

欠采样对LFM脉冲压缩的影响

李 崑, 陈祝明, 江朝抒

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】研究了对LFM信号进行正交I/Q采样时,采样率对脉冲压缩处理的影响。理论分析证明:在欠采样情况下,脉冲压缩后会出现成对回波,因而系统的多目标分辨能力受到影响;由于信号带宽的损失,脉压输出回波信号的主瓣展宽,距离分辨力下降;另外,主瓣幅度或相位还会受到调制。最后给出了仿真的结果。

关键词 欠采样; 成对回波; 线性调频; 脉冲压缩

中图分类号 TN958.3 文献标识码 A

Effects of Under-Sampling on LFM Pulse Compression

LI Wei, CHEN Zhu-ming, JIANG Chao-shu

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract This paper discusses the effects of sampling rate on LFM pulse compression when LFM I/Q Quadrature signals are sampled. The theoretical analysis has proved that in the condition of under-sampling, because the paired echoes will be appeared, the system's multi-object resolution will be affected. In the other hand, after pulse compression processing, the output signal's main lobe will be extended and its amplitude or phase will be modulated, and the range resolution will descend too. Finally, some simulation results have been displayed.

Key words under-sampling; paired echoes; LFM; pulse compression

脉冲压缩是现代雷达中广泛使用的一种雷达体制,采用宽脉冲发射,窄脉冲接收,能很好地解决作用距离和距离分辨能力之间的矛盾,其中线性调频(LFM)是脉冲压缩雷达常用的一种信号调制形式^[1]。随着现代大规模集成电路技术和数字信号处理技术的发展,LFM信号广泛应用数字化的方法实现时域或频域脉冲压缩。首先雷达接收机对接收的中频信号进行正交解调得到I、Q信号,然后对I、Q信号采用正交双通道A/D采样、匹配滤波、加窗等一系列处理^[2-3]。根据奈奎斯特采样定律和频域脉压理论,在进行A/D采样时,采样率不应小于信号带宽(对复信号而言),才能对接收到的LFM信号进行正确的脉冲压缩。目前,在发射端很容易获得数百兆的LFM信号带宽,接收端由于A/D器件的限制,其采样率往往不能满足发射信号带宽的要求。因此,研究欠采样对LFM脉冲压缩的影响对其工程实现具有一定的指导意义。

1 LFM脉冲压缩数字处理

一种典型的数字脉冲压缩系统的结构如图1所示。

本文假设:LFM信号角带宽为 $\omega_B = 2\pi B$,LFM信号时宽为 T_B ,I、Q通道的角采样率为 ω_s 。通过对LFM信号进行频谱分析可知^[4],在脉冲压缩比很大(>100)的情况下,信号的能量基本上集中在调制带宽内。发射信号 $S_0(t)$ 的频谱可表示为:

收稿日期:2004-07-15

作者简介:李 崑(1979-),男,硕士生,主要从事雷达信号处理方面的研究。

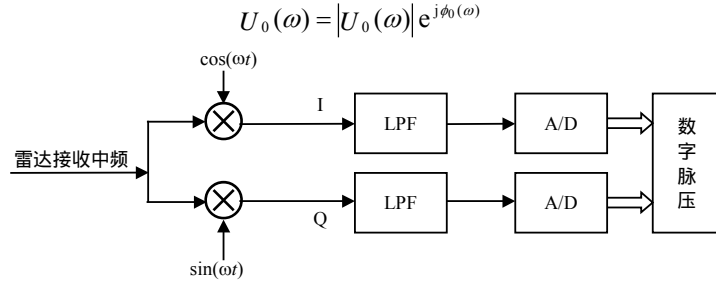


图1 数字脉冲压缩的系统结构

式中 $|U_0(\omega)|$ 为信号的幅频特性, 可近似表示为:

$$|U_0(\omega)| = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \frac{\omega_B}{2} \\ 0, & |\omega| > \frac{\omega_B}{2} \end{cases} \quad (2)$$

$\phi_0(\omega)$ 为信号的相频特性, 可近似表示为:

$$\phi_0(\omega) = \frac{-\omega^2}{2\mu} + \frac{\pi}{4}; \quad |\omega| \leq \frac{\omega_B}{2} \quad (3)$$

目标为单一点目标时, 接收信号 $S_r(t) = S_0(t - \tau)$ 的频谱可表示为:

$$U_r(\omega) = U_0(\omega) e^{-j\omega\tau} \quad (4)$$

式中 τ 为接收信号相对于发射信号的时延。

当系统以角采样率 ω_s 对接收到的 LFM 信号进行正交采样时, 所得采样信号的频谱为:

$$U_r'(\omega) = \sum_m U_r(\omega - m\omega_s) = \sum_m |U_0(\omega - m\omega_s)| e^{j\phi_0(\omega - m\omega_s)} e^{-j(\omega - m\omega_s)\tau} \quad (5)$$

当系统以角采样率 ω_s 对匹配滤波器的系统函数进行采样时, 所得匹配滤波器的频谱为

$$U_{\text{匹}}(\omega) = \left[\sum_m U_0(\omega - m\omega_s) \right]^* = \sum_m |U_0(\omega - m\omega_s)| e^{-j\phi_0(\omega - m\omega_s)} \quad (6)$$

则脉冲压缩后输出信号的频谱表示为:

$$U_{\text{out}}(\omega) = U_r'(\omega) U_{\text{匹}}(\omega) = \sum_m |U_0(\omega - m\omega_s)| e^{j\phi_0(\omega - m\omega_s)} e^{-j(\omega - m\omega_s)\tau} \sum_m |U_0(\omega - m\omega_s)| e^{-j\phi_0(\omega - m\omega_s)} \quad (7)$$

脉压输出信号的频谱如图2所示。

从图2可以看出, 在采样率 ω_s 不小于 LFM 信号带宽 ω_B 的时候, LFM 信号频谱和匹配滤波器频谱在带内 (ω_s 内) 均无混迭, 因此经匹配滤波后的信号频谱也无混迭, 所以能获得理想的脉压结果 $S_{\text{out}}(t)$, 如式(8)所示。但在欠采样时脉压输出将会产生混叠, 从而影响脉压的效果。

$$S_{\text{out}}(t) = \frac{\omega_B}{2\pi} \text{sinc} \left[\frac{\omega_B(t - \tau)}{2} \right] \quad (8)$$

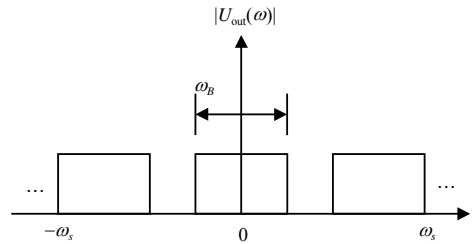


图2 脉压输出信号频谱

2 欠采样对 LFM 的影响

首先假设欠采样为浅度欠采样, (即 $\omega_s > \omega_B / 2$), 则可以只分析 $m=0, \pm 1$ 的情况(这是合理的), 则欠采样时信号经匹配滤波后的频谱 $U'_{\text{out}}(\omega)$ 为:

$$\begin{aligned} U'_{\text{out}}(\omega) &= U_r'(\omega) U_{\text{匹}}(\omega) = \sum_m |U_0(\omega - m\omega_s)| e^{j\phi_0(\omega - m\omega_s)} e^{-j(\omega - m\omega_s)\tau} \sum_m |U_0(\omega - m\omega_s)| e^{-j\phi_0(\omega - m\omega_s)} = \\ &|U_0(\omega)|^2 e^{-j\omega\tau} + |U_0(\omega - \omega_s)|^2 e^{-j(\omega - \omega_s)\tau} + |U_0(\omega + \omega_s)|^2 e^{-j(\omega + \omega_s)\tau} + \\ &|U_0(\omega)| |U_0(\omega - \omega_s)| e^{j[\phi_0(\omega - \omega_s) - \phi_0(\omega)]} e^{-j(\omega - \omega_s)\tau} + |U_0(\omega)| |U_0(\omega - \omega_s)| e^{j[\phi_0(\omega) - \phi_0(\omega - \omega_s)]} e^{-j\omega\tau} + \\ &|U_0(\omega)| |U_0(\omega + \omega_s)| e^{j[\phi_0(\omega + \omega_s) - \phi_0(\omega)]} e^{-j(\omega + \omega_s)\tau} + |U_0(\omega)| |U_0(\omega + \omega_s)| e^{j[\phi_0(\omega) - \phi_0(\omega + \omega_s)]} e^{-j\omega\tau} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 第1项 ω 的取值范围为: $-\omega_s/2 \leq \omega \leq \omega_s/2$; 第2、4、5项 ω 的取值范围为: $\omega_s - (\omega_B/2) \leq \omega \leq \omega_s/2$; 第3、6、7项 ω 的取值范围为: $-\omega_s/2 \leq \omega \leq -\omega_s + (\omega_B/2)$ 。令 $U'_{\text{out}}(\omega)$ 对应的时域表达式为 $S'_{\text{out}}(t)$, 则脉压输出为

$$S'_{\text{out}}(t) = \frac{\omega_s}{2\pi} \text{sinc}\left[\frac{\omega_s(t-\tau)}{2}\right] + \frac{K\omega_B}{2\pi} \text{sinc}\left[\frac{K\omega_B(t-\tau)}{2}\right] e^{j\omega_s\tau} e^{j\Delta(t-\tau)} + \frac{K\omega_B}{2\pi} \text{sinc}\left[\frac{K\omega_B(t-\tau + \frac{\omega_s}{\mu})}{2}\right] (1 + e^{j\omega_s\tau}) e^{-j\frac{\omega_s^2}{2\mu}} e^{j\Delta(t-\tau + \frac{\omega_s}{\mu})} + \frac{K\omega_B}{2\pi} \text{sinc}\left[\frac{K\omega_B(t-\tau - \frac{\omega_s}{\mu})}{2}\right] (1 + e^{-j\omega_s\tau}) e^{j\frac{\omega_s^2}{2\mu}} e^{j\Delta(t-\tau - \frac{\omega_s}{\mu})} \quad (10)$$

式中 频谱混迭比 $K = 1 - (\omega_s/\omega_B)$; $\Delta = (3\omega_s/4) - (\omega_B/4)$; $\text{sinc}(t)$ 表示辛克函数。

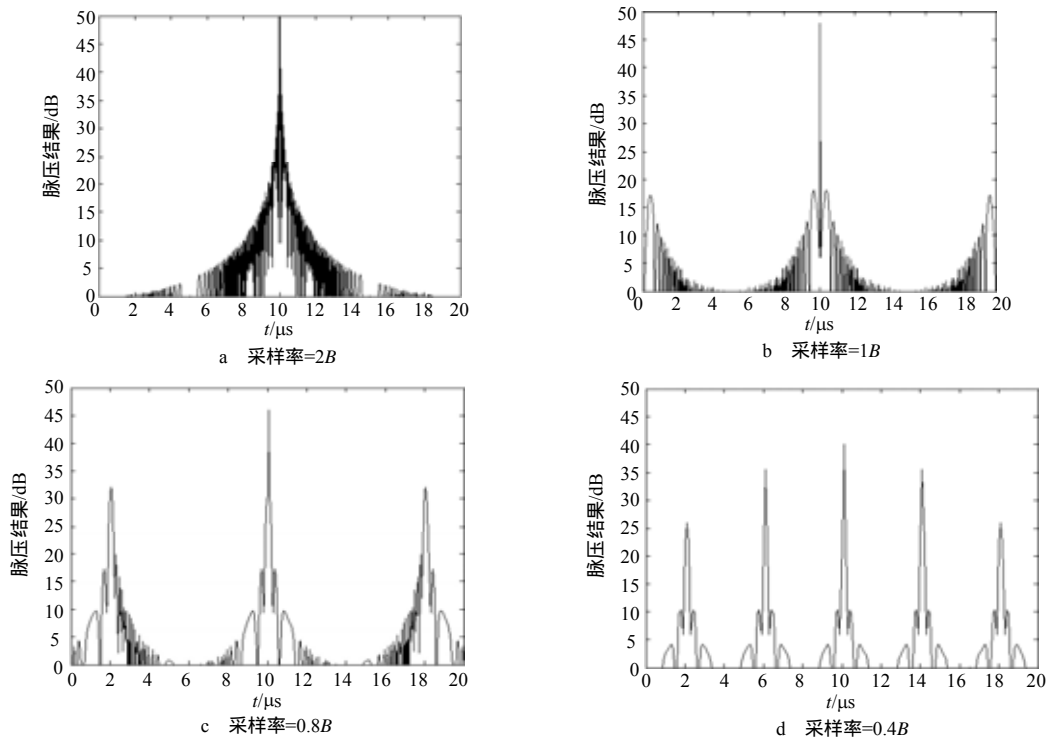


图3 几种采样率下的脉冲压缩结果

对比式(8)和式(10)可以看出, LFM信号在欠采样条件下的脉压输出不仅在时间 $t = \tau$ 的地方出现回波信号, 而且在 $t = \tau \pm (\omega_s/\mu)$ 的地方出现成对回波^[4]。通过对式(10)进行分析, 可以得出如下5个结论:

- (1) 欠采样时, 脉压输出的各信号都具有辛克函数的形式, 但幅度或相位要受到调制;
- (2) 欠采样时, 在回波两侧 ω_s/μ 处出现虚假的成对回波; 而且可以推断, 随着采样率进一步降低(即由浅度欠采样变为深度欠采样), 成对回波的数目还会增加, 且出现在回波两侧 $N\omega_s/\mu$ 处(N 为正整数);
- (3) 欠采样时, 由于信号带宽损失, 脉压输出回波信号的主瓣展宽, 距离分辨率下降;
- (4) 欠采样时, 由于成对回波的出现, 系统的多目标分辨能力受到影响;
- (5) 由于LFM信号频谱实际上并非理想的矩形特性, 而是具有一个过渡带(压缩比越大, 过渡带越窄), 所以从理论上来说, 等采样时也会出现成对回波, 但其幅度很小。只要能够保证一定的压缩比, 那么, 兼顾工程实现的难度(主要指A/D器件), 可以使用等采样进行处理。

(下转第675页)

表1 小波网络对测试样本分类识别情况表

| 项目 | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | T8 | T9 | T10 | T11 | T12 | 结果 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| P1 | 9.6 | 9.3 | 9.2 | 8.5 | 8.8 | 9.1 | 8.9 | 8.4 | 9.6 | 9.3 | 9.2 | 8.5 | 优 |
| P2 | 9.2 | 8.4 | 8.5 | 9.2 | 8.1 | 7.6 | 7.5 | 8.9 | 7.4 | 7.1 | 8.5 | 8.2 | 良 |
| P3 | 8.8 | 8.2 | 7.4 | 9.2 | 7.9 | 7.2 | 7.1 | 8.8 | 8.2 | 8.3 | 8.0 | 7.8 | 良 |
| P4 | 8.4 | 7.3 | 7.8 | 6.7 | 6.4 | 7.1 | 7.3 | 8.2 | 8.4 | 7.6 | 7.0 | 6.5 | 中 |
| P5 | 8.7 | 8.2 | 7.9 | 9.2 | 8.1 | 8.6 | 8.3 | 7.5 | 9.1 | 8.5 | 8.1 | 8.2 | 良 |

3 结束语

利用小波神经网络对信息系统进行综合评判,在很大程度上消除了人为因素的影响,能把影响信息系统的各种因素进行综合考虑,并能够充分利用历史有关信息系统特征参数的统计数据信息,通过高度的非线性映射,寻求信息系统的综合评价与其影响特征因素之间的隐含的内在机理,增强了所得数据的客观性,从而给出具体的综合评价结果,可为进一步的信息系统的开发与管理提供重要的科学依据。本文所采用的评判方法符合人脑的逻辑思维规律,保证了信息系统测评的合理性、科学性,操作起来比较容易。

参 考 文 献

- [1] 刘卫国. 一种信息系统的评价模型及其实现[J]. 计算机应用, 2003, 23(1):33-35
- [2] 陈义安. 基于小波网络的高新技术产业内在价值的评估模型[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(8): 1 200-1 204
- [3] 张新红. 基于小波网络的干旱程度评估方法[J]. 运筹与管理, 2001, 10(4): 91-95
- [4] 焦李成. 神经网络的应用与实现[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1996

编 辑 熊思亮

(上接第602页)

3 仿真与结论

图3给出了4种使用不同角采样率 ω_s 所得到的仿真结果(假设 $\tau = 10\mu\text{s}$, $T_b = 10\mu\text{s}$)。

从图3中可以看出,在回波($\tau = 10\mu\text{s}$ 处)两侧 $N\omega_s / \mu$ 处,确实出现了成对回波,并且随着采样率的进一步降低,成对回波数目成对增加。

以上的分析都是在脉冲压缩比很大的情况下得到的。如果脉冲压缩比较小,那么LFM信号频谱的矩形特性就会变得很差,脉冲压缩的性能会进一步降低。

参 考 文 献

- [1] 向敬成, 张明友. 雷达系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001
- [2] 张云华, 姜景山, 张鸿远, 等. IQ幅度和相位不平衡对脉冲压缩的影响及其矫正方法[J]. 遥感技术与应用, 2000, 15(2): 79-82
- [3] 张群英, 杨学贤, 何佩琨, 等. AD量化误差对脉冲压缩结果的影响[J]. 现代雷达, 2000, 22(2): 63-68
- [4] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984

编 辑 徐安玉