



南京理工大学
NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY

电子信息工程综合实验 实验报告

课程 : 电子信息工程综合实验

教师 : 李洪涛

组号 : 第5组

作者 : 许晓明 学号 : 9161040G0734

同组人 : 朱泳庚 学号 : 9161040G0740

同组人 : 郭又溥 学号 : 9161040G0918

2019 年 9月

目录

1	设计目的	1
2	实验仪器	1
3	实验原理	1
3.1	雷达工作原理	1
3.2	线性调频脉冲信号(LFM)	2
4	实验参数要求	2
5	系统参数理论计算	2
6	系统仿真与示波器波形	4
6.1	单目标情况	4
6.1.1	中频信号	4
6.1.2	基带信号	4
6.1.3	脉压信号	4
6.2	双目标情况	6
6.2.1	距离分辨率	6
6.2.2	速度分辨率	6
7	MATLAB仿真	7
8	实验感想与体会	9
9	附录:matlab代码	9

一、设计目的

1. 通过给定的雷达目标参数及相应技术指标要求，计算出符合要求的雷达设计参数，体会雷达整体综合设计的过程；
2. 通过整体实验，对所学的雷达原理、数字信号处理、信号与系统等专业课程进行综合复习与理解；
3. 通过雷达综合试验箱输出结果与matlab仿真结果进行比较分析，直观观察并分析实际结果与理论仿真的不同。

二、实验仪器

雷达综合试验箱	一套
装有配套调试软件与Matlab的PC	一台
示波器	一台

三、实验原理

3.1 雷达工作原理

雷达主要是通过发射机产生符合要求的雷达波形，经馈线和收发开关由发射天线辐射出去，遇到目标之后，一部分电磁波发生反射，经接收天线和收发开关由接收机接收回波信号，通过对雷达信号做适当的处理即可获知目标的距离，速度等相关信息。

本实验中，假设目标与雷达的相对距离为 R ，发射信号为 $S(t)$ ，为了探测到该目标，雷达发射机将发射信号以光速 C 向四周传播，经过时间 $t = \frac{R}{C}$ 后发射信号到达目标，此时，发射信号的表达式为 $s(t - \frac{R}{C})$ 。发射信号接触到目标后，一部分被目标吸收，另一部分被目标散射，其中被目标散射的信号可以表示为 $\sigma s(t - \frac{R}{C})$ ，其中 σ 为目标的雷达截面积，该信号我们在本实验中将其称为回波信号。回波信号再经过 $t = \frac{R}{C}$ 的时间，被雷达的接收机所接收，接收的信号表达式为 $s_r(t) = \sigma s(t - 2\frac{R}{C})$ 。

对于接收到的回波信号 $s_r(t) = s(t - 2\frac{R}{C})$ ，需要从中提取出表征目标特性的距离等参数，常用的方法是将 $s_r(t)$ 信号通过一个匹配滤波器。 $s_r(t)$ 的匹配滤波器为 $h_r(t) = s^*(-t)$ ，所以通过匹配滤波器后的信号为 $s_o(t) = h_r(t) * s_r(t)$ 。

对通过匹配滤波器后的信号进行频域分析，进行傅里叶变换：

$$S_o(j\omega) = |S(j\omega)|^2 H(j\omega) \quad (3.1)$$

通过选取合适的 $s(t)$ ，使其幅值特性为常数，从而可以得到 $S_o(j\omega) = kH(j\omega)$ 。再进行傅里叶逆变换

$$s_o(t) = kh(t) = k \sum_{i=1}^M \sigma_i \delta(t - \tau_i) \quad (3.2)$$

通过分析 $s_o(t)$ 我们可以得到我们想要的目标特征信息。

3.2 线性调频脉冲信号(LFM)

脉冲压缩雷达能同时提高雷达的作用距离和距离分辨率。这种体制采用宽脉冲发射以提高发射的平均功率，保证足够大的作用距离；而接受时采用相应的脉冲压缩算法获得窄脉冲，以提高距离分辨率，较好的解决雷达作用距离与距离分辨率之间的矛盾。

脉冲压缩雷达最常见的调制信号是线性调频信号，接收时采用匹配滤波器压缩脉冲。LFM信号的数学表达式为：

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right)e^{j2\pi(f_c t + \frac{K}{2}t^2)} \quad (3.3)$$

其中 f_c 为载波频率， $k = \frac{B}{\tau}$ 为调频斜率， $\text{rect}(\frac{t}{\tau})$ 为矩形信号。

$$\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) = \begin{cases} 1 & , \quad |\frac{t}{\tau}| \leq 1 \\ 0 & , \quad \text{其他} \end{cases} \quad (3.4)$$

为了方便对LFM信号进行处理， $s(t)$ 信号可以表示为：

$$s(t) = S(t)e^{j2\pi f_c t} \quad (3.5)$$

其中， $S(t) = \text{rect}(\frac{t}{\tau})e^{j\pi k t^2}$ 是 $s(t)$ 信号的复包络，由傅里叶变换的性质可知， $s(t)$ 和 $S(t)$ 虽然中心频率不同，但是具有相同的幅频特性，所以通过处理后的线性调频脉冲信号仿真时，只需考虑 $S(t)$

四、实验参数要求

题目	B	
最大不模糊探测距离	$d_{max} \geq 5Km$	
最小可检测距离	$d_{min} \leq 400m$	
测速范围	$3m/s \leq v \leq 80m/s$	(4.1)
速度分辨率	$\Delta v \leq 3m/s$	
距离分辨率	$\Delta d \leq 20m$	
RCS	$0.01m^2$	

五、系统参数理论计算

由雷达原理的相关知识，可知存在以下公式：

$$d_{max} = \frac{CT_r}{2} \quad (5.1)$$

$$d_{min} = \frac{C\tau}{2} \quad (5.2)$$

$$\Delta d = \frac{C}{2B} \quad (5.3)$$

结合(4.1)的要求，可知需满足：

$$\begin{aligned} T_r &\geq 3.33 \times 10^{-5}s \\ \tau &\leq 2.66 \times 10^{-6}s \\ B &\geq 7.5 \times 10^6 Hz \end{aligned} \quad (5.4)$$

由于系统上可供选择的脉宽、带宽有限，因此选择：

$$\begin{aligned} \tau &= 2\mu s \\ B &= 10MHz \end{aligned} \quad (5.5)$$

对于速度，其与多普勒频移的关系为：

$$v = \frac{f_d \lambda}{2} \quad (5.6)$$

其中， f_d 为多普勒频移。而不引起多普勒模糊的条件是：

$$|f_d| \leq \frac{f_r}{2} \quad (5.7)$$

f_r 为脉冲重复频率。结合(4.1),(5.6)与(5.7)，有：

$$f_r \geq 1.706 \times 10^4 Hz \quad (5.8)$$

即

$$T_r \leq 5.86 \times 10^{-5}s \quad (5.9)$$

结合(5.4)，有

$$3.33 \times 10^{-5}s \leq T_r \leq 5.86 \times 10^{-5}s \quad (5.10)$$

多普勒分辨率为相关积累时间的倒数，于是有

$$\Delta f_d = \frac{1}{T_a} = \frac{1}{T_r N} = \frac{f_r}{N} \quad (5.11)$$

其中N为积累的重复脉冲个数。结合(4.1),(5.8),(5.6),(5.11)，有

$$N \geq 53 \quad (5.12)$$

系统上可供选择的脉冲积累个数也有限，故可取：

$$N = 64 \quad (5.13)$$

而由(5.13)，结合(5.11),(5.10)，反推此时 T_r 应满足：

$$4.88 \times 10^{-5}s \leq T_r \leq 5.86 \times 10^{-5}s \quad (5.14)$$

取 $T_r = 50\mu s$ 。

于是相关参数为：

$$\begin{aligned} T_r &= 50\mu s \\ \tau &= 2\mu s \\ B &= 10MHz \\ N &= 64 \end{aligned} \quad (5.15)$$

再由雷达方程：

$$P_r = \frac{P_t^2 A^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 d^4} \quad (5.16)$$

定性给出 P_t 的表达式：

$$P_r = \sqrt{\frac{4\pi \lambda^2 P_r d^4}{A^2 \sigma}} \geq \sqrt{\frac{4\pi \lambda^2 S_{i_{min}} d_{max}^4}{A^2 \sigma}} \quad (5.17)$$

其中， $S_{i_{min}}$ 为接收机的最小可检测输入信号，A为天线有效面积。

实验要求参数与系统可达到的参数见表5.1。

表 5.1 系统参数情况

	实验要求参数	系统可达到参数
最大不模糊探测距离(Km)	5	7.5
最小可检测距离(m)	400	300
测速范围(m/s)	3—80	2.93—93.75
速度分辨率(m/s)	3	2.93
距离分辨率(m)	20	15

六、系统仿真与示波器波形

6.1 单目标情况

6.1.1 中频信号

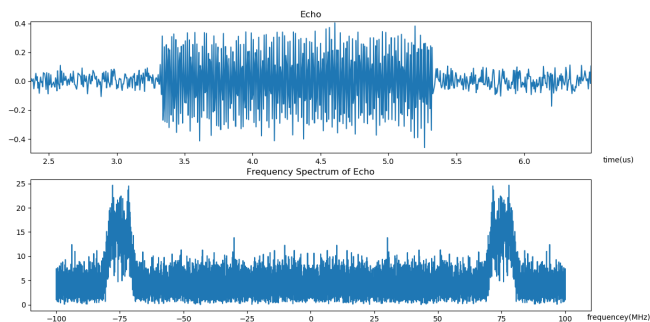
中频信号的系统仿真图像与示波器波形见图6.1。

6.1.2 基带信号

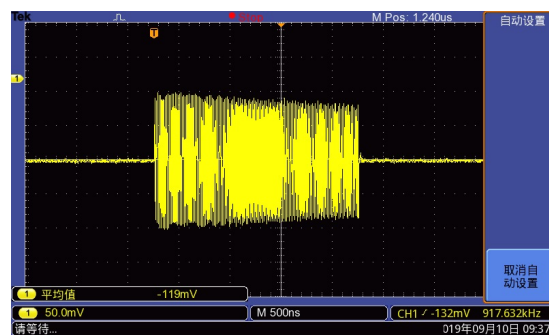
基带信号的系统仿真图像与示波器波形见图6.2。

6.1.3 脉压信号

脉冲压缩信号的系统仿真图像与示波器波形见图6.3。

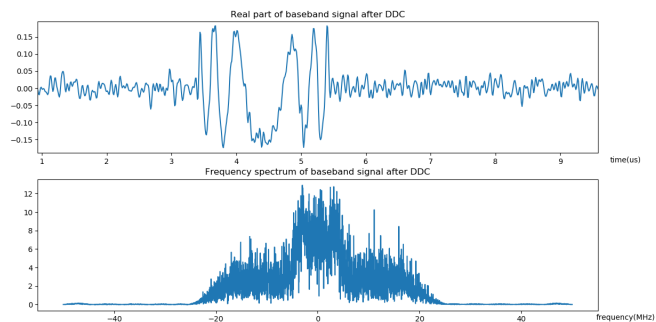


(a) 仿真软件中频信号

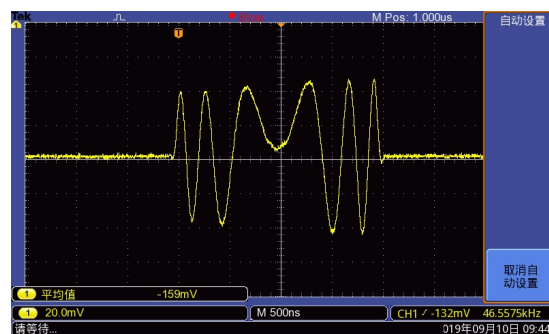


(b) 示波器中频信号

图 6.1 中频信号

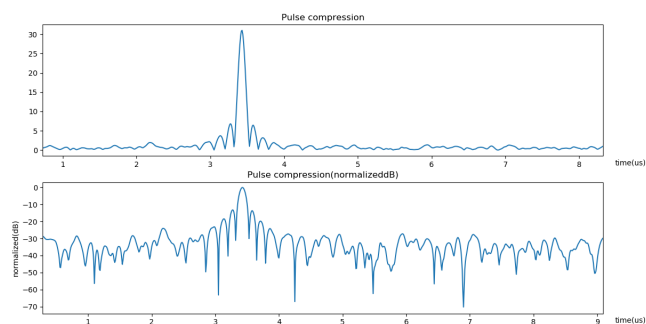


(a) 仿真软件基带信号

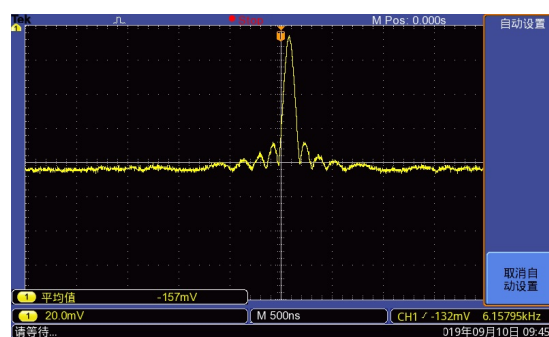


(b) 示波器基带信号

图 6.2 基带信号



(a) 仿真软件脉压信号



(b) 示波器脉压信号

图 6.3 脉压信号

6.2 双目标情况

6.2.1 距离分辨率

由表5.1，系统理论的距离分辨率为15m。在仿真软件上进行仿真的情况如图6.4所示。

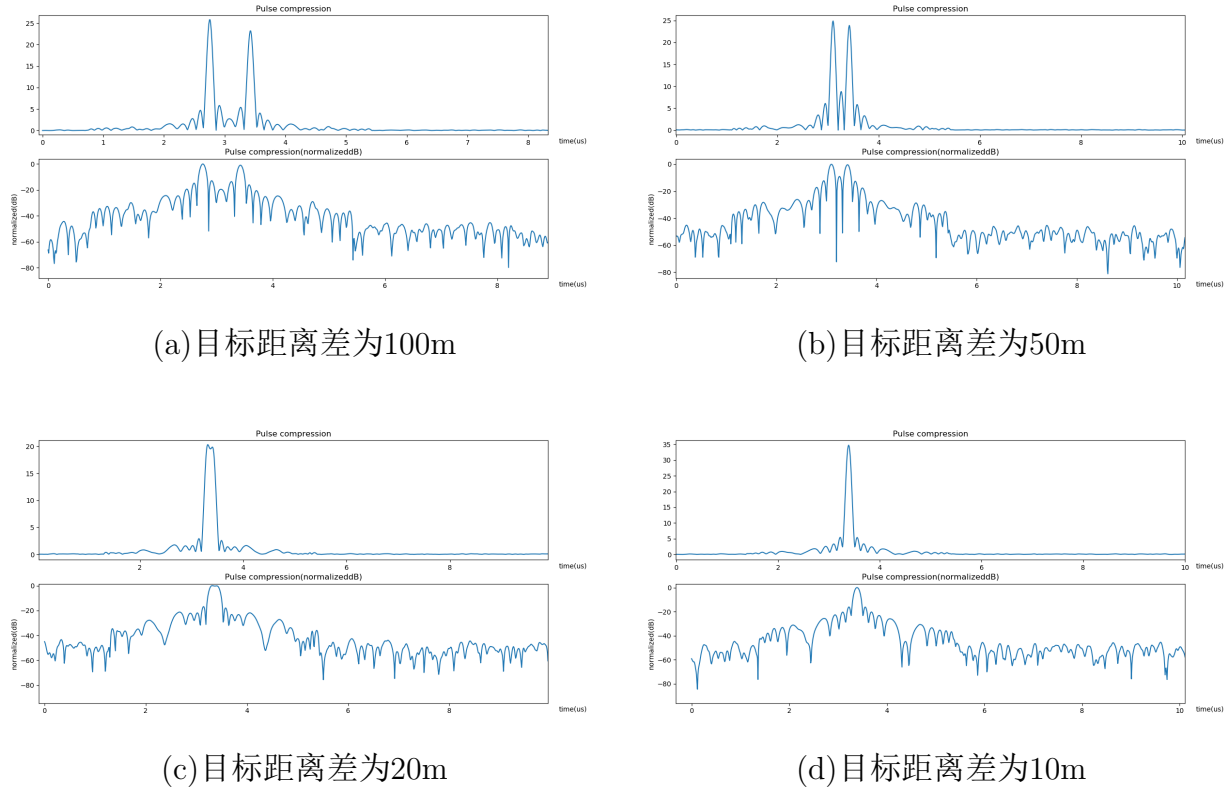


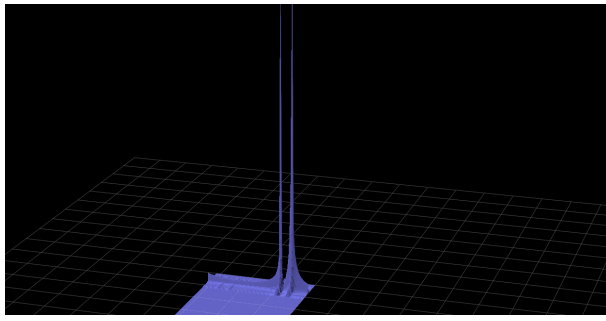
图 6.4 距离分辨率仿真

由仿真图可知，当两者的目标大于距离分辨力时，系统可以区分两个目标，且距离差越大，越明显，当距离小于距离分辨力时，系统无法区分两个目标。

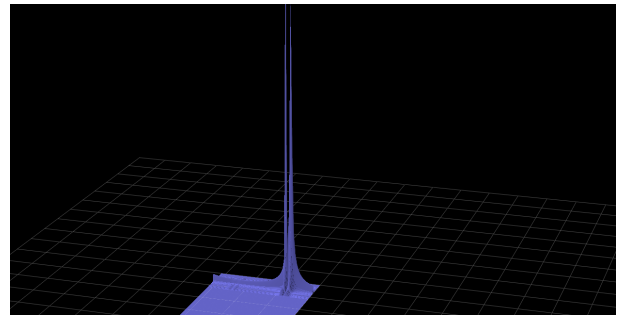
6.2.2 速度分辨率

由表5.1，系统理论的速度分辨率为2.93m/s。在仿真软件上实际进行仿真的情况如图6.5所示。

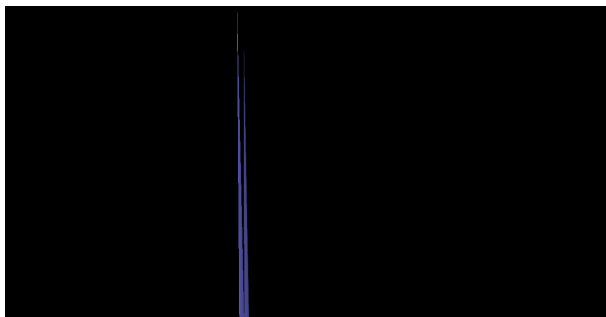
由仿真图可知，当两者的目标大于速度分辨力时，系统可以区分两个目标，且速度差越大，越明显；实际仿真过程中，当速度小于4m/s时，系统已无法明确区分两个目标。



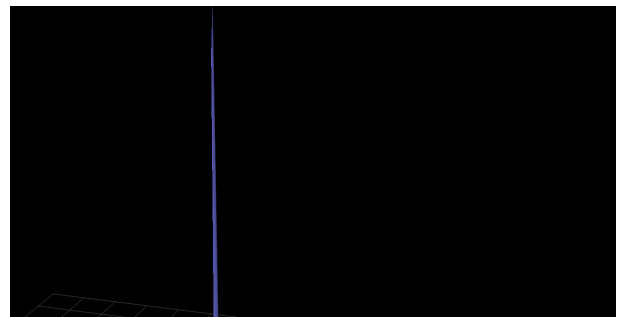
(a) 目标速度差为20m/s



(b) 目标速度差为10m/s



(c) 目标速度差为5m/s



(d) 目标速度差为3m/s

图 6.5 速度分辨率仿真

七、 MATLAB仿真

针对实验所设计的LFM脉冲雷达系统，在MATLAB上进行了相应的仿真研究，加入噪声后，仿真所得到的各个波形如图7.1–7.3 所示。

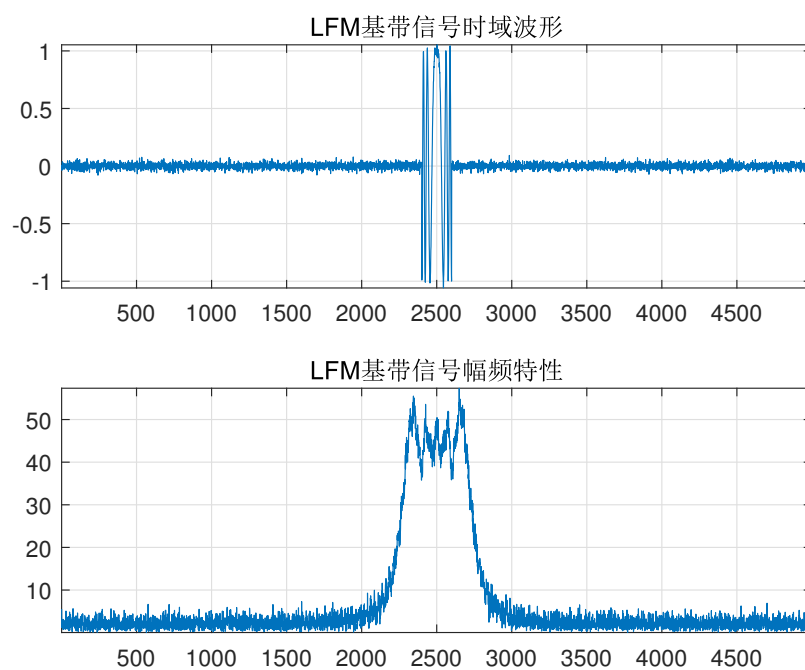


图 7.1 基带信号

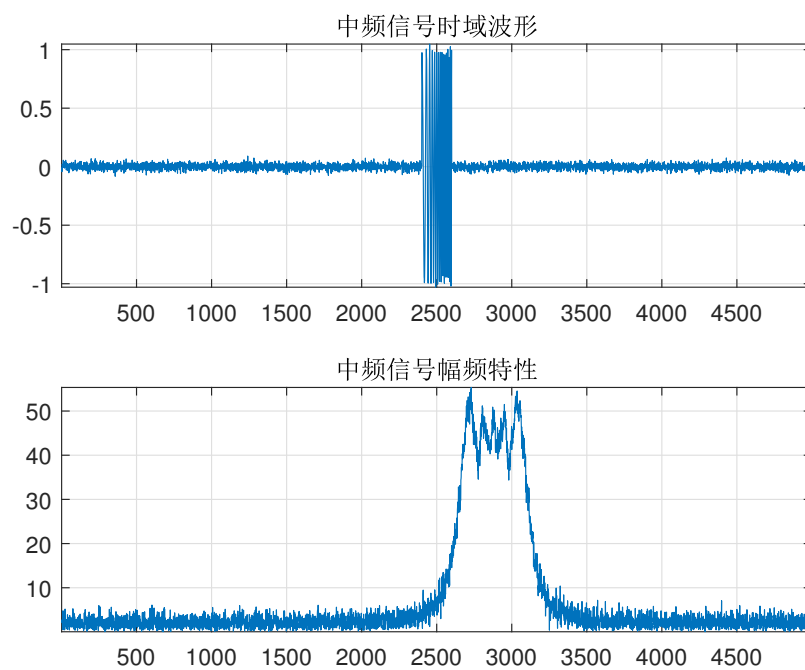


图 7.2 中频信号

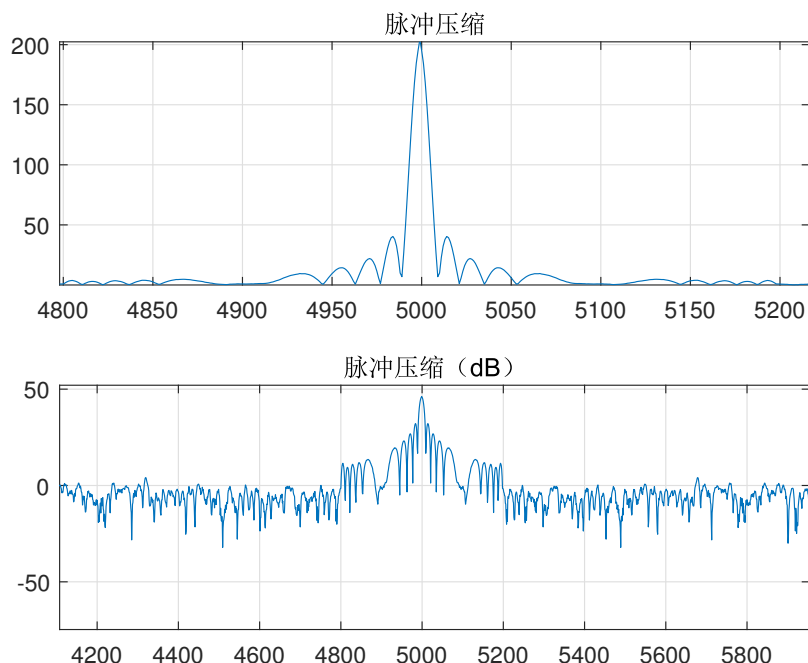


图 7.3 脉压信号

八、实验感想与体会

在本次实验中，我充分体会到了理论与实际相结合的重要性。

实验过程中，同时也锻炼了我的实际动手能力，例如示波器的调试、硬件的连接等等。

事实上，MATLAB仿真的内容在卓工的《信号检测与估计》中有做过类似的内容，但结合实物进行雷达系统设计实验还属首次，在实验过程中也遇到了一些问题，主要是与实验箱和示波器有关。设置目标RCS为 $0.01m^2$ 时，虽然在仿真系统上可以观察到相应波形，但无法在示波器上观察到。即使调整信噪比和发射功率也仍然无效，推测是雷达目标截面积过小，噪声使得信号达不到示波器能检测的阈值。增加RCS至 $0.05m^2$ 后，可以在示波器上观察到波形。

本次仿真实验结合了雷达原理、数字信号处理等课程的内容，通过独立自主地完成本次仿真实验，我基本上了解、明白了雷达信号对于信号的识别过程。

当然，实验也存在令人遗憾的内容。由于对示波器不够熟悉，尤其是触发电平功能不够了解，在最后的考核中并没有取得十分理想的成绩。

最后，我要感谢在实验中给予我帮助的李洪涛老师，以及在实验过程中与我一同讨论的卢铭同学。

九、附录:matlab代码

```

1  clc;
2  clear;
3  B=10e6;           %带宽
4  T=5e-5;           %脉冲重复周期
5  Tau=2e-6;         %脉宽
6  Fc=16e9;          %载频
7  F0=7.5e6;
8  SNRi=30;          %输入信噪比
9  V=0;              %目标速度
10 A=0.01;            %目标幅度
11 R=0;              %目标距离
12 %*****常数或中间参数*****
13 D=Tau/T;           %占空比
14 K=B/Tau;           %线性调频斜率
15 Fs=100e6;          %采样频率
16 Ts=1/Fs;           %采样周期
17 C=3e8;             %光速C
18 %*****线性调频信号*****
19 N=round(T/Ts);
20 t1=linspace(-Tau/2,Tau/2,N*D);
21 St_1=exp(2*j*pi*(F0*t1+0.5*K*t1.^2));
22 St_0=exp(2*j*pi*(+0.5*K*t1.^2));
23 N1=round(N*(1-D)/2);
24 zero=zeros(1,N1); %补零
25 St_0=[zero,St_0,zero];
26 St_1=[zero,St_1,zero];
27 St_0=awgn(St_0,SNRi); %加入噪声
28 St_1=awgn(St_1,SNRi);
29 %LFM时域波形
30 figure(1);
31 subplot(2,1,1)
32 plot(real(St_0));
33 title('基带信号时域波形LFM');
34 grid on;axis tight;
35 %LFM频域波形
36 figure(1);
37 subplot(2,1,2)
38 fftshift(abs(fft(St_0)));
39 St_FFT_0=fftshift(abs(fft(St_0)));
40 plot(St_FFT_0);
41 title('基带信号幅频特性LFM');
42 grid on;axis tight;
43 %中频信号时域
44 figure(2);

```

```

45 subplot(2,1,1)
46 plot(real(St_1));
47 title('中频信号时域波形');
48 grid on;axis tight;
49 %中频信号频域
50 figure(2);
51 subplot(2,1,2)
52 fftshift(abs(fft(St_1)));
53 St_FFT_1=fftshift(abs(fft(St_1)));
54 plot(St_FFT_1);
55 title('中频信号幅频特性');
56 grid on;axis tight;
57 %*****匹配滤波*****
58 Ht_0=fliplr(St_0);
59 Ht=conj(Ht_0);
60 Sot=conv(St_0,Ht);
61 Z0=abs(Sot);
62 %匹配滤波
63 figure(3)
64 subplot(2,1,1)
65 plot(Z0);
66 grid on;axis tight;
67 title('脉冲压缩');
68 %匹配滤波dB
69 figure(3)
70 subplot(2,1,2)
71 Z1=20*log10(Z0);
72 plot(Z1);
73 grid on;axis tight;
74 title('脉冲压缩 ( ) dB');

```