

# 多采样率超声数字信号处理方法的研究与应用

孙志林<sup>1</sup>, 包亚萍<sup>1</sup>, 石峥映<sup>2</sup>, 梅劲松<sup>3</sup>

(1 南京工业大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210009; 2 南京拓控信息科技有限公司, 江苏 南京 210019  
3 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

[摘要] 在铁路车轮(机车、车辆、动车组等走行部车轮)通过式压电超声波在线探伤中,由于在线检测车轮数量多,硬件采样频率高,因而超声回波数据量很大,数据传输与分析处理时间较长.为提高数据处理效率,有必要对超声信号进行采样率转换以改变原始数据量;本文从超声检测信号的特点出发,研究了超声数字信号的抽取与插值算法并在 CPLD 上实现了采样率转换,降低了数据冗余,提高了系统处理效率,在实际应用中验证了该方法的有效性和可靠性.

[关键词] 多采样率, 超声检测, 抽取, 插值

[中图分类号] TN 911.72 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2008)04-0163-04

## Research and Application of Multi-Sampling Rate of Ultrasonic Digital Signal Processing

Sun Zhilin<sup>1</sup>, Bao Yaping<sup>1</sup>, Shi Zhengying<sup>2</sup>, Mei Jinsong<sup>3</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China

2. Nanjing Tycho Information Technology Co., Ltd., Nanjing 210019, China

3. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract** In the piezoelectricity ultrasonic on-line testing for railway wheels (included wheels of locomotive, vehicle, multiple unit trains, etc.), the amount of acquired ultrasonic data can be very large and the time of transmit and process can be long because of the large number of wheels and the high hardware sample rate for on-line testing. So in order to promote the efficiency, it is necessary to change the sample rate for ultrasonic signal to shift the amount of original data. In this paper, the features of ultrasonic data are mentioned, the digital signal arithmetic of extraction and interpolation are researched and the sample rate change is implemented on the CPLD, the data redundancy are declined and the system process efficiency are enhanced and the applications show that the proposed method has higher validity and reliability.

**Key words** multi-sampling rate, ultrasonic testing, extraction, interpolation

采用数字化方式对超声信号进行处理具有灵活多样和稳定可靠等特点,越来越多的超声无损探伤系统使用数字信号处理方法.在我国铁路不断提速的背景下,为保障安全行车,针对机车、车辆、动车组的车轮辋裂等故障设计了一种在线自动超声波探伤装置,该装置超声波换能器的工作频率为 2.5MHz,硬件采样频率为 100MHz,采用 28 组压电超声波换能器探头阵列,每组纵波双晶探头 10 个,横波单晶探头 2 个,探头布置间距 50mm.纵波探测钢材每  $\mu s$  对应 2.95mm 的声程,每个纵波双晶探头采样声程 90mm,一次采集数据量 3 050 字节,横波探测钢材每  $\mu s$  对应 1.615mm 的声程,每个横波单晶探头采样声程 700mm,一次采集数据量 43 300 字节.整个装置采集一次数据量为 3 050 字节  $\times 10 \times 28 + 43 300$  字节  $\times 2 \times 28$ , 共为 2.4M 原始数据量.在车轮通过式动态探伤中,为实现缺陷波信号的重复性,实际采集 3 次,以 12 轴重联机车为例,进行一次探伤作业的超声信号数据量为  $2.4M \times 3 \times 12 = 86.4M$ ,可见,数据量较大;本装置数据传输与分析处理的时间约为 300s,远不能满足装置探伤对实时性的要求.如何改进数据处理方法,实现在不丢失缺陷信息的情况下对数据进行抽取与插值,即实现系统工作在“多采样频率”状态,是动态在

收稿日期: 2008-06-18

通讯联系人: 包亚萍,副教授,研究方向: 信号处理. E-mail: ngdlby@163.com

线探伤中亟待解决的问题.

## 1 多采样率数字信号处理原理

在信号处理各种方法中, 通常采样频率  $f_s$  都是固定不变的, 即数字系统中只有一个采样频率. 但实际中, 经常会遇到频率转换问题, 要求系统工作在“多采样频率”状态. 例如, 当要求处理的信号所含频率分量变大时, 则应相应加大采样频率, 满足采样定律; 当要求处理的信号所含频率分量变小时, 采样频率也应该相应变小, 从而降低数据冗余, 提高系统的处理效率. 近年来, 建立在采样频率转换基础上的“多采样率数字信号处理”已经成为数字信号处理学科中的主要内容之一. 本文所述超声波回波信号具有 2 个重要特点: 相近性: 不同位置的回波信号波形相近; 相关性: 对同一装置和同一对象, 超声回波信号随界面距离的改变只有强弱的变化, 而波形变化不大, 换句话说, 回波信号之间是密切相关的. 利用多采样率数字信号处理方法对超声信号进行抽取以实现数据压缩, 降低冗余数据, 将不会影响超声信号的上述特点, 可以实现缺陷信号的有效检出.

## 2 信号的抽取与插值

### 2.1 整数倍抽取

设  $x(n_1, t_1)$  是连续信号  $x_a(t)$  的采样序列,  $T_1$  是采样间隔, 单位是 s 即  $x(n_1, t_1) = x(n_1 T_1)$ . 如果希望将采样频率降低到原来的  $1/M$ , 最简单的方法是对  $x(n_1 T_1)$  每隔  $M$  点抽取 1 点, 抽取的点依次组成新序列  $y(n_2 T_2)$ , 其间隔为  $T_2$ , 与  $T_1$  的关系为  $T_2 = MT_1$ . 图 1 说明了信号抽取的过程.

信号抽取对信号的频域特性有什么影响呢? 下面将在频域中进行一定的分析. 抽取后信号  $y(n_2 T_2)$  的傅立叶变换如下式所示:

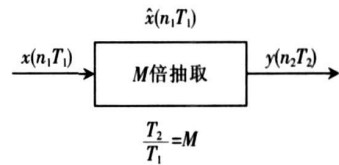


图 1 信号抽取示意图  
Fig.1 Sketch map of signal extraction

$$Y(e^{j\omega_2}) = \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} y(n_2 T_2) e^{-j\omega_2 n_2} = \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} y(n_2 M T_1) e^{-j\omega_2 n_2} = \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} y(n_2 M T_1) e^{-j\omega_1 M n_2},$$

若  $n_2 M = n_1$ , 则  $y(n_2 M T_1) = \hat{x}(n_1 T_1)$ , 当  $n_2 M \neq n_1$  时,  $\hat{x}(n_1 T_1) = 0$  有

$$Y(e^{j\omega_2}) = \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \hat{x}(n_1 T_1) e^{j\omega_1 n_1} = \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \left[ \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \hat{x}(n_1 T_1) e^{j\frac{2\pi}{M} k n_1} \right] e^{-j\omega_1 n_1} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X(e^{j\omega_1 - j\frac{2\pi}{M} k}),$$

变换到  $Z$  域, 则有

$$Y(z) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X(z^{1/M} W^k).$$

可以看出,  $Y(e^{j\omega_2})$  就是  $X(e^{j\omega_1})$  的  $M$  个平移样本之和. 相邻的平移样本在频率上相差  $2\pi/M$ , 而在模拟频率轴上相差  $2\pi/M T_1$ . 如果  $M$  较大, 会造成抽取后的频谱混叠, 造成信号失真, 需加抗混叠滤波.

### 2.2 整数倍插值

如果希望将系统的采样率加大到  $L$  倍, 得到  $y(n)$ , 则  $y(n)$  就是对  $x(n)$  的插值. 实现插值的最简单方法就是在  $x(n)$  每相邻的两个点补  $L-1$  个零, 再通过低通滤波器, 即可得到  $y(n)$ , 其过程如图 2 所示.

下面对内插器的输入、输出关系进行说明.

由图 2 可知  $y(n_2 T_2) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} v(m T_2) h(n_2 T_2 - m T_2)$ ,

其中,  $v(m T_2) = \begin{cases} x\left(\frac{m}{L} T_1\right) = x(n_1 T_1), & m = n_1 L, T_1 = L T_2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$

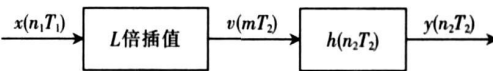


图 2 信号插值示意图  
Fig.2 Sketch map of signal interpolation

所以有  $y(n_2T_2) = \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} x(n_1T_1)h(n_2T_2 - n_1T_1)$ .

这就是内插器的时域输出. 在频域内, 对上式作  $Z$  变换, 有

$$Y(z) = V(z)H(z),$$

$$V(z) = \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} v(n_2T_2)z^{-n_2} = \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} x\left(\frac{n_2}{L}T_1\right)z^{-n_2} = \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} x(n_1T_1)z^{-Ln_1} = X\left(\frac{z}{L}\right).$$

所以  $Y(z) = X\left(\frac{z}{L}\right)H(z)$ , 插值前后的幅频特性相同, 但与  $Y(e^{j\omega_2})$  相比, 在频域内原来的一个周期变成了  $L$  个周期, 多余的  $L-1$  个周期成为镜像. 若想恢复  $Y(e^{j\omega_2})$ , 只需用低通  $FIR$  滤波器将这些镜像滤除即可.

### 2.3 非整数倍采样率转换

当然, 在实际应用中, 信号的抽取和插值并非都是整数倍的改变采样率, 有时也需要对采样频率作非整数倍变换. 此时, 可以将信号的整数倍抽取和插值结合起来, 实现信号的非整数倍变换. 例如, 需要对信号  $x(n)$  的采样频率作  $LM$  倍变换, 可以先对信号作  $L$  倍插值, 再作  $M$  倍抽取, 也可以先  $M$  倍抽取, 再作  $L$  倍插值即可.

### 2.4 多采样率转换的优缺点

采样频率的转换可直接在数字域上实现. 采样定理依然是信号抽取后不产生失真的基本保证. 通过分析抽取和插值前后, 信号在时域和频域上的关系, 给出了多采样率系统的有效实现方法. 从该方法的原理可以看出, 在满足采样定律的前提下采用多采样率数字信号处理方法可以实现原始数据量的改变, 但由于抽取与插值后的数据经过抗混叠滤波和去镜像滤波, 致使信号幅度有所损失.

## 3 超声数据采样率转换实例

文中介绍的自动探伤装置采用  $2.5\text{MHz}$  换能器, 硬件采样频率为  $100\text{MHz}$ , 在满足采样定律的前提下采用基于 CPLD 的数据抽取与插值算法的多采样率数字信号处理方法, 将采样率依次降为  $50\text{MHz}$  和  $20\text{MHz}$  即对原始数据进行 2 倍和 5 倍抽取, 数据量为原来的  $1/2$  和  $1/5$ . 观察该数据对缺陷的定位、定性分析与定量测量的影响.

如图 3 所示 3 000 点超声波原始射频信号及抽取后的 1 500 点和 600 点射频信号, 可以看出, 经过采样率转换, 缺陷回波信号的相对位置和原始位置是一致的, 可以实现缺陷的定位; 其缺陷回波信号幅度有一定的损失, 不影响定性分析与定量测量.

## 4 结语

抽取与插值算法虽然简单, 但要在 CPLD 上实现对  $100\text{MHz/s}$  数据的无丢失实时压缩, 对逻辑的设计要求非常严格. 经过反复仿真和物理验证, 结合逻辑设计中同步技术、冒险和竞争的消除、流水线技术, 最终在 CPLD 上设计的电路实现了数据的压缩和抽取, 满足了系统设计的要求. 本文研究的基于 CPLD 的数据抽取与插值算法的多采样率数字信号处理方法已应用在铁路

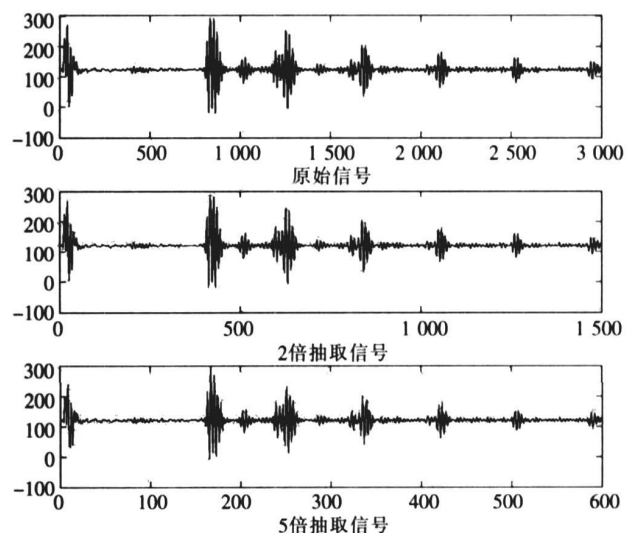


图 3 原始及抽取信号

Fig.3 Original signal and extraction

车轮在线探伤中, 经系统运行和测试表明, 这种数据处理方法合理可行, 能够有效的去除数据冗余度, 提高系统的处理效率 (提高 5 倍), 实现不失真检波, 满足自动化探伤中的灵敏度和实时性. 另外, 利用上位 PC 机强大的处理能力和丰富的资源, 采用不同的现代数字信号处理技术如小波分析、自适应滤波等方法完成对缺陷信号的后续处理, 可进一步提高超声检测技术中缺陷定性、定量识别的可靠性和客观性.

[参考文献] (References)

[ 1 ] 罗军辉, 罗勇江, 白义臣, 等. Matlab7. 0 在数字信号处理中的应用 [ M ]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 121-129.  
Luo Junhui, Luo Yongjiang, Bai Yicheng, et al. The Application of Matlab7. 0 in the Digital Signal Processing [ M ]. Beijing: China Machine Press, 2005. 121-129. ( in Chinese )

[ 2 ] 张贤达. 现代信号处理 [ M ]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
Zhang Xianda. Modern Signal Processing [ M ]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. ( in Chinese )

[ 3 ] Xilinx Co. The Programmable Logic Data Book [ Z ]. Xilinx Co. 2006.

[ 4 ] 郭成彬, 蒋危平. 认识数字超声探伤仪 [ J ]. 无损检测, 2004, 26( 3 ): 149-154.  
Guo Chengbin, Jiang Weiping. A acquaintanceship of digital ultrasonic testing instrument [ J ]. Non-destructive Testing, 2004, 26( 3 ): 149-154. ( in Chinese )

[ 5 ] 常晓明. Verilog-HDL 实践与应用系统设计 [ M ]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.  
Chang Xiaoming. Practice and Application System Design of Verilog-HDL [ M ]. Beijing: BUAA Press, 2003. ( in Chinese )

[ 责任编辑: 顾晓天 ]

( 上接第 117 页 )

[ 4 ] 张磊, 林坤辉, 周昌乐, 等. 基于图像内容检索的主题爬虫设计方法 [ J ]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2007, 25( 2 ): 182-185.  
Zhang Lei, Lin Kunhui, Zhou Changle, et al. Design method of theme crawler of content based image retrieval [ J ]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 2007, 25( 2 ): 182-185. ( in Chinese )

[ 5 ] Brin S, Page L. The anatomy of a large-scale hypertextual Web search Engine [ C ]. Proc the 7th World Wide Web Conference [ s n ], 1998. 146-164.

[ 6 ] Lucene [ EB/OL ]. <http://lucene.apache.org/>, 2008. 7. 21.

[ 责任编辑: 孙德泉 ]