

文章编号: 1006-4710(2015)01-0095-05

基于数字滤波的光纤光栅传感信号去噪及其 FPGA 实现

王亚萍, 胡辽林, 王斌

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 光纤光栅传感器是通过检测被测物理量引起的光纤光栅中心波长的漂移量来得到该物理量的变化, 波长检测精度常受到各种噪声的限制。为了提高波长的检测精度, 本文提出采用数字滤波进行去噪。分析了不同窗函数 FIR 低通滤波器对光纤光栅传感信号去噪能力的影响, 发现凯泽(Kaiser)窗的通带纹波、阻带衰减以及去噪后的信噪比和均方误差均比较好, 并确定了其阶数和 β 参数。用设计的滤波器对光栅反射谱进行了去噪处理, 效果较好, 尤其是在峰值波长处, 光栅反射谱较平滑, 峰值波长的分辨能力显著提高。最后用 FPGA 实现 FIR 滤波并对光纤光栅传感信号去噪, 进一步验证了设计的 FIR 滤波器对光栅传感信号具有良好去噪效果。

关键词: 光纤光栅; 传感; 有限冲激响应(FIR)滤波; FPGA

中图分类号: TN911.4

文献标志码: A

Denoising of fiber Bragg grating sensing signal and implementation by FPGA based on digital filtering

WANG Yaping, HU Liaolin, WANG Bin

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Fiber Bragg grating sensor makes acquisition to physical change by detecting the FBG central wavelength drift caused by physical change, while the wavelength detection precision is limited by noises. To improve the detection precision in noisy circumstance, this paper suggests that the digital filter wave to denoise. By analyzing the ability of denoising for FIR low-pass filter with various window functions, it is discovered that the Kaiser window has a better performance in pass-band ripple, stopband attenuation, SNR and MSE, so that its order and β parameters are determined. The designed wave filter is used to carry out the de-noising treatment of the FBG reflection spectrum with good results obtained, particularly in the peak value of wavelength. So that the FBG reflection spectrum is rather smooth and the resolution ability of peak value wavelength is obviously improved. Finally the PPGA is used to realize FIR filter wave and to denoise fiber Bragg grating sensing signal, and the designed FIR wave filter has further been tested to have a better denoising effects.

Key words: fiber Bragg grating; sensing; FIR; FPGA

光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器广泛应用于应变、温度、压力、磁场等多种物理量的测量, 其核心都是检测被测量引起的光纤光栅中心波长的漂移^[1,2]。为了精确检测应变或温度等的变化, 需要检测由它们引起的中心波长的微小漂移, 但波长的探测精度受到了各种噪声的限制, 给光栅反射谱中心波长的准确定位带来极大困难, 因此必须

对光纤光栅传感信号进行去噪处理^[3-5]。

在检测电路中加入模拟滤波可以滤除干扰信号, 但其存在稳定性不高、精度较低、抗干扰性差、适应性差等缺点^[1]。数字滤波能够克服模拟滤波器所无法解决的电压和温度漂移及噪声等问题。有限冲激响应(FIR)滤波器具有严格的线性相位特性, 且系统稳定。本文使用数字滤波对光纤光栅传感信号

收稿日期: 2014-06-16

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2014JM7273)。

作者简介: 王亚萍, 女, 硕士生, 研究方向为光纤传感。E-mail: wyp.14@163.com。

通讯作者: 胡辽林, 男, 副教授, 研究方向为光纤传感及光纤通信。E-mail: huliaolin@163.com。

进行去噪,分析了不同窗函数的 FIR 低通滤波器对光纤光栅传感信号去噪能力的影响,并用设计的滤波器对光栅反射谱进行去噪处理,效果较好,尤其是在峰值波长处,光栅反射谱比较平滑,峰值波长的分辨能力显著提高。最后用 FPGA 实现 FIR 滤波并对光纤光栅传感信号去噪,效果良好。

1 光纤光栅传感系统

本文所采用光纤光栅传感系统框图如图 1 所示。宽带光源为系统光源,光通过隔离器后进入 3dB 耦合器,然后入射到光纤光栅传感阵列。光纤光栅反射回来的光与可调谐滤波器选通波长相同时,产生干涉极大,此时光电探测器探测到最大光强。光信号经过光电探测器变为与之相对应的电信号,通过寻找电信号峰值即可得到波长的漂移量,进而得到被测量的变化。但是探测到的反射光中存在有害干涉信号等噪声,为了有效提高波长检测精度,必须对信号做去噪处理。

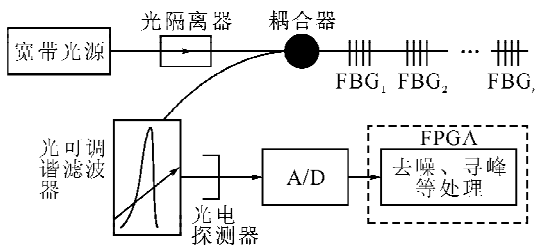


图 1 光纤光栅传感系统框图

Fig. 1 Diagram of the fiber Bragg grating sensing system

2 光纤光栅传感信号去噪仿真

本节先制造一个含噪声的光栅反射谱信号,通过数字滤波去除噪声,并与无噪声光栅反射信号进行比较,以确定滤波器窗函数和阶数等参数。

2.1 光栅反射谱模型

光栅反射谱由光纤模式耦合理论得到^[6],光电探测器探测到的光纤光栅反射谱的光功率为

$$P(\lambda) = \frac{P_0}{4} R(\lambda) = \frac{P_0 C^2 \sinh^2(SL)}{4\Delta\tilde{\beta}^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)} \quad (1)$$

$$\tilde{\beta} = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda \quad (2)$$

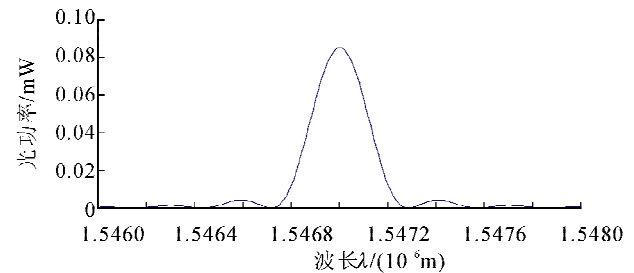
$$\Delta\tilde{\beta} = \tilde{\beta} - \frac{\pi}{\Lambda} \quad (3)$$

$$S^2 = C^2 - \Delta\tilde{\beta}^2 \quad (4)$$

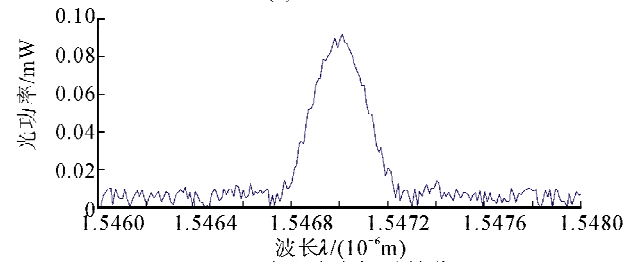
式中, P_0 是光源输出光功率, $R(\lambda)$ 是光纤光栅反射率, $\tilde{\beta}$ 为传输常量, $\Delta\tilde{\beta}$ 为传输常量的失谐量, C 为耦合系数, L 是光栅长度, n_{eff} 为纤芯有效折射率, Λ 为

光栅周期。光纤光栅反射谱的参数取值: P_0 为 0.4 mW, 中心波长为 1 547 nm, 光谱扫描范围为 1 546 nm~1 548 nm, 每个数据点间隔 0.01 nm, 共 200 个数据点, 其 3 dB 带宽为 0.25 nm。

由式(1)所得的无噪声光栅反射谱信号如图 2(a)所示。本系统中的噪声主要来自于光栅反射信号与其它残余反射光相互干涉产生的有害干涉信号以及光电检测电路的热噪声, 表现为光强与相位的起伏, 接近高斯白噪声, 因此在图 2(a)上叠加幅值为 0.01 mW 高斯白噪声产生含噪声的光栅反射谱, 如图 2(b)所示。



(a) 无噪声光栅反射谱



(b) 含噪声光栅反射谱

图 2 无噪声和含噪声光纤光栅反射谱

Fig. 2 Noiseless and noisy fiber Bragg grating reflection spectra

评价去噪能力指标常用均方误差 (MSE) 和信噪比 (SNR)。均方误差为原始信号与去噪后信号之差的平方的均值, 定义为:

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [P(i) - y(i)]^2 \quad (5)$$

式中, $P(i)$ 为原始信号, $y(i)$ 为去噪后的信号, m 为离散的数据点数, 本文取 $m=200$ 。

信噪比是衡量信号噪声的参量, 定义为:

$$SNR = 10 \lg \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P^2(i)}{MSE} \text{ (dB)} \quad (6)$$

MSE 越小, SNR 越大, 去噪效果越好。

2.2 数字滤波器设计

本文采用有限冲激响应 (FIR) 滤波器来去噪, FIR 输出 $y(n)$ 和系统传输函数为^[7-8]

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) \times (n-k), 0 \leq n \leq N-1 \quad (7)$$

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)z^{-k} \quad (8)$$

式中, $h(k)$ 是滤波器的冲激响应系数, N 是滤波器阶数。

FIR 滤波器特性由滤波器阶数和相应的系数取值决定。滤波器阶数取决于信号的截止频率和采样频率, 可从信号频谱中得到。设计数字滤波器就是用因果滤波器的频率特性来逼近理想频率特性, 即根据因果滤波器的频率特性求冲激响应。本文采用窗函数法来计算 FIR 的冲激响应系数。

窗函数法是 FIR 滤波器设计中常用方法, 即将理想的冲激响应 $h_d(k)$ 乘上一个合适的、有限的窗函数, 得到一个有限长序列, 亦即在时域范围将理想冲激响应 $h_d(k)$ 加权截尾后得到其逼近函数 $h(k)$ 。

设计线性相位 FIR 滤波器分四步: ①确定滤波器的性能, 即截止频率 ω_c 和阶数 N ; ②根据性能要求选择合理的单位脉冲响应的奇偶对称性, 确定理

想频率响应 $H_d(e^{j\omega})$ 的幅频特性和相频特性; ③选择合适的窗函数 $w(k)$, 根据 $h(k) = h_d(k)w(k)$ 求所需的 FIR 单位脉冲响应; ④求 $H(e^{j\omega})$, 分析其幅频特性, 若不满足要求, 可适当改变窗函数和阶数 N 以达到要求。

选取窗函数的依据有: ①窗函数频谱的主瓣应尽可能窄, 以获得较小的过渡带宽度; ②尽可能减小旁瓣幅度。常用的窗函数有矩形窗、海明 (Hamming) 窗、汉宁 (Hanning) 窗、布莱克曼 (Blackman) 窗和凯泽 (Kaiser) 窗, 前四种窗函数有着固定的特性, 它们的过渡带、阻带衰减、阻带起伏都是固定的, 而凯泽窗引入了一个控制窗函数形状参数 β , 可通过选择不同的 β 来满足不同要求的过渡带宽度和阻带衰减。除了考虑窗函数频谱本身的特性外, 还应考虑被分析信号的特点及处理要求。

表 1 是 51 阶的五种窗函数的滤波器对光纤光栅信号去噪效果的比较。

表 1 不同窗函数的去噪效果
Tab. 1 The denoising results of different window functions

| 窗函数 | 凯泽窗 | 汉宁窗 | 矩形窗 | 海明窗 | 布莱克曼窗 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 阻带衰减/dB | 43 | 34 | 26 | 36 | 24 |
| 通带纹波/dB | 0.049 | 0.098 | 0.999 | 0.082 | 0.359 |
| $MSE/10^{-5}$ | 2.763 | 2.827 | 2.831 | 2.820 | 2.824 |
| SNR/dB | 34.124 | 32.207 | 30.018 | 33.972 | 32.088 |
| 3dB 带宽内的 $MSE/10^{-6}$ | 6.907 | 7.003 | 7.247 | 7.017 | 7.126 |
| 3dB 带宽内的 SNR/dB | 66.744 | 66.222 | 65.359 | 66.241 | 66.478 |

从表 1 可以看出, 凯泽窗函数的阻带衰减最大, 通带纹波最小, 不同窗函数对光栅去噪后, 凯泽窗的 MSE 最小, SNR 最大。峰值波长处的去噪效果对波长检测精度的影响很大, 本文也计算了反射谱 3 dB 带宽内的 MSE 和 SNR , 同样凯泽窗的 MSE 最小, SNR 最大。3 dB 带宽内的 MSE 和 SNR 是由光栅反射谱中心波长左右各 12 个数据点计算得来。

因此本文选择凯泽窗函数, 下面确定其阶数和 β 参数。凯泽窗函数表达式为:

$$w(k) = \frac{I_0 \left[\beta \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2k}{N-1}\right)^2} \right]}{I_0(\beta)} \quad (9)$$

$0 \leq k \leq N-1$

式中 I_0 是零阶第一类修正的贝塞尔函数。

$$I_0(\beta) = 1 + \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{(\beta/2)^k}{k!} \right]^2 \quad (10)$$

滤波器阶数 N 与参数 β 计算公式为:

$$N \approx \frac{A_s - 7.95}{2.285 \Delta \omega} + 1$$

$$\beta = \begin{cases} 0.1102(A_s - 8.7), & A_s \geq 50 \\ 0.5842(A_s - 21)^{0.4} + \\ 0.07886(A_s - 21), & 21 < A_s < 50 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\Delta \omega$ 为过渡带宽度, A_s 为阻带衰减。光栅反射谱的阻带衰减要求为 50 dB, 通带纹波为 0.05, 通带截止频率为 20 Hz, 阻带截止频率为 50 Hz。由式 (11) 计算得 $N \approx 51$, 即设计的 FIR 滤波器为 51 阶, $\beta = 4.55$ 。但所设计的滤波器的阻带衰减为 43 dB, 没有满足要求, 必须对参数微调使其达到要求。因为 β 值增大, 主瓣随之加宽, 旁瓣幅度随之减小。阶数变大, 主瓣随之变窄, 但最大旁瓣幅度基本不受影响, 所以只调整 β 参数, 使 β 为 4.25, 此时阻带衰减为 50 dB, 正好满足要求。

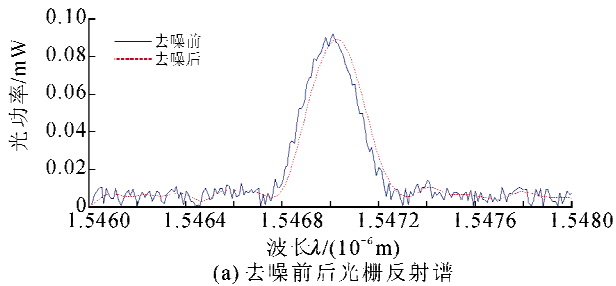
凯泽窗具有很强的适应性, 可以任意调整主瓣宽度和旁瓣的衰减, 因此可以根据需要构造出具有

较窄过渡带及较大阻带衰减的滤波器。

2.3 去噪结果

经过所设计的 FIR 滤波器后,得到光纤光栅信号去噪效果如图 3 所示。

从图 3(a)可以看到,去噪后的光栅信号比较平滑,易于辨别峰值波长,消除了峰值波长的不确定性。去噪后峰值位置和原信号相比向长波方向移动



了 0.02 nm,峰值位置的移动仅依赖于滤波器的阶数,对峰值波长检测精度没有影响,可将测量结果直接减掉 0.02 nm 来进行补偿。

图 3(b)为去噪前后的光栅反射谱噪声幅值,去噪后噪声幅值的量级为 10^{-5} ,降低了 3 个量级,去噪效果良好。

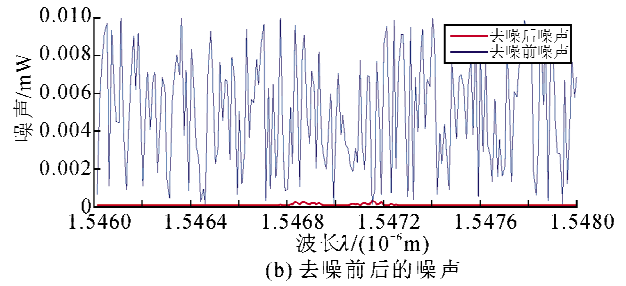


图 3 去噪前后光栅反射谱与噪声功率

Fig. 3 Fiber Bragg grating reflection spectra and noise before and after denoise

3 FPGA 实现

FPGA 实现 FIR 滤波去噪可采用串行结构、并行结构、分布式结构和直接使用 Altera 公司的 FIR IP 核等方法^[9-11]。这四种实现方法各有优缺点,从代码的实现复杂程度来看依次是 IP 核、并行结构、串行结构、分布式结构。IP 核设计 FIR 滤波器,设计周期短,占用资源少,采用硬件乘法器 IP 核,具有很高的运行速度。本文采用 MATLAB 和 Altera 公司 IP 核相结合的方法设计 FIR。

Quartus II 中 FIR Compiler 可生成用户参数化的 FIR 滤波器,可设置滤波器的阶数、采样速率、

带宽、输入的通道数、输入数据的位数及采用的滤波器结构等,同时可实时显示占用 FPGA 的各种资源。

本文将 MATLAB 算出的滤波器系数 $h(k)$ 导入 IP 核,就可以实现所需的滤波器。由于从 MATLAB 算出的系数 $h(k)$ 是一组浮点数,而 FPGA 器件是定点数表示,需要将滤波器系数量化,本文采用 16 位量化,量化方式为自动,输入数据位宽为 16 位,输出精度为 35 位,FPGA 实现结构为全并行结构。生成的滤波器共占用 4421 个逻辑单元。图 4 为 FPGA 生成的滤波器幅频特性,可以看到其阻带衰减大于 50 dB,满足要求,通带纹波很小。

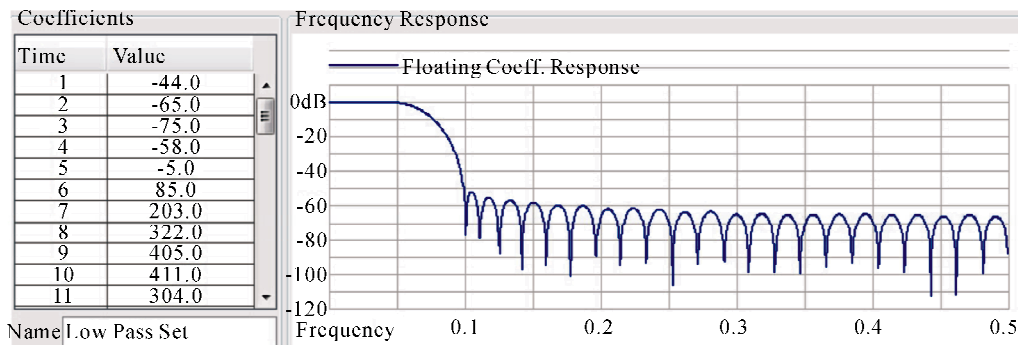


图 4 FPGA 生成滤波器的幅频特性

Fig. 4 The amplitude-frequency characteristic of the filter generated by FPGA

为了验证所设计的滤波器对光栅反射谱的去噪效果,将仿真得到的光栅反射谱的数据存储在 ROM 中,这样使得 FPGA 实现滤波时与仿真有同样的信号源,便于对比两者的结果是否一致。在顶

层文件中调用 FIR 滤波器模块,实现滤波去噪。图 5 为 FPGA 实现去噪前后的光栅反射谱,可以看出去噪后光栅反射谱变得平滑,信号峰值处的去噪效果很好,易于确定峰值波长,与仿真效果一致。

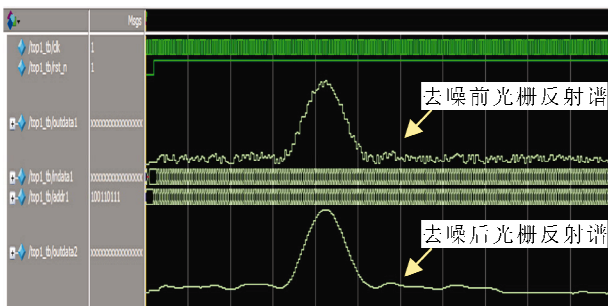


图5 FPGA实现光纤光栅传感信号去噪
Fig. 5 Denoise of simulated fiber Bragg grating sensing signal by FPGA

实验采集真实光谱数据验证 FPGA 滤波效果,如图 6 所示。本实验系统中光纤光栅距离解调系统很近,光路中固有反射点较少,由光路固有反射产生的噪声不是很大,并且光栅反射谱容易受到外界干扰影响,噪声具有随机性和瞬时不可测性,因此与仿真有差别。但从图 6 中可以看出,所设计的滤波器依然表现出了良好的去噪能力,波形变得平滑,易于峰值波长的确定。

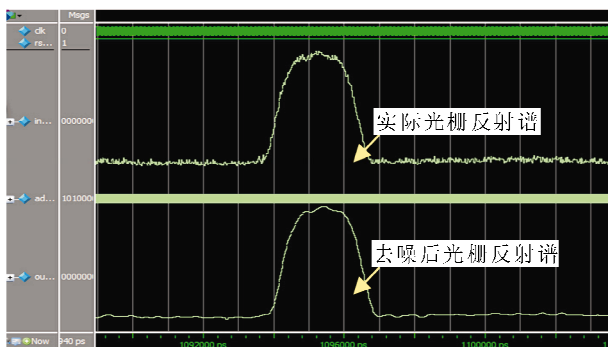


图6 FPGA实现实际光纤光栅传感信号去噪
Fig. 6 Denoise of real fiber Bragg grating sensing signal by FPGA

4 结 论

本文基于数字滤波对光纤光栅传感信号进行去噪研究。分析了不同窗函数 FIR 低通滤波器对光纤光栅传感信号去噪能力的影响。仿真确定了滤波器阶数和 β 参数,并发现凯泽窗的通带纹波、阻带衰减以及去噪后的均方误差和信噪比均比较好。用设计出的滤波器对光栅反射谱进行去噪处理,效果比较理想,尤其是在峰值波长处,光栅反射谱比较平滑,峰值波长的分辨能力显著提高。最后用 FPGA 实现 FIR 滤波,并对仿真的光栅传感信号以及实际光栅传感信号去噪,效果均良好。

参考文献:

[1] 王亚萍,胡辽林,张卫超. 分布式光纤光栅传感系统中微弱信号检测研究[J]. 西安理工大学报, 2013, 29(4):

88-94.

Wang Yaping, Hu Liaolin, Zhang Weichao. Research on weak signal detecting in distributed FBG sensing system [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(4): 88-94.

[2] 胡辽林,张卫超,华灯鑫,等. 基于 LabVIEW 的光纤光栅传感的动态解调[J]. 计算机应用, 2013, 33(5): 1473-1475.

Hu Liaolin, Zhang Weichao, Hua Dengxin, et al. Dynamic demodulation of fiber Bragg grating sensing based on LabVIEW [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(5): 1473-1475.

[3] 何玉钧,王梓萌,尹成群,等. 利用平稳小波变换处理 FBG 传感信号[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2295-2300.

He Yujun, Wang Zishuo, Yin Chengqun, et al. Treatment of FBG sensor signal by stationary wavelet transform [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2295-2300.

[4] 李志全,曹平,王亚男,等. 基于经验模态分解消噪的光纤光栅解调系统[J]. 光子学报, 2010, 39(8): 1367-1370. Li Zhiquan, Cao Ping, Wang Ya'nan, et al. FBG demodulation system based on EMD denoise [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(8): 1367-1370.

[5] Chen Yong, Chen Lijuan, Liu Huanlin, et al. Research on FBG sensor signal wavelength demodulation based on improved wavelet transform [J]. Optik, 2013, 124: 4802-4804.

[6] 吴朝霞,吴飞. 光纤光栅传感原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.

[7] 姚天任. 数字信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2011.

[8] 杜勇,路建功,李元洲. 数字滤波器的 MATLAB 与 FPGA 实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.

[9] 戴敬,王超. 基于 FPGA 多级分布式算法的 FIR 数字滤波器的设计[J]. 沈阳建筑大学学报, 2010, 26(1): 196-200.

Dai Jing, Wang Chao. The design of multi-channels distributed arithmetic Algorithm FIR filter based on FPGA [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, 26(1): 196-200.

[10] Krill B, Ahmad A, Amira A, et al. An efficient FPGA-based dynamic partial reconfiguration design flow and environment for image and signal processing IP cores [J]. Signal Processing: Image Communication, 2010, 25: 377-387.

[11] Saliha Harize, Mohamed Benouret, Nouredine Doghmane, et al. A methodology for implementing decimator FIR filters based on FPGA [J]. International Journal of Electronics and Communications, 2013, 67: 993-1004.

(责任编辑 王卫勋)