

# 信号与信息处理课程设计

林艳飞

2025.12



# 主要内容

- 实验一：GUI界面设计
- 实验二：典型信号的产生
- 实验三：信号频谱分析
- 实验四：数字滤波器设计



# 主要内容

- 实验五：脑电SSVEP信号的目标分类
- 实验六：VR眼动数据的目标分类
- 实验七：脑电ERP信号的去噪方法
- 实验八：心电信号心率检测方法
- 实验九：空域滤波器设计
- 实验十：包络检测器设计（选做）



# 时间安排

- 实验一：GUI界面设计
- 实验二：典型信号的产生
- 实验三：信号频谱分析
  - 快速傅里叶变换
  - 功率谱分析
- 实验四：数字滤波器设计
  - IIR滤波器设计
  - FIR滤波器设计（窗函数）
  - 滤波器子函数及应用

第一周内完成

第二周内完成



# 时间安排

- 实验五：脑电SSVEP信号的目标分类
  - 实验六：VR眼动数据的目标分类
  - 实验七：脑电ERP信号的去噪方法
- 第二周内完成



# 时间安排

- 实验八：心电信号心率检测方法
- 实验九：空域滤波器设计
- 实验十：包络检测器设计（选做）

第三周内完成



# 基本要求

- 按讲义里的题目要求一一实现，实验十选做。
- 评分要求：平时考勤、课程表现及软件演示（40分）+实验报告（60分）
- 可相互讨论学习，严禁抄袭。
- 若有抄袭者，抄袭者与被抄袭者该门课程不及格。课堂表现

# 实验报告

- 每题内容如下：
  - 题目
  - 原理或方法（所用函数，频率分析方法，滤波器设计方法等）
  - 结果图
  - 分析讨论
  - 附程序代码

软件验收时间截止：每周周四前

提交实验报告的截止时间：每周周日前





# 实验一 GUI界面设计



# 界面设计GUI

- (a) Using GUIDE (GUI Development Environment);
  - Simpler, more straightforward
- (b) Coding from MATLAB Editor.



- 命令窗口输入guide启动GUIDE

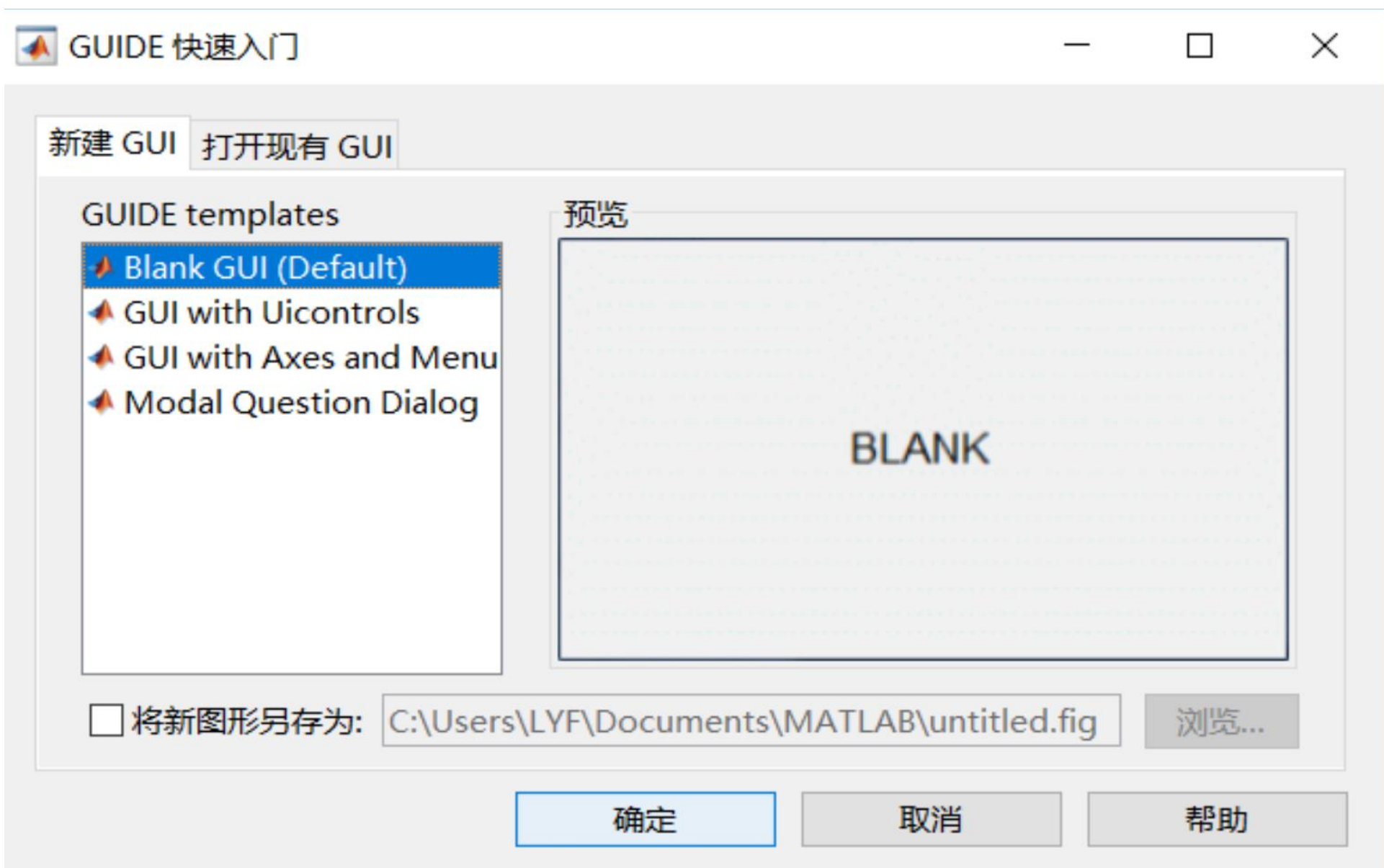




表 6-1 常用控件

控件名称	功能说明
Push Button (按钮)	单击按钮, 可以执行某个操作, 松开后, 恢复到原位
Slider (滑动框)	用于从一个数据范围中选择一个数据值
Radio Button (单选按钮)	单个按钮用来在两种状态之间切换, 当多个单选按钮成组时, 通常只能从一组选择对象中选择单个对象
Check Box (复选框)	单个复选框用来在两种状态之间切换, 当多个复选框成组时, 可使用户在一组状态中做多项选择
Edit Text (文本编辑框)	用户可以动态地修改或替换文本框中的内容
Static Text (静态文本)	显示文本字符串, 不能进行编辑, 用于显示标题、标签和用户信息
Pop-up Menu (弹出菜单)	可以从菜单的多个选项中选择一个
List Box (列表框)	产生的文本可以用于选择, 不能编辑
Toggle Button (双位开关)	产生一个动作并指示一个二进制状态, 当单击它时, 按钮按下, 执行指令, 再次单击, 按钮弹起, 再次执行指令
Table (表格)	创建表格组件
Axes (坐标轴)	用于在 GUI 中添加图形和图像
Panel (面板)	将 GUI 中的相关控件分组管理和显示, 易于理解
Button Group (按钮组)	类似于面板, 按钮组中的控件只包括单选按钮和双位开关
ActiveX Control (ActiveX 控件)	用于在 GUI 中显示控件, 仅限于 Windows 系统使用



## • Getting Started

- (a) Push Button    (a) Slider
- (b) Radio Button    (b) Check Box
- (c) Edit Text    (c) Static Text
- (d) Pop-up Menu    (d) Listbox
- (e) Toggle Button    (e) Table
- (f) Axes    (f) Panel
- (g) Button Group    (g) ActiveX Control

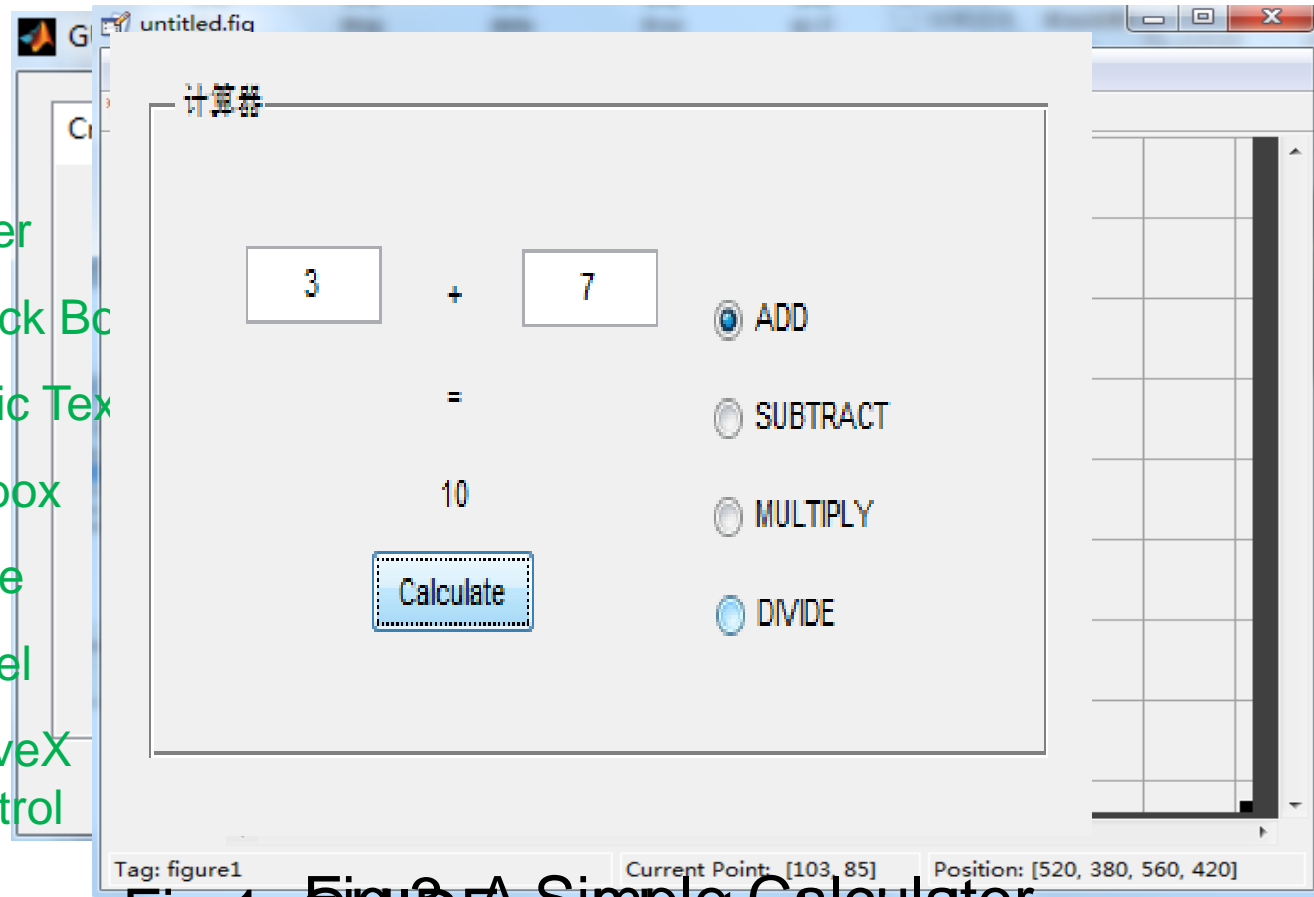


Fig.1 A Simple Calculator    Fig.2 GUIDE design window





## Exam:

Getting Started

Adding  
Components

Edited property inspector

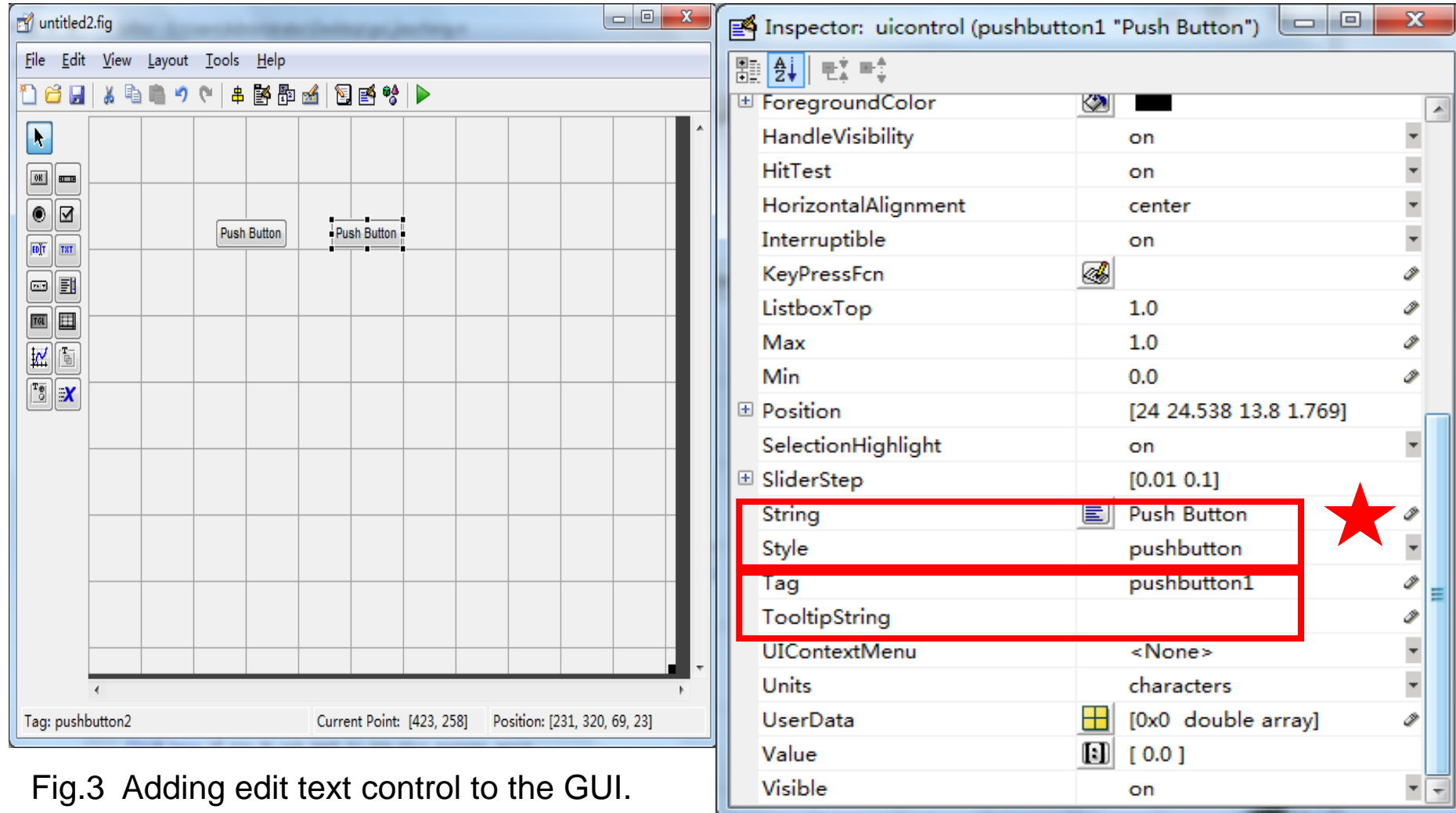


Fig.3 Adding edit text control to the GUI.

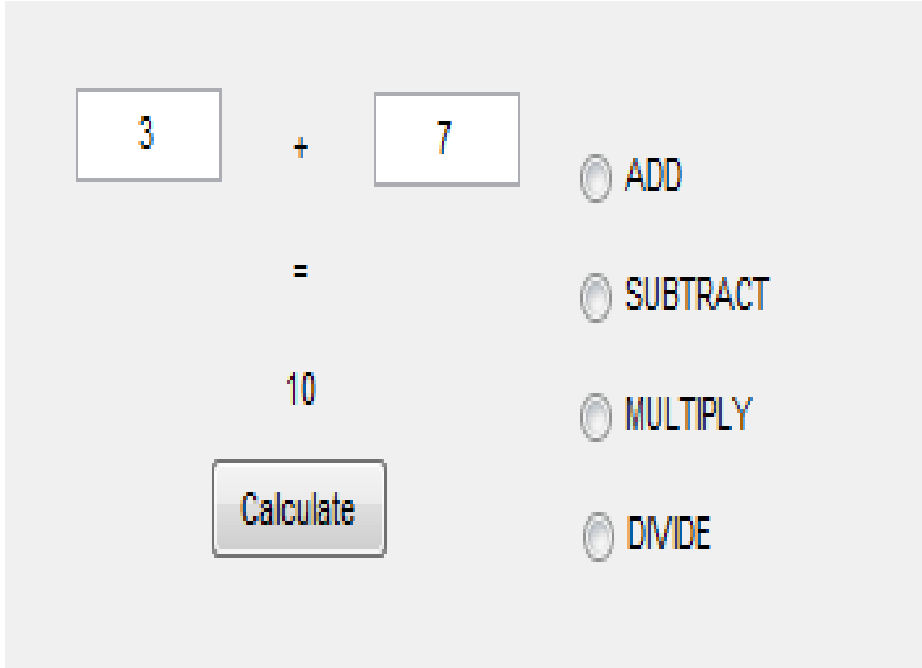


Table.1 Properties of various controls used for this exam.

Component	String	Tag
Edit Text1	3	number1
Edit Text2	7	number2
Static Text1	+	text1
Static Text2	=	text2
Static Text3	10	text3
Push Button	Calculate	pushbutton1
Radio Button1	ADD	radiobutton1
Radio Button2	SUBTRACT	radiobutton2
Radio Button3	MULTIPLY	radiobutton3
Radio Button4	DIVIDE	radiobutton4





+

Getting Started

Adding  
Components

GUI Programming

Editor - C:\Users\Administrator\Desktop\gui\_jiaocheng.m

```
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to radiobutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of radiobutton1
set(handles.radiobutton1,'Value',1);
set(handles.radiobutton2,'Value',0);
set(handles.radiobutton3,'Value',0);
set(handles.radiobutton4,'Value',0);
set(handles.text1,'String','+')

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of radiobutton1
```

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

a = str2double(get(handles.number1,'String'));
b = str2double(get(handles.number2,'String'));
index1 = get(handles.radiobutton1,'Value');
index2 = get(handles.radiobutton2,'Value');
index3 = get(handles.radiobutton3,'Value');
index4 = get(handles.radiobutton4,'Value');
if index1 == 1
    c=a+b;
else if index2==1
    c=a-b;
else if index3==1
    c=a*b;
else if index4==1
    c=a/b;
end
end
end
end
set(handles.text3,'String',c);
```

Fig.5 Programming Radio and Push Button

Fig.4 Accessing function handles



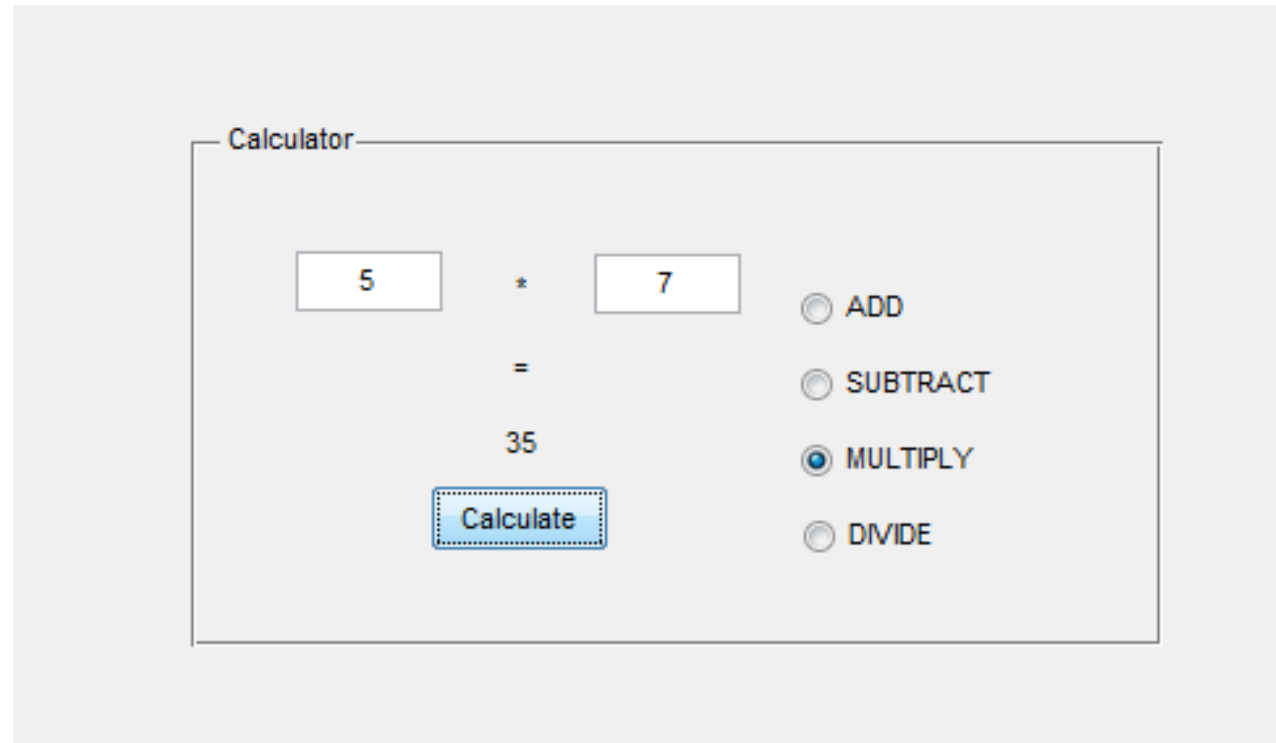
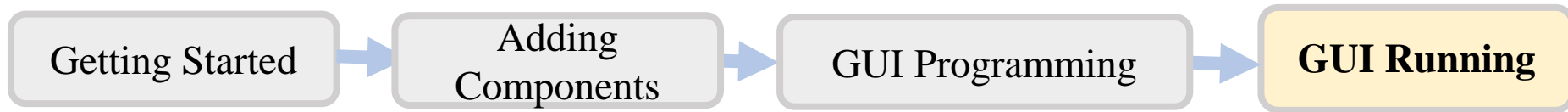
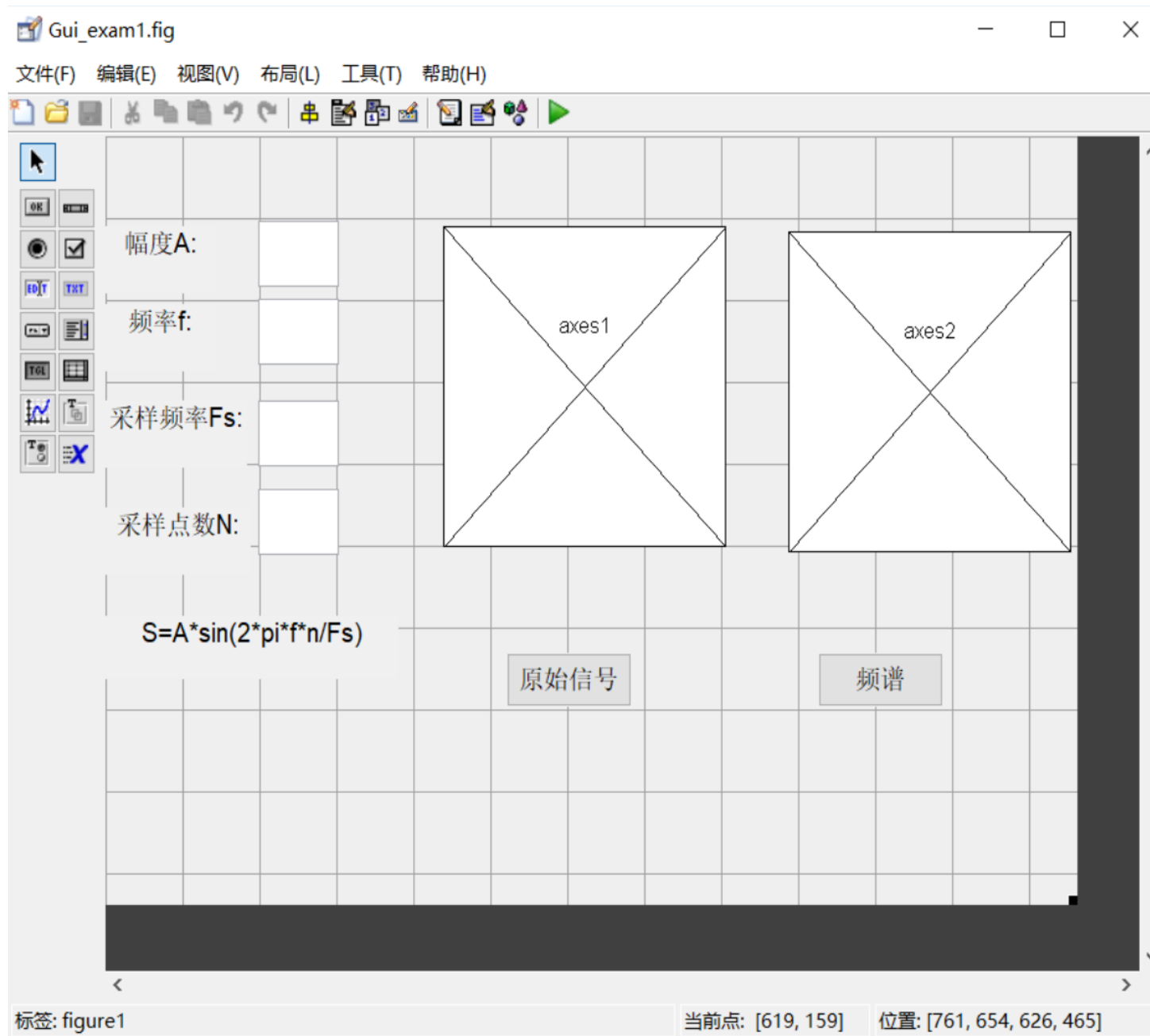


Fig.6 Modifying and running GUI for multiplication.



## • 例2 正弦信号的频谱



幅度A:

1

频率f:

30

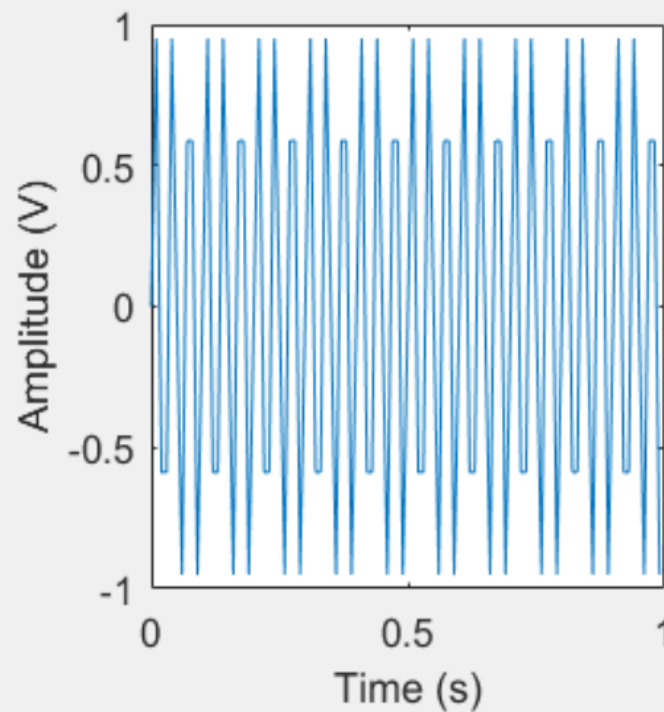
采样频率Fs:

100

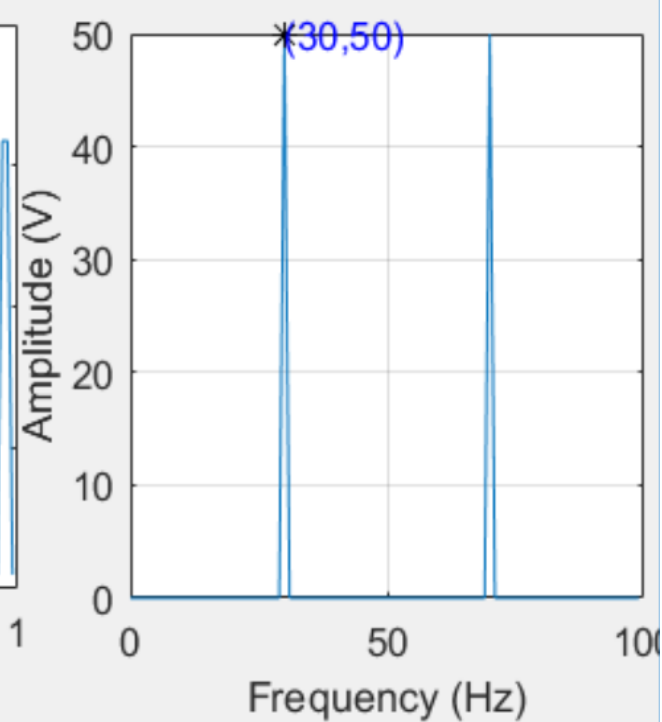
采样点数N:

100

$$S=A*\sin(2*\pi*f*n/Fs)$$



原始信号



频谱



# 实验二 典型信号的建模与产生



## 1、正弦波信号

频率 $f$ ，幅度 $A$ ，相位 $\phi$ 的正弦波，时长为 $L$ ，采样频率 $f_s$ 为1000 Hz

## 2、方波信号 `help square`

幅度 $A$ 、占空比 $a$ 的方波信号，时长为 $L$ ，采样频率 $f_s$ 为1000 Hz

## 3、混合正弦信号

一频率为 $f_1=30\text{Hz}$ ，另一频率为 $f_2=300\text{Hz}$ ，幅度均为 $A=1$ ，时长为 $L=1\text{s}$ ，相位为0的混合正弦波信号，采样频率 $f_s$ 为1000 Hz

## 4、高斯分布的白噪声

时长为 $L$ ，均值为 $\mu$ ，方差为 $\sigma$        $x=[\text{randn}(1,L)*\text{sqrt}(\delta^2)+u$

## 5、均匀分布的白噪声

时长为 $L$ ，均值为 $\mu$ ，方差为 $\sigma$        $x=[\text{rand}(1,L)-0.5]*\text{sqrt}(12)*\text{sqrt}(\delta^2)+u$

## 6、加载已有的ssvep.mat文件信号

`load ('ssvep.mat') ; plot(s) ;`



# 实验三 信号频谱分析



- 离散傅里叶变换

$$\mathbf{X(k)} = \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{x(n)} \mathbf{W_N^{kn}}, \quad \mathbf{n = 0, 1, \dots, N-1}$$

- Matlab 函数fft

- $Y=\text{fft}(x)$  多少点的输入多少点的输出;  $y=\text{fft}(x,N)$  多少点的输入N点的输出
- 幅值为共轭偶对称的复数，频率信息只看0~pi或fs/2或一半点数，幅值取abs(y)，相频响应angle(y)或phase(y)函数
- 横坐标转换：

点数

1~N

数字角频率

0~ 2\*pi

采样频率

0~ fs





- 功率谱
- 定义：自相关函数的傅里叶变换
- 由Matlab函数periodogram实现
  - [Pxx, w]= periodogram(x)
  - [Pxx, w]= periodogram(x>window,nfft,fs)

$$S_X(\omega) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} R_X(m) e^{-jm\omega}$$

Pxx 为输出的功率谱估计值；

f 为频率向量；

w 为归一化的频率向量；

window 代表窗函数

nfft 设定 FFT 算法的长度；

fs 表示采样频率；



表 2.1 常用窗函数及产生窗函数的 MATLAB 函数

窗函数	MATLAB 函数	窗函数	MATLAB 函数
矩形窗	<code>rectwin</code> <code>boxcar</code>	Blackman 窗	<code>blackman</code>
三角窗	<code>triang</code>	Chebyshev 窗	<code>chebwin</code>
Hanning 窗	<code>hann</code>	Bartlett 窗	<code>bartlett</code>
Hamming 窗	<code>hamming</code>	Kaiser 窗	<code>kaiser</code>

- 默认为将x做2的幂次点功率谱，呈现前一半+1个点的值

```
x=rand(1,1000);[Pxx,w]=periodogram(x);plot(w,Pxx);
%513点的值
```



- Window: 矢量; 用法rectwin(L)
- Nfft: 计算指定点数的功率谱, 只呈现取一半+1个值

```
x=rand(1,1000);  
[Pxx,w]=periodogram(x,boxcar(1000),1000,1);  
p[Pxx,w]=periodogram(x,[],[],fs);  
plot(w,Pxx); % 501点的值 w对应采样频率域
```

- Periodogram函数默认横坐标为数字角频率域(0,pi);
- 点数域 -> 采样频率域 -> 数字角频率域对应关系:  
1: Nfft -> 0: fs -> 0:2\*pi
- 将点数域转为采样频率域:  
 $w = fs/Nfft * (0:Nfft/2);$
- 将数字角频率域转为采样频率域:  
 $w1 = 0:pi; w = fs/(2*pi) * w1;$



# 实验四 数字滤波器的设计



- 直接利用Matlab设计IIR滤波器
- butter函数、cheryl函数、chewy2函数、elip函数可设计模拟滤波器的方法，也可直接用于设计IIR数字滤波器，由于双线性变换法的优点，这些函数都采用双线性变换。
- $[b \ a] = \text{butter}(N, Wn)$  设计低通巴特沃斯数字滤波器
- $[b \ a] = \text{cheby1}(N, Rp, Wn)$  设计低通切比雪夫1型数字滤波器
- $[b \ a] = \text{cheby2}(N, As, Wn)$  设计低通切比雪夫2型数字滤波器
- $[b \ a] = \text{ellip}(N, Rp, As, Wn)$  设计低通椭圆数字滤波器
- 其中，N表示滤波器的阶数： $Wn$ 表示取值在0~1之间的截止频率（以pi单位），当Wn为包含两个元素的向量  $[W1 \ W2]$  时，表示设计带通数字滤波器，通带介于W1和W2之间



- 参数N和Wn可以采用函数 buttord、函数 cheb1ord、函数 cheb2ord、函数 ellipord求得，这些函数能在已知设计指标时给出滤波器的阶数N和截止频率Wn，这些函数的具体使用方法如下
- $[N, W] = \text{buttord}(W_p, W_{st}, R_p, A_s)$  给出数字巴特沃斯滤波器的阶数N和截止频率Wn
- $[N, W] = \text{cheb1ord}(W_p, W_{st}, R_p, A_s)$  给出数字切比雪夫1型滤波器的阶数N和截止频率wn
- $[N, W] = \text{cheb2ord}(W_p, W_{st}, R_p, A_s)$  给出数字切比雪夫I型滤波器的阶数N和截止频率Wn
- $[N, W] = \text{ellipord}(W_p, W_{st}, R_p, A_s)$  给出数字椭圆滤波器的阶数N和截止频率wn
- 其中，Wp和Wt分别表示通带和阻带截止频率，Rp表示通带波动，As表示阻带衰减



例：设计低通滤波器，截止频率40Hz，采样频率1000 Hz

```
Wp = 40/500; Ws = 150/500;
```

```
[n,Wn] = buttord(Wp,Ws,3,60);
```

```
% Returns n = 5; Wn=0.0810;
```

```
[b,a] = butter(n,Wn);
```

```
freqz(b,a,512,1000);
```

```
title('n=5 Butterworth Lowpass Filter')
```

$W' = 2 * \pi * fT$   
 $= 2 * \pi * f / F_s$   
归一化频率  
 $W = 2 * f / F_s$  单位p

- 设计任意类型滤波器

- $[b \ a] = \text{butter}(N, Wn, 'ftype')$  设计巴特沃斯数字滤波器

- $[b \ a] = \text{cheby1}(N, Rp, Wn, 'ftype')$  设计切比雪夫1型数字滤波器

- $[b \ a] = \text{cheby2}(N, As, Wn, 'ftype')$  设计切比雪夫型数字滤波器

- $[b \ a] = \text{ellip}(N, Rp, As, Wn, 'ftype')$  设计椭圆数字滤波器

其中，'ftype'表示数字滤波器的类型，可选选项有'high'、'low'、'stop'，分别表示高通、低通、带阻，设计带阻滤波器时，Wn为包含两个元素的向量[W1 W2]，阻带介于W1和W2之间



- 利用Matlab直接设计FIR滤波器
- (1) fir1函数: 用窗函数法设计线性相位FIR数字滤波器,
  - $h = \text{fir1}(N, Wn)$
  - $h = \text{fir1}(N, Wn, \text{window})$
  - $h = \text{fir1}(N, Wn, \text{'ftype'})$
  - $h = \text{fir1}(N, Wn, \text{'ftype'}, \text{window})$
  - $h$ 为 $N$ 阶( $N+1$ 点)FIR数字滤波器的单位脉冲响应,
  - $Wn$ 表示以 $\pi$ 为单位的截止频率,  $\text{window}$ 指长度为 $N+1$ 的窗函数, 'ftype'指定数字滤波器的类型,  $\text{window}$ 不指定时默认使用海明窗MATLAB函数设计FIR数字滤波器
- (2) fir2函数: 频率取样法设计具有任意频率响应的FIR数字滤波器
  - $h = \text{fir2}(N, f, m)$
  - $h = \text{fir2}(N, f, m, \text{window})$
  - $h$ 为 $N$ 阶 ( $N+1$ 点) FR数字滤波器的单位脉冲响应,  $f$ 是给定的频率点向量,  $m$ 是给定频率点对应的幅度值向量,  $\text{window}$ 指长度为 $N+1$ 的窗函数,  $\text{window}$ 不指定时默认使用海明窗

```
例1 %b为49点
b=fir1(48,[0.35
0.65]);
Freqz(b,1,512);
例2%h为35点
f=[0 0.48 0.48 1];
m=[0 0 1 1];
h=fir2(34,f,m);
Freqz(h,1);
```





Table 3.1 Summary of commonly used window function characteristics<sup>↗</sup>

Window name <sup>↗</sup>	Window function frequency characteristics <sup>↗</sup>		Specification <sup>↗</sup>	
	Side Lobe	Main Lobe	Transition Width <sup>↗</sup>	Min.Stopband
	Magnitude (dB) <sup>↗</sup>	Width <sup>↗</sup>		Attenuation (dB) <sup>↗</sup>
Rectangular <sup>↗</sup>	-13 <sup>↗</sup>	$4\pi/N$ <sup>↗</sup>	$1.8\pi/N$ <sup>↗</sup>	-21 <sup>↗</sup>
<u>Hanning</u> <sup>↗</sup>	-31 <sup>↗</sup>	$8\pi/N$ <sup>↗</sup>	$6.2\pi/N$ <sup>↗</sup>	-44 <sup>↗</sup>
Hamming <sup>↗</sup>	-41 <sup>↗</sup>	$8\pi/N$ <sup>↗</sup>	$6.6\pi/N$ <sup>↗</sup>	-53 <sup>↗</sup>
Blackman <sup>↗</sup>	-57 <sup>↗</sup>	$12\pi/N$ <sup>↗</sup>	$11\pi/N$ <sup>↗</sup>	-74 <sup>↗</sup>

窗函数方法，  
由过渡带宽  
估算出窗长  
或滤波器阶  
数N

Table 3.2 MATLAB functions for implementing window function <sup>↗</sup>

MATLAB function <sup>↗</sup>	Window name <sup>↗</sup>	MATLAB function <sup>↗</sup>	Window name <sup>↗</sup>	<sup>↗</sup>
boxcar <sup>↗</sup>	Rectangular <sup>↗</sup>	<u>blackman</u> <sup>↗</sup>	Blackman <sup>↗</sup>	<sup>↗</sup>
<u>hanning</u> <sup>↗</sup>	<u>Hanning</u> <sup>↗</sup>	<u>kaiser</u> <sup>↗</sup>	Kaiser <sup>↗</sup>	<sup>↗</sup>
hamming <sup>↗</sup>	Hamming <sup>↗</sup>	<sup>↗</sup>	<sup>↗</sup>	<sup>↗</sup>



– 2. 输入信号输入系统后的输出信号

–  $Y(t)=x(t)*h(t)$ ;  $Y=\text{filter}(b,a,x)$ ;

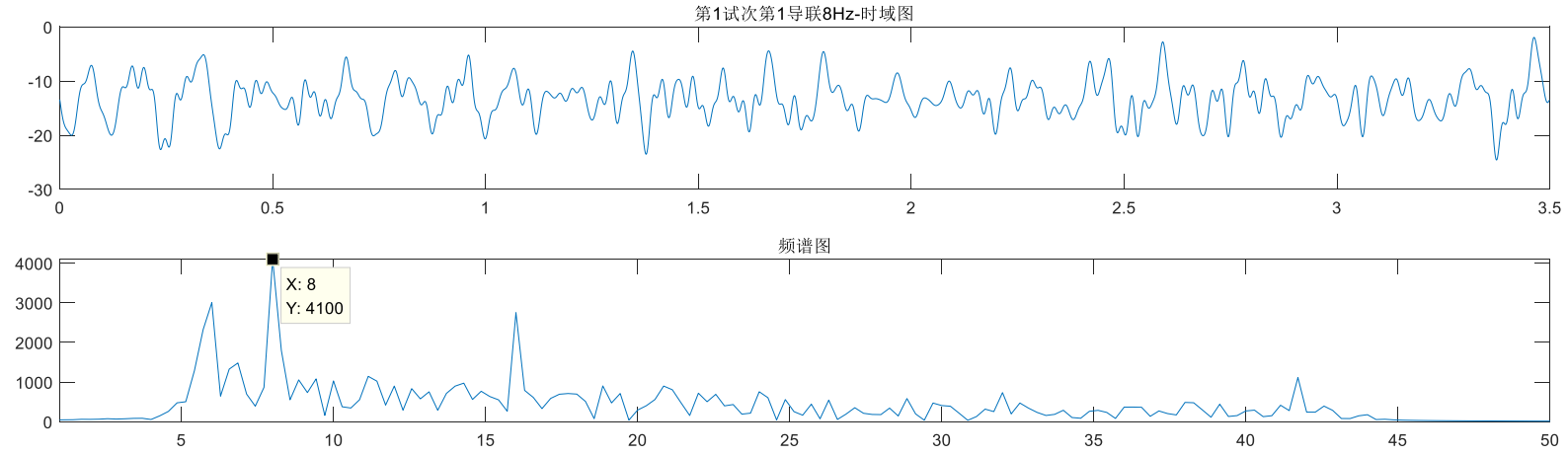
–  $Y=\text{conv}(x,h)$



# 实验五 脑电SSVEP信号的目标分类



- SSVEP：当人眼受到固定频率的视觉刺激时，大脑皮质活动将被调节，产生类似于刺激的周期性节律，即稳态视觉诱发电位。
  - 每类刺激诱发的脑电信号中包含了基频、倍频成分：
  - 如，具有高能量的频率为8Hz、16Hz、32Hz，倍频成分的能量可能比基频的能量小，16Hz幅度小于8Hz。



- 脑电数据是受试者观看10个不同频率闪烁的刺激块所诱发的脑电信号，对应目标1-10。目标与刺激频率信息如下。

类别1	类别2	类别3	类别4	类别5	类别6	类别7	类别8	类别9	类别10
8Hz	8.5Hz	9Hz	9.5Hz	10Hz	10.5Hz	11Hz	11.5Hz	12Hz	12.5Hz

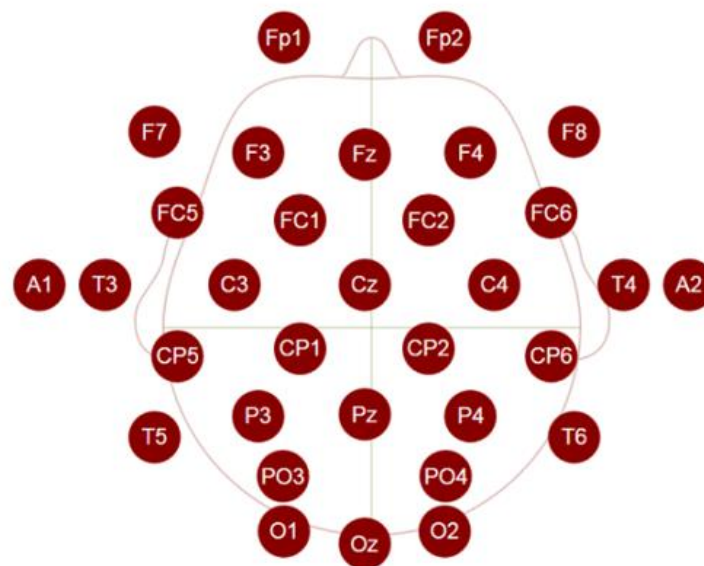
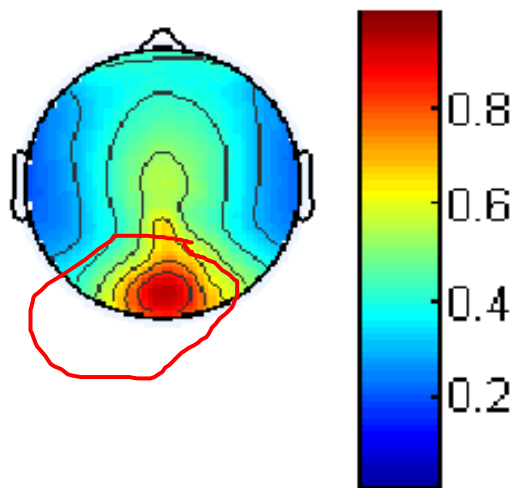


- 数据格式：

- **eegmat.mat**文件中包含x变量，数据维度信息为 $8 \times 3500 \times 20$ ；
- 8对应脑电信号的导联数；
- 3500对应3.5s的时域采样点，采样频率1000Hz；
- **label.mat**为标签信息，其中20值对应20个目标试次

- 数据加载：

- `load (eeg.mat) ;`
- `load(label.mat);`



- 目标分类：

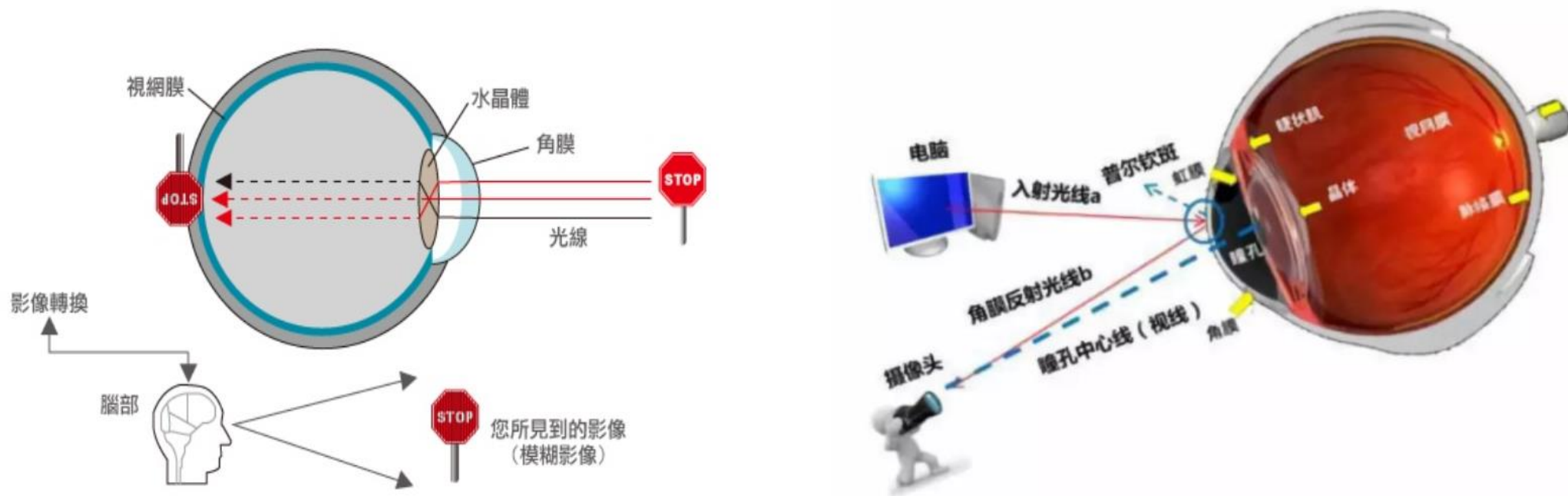
- (1) 对每一通道脑电信号进行带通滤波，滤波范围5-40Hz。
- (2) 利用FFT或功率谱periodogram对一个试次下每个通道的脑电信号进行频谱分析，查看7-15Hz范围内最高峰值是多少，并与所给刺激频率比对，8个通道投票最多的目标即为该试次所分类出来的目标结果。另外，可加入倍频频率检测，提高目标识别准确率。
- (3) 对20个试次分别进行目标分类，根据频谱信息判断目标类别并与其真实标签label进行比较，计算准确率。
- (4) GUI界面呈现滤波器频响；20个试次一个通道下的频谱图（可选一个识别率高的通道），并标出峰值频率；呈现20个试次中每个导联目标识别结果（类别），8导联联合目标识别结果,以及导联和倍频联合的目标识别结果（选做）。最终给出20个试次识别的平均准确率。



# 实验六 VR眼动数据的目标分类



- 眼动仪是一种能够跟踪测量眼球位置及眼球运动信息的一种设备，在视觉系统、心理学、认知语言学的研究中有广泛的应用。

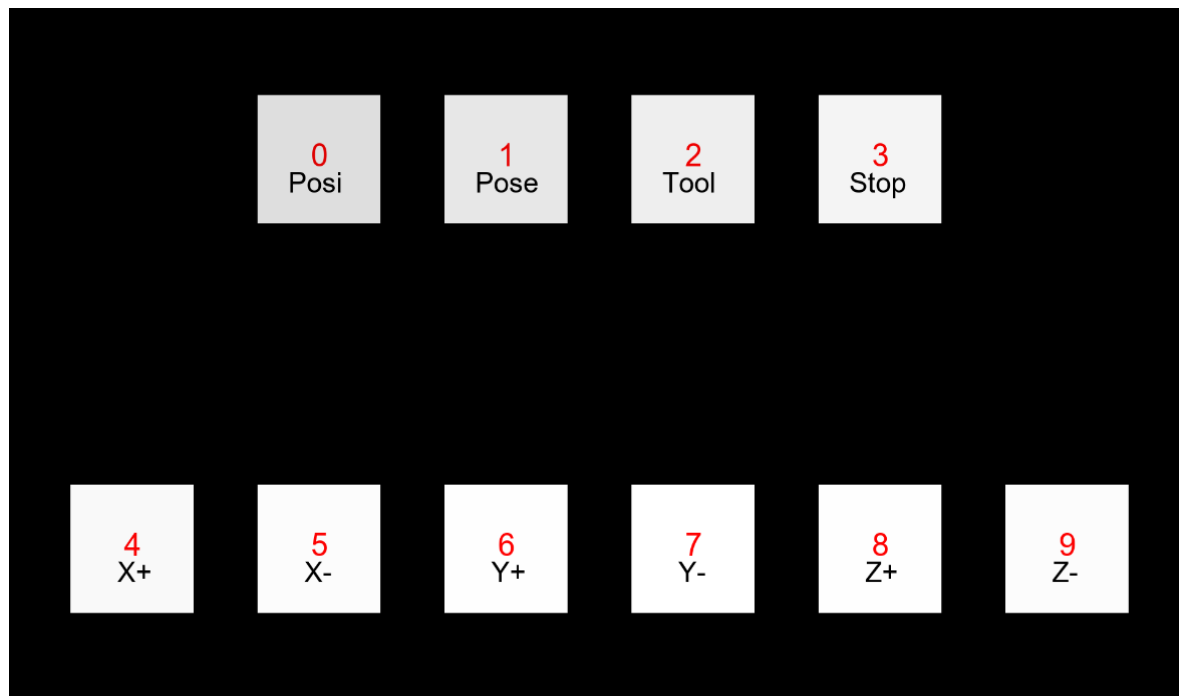


- 普尔钦(Purkinje)斑是光束在入射眼球的过程中,在眼球各层膜的前后面上形成的影像。
- 眼动的本质是人注意力资源的主动或被动分配，选择更有用或吸引力的信息。其应用方向有：用户体验与交互研究（网页可用性、移动端可用性、软件可用性、视线交互、游戏可用性研究）、市场研究与消费者调研等。





- 实验任务是**根据采集的眼动数据实现10个目标的分类**。
- 实验数据采集分为两个过程，**第一个是眼动校准阶段**，要求实验参与者依次观看界面上的数字0-9，如下图所示，采集参与者的模板数据，用于正式阶段的分类。**每个目标1个试次，校准阶段共10个试次。第二个是正式实验阶段**，采集过程连续进行，数据中包含开始和结束的位置索引，**每个目标2个试次，共20个试次**。



## 数据格式：

- 数据维度为 $10 \times 2 \times 40$ ，10为10个试次，对应目标0-9；2为x和y坐标值；40为时间点；
- **left\_pre\_c, right\_pre\_c**分别为校准阶段左右眼在10个试次下40个时间点处的xy坐标值。
- **left\_pre\_o, right\_pre\_o**分别为测试阶段左右眼在20个试次下40个时间点处的xy坐标值。
- **label.mat**为实际目标类别， $10 \times 2$ 表示10个试次做了两轮共20个试次，每轮每个目标的类别。



- 数据分析:

- 1) 先对校准数据10个试次中每个试次left\_pre\_c 40个时间点的数据进行平均得到一个值, 这样10个目标各自有一个平均值, 作为10个目标xy坐标的校准点(10\*2)。左右眼数据可分别处理。
- 2) 对正式实验数据left\_pre\_o, 每个试次下40个时间点中每一时间点都与10个校准数据点求距离, 查看距离最小的对应目标是什么, 然后查看40个时间点中所得分类结果(目标投票最多的是哪一个), 就确定是哪个目标。最后与标签label比对并计算准确率。相同方法对右眼数据进行处理, 也可将左右眼的数据融合后按此方法处理。

- 目标分类:

- 1) 求正式实验阶段目标分类的准确率, 左右眼分别计算分类准确率, 然后左右眼融合计算分类准确率。
- 2) 分析不同时间点10、20、30、40条件下的分类准确率(理论上时间点越多准确率越高), 并画出曲线。
- 3) GUI界面呈现校准阶段10个试次各自的中心位置(XY坐标), 以及正式实验阶段20个试次目标分类类别, 如左眼分类准确率、右眼分类准确率、双眼融合分类准确率(可表格呈现)。另外呈现不同时间点下的分类准确率曲线(如10个点、20个点、30个点、40个点)。



# 实验七 脑电ERP信号的去噪方法



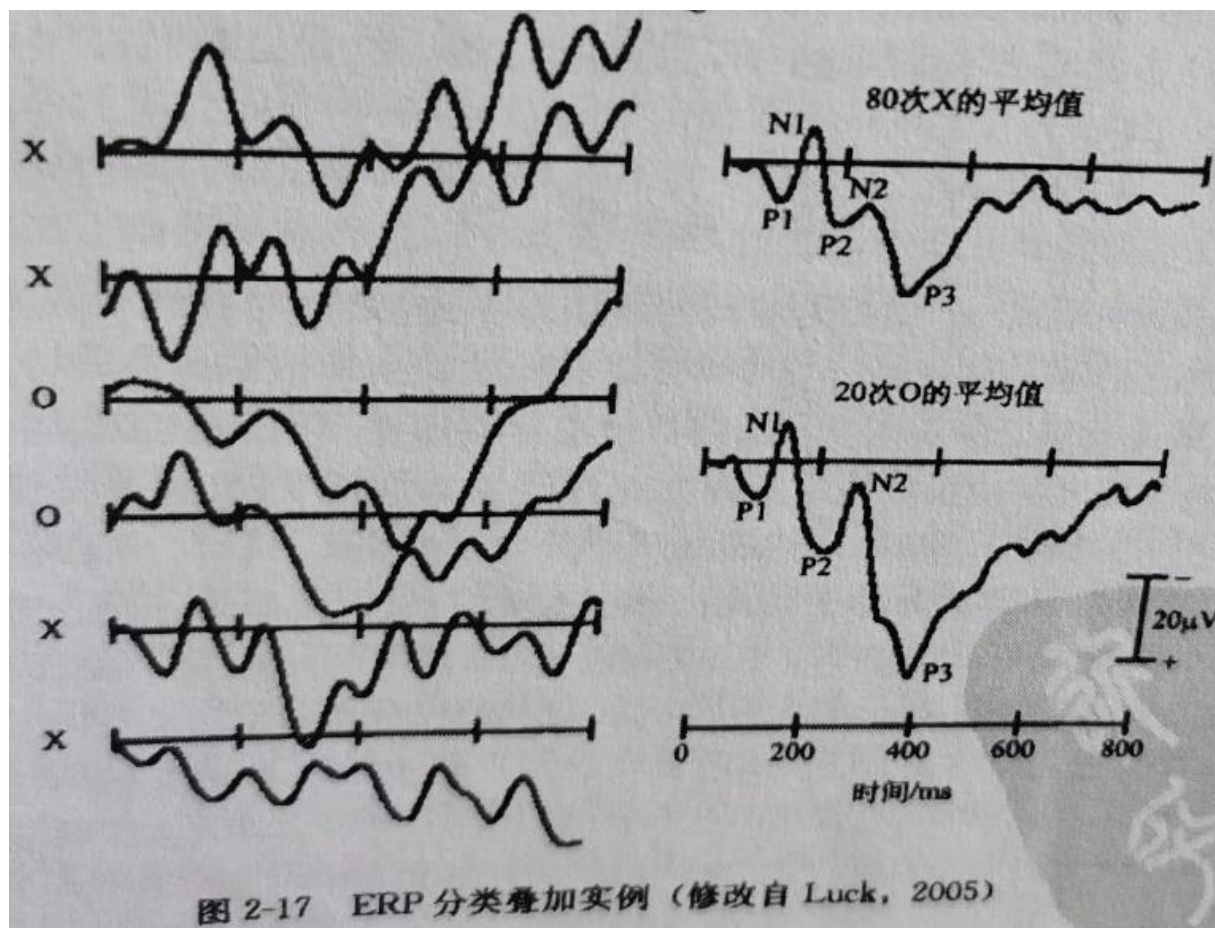
## • 事件相关电位 (Event related potential, ERP)

- 当外加一种特定的刺激，作用于感觉系统或脑的某一部位，在给予或撤销刺激时，或当某种心理因素出现时，在脑区所产生的电位变化。
- EEG的波幅可达50~100  $\mu\text{V}$ ，一次刺激诱发的ERP的波幅一般约2~10  $\mu\text{V}$
- ERP具有两个恒定，一是波形恒定，二是潜伏期恒定
- 背景脑电与刺激间无固定的关系，而ERP波形在每次刺激后是相同的，且ERP波形与刺激间的时间间隔（潜伏期）是固定的。
- 叠加后的ERP数值除以叠加次数，其平均值即还原为一次刺激的ERP数值。



- 数据格式:

- **sig01文件和sig02文件:  $2 \times 701 \times 100$  矩阵, 每个维度分别对应: 导联 (2个导联: 第1导联为FCz电极, 第2导联为Cz电极)  $\times$  信号 (701个采样点)  $\times$  试次 (100个试次, 即重复刺激100次); 数据采样率为1000Hz;**
- **a(1,:, 3):指第1个导联, 第3个试次的1: 701个点。**



- ERP计算步骤:

- 1、设计高低通滤波器: 0.5-30Hz, 采样率为1000 Hz, 画出高低通频率响应。  
对不同试次的脑电信号进行滤波。 (butter, freqz, filter等)
- 2、去基线: 每个试次701个点中的前1-200个点求均值 (mean函数), 然后1:701每个点减去该均值。
- 3、叠加平均: 将所有试次 (100个试次) 1: 701个点逐点对应求均值, 即每个试次的第一个点共100个值求平均, 然后每个试次第二个点求均值, 依次类推。 (mean (a, 3) 即第3维度求均值)
- 分别画出sig01文件和sig02文件中的第一导联FCz和第二导联Cz的ERP波形。
- GUI界面给出1) 滤波器频率响应; 2) FCz导联ERP波形; 3) Cz导联ERP波形。

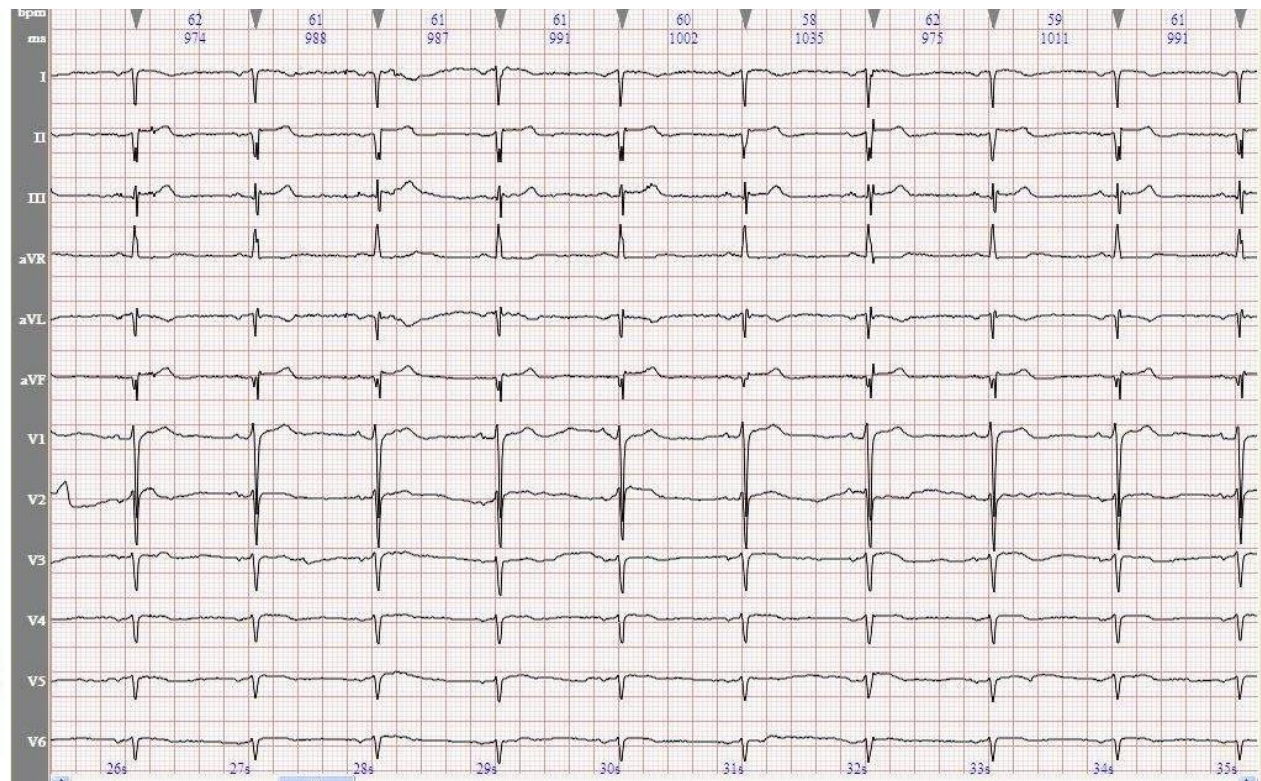
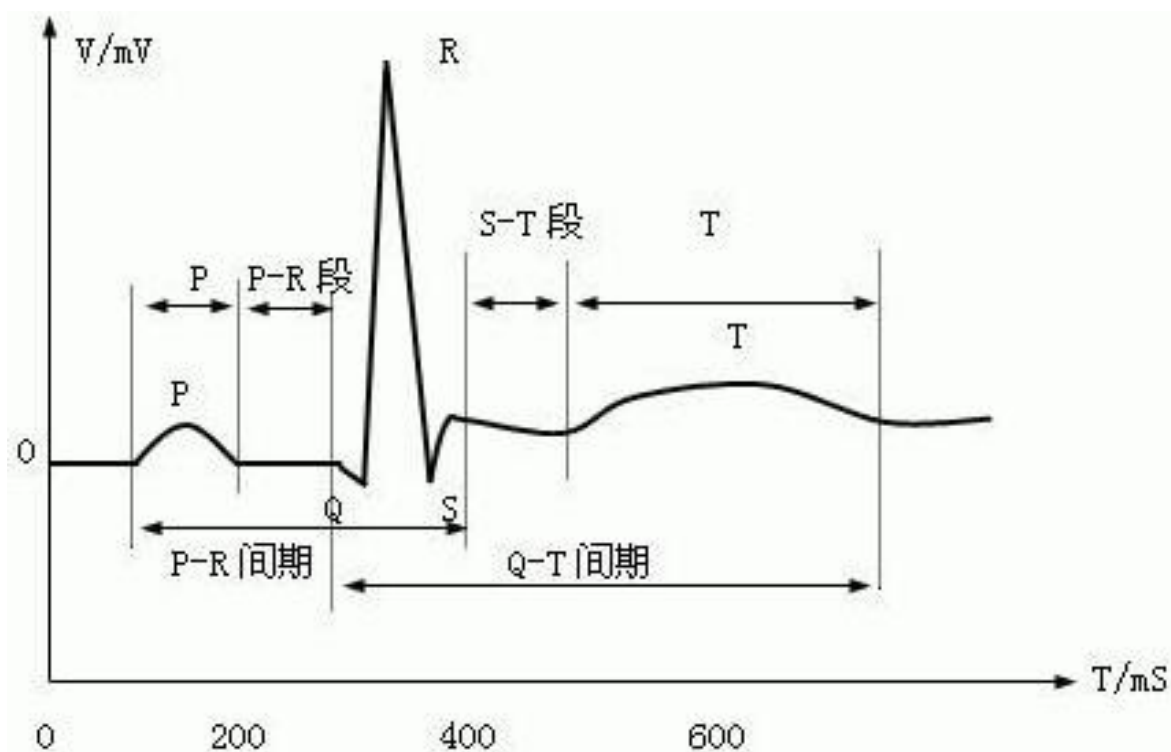


# 实验八 心电信号心率检测方法



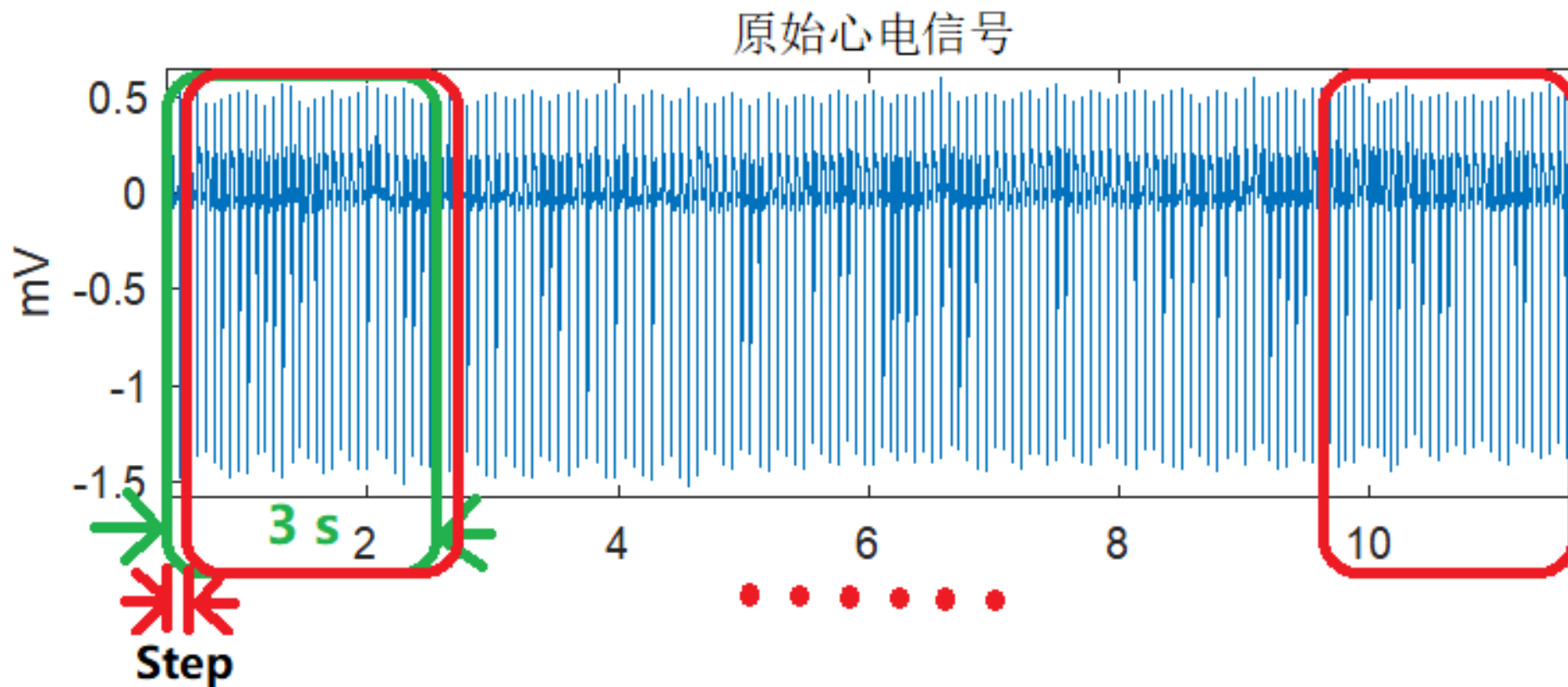


- 心电信号（EEG）：心脏心肌细胞电活动的综合反映。
- 心率：指正常人安静状态下每分钟心跳的次数，也叫安静心率，一般为60～100次/分。可由R峰计算心率。



- 数据格式：
  - a\_2n2变量: 4min, 采样率1000Hz, 240000个点
- 处理过程：
  - 1) 对心电数据进行fft频谱分析, 给出频谱分析图。并查看心电信号和噪声所在频段。
  - 2) 设计高低通数字滤波器0.5-45Hz, 给出高低通滤波器的频率响应。
  - 3) 滤波后的心电信号, fft频谱分析, 并将滤波前后心电信号的波形进行对比。
  - 4) 估计心率：
    - 时域法: 一个时间窗5s钟, 寻找心电信号R峰对应的时间点, 通过时间差和R峰个数计算心率值, 然后移动时间窗, 步长为1点, 逐点计算心率值, 最后绘制随时间变化的心率值曲线。
    - 频域法: 一个时间窗5s钟的数据进行fft频谱分析, 找出最大峰值对应的频率, 根据此信息计算出心率值, 然后然后移动时间窗, 步长为1点, 逐点计算心率值, 最后绘制随时间变化的心率值曲线。
    - 比较时域和频域两种方法的差异。
- GUI界面展示: 1) 滤波前后心电频谱分析图; 2) 频率响应; 3) 时域法随时间变化的心率曲线; 4) 频率法随时间变化的心率曲线.



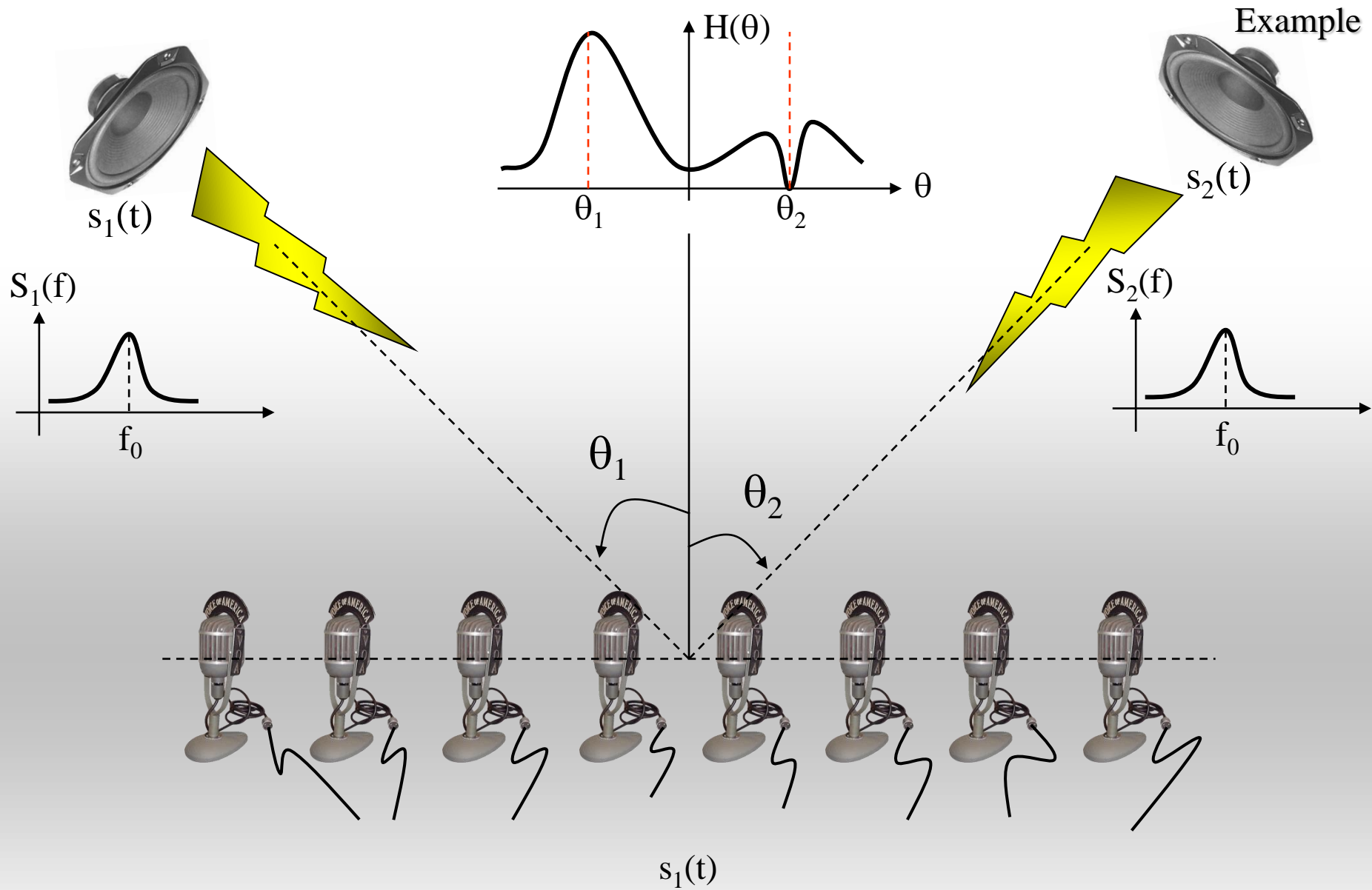


- 窗长：3s；步长：0.5s或1个点
- 时域：每个窗长下，计算R峰个数，假设有 $N$ 个R峰，则心率为 $N/3 \times 60$ 次/min
- 频域：每个窗长下，计算fft，寻找幅度最大峰值对应的频率值，假设为 $f$  Hz，则心率为 $f \times 60$ 次/min



# 实验九 空域滤波器设计





空间选择

信号与干扰：  
频率相同，位置不同

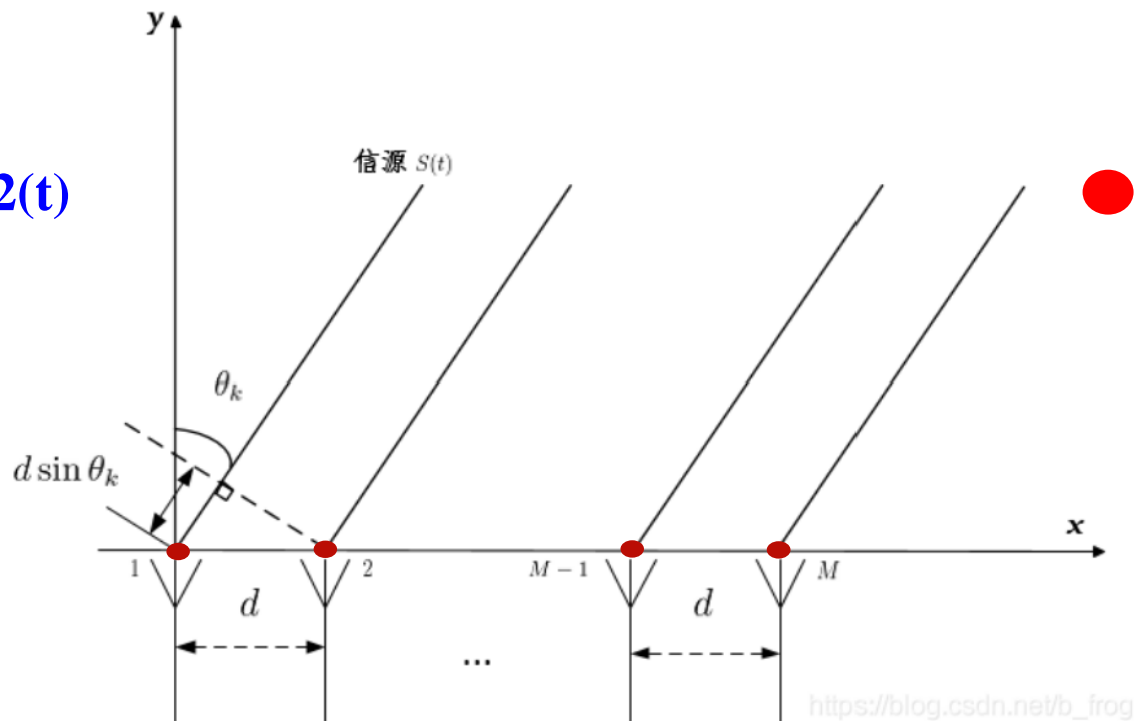
• Filter?



## 一、均匀线阵模型

设有M个阵元，阵元间距为d（一般假设为波长的一半），接收到L个远场窄带信源的信号（信源间互不相干）。如图所示， $\theta_k$ 为所求的DOA（即信号入射方向与法向量所成角）。

● 干扰s2(t)



● 信号s1(t)

相邻两个阵元接收的信号的到达时间差为  $t = \frac{d \sin \theta_k}{c}$ ，相位差为  $\tau^{(i)} = \frac{2\pi f(i-1)d \sin \theta}{c} = \frac{2\pi(i-1)d \sin \theta}{\lambda}$ ,  $i = 1, \dots, M$ 。  
 $\varphi_k^{(i)} = \frac{2\pi f(i-1)d \sin \theta_k}{c}$ ,  $i = 1, \dots, M$ ，其中c表示入射信号的传播速度。



对于单个辐射源( $\theta$ ), 阵列接收信号 $\mathbf{X}(t)$ 可以表示为:

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{\frac{j2\pi d \sin\theta}{\lambda}} \\ \vdots \\ e^{\frac{j2\pi(M-1)d \sin\theta}{\lambda}} \end{bmatrix} s(t) = \mathbf{a}(\theta)s(t)$$

其中,  $\mathbf{a}(\theta)$ 叫做导向矢量, 为 $M \times 1$ 的矩阵。

推广到多个辐射源( $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ )

$$\mathbf{X}(t) = a(\theta_1)s_1(t) + a(\theta_2)s_2(t) + \dots + a(\theta_k)s_k(t) = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_k)] \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_k(t) \end{bmatrix} = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{S}(k)$$

考虑噪声影响,  $\mathbf{n}(t) = \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_M(t) \end{bmatrix}$ 。因此, 均匀线阵信号模型为  $\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{S}(k) + \mathbf{n}(t)$ 。

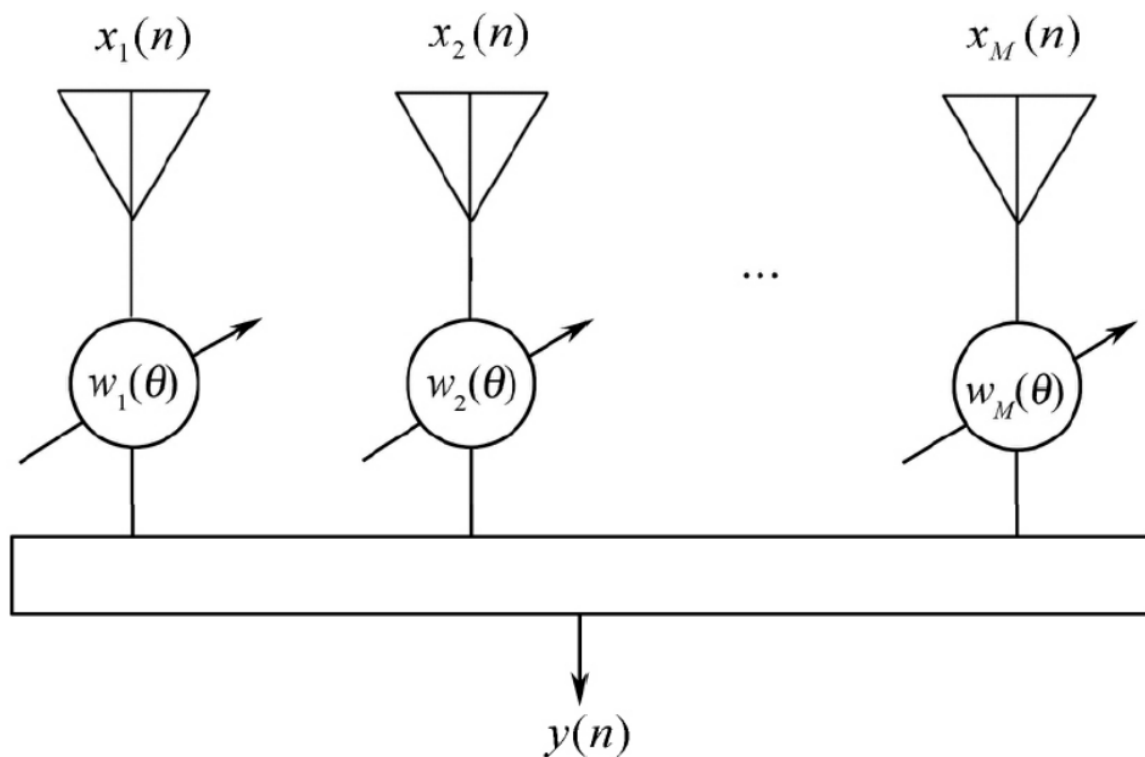




若假设空间源场中有一个感兴趣的信号 $s(t)$ (或称期望信号, 其波达方向为 $\theta_d$ )和 $J$ 个不感兴趣的信号 $i_j(t)$ ,  $j = 1, \dots, J$ (或称干扰信号, 其波达方向为 $\theta_{i_j}$ )。则阵列接收信号用矩阵形式表示, 则有:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_M(t) \end{bmatrix} = [a(\theta_d), a(\theta_{i_1}), \dots, a(\theta_{i_J})] \begin{bmatrix} s(t) \\ i_1(t) \\ \dots \\ i_J(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \dots \\ n_M(t) \end{bmatrix}$$

波束形成算法: 每个通道用一个复加权系数来调整该通道的幅度和相位。对于不同的权矢量, 来自不同方向的电磁波有不同的响应, 从而形成不同方向的空间波束, 通过调整权系数 $\mathbf{w}$ , 使得天线阵列在某一方向上增益最大, 也就指向了某个方向。



$N$ 个快拍的波束形成器输出可以表示为:

$$y(t) = \sum_{i=1}^M w_i^*(\theta) x_i(t) = \mathbf{w}^H(\theta) \mathbf{x}(t), (t = 1, \dots, N)$$

其输出的平均功率为:

$$P(\mathbf{w}) = E\{|y(t)|^2\} = \mathbf{w}^H E\{\mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t)\} \mathbf{w} = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w}$$

其中 $\mathbf{R}$ 为阵列输出的协方差矩阵。





为了保证方向 $\theta_d$ 期望信号的正确接收，并且完全抑制其他J个干扰，由此得到关于权矢量的约束条件：

$$\begin{cases} w^H a(\theta_d) = 1 \\ w^H a(\theta_{ij}) = 0 \end{cases}$$

因此抑制干扰和噪声应该一同考虑，此时波束形成器最佳权矢量可以描述为

$$\min_w P(w), \text{st. } w^H a(\theta_d) = 1$$

运用拉格朗日乘子法，构造代价函数 $J(w)$ 为：

$$J(w) = w^H R w - \eta(1 - w^H a(\theta_d))$$

可以解得

$$w = \eta R^{-1} a(\theta_d)$$

两端取共轭转置，并且右乘 $a(\theta_d)$ ，同时注意到约束条件 $w^H a(\theta_d) = 1$ ，可以得到

$$\eta = \frac{1}{a(\theta_d)^H (R^{-1})^H a(\theta_d)}$$

最终解得权矢量为

$$w = \frac{R^{-1} a(\theta_d)}{a(\theta_d)^H (R^{-1})^H a(\theta_d)}$$

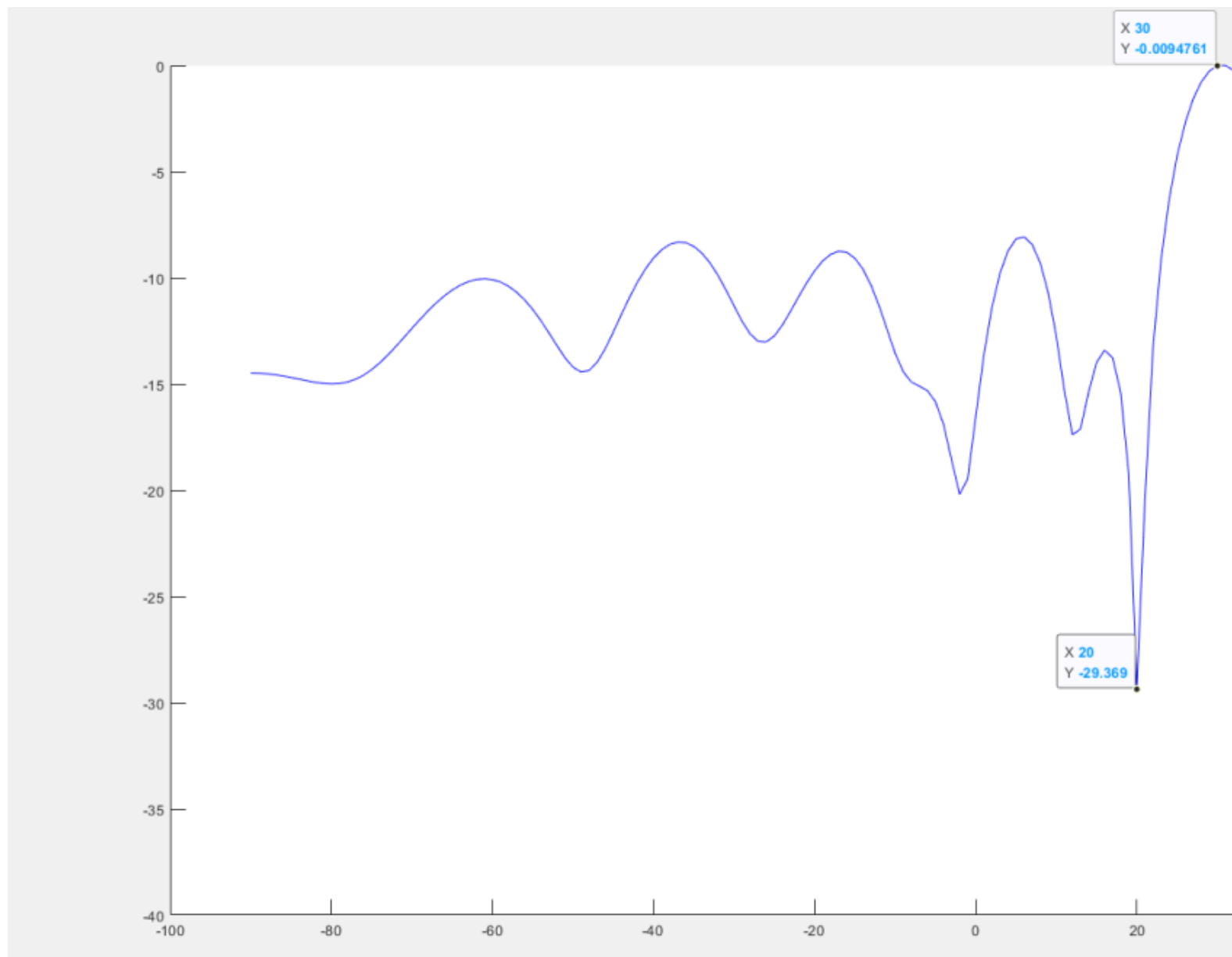
该权矢量可以使 $a(\theta_d)$ 对应方向的信号通过，其余方向的信号和噪声最大程度的抑制。



传感器均匀排布的天线接收到空间中两个同频相位不一样的正弦信号，要求设计一个空域滤波器，提取其中一路信号同时抑制另外一路信号。假设一个均匀线阵有12阵元， $\frac{\lambda}{2}$ 布阵；取100个快拍估计协方差矩阵 $R$ ，两个信号为同频信号相位不同的信号（一个正弦，一个余弦，两者频率相同），其中期望信号的入射方向为 $30^\circ$ ，干扰信号的入射方向为 $20^\circ$ ，实验结果如下：

- 1) 写出天线的接收信号模型(矩阵形式)
- 2) 设计空域滤波器权矢量 $w$
- 3) 仿真画出结果图，展示滤波效果，包括空域滤波器的方向图（随着入射方向角度从 $-180^\circ$ 到 $180^\circ$ 变化，权矢量的变化图）、以及空域滤波器的接收信号 $x(t)$ 和最终输出信号(期望信号和干扰信号)波形的对比图
- 4) 写出此方法的优缺点

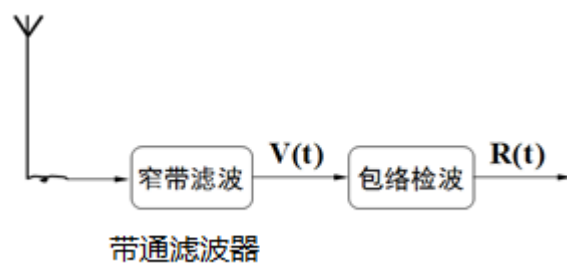




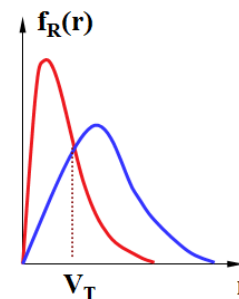
# 实验十 包络检测器设计



- 为了检测无线电信号  $S(t) = b\cos(\omega_0 t)$  是否存在，可以构造下面的接收机。接收信号为  $V(t) = b\cos[\omega_0 t + \theta] + N(t)$ ，其中  $N(t)$  是接收到的加性零均值高斯噪声，假定方差为  $\sigma^2$ ； $\omega_0$  为高频调制频率； $\theta$  表明信号的相位无法预知。接收过程如下图 (a) 所示，思考如何根据观测  $R(t)$  判断信号  $S(t)$  是否存在？



(a) 信号处理流程图

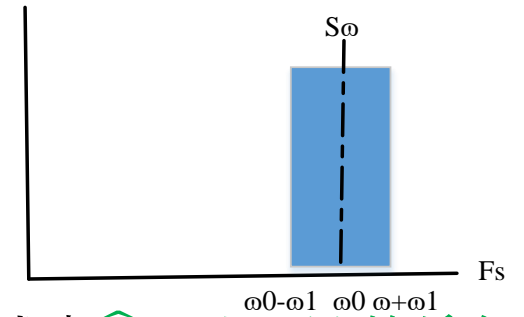


(b)  $V(t)$  的包络一维概率密度



## • 包络检测器的步骤:

- 1. 设计一个窄带带通滤波器, 采样频率 $F_s$ , 带宽400Hz, 中心频率 $\omega_0$ 。输入高斯白噪声 (点数 $N=F_s$ ), 得到输出窄带随机过程 $N(t)$ , 方差为 $\sigma^2$ 。
  - (注意1: 生成的窄带随机过程 $N(t)$ 的方差为1, 即 $\sigma^2=1$ )
  - (注意2: 参数 $F_s=200000\text{Hz}$ ;  $t=0:1/F_s:1$ ;  $N=F_s$ ;  
 $\omega_0=80000\text{Hz}$ ;  $\omega_1=400$  )
  - $N(t) = N(t) / \sqrt{\text{Var}(N(t))}$
- 2. 通过如下莱斯表达式, 由解调原理, 得到两路正交分量 $N_I(t)$ 和 $N_Q(t)$ , 式中 $\hat{N}(t)$ 为 $N(t)$ 的希尔伯特变换。



$$N(t) = N_I(t) \cos \omega_0 t - N_Q(t) \sin \omega_0 t \quad (1)$$

$$N_I(t) = N(t) \cos \omega_0 t + \hat{N}(t) \sin \omega_0 t \quad (2)$$

$$N_Q(t) = -N(t) \sin \omega_0 t + \hat{N}(t) \cos \omega_0 t \quad (3)$$

- 3. 计算不同信噪比下 ( $\text{SNR} = -20: 5: 20\text{dB}$ ) 的信号参数 $b$ 。

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{\text{Var}(b)}{\text{Var}(N(t))}$$

- 4. 接收信号  $V(t) = b \cos[\omega_0 t + \theta] + N(t) = [N_I(t) + b \cos \theta] \cos \omega_0 t - [N_Q(t) + b \sin \theta] \sin \omega_0 t$   
 求出包络表达式

$$a(t) = \sqrt{(N_I(t) + b \cos \theta)^2 + (N_Q(t) + b \sin \theta)^2}$$



- 5. 求阈值 $V_T$ ，用ksdensity画出有信号与无信号条件下的一维概率密度，先确定 $V_T$ 的大致范围。然后在此范围下，求瑞利分布公式和高斯分布公式的交点，即为每一信噪比条件下确定 $V_T$ 。

注意：1) 设定范围逐点扫描求交点（两个公式相减差值最小为交点），多个交点选择最合理者。2) 每种信噪比下搜索范围不同。

$$X(t) = b \cos(\omega_0 t + \Theta) + N(t)$$

包络服从广义瑞利（莱斯）分布：

$$f_A(a) = \frac{a}{\sigma^2} e^{-\frac{a^2+b^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{ab}{\sigma^2}\right), a \geq 0$$

零阶修正贝塞尔函数

(1) 信噪比 $\rho = b/\sigma = 0$ （正弦信号不存在）时，退化为瑞利分布；与前面的结论一致

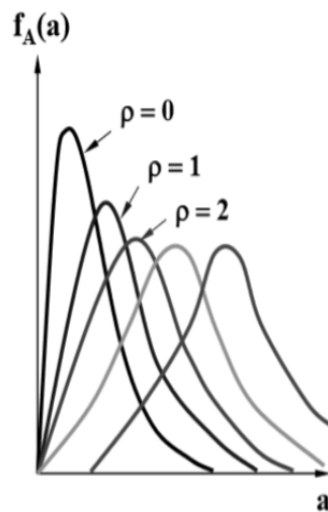
(2) 信噪比很小时，仍趋近于瑞利分布：

$$f_A(a) \approx \frac{a}{\sigma^2} e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}}, a \geq 0$$

(3) 信噪比很大时，近似为高斯分布：

$$f_A(a) \approx \sqrt{\frac{a}{2\pi b}} \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{(a-b)^2}{2\sigma^2}} \stackrel{a \approx b}{=} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(a-b)^2}{2\sigma^2}}, a \geq 0$$

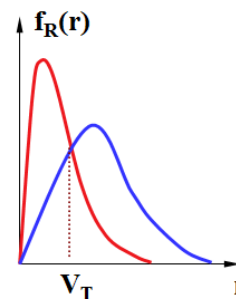
$$\sigma^2 = 1$$



- 6.求漏警率。

1) **理论值**：对5中画出的有信号条件下的一维概率密度曲线，求小于 $V_T$ 时的曲线面积，再求有信号全曲线下的面积，两者的比值即为漏警率。

2) **实际值**：重复生成1000次接收信号 $V(t)$ ，通过Matlab计算包络，并与阈值 $V_T$ 比较，小于阈值说明检测不到信号，大于阈值说明检测到信号，计算1000次仿真中信号检测的漏警概率的平均值（每次的漏警概率的平均）。



(b)  $V(t)$ 的包络一维概率密度

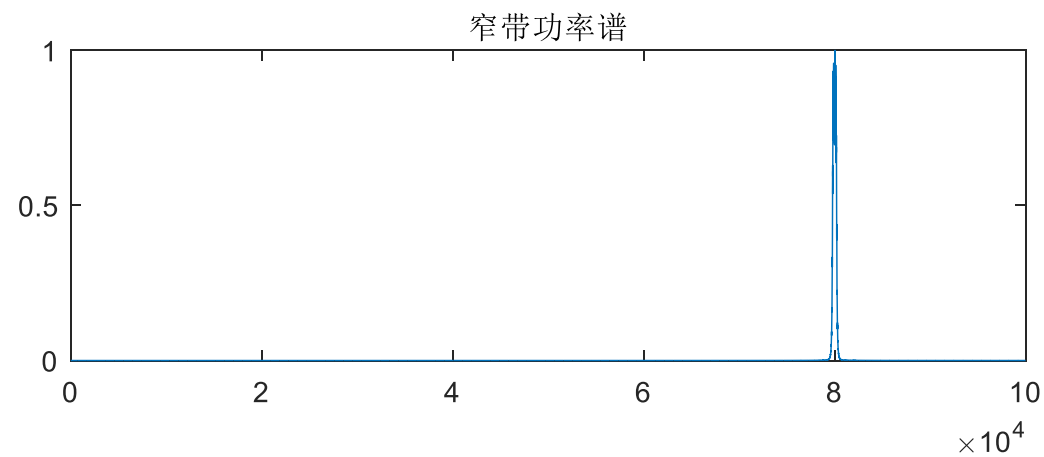
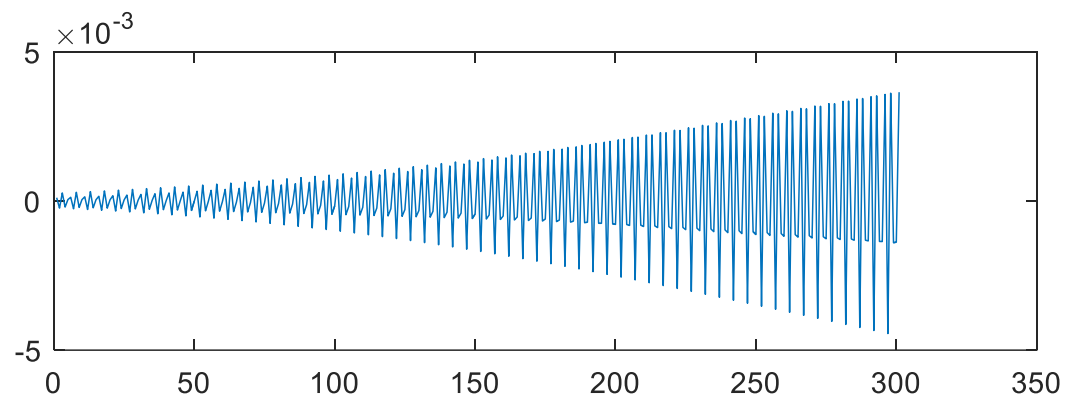
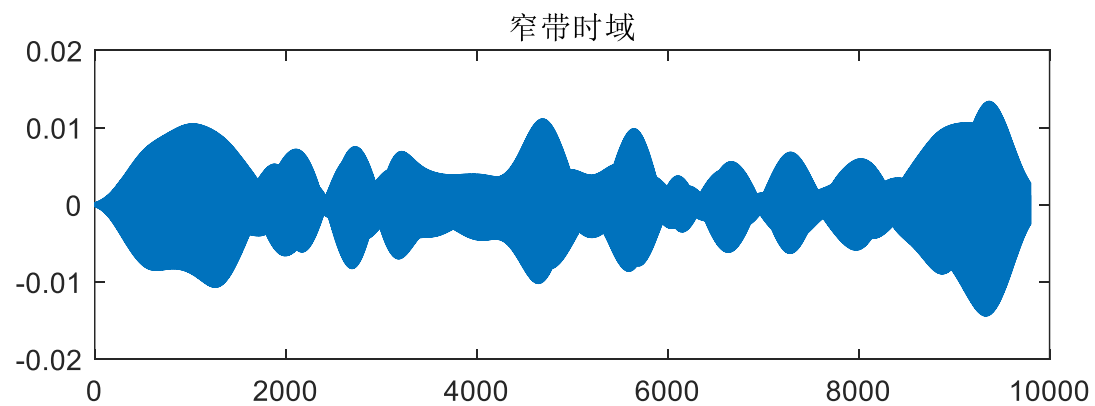
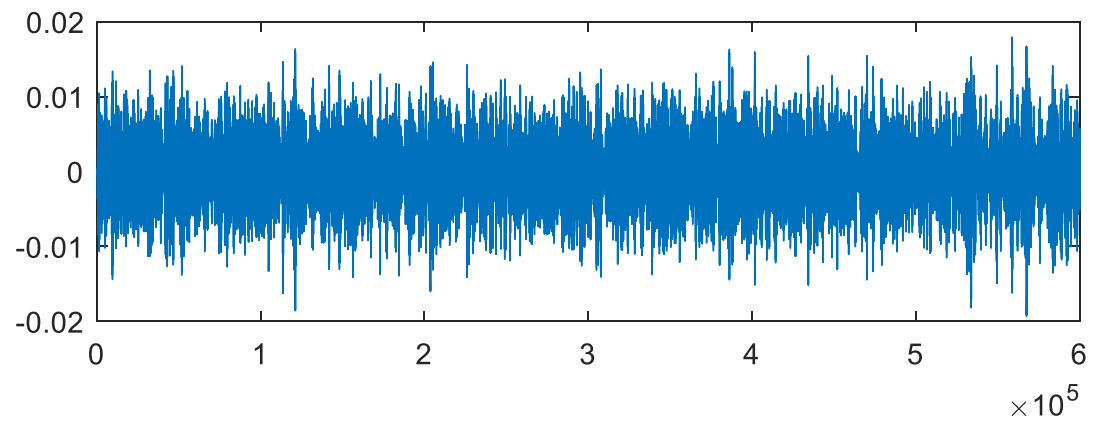




注意：

- 1.  $\theta$ 是一个常数
- 2. SNR是窄带滤波后 $V(t)$ 的信噪比，方差 $\sigma^2$ 为1
- 3. 求两路正交分量 $N_I$ 和 $N_Q$ ，然后求包络
- 4.  $b\cos\omega_0 t$ 为高频信号；
- 5. 带宽比=低通滤波器带宽/调制频率 $\omega_0 \sim 0.01$ 以下
- 6. 每个SNR下，重复生成1000次接收信号 $V(t)$ ，每次检测一个点数为 $1s \cdot F_s$ 个随机序列 $V(t)$ ，根据阈值 $V_T$ 求漏警率，计算每种SNR的平均漏警概率，最后画出随着SNR变化漏警概率变化趋势。





谢谢大家！

