MSK 调制解调

一、MSK 调制解调原理

MSK 称为最小移频键控，是移频键控（FSK）的一种改进型。这里“最小”指的是能以最小的调制指数（即 0.5）获得正交信号，它能比 PSK 传送更高的比特速率。“最小”：要实现单边带调频调制就必须保证不同码元对应不同频率，而且两个频率信号之间的正交关系。利用两个频率的信号是正交的（即内积为 0）关系就可以得出两个频点频偏最小值为 1/2 码速率。“更高”也是基于“最小”来说的。对于给定的频带，MSK 调制的码速率比 PSK 高。

MSK 信号是一种相位连续、包络恒定并且占用带宽最小的二进制正交 FSK 信号。它的第 k 个码元可以表示为：

$$S_{msk}(t)=\cos\left(\omega_c t+\frac{\pi a_k}{2T_s}t+\phi_k\right)$$

其中，ω_c ——载波角频率；

Ts——码元宽度；

a_k ——第 k 个码元中的信息；

φ_k——第 k 个码元的相位常数；

当 $a_k=+1$ 时，信号的频率为：$f_2=f_c+\frac{1}{4Ts}$ ；

当 $a_k=-1$ 时，信号的频率为：$f_1=f_c-\frac{1}{4Ts}$ ；

由此可得频率之差为：$\Delta f=f_2-f_1=\frac{1}{2Ts}$ 。

MSK 信号具有特点如下：①MSK 信号是正交信号；②其波形在码元间是连续的；③其包络是恒定不变的；④其附加相位在一个码元持续时间内线性地变化；⑤在一个码元持续时间内含有的载波周期数等于 1/4 的整数倍。

那么 MSK 信号波形如图 1-1 所示：

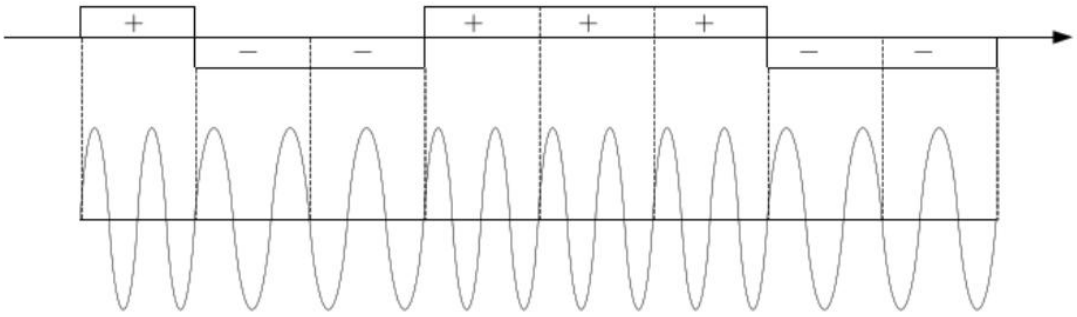


图 1-1 MSK 信号波形

为了保持相位连续，在 $t=kTs$ 时间内应有下式成立：

$$\varphi_k=\varphi_{k-1}+(a_{k-1}-a_k)\left(\frac{\pi}{2}(k-1)\right)$$

即：当 $a_k=a_{k-1}$ 时，$\varphi_k=\varphi_{k-1}$；当 $a_k\neq a_{k-1}$ 时，$\varphi_k=\varphi_{k-1}\pm(k-1)\pi$；

若令 $\varphi_0=0$ 时，则 $\varphi_k=0$ 或 $\pm\pi$，此式说明本比特内的相位常数不仅与本比特区间的输入有关，还与前一个比特区间内的输入即相位常数相关。

$$S_{MSK}(t)=\cos\left(\omega_c t+\frac{\pi a_k}{2Ts}t+\varphi_k\right)$$

$$=\cos\varphi_k\cos\left(\frac{\pi}{2Ts}t\right)\cos\omega_c t-a_k\cos\varphi_k\sin\left(\frac{\pi}{2Ts}t\right)\sin\omega_c t$$

令 $\cos\varphi_k=I_k$，$-a_k\cos\varphi_k=Q_k$

则：$S_{MSK}(t)=I_k\cos\left(\frac{\pi}{2Ts}t\right)\cos\omega_c t+Q_k\sin\left(\frac{\pi}{2Ts}t\right)\sin\omega_c t$

为了便于理解，如图 1-2 所示：

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
a_k	−1	−1	+1	−1	+1	+1	+1	−1	+1	+1	+1	−1	−1	−1	+1	+1	+1	−1	+1	+1	−1	−1	+1	+1	−1
d_k	−1	+1	+1	−1	−1	−1	−1	+1	+1	+1	+1	−1	+1	−1	−1	−1	−1	+1	+1	+1	−1	+1	+1	+1	−1
φ_k	0	0	0	π	π	π	π	0	0	0	0	π	π	π	π	π	π	0	0	0	0	0	0	0	0
$\cos\varphi_k$	+1	+1	+1	−1	−1	−1	−1	+1	+1	+1	+1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
$a_k\cos\varphi_k$	−1	−1	+1	+1	−1	−1	−1	−1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	−1	−1	−1	−1	+1	+1	−1	−1	+1	+1	−1

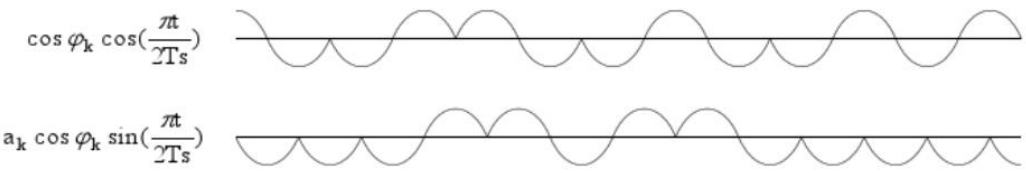


图 1-2 码元变换及成形信号波形图

其同向分量成为 I 之路，即为：

$$x_I(t) = \cos\phi_k \cos[\frac{\pi t}{2T_s}]\cos\omega_c t$$

其正交分量成为 Q 之路，即为：

$$x_Q(t) = a_k \cos\phi_k \sin[\frac{\pi t}{2T_s}]\sin\omega_c t$$

其中， $\cos[\frac{\pi t}{2T_s}]$和$\sin[\frac{\pi t}{2T_s}]$称为加权函数。

如图所示为 MSK 信号调制器原理图。图中，输入二进制数据序列经差分编码和串/病变换后，I 之路信号经 $\cos[\frac{\pi t}{2T_s}]$ 加权调制和同相载波 $\cos\omega_c t$ 相乘输出同相分量 $x_I(t)$。Q 支路信号先延迟 Ts，经 $\sin[\frac{\pi t}{2T_s}]$ 加权调制和正交载波 $\sin\omega_c t$ 相乘输出正交分量 $x_Q(t)$。$x_I(t)$ 和 $x_Q(t)$ 相减就可得到已调 MSK 信号。

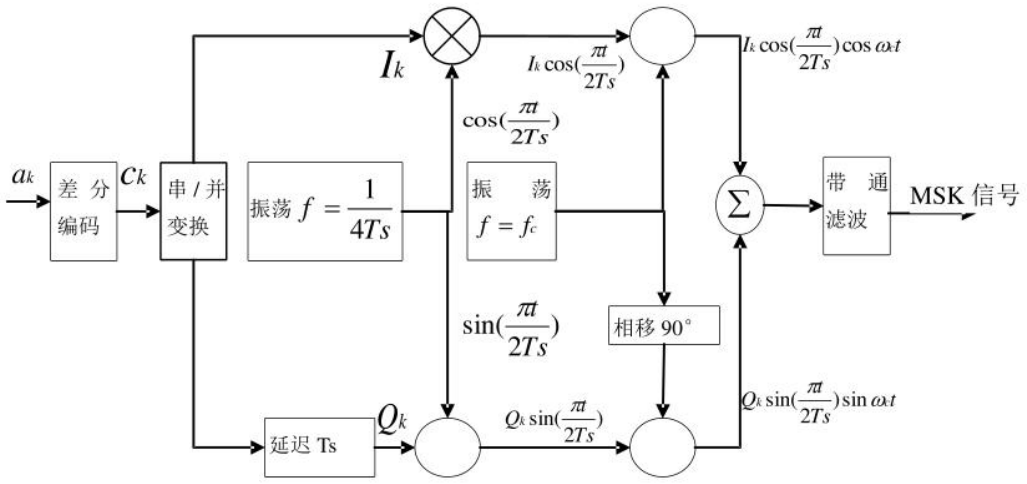


图 1-3 MSK 信号调制器原理图

MSK 信号属于数字频率调制信号，因此 可以采取一般鉴频方式进行解调，其原理如图所示。鉴频器解调方式结构简单，容易实现。

MSK 信号的解调与 FSK 信号相似，可以采用相干解调，也可以采用非相干解调方式。

已知： $S_{MSK}(t) = I_k \cos(\frac{\pi}{2Ts}t)\cos\omega_c t + Q_k \sin(\frac{\pi}{2Ts}t)\sin\omega_c t$

把该信号进行正交解调得到：

$$I_k\text{路}[I_k\cos(\frac{\pi}{2Ts}t)\cos\omega_c t+Q_k\sin(\frac{\pi}{2Ts}t)\sin\omega_c t]\cos\omega_c t$$

$$=\frac{1}{2}I_k\cos(\frac{\pi}{2Ts}t)+\frac{1}{4}I_k\cos\left[(2\omega_c+\frac{\pi}{2Ts})t\right]+\frac{1}{4}I_k\cos\left[(2\omega_c-\frac{\pi}{2Ts})t\right]$$

$$-\frac{1}{4}Q_k\cos\left[(2\omega_c+\frac{\pi}{2Ts})t\right]+\frac{1}{4}Q_k\cos\left[(2\omega_c-\frac{\pi}{2Ts})t\right]$$

$$Q_k\text{路}[I_k\cos(\frac{\pi}{2Ts}t)\cos\omega_c t+Q_k\sin(\frac{\pi}{2Ts}t)\sin\omega_c t]\sin\omega_c t$$

$$=\frac{1}{2}Q_k\sin(\frac{\pi}{2Ts}t)+\frac{1}{4}I_k\sin\left[(2\omega_c+\frac{\pi}{2Ts})t\right]+\frac{1}{4}I_k\sin\left[(2\omega_c-\frac{\pi}{2Ts})t\right]$$

$$-\frac{1}{4}Q_k\sin\left[(2\omega_c+\frac{\pi}{2Ts})t\right]+\frac{1}{4}Q_k\sin\left[(2\omega_c-\frac{\pi}{2Ts})t\right]$$

我们需要的是$\frac{1}{2}I_k\cos(\frac{\pi}{2Ts}t)$、$\frac{1}{2}Q_k\sin(\frac{\pi}{2Ts}t)$两路信号，所以必须将其它频率成份$(2\omega_c+\frac{\pi}{2Ts})$、$(2\omega_c-\frac{\pi}{2Ts})$通过低通滤波器除掉，然后对$\frac{1}{2}I_k\cos(\frac{\pi}{2Ts}t)$、$\frac{1}{2}Q_k\sin(\frac{\pi}{2Ts}t)$采样即可还原成$I_k$、$Q_k$两路信号。

根据上面描述可构成一种 MSK 解调器，其方框图如图所示：

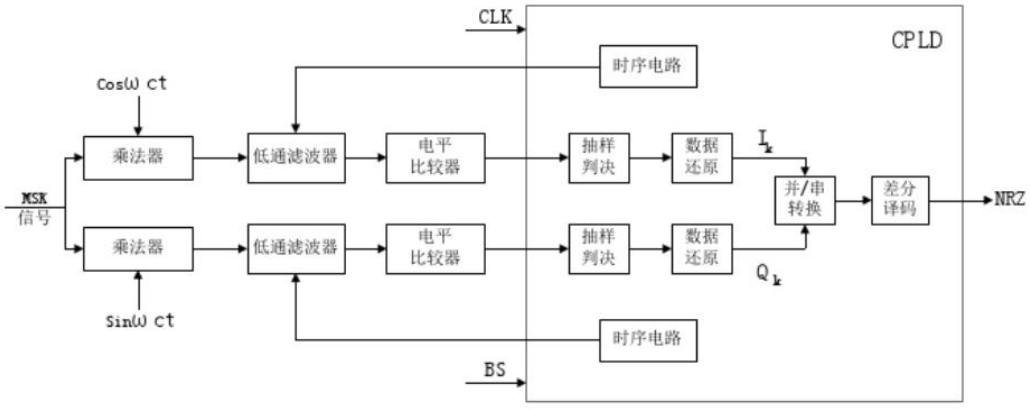


图 1-4 MSK 解调原理框图

将得到的 MSK 调制信号正交解调，通过低通滤波器得到基带成形信号，并对由此得到的基带信号的波形进行电平比较得到数据，再将此数据通过 CPLD 的数字处理，就可解调得到 NRZ 码。

在实际系统中，相干载波是通过载波同步获取的，相干载波的频率和相位只有和调制端载波相同时，才能完成相干解调。由于载波同步不是本实验的研究内

容，因此在本模块中的相干载波是直接从调制端引入，因此解调器中的载波与调制器中的载波同频同相。

二、仿真实现过程

在仿真时先设置输入信号的参数：载波频率 fc 调制后，数字信号速率 fd，模拟信号采样率 fs。之后产生要调制额随机数字信号 x；然后用 dmod 函数进行调制，产生调制信号。dmod 函数是 MATLAB 中一个常用来进行信号调制的函数，它后面的参数包括被调制信号，载波信号的频率，输出信号的速率以及采样速率和所进行调制的函数。

部分程序代码和仿真如下所示：

```
M=2;                          %定义输入随机信号的参数
fc=20;                        %载波信号的频率 fc 为 20
fd=10;                        %输出信号的速率 fd 为 10
fs=200;                       %采样速率 fs 为 200
x=randint(1,10000);           %产生随机的输入序列
y=dmod(x,fc,fd,fs,'msk');     %对用 dmod 函数对输入的随机序列进行解调
```

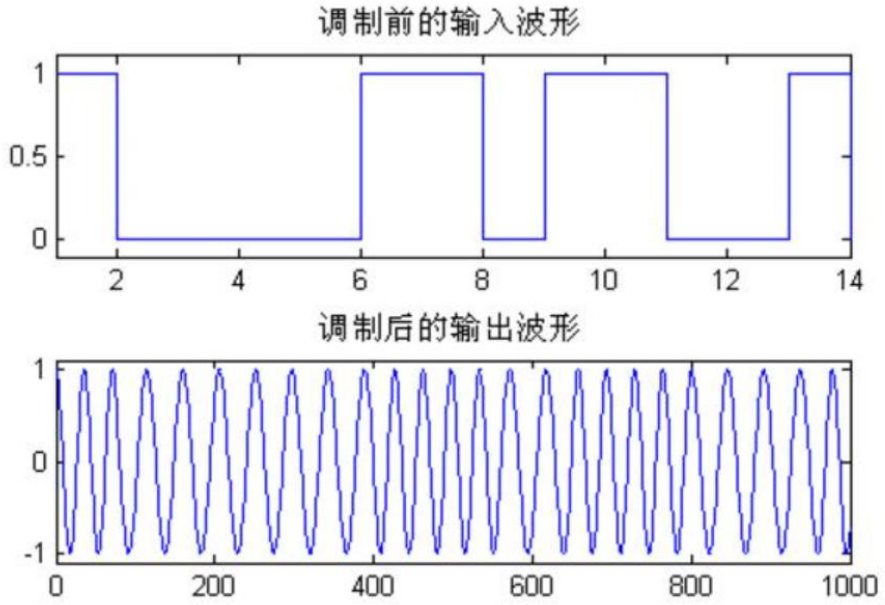


图 2-1　MSK 调制信号的波形

由调制波形图可以看出 MSK 的调制信号特性与 2FSK 调制信号的特性非常的相似，即：当输入信号为“1”时，调制后的波形比输入信号为“0”

时的波形要密。同时 MSK 信号的包络是恒定的，相位则是连续的。带宽相对于一般的 2FSK 信号要小，而且正交。

由于 MSK 信号是最小二进制 FSK 信号，所以它可以采用解调 FSK 信号的相干法和非相干法解调。在进行程序仿真时，用 ddemod 函数进行调制信号的解调。同时画出解调前后的时域与频域的波形图。在画频域的波形图时先对已调信号与解调信号进行 DTFT 变换，之后画出相应的波形。ddemod 函数是与 dmod 函数相对应，用来对已调信号进行解调的。其后面的参数与 dmod 函数后的一模一样。

部分程序与仿真波形图如下所示：

z=ddemod(y,fc,fd,fs,'msk');%对调制后的 MSK 信号进行解调

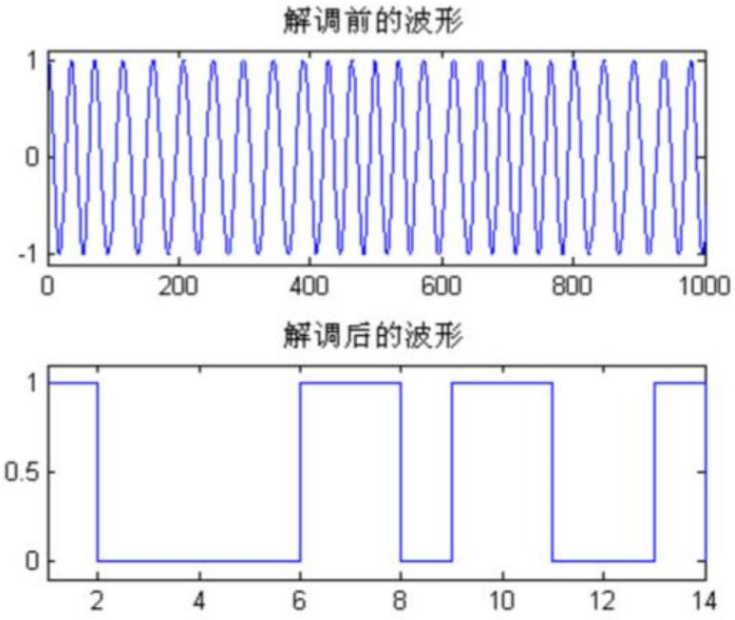


图 2-2 MSK 信号解调波形

由解调信号的时域波形可以看出，解调后的波形与原始输入信号的波形完全一致。同时不难发现解调后的信号很稳定。

```
n1=1:1:length(y);
w=[0:1:1000]*pi/500;
n2=1:1:10000;
w=[0:1:1000]*pi/500;
Y=y*exp(-j*n1'*w);
```

Z=z*exp(-j*n2'*w);

magY=abs(Y);

magZ=abs(Z);

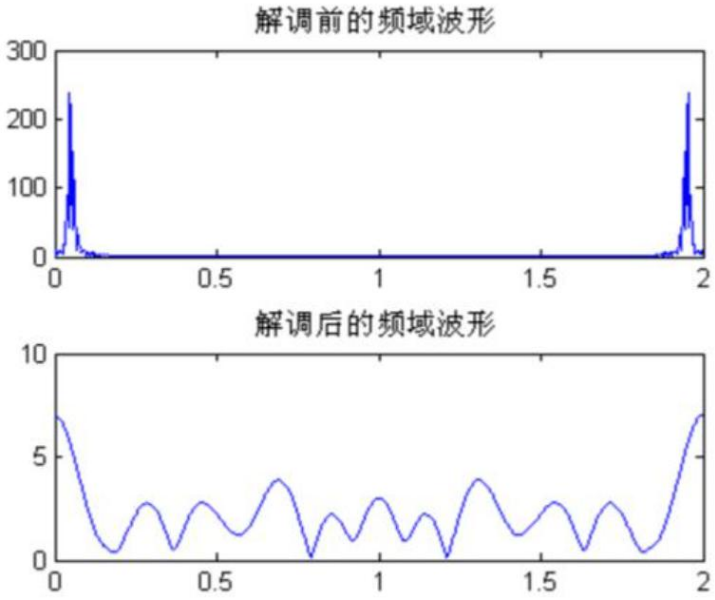


图 2-3 MSK 信号解调前后的频域波形

由解调后的频域波形可以看出 MSK 信号的稳定性很好，说明 MSK 信号的抗噪声性能很强。

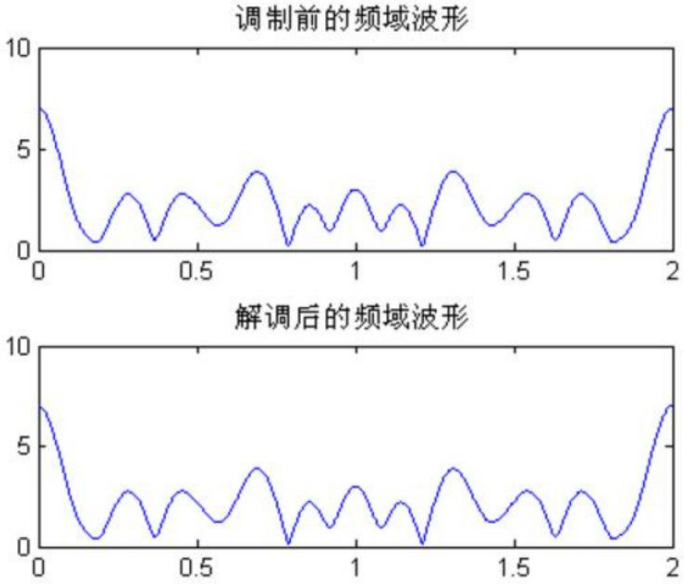


图 2-4 调制前解调后的频域波形

通过调制前和解调后的频域波形比较，发现解调非常的成功，波形被完整无误的输出来。

由于信号在传输的过程中难免要受到外来噪声的影响，所以在进行通信仿真时务必要在理想的模拟通信系统中加入高斯白噪声对系统进行影响，以此来判断一个通信系统抗噪声性能的好坏。

我利用 awagn 函数对已调信号加入信噪比为 0.001 的高斯白噪声。然后对加入了噪声的已调信号进行解调，同时画出其时域与频域的波形，将其与没有加噪声的调制信号进行比较，不难发现：加入噪声后对已调信号的影响很大，但对解调信号而言，噪声对解调后的影响还是有一定限度的。这说明 MSK 解调系统的抗噪声性能很强。

仿真的部分程序与相应的仿真波形图如下所示：

```
y1=awgn(y,0.001);
z1=ddemod(y,fc,fd,fs.'msk');
[num1,ratio]=symerr(x,z2)
```

通过 symerr 函数对解调信号的误码率进行测定，得到的误码率为 0.0024.因为输入的随机序列长度为 10000，错了 24 个。说明 MSK 信号的抗噪声性能很强。当将信噪比变为 1 时，输出的误码率很快发生了变化，由原来的 0.0024 变为了 6.0000e-004.图形也同时发生了变化。通过图形的比较，可以发现噪声对调制信号的影响很大，但通过解调后影响相对减小了很多。

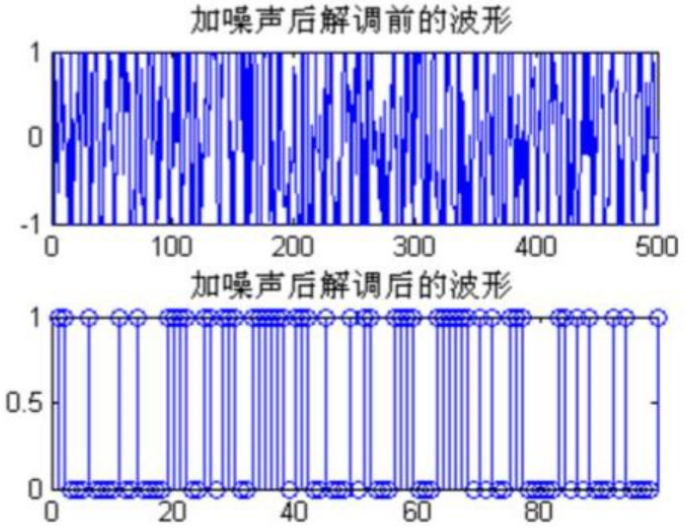


图 2-5 信噪比为 0.001 的 MSK 信号加噪声解调前后的时域波形

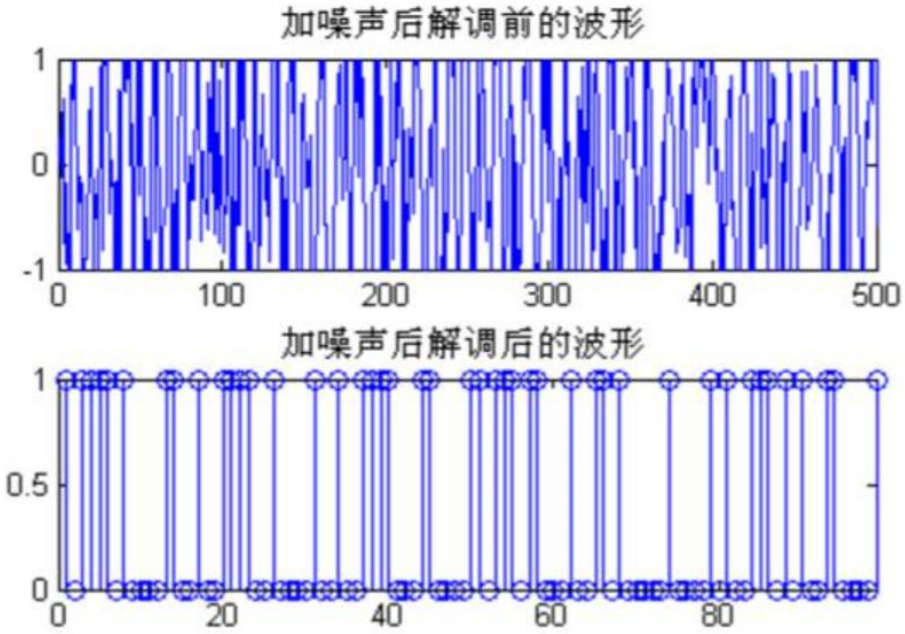


图 2-6 信噪比为 1 的 MSK 信号加噪声解调前后的时域波形

```
Y1=y1*exp(-j*n1'*w);
Z1=z1*exp(-j*n2'*w);
magY1=abs(Y1);
magZ1=abs(Z1);
```

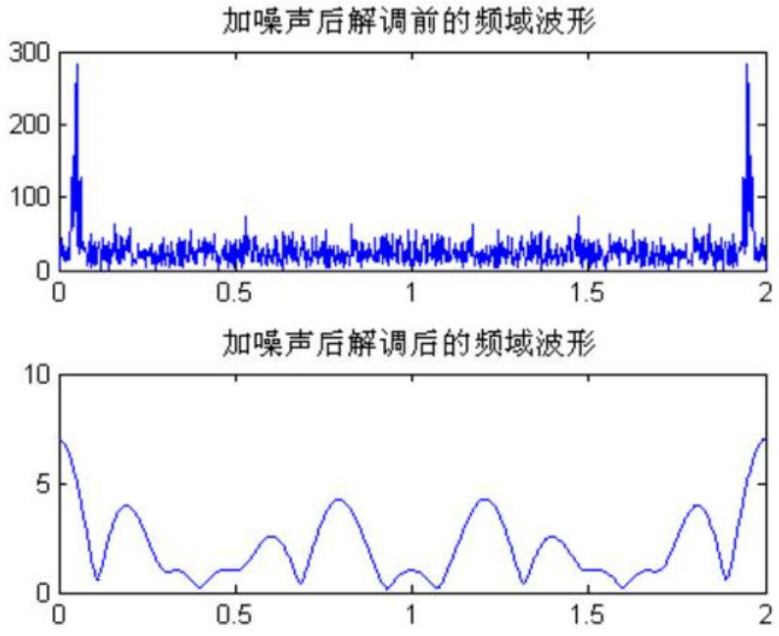


图 2-7 信噪比为 2 的 MSK 信号加噪声解调前后的时域波形

在多次改变信噪比后，将信噪比与误码率联合做了如图 2-8 所式。

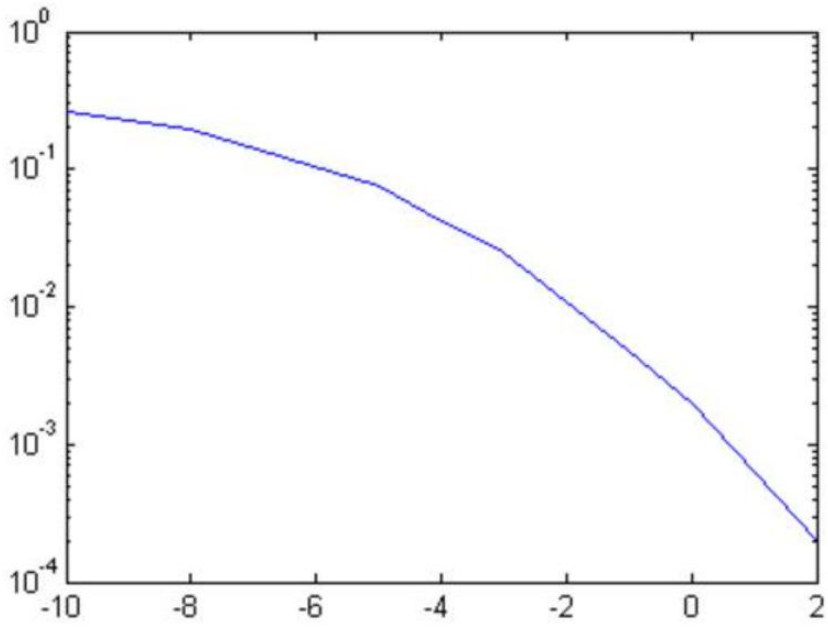


图 2-8 信噪比与产生误码率曲线图

通过图形可知，随着系统信噪比的增加，解调后输出的误码率随之减小，当信噪比增加到一定程度时，误码率变为 0。说明噪声对信号的影响在一定程度上是可以减小，但很难消除，因为每一个系统都不可能是理想系统，总会受到外界的干扰。

在设计程序时由于一开始使用的不是随机序列，同时 MSK 信号的抗噪声性能很强，当输入的是有限个序列时，很难判断出噪声对信号的影响。所以在加入噪声后再进行解调时根本就无法发现噪声对信号的影响。利用 randint 函数来产生 100 个随机序列，然后再在调制好了的信号上加入高斯白噪声，之后对调制信号解调。这样发现噪声对信号的一点点影响。

在画解调信号前后的频域波形时，由于忽略了调制信号和解调后的信号长度不一致，所以只设置了一个参数 n1，当进行仿真画图时一直都无法画出来。重新添加了参数 n2，然后在进行 DTFT 转换后画图得到了正确的结果。

在加入高斯白噪声时，由于不清楚 awgn 这个函数，所以我一直按照参考书上的方法进行噪声的添加，但噪声却一直没有成功的添加。我通过 MATLAB 里的 help 帮我很快了解了 awgn 函数，后来成功加入噪声也是可想而知的了。