

脉冲压缩技术

在雷达信号处理中的应用

## 一. 脉冲压缩的产生背景及定义

### 1.1 脉冲压缩的定义

脉冲压缩即 pulse compression，它是指发射宽编码脉冲并对回波进行处理以获得窄脉冲，因此脉冲压缩雷达既保持了窄脉冲的高距离分辨力，又能获得宽脉冲的强检测能力。

$$\Delta R = \frac{Zc}{2}, \quad c \downarrow \Delta R \downarrow \quad \quad \quad c \uparrow, P \uparrow$$

距离分辨力越高。

### 1.2 脉冲压缩的主要手段

目前的脉冲压缩的手段主要有①线性调频、②非线性调频与③相位编码等。

#### 1) 线性调频

是最简单的脉冲压缩信号，容易产生，而且其压缩脉冲形状和信噪比对多普勒频移不敏感，因而得到了广泛的应用，但是，在利用多普勒频率测量目标方位和距离的情况下很少使用；

#### 2) 非线性调频

非线性调频具有几个明显的优点，不需要对时间和频率加权，但是系统复杂。为了达到所需的旁瓣电平，需要对每个幅度频谱分别进行调频设计，因而在实际中很少应用；

#### 3) 相位编码

相位编码波形不同于调频波形，它将宽脉冲分为许多短的子脉冲。这些子脉冲宽度相等，其相位通过编码后被发射。根据所选编码的类型，包括巴克码、伪随机序列编码以及多项制编码等。

### 1.3 脉冲压缩的产生背景

随着飞行技术的飞速发展，对雷达的作用距离、分辨能力、测量精度和单值性等性能指标提出越来越高的要求。测距精度和距离分辨力对信号形式的要求是一致的，主要取决于信号的频率结构，为了提高测距精度和距离分辨力，要求信号具有大的带宽。而测速精度和速度分辨力则取决于信号的时域结构，为了提高测速精度和速度分辨力，要求信号具有大的时宽。除此之外，为提高雷达系统的发现能力，要求信号具有大的能量。由此可见，为了提高雷达系统的发现能力、测量精度和分辨能力，要求雷达信号具有大的时宽、带宽、能量乘积。但是，在系统的发射和馈电设备峰值功率受限制的情况下，

大的信号能量只能靠加大信号的时宽来得到。测距精度和距离分辨力同测速精度和速度分辨力以及作用距离之间存在着不可调和的矛盾。于是在匹配滤波器理论指导下，人们提出了脉冲压缩的概念。

由于发射机效率的限制，雷达真正采用的脉压信号是由调频和相位编码产生的，其中以线性调频和二相编码信号的研究与应用最为广泛。

## 二. 线性调频信号（LFM）

脉冲压缩雷达最常见的调制信号是线性调频（Linear Frequency Modulation）信号，接收时采用匹配滤波器（Matched Filter）压缩脉冲。

LFM 信号的数学表达式为：

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi(f_c t + \frac{K}{2} t^2)} \quad (1)$$

式中  $f_c$  为载波频率， $\text{rect}(\frac{t}{T})$  为矩形信号。

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, & \left|\frac{t}{T}\right| \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$K = \frac{B}{T}$  是调频斜率，于是，信号的瞬时频率为  $f_c + Kt$  ( $-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$ )，如图 1。

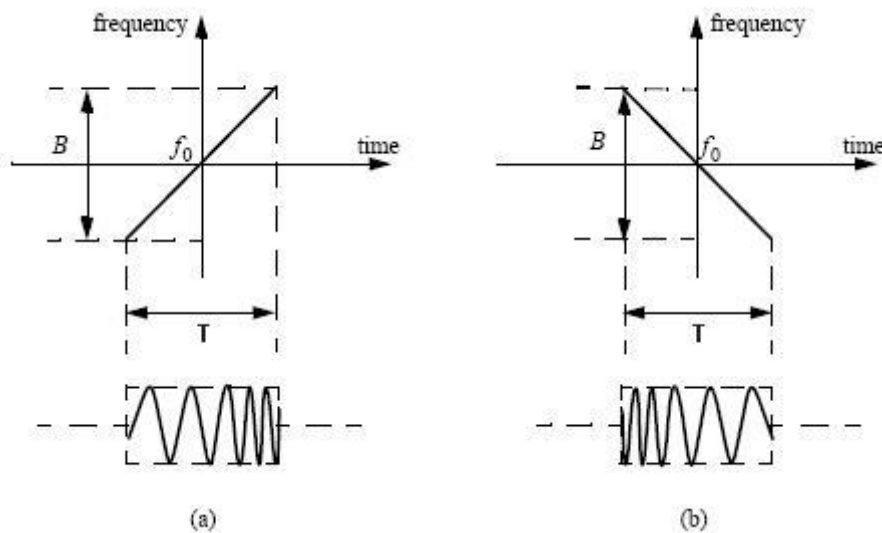


图 1 典型的 LFM 信号 (a) up-LFM( $K > 0$ ) (b) down-LFM( $K < 0$ )

将(1)式中的 up-LFM(信号重写为:

$$s(t) = S(t)e^{j2\pi f_c t} \quad (3)$$

式中,  $S(t) = \text{rect}(\frac{t}{T})e^{j\pi Kt^2}$  是信号  $s(t)$  的复包络。由傅立叶变换性质,  $S(t)$  与  $s(t)$  具有相同的幅频特性, 只是中心频率不同而以, 因此, Matlab 仿真时, 只需考虑  $S(t)$ 。由 Matlab 程序产生  $S(t)$  信号, 并作出其时域波形和幅频特性, 如图 2 所示。

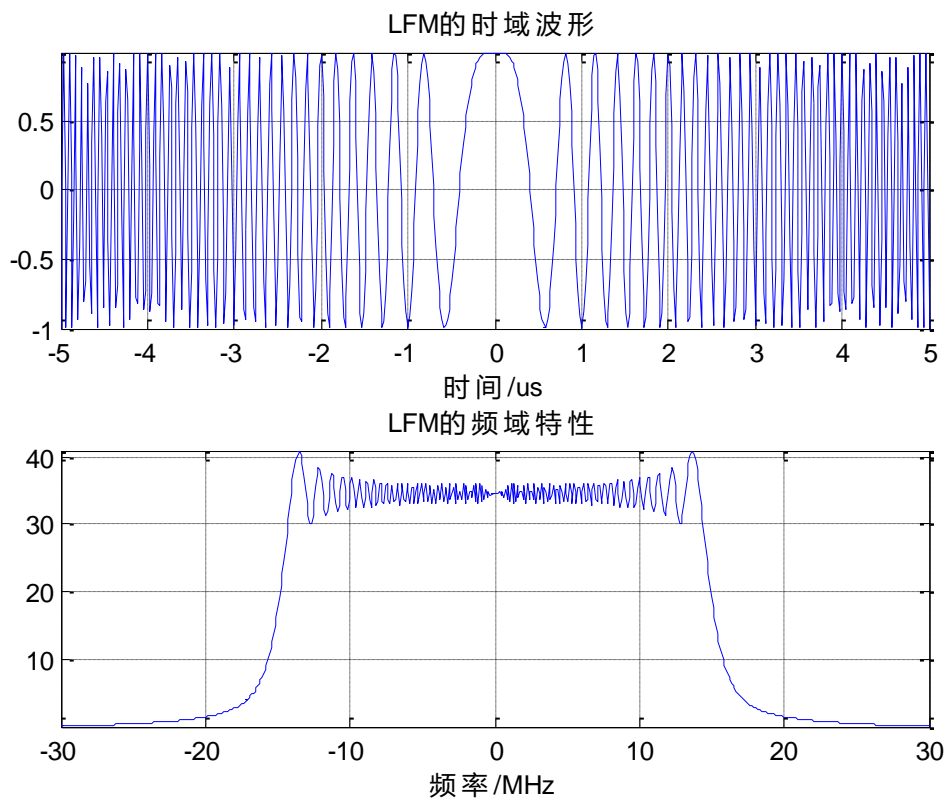


图 2 线性调频信号的时域波形和幅频特性

由此可以得到关于线性调频脉冲信号频率特性的两个重要结论:

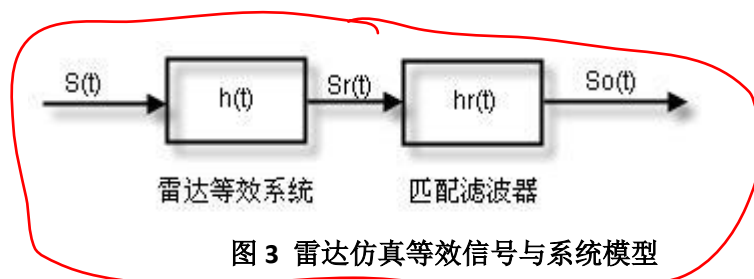
- (1) 在满足大时宽带宽积的条件下, 线性调频脉冲信号的振幅谱接近矩形函数, 频谱宽度近似等于信号的调频变化范围  $B$ , 与时宽  $\tau$  无关。
- (2) 在满足大时宽带宽积的条件下, 线性调频脉冲信号的相位谱具有平方律特性。

以上两点是设计匹配滤波器, 进行脉冲压缩处理的主要依据。

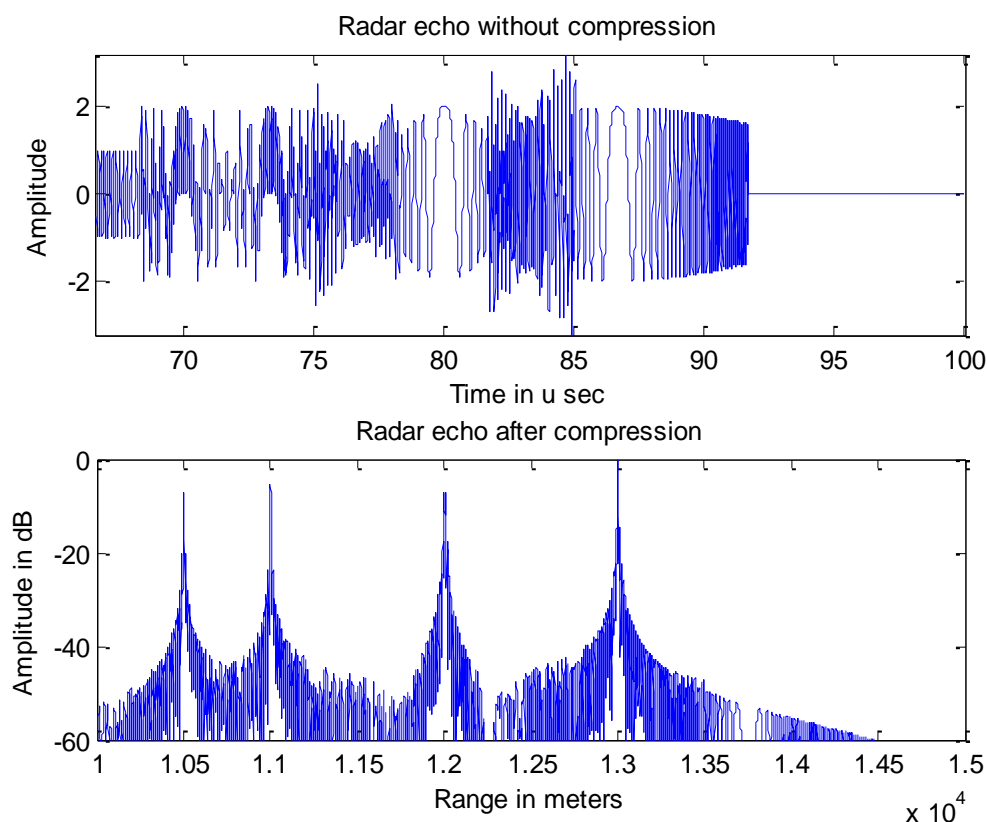
注: 匹配滤波器是在白噪声背景中检测信号的最佳线性滤波器, 其输出信噪比在某个时刻可以达到最大, 它是对线性调频信号进行脉冲压缩的主要手段。

### 三. 对脉冲压缩信号的仿真

结合以上分析，用 Matlab 仿真雷达发射信号，回波信号，和压缩后的信号的复包络特性，其载频不予考虑（实际中需加调制和正交解调环节），仿真信号与系统模型如图 3。



仿真程序模拟产生理想点目标的回波，并采用频域相关方法（以便利用 FFT）实现脉冲压缩，得到仿真图如下。



对比图 2 与图 4 可以看出，采用脉冲压缩后，在接收机的接收端信噪比有了明显的改善，进而可以在满足分辨率的基础上，提高雷达的作用距离。

## 四. 结语

脉冲压缩技术是大时宽带宽乘积信号经过匹配滤波器实现的，不同的信号形式有不同的压缩性能，其中线性调频脉冲信号的诸多优点使其称为脉冲压缩信号的首选，它也是最早、应用最广泛的脉冲压缩信号。脉冲压缩技术能在雷达发射功率受限的情况下，提高目标的探测距离，并且保持很高的分辨力，是雷达反隐身、多目标分辨、抗干扰的重要手段，在目前的雷达信号系统中有着广泛的应用。

## 参考文献

- [1]丁鹭飞，耿富录·雷达原理（第三版）·西安：西安电子科技大学出版社，2006.
- [2]楼顺天，姚若玉，沈俊霞·MATLAB 程序设计语言·西安：西安电子科技大学西电出版社，2007.
- [3]元春，苏广州，米红·宽带雷达信号产生技术[M]·北京：国防工业出版社，2002.

## 附 录

### 线性调频信号的时域波形和幅频特性的 matlab 仿真程序

```
T=10e-6; %pulse duration 10us
B=30e6; %chirp frequency modulation bandwidth 30MHz
K=B/T; %chirp slope
Fs=2*B;Ts=1/Fs; %sampling frequency and sample spacing
N=T/Ts;
t=linspace(-T/2,T/2,N);
St=exp(j*pi*K*t.^2); %generate chirp signal
subplot(211)
plot(t*1e6,real(St));
xlabel('时间/us');
title('LFM 的时域波形');
grid on;axis tight;
subplot(212)
freq=linspace(-Fs/2,Fs/2,N);
plot(freq*1e-6,fftshift(abs(fft(St))));
xlabel('频率/MHz');
title('LFM 的频域特性');
grid on;axis tight;
```