



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

通信原理实验

3 同步处理

姓 名：张翠翠

办公室：西一楼520

邮 箱：zhangcuicui@mail.xjtu.edu.cn





内容回顾

调制解调

差错控制

同步处理

调频收音机



内容回顾



```
msgStr=[  
'a-----a',...  
'b-----b',...  
'c-----c',...  
'd-----d',...  
'e-----e',...  
'f-----f',...  
'g-----g',...  
'h-----h',...  
'a-----a',...  
'b-----b',...  
'c-----c',...  
'd-----d',...  
'e-----e',...  
'f-----f',...  
'g-----g',...  
'h-----h',...  
];
```



内容回顾

未加信道编解码的收端误码率

```
C---)-----a
-B---.-----b-
-a-----cm-
--d-----d-/
-)---e-%-----
---%---f-----
o---g-g/m-m-
)=---mH-----=,
a--,-----á
-b--.-----"-
--c-----c-
--d-----)---d--
--/e-----e=--
----=f-(%-f-m-!
--==g-w-)---
```

```
-----h---
|
ber =
```

0.0263

```
a=====
-----a
-&---%---%-%b-
--c%-----#--
---d-m-----l---
---e-----e-'--
---&---f---
-
--í--%g-g-)----
----/-x--, -, }-m
k=---/---m`
-b-m-----r-
--c-}-, --m-%c-
m-em%-----d-%
---=e-----e---
m==f---/f-gm--
----g-%g-/---%
-----x/-m<
```

ber =

0.0327

```
a-----m-a
-b-----%-b-
--c-----)-c-
-/D-m-
--d=--
-í-e-----e---
-----n-f-----
---=g-g-----
-----h-m-----)
a-----a
-b-
----+-----b-
--c,-----c-
--=d-----d-
---g-----me
--%
-----f-%-f-----
-----g-g-----%
-----h-
-
```

ber =

0.0129

```
a-%--m-----!
/b-----=b-
-)c-%-----c-m
---d-m---d---
--m-e---,m---
---b---f-%-
m---g-g---)%
--|/-h-m-
--
a-----a
-â--),%--,--b-
,-c %--)-c-|
/-d-----d-)-
,-
-e-%-e-m-
,---Mf---f---
)
--m-g%-g---)m-
-,---h---
```

ber =

0.0308



内容回顾

加入Golay信道编解码后误码率降低

a-----a
-b-----b-
--c---
---m-c--
--d--,---d--
---e-----e---
--m-f---f---,
---,g-g-m---
-----h-----

a-m-----a
-b-----b-
--c---.---m-c-
--d-----)d--
---e-----%,
--mf---f---
---g-g-----
--%-h---,

ber =

0.0089

a---%-----%a
-b-/-----b/
--c-----)-!-
--d-/,---d--
---e-----a--
---f---f---
-----g-g---.

-h-----
-
a-----=a
mb-----b-
--c-----cm-
--d-----d--
--%-e-----a--%
---f---f---.
---mg-g-----
-----h-----
|

ber =

0.0104

a-----a
-b-----b-
--c-----c-
--d-----d--
---e-----e---
---f-----
--f-----
/-g-g-----
-----h-i-----
a-
-----a
-b-----b-
--c-----c-
--D-/---d--
--/e-----e---
---f---f---
---g-g-

-----h---

ber =

0.0045

a-----a
-`-----,b-
--c-----c-
--d-----d--
---e-----e---
---f---f---
-----g-g,---
-----h-----
a-----a
-b-%-%---.---b-
-/c-----c-
--d-----d--
---e-----e---
---f---f---)-
---G--÷-----
-----=h---

ber =

0.0060



内容回顾

%% Params

```
N = 1000 + randi(200); % 假定比特流中比特位数目，任意取 1000~1200 中的值
x = zeros(1,N); % 构建一串比特流，初始化为 0
for i=1:N % 初始化比特流为任意 0/1
    x(i) = (rand>0.5);
end
```

%% Polynomial Matrix

```
G = [1 1 1 0 0 0 0;
     1 0 0 1 1 0 0;
     0 1 0 1 0 1 0;
     1 1 0 1 0 0 1];
```

%% Simulation

```
x = [x zeros(1,4-mod(length(x),4))]; % 由于 x 的长度可能不是 4 的整数倍，需补零
y = ( reshape(x,[4,length(x)/4]) )'; % 将 x 转化为 n \times 4 的矩阵 [注意: re
```

%% Encoding

```
data_tx = mod(y*G,2);
```



内容回顾

%% Transmission

```
data_rx = data_tx;  
idx = zeros(1,30);  
for i=1:30                % 假设有 10 位因信道干扰误码  
    idx(i) = randi(N);  
    data_rx(idx(i)) = mod(data_rx(idx(i))+1,2);  
end
```

```
H = [1 0 1 0 1 0 1;  
     0 1 1 0 0 1 1;  
     0 0 0 1 1 1 1];
```



内容回顾

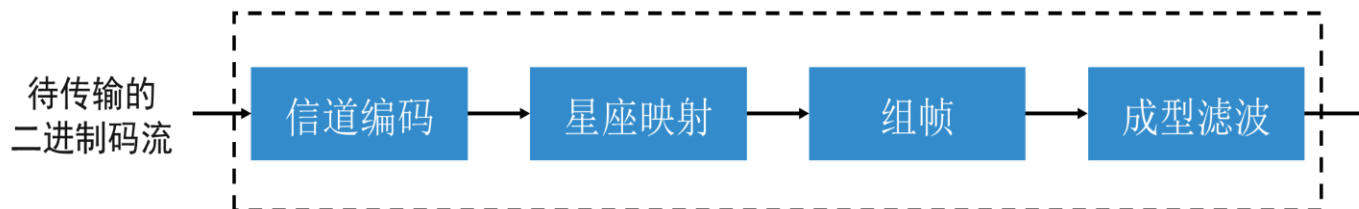
```
%% Decoding
tmp = [data_rx(:,3) data_rx(:,5) data_rx(:,6) data_rx(:,7)]; % 提取信息位
tmp = reshape(tmp',[1,size(tmp,1)*size(tmp,2)]); % 恢复为比特流形式
find(abs(x-tmp)==1) % 校验前错误位

s = mod(data_rx*H',2); % 校验并修正
for i=1:size(s,1)
    if( isequal(s(i,:),[1 1 0]) )
        data_rx(i,3) = mod(data_rx(i,3)+1,2);
    elseif( isequal(s(i,:),[1 0 1]) )
        data_rx(i,5) = mod(data_rx(i,5)+1,2);
    elseif( isequal(s(i,:),[0 1 1]) )
        data_rx(i,6) = mod(data_rx(i,6)+1,2);
    elseif( isequal(s(i,:),[1 1 1]) )
        data_rx(i,7) = mod(data_rx(i,7)+1,2);
    % elseif( isequal(s(i,:),[1 0 0]) )
    %     data_rx(i,1) = mod(data_rx(i,1)+1,2);
    % elseif( isequal(s(i,:),[0 1 0]) )
    %     data_rx(i,2) = mod(data_rx(i,2)+1,2);
    % elseif( isequal(s(i,:),[0 0 1]) )
    %     data_rx(i,4) = mod(data_rx(i,4)+1,2);
end
end
res = [data_rx(:,3) data_rx(:,5) data_rx(:,6) data_rx(:,7)]; % 提取信息位
res = reshape(res',[1,size(res,1)*size(res,2)]); % 恢复为比特流形式
```

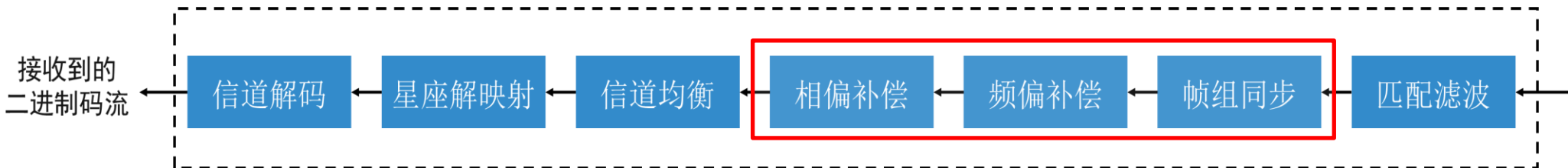



实验内容

发送端-基带处理



接收端-基带处理



Matlab上基带处理

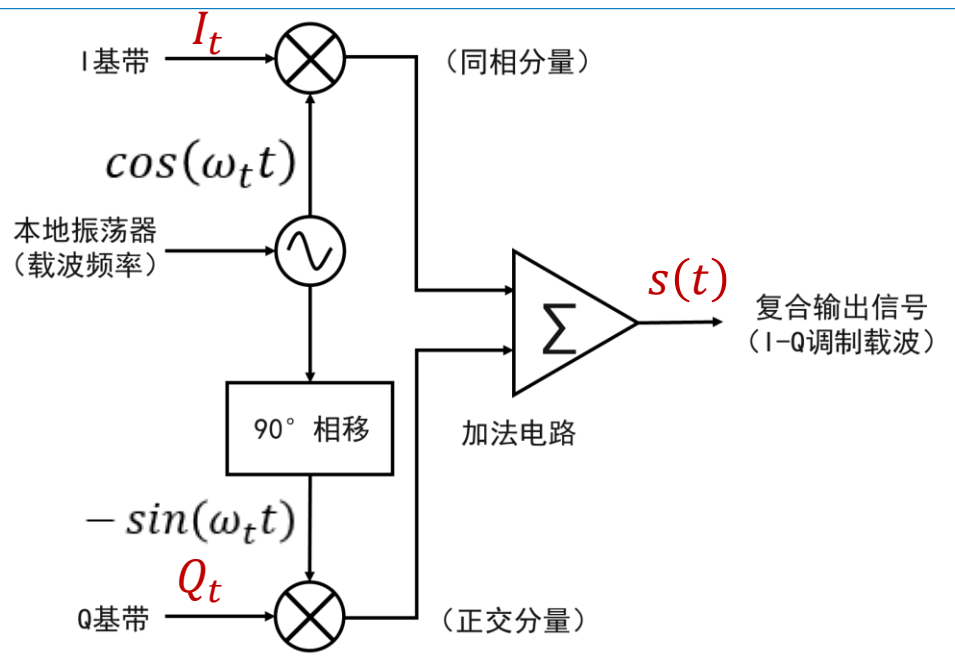


实验内容

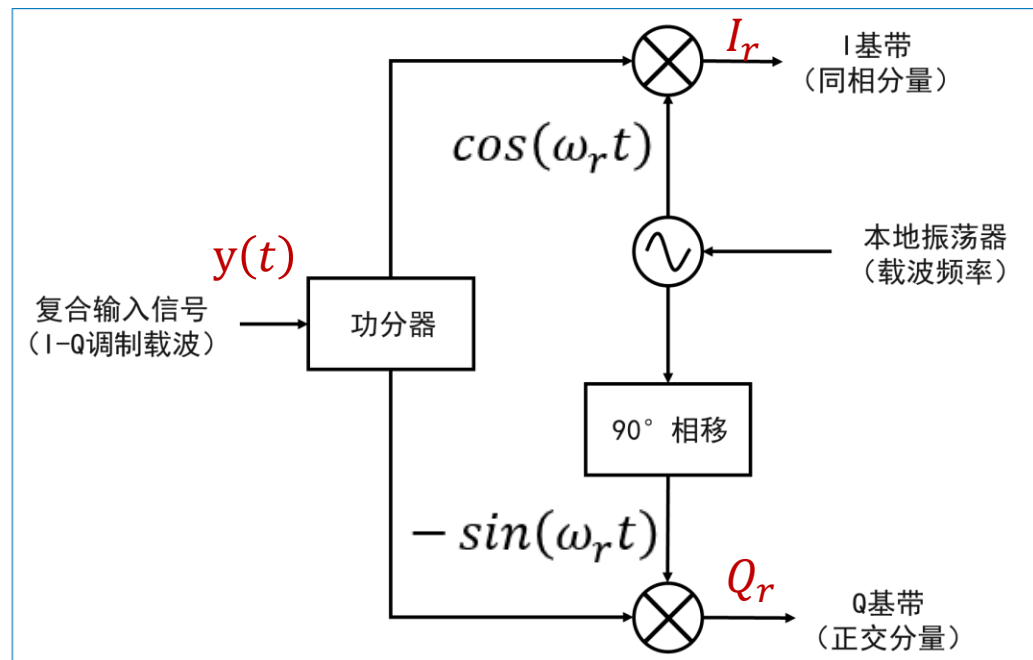
- 帧组同步
- 频偏估计和补偿
- 相偏估计和补偿



频偏相偏带来的影响



(a) I-Q调制



(b) I-Q解调

$$s(t) = I_t \cdot \cos(\omega_t t) - Q_t \cdot \sin(\omega_t t)$$

$$I_r = y(t) \cdot \cos(\omega_t t) = [I_t \cdot \cos(\omega_t t) - Q_t \cdot \sin(\omega_t t)] \cdot \cos(\omega_t t);$$

$$I_r = \frac{1}{2} I_t$$

$$Q_r = y(t) \cdot [-\sin(\omega_t t)] = [I_t \cdot \cos(\omega_t t) - Q_t \cdot \sin(\omega_t t)] \cdot [-\sin(\omega_t t)];$$

$$Q_r = \frac{1}{2} Q_t$$



频偏相偏带来的影响

$$\omega_t \neq \omega_r$$

$$I_r = y(t) \cdot \cos(\omega_t t) = [I_t \cdot \cos(\omega_t t) - Q_t \cdot \sin(\omega_t t)] \cdot \cos(\omega_t t);$$

$$I_r = \frac{1}{2} I_t$$

$$I_r = y(t) \cdot \cos(\omega_r t - \Delta\varphi)$$

$$= I_t \cdot \cos(\omega_t t) \cdot \cos(\omega_r t - \Delta\varphi) - Q_t \cdot \sin(\omega_t t) \cdot \cos(\omega_r t - \Delta\varphi)$$

$$= I_t \cdot \cos(\omega_t t) \cdot \cos(\omega_t t - \Delta\omega \cdot t - \Delta\varphi) - Q_t \cdot \sin(\omega_t t) \cdot \cos(\omega_t t - \Delta\omega \cdot t - \Delta\varphi)$$

$$= [I_t \cdot \cos^2(\omega_t t) \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) + I_t \cdot \cos(\omega_t t) \cdot \sin(\omega_t t) \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi)]$$

$$- [Q_t \cdot \sin(\omega_t t) \cdot \cos(\omega_t t) \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) + Q_t \cdot \sin^2(\omega_t t) \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi)]$$

$$= [I_t \cdot \frac{\cos(2\omega_t t) + 1}{2} \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) + I_t \cdot \frac{\sin(2\omega_t t)}{2} \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi)]$$

$$- [Q_t \cdot \frac{\sin(2\omega_t t)}{2} \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) + Q_t \cdot \frac{1 - \cos(2\omega_t t)}{2} \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi)]$$

$$I_r = \frac{1}{2} I_t \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) - \frac{1}{2} Q_t \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi)$$



频偏相偏带来的影响

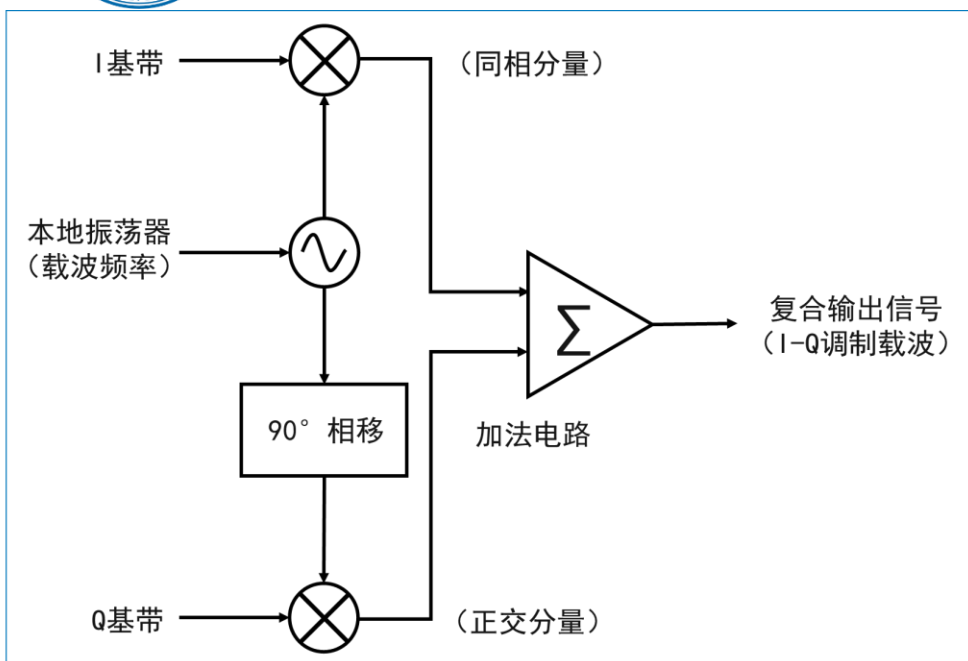
$$Q_r = y(t) \cdot [-\sin(\omega_t t)] = [I_t \cdot \cos(\omega_t t) + Q_t \cdot \sin(\omega_t t)] \cdot \sin(\omega_t t); \quad Q_r = \frac{1}{2} Q_t$$

$$\begin{aligned} Q_r &= y(t) \cdot [-\sin(\omega_r t - \Delta\varphi)] \\ &= -I_t \cdot \cos(\omega_t t) \cdot \sin(\omega_r t - \Delta\varphi) + Q_t \cdot \sin(\omega_t t) \cdot \sin(\omega_r t - \Delta\varphi) \\ &= -I_t \cdot \cos(\omega_t t) \cdot \sin(\omega_t t - \Delta\omega \cdot t - \Delta\varphi) + Q_t \cdot \sin(\omega_t t) \cdot \sin(\omega_t t - \Delta\omega \cdot t - \Delta\varphi) \\ &= -[I_t \cdot \cos(\omega_t t) \cdot \sin(\omega_t t) \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) - I_t \cdot \cos^2(\omega_t t) \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi)] \\ &\quad + [Q_t \cdot \sin^2(\omega_t t) \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) - Q_t \cdot \sin(\omega_t t) \cdot \cos(\omega_t t) \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi)] \\ &= \left[-I_t \cdot \frac{\sin(2\omega_t t)}{2} \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) + I_t \cdot \frac{\cos(2\omega_t t) + 1}{2} \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) \right] \\ &\quad + \left[Q_t \cdot \frac{1 - \cos(2\omega_t t)}{2} \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) - Q_t \cdot \frac{\sin(2\omega_t t)}{2} \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) \right] \end{aligned}$$

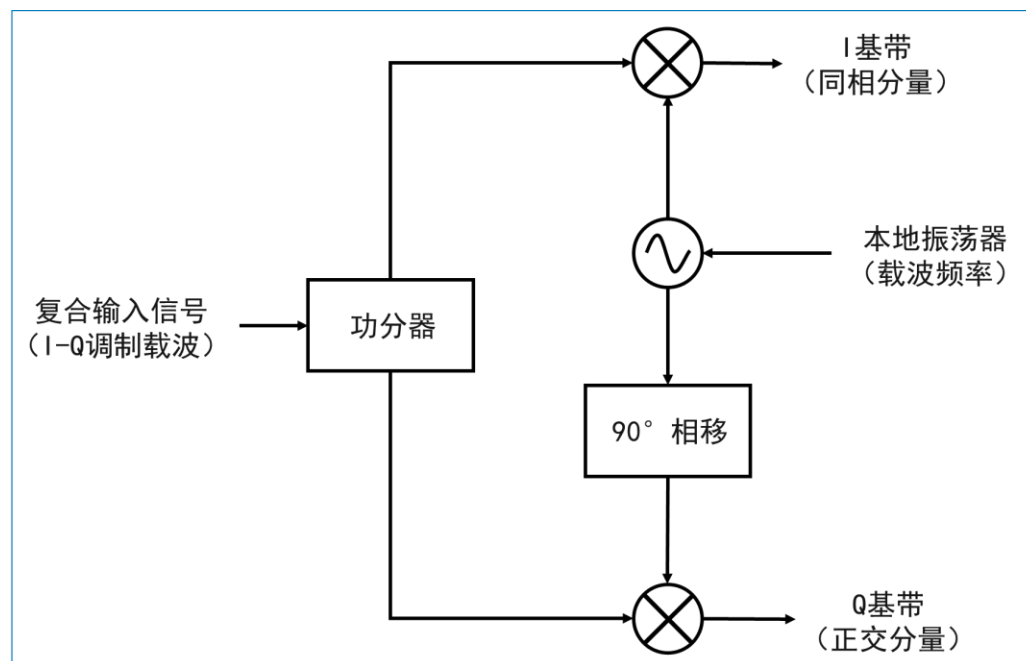
$$Q_r = \frac{1}{2} I_t \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) + \frac{1}{2} Q_t \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi)$$



频偏相偏带来的影响



(a) I-Q调制



(b) I-Q解调

$$\left\{ \begin{aligned} I_r &= \frac{1}{2} I_t \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) - \frac{1}{2} Q_t \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) \\ Q_r &= \frac{1}{2} I_t \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) + \frac{1}{2} Q_t \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi) \end{aligned} \right.$$



频偏相偏带来的影响

■ 产生频偏相偏的原因有哪些？

1. 收发两端时钟不同源
2. 收发两端样点不同步导致的相偏
3. 无线信道引入的频偏和相偏
4. 收发信机的一些处理引入的延时导致的相偏



频偏估计和补偿

$$\begin{aligned} r_k &= I_r + j * Q_r \\ &= \cos(a_k \pi) \cos(\Delta \omega k T_{sym} + \Delta \varphi) - \sin(a_k \pi) \sin(\Delta \omega k T_{sym} + \Delta \varphi) \\ &\quad + j[\cos(a_k \pi) \sin(\Delta \omega k T_{sym} + \Delta \varphi) + \sin(a_k \pi) \cos(\Delta \omega k T_{sym} + \Delta \varphi)] \\ &= \cos(a_k \pi + \Delta \omega k T_{sym} + \Delta \varphi) + j \sin(a_k \pi + \Delta \omega k T_{sym} + \Delta \varphi) \\ &= e^{j a_k \pi} e^{j(\Delta \omega \cdot k \cdot T_{sym} + \Delta \varphi)}; \quad 1 \leq k \leq N \end{aligned}$$

以4PSK为例, $a_k = \pm 1/4, \pm 3/4$ 。

$$z_k = r_k^M = e^{jM(\Delta \omega \cdot k \cdot T_{sym} + \Delta \varphi)} \quad 1 \leq k \leq N$$

使用L&R算法

M. Luise and R. Reggiannini. Carrier frequency recovery in all-digital modems for burst-mode transmissions[J]. IEEE Transactions on Communications

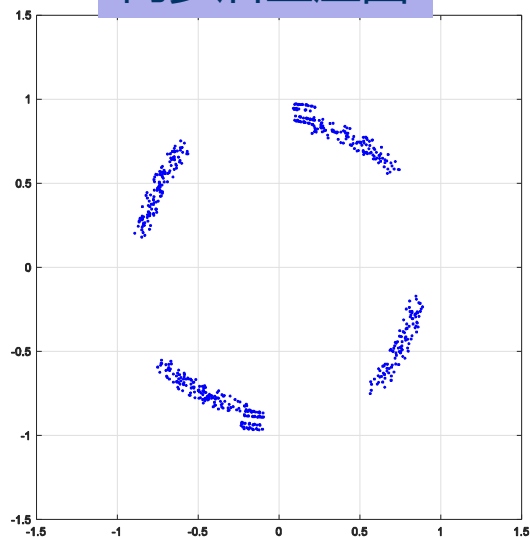
$$R(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=k+1}^N z_i z_{i-k}^* \quad 1 \leq k \leq N-1$$

$$\Delta \hat{\omega} \cong \frac{2}{MNT_{sym}} \arg \left\{ \sum_{k=1}^{N-1} R(k) \right\} \quad r_k * e^{-j(\Delta \omega \cdot k \cdot T_{sym})} = s_k e^{j(\Delta \varphi)}$$

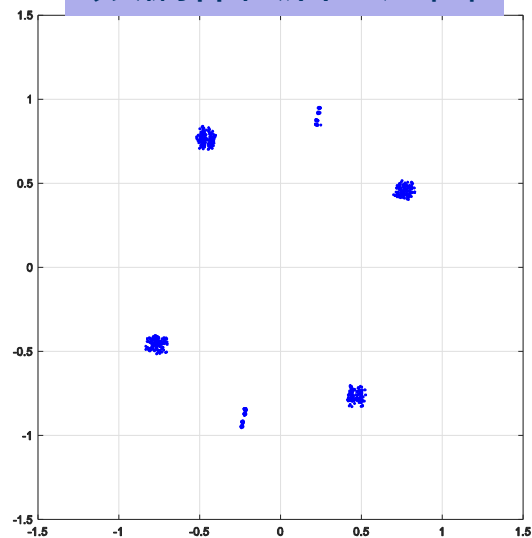


频偏估计和补偿

同步后星座图



频偏补偿后星座图





相偏估计和补偿

经过频偏估计后的MPSK训练序列为:

$$r_k = I_r + j * Q_r = e^{ja_k\pi} e^{j\Delta\theta} \quad 1 \leq k \leq N$$

而本地生成的MPSK训练序列为:

$$(r_{local})_k = e^{ja_k\pi} \quad 1 \leq k \leq N$$

两者共轭相乘:

$$r_k (r_{local})_k^* = e^{j\Delta\theta}$$

进一步提高精度, 对相偏信息序列的幅角求均值:

$$\Delta\hat{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \arg\{r_k (r_{local})_k^*\}$$

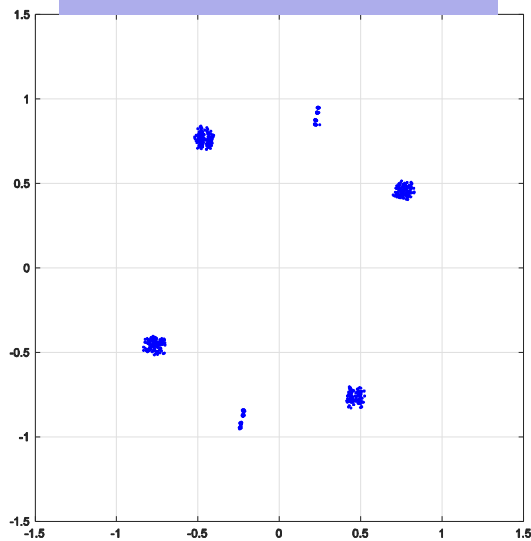
对接收信号进行相位补偿

$$\hat{r}_k = e^{j(a_k\pi + \Delta\theta)} e^{-j\Delta\hat{\theta}} = e^{ja_k\pi}$$

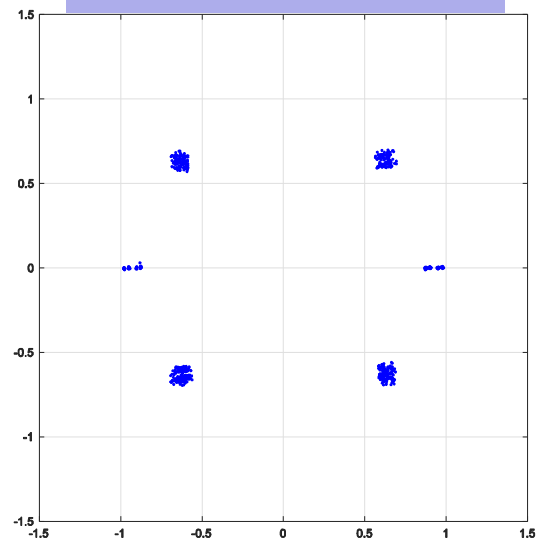


相偏估计和补偿

频偏补偿后星座图



相偏补偿后星座图





帧组同步



可能含有信息的数据段

训练序列：127位M序列

训练序列

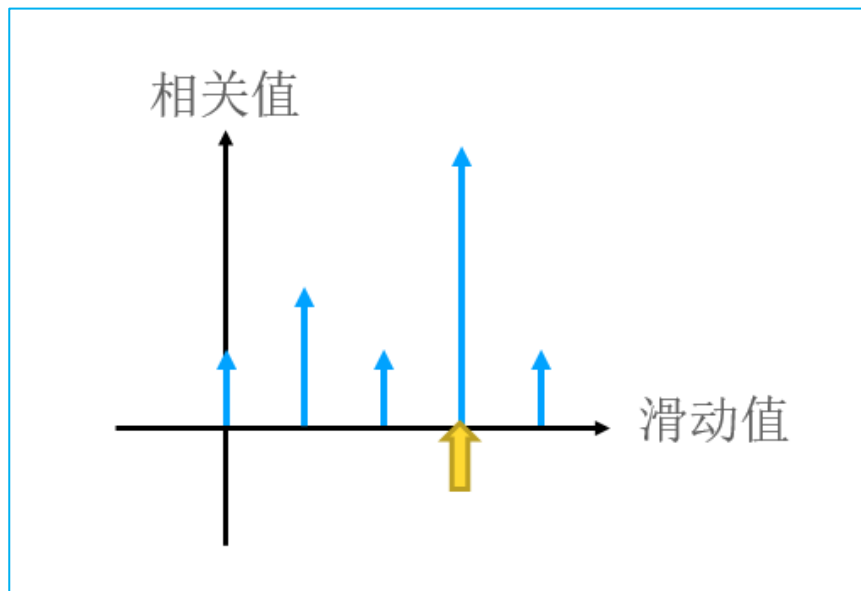
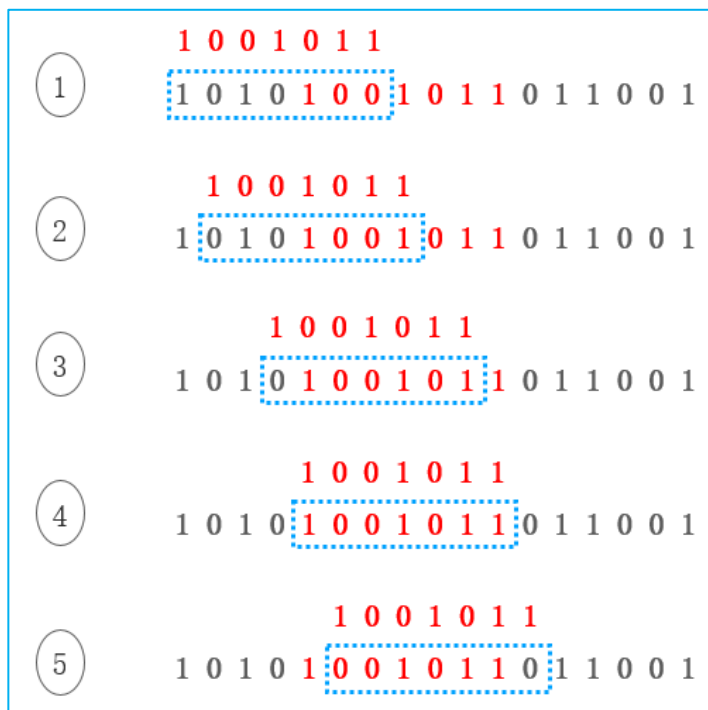


有效数据码流



帧组同步

利用M序列自相关性强的特点
滑动窗口，接收序列和训练序列求相关

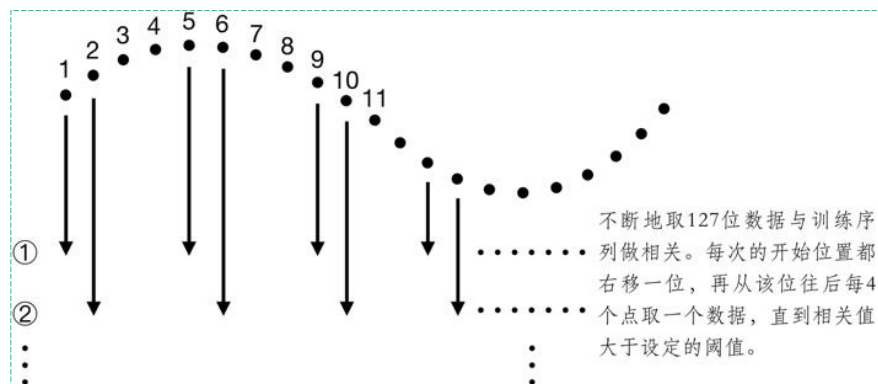


滑动窗口做相关：以M=1001011为例

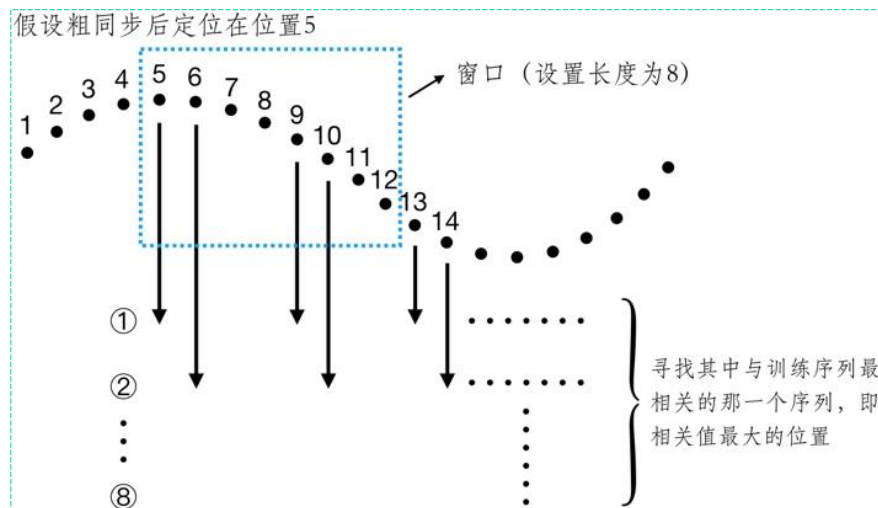


帧组同步

粗同步



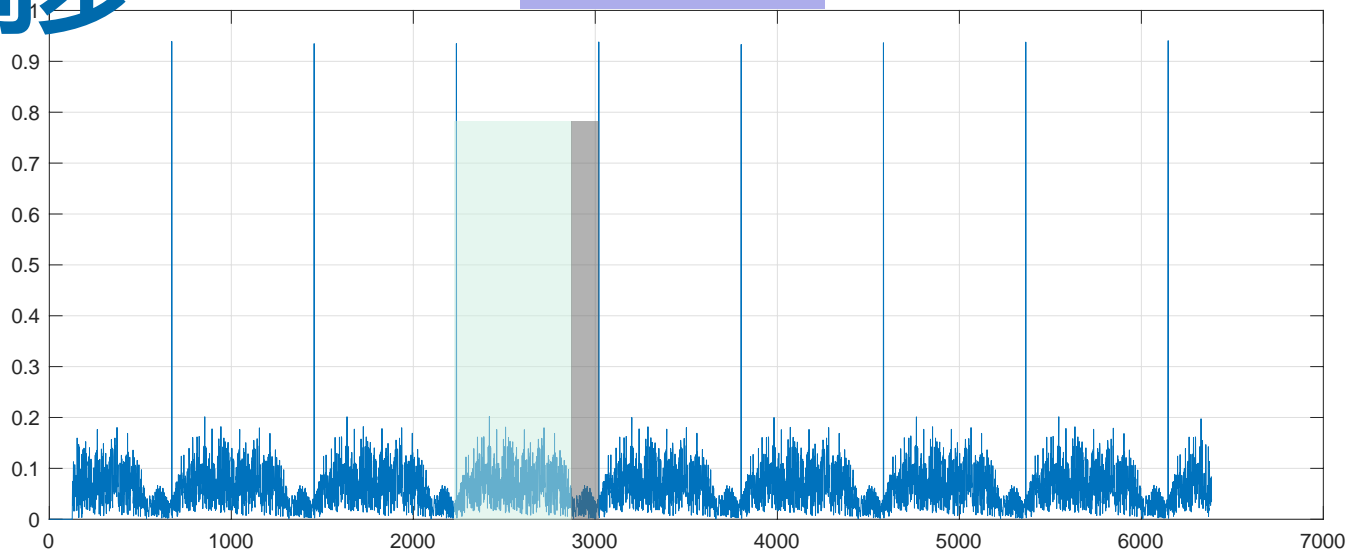
精同步





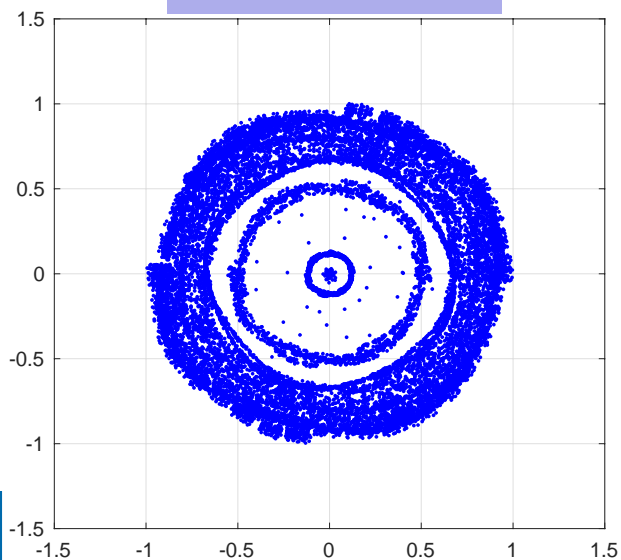
帧组同步

相关值-索引

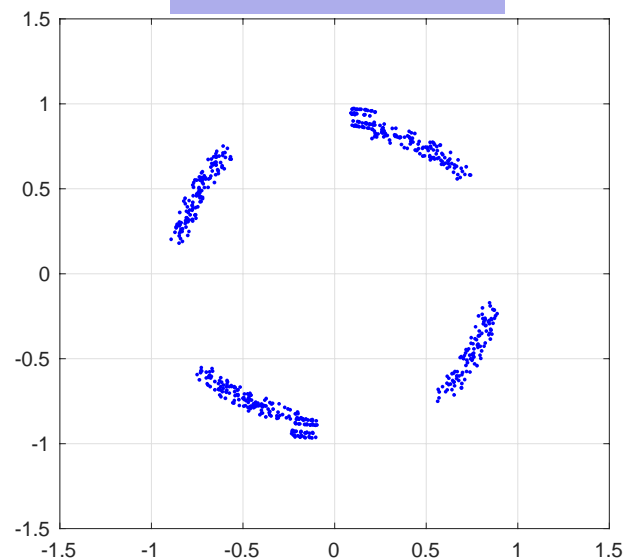


127位M序列
作为训练序列

同步前星座图



同步后星座图





帧组同步

- 帧组同步一定要在频偏估计之前吗？
- 含频偏和相偏的M序列，自相关性会受影响吗？



实验任务

- ① 在前两次实验课的基础上，进一步理解通信系统的组成
- ② 深入理解“帧组同步、频偏估计和补偿、相偏估计和补偿”的原理
- ③ 参考老师给的帧组同步的代码，学习其具体实现
- ④ 对帧组同步前后的星座图进行分析和理解
- ⑤ 参考老师给的频偏估计的代码，学习其具体实现
- ⑥ 补充频偏补偿的代码，并验证
- ⑦ 对频偏补偿前后的星座图进行分析和理解
- ⑧ 编写相偏估计和补偿的代码，并验证
- ⑨ 对相偏补偿前后的星座图进行分析和理解



实验报告

一、实验内容

描述本次实验要完成的任务及相关指标

二、实验原理（公式或绘图允许手写）

分别描述帧组同步、频偏估计、相偏估计的原理

三、Matlab具体实现

描述matlab具体实现，切勿贴代码，用流程图或核心代码截图。

四、实验结果及结果分析

各处星座图、及对星座图的理解

五、总结并回答思考题

实验过程中遇到的问题及解决方法

回答思考题