

报告

一维 LFM 脉冲压缩结果的保相性问题及解决

2015.01.12

设计解调后的 LFM 信号如下^[1]:

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \frac{2R_0}{c}}{T}\right) \cdot \exp\left\{j\pi K\left(t - \frac{2R_0}{c}\right)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi f_0 R_0}{c}\right\}$$

上式表示来自距离 R_0 处的回波信号，且已经被解调至基带。根据理论分析，用匹配滤波器进行脉冲压缩后，其峰值点处的相位应该是：

$$-j\frac{4\pi f_0 R_0}{c} = -j\frac{4\pi R_0}{\lambda}$$

本报告要做的是：在前面的基础上，要研究以下几种情况：

- 1) 首先，作为分析依据，要明确知道以下这件事：峰值点处的相位理论上是 $-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}$ ，但由于相位缠绕，我们从图中读出的峰值点相位是缠绕过后的。因此，此时的检查方法就是将缠绕后的相位（从仿真结果中得到），与理论相位 $-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}$ 作差，如果等于 2π 的整数倍，那么结果就是正确的；如果不是，则结果有问题。当然，考虑到计算误差，结果是有一定偏差的。后面具体再说。
- 2) 第一种情况：设置一个延迟时间为0的目标（即 $R=0$ ），考察其相位是否满足上面的理论分析结果；
- 3) 第二种情况：设置一个位于距离 R_0 处的目标（即延迟时间为 $\frac{2R_0}{c}$ ），考察其相位是否与 $-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}$ 相差 2π 的整数倍；
- 4) 第三种情况：由上面的各自独立的 LFM 信号组成一个组合的 LFM 信号（此时各 LFM 信号之间是会有互相影响的），然后进行脉冲压缩。分别得到各个峰值点处的相位，然后考察是否满足上面的理论分析结果。

下面进行仿真分析。

1. 将第一种情况和第二种情况合并，将仿真结果列表如下：

表1 设计独立的不同 R_0 的LFM进行仿真，结果统计表

序号	设计的距离 R_0 (m)	理论相位 $-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}$ (rad)	仿真结果中 读出的相位 记为 φ (rad)	进行16倍升采样后，再次读出峰值点处的相位 (rad)	理论相位与仿真结果作差： $\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) - \varphi$ 考察其是否是 2π 的整数倍
1	0	0	-1.8504e-18	-1.8504e-18	2.9450e-19
2	50	-1.1100e+04	2.0944	2.0944	-1767
3	100	-2.2201e+04	-2.0944	-2.0944	≈ -3533 (精确到小数点后10位以上，也就是3533.后面至少有10个零)
4	200	-4.4401e+04	2.0944	2.0944	-7067
5	300	-6.6602e+04	-2.4630e-12	-2.4630e-12	≈ -10600 (精确到小数点后11位以上)
6	400	-8.8802e+04	-2.0944	-2.0944	-14133

通过表1可以看到，对于上述不同 R_0 处的LFM（每次仿真都只有一个LFM信号，所以说是独立的），最终的相位结果都很精确，完全符合了我们的要求。

要说明的是，之所以上面的距离 R_0 选择的这么整，是为了能使得 $\frac{2R_0/c}{1/F_r} = \frac{2R_0}{c} \cdot F_r$ 是整数，

也就是为了能使峰值点恰好出现在整数点处，便于我取相位进行以上计算。当然，不是整数点的时候也能够得到其相位，只不过这时候的相位需要通过插值得到，而且可以预见它也一定也是符合理论结果的。

这里我就不再多说了。

下面针对第3种情况，进行分析。

2. 第三种情况：用许多独立的LFM组成一个LFM信号序列，对其进行脉冲压缩，并分析相位特性。

这种情况是实际情况的理想化。因为实际情况就可以看成是无数个点目标组合在一起而得到的原始目标回波，经过SAR成像处理最终得到成像结果。

这里我对一维LFM进行类似的操作：用不同 R_0 的LFM（峰值都设置为1）组成一个LFM信号序列， R_0 的设计保证最后的脉冲压缩结果能够分别出各自的峰值。因为这里我的目的是分析这种情况下处理的保相性，所以用最简单的情况，即LFM序列中的各个LFM的脉压结果的峰值能被分辨，且都处于整数采样点处。我就简单地选用表1的数据，将1到6共6个LFM组成一个LFM序列，进行上述操作。

仿真结果如下：

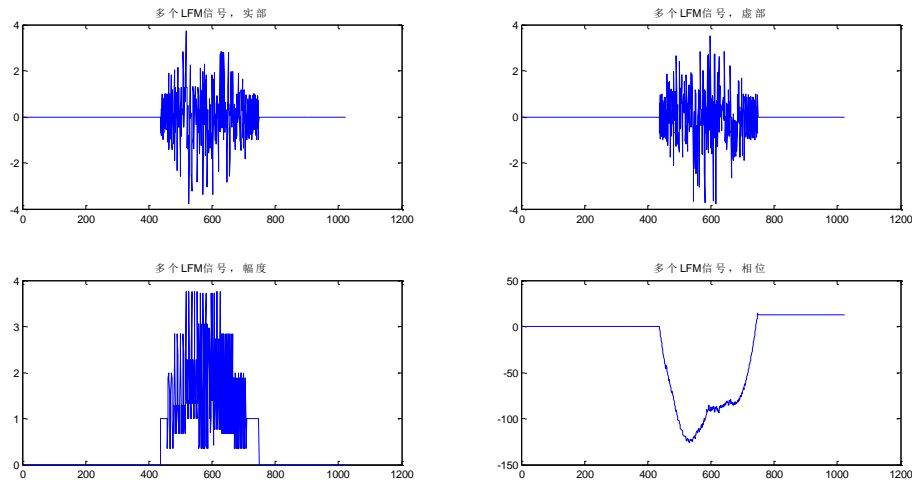


图1 生成的LFM序列

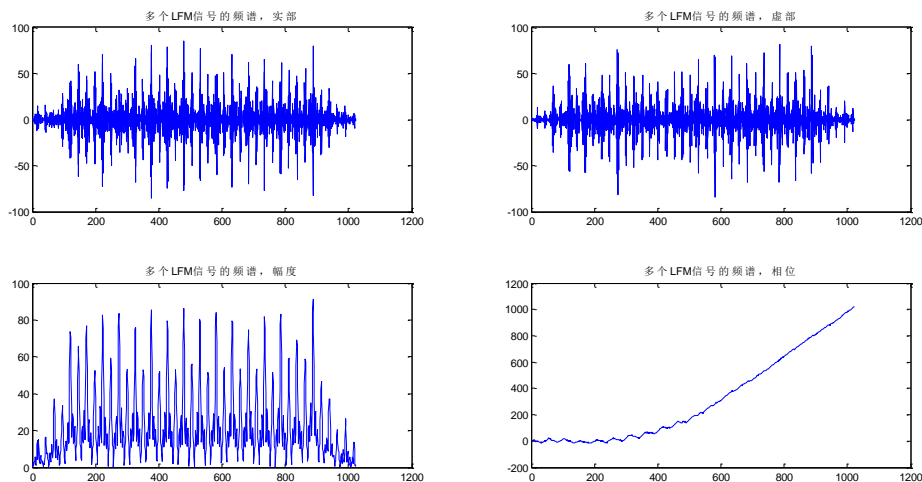


图2 LFM序列的频谱

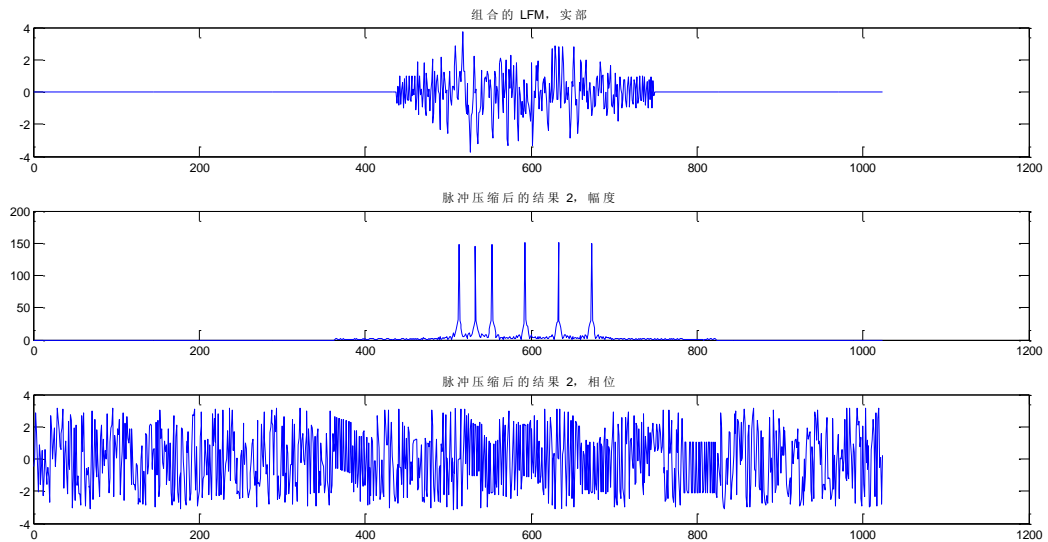


图3 脉冲压缩结果

(第一幅图是LFM序列, 第二幅图是脉压结果的幅度, 第三幅图是脉压结果的相位)

(6个点目标峰值分别位于: 513, 533, 553, 593, 633, 673)

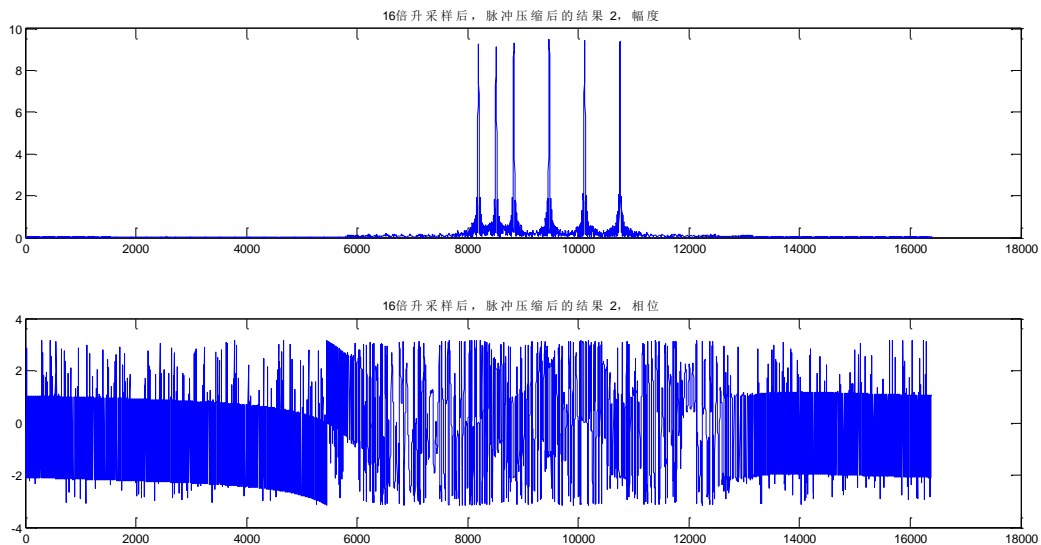


图4 进行16倍升采样后, 脉冲压缩结果

(上图幅度, 下图相位)

下面我根据表1的形式, 并根据不同LFM峰值的位置, 分别取出它们的相位。检验在有互相影响的情况下(因为形成了LFM序列, 不同 R_0 的LFM信号之间会互相影响, 其脉压结果的幅度和相位, 尤其是相位都会受到不同程度的影响), 保相性如何。

表2 LFM序列中，不同峰值点处相位的保相性

序号	设计的距离 R_0 (m)	理论相位 $-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}$ (rad)	仿真结果中 读出的相位 记为 φ (rad)	进行16倍升采样后，再次读出峰值点处的相位 (rad)	理论相位与仿真结果作差： $\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) - \varphi$ 考察其是否是 2π 的整数倍
1	0	0	0.0031	0.0031	-4.9424e-04
2	50	-1.1100e+04	2.0983	2.0983	≈ -1767.00062
3	100	-2.2201e+04	-2.1127	-2.1127	≈ -3532.9971
4	200	-4.4401e+04	2.0986	2.0986	≈ -7067.0007
5	300	-6.6602e+04	0.0085	0.0085	≈ -10600.00136
6	400	-8.8802e+04	-2.0897	-2.0897	≈ -14133.00075

由表2可以看出，这些独立的峰值点处的相位与理论值也是基本满足 2π 的整数倍的要求的（我认为由于来自不同 R_0 处的LFM的相互影响，表2中的计算结果是完全可以接受的）。它们峰值处的相位与理论值之差，再除以 2π ，其精度也至少得到了小数点后两位。所以我认为这是完全可以接受的，

因此，我认为一维LFM处理的保相性是没有问题了。

从现在开始，我可以暂时认为对LFM的一维匹配滤波可以符合理论分析。在后续的分析成像的保相性以及干涉SAR处理中，可以认为该部分能够达到要求而不用在花时间检查了。

参考文献

- [1] Cumming Ian G., Wong Frank H. 合成孔径雷达成像——算法与实现[M]. 洪文，胡东辉等，译. 电子工业出版社, 2007.

WD

2015 年 1 月 12 日 22:18 p.m.

MATLAB 源代码:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               用一维 LFM 脉冲压缩来检验相位信息
%                               研究保相性相关问题及解决
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% 方法:
% 生成一个一维 LFM;
% 模拟到距离 R 处的接收信号。这样信号的时间延迟是 2R/c;
% 用匹配滤波器进行脉冲压缩;
% 检验其峰值点的相位, 是否符合理论值:  $-4\pi R/\lambda$ ;
%
% 该程序截止到: 2015.01.12. 22:17 p.m.

%%
close all;
clear;
clc;

%%
% -----
% 定义参数
% -----
R0 = 50;                % 设计的目标距离

Tr = 2.5e-6;            % 发射脉冲时宽
Kr = 20e12;             % 距离调频率
f0 = 5.3e9;             % 雷达工作频率
Fr = 60e6;              % 距离采样率
c = 3e8;                % 光速
Nr = Tr*Fr;             % 线性调频信号采样点数
BW_range = Kr*Tr;       % 距离向带宽
lamda = c/f0;           % 波长
a_sr = Fr / BW_range;   % 距离向过采样因子

Nrg = 1024;             % 距离线采样点数
NFFT_r = Nrg;           % 距离向 FFT 长度

% -----
% 距离向时间, 频率相关定义
% -----
tr = ( -Nrg/2 : (Nrg/2-1) )/Fr;          % 距离时间轴

```

```

fr = ( -NFFT_r/2 : NFFT_r/2-1 )*( Fr/NFFT_r );          % 距离频率轴

%%
% -----
%                                     生成一维 LFM
% -----
% *****
% 第一个 LFM, 位于零时刻
w_range = (abs(tr)) <= (Tr/2);          % 距离向包络, 即距离窗
s_k1 = w_range.*exp(1j*pi*Kr*tr.^2).*exp(-1j*4*pi*f0*0/c);
S_K1 = fft(s_k1);                      % FFT 到频域, 得到其频谱。零频位于两端.

figure;
subplot(2,2,1);plot(real(s_k1));title('LFM 信号 1, 实部');
subplot(2,2,2);plot(imag(s_k1));title('LFM 信号 1, 虚部');
subplot(2,2,3);plot(abs(s_k1));title('LFM 信号 1, 幅度');
subplot(2,2,4);plot(phase(s_k1));title('LFM 信号 1, 相位');

figure;
subplot(2,2,1);plot(real(fftshift(S_K1)));title('LFM 信号 1 的频谱, 实部');
subplot(2,2,2);plot(imag(fftshift(S_K1)));title('LFM 信号 1 的频谱, 虚部');
subplot(2,2,3);plot(abs(fftshift(S_K1)));title('LFM 信号 1 的频谱, 幅度');
subplot(2,2,4);plot(phase(fftshift(S_K1)));title('LFM 信号 1 的频谱, 相位');
% *****
% 第二个 LFM, 来自距离 R0 处的回波
w_range2 = (abs(tr - 2*R0/c)) <= (Tr/2);          % 距离向包络, 即距离窗
s_k2 = w_range2.*exp(1j*pi*Kr*(tr - 2*R0/c).^2).*exp(-1j*4*pi*f0*R0/c);
S_K2 = fft(s_k2);                      % FFT 到频域, 得到其频谱。零频位于两端.

figure;
subplot(2,2,1);plot(real(s_k2));title('LFM 信号 2, 来自距离 R0 处的回波, 实部');
subplot(2,2,2);plot(imag(s_k2));title('LFM 信号 2, 来自距离 R0 处的回波, 虚部');
subplot(2,2,3);plot(abs(s_k2));title('LFM 信号 2, 来自距离 R0 处的回波, 幅度');
subplot(2,2,4);plot(phase(s_k2));title('LFM 信号 2, 来自距离 R0 处的回波, 相位');

figure;
subplot(2,2,1);plot(real(fftshift(S_K2)));
title('LFM 信号 2 的频谱, 来自距离 R0 处的回波, 实部');
subplot(2,2,2);plot(imag(fftshift(S_K2)));
title('LFM 信号 2 的频谱, 来自距离 R0 处的回波, 虚部');
subplot(2,2,3);plot(abs(fftshift(S_K2)));
title('LFM 信号 2 的频谱, 来自距离 R0 处的回波, 幅度');
subplot(2,2,4);plot(phase(fftshift(S_K2)));

```



```

title('LFM 信号 2 的频谱，来自距离 R0 处的回波，相位');
% *****
% 将以上 LFM 组合，得到线性调频信号如下：
s_lfm = s_k1 + s_k2;
S_LFM = fft(s_lfm);

figure;
subplot(2,2,1);plot(real(s_lfm));title('多个 LFM 信号，实部');
subplot(2,2,2);plot(imag(s_lfm));title('多个 LFM 信号，虚部');
subplot(2,2,3);plot(abs(s_lfm));title('多个 LFM 信号，幅度');
subplot(2,2,4);plot(phase(s_lfm));title('多个 LFM 信号，相位');

figure;
subplot(2,2,1);plot(real(fftshift(S_LFM)));title('多个 LFM 信号的频谱，实部');
subplot(2,2,2);plot(imag(fftshift(S_LFM)));title('多个 LFM 信号的频谱，虚部');
subplot(2,2,3);plot(abs(fftshift(S_LFM)));title('多个 LFM 信号的频谱，幅度');
subplot(2,2,4);plot(phase(fftshift(S_LFM)));title('多个 LFM 信号的频谱，相位');

%%
% -----
%                               在时域生成匹配滤波器
%               取复制信号，求补零 FFT，再取复共轭，得到 MF 的频域形式
%               进行匹配滤波，并得出峰值点的相位
% -----
t_ref = (-Nr/2 : (Nr/2-1))/Fr;           % 用来生成距离 MF 的距离时间轴
w_range_ref = (abs(t_ref)) <= (Tr/2);    % 距离向包络，即距离窗，限制脉冲长度
s_ref = w_range_ref.*exp((1j*pi*Kr).*((t_ref).^2)); % 复制（发射）脉冲，未加窗。
s_ref = [s_ref,zeros(1,Nrg-Nr)];        % 对复制脉冲，后端补零。
s_ref = circshift(s_ref,[0 -Nr/2]);
% 对 s_ref 设计一个延迟，使得峰值点被压至 LFM 脉冲中心
S_ref = fft(s_ref,[],2);                 % 复制脉冲的距离傅里叶变换，零频在两端。
H_range2 = conj(S_ref);                  % 距离向匹配滤波器，零频在两端。

%%
% *****
%                               对 LFM1 的脉压
% *****
%
S_K1_after_MF2 = S_K1.*H_range2;
s_k1_after_mf2 = ifft(S_K1_after_MF2);

% 作图
figure;
subplot(3,1,1);plot(real(s_k1));title('原始的 LFM，实部');

```

```

subplot(3,1,2);plot(abs(s_k1_after_mf2));title('脉冲压缩后的结果 2, 幅度');
subplot(3,1,3);plot(angle(s_k1_after_mf2));title('脉冲压缩后的结果 2, 相位');

% 通过 16 倍升采样后考察;
% 下面在频域进行 16 倍升采样, 再考察峰值点附近的幅度和相位
TMP_S_K1_after_MF2 = [S_K1_after_MF2(1:length(S_K1_after_MF2)/2),...
                      zeros(1,15*length(S_K1_after_MF2)),...
                      S_K1_after_MF2(length(S_K1_after_MF2)/2+1:end)];
% TMP_S_K1_after_MF 是对频谱进行 16 倍补零后的结果
% 下面进行 ifft 则直接得到升采样后的结果
tmp_s_k1_after_mf2 = ifft(TMP_S_K1_after_MF2);

figure;
subplot(2,1,1);plot(abs(tmp_s_k1_after_mf2));
title('16 倍升采样后, 脉冲压缩后的结果 2, 幅度');
subplot(2,1,2);plot(angle(tmp_s_k1_after_mf2));
title('16 倍升采样后, 脉冲压缩后的结果 2, 相位');

disp('-----');
disp('理论相位');
disp((-4*pi*0/lamda));
disp('第二种脉冲压缩方式后, 峰值处的相位');
disp(phase(s_k1_after_mf2( Nrg/2+1 )));
disp('16 倍升采样后, 第二种脉冲压缩方式后, 峰值处的相位');
disp(phase(tmp_s_k1_after_mf2( 1+(Nrg/2+1-1)*16 )));
disp('峰值处的相位 (缠绕相位) 和理论相位 “-4*pi*R0/lamda” 是否满足整数倍的关系: ');
disp((( -4*pi*0/lamda)- phase(s_k1_after_mf2(Nrg/2+1)))/(2*pi));
% 通过我这里的脉冲压缩方法, 将峰值点压至脉冲中心处。
% 因此, 其中心点位置是 ((Nrg/2+1));
disp('-----');

%%
% *****
%                               对 LFM2 的脉压
% *****
%
S_K2_after_MF2 = S_K2.*H_range2;
s_k2_after_mf2 = ifft(S_K2_after_MF2);

% 作图
figure;
subplot(3,1,1);plot(real(s_k2));title('原始的 LFM 2, 实部');
subplot(3,1,2);plot(abs(s_k2_after_mf2));title('脉冲压缩后的结果 2, 幅度');
subplot(3,1,3);plot(angle(s_k2_after_mf2));title('脉冲压缩后的结果 2, 相位');

```

```

% 通过 16 倍升采样后考察；
% 下面在频域进行 16 倍升采样，再考察峰值点附近的幅度和相位
TMP_S_K2_after_MF2 = [S_K2_after_MF2(1:length(S_K2_after_MF2)/2),...
                      zeros(1,15*length(S_K2_after_MF2)),...
                      S_K2_after_MF2(length(S_K2_after_MF2)/2+1:end)];
% TMP_S_K2_after_MF2 是对频谱进行 16 倍补零后的结果
% 下面进行 ifft 则直接得到升采样后的结果
tmp_s_k2_after_mf2 = ifft(TMP_S_K2_after_MF2);

figure;
subplot(2,1,1);plot(abs(tmp_s_k2_after_mf2));
title('16 倍升采样后，脉冲压缩后的结果 2，幅度');
subplot(2,1,2);plot(angle(tmp_s_k2_after_mf2));
title('16 倍升采样后，脉冲压缩后的结果 2，相位');

disp('-----');
disp('理论相位');
disp((-4*pi*R0/lamda));
disp('第二种脉冲压缩方式后，峰值处的相位');
disp(phase(s_k2_after_mf2( Nrg/2+1 + 2*R0/c*Fr )));
disp('-----');
disp('16 倍升采样后，第二种脉冲压缩方式后，峰值处的相位');
disp(phase(tmp_s_k2_after_mf2( 1+(Nrg/2+1+2*R0/c*Fr-1)*16 )));
disp('峰值处的相位（缠绕相位）和理论相位“-4*pi*R0/lamda”是否满足整数倍的关系：');
disp(((( -4*pi*R0/lamda)- phase(s_k2_after_mf2(Nrg/2+1 + 2*R0/c*Fr)))/(2*pi));
disp('-----');

%%
% *****
%           对组合的 LFM（多个 LFM 合成的）进行脉压
% *****
S_LFM_after_MF2 = S_LFM.*H_range2;
s_lfm_after_mf2 = ifft(S_LFM_after_MF2);

% 作图
figure;
subplot(3,1,1);plot(real(s_lfm));title('组合的 LFM，实部');
subplot(3,1,2);plot(abs(s_lfm_after_mf2));title('脉冲压缩后的结果 2，幅度');
subplot(3,1,3);plot(angle(s_lfm_after_mf2));title('脉冲压缩后的结果 2，相位');

% 通过 16 倍升采样后考察；
% 下面在频域进行 16 倍升采样，再考察峰值点附近的幅度和相位

```

```

TMP_S_LFM_after_MF2 = [S_LFM_after_MF2(1:length(S_LFM_after_MF2)/2),...
                        zeros(1,15*length(S_LFM_after_MF2)),...
                        S_LFM_after_MF2(length(S_LFM_after_MF2)/2+1:end)];
% TMP_S_LFM_after_MF2 是对频谱进行 16 倍补零后的结果
% 下面进行 ifft 则直接得到升采样后的结果
tmp_s_lfm_after_mf2 = ifft(TMP_S_LFM_after_MF2);

figure;
subplot(2,1,1);plot(abs(tmp_s_lfm_after_mf2));
title('16 倍升采样后，脉冲压缩后的结果 2，幅度');
subplot(2,1,2);plot(angle(tmp_s_lfm_after_mf2));
title('16 倍升采样后，脉冲压缩后的结果 2，相位');

disp('-----');
disp('第二种脉冲压缩方式后，两个峰值点处的相位依次如下：');
disp([phase(s_lfm_after_mf2(Nrg/2+1)),phase(s_lfm_after_mf2(Nrg/2+1 + 2*R0/c*Fr))]);
disp('-----');
disp('16 倍升采样后，第二种脉冲压缩方式后，峰值处的相位');
disp([phase(tmp_s_lfm_after_mf2(1+(Nrg/2+1-1)*16)),...
      phase(tmp_s_lfm_after_mf2(1+(Nrg/2+1+2*R0/c*Fr-1)*16))]);
disp('峰值处的相位（缠绕相位）和理论相位 “-4*pi*R0/lamda” 是否满足整数倍的关系：');
disp([( (-4*pi*0/lamda)- phase(s_lfm_after_mf2(Nrg/2+1)))/(2*pi),...
      ((-4*pi*R0/lamda)- phase(s_lfm_after_mf2(Nrg/2+1 + 2*R0/c*Fr)))/(2*pi)]);
disp('-----');

```