frac{1}{H(f)}$ 则最终接

收信号为 $Y(f) = [S(f)H(f) + N(f)] \frac{1}{H(f)} = S(f) + \frac{N(f)}{H(f)}$ 这样一操作信道对信号的影响就没了，就能得到调

制后的信号 $s(t)$ (当然这个 $s(t)$ 是混合了噪声的，均衡只是消除信道干扰并不会消除噪声！噪声是来自接收机的分子热运动)，然后就是信号检测、解调的工作了。实际信道很复杂，均衡器的设计也很复杂，这里就不详细解释了 (这方面的问题只有一个：解释均衡的概念)。

5.5.2 扩频

扩频： 将信号频谱 通过调制进行扩展 (在传统的调制器之外还设置一个伪随机数发生器)，使 发送信号的带宽远大于所传信息需要的带宽。

编码和调频都能增加信号带宽，但不属于扩频技术 (PS：樊昌信教材将线性调频列入扩频技术，但是 Gold Smith 的无线通信，proakis 的数字通信以及维基百科都只强调了 DSSS 和 FHSS 两种扩频技术)。

扩频调制具有以下三个特性：

信号带宽远大于所传信息需要的带宽；

扩频调制使用扩频码 (spreading code)，扩频码独立于所传数据；

接收端的解扩是用同步扩频码和接收信号进行相关

扩频的实现一般有两种形式：直接序列扩频 (direct sequence spread-spectrum, DSSS)，跳频扩频 (frequency

hopping spread-spectrum, FHSS)

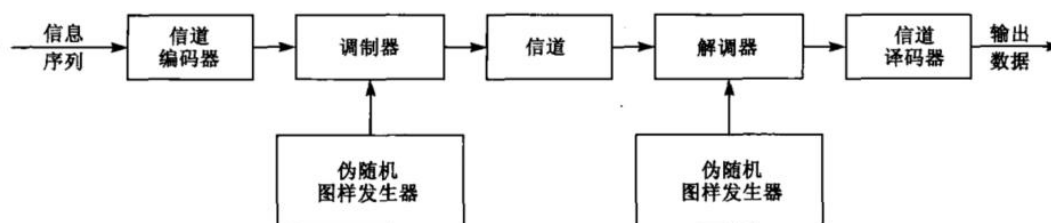


图 12-1-1 扩频数字通信系统模型

扩频的原因

1. 加密作用

原始的信号非常有规律就容易被敌人发现，于是可以乘以扩频码，使得原始信号非常不规律，就可以让敌人以为是背景噪声，因此不容易被发现；(PS: 扩频通信最初应用在军事中)

2. 抑制窄带干扰，因此常用于无绳电话

3. 抗 ISI 抗多径效应 (∵ 频谱足够宽，就可以分离多径信号)

4. 多用户共享频带的特性，(3, 4 点的特性使其适用于蜂窝系统和无线局域网)

直接序列扩频 (direct sequence spread-spectrum, DSSS)

将已调的信号直接与一个扩频信号 (spreading signal, 也叫做扩频码 spreading code) 相乘。扩频信号是伪随机序列，所以也可以理解为 利用伪随机序列去调制载波。

伪随机序列: 人为生成的随机序列，例如 m, M, Gold 序列

正交编码: 码组中任意两个码两两正交，用于扩频通信，加密，纠错

跳频扩频 (frequency hopping spread-spectrum, FHSS) 根据扩频码的值不断改变已调信号的载频

5.5.3 同步(synchronization)

《通信原理》里面的同步，有哪几种同步，这几种同步分别需要什么方式实现，又有什么特点；

数字通信中的同步种类：

同步: 使收发两端的信号在时间上保持步调一致 保证数字通信系统准确，可靠工作

载波同步: 接收设备产生一个和载波同频同相的本地振荡用于相干解调 (用于解调)

码元同步: 又叫做时钟同步，时钟恢复，接收端产生与码元严格同步的脉冲序列，用于确定抽样判决时刻 (用于判决)。对于二进制码元，码元同步又叫做位同步 (bit synchronizatio)。

群同步: 又叫做 帧同步，字符同步，通常若干个码元在一起表示一定的意义。例如 7 个二进制码元表示一个字符，因此接收端需要知道组成这个字符的 7 个码元的起始位置；发送端需在信号中插入同步信息，从而确定字符的起始位置 (用于正确接收码元分组)。

网同步: 通信网中各站之间时钟的同步。

6 信源编码

编码一定是数字信号处理，数字信号的优势之一就是可以进行编码。对于模拟信源来说，一定要经过采样和量化转化为数字信号后才可以进行编码。信源编码的两个功能：信源压缩编码，数字化 (针对模拟信号)

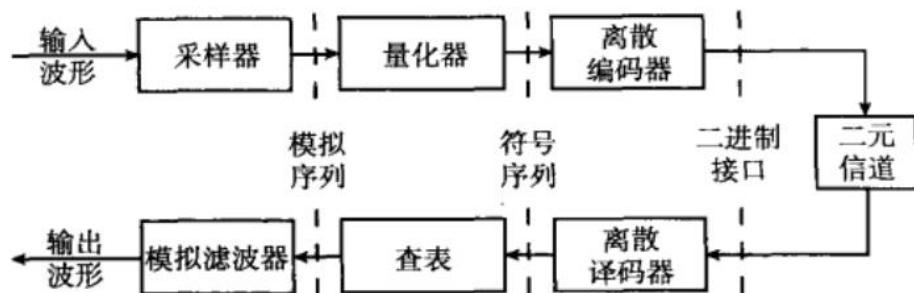


图 2-1 离散信源只需要最内侧的一层，模拟序列需要内侧的两层，波形信源需要全部三层

6.0 问题

为什么要进行信源编码

信源编码的目的和种类

模拟信号如何变为数字信号（抽样、量化、编码）？

什么是量化误差？

模拟序列： 可以看做模拟波形采样后的结果 。

6.1 模拟信号数字化

对于模拟信源来讲，信源编码的过程包括模 / 数转换（采样、量化和编码）和压缩编码。本节先介绍模拟信号的数字化，然后就和数字信号一样进行压缩编码。

6.1.1 采样

从时域看，利用冲激信号按照一定的时间间隔对模拟信号进行抽样；从频域看，以采样频率为间隔对模拟信号频谱进行周期性拓展。

6.1.2 量化

采样信号的电平（信号电平是连续的，理论上采样会得到无穷个幅值），因此需要**将采样得到的电平 归一化到有限个量化电平 上**，实现采样信号幅度的离散化，具体来说就是将抽样值划分成 M 个区间，每个区间用一个电平表示，叫做量化电平。用量化电平表示连续抽样值的方法称为量化。

均匀量化： 抽样值区间等间隔划分

非均匀量化： 抽样值区间不均匀划分，也就是量化间隔随信号抽样值的不同而变化。一般量化前后将信号的抽样值压缩，再均匀量化。

量化级数： 量化电平的个数称为量化级数。

量化误差： 信号电平的量化值和实际值之差称为量化误差，也称为量化噪声。量化噪声的幅度最大等于量化间隔的 $1/2$ 。

一般量化噪声： 阶梯本身产生的失真 过

载量化噪声： 阶梯上升速度 < 信号上升速度 量化信噪比 = 信号功率 / 量化噪声功率。

6.1.3 编码（这里已经算是信源压缩编码了）

这里所谓的编码就是将量化后的信号电平值用二进制数字来表示。就像这样的（以下是等长信源编码，信源的每个

符号（量化电平）的编码长度都是等长的）：

量 化 级	b_3	b_2	b_1	b_0
15	1	1	1	1
14	1	1	1	0
13	1	1	0	1
12	1	1	0	0
11	1	0	1	1
10	1	0	1	0
9	1	0	0	1
8	1	0	0	0
7	0	0	0	0
6	0	0	0	1
5	0	0	1	0
4	0	0	1	1
3	0	1	0	0
2	0	1	0	1
1	0	1	1	0
0	0	1	1	1

6.1.3 脉冲编码调制（PCM）

将模拟信号抽样，量化，编码后用二进制符号 0，1 表示（编码）的过程也叫做脉冲编码调制（PCM）；传输 PCM 信号占用很大带宽， \therefore 采用预测编码来降低数字电话信号的比特率，即差分脉冲编码调制（DPCM）。

6.2 信源压缩编码

针对数字信号进行编码，压缩冗余度以得到信息的有效表示，即用最少的比特数来表示信源，且要能够从压缩数据中尽可能最佳地恢复出原信源。

6.2.1 信源的无损编码

在能够从压缩数据中无损恢复出信源的前提下，最小化编码比特数。无损压缩是通过改变符号出现的概率，减小符号间的相关性，从而提高符号的平均信息量 用更少的码元传输同样量的信息。

香农第一定理（信源无损编码定理）： 离散无记忆信源 X 的熵假设为 $H(X)$ ，对于任意码率 R ，只要 $R > H(X)$ ，

总存在一种针对该信源的无损编码；否则当 $R < H(X)$ ，一定不存在该信源的无损压缩。

6.2.2 信源的无损编码算法

1. 可变长度信源编码

当信源符号不等概时，一种有效的编码方法就是可变长度编码。 **根据信源符号的不同发生概率来选择码字**。
前缀条件： 字符集中任一字符的编码都不是其它字符的编码的前缀。这种性质使得满足前缀条件的编码是唯一可译码。

2. 克拉夫特（Kraft）不等式

一个满足前缀条件、码字长度 $n_1 \leq n_2 \leq \dots \leq n_L$ 的二进制码字存在的充要条件是 $\sum_{k=1}^L 2^{-n_k} \leq 1$

3. 前缀码的信源编码定理

4. 霍夫曼 (Huffman) 编码

霍夫曼编码算法是可变长度编码算法的特例。霍夫曼编码在下述意义上是最优的：在码字满足前缀条件情况下，用来表示信源符号所需要的平均二进制数目最小。

5. 兰培尔-齐夫 (Lempel-Ziv) 编码

Lempel-Ziv 编码是可变长度编码的特例。霍夫曼编码算法能产生最优信源编码，使码字满足前缀条件并且平均分组长度最小，但是需要知道所有信源符号发送的概率，很显然在很多实际系统中不太现实，因此便有了 L-Z 编码算法，L-Z 编码算法和信源的统计特性无关。（PS:从原理上说，只要观察到信源发出的一个长长的信息序列，就有可能估计出离散信源的概率，但这实现起来的复杂度比较高）

6.2.2 信源的有损编码

数据在最大允许失真的限制条件下实行压缩（会使信源含有的信息量有所降低）。

对于连续幅度的信源，无损压缩是不可能的，因为采样信号的电平（信号电平是连续的，理论上采样会得到无穷个幅值），因此需要将采样得到的电平归一化到有限个量化电平上，实现采样信号幅度的离散化。量化后必然引起误差。（PS：这里是将采样量化编码这一整个过程都认为是信源编码过程）

利用采样定理，模拟信源的输出可转化为一个等效的离散时间抽样序列，然后对样值幅度进行量化和编码。一种简单的编码方法是一串二进制数字序列来代表一个离散幅度电平。这样如果有 L 个电平，当 L 是 2 的幂次时，每个电平都需要 $R = \log_2 L$ bit 来表示，当 L 不是 2 的幂次时，每个电平需要 $R = \lfloor \log_2 L \rfloor + 1$ 比特来表示。如果输出电平不等概且各电平的概率已知，可以用霍夫曼编码（也叫做熵编码）来提高编码效率。

6.3 常见业务

语音压缩编码

语音压缩编码可以分为三类：波形编码、参量编码和混合编码。

波形编码：保持语音波形不变，或使语音波形失真尽量小：PCM, DPCM, ΔM

参量编码（有损压缩）：保持语音的高可识别度，能听懂但是声音质量差

混合编码（有损压缩）：保持语音的高可识别度，解决参量编码的缺点。常见的有（应该不用记的）MPE-LPC, RPE-LTP-LPC, CELP, LD-CELP, ACELP

图像压缩编码：静态图像压缩：JPEG 动态图像压缩：MPEG

数据压缩编码：数据压缩编码不允许失真（霍夫曼，香农-费诺）

7 信道编码（差错控制编码）

为了解决数据在信道中传输时引入的误码问题，引入差错控制技术

后向纠错（检错重发）：接收端在发现误码后，请求发送端对错误数据进行重传，称为后向纠错。ARQ 就是一种后向纠错算法。

检错删除：检测到错码立即删除（有的系统删除部分接收码元不影响系统，反而能提高传输效率）

前向纠错：发送端在发送数据时加入一定的冗余信息，以便在出现误码时接收端可以直接进行纠错，称为前向纠错。

反馈校验 IRQ：发送端不需要加入差错控制码元，接收端将收到的码元送回，与一开始发送的序列进行比较，有错就重发。

信道编码（数据传输码/差错控制码）就是一种前向纠错：在原始数据中 增加冗余度以增加信息传输的可靠性，提高抗干扰能力。

7.0 问题

为什么要进行信道编码

信道编码的目的和种类

信源编码和信道编码有什么区别

信道容量含义

对香农公式的理解？

信息速率可以超过信道容量吗？

1MHz 信道如何传输 10Mbit/s 的信号？（用香农公式计算如果能传输就正常传输，否则的话也可以使用信道复用技术，例如 MIMO 复用，5G 的 NOMA 技术）

传送 10k 的数据需要多大带宽

香农公式？

信道容量的含义？

香农公式中 S 是发送端的功率还是接收端的功率？

奈奎斯特定理和香农公式

带宽增加，信道容量怎么变？

理想情况/存在噪声情况下的信道极限容量问题

如果信道给定了，怎么提高信道容量（信道给定如果理解为带宽给定，那么可以增加信噪比，或是复用技术）香农公式的前提条件（信道和输入信号的要求：AWGN 信道以及输入满足高斯分布）？数字信号相对于模拟信号的一大优点是抗噪声，请问为什么数字信号有这样的优点（数字信号可以进行信道编码）。

7.1 信源编码 vs 信道编码

信源编码与信道编码的作用

信源编码是压缩冗余度以得到信息的有效表示，提高传输时的信息传输率。

信道编码是增加冗余度以增加信息传输的可靠性，提高抗干扰能力。

信源编码与信道编码的区别

信源编码主要解决的是通信的有效性问题，用尽可能少的码符号来表示信源

信道编码解决的是通信的可靠性问题，使信源发出的消息通过信道后尽可能不失真地再现在接收端，信道编码是以通信的有效性为代价换取可靠性

香农三大编码定理

香农第一编码定理（无失真信源编码定理）： 总可以找到一种信源编码，使得在无噪无损信道上无差错地以最大传输速率 C 传输信息

香农第二编码定理（有噪信道编码定理）： 一个离散无记忆平稳信道，信息传输率 $R < \text{信道容量 } C$ 时，码长足够长，就可以让平均译码错误足够小，也就是通过一个有噪信道可以实现几乎无失真传输

香农第三定理（限失真信源编码定理）： （只要码长足够长）总可以找到一种信源编码，使码的平均失真度不大于给定的允许失真度。

7.2 信道容量

信道容量是理论最大能到达的信息传输速率（achievable rate），吞吐量（throughput）是实际传输速率，不过在论文里，经常看到将两者混为一谈，问题不是很大（反正大部分论文也不太可能在实际系统里复现出来^_^）。

7.2.1 香农公式

信道容量公式： $C = B \log(1 + \text{SNR})$ bit/s, B 是系统带宽， SNR 是 接收端 信噪比。

结论 1： 增加信号功率可以 增加信道容量，**信号功率增加到无穷大，信道容量就增加到无穷大**

结论 2： **增加带宽 B 可以增加信道容量但是不能无限制增加**，会有个极限值

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} B \log \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) = \frac{S}{n_0} \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{n_0 B}{S} \log \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) = \frac{S}{n_0} \ln e \approx 1.44 \frac{S}{n_0}$$

结论 3： **减小噪声可以增加信道容量，噪声减小至 0 那么信道容量就能增加到无穷**

7.2.2 香农公式的意义

1. 香农公式表述了信道容量和信道带宽的关系， 信道容量与信道带宽成正比，同时还取决于系统信噪比以及编码技术种类。
2. 香农定理指出，如果信息源的信息速率 R 小于或者等于信道容量 C ，那么， 在理论上存在一种方法可使信息源的输出能够以任意小的差错概率通过信道传输。
3. 该定理还指出：如果 $R > C$ ，则没有任何办法传递这样的信息，或者说传递这样的二进制信息的差错率为 $1/2$ （注意哦，你可以让信息传输速率超过信道容量，但这时候接收端就会以高错误概率解调，那通信就没意义了）。

7.2.3 香农限

香农限是指单位时间 单位带宽 内 传输 1bit 信息所需要的最小信噪比（ E_b/N_0 ）。（ -1.59dB 一定要记住，具体推导过程如下!!!）

$$C = B \log \left(1 + \frac{S}{N} \right) = B \log \left(1 + \frac{E_b R_b}{N_0 B} \right) \quad R_b \leq C \Rightarrow \frac{R_b}{B} \leq \log \left(1 + \frac{E_b R_b}{N_0 B} \right) \Rightarrow 2^{\frac{R_b}{B}} \leq 1 + \frac{E_b R_b}{N_0 B} \Rightarrow \frac{E_b}{N_0} \geq \frac{2^{\frac{R_b}{B}} - 1}{\frac{R_b}{B}}$$

对于单位带宽（ $B=1$ ）

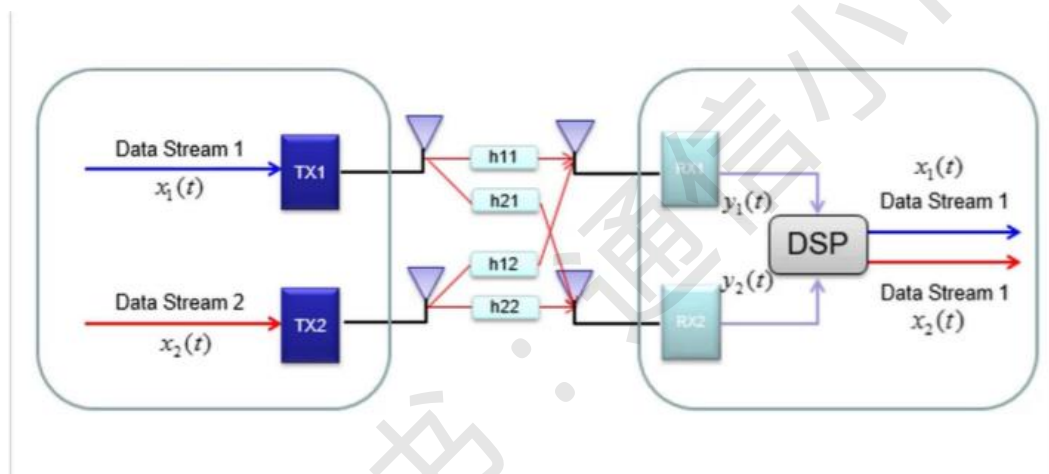
$$\frac{E_b}{N_0} \geq \lim_{R_s \rightarrow 0} \frac{2^{R_s} - 1}{2^{R_d}} = \lim_{R_b \rightarrow 0} 2^{R_j} \ln 2 = \ln 2 = 0.693 = -1.59\text{dB}$$

8 MIMO 技术

本节涉及到很多矩阵的知识，见线性代数笔记

8.1 MIMO (4G 技术)

8.1.1 MIMO 系统模型



MIMO: 多输入多输出 (Multi Input Multi Output), 顾名思义, **多路并行的数据流通过发射端的多根天线并行发送, 在接收端接收**。注: 这里的输入和输出是针对通信系统而言, 比如你发射端发射数据, 接收端进行接收, 这对整个通信系统而言发射端是输入, 接收端是输出。

输入和输出之间的关系 $y_1 = h_{11}x_1 + h_{21}x_2$, $y_2 = h_{12}x_1 + h_{22}x_2$

接收天线 1 和发射天线 1,2 相连, 两两之间的信道为 h_{11}, h_{21} , 两根发射天线分别发送 x_1, x_2

写成矩阵的形式为:
$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x}$$

假设有 M_t 根发射天线和 M_r 根接收天线, MIMO 就得到 MIMO 的一般模型 (考虑接收机的热噪声)

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{M_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_r,1} & \cdots & h_{M_r,M_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{M_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_{M_r} \end{bmatrix} \quad \mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}$$

8.1.2 MIMO 的三种用途

8.1.2.1 复用 (multiplex)

复用是最容易想到的作用，多根天线同时发多路数据，接收端在用多根天线分别接收。理想情况下， M 根发送天线能同时传输 M 路信息，信道复用 M 次，频谱效率，传输速率提高 M 倍

但接收端能够成功解调这 M 路信息吗？这不一定！接收信号和发送信号之间满足： $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}$ ，所以现在就是已知 \mathbf{y} 对 \mathbf{x} 进行求解，由线性代数的知识可知， **\mathbf{x} 解的个数和前面的 \mathbf{H} 有关**

8.1.2.2 分集 (diversity)

减轻衰落影响的有效技术之一就是独立的衰落信号进行分集合并。分集就是现在 独立的衰落路径上发送相同的数据，由于独立路径在同一时刻经历的深衰落的概率很小，因此 经过适当的合并 后，接收信号的衰落程度就会被减小。因此分集的原理：分集接收=分散传输+集中处理。

对抗多径衰落的分集技术叫做微分集 (microdiversity)，多根天线进行分集；对抗阴影效应的分集叫宏分集 (macrodiversity)，多个基站进行分集。

分集方式：空间分集（天线间保持一定的距离）；频率分集（相同信号用不同载波发送）；极化分集（相同信号用不同的极化方式传播）；角度分集（接收端分别接收来自不同方向的信号）；时间分集（间隔不同时间发送相同信号）

接收分集：一根发送天线，多根接收天线接收信号。

选择合并 (Selection combining, SC)：输出信噪比最高的那个支路上的信号

门限合并：选择合并需要每个支路都有一个接收机来连续监测支路的信噪比。门限合并就用同一个接收机顺序检测每个支路，**输出第一个信噪比高于门限的信号**，避免在每个支路上都安装一个接收机。当支路的信噪比低于门限值时就切换其他支路，最简单的就是随机切换。当只有两个支路时，直接切换到另一个支路上（切换合并，switch-and-stay combining, SSC）

最大比合并 (maximal-ratio combining, MRC)：SC 和 SSC 都是输出某一个支路上的信号，最大比合并是输出各支路信号的加权和。

等增益合并 (equal-gain combining, EGC)：每条支路都以相同的权值来进行合并。

发射分集：多根发送天线发送相同的数据，接收端只有一根天线进行接收，信号的合并方法同上 3.RAKE 接收技术：将多径信号各条路径分离，相位校准后加以利用，把干扰信号变为有利信号，有效利用多径分量，提高系统性能。

8.1.2.3 波束赋形 (beamforming, 属于 5G 的关键技术，后面单独拿出来详细讲)

简单来说就是多根天线同时向用户发送信息，这里 **通过调节不同天线的发射相位和振幅，使得到达用户的位置时，所有的信号保持同相**，这时候叠加在一起信号的强度就非常大（信噪比非常高），就像是形成一股波束直接对准用户，因此叫做波束赋形。

不同于上面提到的分集：分集则只是简单地发送相同信号，因此到达用户时的信号不一定是同相的；另外分集是选择信噪比最高的那一路线、或是输出第一个信噪比高于门限的信号，或是输出各支路信号的加权和、或是相同的权

值来进行合并。波束赋形是将所有信号聚焦在一个方向，分集是将信号分散到多个方向。可以说波束赋形是理论上最优的分集；此外波束赋形也可以兼具复用的功能（多组天线分别对准同一个用户，不同组的天线传输并行的数据，同一组的天线传输相同的数据）

9 无线通信物理层关键技术

第一代到第六代无线通信系统

第一代（1G）通信系统：1G 通信系统采用模拟信号传输技术，主要用于模拟语音信号的传输。1G 系统采用的频率较低，信号覆盖范围较小，通信质量较差，容易受到干扰。

第二代（2G）通信系统：2G 通信系统采用数字信号传输技术，主要用于数字语音和短信的传输。2G 系统采用的频率较高，信号覆盖范围较大，通信质量较好，可以支持多种业务。

第三代（3G）通信系统：3G 通信系统采用 CDMA 技术，主要用于语音、数据和视频的传输。3G 系统支持更高的数据传输速率和更多的用户同时接入，可以实现更多的业务。

第四代（4G）通信系统：4G 通信系统采用 OFDMA 技术，主要用于高速数据传输和视频流媒体服务。4G 系统可以支持更高的数据传输速率、更低的时延和更好的网络容量。

第五代（5G）通信系统：5G 通信系统采用多种新技术，包括 mmWave、Massive MIMO 和 Beamforming 等技术，旨在实现更高的数据传输速率、更低的时延、更好的网络容量和更广的覆盖范围。5G 系统还可以支持更多的连接和更低的功耗，以满足未来智能物联网和工业互联网的需求。

第六代（6G）通信系统：到目前为止，尚未正式定义或商定第六代（6G）通信系统的标准和技术，但是大概率是超大规模 MIMO，太赫兹频段，原生支持 AI。总的来说，随着通信技术的不断发展，每一代通信系统都在提高数据传输速率、减少时延、扩大覆盖范围、提高网络容量等方面有所改进和突破，这些变化使得人们的通信体验更加便捷和高效。

无线通信最大的限制是在物理层，具体来说受限于香农公式。 $C = B \log(1 + \text{SNR}) \text{ bit/s}$

思路 1： 更好的编码调制技术去接近这个容量（对应于 5G 的 QAM256, QAM512, QAM1024）

思路 2： 采用更大的带宽去增加信道容量（对应于 5G 的毫米波技术以及未来 6G 的太赫兹，光通信技术）。**更高的频谱对应于更大的带宽的原因：** 频段越低，这个频段的利用率越高，就没有多少空闲频段可供使用；频段越高，受限于技术，利用率就越低，所以有更多空闲频谱可供使用。

思路 3： 提高信噪比（对应于 MIMO 技术） 因此本部分主要是介绍一些物理层的关键技术（当然关键技术不止这些，有兴趣的话可以自己查阅相关文章去了解）

9.0 问题

对无线/移动通信感兴趣在哪？说一个具体的点。 想研究的具体方向？

5G 比 4G 中增加的技术？

同时同频全双工要克服什么问题？如何实现的？

3G 和 4G 中有哪些标准？

5G 中用了什么技术？

同时同频全双工优缺点？

一代到四代通信系统区别。

5G 中两种编码方式 LDPC，Polar 码特点

5G 中的关键技术 TWC（太赫兹无线通信）的应用场景 LDPC 码是分组码还是卷积码

如何看待中国发展 5g：太开放了，没有标准答案（注意如果回答之中涉及到了专业知识，老师是可能深入问的，比如你回答 5g 网速快，那么就可能问你为什么快，这就涉及到 MIMO 呀、高阶调制技术呀）

mimo 是什么？

OFDM，中英文全称 通信前沿问题，通信系统中，多址接入信道 MAC（多对一 or 一对多），对信息传输速率的限制？（一对一只需满足香农公式，一对多会发生变化）：看 H 矩阵的秩，1 对多或者多对 1 都只能等效为一个信道；多对多才能等效为多个并行信道

9.1 4G 关键技术

MIMO 技术和 OFDM 技术一起并称为 LTE 的两大最重要物理层技术。前面已经进行了介绍，这里简要回顾。

9.1.1 OFDM 技术

OFDM 技术：将信道分成 N 个子信道，每个子信道上一个载波，称为子载波。各子载波间相互正交。将串行数据流转换成 N 路并行的子数据流去调制各路子载波。

OFDM 特点：正交信号可在接收端分离，避免子信道间的干扰；子载波之间相互重叠， \therefore 有很高的频带利用率。OFDM 是调制技术和频分复用技术，关注的是：在发送端，如何利用特定带宽、包含 N 多个子载波的基带无线信号，并行承载不同用户的二进制比特数据，然后通过单根天线构建的单个无线信道发送；在接收端，如何利用通过单根天线把单个无线信道接收下来的基带信号，把不同子载波上承载的不同用户的二进制数据能分离出来的技术。

9.1.2 MIMO 技术

9.1.3 软件无线电

软件无线电（Software Defined Radio, SDR）是一种基于软件和通用计算机平台的无线电通信技术。它使用数字信号处理技术和软件算法来实现无线电信号的调制、解调、过滤、放大、解码等基本功能，而不像传统无线电设备一样使用硬件电路来实现这些功能。软件无线电的核心是软件无线电平台，它由软件无线电前端、通用处理器和软件无线电后端组成。软件无线电的主要优点包括：

灵活性高：软件无线电可以通过软件修改的方式来实现不同的调制解调方式和协议，因此可以适应多种无线电通信需求。

成本低：软件无线电可以使用通用的计算机硬件和标准的通信接口，从而避免了昂贵的专用硬件和模块。

可升级性强：由于软件无线电可以通过软件修改的方式来实现不同的功能，因此可以轻松地进行系统升级和维护。

易于开发和调试：软件无线电的开发和调试工作可以通过软件模拟来完成，不需要使用硬件设备，从而降低了开发和调试的成本和风险。

9.1.4 LDPC

LDPC 码是一种 分组码（Block Code），其全称为“Low-Density Parity-Check Code”，也被称为低密度奇偶校验码。相比于卷积码，分组码可以对输入数据进行分块处理，每个块之间互不影响，从而简化了编码和解码的过程，同时也具有更好的容错性能。LDPC 码具有低密度矩阵结构，能够充分利用随机矩阵的优良性质，在保证误码率的前提下，降低编码复杂度，提高解码性能。因此，LDPC 码在通信系统中得到了广泛应用，特别是在无线通信、数字广播、卫星通信等领域，已经成为国际标准之一。

9.2 5G 关键技术

增强覆盖技术：大量新带宽(如具有大带宽的毫米波频段) 提高效率技术：调制编码技术，massive MIMO，新多址技术，灵活双工与全双工 降低时延技术：免授权调度等

9.2.1 5G 概述以及物理层信息传输

9.2.1.1 5G 概述

场景	关键性能挑战	关键技术
连续广域覆盖	用户体验速率：100Mbit/s	大规模天线阵列 新型多址技术
热点高容量	用户体验速率：1Gbit/s 峰值速率：数十 Gbit/s 流量密度：数十 Tbit/s/km ²	超密集组网 全频谱接入 大规模天线阵列 新型多址技术
低功耗大连接	连接密度：10 ⁶ /km ² 超低功耗，超低成本	新型多址技术 新型多载波技术 D2D 技术
低时延高可靠	空口时延：1ms 端到端时延：ms 量级 可靠性：接近 100%	新型多址技术 D2D 技术 MEC（移动边缘计算）

5G 主要是定义了三大应用场景：增强移动宽带(eMBB)、大规模机类通信(mmtc)和超可靠低延迟通信(URLLCs)。eMBB 提供更快的网络速度和更高的带宽，为移动宽带用户提供更好的网络体验。（具体参数上面有）；mMTC 支持大规模物联网应用，连接和管理大量的传感器、设备和物品；URLLC 支持一些对时延和可靠性要求比较高的应用场景，如智能制造、智慧城市、车联网等。

9.2.1.2 5G 帧结构

4G 中，一个帧（frame）是 10ms，一个子帧是 1ms，子载波间隔为 15kHz，1ms 对应 1 个 slot，1 个 slot 对应 14 个 OFDM 符号；**5G 中，定义了灵活的帧结构**，子载波间隔可以是 15kHz, 30kHz,60kHz, 120kHz, 240kHz，这时候 1ms 对应 2, 4, 8, 16 slot，每个 slot 都是 14 个 OFDM 符号。子载波间隔指的是前面提到的 OFDM 的子载波间隔，理论上可以推导出来，子载波间维持正交的时间就是子载波间隔的倒数。

μ	子载波间隔 $2^{\mu} \times 15$ [kHz]	时隙长度 [ms]	每个时隙 包含的 OFDM 符号数	OFDM 符号长度 (包含 CP) [ms]
0	15	1	14	0.0714
1	30	0.5	14	0.0357
2	60	0.25	14	0.0179
3	120	0.125	14	0.0089
4	240	0.0625	14	0.0045

9.2.1.3 全双工技术 (FD, full duplex)

全双工技术 (FD, full duplex) 也被称为同时同频全双工技术 (CCFD, co-frequency co-time full duplex)。全双工技术可以使通信终端设备能够在同一时间同一频段发送和接收信号，理论上，比传统的 TDD 或 FDD 模式能提高一倍的频谱效率，同时还能有效降低端到端的传输时延和减小信令开销。但是在实现过程中需要克服以下两个主要问题：

自干扰： 由于发射天线和接收天线在同一频率上工作，发射信号会对接收信号产生强烈的自干扰。这会导致接收机无法正确解码接收信号，从而影响通信质量。

外干扰： 由于同一频率上有多个用户同时通信，不同用户之间的信号会相互干扰，从而影响通信质量。

为了克服自干扰问题，SFD 系统采用了各种技术，例如：

取消自干扰技术： 通过在接收端引入逆自干扰信号，抵消发射端引入的自干扰信号，从而提高接收端的信噪比和解调性能。

频率隙技术： 通过在发射端和接收端之间引入一段频率隙，将发射信号和接收信号在频域上分离，从而减少自干扰。

为了克服外干扰问题，SFD 系统采用了以下技术：

聚合技术： 通过在同一频率上聚合多个小带宽信道，减少用户之间的干扰。

功率控制技术： 通过动态调整发送功率，使不同用户之间的信号相互平衡，减少干扰。

9.2.2 大规模 MIMO 技术

在 2010 年底，贝尔实验室的 Thomas[10]在《无线通信》中提出了 5G 中的大规模多天线的概念。大规模多天线（又叫大范围多入多出技术和大范围 天线系统）是一种多入多出（MIMO, multiple input and multiple output）的通信系统，在系统中 **基站的 天线数远高于终端的天线数目，通过建立极大数目 达到终端的信道实现信号的强健高速传输**，并通过大规模天线简化 MAC 层设计来最终实现信号的低时延传输。

9.2.3 毫米波通信

毫米波的波长为 1~10mm 左右，频率是 (30-300GHz)，在微波的范围内，更靠近光波波段。

毫米波段的缺点：

1. 由前面提到的电磁波自由空间损耗公式 $P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}$ ，电磁波的衰减随着频率的平方成正比，

频率越高路径损耗越大；

2. 毫米波的绕射，遇到障碍物阻挡造成的衰减更严重，另外氧分子和水蒸气也会对毫米波频率产生选择性吸收与散射。**毫米波的衰减非常大**。

3. **毫米波器件很复杂**。

毫米波段的优点：

频率资源丰富，总的可用频段能有 150GHz (PS:全球可以用于移动通信的带宽不超过 870 兆，每个主要运营商的总带宽可能不超过 200M)；由于毫米波频率的波长极短，因此可以在一个小范围内封装大量的天线元件，从而有助于在基站(BSs)和用户 实现大规模 MIMO。

4G 中没有采用毫米波的原因

1. 4G 并不需要很高的速率，因此 4G 的频谱虽然紧张但是够用

2. 5G 以及未来 6G 需要更高的速率，由香农公式，带宽线性提高，信道容量线性增加，而信噪比指数增加才能带来容量的线性增加，因此提高带宽才可能满足 5G 以及未来 6G 的性能要求。而 4G 的频谱很紧张，没

有足够多的频谱资源用以满足 5G 以及未来 6G 的要求，因此就很需要去采用毫米波频段，即使毫米波存在很多问题。

9.2.4 Polar 信道编码

9.2.5 网络架构上的一些技术

9.2.5.1 SDN/NFV（计算机网络里面会详细介绍）

SDN/NFV 是两种网络虚拟化技术，它们分别代表软件定义网络（Software Defined Networking，简称 SDN）和网络功能虚拟化（Network Function Virtualization，简称 NFV）。

SDN 是一种网络架构，它将网络控制平面（Network Control Plane）与数据转发平面（Data Forwarding Plane）分离，通过集中控制器（Controller）对整个网络进行集中管理和控制，从而提高网络的灵活性、可编程性和可管理性。

NFV 是一种虚拟化技术，它将网络功能（Network Function）转化为软件模块，通过虚拟化技术在普通服务器上实现网络功能，从而提高网络的可扩展性、灵活性和成本效益。NFV 技术的核心是虚拟化平台和虚拟网络功能（Virtualized Network Function，简称 VNF），虚拟化平台负责管理虚拟化资源，VNF 则是一些虚拟化的网络功能模块，可以在虚拟化平台上部署、启动和运行。

SDN 和 NFV 的结合可以提供更为灵活和可编程的网络服务，可以实现网络的自动化管理、弹性伸缩和故障恢复等功能。它们已经广泛应用于云计算、5G 和物联网等领域，推动了网络的数字化转型和创新。

9.2.5.2 网络切片

网络切片（Network Slicing）是一种新型网络架构和管理技术，它可以将一些不同的网络功能、资源和服务划分为独立的、可定制的虚拟网络切片，以支持不同类型的应用程序和服务（例如 eMBB 需求就分配 eMBB 网络、uRLLC 需求就分配 uRLLC 网络、mMTC 需求就分配 mMTC 网络），从而提高网络的灵活性、可靠性和效率。网络切片的基本思想是将网络基础设施（如无线电接入、传输、计算和存储资源等）划分为多个独立的逻辑网络切片，每个切片可以根据具体需求进行不同的配置和管理。这些切片可以为不同的用户、应用程序和服务提供不同的网络质量、安全性、可靠性和服务水平等级，从而实现更好的网络管理和资源利用。

9.2.5.3 边缘计算

边缘计算（Edge Computing）是一种分布式计算模型，它将计算资源和数据存储推向网络边缘（即靠近数据源或数据使用者的地方，例如车辆可以通过路边单元进行通信，而不是需要通过远处的基站进行通信），从而实现更快的数据处理和更低的延迟。

边缘计算将计算和存储资源部署在接近数据源的位置，可以在网络边缘解决传统云计算模型中存在的延迟和带宽瓶颈问题。在边缘计算模型中，计算和存储资源可以分布在多个设备、路由器、交换机、服务器等设备上。边缘计算可以处理来自多个传感器、物联网设备、移动设备等源的数据，并将数据聚合和分析，从而支持更广泛的应用场景，如自动驾驶、智能家居、智能工厂、物流管理等。

边缘计算有许多优点，如低延迟、更高的数据安全性、更高的可靠性、更好的带宽利用率等。因此，边缘计算已经成为人工智能、大数据分析、物联网等领域的热门话题，越来越多的企业和组织开始将边缘计算技术应用于自己的业务和产品中。

D2D（D2D, device-to-device communication）通信，顾名思义是 2 个终端设备不借助于其他设备直接进行通信的新型技术。D2D 具有潜在的减轻基站压力、提升系统网络性能、降低端到端的传输时延、提高频效率的潜力。

9.4 6G 潜在的关键技术

9.4.1 6G 概述

6G 的特征是超连接、更高速率与可靠性、更低时延、更宽覆盖、更加智能。6G 的发展愿景，就是全覆盖、全频谱、全应用、强安全。

全频谱，移动通信从第一代（1G）发展到第五代（5G），用来发送和接收的数字信息越来越多，越来越快，所以用的电磁波频率越来越高。到 6G，在深耕低频段、超低频段的同时，将向毫米波太赫兹和可见光等高频发展。根据目前的测算，如果用毫米波频段，移动传输速率将达到 5G 的 100 倍，达到 1TB/秒。到 6G 更高的频段，全频谱是非常自然的。

全覆盖，现有的 4G、5G 覆盖地球表面的 7% 还不到，剩下没有信号覆盖的 93% 怎么办？靠卫星和地面网络的融合，我们叫星地融合，可以覆盖无边无际的沙漠海洋和人迹罕至的高山密林。实际上是靠地面的网络来解决容量问题，靠卫星来解决覆盖问题。两者有机的结合才真正能够满足全人类的需求。

全应用，5G 已经迈向全应用，6G 会派生出来一些更新的场景，比如数字孪生，在虚拟的数字空间中复制出现实世界，利用这个虚拟的数字城市、数字社区、数字物体，再借助人工智能等技术，做设计、做规划，做各种推演推算，让我们面对现实的选择不再纠结；远程全息无人智能系统，与远在万里之外的人面对面互动——不是互相在屏幕上看“大脸”，而是面对栩栩如生的全息 3D 立体影像。这些应用对于流量、时延的要求更高。

强安全：随着通信系统越来越复杂，就容易有漏洞被攻击，因此安全性问题也越来越重要

9.4.2 智能超表面技术

智能反射面（IRS）是一种全新的技术，它可以通过在平面上集成大量低成本的无源（不需要电源）反射元件，智能地重新配置无线传播环境，具体地说，IRS 的不同元件可以通过控制其幅度和/或相位来独立地反射入射信号，从而协同地实现用于定向信号增强，显著提高无线通信网络的性能。智能超表面和大规模 MIMO 类似，都是实现波束赋形的功能，但是 MIMO 是被动适应信道，而智能超表面是主动改变信道。很显然，MIMO 也可以和 RIS 结合起来使用。

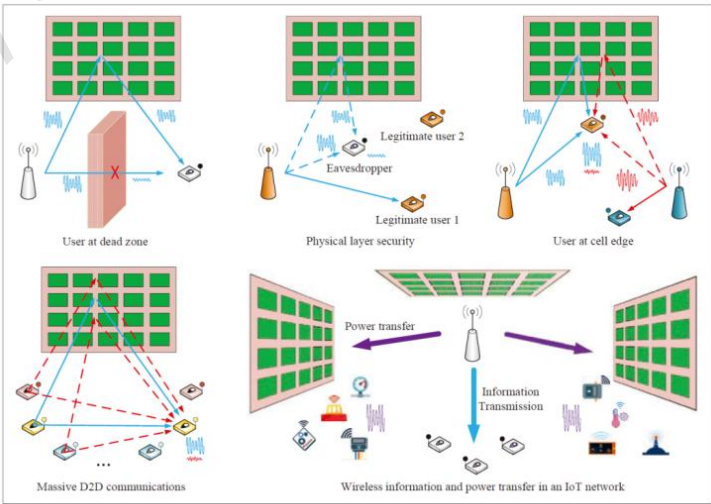


Figure 1. Typical IRS applications in wireless network.

应用一：当用户处于一个死角（dead zone）之时，适当地使用智能反射面，可以制造出一条反射路径，使得该用户仍能接收到信号。

应用二：展示 IRS 用于改进物理层安全性的使用。当从 BS 到窃听器的链路距离小于到合法用户（例如，用户 1）的链路距离时，或者 qietingqi 位于与合法用户（例如，用户 2）相同的方向时，可实现的保密通信速率高度受限（即使在后一种情况下通过在 BS 处采用发射波束成形）。然而，如果 IRS 部署在窃听器附近，则 IRS 反射的信号可以被调谐以抵消来自窃听器处的 BS 的（非 IRS 反射的）信号，从而有效地减少信息泄漏。

应用三：当用户位于小区边缘时，本小区的基站信号衰减严重，同时还会受到邻小区的信号干扰。那么通过设计智能反射面，可以增强本小区的信号，并减弱邻小区的干扰。

应用四：大规模设备到设备（D2D）通信的使用场景。多个装置之间互相通信，相当于多个发送端和多个接收端同时通信，显然互相会有干扰，通过设计智能反射面可以尽可能消除干扰信号，增强正确信号。

应用五：展示 IRS 在物联网（IoT）网络中实现对杂项设备的同时无线信息和功率传输（SWIPT）的应用，其中，IRS 的大孔径被用来补偿通过无源波束形成到附近物联网设备的远距离显著功率损失，以提高向其无线功率传输的效率。

9.4.3 非正交多址技术

非正交多址技术（Non-orthogonal multiple access，简称 NOMA）是一种无线通信技术，它允许多个用户同时使用相同的频谱资源进行通信。与传统的正交多址技术（Orthogonal multiple access，简称 OMA）不同，NOMA 允许多个用户 **共享相同的频带，并使用相同的时间和频率资源**，通过不同的信号强度或码率进行区分。

9.4.4 通信感知一体化

通信感知一体化是 6G 潜在关键技术的研究热点之一，顾名思义，就是**未来电磁波在通信的基础上还具有感知的能力**。例如通过收集和分析经过散射、反射的通信信号获得环境物体的形态、材质、远近和移动性等基本特性。

高精度定位和追踪：从散射和反射信号中估算时延、多普勒和角度谱息，对应物体的距离、速度和角度，以估算出目标设备位置。通过进一步信号处理，还可以提取坐标、朝向、速度和其他物理三维空间的几何信息。实现对物体的定位，进而实现跟踪的功能。这个可以用于工业场景，例如机器人把货物放到相应的货架。

成像、地图构建和环境重构：由物体的基本特性就可以实现物体的成像，通过成像可捕捉周围环境的图像，通过定位可获取周边物体的位置，再利用这些图像、位置来构建地图，而构建出的地图又反过来提升位置推理能力。

人类感官增强：利用穿透（电磁波）和成像能力，通过在便携式设备上人类就可以实现非视距成像

手势和动作识别：在智能家居中，通过通信的感知能力，家居就可以识别到你的手势和动作，就可以很方便地进行各种远程控制。在医疗康复领域，也能检测不正确的姿势。

9.4.5 太赫兹、光通信技术

太赫兹频段（0.1~10THz）位于微波与光波之间，**频谱资源极为丰富**，具有**传输速率高、抗干扰能力强和易于实现通信探测一体化等特点**，重点满足 Tbps 量级大容量、超高传输速率的系统需求。太赫兹通信可作为现有空口传输方式的有益补充，将主要应用在全息通信、微小尺寸通信（片间通信及纳米通信）、超大容量数据回传、短距超高速传输等潜在应用场景。同时，借助太赫兹通信信号进行高精度定位和高分辨率感知也是重要应用方向。

与毫米波相比，太赫兹波的频率选择性更强，散射效应更明显，传输损耗也更大。与光波相比，太赫兹波的路径损耗更小，波动性和反射能量更强，被阻挡的可能性也更低。

可见光通信指利用从 400THz 到 800THz 的超宽频谱的高速通信方式，具有无需授权、高保密、绿色和无电磁辐射的特点。可见光通信比较适合于室内的应用场景，可作为室内网络覆盖的有效补充，此外，也可应用于水下通信、空间通信等特殊场景以及医院、加油站、地下矿场等电磁敏感场景。当前大部分无线通信中的调制编码方式、复用方式、信号处理技术等都可应用于可见光通信来提升系统性能，可见光通信的主要难点在于研发高带宽的 LED 器件和材料，虽然可见光频段有极其丰富的频谱资源，但受限于光电、电光器件的响应性能，实际可用的带宽很小，如何提高发射、接收器件的响应频率和带宽是实现高速可见光通信必须解决的难题。此外，上行链路也是可见光通信面临的重要挑战，通过与其他通信方式的异构融合组网是解决可见光通信上行链路的一种方案。

10 结语

本笔记到此结束，希望能帮助大家少走一些弯路。关键技术部分文字比较多，大家了解概念即可。