

De-Noising of the Infrared Sensors Made from PMN-PT Based on Wavelet Transform*

YIN Xiaomin^{1,2}, XU Tingting³, ZHANG Hua^{1,2}, JING Weiping^{1,2*}, LU Huaxiang^{1,2}, LI Yanjin^{1,2}

(1. Jiangsu Provincial Key LAB of ASIC Design, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, China;
2. State Key Laboratory of Transducer Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
3. Alcatel-Lucent, shanghai 201206, China)

Abstract: The relax-based ferroelectric single crystals material (PMN-PT) shows perfect piezoelectric and pyroelectric performance. It has more sensitivities and noises than sensors made from InGaAs. We analyze the characteristics of white noise, 1/f noise and some other noises in the infrared sensor; simulate the model of readout signal with those noises at 0 dB. We decompose the readout signal with db4 and dealt the detail coefficients with the improved threshold. Finally we validate the method by the actual signal. The noise of actual signal is reduced by wavelet transform through FPGA. The result shows that the SNR of the signal after de-noising is improved 15 dB and the performance of infrared sensors is improved.

Key words: infrared sensors; PMN-PT; wavelet transform; 1/f noise; white noise

EEACC: 7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.11.017

基于小波变换的 PMN-PT 红外传感器读出信号降噪处理*

殷晓敏^{1,2}, 徐婷婷³, 张 华^{1,2}, 景为平^{1,2*}, 鲁华祥^{1,2}, 李言谨^{1,2}

(1. 南通大学江苏省专用集成电路设计重点实验室, 江苏 南通 226019;
2. 中国科学院传感技术联合国家重点实验室, 上海 200050;
3. 上海贝尔股份有限公司, 上海 201206)

摘 要: 由于弛豫铁电单晶(PMN-PT)优异的压电效应和热释电效应,使得它对外界的干扰更加敏感,制成传感器后会比 InGaAs 等材料产生更多的噪声。针对 PMN-PT 红外传感器读出信号中的白噪声、1/f 噪声及其他一些噪声的产生机理、特点进行了分析与研究,利用计算机仿真出了带有白噪声和 1/f 噪声、信噪比为 0 dB 左右的读出信号模型。采用 db4 正交小波基对读出信号进行分解,并使用改进的阈值对小波细节系数进行处理,达到降噪的目的。使用 FPGA 实现了对实测信号的小波去噪,结果表明,降噪后信噪比提高了 15 dB,提高了红外传感器的性能。

关键词: 红外传感器;PMN-PT;小波变换;1/f 噪声;白噪声

中图分类号 TN911.7

文献标识码:A

文章编号:1004-1699(2010)11-1599-06

红外焦平面探测器是由光敏元和读出电路组成的,光敏元由于制备的热释电材料的不同而产生的性能也不同。我国率先研制出了一种以 $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ (PMN-xPT, PMN-PT) 为代表的弛豫铁电单晶,这种材料对红外线的吸收大,具有较高的电流响应优值、电压响应优值和探测优值;在宽的频率及温度范围内具有大的热释电响应等综合性能,远远优于传统的热释电材料^[1]。将其制成的红外探测器具有探测优值高、性能稳定和功耗低等优点,但是也带来了更多干扰和噪声。

读出电路的性能直接影响探测器读出信号的质量,

不同的电路结构产生的噪声种类也不同。国内外不少专家都在致力于研究新技术、新电路以提高读出电路的性能,从而希望能提高探测器输出信号的信噪比。但是由于电路中半导体器件本身的噪声与集成电路制作工艺的缺陷,增加降噪电路难免会带来新的噪声;而且使用相关双采样电路降噪存在局限性,它只能去除某些噪声,并不能去除所有的噪声^[2]。

小波变换的特点是能够同时对信号的频域和时域进行分析。将小波变换应用到弛豫铁电红外探测器的降噪上,其优点是:①分析了新型材料带来的噪

项目来源:国家自然科学基金重点项目资助(60837003);传感技术联合国家重点实验室基金课题资助(Skt0804);南通市科技局 2009AA 科技创新计划(工业)资助(AA2009024)

收稿日期:2010-03-12

修改日期:2010-07-19

声特点;②简化了读出电路的结构;③使用改进的小波阈值对信号进行处理,获得了比传统滤波更高的信噪比;④用FPGA可以验证小波去噪算法的可行性。本文提出用小波变换方法来降低读出信号的噪声,采用db4正交小波基对读出信号分解,并使用改进的阈值对小波细节系数进行处理,以达到降噪的目的。使用FPGA实现了对实测信号的小波去噪,结果表明,降噪后信噪比提高了15 dB,提高了红外传感器的性能。

1 读出信号特点分析

整个弛豫铁电红外探测器分为两部分,一是光敏元,二是读出电路部分。其中光敏元是将红外辐射转换成电信号;读出电路是实现形成的电信号进行放大、初步去噪等功能。两部分在工作时都会产生噪声,分析它们噪声生成的机理、研究噪声的特点能帮助更好地去除噪声。

1.1 光敏元部分信号特点

红外探测器信号是由弛豫铁电单晶的热释电效应产生的,热释电效应是温度变化引起晶体电极化的改变。当晶体的温度变化时,晶体的自发极化强度也随之发生改变,由于面束缚电荷来不及被中和,与极化强度方向垂直的晶体表面就会出现多余的自由电荷,晶体的自发极化强度或面束缚电荷密度必然以同样的频率变化,并产生电场^[1]。这一电场即得到的信号,通过信号放大器放大就可以被观察到。

光敏元部分存在的噪声包括温度噪声、介电损耗噪声、电阻器噪声和其他一些噪声。

根据上海硅酸盐研究所的研究成果,当黑体的频率调制到10 Hz时,热释电性能较好,输出信噪比最高的时候,弛豫铁电单晶中的温度噪声占主要地位。温度噪声是材料通过热传导和热辐射与环境进行热交换时,产生的材料温度无规则起伏,噪声电压为:

$$V_T = \frac{R_V}{\eta} \cdot (4kT^2 g_R)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中 η 为辐射吸收系数, k 为波尔兹曼常数, T 为材料的温度, R_V 为电压响应率, g_R 为探测器单位面积辐射传导率。

1.2 读出电路部分信号分析

读出电路的结构有多种,不同的结构所产生的噪声也不同。本文讨论电路输入级为源随器读出电路结构,其读出信号中的噪声主要有散粒噪声,1/f噪声、热噪声等^[3-4]。电路中仅一个单路运算放大器,噪声低、精度高、功耗低。

散粒噪声是由于载流子各自独立而随机地通过势垒所引起的噪声,其功率谱密度为:

$$S_I(f) = 2qI \quad (2)$$

式中, q 为载流子电量, I 为电流。

由式(2)可知散粒噪声功率谱密度与频率无关,属于白噪声。然而,该式仅在中低频范围内有效,在高频区,散粒噪声将随频率的上升而增加^[5]。结合本文的实际应用,弛豫铁电材料的辐射调制频率为10 Hz时信噪比最高,处于低频区,在处理的过程中可把散粒噪声归为白噪声处理。

1/f噪声存在于所有有源器件中,对于半导体器件,它与载流子散射几率的涨落有关。它是一种低频噪声,主要出现在1 kHz以下。1/f噪声是一类具有长程相关性、自相似性以及非平稳性的随机噪声。其功率谱密度为:

$$S_V(f) = Af^\beta / f^\gamma \quad (3)$$

式中, I 为通过器件的电流, f 为频率;参数 A 由器件结构特性决定;常数 $\gamma = 0.8 \sim 1.2$,典型值为1.0; $\beta = 2.0$ (均匀材料)或 $1.0 \sim 2.0$ (结构较复杂的器件)。在一个相当宽的频率范围内,1/f噪声的功率谱密度与频率成反比^[5]。

热噪声是由于温度变换引起的晶体表面电子不规则运动而产生的电压噪声。热噪声电压功率谱密度表达式为:

$$S_V(f) = 4kTR \quad (4)$$

式中, k 为波尔兹曼常数, R 为电阻。可以看出热噪声电压功率谱密度与频率无关,即属于白噪声。

2 小波变换

小波去噪是通过低通滤波器和高通滤波器将信号的频谱分解到不同的频率范围,从而得到一个个的子带信号;又由于正交变换具有去除信号中的相关性和信号能量集中的功能,因此,通过小波变换就把信号的能量集中到某些频带的少数系数上。通过将其他频带上的小波系数置零或是给予小的权重,即可达到有效抑制噪声的目的^[6]。

2.1 算法简介

给定平方可积的信号 $x(t)$,即 $x(t) \in L^2(R)$,则 $x(t)$ 的小波变换(Wavelet Transform, WT)定义为

$$\begin{aligned} \text{WT}_x(a, b) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt = \\ &= \int x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt = \langle x(t), \psi_{a,b}(t) \rangle \end{aligned} \quad (5)$$

式中 b 是时移, a 是尺度因子, $\psi(t)$ 为基本小波。其中

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (6)$$

$\psi_{a,b}(t)$ 是母小波经移位和伸缩所产生的一组函数,称之为小波基函数。

平稳白噪声的小波变换仍然是平稳的白噪声,带加性噪声的信号经过小波变换后能在最大程度上去除其相关性^[6]。

2.2 小波阈值去噪

在弛豫铁电单晶红外探测器读出信号中,1/f 噪声功率谱在低频段(小于 1 kHz)尤为明显,而白噪声功率谱遍布整个频率范围。由于 1/f 噪声是一类具有长程相关性、自相似性以及非平稳性的随机噪声。其非平稳性要求进行时间分析,自相似性又要求进行尺度分析,而小波的多分辨率兼具有时频分析和尺度分析的功能,因此成为研究 1/f 噪声的良好工具^[6]。而白噪声经过小波分解以后在各层系数中的分布也是不相关的,可以通过这一特点达到消噪的目的。

假设输入的有用信号模型为 $s(t) = A\sin(2\pi\omega t)$, 经过红外探测器读出电路放大以后的信号为:

$$x(t) = B\sin(2\pi\omega t) + w(t) + f(t) \quad (7)$$

式中 $w(t)$ 表示均值为零的高斯白噪声, $f(t)$ 表示 1/f 噪声^[7]。

小波去噪的过程为:

(1)小波分解 选择正交小波基函数,对信号进行 N 尺度正交小波分解,得到各个尺度的小波系数^[8]。

(2)阈值滤波 确定各个尺度下高频细节信号的阈值,进行量化处理。选取阈值的公式为:

$$th_j = \gamma \cdot \sqrt{\text{median}(|d_j(k)|)}/0.6745 \times \sqrt{2\ln(\text{length}(d_j(k)))/\ln(j+1)} \quad (8)$$

其中 γ 为噪声功率谱参数, $d_j(k)$ 为第 j 层小波细节系数, j 为小波分解的尺度。

本文在阈值的选取方法上进行改进,小波固定阈值为 $th = \gamma \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\ln(\text{length}(d_j(k)))}$, σ 为噪声的标准偏差。估计噪声的方法是取细节系数在各个尺度下绝对值的中位数值 $\text{median}(|d_j(k)|)$,然后将该中位数除以常数 0.6745 作为该尺度下细节系数中噪声强度的估计,即 $\sigma = \text{median}(|d_j(k)|)/0.6745$ ^[9]。由于在红外探测器读出信号中不仅含有一些已知热噪声、散粒噪声和 1/f 噪声,而且含有更多未知种类的噪声,如果只计算已知噪声的标准就不能很好地降噪,所以本文采用了计算细节系数在各尺度下的中位数值再除以 0.6745 作为噪声的标准差,这

样对于未知的噪声也能起到降噪作用。

针对热释电红外探测器读出信号中的噪声在各个尺度上的分布特点,在不同的尺度取不同的阈值,即 $th/\ln(j+1)$ ^[10]。即随着尺度 j 的增大,阈值逐渐减小,使得与噪声在小波变换各尺度上的传播特性相一致。最后使用软阈值法对各层细节系数进行修正,其公式为: $g_j(k) = \text{sgn}(d_j(k)) \cdot (|d_j(k)| - th_j)$ 。

(3)小波重构。利用阈值处理后的第一层至第 N 层的细节系数和第 N 层逼近系数进行重构,得到降噪后的信号。

2.3 算法的 FPGA 实现

小波的实质是正交镜像滤波器组,如图 1,图 2 所示。

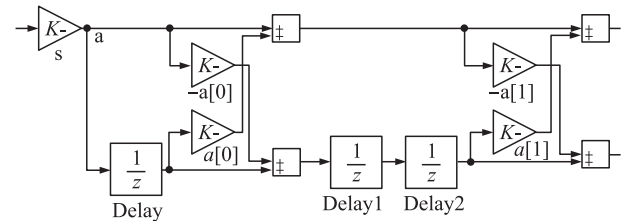


图 1 db4 小波滤波器网格实现

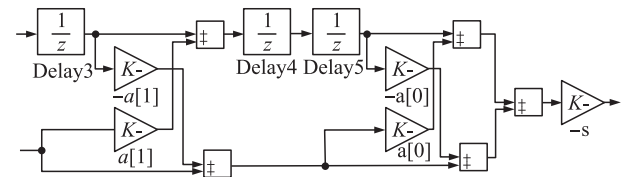


图 2 镜像滤波器的实现

小波变换的滤波器系数为^[11]

$$G(z) = (1 + a[0]z^{-1} - a[0]a[1]z^{-2} + a[1]z^{-3})s$$

$$H(z) = (-a[1] - a[0]a[1]z^{-1} - a[0]z^{-2} + z^{-3})s \quad (9)$$

其中 $s = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$, $a[0] = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}s}$, $a[1] = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}s}$, 而镜像滤波器的构造必须满足^[12]: $G(-z) = -H(z)$, $H(-z) = \hat{G}(z)$, 计算得图(2)中逆滤波系数为:

$$\hat{G}(z) = (a[1] - a[0]a[1]z^{-1} + a[0]z^{-2} + z^{-3})(-s)$$

$$\hat{H}(z) = (1 - a[0]z^{-1} - a[0]a[1]z^{-2} - a[1]z^{-3})(-s) \quad (10)$$

这种结构可以直接转换成硬件。

输入信号通过图(1)中的滤波器组分解成高频系数和低频系数,通过改变高频系数的权重来减少噪声分量。

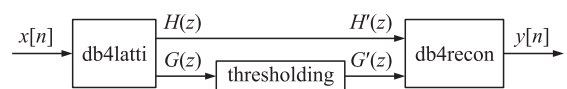


图 3 小波变换原理框图

3 小波降噪结果及分析

3.1 信号模型仿真

热释电红外探测器读出信号模型为 $x(t) = s(t) + w(t) + f(t)$, $s(t)$ 为正弦信号和 heavy sine 信号拼接而成的原始信号模型, 其长度为 2006 点, 采样间隔为 0.0001 s, 如图 4 所示。

读出信号模型为在原始信号模型上加上白噪声和 $1/f$ 噪声, 信噪比为 0 dB 左右, 如图 5(a) 所示。噪声的功率谱密度如图 5(b) 所示, 从功率谱密度图中可以看出原始信号的能量集中在 70 Hz 以下, 因

而采用 5 尺度小波分解, 使得低频逼近信号的带宽在 0 ~ 62.69 Hz。

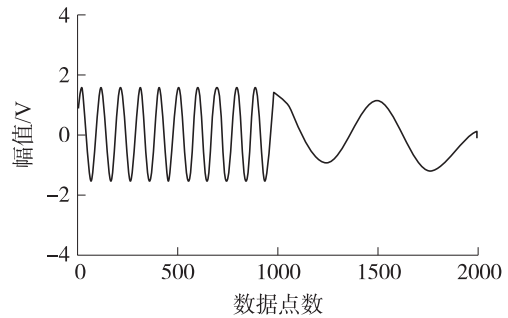
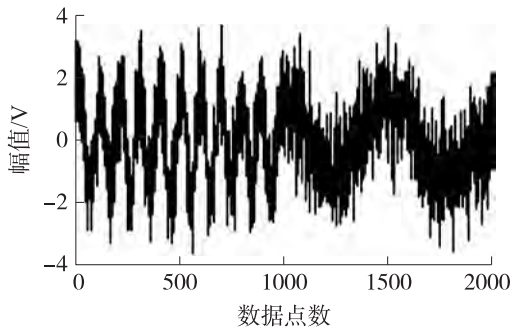
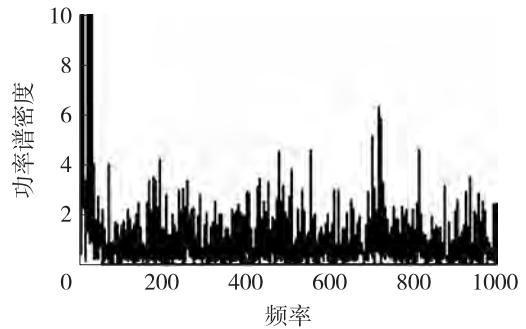


图 4 不带噪声的原始信号



(a) 带有自噪声和 $1/f$ 噪声的读出信号

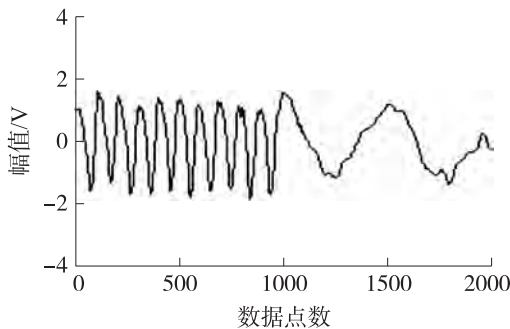


(b) 读出信号的功率谱密度

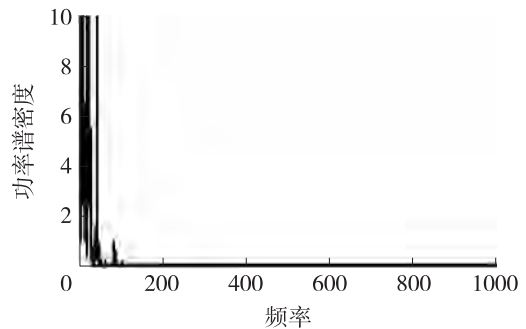
图 5 带自噪声和 $1/f$ 噪声的读出信号及功率谱密度

对图 5(a) 带噪的信号用 db4 小波进行 5 层分解, 选取噪声功率谱参数 γ 为 1.0。小波去噪后的信号如图 6(a) 所示。小波去噪后噪声的功率谱密度如图 6(b) 所示。根据信噪比公式 $20 \log(V_s/V_n)$, 计算得

到小波降噪后信号的信噪比提高了 15 dB。通过信号模型可以看出小波变换降噪的方法可以降低信号中平稳或非平稳的加性噪声, 能够最大程度地还原信号的本来面目。接下来研究实际信号的小波去噪情况。



(a) 小波去噪后的信号



(b) 去噪声信号的功率谱密度

图 6 小波去噪后的信号及其功率谱密度

3.2 实际信号处理实验

弛豫铁电单晶红外探测器的实际读出信号如图 7(a) 所示, 采样长度为 2500 点, 采样频率为 10 MHz。噪声的功率谱密度如图 7(b) 所示。由图 7(b) 可得信号的能量集中在 70 Hz 以下, 采用 5 尺度小波分解, 使得低频逼近信号的带宽在 0 ~ 62.69 Hz, 噪声功率谱参数 γ 为 0.4。小波降噪处理后的信号如图 8(a) 所示, 小波降噪后的噪声的功率谱密度如图 8(b)

所示。

由于图 7(a) 中的实际信号是经过带有低通滤波器的读出电路放大器放大以后得到的, 使得信号的信噪比较图 5(a) 模型中的高。从图 8 可以看出, 小波降噪后噪声的功率谱在 70 Hz 之内, 最大幅值为 6 dB/Hz。利用小波的多分辨率分析的特点对红外焦平面读出信号做降噪处理有很好的效果, 小波降噪后信号的信噪比提高了 11 dB。

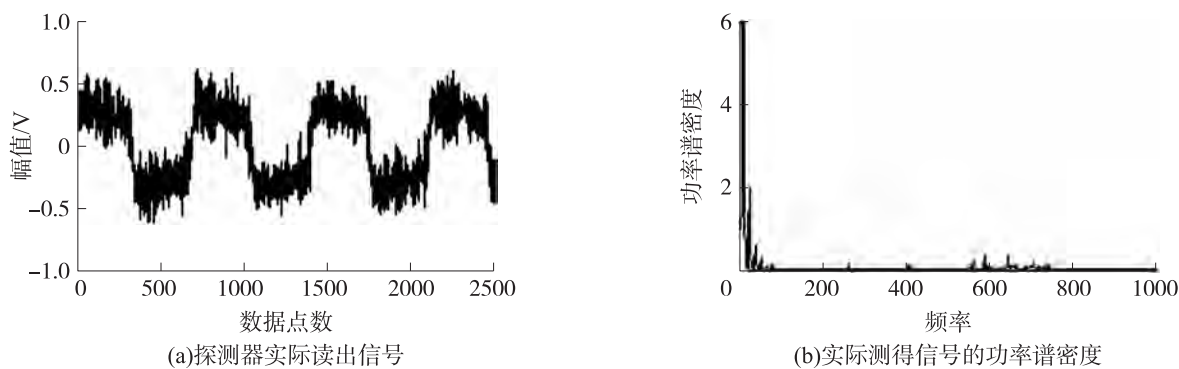


图 7 探测器实际读出信号及其功率谱密度

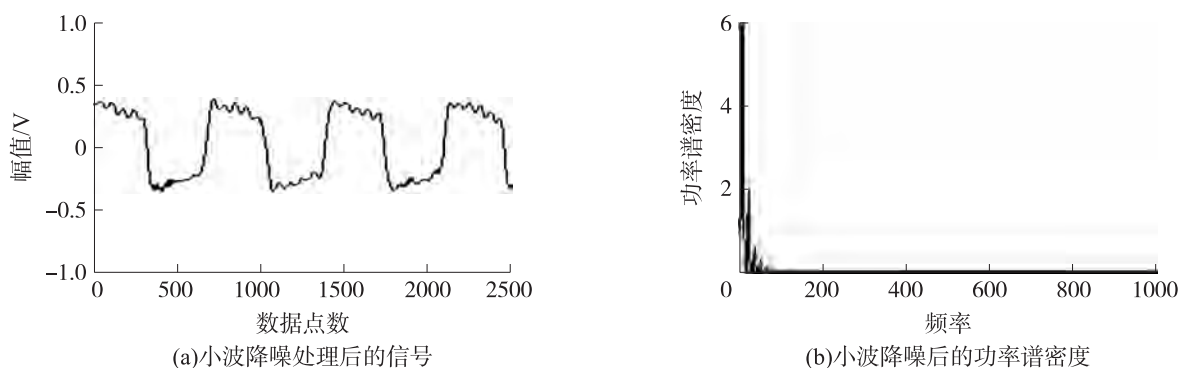


图 8 小波降噪后的信号及其功率谱密度

3.3 硬件测试结果

本文选择 Quartus II 作为开发环境, FPGA 采用 ALTERA 公司 cyclone II 系列的 EP2C35。通过 signal tap 获得了硬件仿真图, signal_wire 为实际噪声信号的一部分, dac_data_o 为经过小波变换去噪后的波形。可以看出噪声有所改善, 说明了采用基于小波变换的弛豫铁电红外读出信号的降噪具有可实现性。

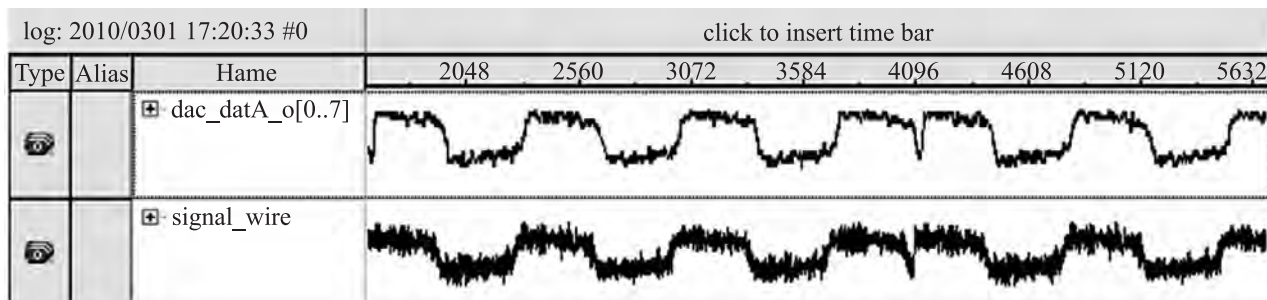


图 9 小波去噪的 FPGA 实现

4 结论

本文对弛豫铁电红外探测器中的温度噪声、热噪声、散粒噪声以及 $1/f$ 噪声作了分析与研究。针对弛豫铁电红外探测器中噪声的特点, 采用小波变换来降低信号中的噪声含量。结果表明: $1/f$ 噪声主要表现在 1 kHz 以下, 而白噪声在整个频谱范围内均有分布, 小波变换可以通过频域上的多层分解, 然后在各频域段进行阈值消噪, 达到了信噪分离的目的, 且具有硬件的可实现性。FPGA 的实现为该传感器的大规模数字化应用打下了基础。

参考文献:

- [1] Tang Yanxue, Zhao Xiangyong, Feng Xiqi, et al. Pyroelectric Properties of [111] - Oriented $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3$ Crystals[J]. Appl Phys Lett, 2005 (86): 082901.
- [2] 潘银松, 张仁富, 汪瑛, 等. 一种低噪声的生物微传感器 CMOS 读出电路研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(6): 776 - 780.
- [3] Johnson J F. Hybrid Infrared Focal Plane Signal and Noise Model [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1999, 46(1): 96 - 108.
- [4] LI Yaoqiao, Zhu Hui, LI Xue, ed al. Design and Simulation of A 512×1 Readout Circuit for Focal Plane Array[C]//SPIE, 2007, 6835: 68350H - 1 - 68350H - 11.

- [5] 刘俊,张斌珍. 微弱信号检测技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005:31-39.
- [6] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社,2004:397-405.
- [7] 李光,于盛林. 基于小波变换的拟 $1/f$ 信号生成[J]. 数据采集与处理,2003(3):119-122.
- [8] 王爱萍,王惠南. 基于小波分析的 $1/f$ 噪声降噪[J]. 数据采集与处理,2006,21(2):217-220.
- [9] 蒋庆仙,吴富梅. 基于小波阈值消噪的光纤陀螺信号的抗差估计[J]. 传感技术学报,2009,22(11):1596-1601.
- [10] 赵瑞珍,宋国乡. 一种基于小波变换的白噪声消噪方法的改进[J]. 西安电子科技大学学报,2000,27(5):619-622.
- [11] BAESE M. 数字信号处理的FPGA实现[M]. 刘凌,译. 2版. 北京:清华大学出版社,2006:183-201.
- [12] 贾维敏,姚敏立. 双通道滤波器组与小波变换[J]. 核电子学与探测技术,2004,24(3):249-252.



殷晓敏(1984-),女,硕士研究生,主要研究方向为光信息传输与处理;



景为平(1954-),男,工学硕士,南通大学江苏省专用集成电路设计重点实验室研究员,博士生导师,主要研究方向集成电路设计,主持过多个国家级和省级科研项目,并发表论文几十篇, jing.wp@ntu.edu.cn。