

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.08.019

两种雷达脉冲压缩信号的性能分析

徐景明, 朱灿焰

(苏州大学 电子信息学院, 江苏 苏州 215006)

摘要: 为提高雷达的抗干扰性能, 介绍了线性调频和混沌二相编码两种脉冲压缩信号的原理, 分析了各自信号特点。在 MATLAB 仿真的基础上, 从 5 个方面分析比较了这两种雷达脉冲压缩信号的性能。仿真结果表明, 这两种脉冲信号都能满足大时宽带宽的要求, 脉压后的信号具有较高的主副瓣之比, 并且具有良好的抗干扰能力。

关键词: 脉冲压缩; 线性调频; 混沌二相编码

中图分类号: TN956 **文献标识码:** A

Analysis of Two Kinds of Radar Pulse Compression Signals

Xu Jingming, Zhu Canyon

(School of Electronic & Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: To enhance performance of radar ECCM, linear frequency modulation (LFM) signal and chaotic binary phase-coded signal are applied widely in pulse compression radar system. The principle and characteristics of these two signals are introduced. The simulation on the Matlab shows that these pulse compression signals feature a high mainlobe-to-sidelobe rate, and have good properties of anti-jamming to radar signal procession.

Keywords: pulse compression; linear frequency modulation; chaotic binary phase-coded signal

0 引言

雷达脉冲压缩信号的提出解决了简单脉冲雷达距离分辨率和速度分辨率不能同时提高的矛盾, 而且在信号峰值功率受限的情况下, 可以通过增加脉冲宽度来增加雷达的作用距离, 提高雷达的抗干扰性能。脉冲压缩就是在雷达发射机中发射时宽较宽、峰值功率较低的脉冲, 通过对载频进行编码以增加发射波形的带宽; 然后在接收机中对回波实施脉冲压缩, 从而达到窄脉冲、高功率的简单脉冲体制雷达所具有的分辨能力和探测性能^[1]。

理论上讲, 实现脉冲压缩需要具备 2 个条件: 一是发射信号具有非线性相位, 其等价条件是信号具有大的时宽带宽积, 使信号存在被“压缩”的可能; 二是接收机中有一个压缩网络, 其相频特性与回波信号实现“相位共轭匹配”。所以一个理想的脉冲压缩系统应该是一个匹配滤波系统^[3]。

脉冲压缩信号按调制规律分主要有线性、非线性调频信号, 相位编码信号和时间频率编码信号。故主要讨论线性调频信号 (LFM) 和相位编码信号中的一种混沌二相编码的雷达脉冲压缩信号。

1 线性调频脉冲压缩

LFM 信号是研究最早、发展最成熟的调制信号, 其载波频率 f 在脉冲宽度 T 内从 f_1 线性变化到 f_2 , 调制频偏 $B = f_2 - f_1$, 调制斜率 $K = B/T$ 。LFM 信号的表达式为^[3]:

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

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

为简便分析, $s(t)$ 的复包络可以表示为:

$$u(t) = \begin{cases} e^{jK\pi t^2}, & |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \tag{2}$$

根据傅立叶变换性质, $s(t)$ 与 $u(t)$ 具有相同的幅频特性。匹配滤波器的时域脉冲响应近似为 $H(t) = u^*(-t)$ 。接收信号具有如下形式:

$$r(t) = \begin{cases} \exp[j2\pi\left(\xi t + \frac{1}{2}Kt^2\right)], & |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \tag{3}$$

收稿日期: 2010-03-04; 修回日期: 2010-04-19

作者简介: 徐景明 (1985-), 男, 江苏人, 从事雷达信号处理研究。

其中, ξ 是多普勒频移。匹配滤波器的输出信号可表示为^[3]:

$$y(t) = \sqrt{KT^2} \frac{\sin 2\pi(\xi + Kt)T/2}{2\pi(\xi + Kt)T/2} \cdot \exp j2\pi(-\frac{1}{2}Kt^2)e^{j\pi/4} \quad (4)$$

由式 (4) 得出: 当 $\xi = 0$ 时, 输出脉冲具有 $\sin c$ 函数型包络。当 $\pi K T t = \pm \frac{\pi}{2}$ 时, $t = \pm \frac{1}{2B}$, 习惯上将此时的脉冲宽度定义为压缩后脉冲宽度 τ :

$$\tau = \frac{1}{2B} \times 2 = \frac{1}{B} \quad (5)$$

LFM 信号压缩前脉冲宽度 T 和压缩后脉冲宽度 τ 之比称为压缩比 D :

$$D = \frac{T}{\tau} = TB \quad (6)$$

2 二相编码脉冲压缩

相位编码信号的相位调制函数是有限个离散值, 通常由伪随机序列构成。相位编码信号是由 n 个相互连接的高频子脉冲组成, 这些子脉冲宽度相等, 频率相同, 如果各自的初相位只取 0 、 π 两个数值, 则称为二相编码信号。二相编码信号表达式为:

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j\phi(t)} e^{j2\pi f_c t} \quad (7)$$

式中, f_c 是载频, $\phi(t)$ 是相位函数, 在 0 、 π 两个值之间变化, 即信号的复包络在 -1 和 1 之间变化。 $s(t)$ 的复包络可表示成以下形式:

$$u(t) = v(t) \otimes \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} c_n \delta(t - n\tau) \quad (8)$$

其中, $v(t)$ 是子脉冲函数, \otimes 表示卷积, τ 是子脉冲宽度, c_n 是编码序列, N 是编码序列长度, 信号时宽 $T = N\tau$ 。可以看出, 二相编码的相位是非线性的, 所以满足脉冲压缩的条件。二相编码信号的频谱可表示成^[3]:

$$U(f) = \sqrt{\frac{\tau}{N}} \sin c(f\tau) e^{-j\pi f\tau} \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{-j2\pi f n\tau} \quad (9)$$

式 (9) 表明二相编码信号的频谱主要取决于子脉冲的频谱, 而且与编码形式有关。计算表明二相

编码信号的带宽 B 与子脉冲带宽相近, 即:

$$B \approx \frac{1}{\tau} = \frac{N}{T} \quad (10)$$

则脉冲压缩比为

$$D = TB = N \quad (11)$$

根据匹配滤波理论可知, 信号通过匹配滤波器的输出信号相当于信号的自相关函数, 而二相编码信号的自相关函数主要取决于所采用的二元序列, 所以二元序列自相关特性越好, 则二相编码信号的自相关性越好。伪随机序列的非周期自相关函数为:

$$\chi(m) = \sum_{k=1}^{N-1-m} c_k c_{k+m} \quad (12)$$

巴克序列具有理想的非周期自相关函数, 被称为最佳有限二元序列^[2]。目前能找到的长度只有 2, 3, 4, 5, 7, 11, 13 位这 7 种巴克序列。这在一定程度上限制了巴克码的应用, 根据式 (11) 可知, 二相编码的压缩比等于编码序列的长度, 仅 13 位的编码序列往往不能满足大时宽带宽信号的要求。

混沌序列由确定性系统产生, 却具有类似噪声的随机性, 因而混沌二元序列具有很好的自相关特性, 可以用于雷达信号的相位编码。混沌编码信号类随机性和混沌序列对初值的敏感性, 使得混沌编码调制雷达信号具有极强的保密性, 提高了抗欺骗干扰的能力。

由于混沌序列对初值非常敏感, 可通过改变初值或者混沌控制参数来获得不同的混沌序列, 因此混沌二相码的编码形式很多。另外, 可通过挑选最大主副瓣比的方法挑选出压缩性能较好的二相码。根据文献[4]的统计可知, 混沌二相码的码长对最大主副瓣的比值起着决定作用, 受初值影响较小。

3 仿真分析及比较

实验参数说明:

线性调频 (LFM) 信号, 带宽 $B = 20$ MHz, 时宽 $T = 20$ μ s, $BT = 400 \gg 1$, 符合脉冲压缩条件, 信号采样频率 200 MHz。

一维混沌序列基于 Full Logistic 映射产生, 其公式为:

$$y_{n+1} = 1 - ay_n^2 \quad (13)$$

式中, $a \in [0, 2]$ 是分叉参数, $y_n \in [-1, 1]$ 是序

列值。取任意初始值 $y(0)$ 开始迭代，当 $a = 1.40115518909205\dots$ 以后，周期变得无限长，即可产生混沌序列 $y(i)$ 。根据文献[6]统计结果，初值 $y(0)$ 取 0.93，从 1 000 次迭代以后开始取混沌序列。混沌序列长度 $N = 400$ ，取码元宽度 $\tau = 0.05 \mu\text{s}$ ，时宽 $T = 20 \mu\text{s}$ 。

3.1 脉冲压缩比

对于 LFM 信号，由式 (6) 可得，脉冲压缩比 $D = TB$ ，调整 B 或者 T 即可调整压缩比。当扫频周期 $T = 20 \mu\text{s}$ ，扫频带宽 $B = 20 \text{ MHz}$ 时，压缩比 $D = 26.02 \text{ dB}$ 。

对于混沌二相码，带宽 $B \approx \frac{1}{\tau} = \frac{N}{T}$ ，其脉冲压缩比 $D = 10\lg \frac{T}{\tau} = 10\lg N = 26.02 \text{ dB}$ 。

3.2 距离分辨率

LFM 信号距离分辨率为：

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \tag{14}$$

调整扫频带宽 B 可以改变距离分辨率，容易做到较高的指标。当 $B = 20 \text{ MHz}$ 时，距离分辨率为 7.5 m。而 LFM 雷达体制中，对带宽 B 做一定调整相对容易。

对于混沌二相编码信号，有：

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} \tag{15}$$

式 (15) 说明，二相编码距离分辨率取决于码元宽度 τ ，而 $\tau = \frac{T}{N}$ ，对于混沌序列， N 越大，则分辨率越高。所以混沌二相编码克服了巴克序列的长度限制，提高了距离分辨率。仿真时，码元宽度 $\tau = 0.05 \mu\text{s}$ ，序列长度 $N = 400$ ，则时宽 $T = 20 \mu\text{s}$ ，距离分辨率达 7.5 m。

3.3 距离旁瓣

LFM 信号，当 $\xi = 0$ 时，脉冲压缩结果如图 1，输出脉冲包络近似为 $\text{sinc}(x)$ 形状， -4 dB 带宽（压缩后主瓣宽度）约为 $1/B$ ，最大的第一旁瓣电平为 -13.35 dB 。说明在多目标环境中，旁瓣会淹没附近比较小的目标。为提高分辨能力，常用加权窗函数

对距离旁瓣进行抑制，仿真使用了汉明 (Hamming) 窗加权，如图 2。加窗后，最大旁瓣减小到了 -42.47 dB ，旁瓣得到了明显的抑制；但是其主瓣宽度 (-4 dB) 约为汉明加权前的 1.47 倍，降低了距离分辨率；而且峰值信噪比增益损失了约 1.34 dB。

混沌二相编码信号，脉冲压缩输出如图 3。在未进行加权之前，最大距离旁瓣只有 -20.02 dB 。根据二相编码的特性，随着编码序列 N 的增长，主旁瓣比会相应增加，如果混沌二元序列足够长，总能满足主旁瓣比的要求。另外，采用最优峰值旁瓣电平失配滤波后，仿真见图 4，旁瓣得到了明显抑制，主副比增大，最大旁瓣电平 -31.25 dB 。

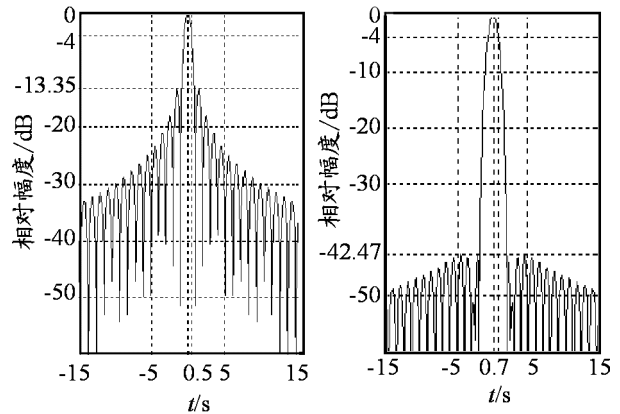


图 1 LFM 信号脉冲压缩 图 2 汉明加权后 LFM 脉冲

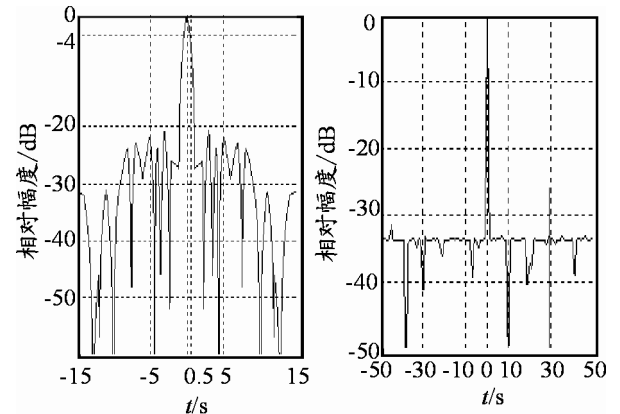


图 3 混沌二相编码脉冲 图 4 混沌二相编码加权后脉冲

3.4 多普勒 (Doppler) 频移敏感性

LFM 信号还有个优点，匹配滤波器对回波信号因目标运动而引起的多普勒频移不敏感，如图 5。图 5 中的虚线部分是多普勒频移 $f_d = 0.04 * B$ 条件下的脉冲压缩结果，可以看出：输出的 sinc 包络产

生耦合时移, 带来距离误差; 输出旁瓣升高 (升高至 -39 dB), 且两边的旁瓣不对称。

在进行多普勒补偿之后 (图 5 中实线部分), 耦合时移, 以及主瓣展宽, 副瓣升高的现象基本消失。

混沌二相编码信号, 具有相位编码存在的多普勒频移敏感的特性。在回波信号具有多普勒频移 $f_d = 0.04 * B$ 时, 滤波器起不了压缩作用, 故而只能用于多普勒变化较窄的场合。图 6 是对回波信号进行多普勒补偿后的仿真结果。所以通过对混沌二相编码回波信号进行多普勒补偿以后, 同样能完成脉冲压缩。

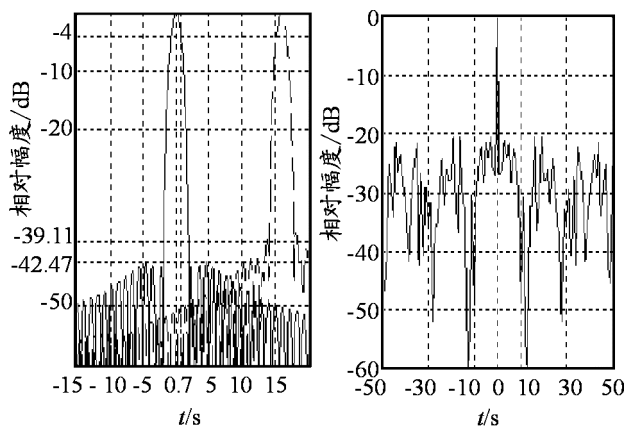


图 5 LFM 多普勒补偿后脉压结果

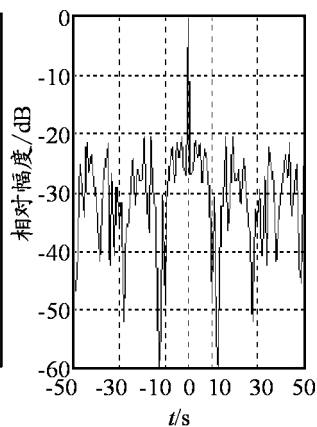


图 6 混沌编码信号多普勒补偿后结果

3.5 抗干扰性能分析

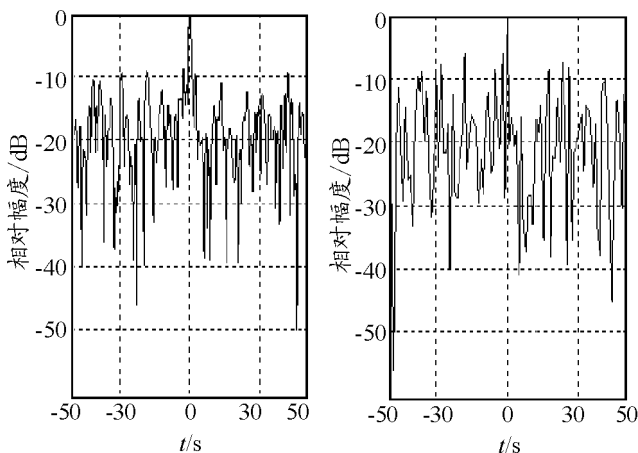


图 7 白噪声干扰下 LFM 信号脉压结果

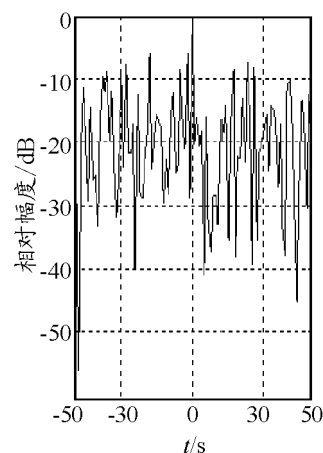


图 8 白噪声干扰下混沌二相编码脉压结果

在实际工作中, 雷达信号处理在任何情况下都存在干扰, 如随机噪声, 高斯白噪声等。实验仿真

干扰为高斯白噪声, 信噪比 $SNR = -20\text{ dB}$ 。图 7 为高斯白噪声对汉明加权后的 LFM 信号脉压结果所造成的干扰; 图 8 为混沌二相编码信号在白噪声干扰下的脉压结果。可以看出, LFM 信号和混沌二相编码信号的均有不错的抗干扰性能。

4 结论

通过分析比较, 可以得出: 2 种脉压信号均能满足大时宽带宽的要求, LFM 信号可以通过增加信号带宽, 混沌二相编码信号可以通过增加码元长度来满足所需的压缩比, 同时又提高了距离分辨能力。2 种信号的脉压结果均存在一定的距离旁瓣, 可通过加权的方法来抑制旁瓣。另外, 混沌二相编码信号具有多普勒频移敏感的特点, 但其容易数字化, 且编码形式多样, 具有非周期性, 敌方很难识别信号参数, 从而提高雷达的抗干扰性能。但随着技术的发展, 可采用多普勒补偿、多普勒预处理等技术, 有效地解决多普勒频移敏感问题。

参考文献:

- [1] Salemian, S.; Keivani, H.; Mahdiyar, O. Comparison of radar pulse compression techniques, 2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications[C], 2005, Volume 2:1076 - 1079.
- [2] Darwich T and Cavanaugh C. Amplitude Shifting for Sidelobes Cancellation Pulse Compression, 2006.CIE '06. International Conference on Radar[C], 2006, 16-19 Oct.:1-4.
- [3] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [4] 林云生, 武文, 王晓军, 等. 一类混沌二相编码脉冲压缩的性能分析[J], 系统工程与电子技术, 2003, 25(4): 489-491.
- [5] Blunt, S.D.; Gerlach, K. Adaptive pulse compression repair processing, 2005 IEEE International Radar Conference[C] 2005 9-12 May: 519-523.
- [6] 李江, 武文, 徐生求. 三类混沌二相码性能分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2006(6): 527-531.
- [7] 王伟, 朱道光, 黄金杰. 基于改进进化规划的 RBF 网络二相编码旁瓣优化[J]. 兵工自动化, 2002, 21(5): 15-18.
- [8] 向敬成, 张明友. 雷达系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [9] 艾名舜, 马红光, 王令欢. 混沌二相编码的雷达脉冲压缩信号[J]. 火控雷达技术, 2007, 3(36): 26-29.
- [10] 马晓岩. 雷达信号处理[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1979.