

## 激光气体分析仪中数字滤波器的设计

王洪涛<sup>1</sup>, 黄云彪<sup>2</sup>, 黄 鸿<sup>1,2\*</sup>

- (1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 重庆川仪自动化股份有限公司技术中心, 重庆 401121)

**摘要:** 由于基于可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术的激光气体分析仪的二次谐波信号中存在较大的系统噪声, 本文利用有限长单位冲激响应(FIR), 提出了激光气体分析仪的二次谐波在线滤波方法。在分析 FIR 数字滤波器原理的基础上, 利用 MATLAB 窗函数设计了适合本激光气体分析仪的数字滤波器。然后, 将仿真的 FIR 数字滤波算法移植到激光气体分析仪嵌入式系统中。最后, 比较了滤波前后二次谐波信号波形, 说明了在激光气体分析仪嵌入式系统中采用基于 FIR 数字滤波器滤波算法的可行性。实验结果表明: FIR 数字滤波器对一组二次谐波信号进行滤波的运算时间为 230 ms, 滤波后的二次谐波信号波形获得了较好的去噪效果, 能够满足激光气体分析仪对含有噪声的二次谐波信号进行平滑去噪的要求, 且滤波算法结构简单、运算时间短、可移植性强。

**关键词:** 激光气体分析仪; 可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS); 二次谐波; 有限长单位冲激响应(FIR)数字滤波器; 数字信号处理器

中图分类号: O657.319; TN713 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20130605.0729

## Design of digital filter in laser gas analyzer

WANG Hong-tao<sup>1</sup>, HUANG Yun-biao<sup>2</sup>, HUANG Hong<sup>1,2\*</sup>

- (1. Key Laboratory of Opto-electronic Technology & Systems of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. The Technical Center of Chongqing Chuanyi Automation CO., Ltd., Chongqing 401121, China)

\* Corresponding author, E-mail: hhuang.cqu@gmail.com

**Abstract:** Due to the presence of system noises in second harmonic signals of a laser gas analyzer based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy(TDLAS), this paper designs an Finite Impulse Response(FIR) based filtering scheme to realize the online filtering of second harmonic of the laser gas analyzer. First, based on the theory of FIR digital filtering, a FIR digital filter is designed with window functions based on a MATLAB (Matrix laboratory) software platform. Then, the corresponding algorithm is transplanted to the embedded system of laser gas analyzer. Finally, on the basis of waveform analysis of the second harmonic signals before and after filterings, it proves the feasibility of the proposed filter algorithm that the FIR digital filter is embedded system to realize the online filtering of second harmonic in the laser gas analyzer. Experimental results indicate

收稿日期: 2013-07-16; 修订日期: 2013-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61101168); 中国博士后科学基金资助项目(No. 2012M511906, No. 2013T60837); 重庆市博士后科研资金特别资助项目(No. XM2012001)

that algorithm computation time for one set of second harmonic signal is 230 ms. The FIR filter can effectively filter out the interference signals of second harmonic by comparing the waveforms of the second harmonic signals before and after filterings. The FIR digital filter can basically meet the requirements of laser gas analyzer for denoising, smoothing the second harmonic signals with noises, lowering computational complexity as well as enhancing the performance of transplanting.

**Key words:** laser gas analyzer; Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS); second harmonic signal; Finite Impulse Response (FIR) digital filter; Digital Signal Processor (DSP)

## 1 引言

可调谐二极管激光吸收光谱技术 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) 是在 20 世纪 70 年代由 Hinkley<sup>[1]</sup> 和 Reid<sup>[2]</sup> 等人提出的, 该技术本质上一种吸收光谱技术, 其通过分析光通过吸收介质时的选择吸收来测得待测介质浓度。由于吸收光谱技术<sup>[3-7]</sup> 具有高光谱分辨率、高灵敏度和良好选择性等特点, 目前基于 TDLAS 技术的气体浓度检测方法已经成为痕量气体快速、在线检测的有效方法之一。

本文研究的基于 TDLAS 技术的激光气体分析仪主要是对工业现场的 CO 气体进行在线检测, 但是激光气体分析仪中随着待测气体 CO 浓度的降低, 气体的检测精度也随之降低, 这是由激光气体分析仪在进行低浓度气体浓度检测时, 信号的信噪比较低造成的。在激光气体分析仪中, 噪声的主要来源有 4 种: 探测器的噪声, 激光额外噪声, 由于激光的相干性而在光学系统中出现的干涉条纹以及随机剩余幅度调制 (Residual Amplitude Modulation, RAM) 引起的偏移噪声。

由于以上系统噪声的存在, 如果不对混杂在有用信号中的噪声信号进行处理, 极易在浓度计算时对浓度计算结果造成较大偏差。因此, 为了提高测量精度、改善信噪比, 必须在激光气体分析仪在线检测系统中对采集到的信号进行滤波, 从混有干扰的信号中滤除噪声, 提取有用信号。近年来, 国内外学者对于激光气体分析仪中谐波信号的滤波方法进行了较多的探索, 并取得了较好的成果, 滤波方式主要有在硬件上搭建滤波电路以及在软件上设计滤波算法这两个方面。在硬件

方面, 主要有通过低通滤波器减小检测的带宽或者对信号进行积分来减少探测器噪声<sup>[8]</sup>, 在二次谐波信号进入模数转换器之前利用静噪滤波器对信号滤波。在软件方面, 主要有卡尔曼滤波<sup>[9]</sup>、修正式加权滑动平均数字滤波<sup>[10]</sup>、 $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$  滤波<sup>[11]</sup>、算术平均、小波变换<sup>[12]</sup> 滤波等。已有的文献主要从待测气体反演精度等方面作为滤波算法的评价指标, 但是对硬件滤波电路的设计难度、硬件成本等问题并未提及; 对软件滤波算法的运算复杂度、算法的可移植性等性能也未做充分的介绍和评价。

由于 TDLAS 是一种在线气体检测技术, 因此必须采用一种算法简单、运算时间短、算法移植性好的滤波方法, 同时满足气体分析仪在线检测的要求, 并将滤波算法移植到激光气体分析仪在线检测系统中。

## 2 TDLAS 原理

基于 TDLAS 技术的激光气体分析仪的理论基础是 Beer-Lambert 定律<sup>[13]</sup>, 根据 Beer-Lambert 定律, 激光通过特定的气体时, 气体吸收前和气体吸收后的光强关系为:

$$I = I_0 \exp[-S(T)g(v)PcL], \quad (1)$$

式中:  $v$  为激光频率, 单位为  $\text{cm}^{-1}$ ;  $I$  为激光穿过被测气体后的强度;  $I_0$  为激光的基准强度, 单位为  $\text{mW}$ ;  $S(T)$  为谱线的线强度, 它表示该谱线的吸收强度, 只与温度有关, 单位为  $\text{cm/mol}$ ;  $p$  为待测气体的分压, 单位  $\text{Pa}$ ;  $L$  为吸收路径长度, 单位为  $\text{cm}$ ;  $c$  为气体的体积浓度, 单位为  $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ;  $g(v)$  为线性函数, 与气体性质有关。

在一般情况下, 气体对近红外光吸收很小, 即

$S(T)g(v)PcL \leq 0.05$  条件很容易满足。将式(1)进行傅里叶展开,可以得到二次谐波信号与气体浓度的关系式,即:

$$I_{2f} \propto I_0 S(T)g(v)PcL. \quad (2)$$

式中: $I_{2f}$ 表示二次谐波强度,当待测气体和外界环境一定时, $I_0$ 、 $S(T)$ 、 $g(v)$ 、 $P$ 、 $L$ 为一常量,式(2)即证明了二次谐波信号与气体浓度呈线性关系。

由式(2)可知,二次谐波信号的信噪比与稳定性直接影响激光气体分析仪的测量精度与稳定性,因此如何对采集到的含有噪声的二次谐波信号进行滤波处理,得到高信噪比的二次谐波信号是提高激光气体分析仪测量精度的关键。

针对激光气体分析仪的工业现场实际应用,本文设计了一种基于有限长单位冲激响应(Finite Impulse Response, FIR)的激光气体分析仪二次谐波滤波方案。该方案通过 MATLAB 设计 FIR 数字滤波器,对采样得到 CO 气体的不同浓度的二次谐波信号进行滤波仿真,并将设计好的 FIR 滤波器算法移植到激光气体分析仪嵌入式系统中进行验证。

### 3 FIR 数字滤波器基本原理

数字滤波器的功能是把输入序列通过一定的运算,变成输出序列。数字滤波器一般可用如下的差分方程来描述:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k x(n-k) + \sum_{k=0}^{N-1} b_k y(n-k), \quad (3)$$

式中, $x(n)$ 为输入序列, $y(n)$ 为输出序列, $a_k$ 和  $b_k$ 为滤波器系数, $N$ 是滤波器的阶数。若上式中所有  $b_k$ 均为零,则有:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k x(n-k). \quad (4)$$

上式就是 FIR 滤波器的差分方程,将其表示为:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k). \quad (5)$$

对式(5)进行 Z 变换得到 FIR 滤波器的传递函数为:

$$H(Z) = \frac{Y(Z)}{X(Z)} = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)z^{-k}. \quad (6)$$

由式(6)可以得到 FIR 滤波器的一般结构如图 1 所示,即 FIR 数字滤波器基本原理<sup>[14]</sup>。

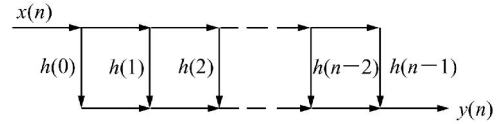


图 1 FIR 滤波器的结构图

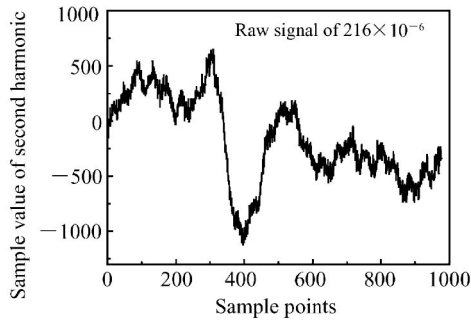
Fig. 1 Structure figure of FIR filter

FIR 滤波器最主要的特点是没有反馈回路,因此它是无条件稳定系统。由式(5)可知,它的单位脉冲响应  $h(n)$  是一个有限长序列。由上面的方程可见,FIR 滤波算法实际上是一种乘法累加运算,它不断地输入样本  $x(n)$ ,经延时做乘法累加,再输出滤波结果  $y(n)$ 。

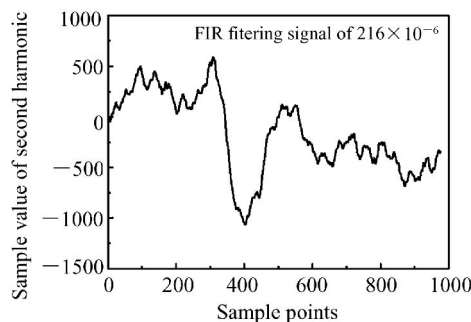
### 4 FIR 数字滤波器 MATLAB 仿真

在 MATLAB 滤波器设计中,通过调用 MATLAB 自带的滤波器设计分析工具(Filter Design & Analysis Tool, Fdatool),根据二次谐波信号的采样频率、噪声的频率范围、软件算法移植的复杂度等参数和算法性能,利用 Fdatool 产生所需的滤波器频率响应特性,确定 FIR 滤波器设计参数,并保存所设计的 FIR 滤波器参数,供数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)处理用。根据激光气体分析仪对滤波算法运算复杂度的要求,在激光气体分析仪实时处理中,若滤波器系数过多,将会导致系统滤波处理时间过长,从而不能及时地完成数据处理,据此,本次设计采用加布莱克曼窗的 9 阶 FIR 滤波器来实现对信号的平滑去噪。

本系统所采集的 CO 气体浓度单位为体积浓度  $10^{-6}$ ,实验分别以激光气体分析仪采集到的浓度为  $216 \times 10^{-6}$  和  $102 \times 10^{-5}$  的 CO 气体二次谐波信号为例,其中浓度为  $216 \times 10^{-6}$  的 CO 气体二次谐波信号滤波前后 MATLAB 中滤波仿真结果如图 2 所示。



(a) 原始二次谐波信号  
(a) Raw signal of second harmonic



(b) 滤波后的二次谐波信号  
(b) Filtered signal of second harmonic

图2 FIR滤波器MATLAB仿真图(CO浓度为 $216 \times 10^{-6}$ )

Fig. 2 Simulated figures of FIR filter with MATLAB  
(Volume concentration of CO:  $216 \times 10^{-6}$ )

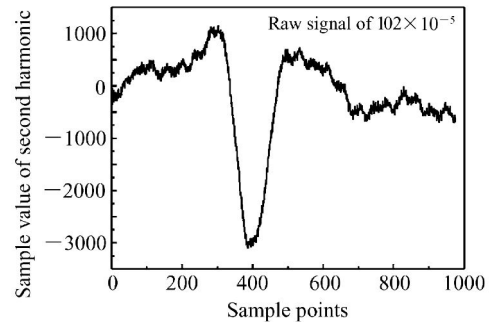
浓度为 $102 \times 10^{-5}$ 的CO气体二次谐波信号滤波前后MATLAB中滤波仿真结果如图3所示。

## 5 DSP系统中的FIR滤波器实现

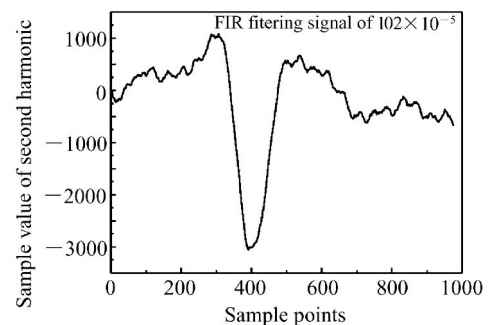
### 5.1 DSP中FIR滤波器实现

近年来,随着计算机和信息技术的飞速发展,DSP技术应得到了迅速的发展。在过去的二十多年时间里,DSP技术已经在通信、信号处理、图像处理等领域得到极为广泛的应用<sup>[15]</sup>。

本激光气体分析仪采用美国德州仪器(Texas Instrument, TI)的DSP TMS320F28335作为数据处理芯片,此款芯片是TI公司最新推出的一款TMS320C28X系列浮点DSP控制器,与以往的定点DSP芯片相比,该器件的精度大大提高。另外,该DSP还具有成本低,功耗小,性能高,外设



(a) 原始二次谐波信号  
(a) Raw signal of second harmonic



(b) 滤波后的二次谐波信号  
(b) Filtered signal of second harmonic

图3 FIR滤波器MATLAB仿真图(CO浓度为 $102 \times 10^{-5}$ )

Fig. 3 Simulated figures of FIR filter with MATLAB  
(Volume concentration of CO:  $102 \times 10^{-5}$ )

集成度更高,数据以及程序存储量更大,模数转换更加精确和快速等特点。具体来说,该DSP具有150 MHz的高速处理能力,具备32位浮点处理单元<sup>[16]</sup>,与前代数字信号控制器(Digital Signal Controller, DSC)相比,平均性能提升50%,并且可以与定点C28x控制器软件兼容,从而简化软件开发,缩短开发周期,降低开发成本。

### 5.2 FIR数字滤波器DSP仿真

由式(5)可以看出,FIR数字滤波器的实现涉及大量的卷积运算,计算量很大,使用常规硬件时会占用大量的资源。由于DSP具有独特的流水线操作、专用的乘法器,所以利用DSP嵌入式系统实现FIR数字滤波器较为方便、快捷,而且稳定。

在DSP嵌入式系统中,根据FDAtool设计的滤波器参数,将FIR滤波器算法移植到激光气体

分析仪的嵌入式系统中调试,波形通过 DSP 编译软件 CCS 的 Graph 功能显示。通过在 CCS 中选择命令 View→Graph,设置相应的参数,即可按所选图形类型显示滤波前后的二次谐波信号波形。

本文以激光气体分析仪采集到的浓度为  $216 \times 10^{-6}$  和  $102 \times 10^{-5}$  的 CO 气体二次谐波信号为例,其中浓度为  $216 \times 10^{-6}$  的 CO 气体二次谐波信号滤波前后 DSP 中滤波仿真结果如图 4 所示。

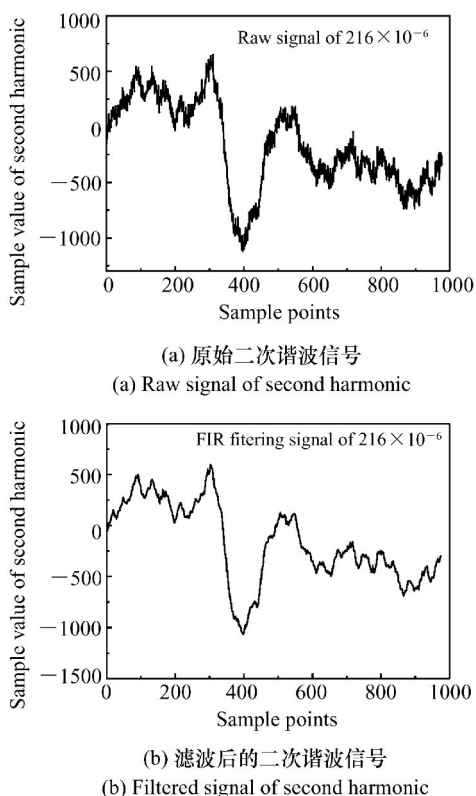


图 4 FIR 滤波器 DSP 仿真图 (CO 浓度为  $216 \times 10^{-6}$ )

Fig.4 Simulated figures of FIR filter with DSP (Volume concentration of CO:  $216 \times 10^{-6}$ )

浓度为  $102 \times 10^{-5}$  的 CO 气体二次谐波信号滤波前后 DSP 中滤波仿真结果如图 5 所示。

本实验分别对不同浓度的 CO 气体的二次谐波信号进行滤波,通过 MATLAB 仿真结果和 DSP 实际测试结果可以看出,本文设计的 FIR 数字滤波器可以有效地滤掉信号杂波,并且对 CO 气体不同浓度的二次谐波信号数据都有较好的滤

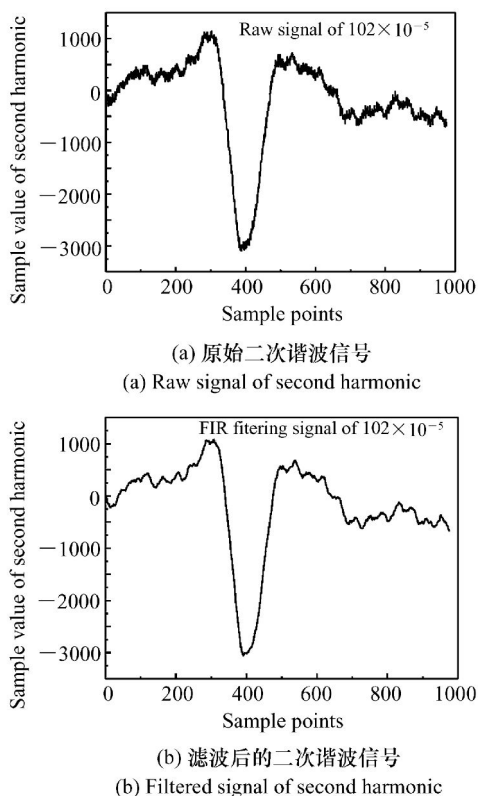


图 5 FIR 滤波器 DSP 仿真图 (CO 浓度为  $102 \times 10^{-5}$ )

Fig.5 Simulated figures of FIR filter with DSP (Volume concentration of CO:  $102 \times 10^{-5}$ )

波效果,对二次谐波信号波形进行较好的平滑处理,达到了滤波的目的。实际测试表明,在激光气体分析仪嵌入式系统中,本算法运算时间较短,一组二次谐波数据经过滤波至结束需要 230 ms,能够满足激光气体分析仪的实时在线检测的需求。

## 6 结 论

通过 MATLAB 仿真结果以及激光气体分析仪的实际运行结果可以看出,基于加布莱克曼窗的 FIR 滤波器不仅在 MATLAB 仿真中得到较好的滤波效果,而且将 MATLAB 滤波算法移植到 DSP 中也能够对含有噪声的二次谐波信号进行平滑去噪。

本文设计的基于 FIR 的数字滤波器,除了具有稳定性强、滤波效果好、运算时间短等优点外,由于算法结构简单,在算法移植方面,只需根据不

同的信号特性修改滤波器参数,并对程序作较少的改动,即可实现不同截止频率的低通滤波器,算法移植性较强。在工业现场利用激光气体分析仪监测污染气体时,本滤波方法可方便地应用到不同浓度、不同气体的探测中。将本文的研究结果

应用到激光气体分析仪中进行系统测试,取得了良好的效果。实验结果表明:1 000 组数据点的 FIR 数字滤波器算法运算时间为 230 ms,能够满足激光气体分析仪的实时在线检测的要求。

#### 参考文献:

- [1] HINKLY E D. High-resolution infrared spectroscopy with a tunable diode laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, 16(9): 351-354.
- [2] REID J, SHEWCHUN J, GARSIDE B K, *et al.*. High sensitivity pollution detection employing tunable diode lasers[J]. *Appl. Opt.*, 1978, 17(2): 300-307.
- [3] 陈星旦, 高静, 丁海泉. 论无创血糖监测的红外光谱方法[J]. *中国光学*, 2012, 5(4): 317-326.  
CHEN X D, GAO J, DING H Q. Infrared spectroscopy for non-invasive blood glucose monitoring[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 317-326. (in Chinese)
- [4] 郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状[J]. *中国光学*, 2011, 4(6): 546-561.  
ZHENG Y Q. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 546-561. (in Chinese)
- [5] 潘卫东, 张佳薇, 戴景民, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱技术检测痕量乙烯气体的系统研制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(10): 2875-2878.  
PAN W D, ZHANG J W, DAI J M, *et al.*. Tunable diode laser absorption spectroscopy system for trace ethylene detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Anal.*, 2012, 32(10): 2875-2878. (in Chinese)
- [6] 周海金, 刘文清, 司福祺, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光抑制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2331-2337.  
ZHOU H J, LIU W Q, SI F Q, *et al.*. Stray light suppression of space-borne differential optical absorption spectrometer for monitoring atmospheric trace gas[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2331-2337. (in Chinese)
- [7] 朱君, 李志全, 孙宇超. 大运动量后呼出气体主要成分检测系统的设计与研究[J]. *光学与光电技术*, 2012, 10(2): 42-46.  
ZHU J, LI ZH Q, SUN Y CH. Main ingredients of breath gas detection system design and research after great exercise[J]. *Opt. Optoelectronic Technol.*, 2012, 10(2): 42-46. (in Chinese)
- [8] 涂兴华, 刘文清, 王铁栋, 等. 基于可调谐二极管激光吸收光谱学对二次谐波检测噪声分析研究[J]. *量子电子学报*, 2006, 23(4): 522-526.  
TU X H, LIU W Q, WANG T D, *et al.*. Noise analysis of second-harmonic detection with tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2006, 23(4): 522-526. (in Chinese)
- [9] LELEUX D P, CLAPS R, CHEN C, *et al.*. Applications of Kalman filtering to real-time trace gas concentration measurements[J]. *Appl. Phys. B*, 2002, 74(1): 85-93.
- [10] 张帅, 刘文清, 张玉钧, 等. 数字滤波方法在 TDLAS 气体检测中的应用[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1362-1367.  
ZHANG SH, LIU W Q, ZHANG Y J, *et al.*. Application of digital filtering to the gas monitoring with TDLAS[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1362-1367. (in Chinese)
- [11] KAN R F, LIU W Q, ZHANG Y J, *et al.*. Application of  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$  filtering to real-time atmosphere methane concentration measurement[J]. *Chinese Phys.*, 2006, 15(6): 1379-1385.
- [12] 邹得宝, 陈文亮, 杜振辉, 等. 数字滤波方法在 TDLAS 逃逸氨检测中的选用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(9): 2322-2336.  
ZOU D B, CHEN W L, DU ZH H, *et al.*. Selection of digital filtering in the escaping ammonia monitoring with TDLAS[J]. *Spectroscopy and Spectral Anal.*, 2012, 32(9): 2322-2336. (in Chinese)

- [13] PETER W. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors[J]. *Spectrochimica Acta Part A*,1998 (54):197-236.
- [14] MITRA S K. 数字信号处理[M]. 北京:电子工业出版社,2006.  
MITRA S K. *Digital Signal Processing*[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2006. (in Chinese)
- [15] 尹传历,李嘉全. 基于位平面的嵌入式超光谱图像压缩系统[J]. 液晶与显示,2012,27(2):245-249.  
YIN CH L,LI J Q. Embedded hyper-spectral image compression system based on bit-plane[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*,2012,27(2):245-249. (in Chinese)
- [16] 刘陵顺,高艳丽,张树团,等. TMS320F28335 DSP 原理及开发编程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.  
LIU L SH,GAO Y L,ZHANG SH T,et al. . *The Principle and Development Programming of TMS320F28335 DSP*[M]. Beijing:Beihang University Press,2011. (in Chinese)

#### 作者简介:



王洪涛(1988—),男,河北唐山人,硕士研究生,2011年于燕山大学获得学士学位,主要从事气体分析、信号获取与处理等方面的研究。E-mail:hebeiwanghongtao@126.com



黄鸿(1980—),男,湖南新宁人,博士,副教授,硕士生导师,2002年于重庆大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事图像处理、遥感影像智能化处理和信号测量与分析等方面的研究。E-mail:hhuang.cqu@gmail.com



黄云彪(1967—),男,重庆人,硕士,高级工程师,2002年于重庆大学获得工程硕士学位,主要从事自动控制、仪器仪表等方面的研究。E-mail:hybmail@163.com