

剂量电离室数字滤波器设计

赵斌清 殷重先 刘鸣 赵明华

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要: 为满足上海先进质子治疗装置治疗头中剂量电离室电子学 A/D 转换后的数据率和降噪要求, 提出一种多级级联的数字滤波器结构。本文中设计 LMS 自适应滤波器来滤除 50 Hz 的工频噪声, 相比于传统数字陷波器, 不会对有用信号造成损失。通过 MATLAB 软件仿真对信号处理结果表明, 电子学延时减少到 170 μs , 数据率 50 kHz, 基本符合量化后的剂量数据处理要求。

关键词: 电离室电子学; 数字滤波器; 多级级联

中图分类号: TL 82 文献标志码: A 文章编号: 0258-0934(2016)1-0026-04

在上海先进质子治疗装置剂量电离室测量仪器中, 为降低数据率和延迟时间、提高信噪比, 电子学主要技术路线采用 I/V 放大和 A/D 转换。I/V 转换采用两级放大, 分别由跨阻放大器和低噪声放大器组成。剂量电离室的流强分辨率主要取决于 I/V 放大电路的噪声, 因此 A/D 转换后需进一步降低噪声。本文采用数字滤波器来滤除高频噪声, 10 倍抽取降低数据率, LMS 滤波器滤除 50 Hz 工频干扰, 电子学响应时间将大大缩短。

1 抽取滤波器^[1]设计

将抽样序列速率降低的过程称为抽取, 抽取就是每 M 个点采样一次, 设输入序列为 $x(n)$, 输出序列为 $y(n)$, 则:

$$y(n) = x(Mn), n = -\infty \sim +\infty \quad (1)$$

$$y_1(n) = x(n)p(n) \quad (2)$$

式中:

收稿日期: 2015-11-09

作者简介: 赵斌清(1989-), 湖南衡阳人, 在读博士研究生, 从事核电子学与探测技术研究。通信作者: 殷重先, 副研究员, Email: yinchongxian@sinap.ac.cn。

$$p(n) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \delta(n - Mi) \quad (3)$$

$y(n)$ 频谱可变换为:

$$Y(e^{j\omega}) = Y_1(e^{j\omega/M}) \quad (4)$$

而 $y_1(n)$ 频谱:

$$Y_1(e^{j\omega}) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X(e^{j(\omega - 2\pi k/M)}) \quad (5)$$

所以:

$$Y(e^{j\omega}) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X(e^{j(\omega - 2\pi k/M)}) \quad (6)$$

可见输出信号频谱 $Y(e^{j\omega})$ 是 $W(e^{j\omega})$ 先作 M 倍扩展再在 ω 轴上每隔 $2\pi/M$ 的移位叠加, 这样输出信号频谱 $Y(e^{j\omega})$ 就是周期为 $2\pi/M$ 的周期信号。要使采样的信号抽取后不发生混叠, 根据式(1~6)抽取前后频谱关系, 需要在抽取前抗混叠滤波。

A/D 采样数据率为 500 kHz, 10 倍抽取后数据率降到 50 kHz。要进行无失真抽取, 经上述分析, 必须先进行抗混叠滤波。低通数字滤波器^[2]主要分为有限脉冲响应滤波器和无限脉冲响应滤波器, 前者输出仅取决于过去的输入, 与输出无关, 非递归结构, 后者输出既取决于过去和现在输入又取决于过去输出, 递归结构。两者的传递函数分别是:

$$H_1(z) = \sum_{k=0}^M b_k z^{-k} \quad (7)$$

$$H_2(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=0}^N a_k z^{-k}} \quad (8)$$

差分方程分别是:

$$y_1(n) = \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) \quad (9)$$

$$y_2(n) = \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) - \sum_{k=0}^N a_k x(n-k) \quad (10)$$

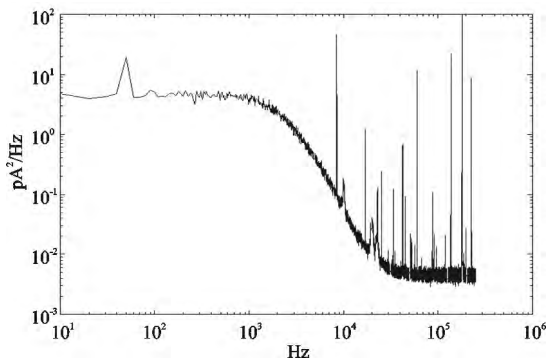


图1 剂量电离室电子学输出噪声功率谱密度

本设计中 $H_1(z)$ 和 $H_2(z)$ 系数计算主要利用 MATLAB 软件中数字信号处理工具箱,调用现有的函数来计算阶次和滤波器的系数。从图1 电子学输出噪声功率谱密度曲线来看,50 Hz 处存在尖峰,跨阻放大器引入的高频噪声大于 8 kHz。该电子学系统的设计指标为:模拟信号带宽 2 kHz,通带截止频率为 25 kHz,阻带截止频率为 45 kHz,通带波动不大于 1 dB,阻带衰减不小于 60 dB。在这分别采用图2 所示3 种方案来完成抽取滤波器的设计,多级抽取比单级抽取所需计算量^[3]少很多,延时少。方案一

和方案二均采用多级抽取结构,方案一第一级用 FIR 数字滤波器来实现,分别调用汉宁窗、汉明窗、布莱克曼窗等窗函数法计算得到阶次均大于 50,可见第一级产生延迟就已经大于 100 μ s,不符合要求。方案二第一级采用 IIR 滤波器,与 FIR 数字滤波器相比,IIR 滤波器有较低的阶数,信号延迟小,得到第一级滤波器最小阶数为 12,还需考虑到后级级联的延时问题,不予采用。方案三直接选用 IIR 滤波器和 10 倍抽取,通带截止频率为 8 kHz,阻带截止频率为 25 kHz,调用巴特沃斯、切比雪夫、椭圆型函数得到阶数分别是 7、5、4,从幅频曲线图3 来看,巴特沃斯滤波器通带最平,未达到 8 kHz 就开始衰减,阶数最大,椭圆型滤波器阶数最小,通带衰减最大,切比雪夫 I 型滤波器通带波纹较大,切比雪夫 II 型滤波器通带平坦,信号延时 14 μ s,最终选用切比雪夫 II 型滤波器作为抗混叠滤波器,调用 cheby2 函数得到传递系数为:

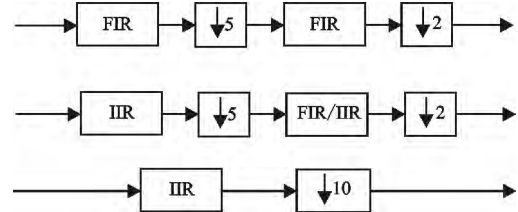


图2 三种方案实现 10 倍抽取滤波器

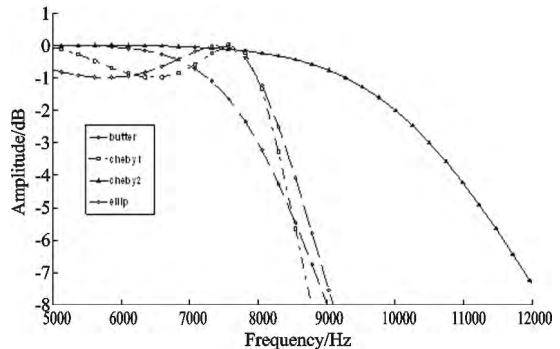


图3 IIR 抗混叠滤波器幅频响应曲线

$$b = [0.0007 \quad -0.0018 \quad 0.0012 \quad 0.0012 \quad -0.0018 \quad 0.0007]$$

$$a = [1.0000 \quad -4.5603 \quad 8.3364 \quad -7.6349 \quad 3.5027 \quad -0.6439]$$

其中, a 为系统函数的分母多项式的系数向量, b 为分子多项式的系数向量。

2 低通滤波器设计

经 IIR 滤波器和 10 倍抽取后,数据率降为 50 kHz,第二级设计指标通带截止频率为 2

kHz,阻带截止频率为 4 kHz,通带波动不大于 1 dB,阻带衰减不小于 60 dB,首先选用 FIR 窗函数法来设计低通滤波器,只有布莱克曼窗和凯塞窗可达到 60 dB 的阻带衰减,得到阶次分别为 138、91,信号延迟很大。仍选用 IIR 滤波器,图 4 是相同参数设计下,调用不同函数得到

$$b = [0.0014 \quad -0.0045 \quad 0.0064 \quad -0.0031 \quad -0.0031 \quad 0.0064 \quad -0.0045 \quad 0.0014]$$

$$a = [1.0000 \quad -5.5138 \quad 13.1613 \quad -17.6069 \quad 14.2435 \quad -6.9626 \quad 1.9031 \quad -0.2243]$$

其中, a 为系统函数的分母多项式的系数向量, b 为分子多项式的系数向量。

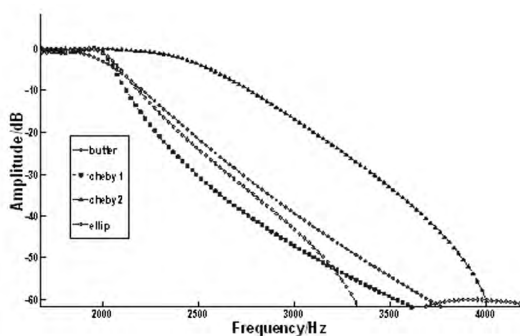


图 4 IIR 低通滤波器幅频响应曲线

3 50 Hz 工频干扰消除

不管是用 FIR 还是 IIR 滤波器来设计 50 Hz 的带阻滤波器,所得到的阻带带宽不够窄,会对有用信号造成损失,效果也不理想。本方案中将采用自适应陷波器^[4]来滤除工频干扰。自适应陷波器可以根据干扰频率信号的相位和幅度,自适应调整滤波器系数,跟踪其参数变化,保持对干扰信号的有效滤除。

图 5 是滤除干扰频率信号的自适应陷波器原理图, $x(t)$ 是混入 50 Hz 干扰频率的输入信号,自适应陷波器的目的就是要滤除这个干扰信号, $S(t)$ 是有用信号,在输入信号中,对于已知频率的干扰信号,不知其具体幅度值 A 及相位值 θ ,自适应算法的目的就是估计这个未知幅度及相位值。为估计单个频率的信号幅度和相位值,用两路正交的单频信号 $\cos(\omega t)$ 和 $\sin(\omega t)$ 通过调整权值 w_1 和 w_2 就可以合成与干扰信号 $A\cos(\omega t + \theta)$ 完全相同的信号,最终输出 $y(t) = A\cos(\omega t + \theta)$ 。

自适应算法主要有最小均方误差(Least - Mean - Square, LMS)和递归最小二乘法(Re-

的低通滤波器幅频曲线,从图中来看,切比雪夫 I 型和椭圆型滤波器通带波纹较多,巴特沃斯滤波器在通带内过早衰减,选用切比雪夫 II 型滤波器,阶次为 7,信号延时 140 μ s,通带平坦,在 4 kHz 达到 60 dB 衰减,符合设计要求。调用 cheby2 函数得到传递系数为:

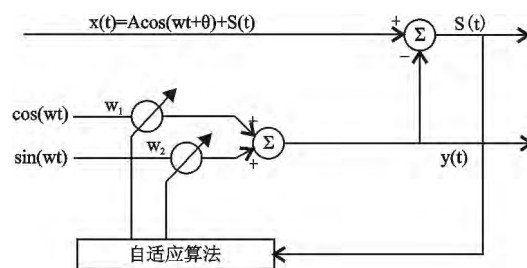


图 5 自适应陷波器原理图

cursive - Least - Square, RLS) 两大类,由于 RLS 算法不仅有乘加法,还有除法运算,计算复杂度与滤波器长度成正比,硬件实现相当复杂,在这里只考虑 LMS 算法,令 $x(n)$ 表示自适应滤波器的输入信号矢量, $w(n)$ 表示抽头权值矢量, $d(n)$ 表示期望信号, $y(n)$ 表示滤波器的输出信号, $e(n)$ 表示误差信号, LMS 算法基本形式如下:

滤波器输出:

$$y(n) = w^T(n) x(n) \quad (11)$$

误差信号:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (12)$$

权值更新:

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n) x(n) \quad (13)$$

再看看自适应陷波器原理图,图 5 是自适应陷波器原理图,将图 5 中的输入信号 $x(t)$ 当做图 6 的期望信号 $d(n)$,将两路参考信号 $\cos(\omega t)$ 和 $\sin(\omega t)$ 当做输入信号 $x(n)$,将输出值 $y(t)$ 当作估计值 $y(n)$,两两相减所得误差信号 $e(n)$ 即为有用信号 $S(t)$ 。

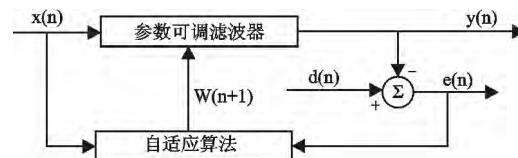


图 6 自适应滤波器原理图

下面采用频率 50 Hz 的正弦信号作为干扰

信号 $\sin(100\pi t + \pi/3)$ 将零均值、单位标准差的高斯白噪声加入到干扰信号中作为输入信号,实验中 $\mu = 1/128$,对 LMS 算法实现的自适应陷波器进行仿真,相应波形变化如图 7 到图 8 所示,从图中可以看出,LMS 陷波器有效滤除了 50 Hz 干扰信号,输出信号与白噪声基本一致,最快一个时钟周期可出滤波结果。

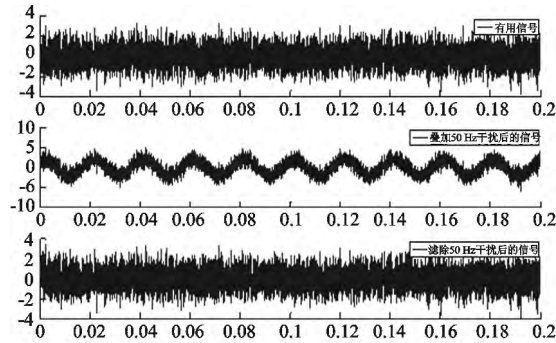


图 7 自适应陷波器滤除 50 Hz 干扰时域波形

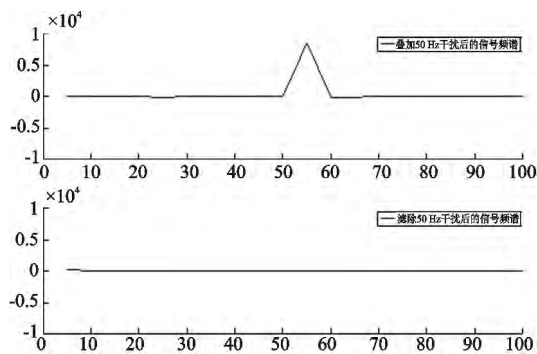


图 8 自适应陷波器滤除 50 Hz 干扰频

4 结论

本文设计了一种级联的数字滤波器结构,在 MATLAB 中进行仿真,结果表明该方案不仅滤掉了 A/D 转换后信号带宽外的高频噪音,而且消除了 50 Hz 的工频干扰,三级数字滤波时间延迟在 170 μs 左右,用文中所述的数字滤波器对电离室信号进行处理,达到预期设计指标,下一步将用 FPGA 实现这种方案。

参考文献:

- [1]杨小牛,楼才艺,徐建良. 软件无线电原理与应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [2]胡广书. 数字信号处理—理论、算法与实现 [M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [3]钮心忻,杨义先. 软件无线电技术与应用 [M]. 北京:北京邮电大学出版社,2000.
- [4]杜勇. 数字滤波器的 MATLAB 与 FPGA 实现 [M]. 北京:电子工业出版社,2012.

Design of Digital Filter Based on Dose Monitor

ZHAO Bin - qing , YIN Chong - xian , LIU Ming , ZHAO Ming - hua

(Shanghai Institute of Applied Physics , Chinese Academy of Sciences , , Shanghai 201800 , China)

Abstract: In order to reduce the data rate and noise after the A / D converter in the electronic system of beam flux ionization chambers , this paper designs a implementation scheme of poly - stage - decimation filter. Compared with traditional digital band - stop filter , LMS adaptive filter is used to eliminate the interference of 50 Hz. The benefit of this is to cause no loss of the useful signal. The theoretical simulation with MATLAB show that the delay time of electronic system is reduced to 170 microsecond , at the same time , the data rate is 50 kHz.

Key words: electronic system of ionization chamber; digital filter; cascade