



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

# 通信原理实验

## 1 调制解调

**姓 名：张翠翠**

**办公室：西一楼520**

**zhangcuicui@mail.xjtu.edu.cn**





# 课程介绍

---

- 性 质：独立设课
- 学时数：16学时（4学时\*4次）
- 成 绩：课堂验收（60%）+实验报告（40%）



# 时间安排

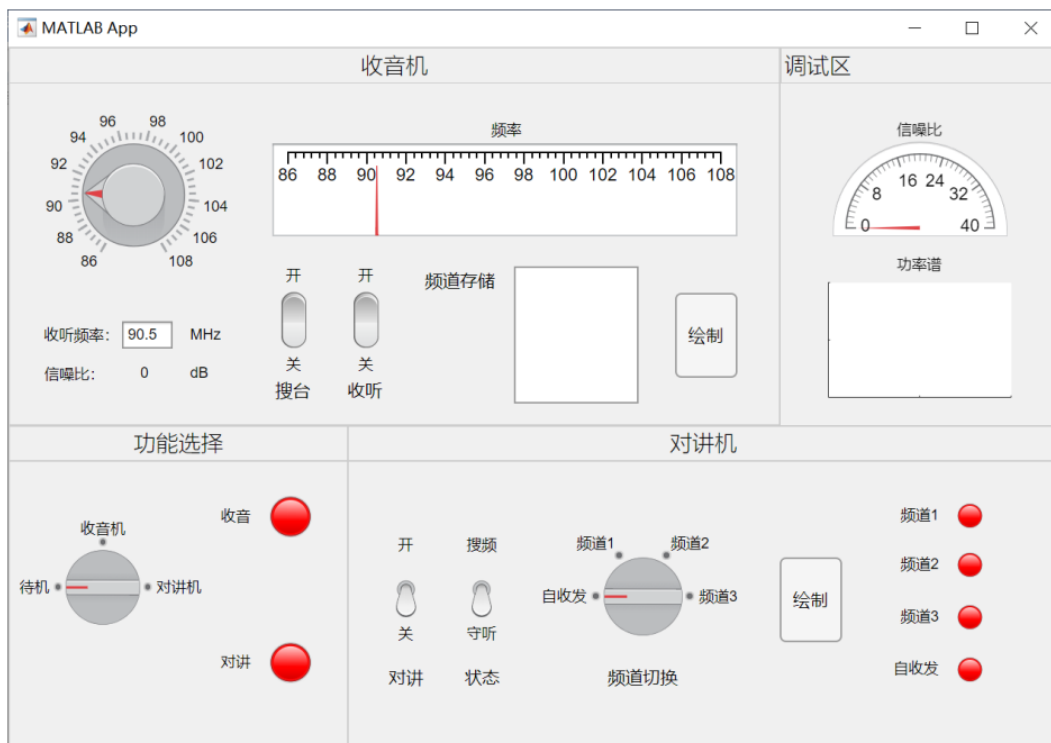
通信原理实验安排-2022 级-信息专业

	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五	星期六	星期天
上午	信息 2206	信息 2201	信息 2205		信息 2204		
下午			信息 2203		信息 2202		
晚上							

备注：  
1) 2024-2025 学年第二学期第 1-4 周  
3) 地点在西一楼 506.



# 实验内容





# 实验内容

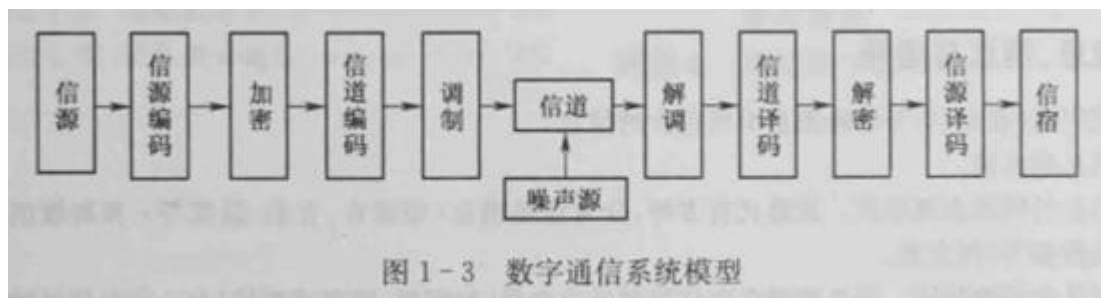
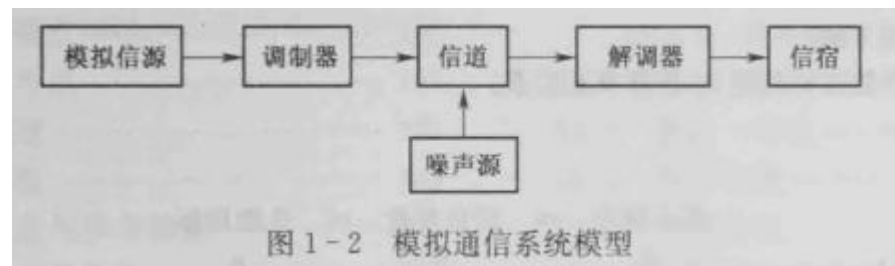
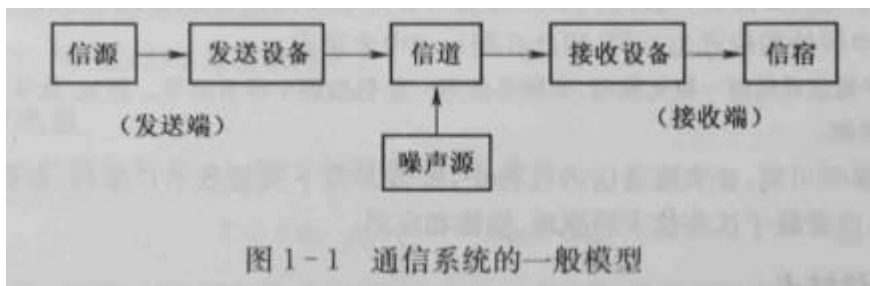
---

- 一个通信系统都包含哪些部分?
- PlutoSDR 负责哪些部分?
- Matlab上负责哪些部分?



# 实验内容

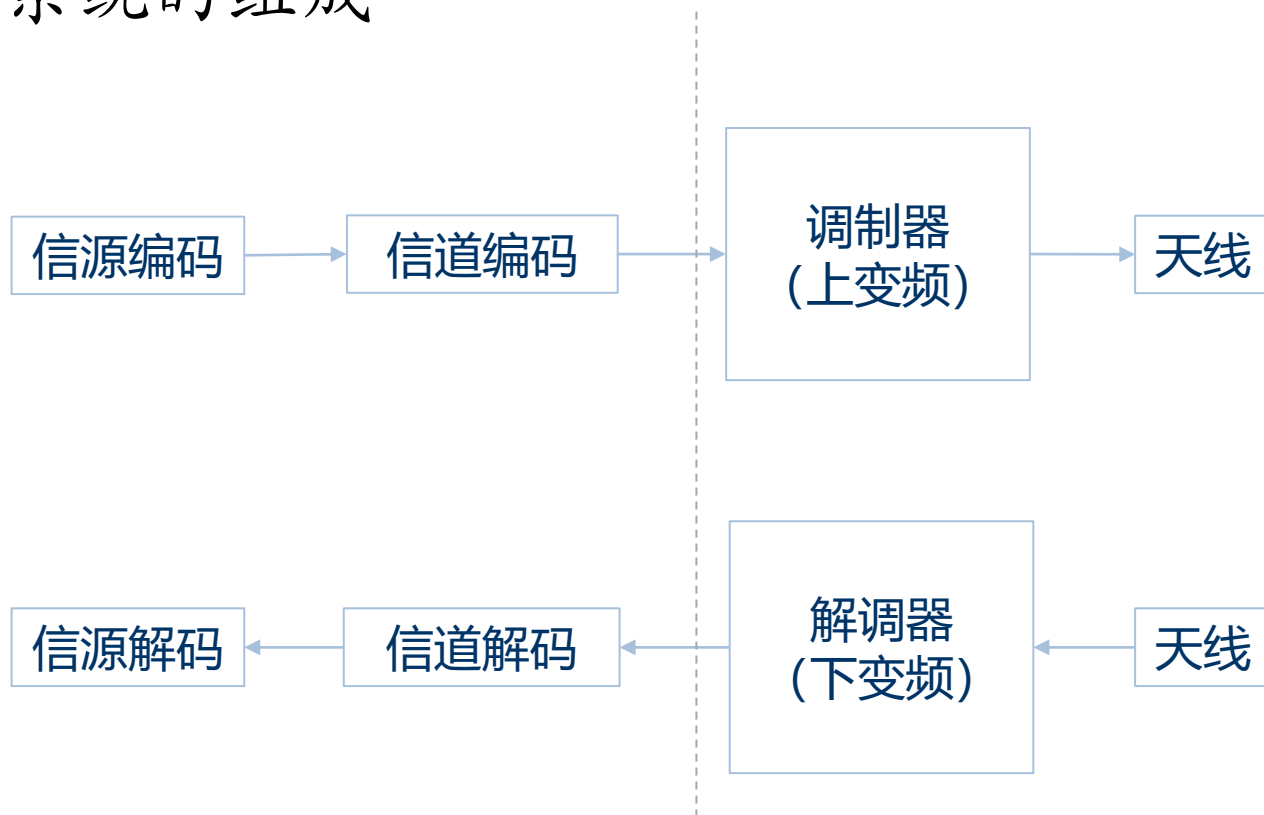
## ■ 通信系统的组成





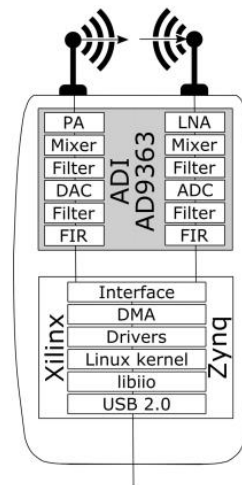
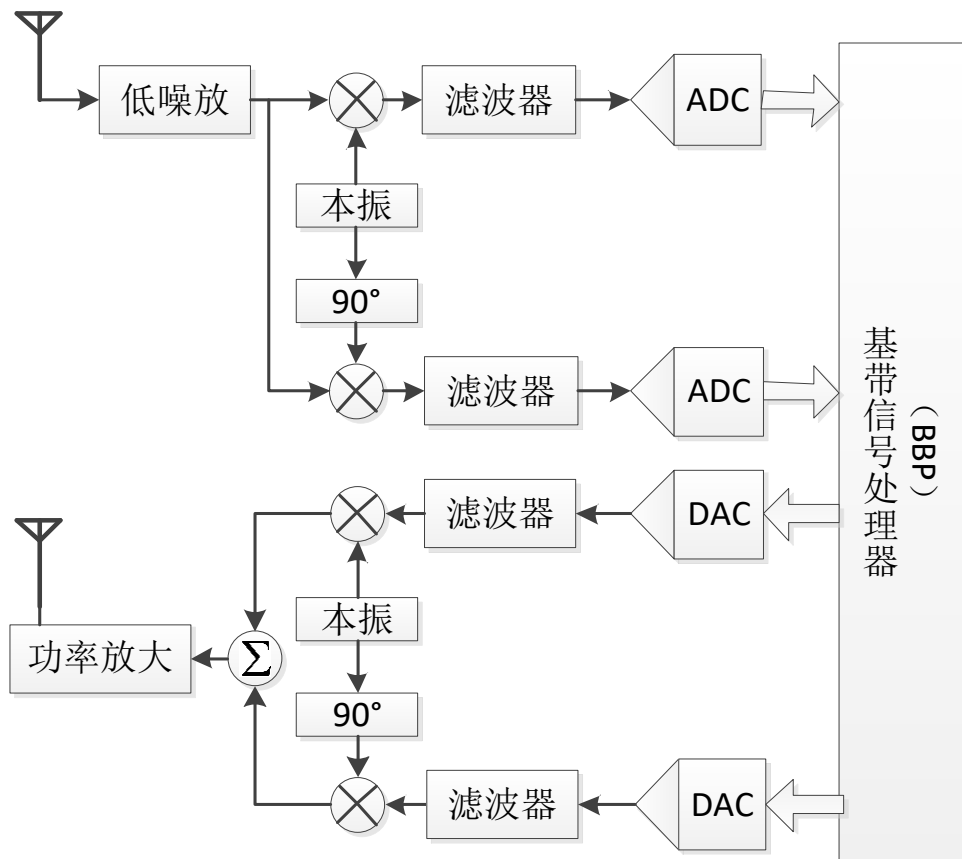
# 实验内容

## ■ 通信系统的组成





# 实验内容

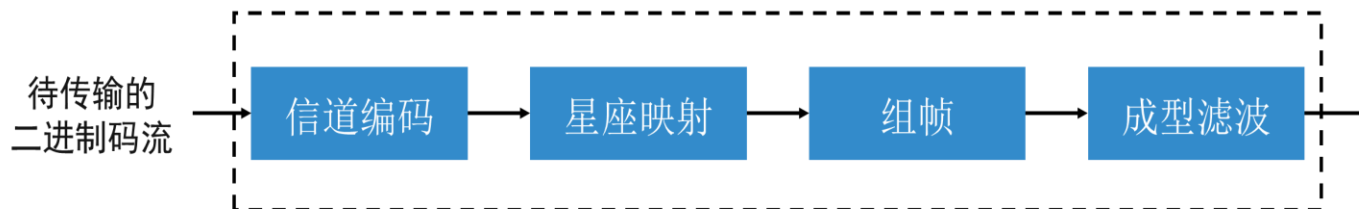




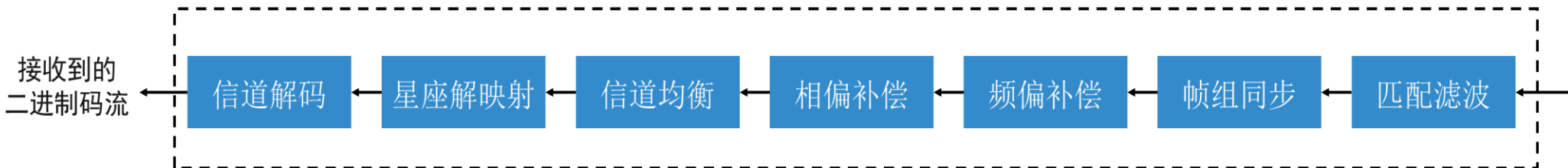


# 实验内容

## 发送端-基带处理



## 接收端-基带处理



## Matlab上基带处理



# 实验内容

---

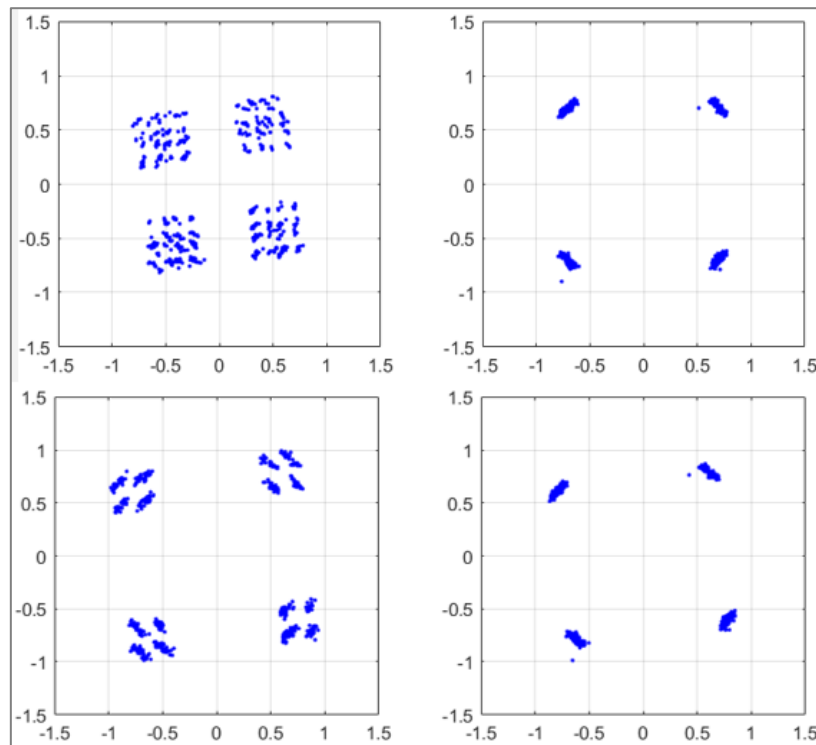
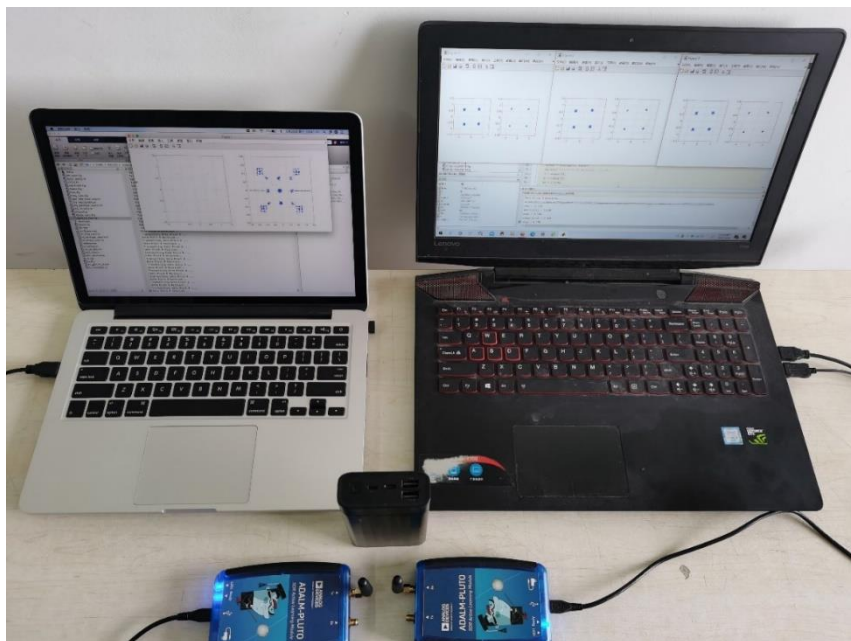
## ■ 4个具体的实验内容

- 调制解调 (FSK、ASK、PSK、QAM)
- 差错控制 (信道编码、交织编码)
- 同步处理 (频偏估计补偿、相偏估计补偿)
- 信道均衡
- 调频收音机
- OFDM



# 实验内容

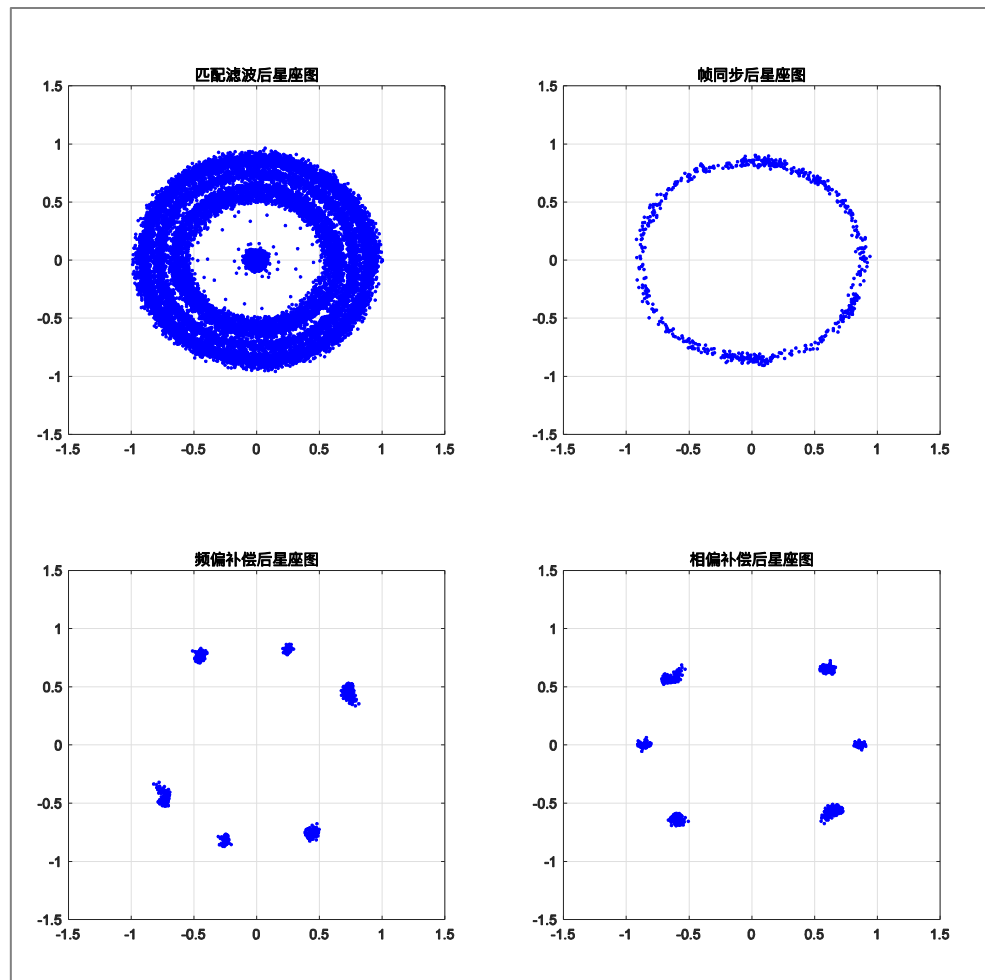
## ■ 信道均衡





# 实验内容

## ■ 同步处理





# 提纲

---

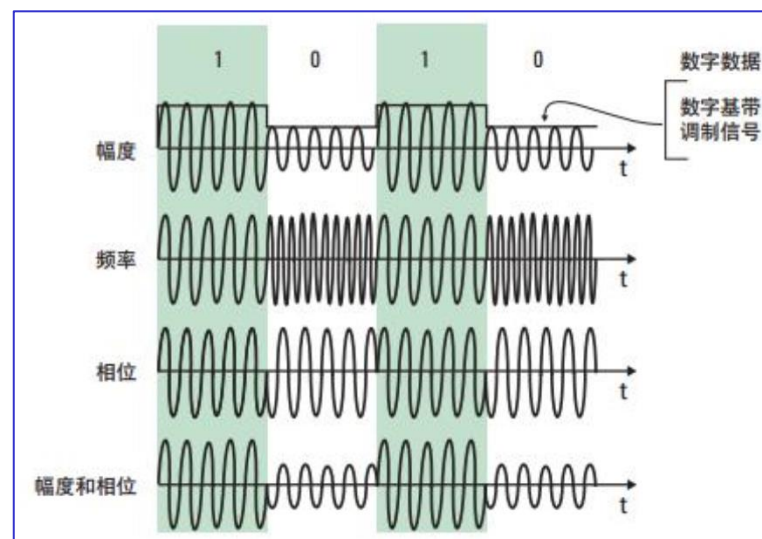
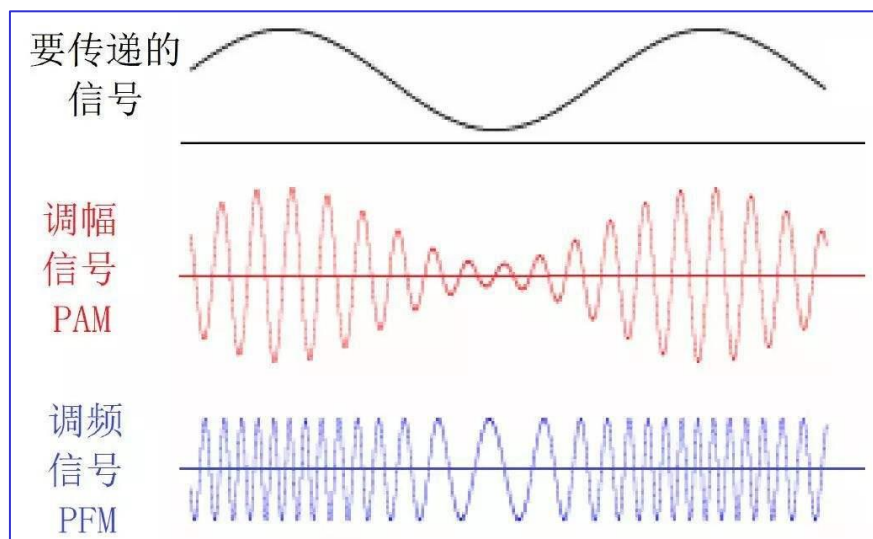
- 数字IQ调制
- ASK、PSK、FSK调制解调
- QAM调制解调
- 实验平台PlutoSDR环境搭建
- 实验任务
- 实验报告要求



# 数字IQ调制

## ■ 调制

- 将信息量承载到载波的频率、相位、或幅度上
- 模拟调制：信息的变化是连续的，即载波的频率、相位、或幅度是连续变化的，AM FM PM
- 数字调制：信息的变化是离散的，即载波的频率、相位、或幅度的变化是离散的、阶跃的 ASK FSK PSK

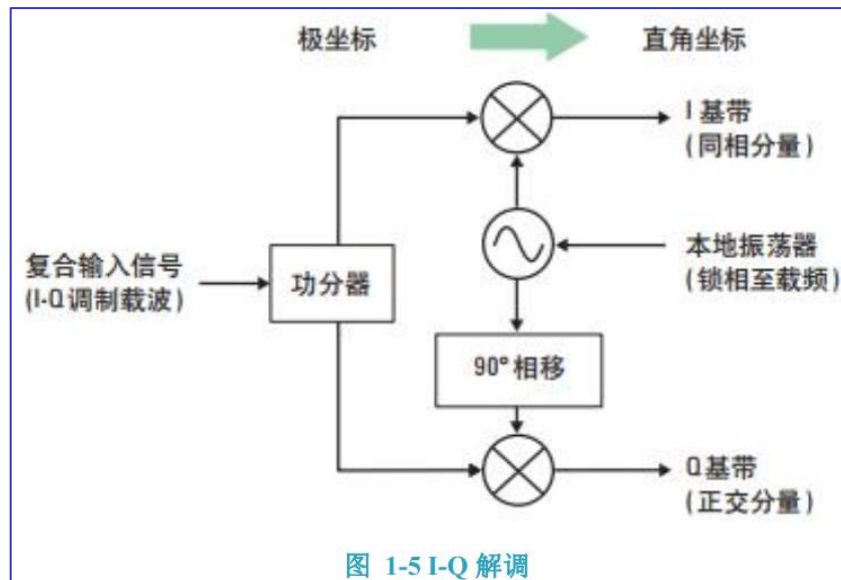
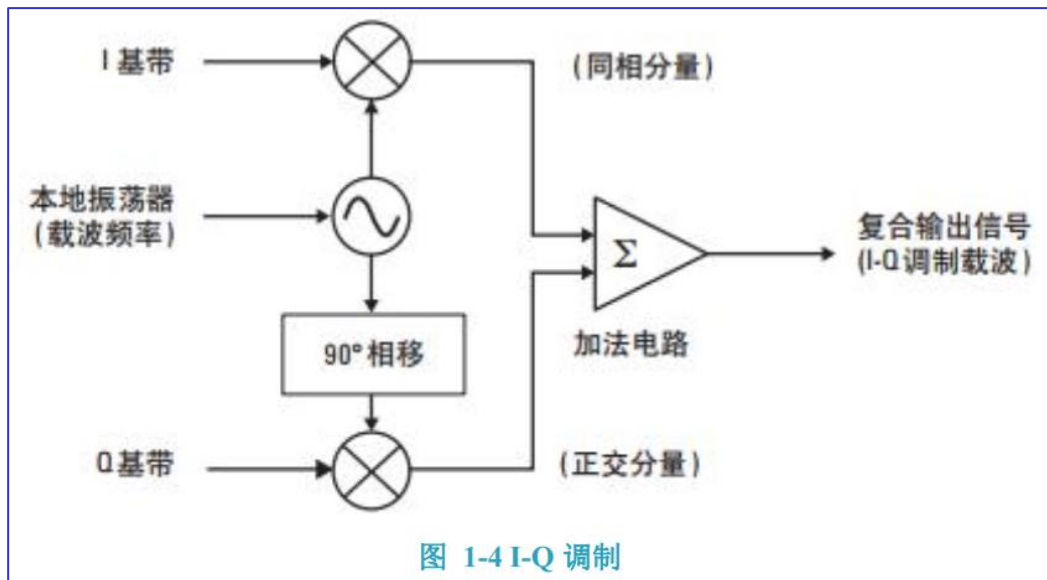




# 数字IQ调制

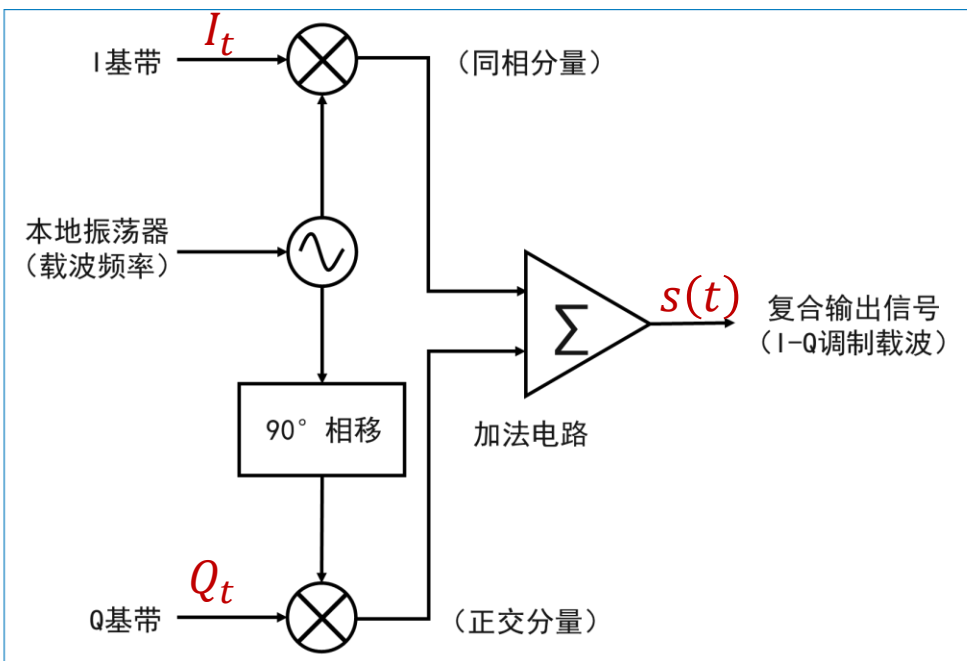
## ■ 数字IQ调制

- 符号映射：将信号比特流转换成I和Q两路信息量
- 正交上变频、正交下变频

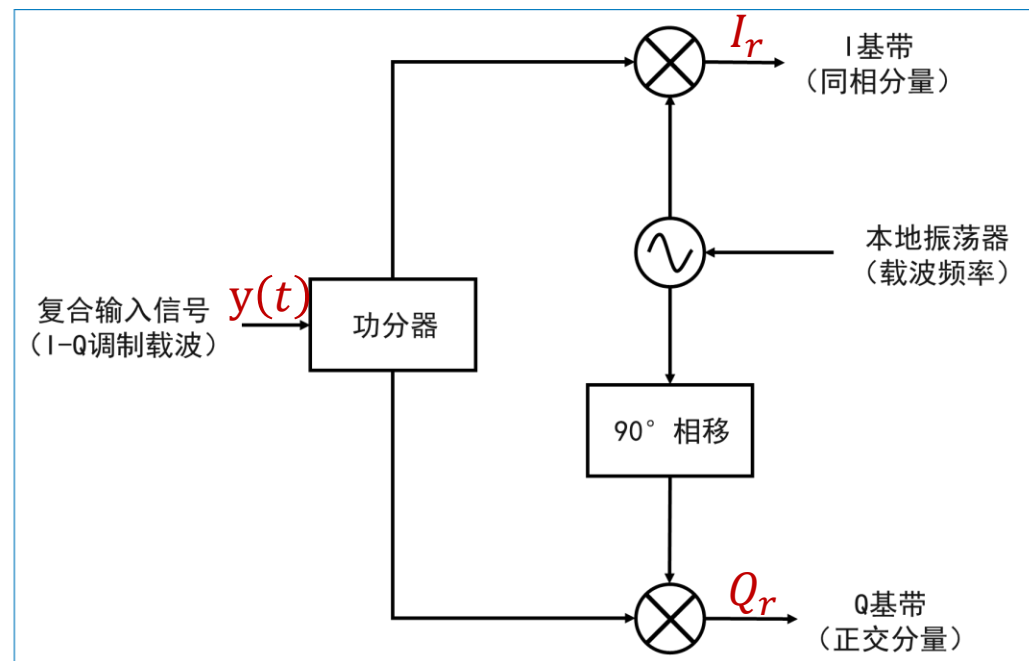




# 数字IQ调制



(a) I-Q调制



(b) I-Q解调

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

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

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

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

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

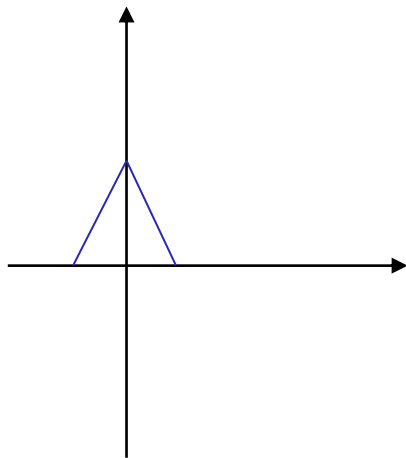




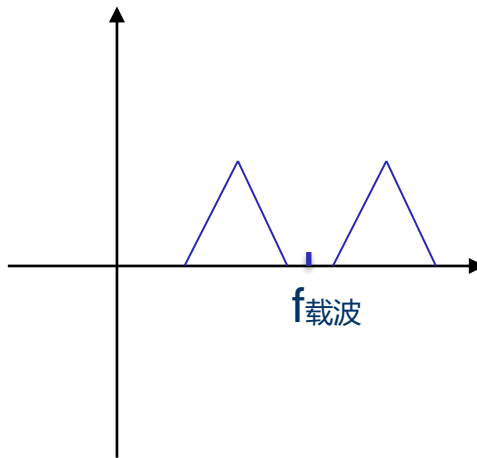
# 数字IQ调制

## ■ 为什么要用IQ调制

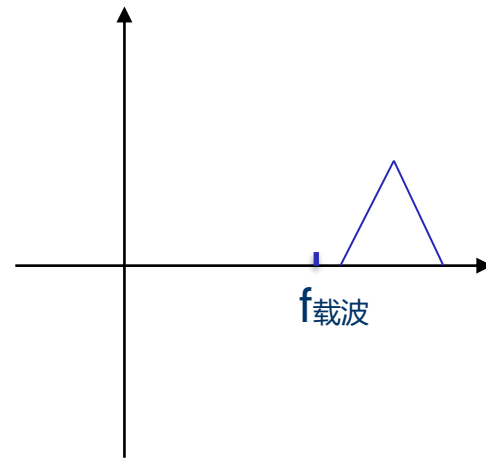
- 载波的相位的精确控制不容易实现，但是幅度控制容易实现；通过同时应用载波的幅度和相位两个维度，可以传输更多的信息；通过控制两路正交信号的幅度，等于控制了载波信号的幅度和相位。
- 双边带和单边带的概念（用IQ调制得到的是单边带信号）



待传输的基带信号 $f$ 的频谱



$f \cdot \cos(2\pi f_{\text{载波}} t)$

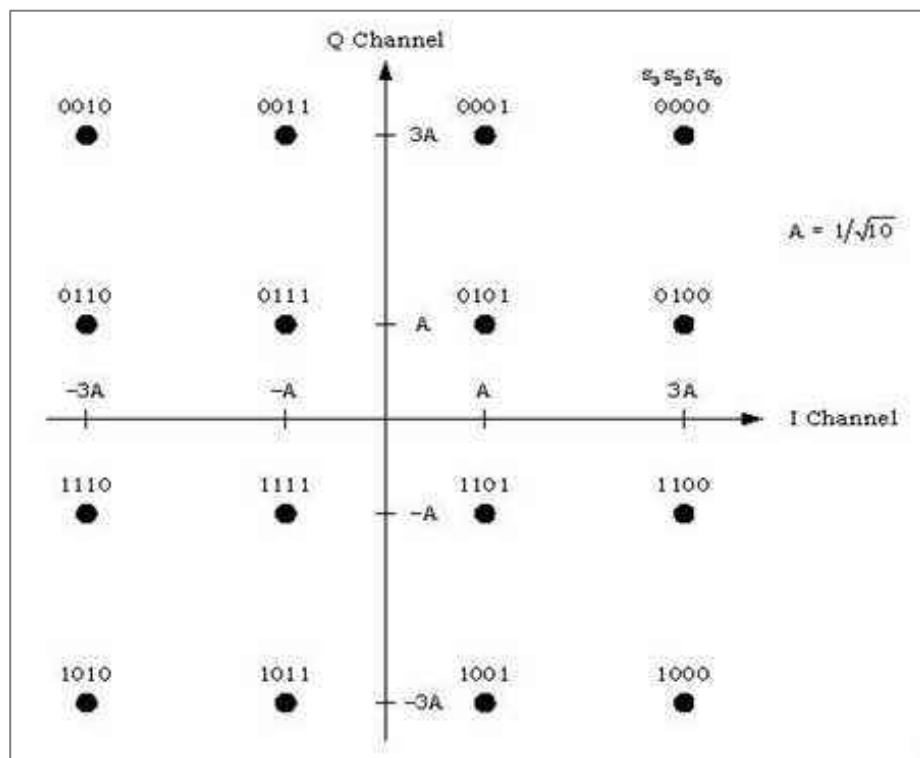
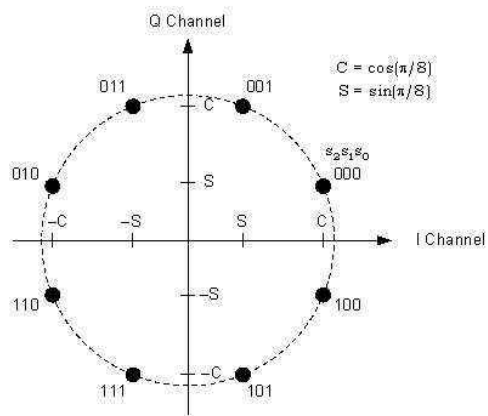
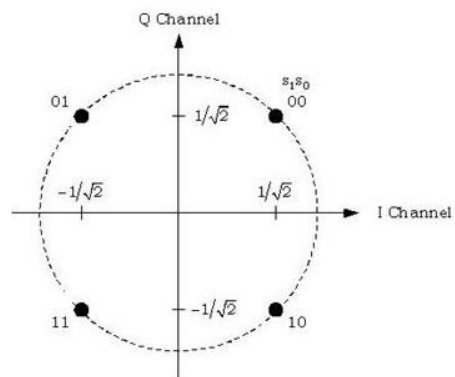


$f \cdot \cos(2\pi f_{\text{载波}} t) - f \cdot \sin(2\pi f_{\text{载波}} t)$



# 数字IQ调制

## ■ 星座图——IQ调制中符号映射的描述





# 数字IQ调制

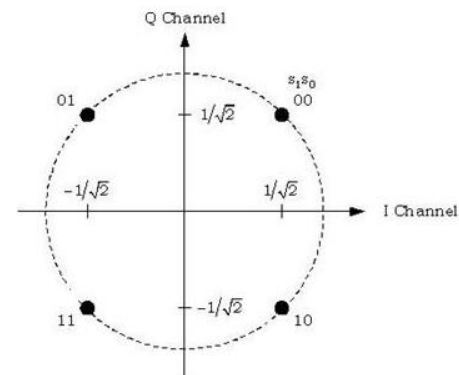
## ■ 举例

- 待传输信号：01010011
- 经过信道编码：01010011**0010**
- 经过符号映射：

01、01、00、11、00、10

$$I: -\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$Q: \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}$$





# 数字IQ调制

## ■ 正交上变频

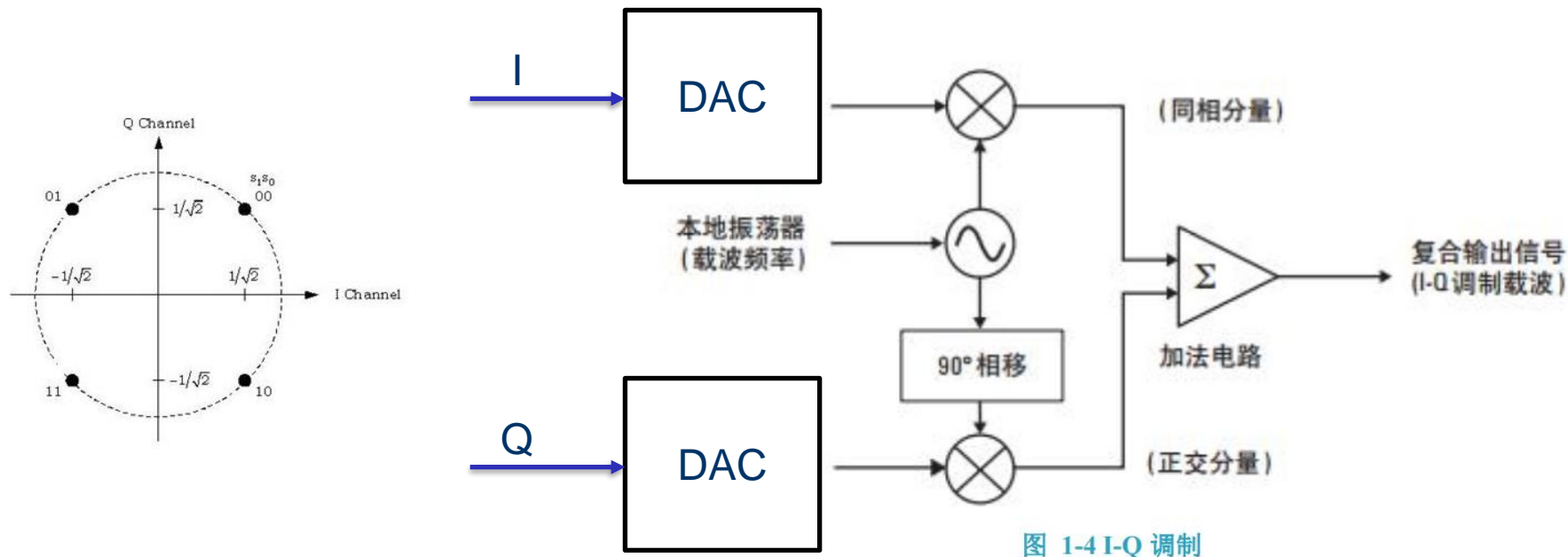
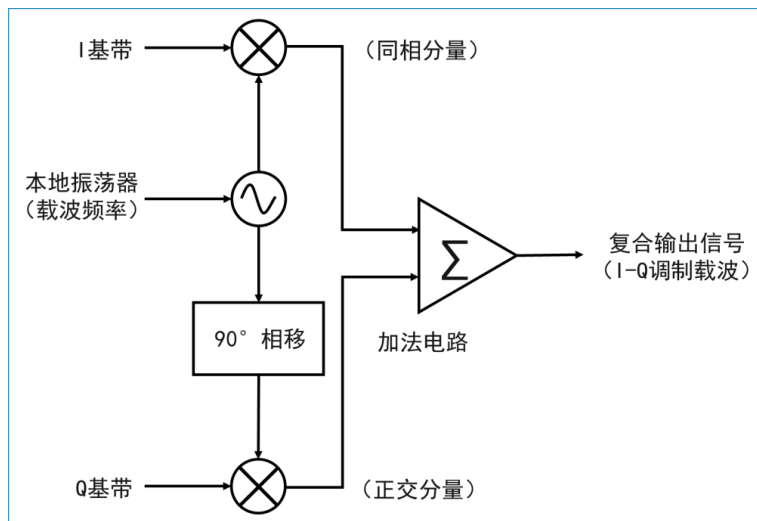


图 1-4 I-Q 调制

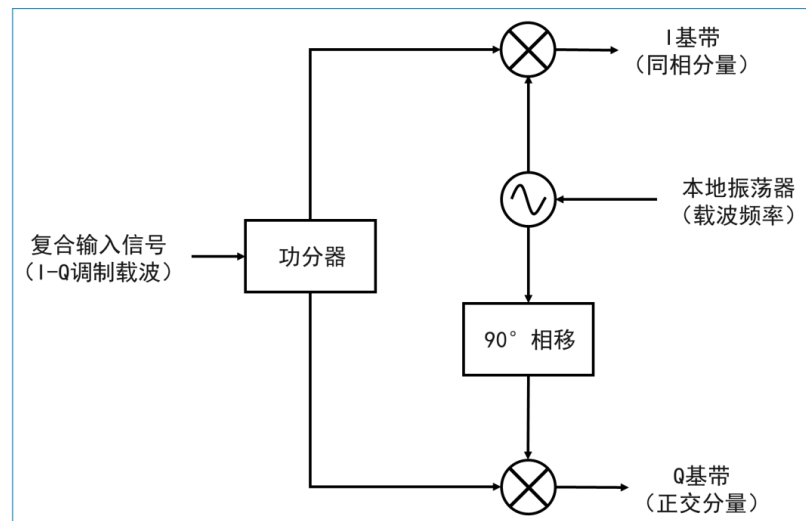
I/Q数据的变化或者更新速度，称为**符号率（码率）**；  
DAC的采样率对应的是最大的符号率；  
符号率\* (bits/符号) = **比特率**；



# ASK调制解调



(a) I-Q调制



(b) I-Q解调

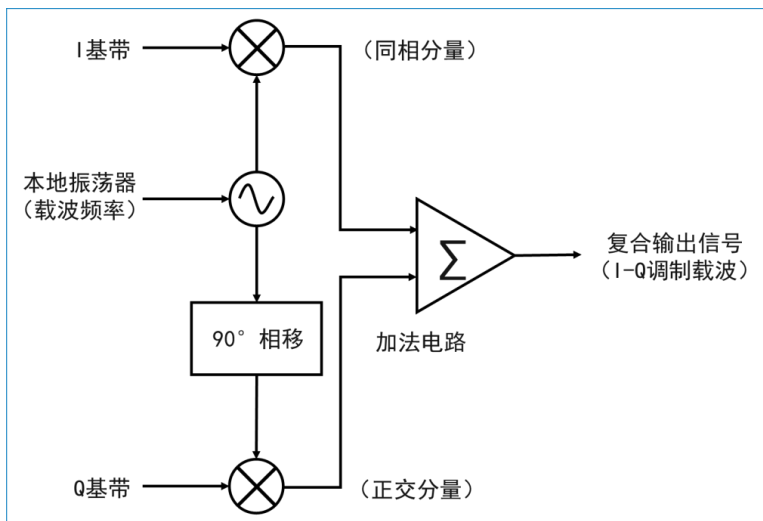
010100110010

2ASK调制

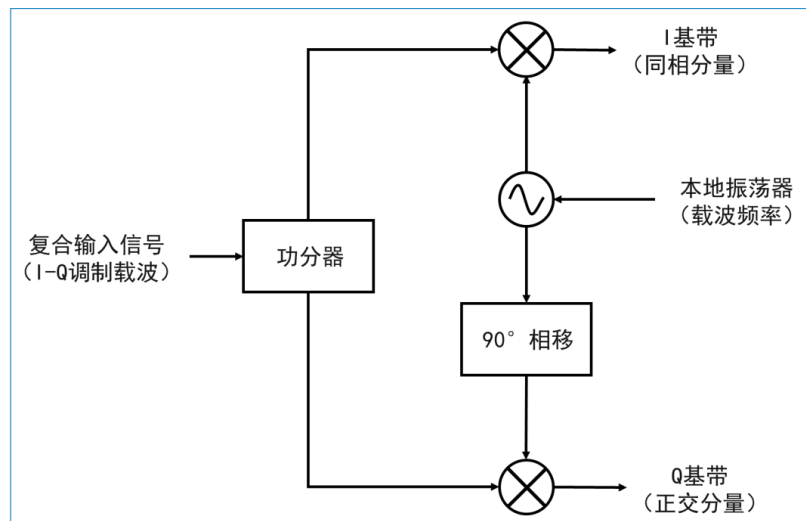
1): 12'd0	12'd4095	12'd0	12'd4095	...
2): 12'd0*(1+j)	12'd4095*(1+j)	12'd0*(1+j)	12'd4095*(1+j)	...
3): 12'd0*j	12'd4095*j	12'd0*j	12'd4095*j	...



# ASK调制解调



(a) I-Q调制



(b) I-Q解调

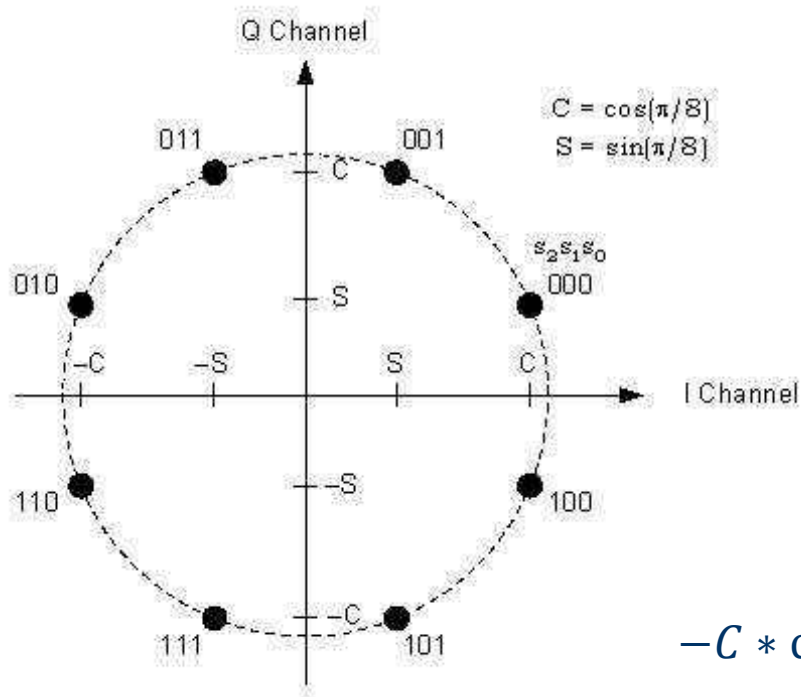
010100110010

4ASK调制

1): $0.25 \times 4095$	$0.25 \times 4095$	0	$1 \times 4095$	...
2): $0.25 \times 4095j$	$0.25 \times 4095j$	$0j$	$1 \times 4095j$	...
3): $0.25 \times 4095(1+j)$	$0.25 \times 4095(1+j)$	$0+0j$	$1 \times 4095(1+j)$	...



# PSK调制解调



010100110010

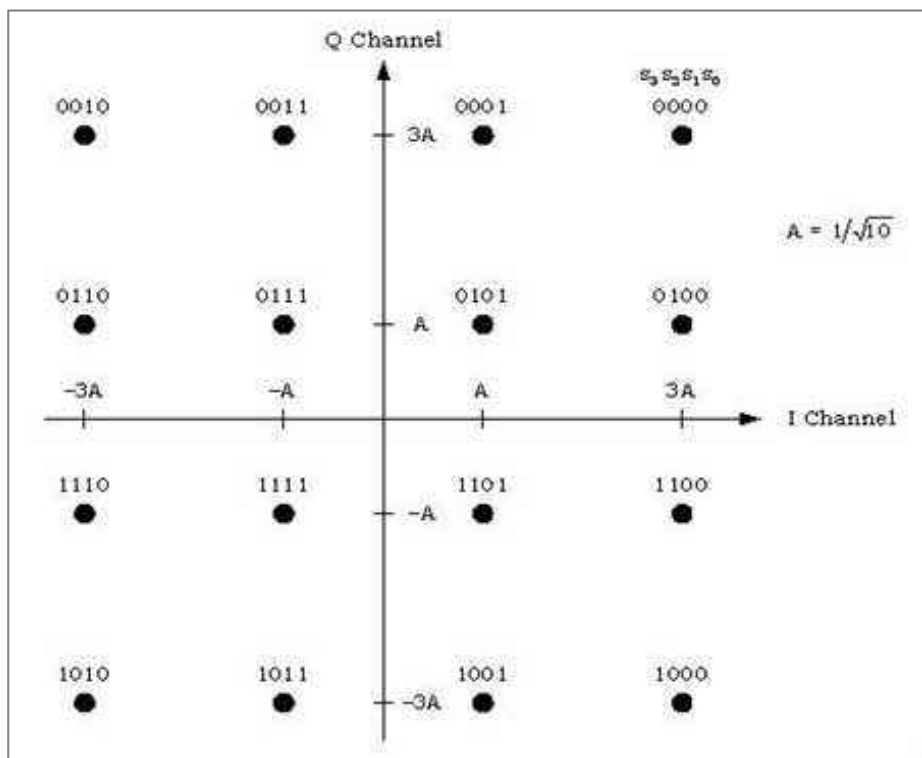
8PSK调制

	-C+Sj	C-Sj	-C-Sj	-C+Sj
I:	-C	C	-C	-C
Q:	S	-S	-S	S

$$-C * \cos \omega t - S * \sin \omega t = \cos \left( \omega t + \arctan \left( \frac{S}{-C} \right) \right)$$



# QAM调制解调



010100110010

16QAM调制

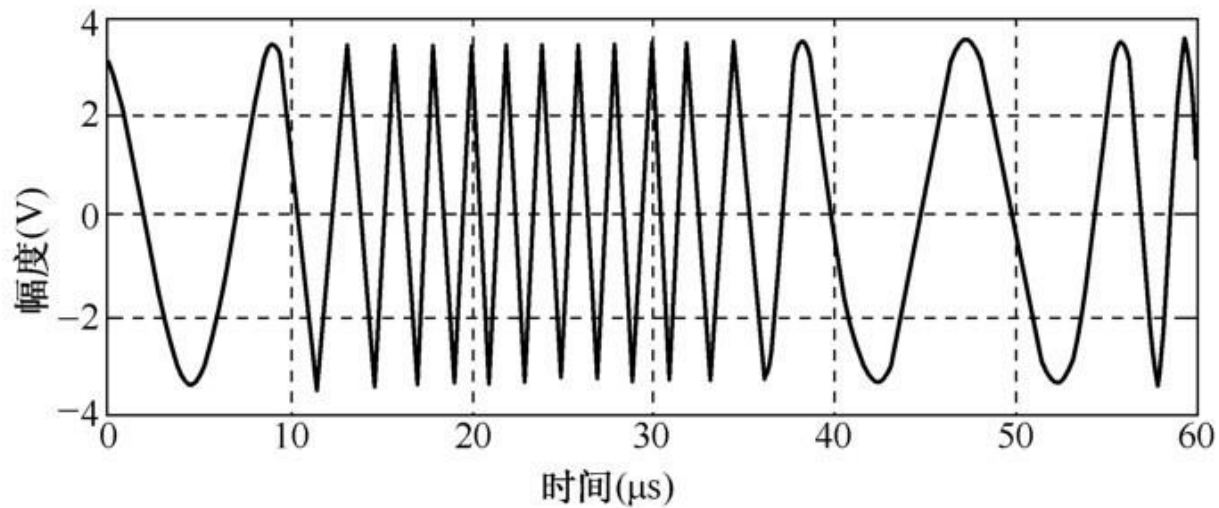
	$A + Aj$	$-A + 3Aj$	$-3A + 3Aj$
I:	$A$	$-A$	$-3A$
Q:	$A$	$3A$	$3A$





# FSK调制解调

- 没有星座图
- 用载波的频率承载信息

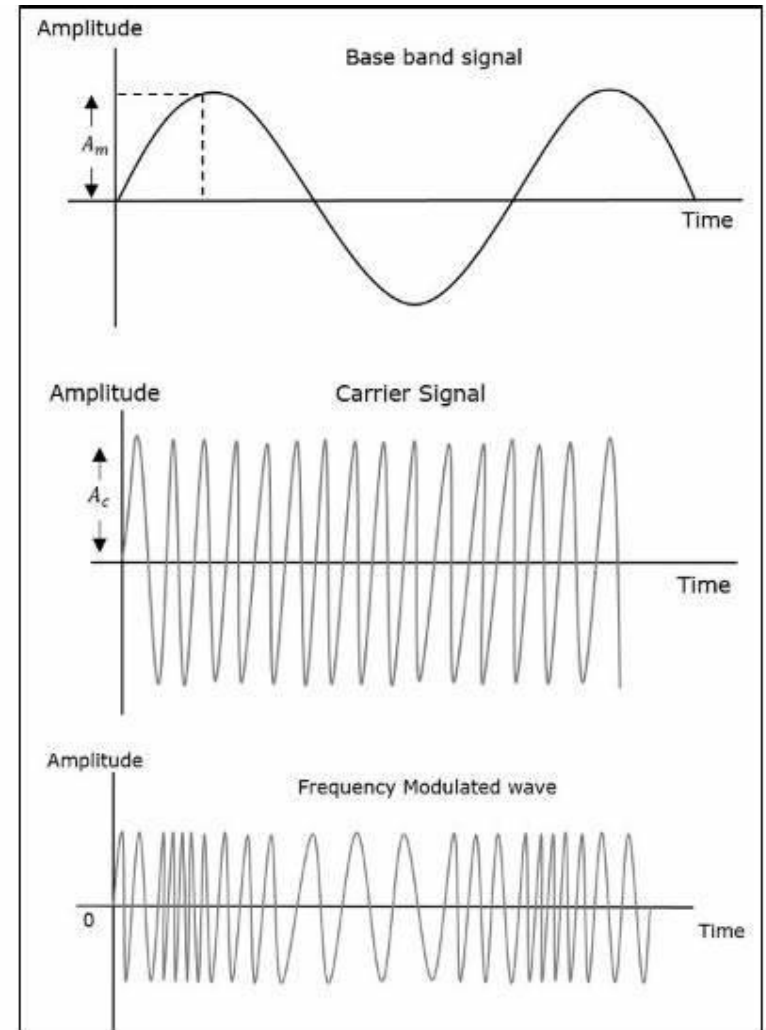
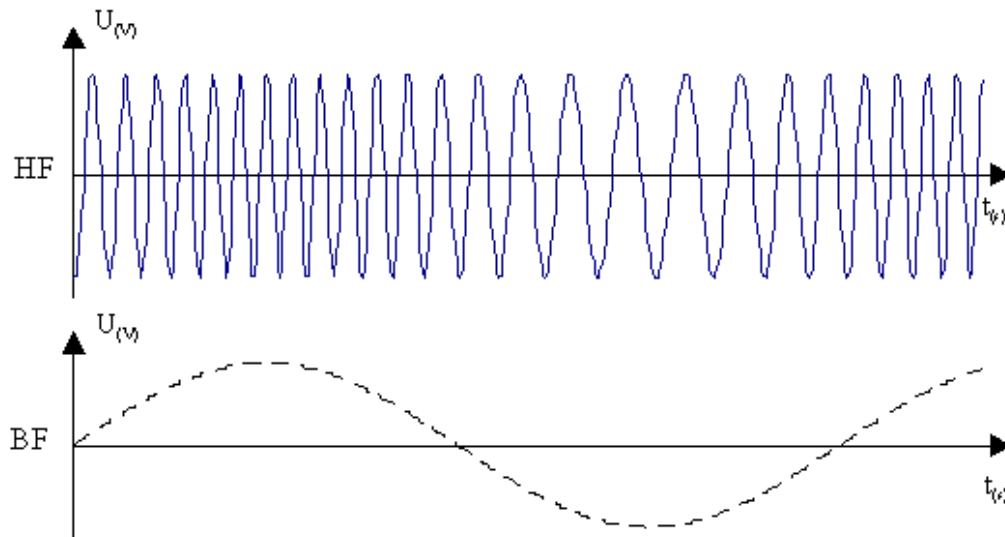


2FSK



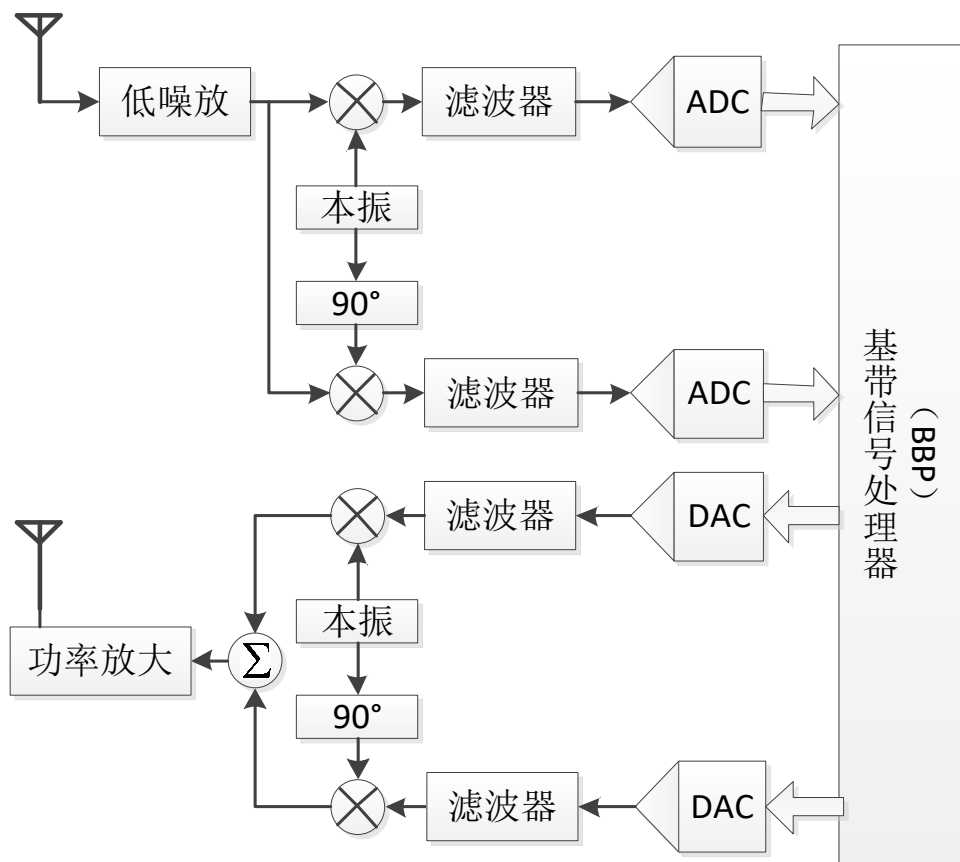
# FSK调制解调

- 没有星座图
- 用载波的频率承载信息





# 实验平台Pluto SDR环境搭建



基带信号处理器由  
FPGA\DSP+PC两个部分完成

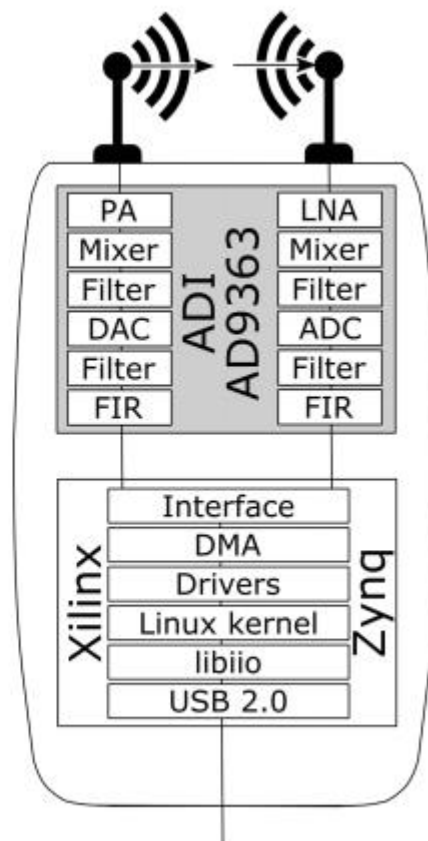
FPGA\DSP和PC之间用  
USB|网口|PCIE通信

零中频软件无线电SDR的结构框图



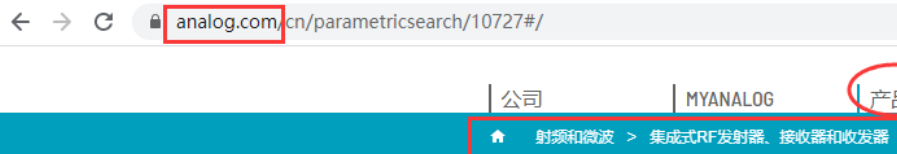
# 实验平台Pluto SDR环境搭建

PC端开发工具: matlab  
和PC端的接口: USB2.0  
射频频点: 375MHz-3.8GHz  
基带带宽: 20MHz  
通道数: 1收1发



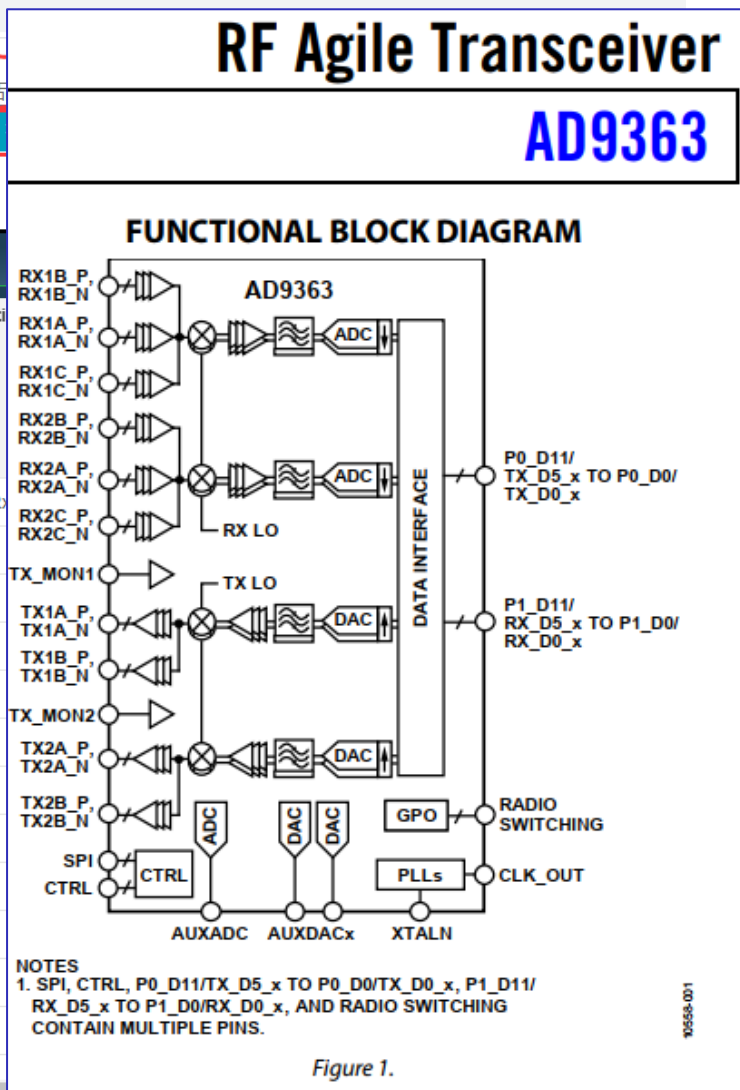


# 实验平台Pluto SDR环境搭建



## 宽带收发器 IC

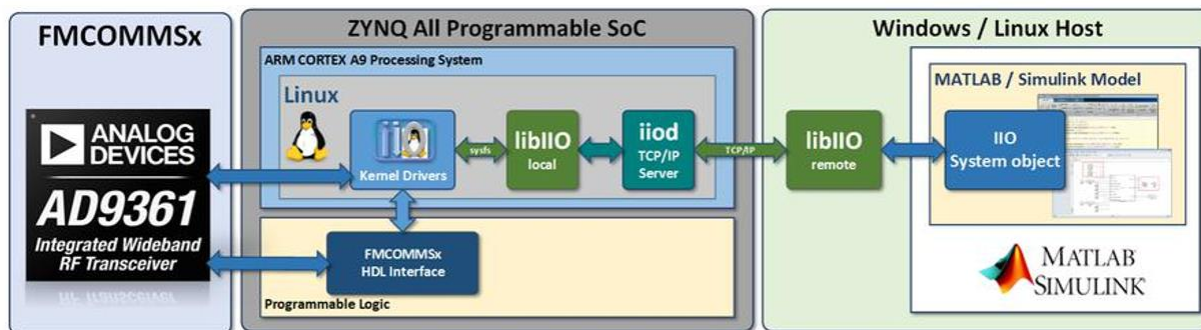
选择参数		全部选择		重置表格		最大值滤波器		按最新排序		保存至 myAnalog	
<div><div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div></div>		产品型号		Freq Response min   Hz		Freq Response max   Hz		Device Configurati			
<div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div>		<div>Filter Parts</div>		<div>70M - 824M</div>		<div>960M - 6G</div>		<div>7 选定值</div>			
<div>Compare</div>		12 器件		<div>HIDE</div>		<div>HIDE</div>		<div>HIDE</div>			
<div><input type="checkbox"/></div>	<div>ADRV9026</div> <div>NEW</div>		<div>650M</div>		<div>6G</div>		<div>4 Rx + 4 Tx + 2 OR</div>				
<div><input type="checkbox"/></div>	<div>ADRV9008-1</div>		<div>75M</div>		<div>6G</div>		<div>2 Rx</div>				
<div><input type="checkbox"/></div>	<div>ADRV9008-2</div>		<div>75M</div>		<div>6G</div>		<div>2Tx + 2 ORx</div>				
<div><input type="checkbox"/></div>	<div>ADRV9009</div>		<div>75M</div>		<div>6G</div>		<div>2 Rx, 2 Tx</div>				
<div><input type="checkbox"/></div>	<div>AD9375</div>		<div>300M</div>		<div>6G</div>		<div>2 Rx, 2 Tx</div>				
<div><input type="checkbox"/></div>	<div>AD9371</div>		<div>300M</div>		<div>6G</div>		<div>2 Rx, 2 Tx</div>				
<div><input type="checkbox"/></div>	<div>HMC8100</div>		<div>800M</div>		<div>4G</div>		<div>1 Rx</div>				
<div><input type="checkbox"/></div>	<div>HMC8200</div>		<div>800M</div>		<div>4G</div>		<div>1 Tx</div>				
<div><input type="checkbox"/></div>	<div>AD9364</div>		<div>71M</div>		<div>6G</div>		<div>1 Rx, 1 Tx</div>				
<div><input type="checkbox"/></div>	<div>AD9363</div>		<div>325M</div>		<div>3.8G</div>		<div>2 Rx, 2 Tx</div>				
<div><input type="checkbox"/></div>	<div>AD9361</div>		<div>70M</div>		<div>6G</div>		<div>2 Rx, 2 Tx</div>				
<div><input type="checkbox"/></div>	<div>ADF4602</div>		<div>824M</div>		<div>960M</div>		<div>1 Rx, 1 Tx</div>				





# 实验平台Pluto SDR环境搭建

- 安装pluto的设备驱动
- 安装matlab
- 编译器安装TDM-GCC，设置环境变量
- IIO驱动安装





# 实验平台Pluto SDR环境搭建

## ■ 怎样确定设备的驱动安装完整？

Device Manager screenshot showing the following devices installed:

- DESKTOP-DMU7LQF
- DVD/CD-ROM 驱动器
- UCM客户端
- 便携设备
- 处理器
- 磁盘驱动器
- 存储控制器
- 打印队列
- 端口 (COM 和 LPT)
  - PlutoSDR Serial Console (COM4)
  - 通信端口 (COM1)
- 固件
- 计算机
- 监视器
- 键盘
- 人体学输入设备
- 软件设备
- 软件组件
- 声音、视频和游戏控制器
- 鼠标和其他指针设备
- 通用串行总线控制器
- 通用串行总线设备
  - IIO
- 图像设备
- 网络适配器
  - Intel(R) Ethernet Connection (7) I219-LM
  - PlutoSDR USB Ethernet/RNDIS Gadget
  - WAN Miniport (IKEv2)
  - WAN Miniport (IP)
  - WAN Miniport (IPv6)

File Explorer screenshot showing the contents of the PlutoSDR (H:) drive:

- img
- config.txt
- info.html
- LICENSE.html

config.txt - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

```
# Analog Devices PlutoSDR Rev.B (Z7010-AD9363)
# Device Configuration File
# 1. Open with an Editor
# 2. Edit this file
# 3. Save this file on the device USB drive
# 4. Eject the device USB Drive
# Doc: https://wiki.analog.com/university/tools/pluto

[NETWORK]
hostname = pluto
ipaddr = 192.168.2.1
ipaddr_host = 192.168.2.10
netmask = 255.255.255.0
```



# 实验平台Pluto SDR环境搭建

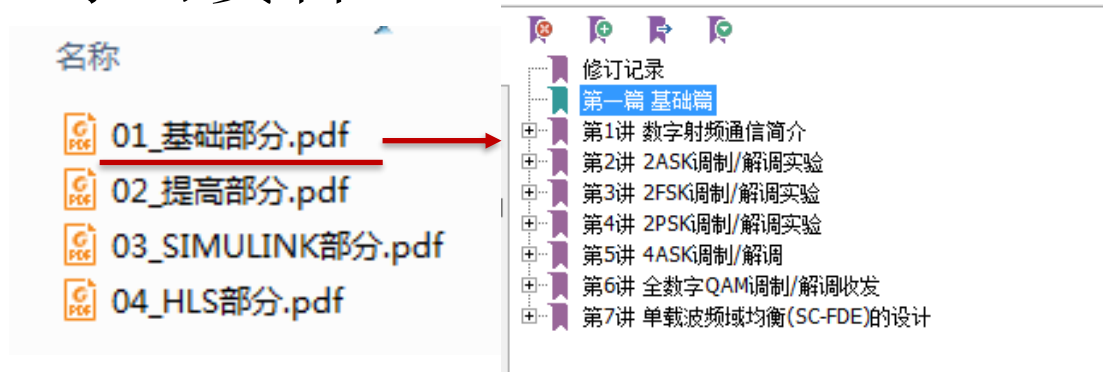
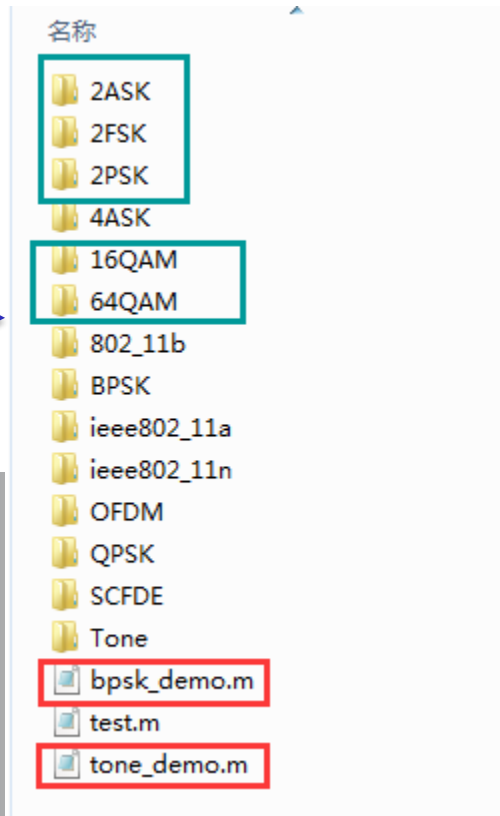
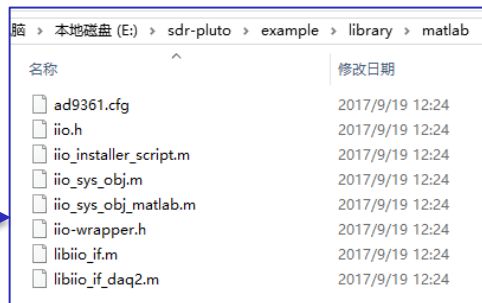
## ■ example (matlab demo 代码)

■ code

■ library

■ source\_code

## ■ 学习资料

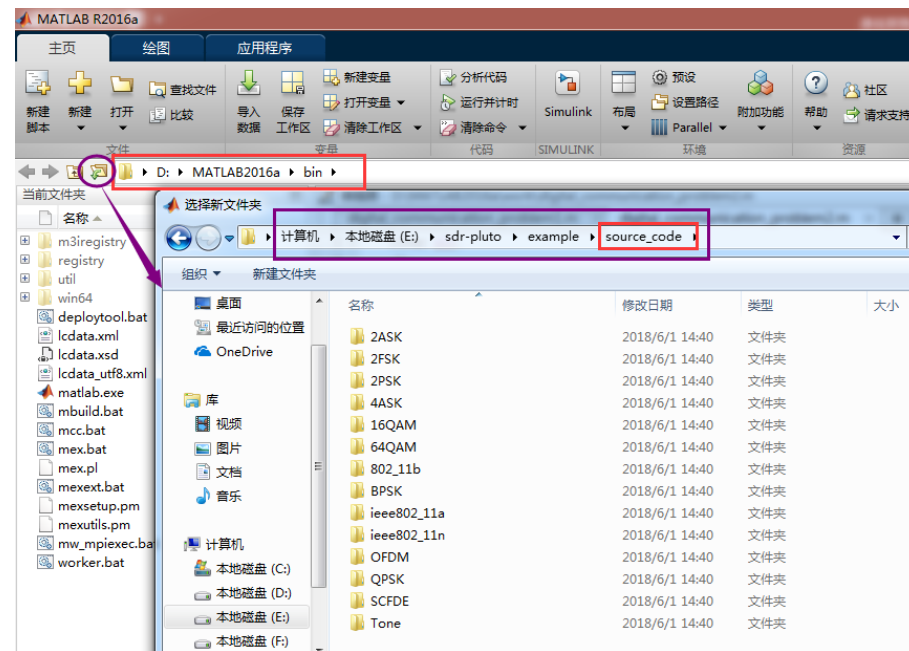






# 实验任务

- 注意工作路径设置
- 2ASK
- 2FSK
- 2PSK
- 16QAM





# 实验任务-2ASK

当前文件夹

- 名称
- 2ASK
  - ask2\_rx\_func.m
  - ask2\_tx\_func.m
- 2FSK
- 2PSK
- 4ASK
- 16QAM
- 64QAM
- 802\_11b
- BPSK
- ieee802\_11a
- ieee802\_11n
- OFDM
- QPSK
- SCFDE
- Tone
- bpsk\_demo.m
- test.m
- tone\_demo.m

编辑器 - E:\sdr-pluto\example\source\_code\bpsk\_demo.m

bpsk\_demo.m x ask2\_rx\_func.m x ask2\_tx\_func.m x +

此文件可以作为实时脚本打开。有关详细信息，请参阅 [创建实时脚本](#)。

```
1 - clearvars -except times;close all;warning off;
2 - set(0,'defaultfigurecolor','w');
3 - addpath ..\library
4 - addpath ..\library\matlab
5
6 - ip = '192.168.2.1';
7 - addpath 2ASK
8 - addpath 2ASK
9
10 %txdata = bpsk_tx_func;
11 % addpath 16QAM\transmitter
12 % addpath 16QAM\receiver
13 txdata = ask2_tx_func(20);
14 txdata = round(txdata .* 2^14);
15 txdata=repmat(txdata, 4,1);
16
17 %% Transmit and Receive using MATLAB libio
18
19 Rx = I+1i*Q;
20 %bpsk_rx_func(Rx(end/2:end));
21 ask2_rx_func(Rx(end/2:end));
22 i=i+1;
23 pause(0.1);
24
25 end
```



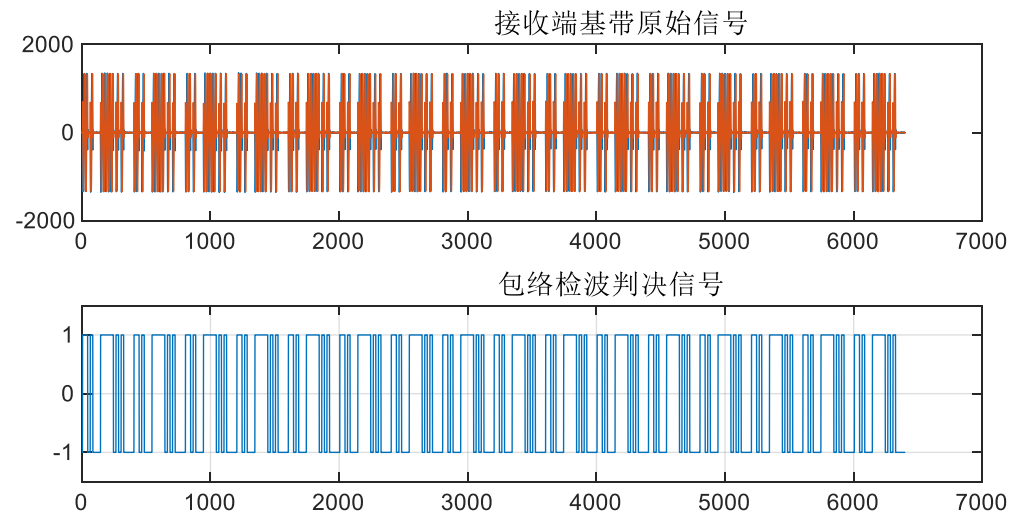
# 实验任务-2ASK

```
编辑器 - E:\sdr-pluto\example\source_code\2ASK\ask2_tx_func.m
bpsk_demo.m x ask2_tx_func.m x ask2_rx_func.m x +
1 function txdata = ask2_tx_func(frame_len)
2
3 %====以下为数据调制部分====%
4 %-----数据源数里-----%
5 bit_Num = frame_len;
6 %-----每个码元占据20个采样点，20M采样率下为1M-----%
7 bit_Width = 20;
8 %-----产生随机数据帧，length=500-----%
9 bit_trans = randi([0, 1],1,bit_Num);
10 %-----数据扩展，每个码元扩展为20位-----%
11 tmp1 = repmat(bit_trans',1,bit_Width);
12 data_trans = reshape(tmp1',1,length(tmp1).*bit_Width);
13 %-----产生I、Q两路载波信号，并量化-----%
14 carrier_I=cos(2*pi/20*[0:19]);
15 carrier_Q=sin(2*pi/20*[0:19]);
16 %-----载波扩展，长度和data_trans相等-----%
17 carrier_I=repmat(carrier_I,1,bit_Num);
18 carrier_Q=repmat(carrier_Q,1,bit_Num);
19 carrier=carrier_I+1i*carrier_Q;
20 %-----键控2ASK信号调制-----%
21 mod_data=data_trans.*carrier;
22 txdata=mod_data.';
23 end
```

```
编辑器 - E:\sdr-pluto\example\source_code\2ASK\ask2_rx_func.m
bpsk_demo.m x ask2_tx_func.m x ask2_rx_func.m x +
1 function ask2_rx_func(rxdata)
2
3 c1=max(max([abs(real(rxdata)),abs(imag(rxdata))])));
4 rxdata_norm = rxdata./c1;
5
6 demod_2ask = abs(rxdata_norm) > 0.5;
7 demod_2ask = demod_2ask.*2 - 1;
8 demod_bits = demod_2ask(1:20:end).';
9 demod_bits = (demod_bits+1)./2;
10
11 figure(1);clf;
12 subplot(311);
13 plot(real(rxdata));
14 hold on;
15 plot(imag(rxdata));
16 title('接收端基带原始信号')
17 subplot(312);
18 plot(demod_2ask);
19 grid on;
20 ylim([-1.5 1.5]);
21 title('包络检波判决信号');
22 subplot(313);
23 text(0.0,0.5,num2str('解调序列:'));
24 text(0.0,0.1,num2str(demod_bits(1:100)));
25 axis off;
26 grid on;
27 ylim([-1 1]);
28 end
```



# 实验任务-2ASK

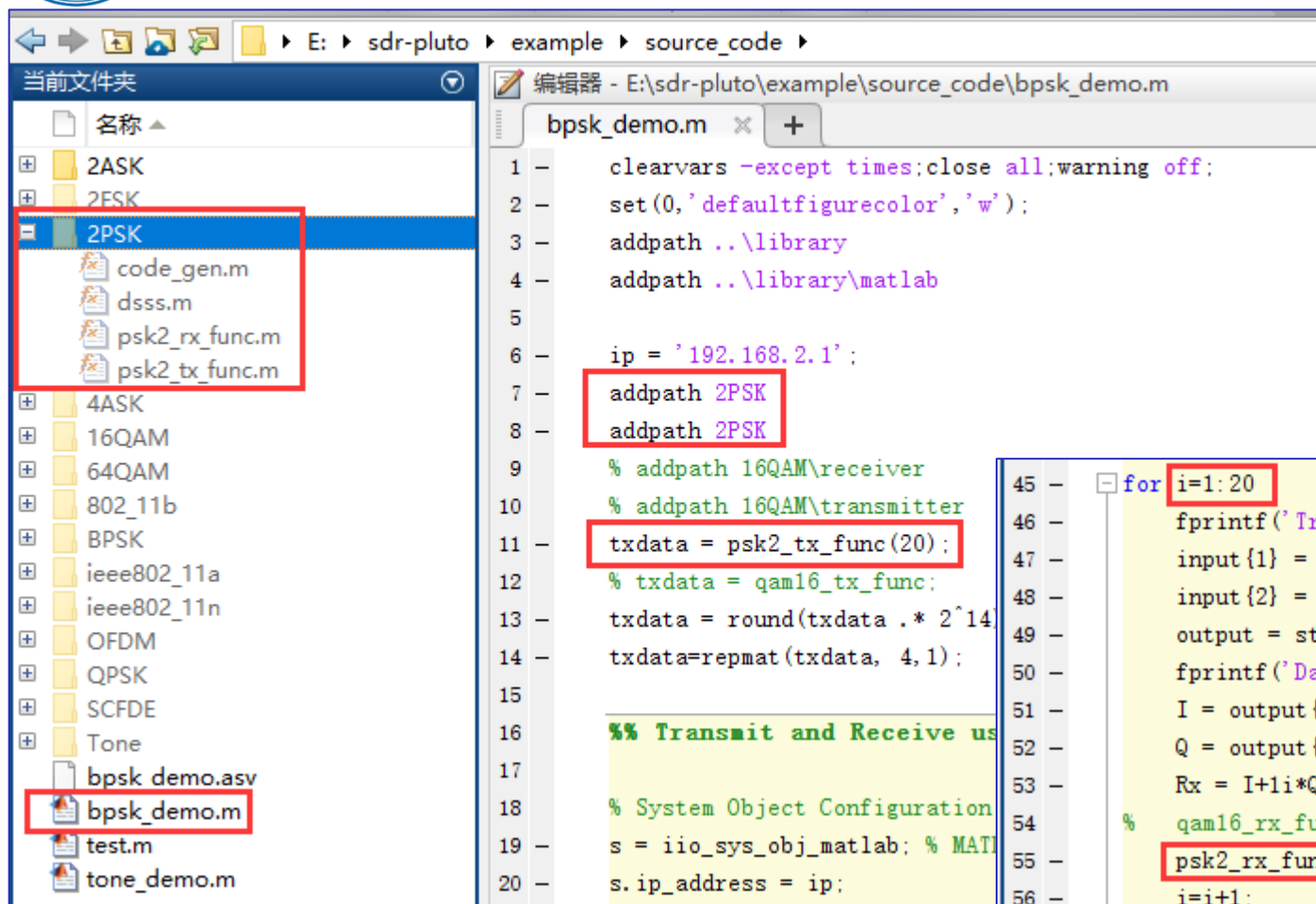


解调序列:

0 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1



# 实验任务-2PSK



```
45 for i=1:20
46     fprintf('Transmitting Data Block %i ... \n',i);
47     input{1} = real(txdata);
48     input{2} = imag(txdata);
49     output = stepImpl(s, input);
50     fprintf('Data Block %i Received... \n',i);
51     I = output{1};
52     Q = output{2};
53     Rx = I+1i*Q;
54     % qam16_rx_func(Rx(end/2:end));
55     psk2_rx_func(Rx(end/2:end));
56     i=i+1;
57     pause(0.1);
58 end
```



# 实验任务-2FSK

当前文件夹

- 名称 ▲
- 2ASK
- 2FSK**
  - fsk2\_rx\_func.m
  - fsk2\_tx\_func.m
- 2PSK
- 4ASK
- 16QAM
- 64QAM
- 802\_11b
- BPSK
- ieee802\_11a
- ieee802\_11n
- OFDM
- QPSK
- SCFDE
- Tone
- bpsk\_demo.asv
- bpsk\_demo.m**
- test.m
- tone\_demo.m

编辑器 - E:\sdr-pluto\example\source\_code\bpsk\_demo.m

bpsk\_demo.m

```
1 clearvars -except times;close all;warning off;
2 set(0,'defaultfigurecolor','w');
3 addpath ..\library
4 addpath ..\library\matlab
5
6 ip = '192.168.2.1';
7 addpath 2FSK
8 addpath 2FSK
9 % addpath 16QAM\receiver
10 % addpath 16QAM\transmitter
11 txdata = fsk2_tx_func(20);
12 % txdata = qam16_tx_func;
13 txdata = round(txdata .* 2^14)
14 txdata= repmat(txdata, 4,1);
15
16 %% Transmit and Receive us
17
18 % System Object Configuration
```

```
45 for i=1:20
46     fprintf('Transmitting Data Block %i ... \n',i);
47     input{1} = real(txdata);
48     input{2} = imag(txdata);
49     output = stepImpl(s, input);
50     fprintf('Data Block %i Received... \n',i);
51     I = output{1};
52     Q = output{2};
53     Rx = I+1i*Q;
54     % qam16_rx_func(Rx(end/2: end));
55     fsk2_rx_func(Rx(end/2: end));
56     i=i+1;
57     pause(0.1);
58 end
59 fprintf('Transmission and reception finished\n');
60
```



# 实验任务-QAM调制解调

当前文件夹: E:\sdr-pluto\example\source\_code

名称

- 2ASK
- 2FSK
- 2PSK
- 4ASK
- 16QAM**
  - receiver
    - crc32.m
    - descramble.m
    - display.slx
    - qam16\_rx\_func.m
    - rx\_channel\_est.m
    - rx\_delete\_pilot.m
    - rx\_freq\_sync.m
    - rx\_package\_search.m
    - rx\_phase\_sync.m
    - rx\_phase\_track.m
    - rx\_qam16\_demod.m
    - rx\_qpsk\_demod.m
    - rx\_time\_equalize.m
    - rx\_timing\_recovery.m
    - tx\_gen\_m\_seq.m
    - tx\_module.m
  - transmitter
    - crc32.m
    - insert\_pilot.m
    - qam16\_tx\_func.m
    - scramble.m
    - str\_to\_bits.m
    - tx\_gen\_m\_seq.m
    - tx\_module.m
- 64QAM
- 802\_11b
- BPSK
- ieee802\_11a

编辑器 - E:\sdr-pluto\example\source\_code\bpsk\_demo.m

bpsk\_demo.m x qam16\_tx\_func.m x qam16\_rx\_func.m x +

此文件可以作为实时脚本打开。有关详细信息, 请参阅 [创建实时脚本](#)。

```
1 - clearvars -except times;close all;warning off;
2 - set(0,'defaultfigurecolor','w');
3 - addpath ..\library
4 - addpath ..\library\matlab
5
6 - ip = '192.168.2.1';
7 - %addpath 2ASK
8 - %addpath 2ASK
9 - addpath 16QAM\receiver
10 - addpath 16QAM\transmitter
11 - %txdata = bpsk_tx_func;
12 - % addpath 16QAM\transmitter
13 - % addpath 16QAM\receiver
14 - %txdata = ask2_tx_func(20);
15 - txdata = qam16_tx_func;
16 - txdata = round(txdata .* 2^14);
17 - txdata=repmat(txdata, 4,1);
18
19 %% Transmit and Receive using MATLAB 1
20
21 % System Object Configuration
22 - s = iio_sys_obj_matlab; % MATLAB libio Con
23 - s.ip_address = ip;
24 - s.dev_name = 'ad9361';
25 - s.in_ch_no = 2;
26 - s.out_ch_no = 2;
27 - s.in_ch_size = length(txdata);
28 - s.out_ch_size = length(txdata).*8;
29
```

```
48 - for i=1:20
49 -     fprintf('Transmitting Data Block %i ...\n',i);
50 -     input{1} = real(txdata);
51 -     input{2} = imag(txdata);
52 -     output = stepImpl(s, input);
53 -     fprintf('Data Block %i Received...\n',i);
54 -     I = output{1};
55 -     Q = output{2};
56 -     Rx = I+1i*Q;
57 -     %bpsk_rx_func(Rx(end/2:end));
58 -     qam16_rx_func(Rx(end/2:end));
59 -     i=i+1;
60 -     pause(0.1);
61 - end
```



# 实验报告要求

## 1 调制解调

### 一 实验内容

- 1.1 2ASK 幅移键控
- 1.2 2FSK 频移键控
- 1.3 2PSK 相移键控
- 1.4 QAM 调制

### 二 实验原理

- 2.1 IQ 调制基本原理
- 2.2 2ASK、2PSK、2FSK 的调制解调原理
- 2.3 QAM 调制解调原理

### 三 实验过程

- 3.1 发送端整体框图
- 3.2 发送端数据帧结构
- 3.3 接收端整体框图
- 3.4 接收时对帧的拆解步骤
- 3.5 QAM 调制解调的具体实现

### 四 实验结果及分析

### 五 思考题

- 5.1 实验中的符号率、采样率、比特率各是多少？之间有怎样的对应关系
- 5.2 你实现的 QAM 映射是格雷映射吗？格雷映射有什么优点？画出你的 QAM 星座图