

由香农公式所表征的信道容量跟哪些因素相关？有效提高信道容量的方法可能有哪些？

【香农公式】

在被高斯白噪声干扰的信道中，计算最大信息传送速率 C 公式：

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

B 是信道带宽（赫兹），S 是信道内所传信号的平均功率（瓦），N 是信道内部的高斯噪声功率（瓦）。

【奈奎斯特定律】

1. 在任何信道中，**码元传输的速率是有上限的**。若传输速率超过此上限。就会出现严重的**码间串扰**问题（指在接收到的信号的波形失去了码元之间的清晰界限），接收端不可能正确识别码元。
2. 信道的**频带越宽**（即能通过的信号高频分量越多），就可以用更高的速率进行码元的有效传输。
3. 奈氏准则给出了码元传输速率的限制，但**并没有对信息传输速率给出限制**，也就是说没有对一个码元可以对应多少个二进制位作出限制。
4. 由于码元的传输速率受奈氏准则的制约，所以要提高数据的传输速率，就必须设法使每个码元能携带更多个比特的信息量，这就是需要采用**多元制的调制方法**。

【通信信道 vs 数字信道】

1. 通信信道中 (Hz)，能通过信道的最高频率和最低频率的差值 (Bandwidth)。

电子电路中，不管哪种类型的电容、电感（导线自身是电感，导线之间是分布电容）都会阻滞信号消耗能量，且与信号频率成正比。带宽：指电路可以保持稳定工作的频率范围。包括显示器带宽、通讯带宽等。

总线：并行、串行。

并行(no)：信号间干扰，频率越高、位宽越大，干扰越严重。

串行(yep)：不存在信号间干扰，可以凭借高频率获得高带宽。改进：多条管线（相互独立

的并行) 带宽=总线频率*管线数。

2. 数字信道中 (bps), 我们常常用信道能够达到的最大数据速率来表示数字信道的带宽。包括内存带宽、总线带宽等。带宽=工作频率*位宽。

【SNR 信噪比 (Signal-Noise Ratio)】

如: $S/N=1000$ (即, 信号功率是噪声功率的 1000 倍)
常以分贝 (dB) 为单位。公式如下:

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{S}{N}$$

换算一下:

$$\frac{S}{N} = 10^{\frac{SNR}{10}}$$

最早使用的拨号上网方式都离不开调制解调器。调制解调器的标称速度为 56kbps, 但实际网络传输的速度都远低于 56kbps。究其原因就会发现瓶颈在电话线上。

可以用香农公式来计算电话线的数据传输速率。

通常音频电话连接支持的带宽 $W=3\text{kHz}$, 而一般链路典型的信噪比是 30dB, 即 $S/N=1000$, 因此有 $C=3000 \times \log_2(1+1000)$, 近似等于 30kbps, 因此要提高速率就必须提高信噪比。

香农公式给出了信道容量的极限。在卷积编码条件下, 实际信道容量离香农极限还差 3dB; 在 Turbo 编码的条件下, 接近了香农极限。

香农定理可以变换一下形式成为

$$\frac{C}{B} = \log\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

C/B : 单位带宽的容量 (业务速率) (频谱利用率), 也就是说香农定理给出了一定信噪比下频率利用率的极限。

【信道容量影响因素】

1. 信道带宽

1.1. 合理的编码调制等级

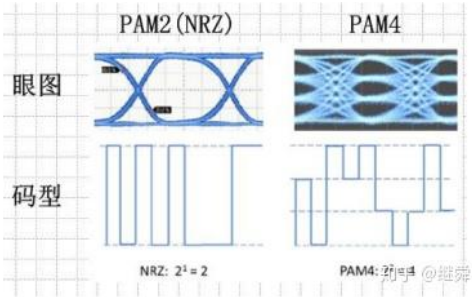
QAM（正交振幅调制）：一种将两种调幅信号（2ASK 和 2PSK）汇合到一个信道的方法，因此会双倍扩展有效带宽。两个相同频率的载波，但是相位相差 90 度，利用这种已调信号的正交性，实现两路并行的数字信息的传输。

不同调制	Bits/符号位/ Polarization	Bits/符号位 倍数	Polarization 极化倍数	总倍数	符号位/极化 举例
OOK	2^0	1	1	1X	0
BPSK	2^0	1	2	2X	0
QPSK	2^1	2	2	4X	01
8 QAM	2^3	3	2	6X	010
16 QAM	2^4	4	2	8X	0101
32 QAM	2^5	5	2	10X	01010
64 QAM	2^6	6	2	12X	010101
128 QAM	2^7	7	2	14X	0101010
256 QAM	2^8	8	2	16X	01010101

随着调制等级的提高，总倍数的增加速率放缓。QAM 等级越高，高阶 QAM 信号对噪声越敏感，可靠性下降，它能够传输的距离也就越短。

1.2. PAM4（脉冲幅度调制）编码

PAM4 使用前向纠错（FEC）来提升传输速率，前向纠错是一种通过提供恒定的纠错数据流来纠正链路中信号错误的方法，因此不需要进行重传。4 个幅度的脉冲幅度调制方式，在不增加带宽需求的情况下将传输数据量翻倍。



NRZ：NRZ 信号：表示 0 和 1 比特的线路编码。正电压代表 1，等效负电压代表 0。

PAM4：这是一种使用脉冲幅度调制技术的线路编码。PAM4 信号有四个电压电平。

如果符号率为 28Gbaud，则表示每秒传输 56Gb。

1.3. 多模（MM）

1.4. 单模（SM）

1.5. 并行单模（PSM）

1.6. 粗波分复用（CWDM）

1.7. 密集波分复用（DWDM）

1.8. ADSL

2. 系统信噪比

2. 1. 选用最佳的调制解调器（MODEM）

为什么需要调制解调器？数模转换：（计算机）数字信号——（电话线）脉冲信号/模拟电信号——数字信号。

信号采集系统本身也会产生噪声，例如上文提到的电子元件中的热噪声、散粒噪声等等。这些噪声没办法屏蔽的。但这些噪声在不同频率上的强度不同。好的 MODEM 可以把原始信号尽量移动到噪声强度低的频率上去，最大限度避开噪声。

在对解调器输出端有同样质量要求（相同的差错率）时，对信噪比的要求移相比移频低（好），移频又比移幅低，相干检测比非相干检测低，采用信道编译码比不采用的低。

2.2. 移除或屏蔽干扰源

大型射电天文台（例如 FAST）要挑选在人烟稀少的深山老林里面，还要设立无线电静默区。



采用光缆、同轴电缆、双绞线以减少传输损耗和噪声。

同轴电缆：可以在相对长的无中继器的线路上支持高带宽通信。

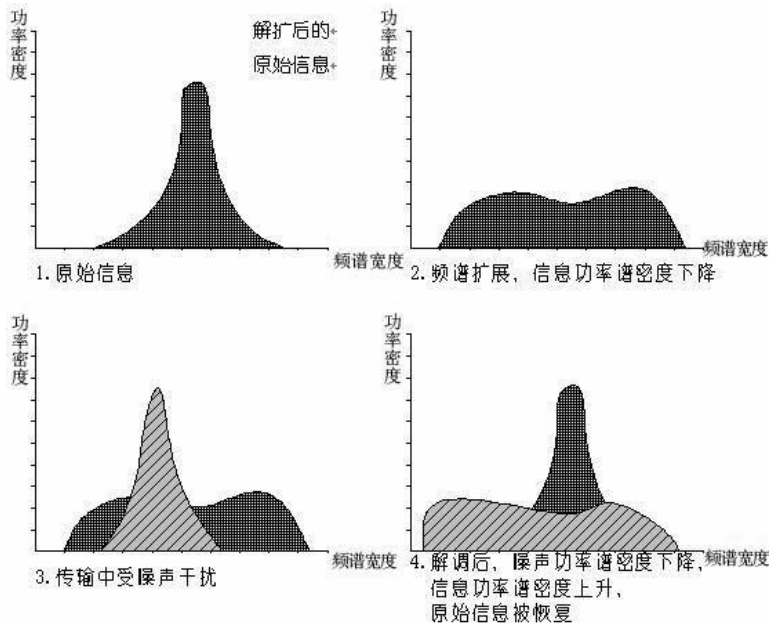
双绞线：每一根导线在传输中辐射出来的电波会被另一根线上发出的电波抵消，有效降低信号干扰的程度。



同轴线缆

[扩频通信]（Spread Spectrum Communication）技术

用扩频方法以宽带传输信息来换取信噪比上的好处（当带宽增加到一定程度，允许信噪比进一步降低，有用信号功率接近噪声功率甚至淹没在噪声之下也是可能的）。



在发端输入的信息先经信息调制形成数字信号, 然后由扩频码发生器产生的扩频码序列去调制数字信号以展宽信号的频谱。展宽后的信号再调制到射频发送出去。

在接收端收到的宽带射频信号, 变频至中频, 然后由本地产生的与发端相同的扩频码序列去相关解扩。再经信息解调、恢复成原始信息输出。

由此可见, 一般的扩频通信系统都要进行三次调制和相应的解调。一次调制为信息调制, 二次调制为扩频调制, 三次调制为射频调制, 以及相应的信息解调、解扩和射频解调。

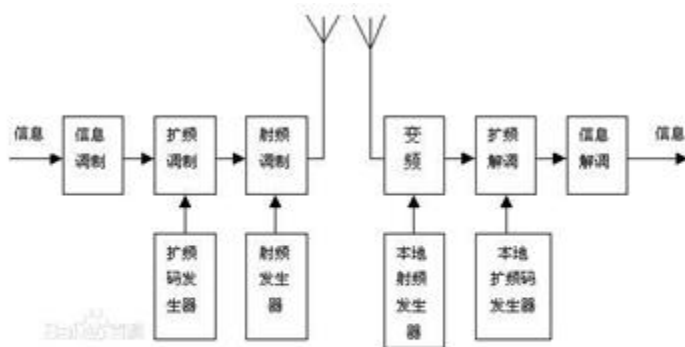


图 2 工作原理

MIMO (Multi-Input & Multi-Output, 多输入多输出)

多进多出 (MIMO) 是为**极大地提高信道容量**, 在发送端和接收端都使用多根天线, 在收发之间构成多个信道的天线系统, 是一种相当复杂的天线分集技术。

具有极高的频谱利用效率, 利用**空间资源**来获取可靠性与有效性两方面增益, 其代价是增加了发送端与接收端的处理复杂度。

发送天线数为 m ，接收天线数是 n ，则在每个天线发送信号能够被分离的情况下，有如下信道容量公式：

$$C = m \times \log_2 \left(\frac{n}{m} \times SNR \right), n \geq m$$