

多项滤波器算法在水声信号处理中的研究和仿真

丘彦¹, 刘宇²

(1. 广东湛江 91388 部队, 广东湛江 524022; 2. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

摘要: 主要对多项滤波器算法在水声信号处理中的应用进行了理论分析和算法仿真。为实现抽样率转换而产生的多项滤波器算法, 通过对信号进行抽取和插值相结合的方法来控制信号的抽样率。对抽取-插值滤波器依照减少乘法运算次数的原则进行结构上的简化, 并进行数学推导, 最终得到多项滤波器的结构框图和数学表达式。运用 MATLAB 对多项滤波器算法进行仿真, 并对仿真结果作了理论分析。

关键字: 多项滤波器; 抽样; 插值; 多普勒频移

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-01-0082-03

Research and simulation of polyphase filter arithmetic in water acoustic signal processing

QIU Yan¹, LIU Yu²

(1. Unit 91388, PLA, Zhanjiang 524022, Guangdong, China;

2. Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: This paper mainly processes theory analyzing and arithmetic simulating to polyphase filter arithmetic in water acoustic signal processing. Polyphase filter arithmetic depends on sample and interpolation processing of the signal. Control the sampling frequency of the signal by connecting sample and interpolation. Predigest the configuration of sample-interpolation filter and depend on the principle of reducing multiplication operation, predigesting on configuration and deriving in mathematics, then get the configuration block and the mathematical expression of polyphase filter. Using MATLAB simulate the polyphase filter arithmetic, and theory analyze the simulation result.

Key words: polyphase filter; sample; interpolation; Doppler shift

1 引言

在水声信号处理中, 当声源和接收机处于相对运动状态时, 信号会产生多普勒频移。在模拟一个运动物体时, 其接收信号与回发信号之间存在多普勒频移。对信号进行 A/D 和 D/A 转换时, 如果信号的抽样率相同, 由于回发信号加入了多普勒频移, 对其进行 D/A 转换时就存在一个抽样率转换的问题^[1]。

实现抽样率转换的方法有三个: 一是若原模拟信号 $x(t)$ 可以再生, 或是记录下来, 那么可以重新抽样; 二是将 $x(n)$ 通过 D/A 转换器变成模拟信号 $x(t)$ 后, 对 $x(t)$ 经过 A/D 转换器后再抽样; 三是使用一套算法, 对抽样后的数字信号 $x(n)$ 在“数字域”作抽样率转换, 以得到新的抽样。

方法一要对原模拟信号进行记录或存储, 似乎并不可行, 实际工程当中难以实现; 方法二要重复

通过 A/D 和 D/A 模块, 除了使处理过程变得更加复杂繁琐外, 也会再次带入 A/D 和 D/A 转换时的量化误差; 方法三是通过使用一套算法, 因此在硬件及输入的模拟信号上不会带来任何变化和影响, 更加可行^[2]。

2 多项滤波器算法和结构

多项滤波器算法是基于对信号进行抽取和插值处理基础上的。减少抽样率以去掉多余数据的过程称为信号的抽取; 增加抽样率以增加数据的过程称为信号的插值^[3]。

对给定的信号 $x(n)$, 若希望将抽样率转变 L/M 倍, 可以先将 $x(n)$ 作 M 倍的抽取, 再作 L 倍的插值来实现, 或是先作 L 倍的插值, 再作 M 倍的抽取。一般说来, 抽取使 $x(n)$ 的数据点减少, 会产生信息的丢失, 因此, 合理的方法是先对信号作插值, 然后再抽取。

插值的方法是在 $x(n)$ 每相邻两个点之间补 $L-1$ 个零, 然后再对该信号作低通滤波处理。在对信号的抽样中, 由抽样定理, 在第一次对 $x(t)$ 抽样时,

收稿日期: 2008-12-01; 修回日期: 2009-02-01

作者简介: 丘彦(1981-), 男, 湖南郴州人, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 刘宇, E-mail: ly_bi@163.com

若保证 $f_s \geq 2f_c$ (f_s 为抽样频率, f_c 为信号频率), 那么抽样的结果不会发生混叠。对 $x(n)$ 作 M 倍抽取后得 $x'(n)$, 若保证能由 $x'(n)$ 重建 $x(t)$, 那么, $X'(e^{j\omega})$ 的一个周期 $\left[-\frac{\pi}{M}, \frac{\pi}{M}\right]$ 也应等于 $X(j\Omega)$, 这要求抽样频率 f_s 必须满足 $f_s \geq 2Mf_c$ 。如果不满足, 那么 $X'(e^{j\omega})$ 将发生混叠。因为 M 是可变的, 所以很难要求在不同的 M 下都保证 $f_s \geq 2Mf_c$ 。为此, 要在抽取之前先对 $x(n)$ 作低通滤波, 压缩其频带, 然后再抽取。

如图 1 所示, 图中插值和抽取工作在级联状态。图 1(a)中滤波器 $h_1(n)$ 、 $h_2(n)$ 所处理的信号的抽样率都是 Lf_s , 因此可以将它们合起来变成一个滤波器, 如图 1(b)所示。令:

$$H(e^{j\omega_v}) = \begin{cases} L & 0 \leq |\omega_v| \leq \min\left[\frac{\pi}{L}, \frac{\pi}{M}\right] \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$\omega_v = 2\pi f / f_s = 2\pi f / Lf_s = \omega_x / L$$

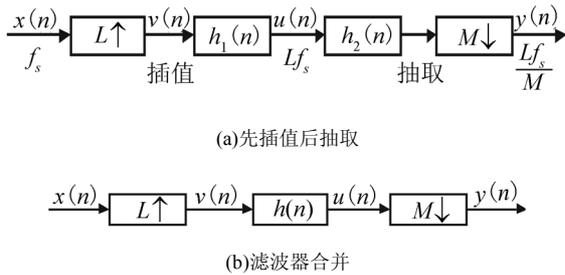


图 1 插值和抽取的级联实现
Fig.1 Interpolate and sample concatenation

由图 1(b)可见, 实现 L/M 倍的抽样率转换需要一个插值器, 一个低通滤波器和一个抽取器。插值器先将 $x(n)$ 每两个点之间插入 $L-1$ 个零, 然后利用低通滤波器滤去在 $\left[-\frac{\pi}{L}, \frac{\pi}{L}\right]$ 以外的由 $X(e^{j\omega})$ 所产生的映像, 最后通过抽取器, 每 M 个点抽取一个, 得到新序列 $y(n)$ 。把插值、滤波及抽取过程结合起来统一考虑, 得到乘法次数为最少的滤波器结构, 如图 2 所示。

经过多项滤波器后输入输出间的关系为:

$$y(m) = \sum_{n=0}^{M-1} h(nL + \langle mM \rangle_L) x\left(\left\lfloor \frac{mM}{L} \right\rfloor - n\right) \quad (2)$$

其中,

$\langle mM \rangle_L$ 表示 mM 对 L 作求余运算;

$\lfloor p \rfloor$ 表示求小于或等于 p 的最大整数;

3 算法仿真

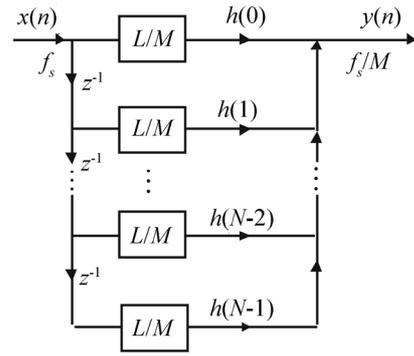


图 2 多相滤波器的结构
Fig.2 Configuration of polyphase filter

根据上面讨论的多相滤波器算法, 用 MATLAB 对多相滤波器进行仿真, 检验其抽样率转换的效果^[4]。

设输入信号为频率 30kHz 的正弦信号, 如图 3 所示, 抽样率为 125kHz, 假设输入信号加入多普勒频移后, 信号频率降低为 29kHz, 同样以 125kHz 的抽样率送出去。这就相当于抽样率从 125kHz 提高为 129.167kHz, 下面就可以通过前面的抽样率转换滤波器对其抽样率进行转换, 以达到输入信号加入多普勒频移后, 以同样的抽样率送出的效果^[5]。

(1) 产生输入信号

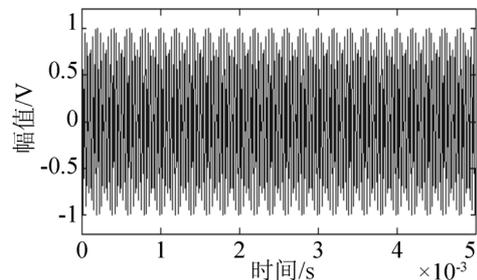


图 3 输入信号
Fig.3 input signal

(2) 计算滤波器系数

由于低通滤波器的幅频特性为一 Sa 函数, 根据这一特点就可以计算出滤波器的系数。首先, 由式(1)可知, 滤波器的截止频率为 $\min\left(\frac{\pi}{M}, \frac{\pi}{L}\right)$, 因为抽样率是提高的, 所以 $L > M$, 因此滤波器的截止频率为 $\frac{\pi}{L}$ 。再通过滤波器系数与 Sa 函数的关系:

$$C_n = \frac{\sin(\omega_c \times n)}{n\pi} \quad (3)$$

就可以求出滤波器的系数。滤波器系数波形如图 4 所示。

(3) 计算抽样率转换后的输出

根据抽样率转换的算法, 由式(2)可计算出抽样率转换后的输出。如图 5 所示。

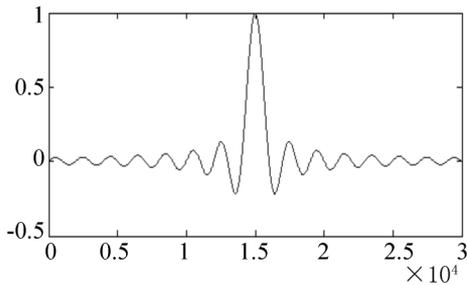


图4 滤波器系数
Fig.4 Filter coefficient

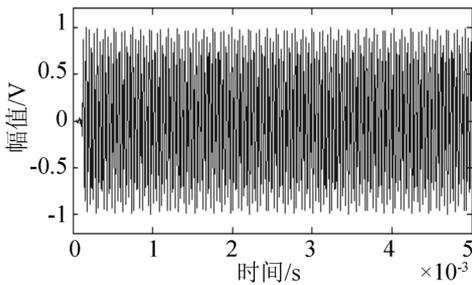


图5 多相滤波器输出信号
Fig.5 Output signal of polyphase filter

(4) 输入信号与输出信号频率变化的验证

对输入输出信号作快速傅立叶变换(FFT),得到它们的频谱曲线,通过对中心频率的比较,进行结果验证,如图6、图7所示。从图7中可以看出,输出信号的主频率为29.036kHz,与理论所要达到的29kHz基本一致。

4 结论

通过对多项滤波器算法的分析,可以看出多项滤波器是基于对信号的抽取和插值变换基础上的。依据抽取和插值对信号抽样率的降低和提高,达到实现改变信号抽样率的目的。

从多项滤波器结构的分析上可以看出,多项滤波器主要包括一个插值器、一个低通滤波器和一个抽取器,如图1(b)所示。经过结构简化、数学推导和化简整理后,多项滤波器转化为如图2所示的结构,从图2可以看到,对输入信号的抽样率为 f_s ,经过多项滤波器后的输出信号抽样率转化为 Lf_s/M ,因此输出信号的抽样率可以由 L/M 的值控制。对多项滤波器的结构进行数学推导化简,最终得出多项滤波器输入输出之间的数学表达式。

在得到多项滤波器算法的数学表达式后,使用MATLAB对算法进行仿真。仿真通过对多项滤波器

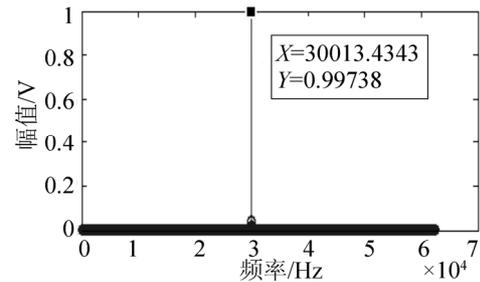


图6 输入信号频谱
Fig.6 Frequency spectrum of input signal

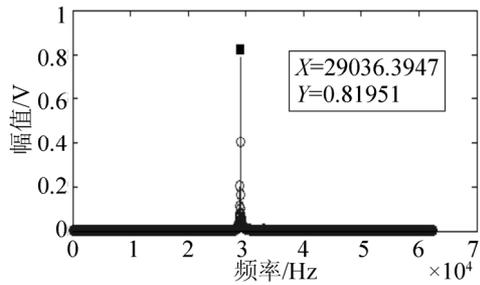


图7 输出信号频谱
Fig.7 Frequency spectrum of output signal

输入信号和输出信号频谱曲线的对比,可以看出在信号通过多项滤波器后,输出信号的频率符合理论分析的结果。这样就用算法实现了通过改变抽样率来达到改变信号频率的效果,也就实现了在回发信号中加入多普勒频移的目的。

参考文献

- [1] 尤立克著,洪申译. 水声原理. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990, 2: 15-25.
Robert J.Urick, Hong Shen, translate. Acoustic Principle[M]. Harbin Ship Engineering College Press, 1990, 2: 15-25.
- [2] 田淳,刘少华. 声学多普勒测流原理及其应用[M]. 黄河水利出版社, 2003, 12: 15-19.
TIAN Zhun, LIU Shaohua. Acoustic doppler flow principle and application[M]. Huang River Conservancy Press. 2003. 12: 15-19.
- [3] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 清华大学出版社, 1997, 8: 281-293.
HU Guangshu. Digital signal processing—theory, algorithm and realization[M]. Tsinghua University Press, 1997. 8: 281-293.
- [4] 王宏. MATLAB6.5 及其在信号处理中的应用[M]. 清华大学出版社, 2004, 10: 77-80.
WANG Hong. MATLAB6.5 and Its application in signal processing[M]. Tsinghua University Press, 2004, 10: 77-80.
- [5] 张明照,刘政波,刘斌,等. 应用 MATLAB 实现信号分析和处理[M]. 科学出版社, 2006, 1: 10-19.
ZANG Zhaoming, LIU Zhengbo, LIU Bin, et al. Application of MATLAB realization of signal analysis and processing[M]. Science Press, 2006, 1: 10-19.
- [6] 杨振江. A/D、D/A 转换器接口技术与实用线路[M]. 电子科技大学出版社, 1996: 33-42.
YANG Zhenjiang. A/D、D/A converter interface technology and utility lines[M]. Electronic Science and Technology University Press, 1996: 33-42.