哈尔滨工业大学（深圳）

可见光通信实验报告

实验二：单载波调制-归零和非归零码

姓　　名　陈兴基

专　　业　通信工程

学　　号　190210303

日　　期　2022/4/22

实验二

一、实验原理

1. 数值仿真 BER

由于 OOK(On-and-Off Keying)调制方式实现方法简单，所以被广泛应用于强度调制/直接检测(Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD)的可见光通信系统中。OOK 调制有归零(Return Zero, RZ)码和非归零(None Return Zero, NRZ)码。在 NRZ 码中，比特“1”的发送持续时间/脉冲时间等于全部比特持续时间/码元时间。在 RZ 码中，比特“1”仅占用部分比特持续时间/码元时间，用一个工作周期(Duty Cycle)的占空比 $\gamma = 0.5$ 表示。比特“0”则由零幅度的光脉冲表示。图 1 展示了 OOK-NRZ 和 OOK-RZ，平均发射能量为 P_{avg} 的单映射比较图。OOK-NRZ 的包络由下式给出：

$$p(t) = \begin{cases} 2P_{avg} & for \quad t \in [0, T_b) \\ 0 & elsewhere \end{cases}$$

其中 P_{avg} 是平均能量，T_b 是比特持续时间/码元时间。

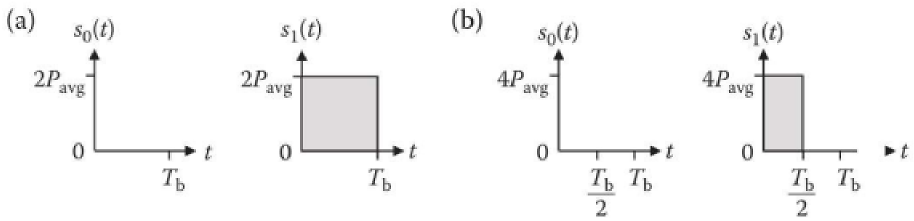


图 1. OOK 的传输波形 (a) NRZ 和 (b) RZ ($\gamma = 0.5$)

2. 理论解析 BER

可见光的噪声双边功率谱密度(Double-Sided Power Spectral Density)为：

$$\frac{N_o}{2} = qI_B$$

其中，q 是电子电荷量，I_B 是背景灯光产生的平均光电流。

在等概率情况下，比特“1”和比特“0”的概率是：$P(0)=P(1)=0.5$。最优的门限点是：

$$i_{th}=0.5I_P$$

其中，I_P 是峰值光电流。

条件错误概率为：

$$P_e=Q(\frac{i_{th}}{\sigma})$$

其中，$Q(\cdot)$ 为 Q-function，标准差 $\sigma=\sqrt{\frac{N_o E_P}{2}}$，其中，$E_P$ 是峰值光能量。

接收端的检测信号可以建模为：

$$i(t)=\begin{cases} I_P+n(t) & \text{传输1} \\ n(t) & \text{传输0} \end{cases}$$

其中，$n(t)\sim(0,\sigma^2)$ 是由于环境光线造成的加性高斯白噪声。

在使用匹配滤波器(Matched filter)的情况下，上式可以表示为：

$$y_i=\begin{cases} E_P+n_i & \text{传输1} \\ n_i & \text{传输0} \end{cases}$$

已知每比特平均能量与峰值光能量的关系为 $E_b=\frac{E_P}{2}$，所以 OOK 的误码率公式为

$$P_{e\_bit\_OOK}=Q(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}})$$

在 OOK-NRZ 中，每比特平均能量：

$$E_b=2(RP_r^{\ 2})T_b$$

其中，光电探测器的灵敏度 $R=1$；P_r 是平均光功率；T_b 是比特持续时间。

在 OOK-RZ 中，工作周期参数 γ 提升了每比特的平均能量：

$$E_b=\frac{2(RP_r^{\ 2})T_b}{\gamma}$$

二、仿真实现

1. OOK-NRZ

```
clear all
close all

q=1.6e-19;
% Charge of Electron
Ib=202e-6;
% Background Noise Current + interfernce
N0=2*q*Ib;
% Noise Spectral Density （此处需要产生噪声功率谱密度：N0）
R=1;
% Photodetector responsivity
Rb=1e6;
% Bit rate
Tb=1/Rb;
% bit duration（此处需要计算比特时间：Tb）
sig_length=1e5;
% number of bits
nsamp=10;
% samples per symbol
Tsamp=Tb/nsamp;
% sampling time
EbN0=1:12;
% signal-to-noise ratio in dB.
SNR=10.^(EbN0./10);
% signal-to-noise ratio

% ********** Simulation of probability of errors. ************
for i=1:length(SNR)
    P_avg(i)=sqrt(N0*Rb*SNR(i)/(2*R^2));
    % average transmitted optical power
    i_peak(i)=2*R*P_avg(i);
    % Peak Electrical amplitude
    Ep(i)=i_peak(i)^2*Tb;
    % Peak energy (Energy per bit is Ep/2)
```

```
    sgma(i)=sqrt(N0/2/Tsamp);
    % noise variance (power spectral density related to
sampling time)
    %sgma(i)=i_peak(i)/sqrt(2)*sqrt(nsamp/(2*SNR(i)));
    pt=ones(1,nsamp)*i_peak(i);
    % transmitter filter
    rt=pt;
    % receiver filter matched to pt
    OOK=round(rand(1,sig_length));
    % OOK random signal generation （此处产生 OOK 信号：OOK）
    Tx_signal = reshape((pt.'*OOK),1,sig_length*nsamp);
    % Pulse shaping function (rectangular pulse)
    Rx_signal=Tx_signal+normrnd(0,sgma(i),1,sig_length*10);
    % received signal (此处编写在 AWGN 信道下接收信号代码
    % Rx_signal：接收信号=发送信号+噪声)
    MF_out=conv(Rx_signal,rt)*Tsamp;
    % matched filter output
    MF_out_downsamp=MF_out(nsamp:nsamp:end);
    % sampling at end of bit period
    MF_out_downsamp=MF_out_downsamp(1:sig_length);
    % truncation
    Eb=Ep(i)/2;
    % thresholding and demodulation (此处设置一个判决门限来解码
1 和 0，
    % 门限为每比特平均能量。)
    error1=sum(((MF_out_downsamp-Eb).*OOK)<0);
    error0=sum(((MF_out_downsamp-Eb).*(OOK-1))<0);
    ber(i)=(error0+error1)/sig_length;
    P(i)=(erfc(sqrt(Eb/N0)/sqrt(2)))/2;
    % bit error calculation（此处计算系统仿真数值误码率：ber）
end

figure;
semilogy(EbN0,ber,'b-*','linewidth',2);
hold on
semilogy(EbN0,P,'r-*','linewidth',2);
% analytical performance, Q-function（此处计算系统理论解析误码
率，并画图）
```

```
grid on
legend('数值解','解析解');
xlabel('Eb/No, dB');
ylabel('BER');
title('OOK-NRZ 调制 BER 曲线');
```

2. OOK-RZ

```
clear all
close all

q=1.6e-19;
% Charge of Electron
Ib=202e-6;
% Background Noise Current + interfernce
N0=2*q*Ib;
% Noise Spectral Density （此处需要产生噪声功率谱密度：N0）
R=1;
% Photodetector responsivity
Rb=1e6;
% Bit rate
Tb=1/Rb;
% bit duration（此处需要计算比特时间：Tb）
sig_length=1e5;
% number of bits
nsamp=10;
% samples per symbol
Tsamp=Tb/nsamp;
% sampling time
EbN0=1:12;
% signal-to-noise ratio in dB.
SNR=10.^(EbN0./10);
% signal-to-noise ratio

% ********** Simulation of probability of errors. ************
for i=1:length(SNR)
    P_avg(i)=sqrt(N0*Rb*SNR(i)/(2*R^2));
```

```
    % average transmitted optical power
    i_peak(i)=2*R*P_avg(i)/0.5;
    % Peak Electrical amplitude
    Ep(i)=i_peak(i)^2*Tb*0.5;
    % Peak energy (Energy per bit is Ep/2)
    sgma(i)=sqrt(N0/2/Tsamp);
    % noise variance (power spectral density related to
sampling time)
    % sgma(i)=i_peak(i)/sqrt(2)*sqrt(nsamp/(2*SNR(i)));
    pt=ones(1,nsamp/2)*i_peak(i);
    pt((nsamp/2+1):nsamp)=0;
    % transmitter filter
    rt=pt;
    % receiver filter matched to pt
    ooK1=round(rand(1,sig_length));
    ooK2=zeros(1,sig_length);
    ook=[ooK1;ooK2];
    OOK=reshape(ook,[1 sig_length*2]);
    % OOK random signal generation （此处产生 OOK 信号：OOK）
    Tx_signal=rectpulse(OOK,nsamp/2)*i_peak(i);
    % Pulse shaping function (rectangular pulse)
    Rx_signal=Tx_signal+normrnd(0,sgma(i),1,sig_length*nsamp);
    % received signal (此处编写在 AWGN 信道下接收信号代码
    % Rx_signal：接收信号=发送信号+噪声)
    MF_out=conv(Rx_signal,rt)*Tsamp;
    % matched filter output
    MF_out_downsamp=MF_out(nsamp/2:nsamp:end);
    % sampling at end of bit period
    MF_out_downsamp=MF_out_downsamp(1:sig_length);
    % truncation
    Eb=Ep(i)/2;
    % thresholding and demodulation (此处设置一个判决门限来解码
1 和 0,
    % 门限为每比特平均能量。)
    error=0;
    for K=1:sig_length
        if (MF_out_downsamp(K)>=Eb)&(ooK1(K)==0)
            error=error+1;
```

```
        end
        if (MF_out_downsamp(K)<Eb)&(ooK1(K)==1)
            error=error+1;
        end
    end
    ber(i)=error/sig_length;
    % bit error calculation（此处计算系统仿真数值误码率：ber）
end

figure;
semilogy(EbN0,ber,'b-*','linewidth',2);
hold on
P=qfunc(sqrt(SNR/0.5));
semilogy(EbN0,P,'r-*','linewidth',2);
% analytical performance, Q-function（此处计算系统理论解析误码
率，并画图）
grid on
legend('数值解','解析解');
xlabel('Eb/No, dB');
ylabel('BER');
title('OOK-RZ 调制 BER 曲线');
```

3. OOK-NRZ vs OOK-RZ

```
clear all
close all

q=1.6e-19;
% Charge of Electron
Ib=202e-6;
% Background Noise Current + interfernce
N0=2*q*Ib;
% Noise Spectral Density （此处需要产生噪声功率谱密度：N0）
R=1;
% Photodetector responsivity
Rb=1e6;
% Bit rate
```

```
Tb=1/Rb;
% bit duration（此处需要计算比特时间：Tb）
sig_length=1e5;
% number of bits
nsamp=10;
% samples per symbol
Tsamp=Tb/nsamp;
% sampling time
EbN0=1:12;
% signal-to-noise ratio in dB.
SNR=10.^(EbN0./10);
% signal-to-noise ratio

% ********** Simulation of probability of errors. ************
for i=1:length(SNR)
    P_avg(i)=sqrt(N0*Rb*SNR(i)/(2*R^2));
    % average transmitted optical power
    i_peak(i)=2*R*P_avg(i);
    % Peak Electrical amplitude
    Ep(i)=i_peak(i)^2*Tb;
    % Peak energy (Energy per bit is Ep/2)
    sgma(i)=sqrt(N0/2/Tsamp);
    % noise variance (power spectral density related to
sampling time)
    %sgma(i)=i_peak(i)/sqrt(2)*sqrt(nsamp/(2*SNR(i)));
    pt=ones(1,nsamp)*i_peak(i);
    % transmitter filter
    rt=pt;
    % receiver filter matched to pt
    OOK=round(rand(1,sig_length));
    % OOK random signal generation (此处产生 OOK 信号：OOK)
    Tx_signal = reshape((pt.'*OOK),1,sig_length*nsamp);
    % Pulse shaping function (rectangular pulse)
    Rx_signal=Tx_signal+normrnd(0,sgma(i),1,sig_length*10);
    % received signal (此处编写在 AWGN 信道下接收信号代码
    % Rx_signal：接收信号=发送信号+噪声)
    MF_out=conv(Rx_signal,rt)*Tsamp;
    % matched filter output
```

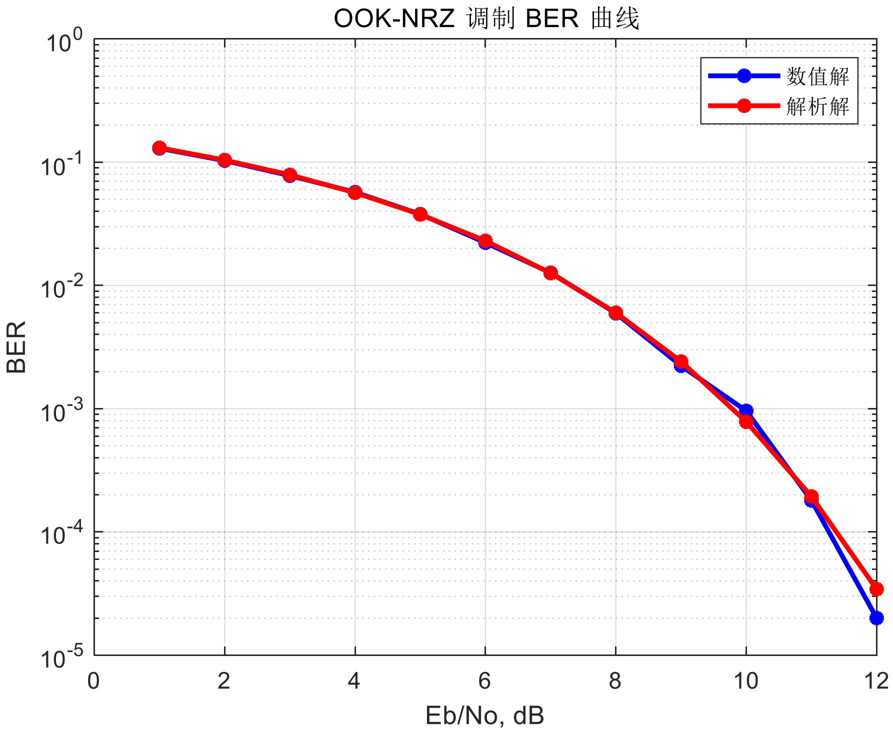
```
    MF_out_downsamp=MF_out(nsamp:nsamp:end);
    % sampling at end of bit period
    MF_out_downsamp=MF_out_downsamp(1:sig_length);
    % truncation
    Eb=Ep(i)/2;
    % thresholding and demodulation (此处设置一个判决门限来解码
1 和 0,
    % 门限为每比特平均能量。)
    error1=sum(((MF_out_downsamp-Eb).*OOK)<0);
    error0=sum(((MF_out_downsamp-Eb).*(OOK-1))<0);
    ber(i)=(error0+error1)/sig_length;
    P(i)=(erfc(sqrt(Eb/N0)/sqrt(2)))/2;
    % bit error calculation (此处计算系统仿真数值误码率: ber)
end

figure;
semilogy(EbN0,ber,'r-*','linewidth',2);
hold on
semilogy(EbN0,P,'b-*','linewidth',2);

% ********** Simulation of probability of errors. ************
for i=1:length(SNR)
    P_avg(i)=sqrt(N0*Rb*SNR(i)/(2*R^2));
    % average transmitted optical power
    i_peak(i)=2*R*P_avg(i)/0.5;
    % Peak Electrical amplitude
    Ep(i)=i_peak(i)^2*Tb*0.5;
    % Peak energy (Energy per bit is Ep/2)
    sgma(i)=sqrt(N0/2/Tsamp);
    % noise variance (power spectral density related to
sampling time)
    % sgma(i)=i_peak(i)/sqrt(2)*sqrt(nsamp/(2*SNR(i)));
    pt=ones(1,nsamp/2)*i_peak(i);
    pt((nsamp/2+1):nsamp)=0;
    % transmitter filter
    rt=pt;
    % receiver filter matched to pt
    ooK1=round(rand(1,sig_length));
```

```
    ooK2=zeros(1,sig_length);
    ook=[ooK1;ooK2];
    OOK=reshape(ook,[1 sig_length*2]);
    % OOK random signal generation （此处产生 OOK 信号：OOK）
    Tx_signal=rectpulse(OOK,nsamp/2)*i_peak(i);
    % Pulse shaping function (rectangular pulse)
    Rx_signal=Tx_signal+normrnd(0,sgma(i),1,sig_length*nsamp);
    % received signal (此处编写在 AWGN 信道下接收信号代码
    % Rx_signal：接收信号=发送信号+噪声)
    MF_out=conv(Rx_signal,rt)*Tsamp;
    % matched filter output
    MF_out_downsamp=MF_out(nsamp/2:nsamp:end);
    % sampling at end of bit period
    MF_out_downsamp=MF_out_downsamp(1:sig_length);
    % truncation
    Eb=Ep(i)/2;
    % thresholding and demodulation (此处设置一个判决门限来解码
1 和 0,
    % 门限为每比特平均能量。)
    error=0;
    for K=1:sig_length
        if (MF_out_downsamp(K)>=Eb)&(ooK1(K)==0)
            error=error+1;
        end
        if (MF_out_downsamp(K)<Eb)&(ooK1(K)==1)
           error=error+1;
        end
    end
    ber(i)=error/sig_length;
    % bit error calculation（此处计算系统仿真数值误码率：ber）
end

semilogy(EbN0,ber,'g-*','linewidth',2);
hold on
P=qfunc(sqrt(SNR/0.5));
semilogy(EbN0,P,'m-*','linewidth',2);

% analytical performance, Q-function（此处计算系统理论解析误码
```

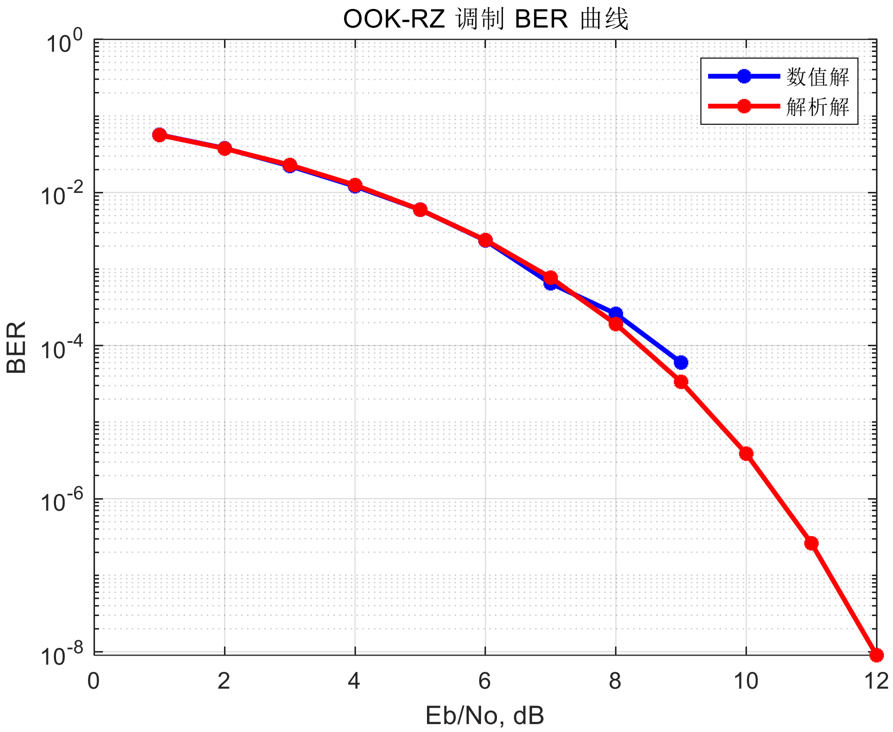
```
率，并画图）
grid on
legend('NRZ数值解','NRZ解析解','RZ数值解','RZ解析解');
xlabel('Eb/No, dB');
ylabel('BER');
title('OOK-NRZ vs OOK-RZ 调制 BER 曲线');
```

三、仿真结果分析及总结

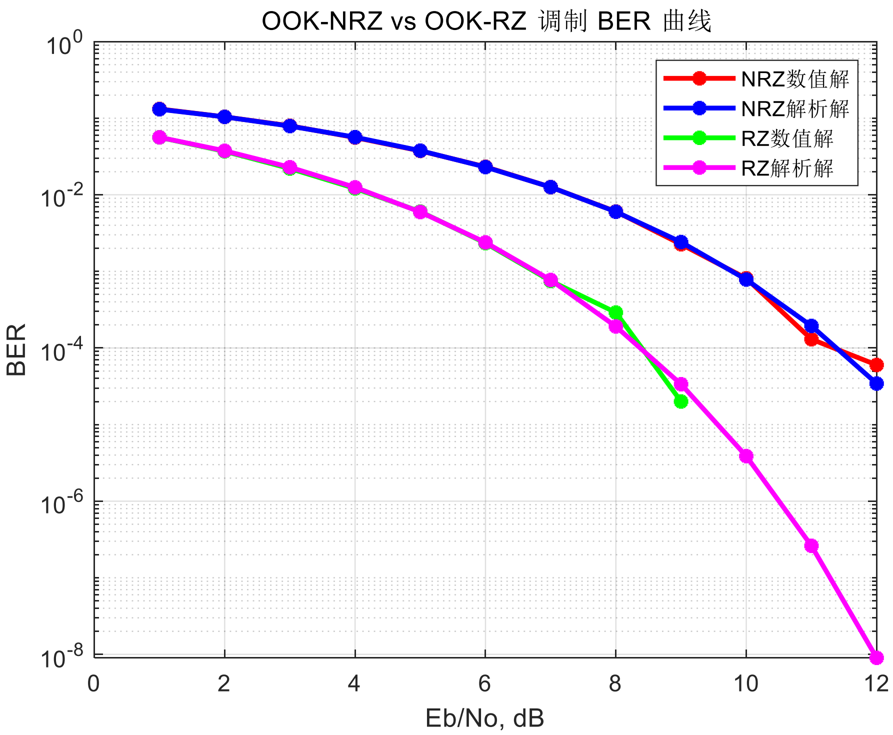
1. OOK-NRZ



2. OOK-RZ



3. OOK-NRZ vs OOK-RZ



从实验结果来看，NRZ 码的理论曲线与数值仿真在实验所给的信噪比范围内拟合结果较好，RZ 码在信噪比升高后模拟结果的误码率会明显高于理论值。

在同样的信噪比和信道条件下，OOK-NRZ 调制的误码率整体高于 OOK-RZ 调制，与理论计算的结果一致。