

基于FPGA的大地震前兆传感信号采集模块

韩朝相¹, 雍珊珊¹, 郑文先², 曾敬武¹, 林科¹, 张国新², 王新安¹

(1. 北京大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055;

2. 深圳市微纳集成电路与系统应用研究院, 广东 深圳 518055)

摘要:大地震的孕育和发生,是地下能量聚集然后突然释放的过程,必然伴随着明显的征兆。文中介绍了一种用于大地震临震预测的微观前兆综合检测系统中的传感信号采集模块,该模块包括多路传感信号的采集、数据读取、数据打包及发送和传输管理,以及传感器采集电路的时钟和使能信号产生模块。其中传感信号采集包括加速度采集、温度采集、地声采集和电磁传感器采集,地声采集和电磁传感器采集电路包括接口电路、滤波器组、数据写入组和存储器组。该模块在FPGA上实现,执行速度相对较快,足以处理多路、大批量的传感信号数据,并且适应性较强,稳定性高,在地下等较为恶劣的环境中能够长期保持正常工作,该模块还易于调试和升级,简化了开发流程,缩短了开发周期。

关键词:临震预测;前兆信息;信号处理;FPGA

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)12-0001-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.12.001

Sensor Signal Acquisition Model of Violent Earthquake Precursor Based on FPGA

HAN Chao-xiang¹, YONG Shan-shan¹, ZHENG Wen-xian², ZENG Jing-wu¹,

LIN Ke¹, ZHANG Guo-xin², WANG Xin-an¹

(1. Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China;

2. Shenzhen Micro & Nano Research Institute of IC and System Applications, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The formation and occurring of violent earthquake is a process of energy gathering and emission. During this process, it emits strong precursor. A sensor signal acquisition model of comprehensive monitoring system of microscopic precursors is proposed. It is composed of multi-signal acquisition, data reading, data packaging & sending, transfer management and generation model of clock and enable signal. The circuit of signal acquisition includes acceleration acquisition, temperature acquisition, geo-sound acquisition and electromagnetic radiation acquisition. There are four parts in the acquisition of geo-sound and electromagnetic radiation, and they are interface circuit, filters, write memories and memories. The function of sensor signal acquisition model is implemented on FPGA which is faster and enough to handle large amounts of multi-channel sensor signal data. The adaptability and the high stability enable the system to maintain long-term normal working in the ground and other more hostile environment. In addition, it is easier to debug and update software which simplifies the development process and shortens the development cycle.

Key words: imminent earthquake prediction; precursor; signal processing; FPGA

0 引言

我国是个大地震多发的国家^[1],地震对我国经济建设造成了极大的破坏,给人民生命财产造成了巨大损失。地震的孕育和发生是地下能量聚集然后突然释放的过程,比较被广泛接受的地震孕育的机理是

基于板块运动在边界处的挤压而导致的地壳或岩石圈块体内由于应力积累到一定程度时突然快速释放的过程^[2]。临震预测^[3]是通过捕捉前兆现象给出预测,前兆现象如应力变化、电磁场以及电磁辐射变化、地声、地温、地下流体变化等。针对各种前兆现象捕捉的研

收稿日期:2015-03-19

修回日期:2015-06-25

网络出版时间:2015-11-19

基金项目:深圳市战略新兴产业发展专项资金项目(JCYJ20130329113052637)

作者简介:韩朝相(1991-),男,硕士生,研究方向为集成电路设计与嵌入式系统设计;王新安,教授,主要从事数模混合集成电路可重构算子设计方法,以及传感器器件及集成技术研究。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20151119.1110.038.html>

究不仅在理论上,还是监测仪器上都进行了广泛的讨论和研究^[4-11]。然而到目前为止,还没有行之有效的方案可以对地震进行准确的预测。

在四川汶川发生 8.0 级特大地震前后,离汶川最近的姑咱台分量钻孔应变仪就记录到延续 3 年多的“潮汐畸变”、“压性脉冲”应变异常^[12]。由于单个台站的异常无法作为判断的依据,在开始搭建新的监测点时地震就发生了。如果当时有更多的台站布设在汶川附近,多个台站同时监测,很有可能捕捉到这次地震^[13-14]。笔者认为,地震预测的难点在于目前没有行之有效的能够密集布设监测点的技术手段。目前我国地震仪均存在体积大、成本高的问题,不适宜密集布设监测点。同时监测台站搭建存在选址难、建设成本高、占地面积大、需人工看守等问题^[15]。

所以,提出了一种可密集布设、适用于大地震临震预测的微观前兆综合监测系统。通过深孔放置在基岩附近绕过地表的影响,直接监测来自地下的地震前兆信息,包括加速度、地声、地温和电磁辐射四种物理量。针对该系统中的传感信号采集模块的设计和实现进行介绍,包括多路传感信号的采集、写入存储、读出以及传输等。

1 一种适用于大地震临震预测的微观前兆综合监测系统 AETA

大地震临震预测的微观前兆综合监测系统 AETA 由传感探头和数据处理终端组成。传感探头完成加速度、地温、地声和电磁辐射传感信号的采集,并将采集的数据通过光缆传输至数据处理终端进行数据处理和分析。传感探头的结构如图 1(a) 所示,外形为锥形底座的圆柱形结构,传感器包括加速度传感器组、地温传感器组、地声传感器组和电磁辐射传感器,电路系统包括模拟信号调理电路和数字采集部分,其中数字采集部分即文中将详细进行介绍的基于 FPGA 的前兆信号采集模块。数据处理终端如图 1(b) 所示,包括基于嵌入式平台的数据处理和分析模块、供电模块、3G 路由器、蓄电池等。传感探头将获得原始传感信号通过光缆传送至数据处理终端,数据处理终端将原始数据进行分析和处理后将结果通过无线 3G 网络发送至数据中心,进行区域性的统计分析。

该系统可密集布设,通过在地震频发区域密集布设构成监测网络,可实时发现该区域在地震孕育和发生过程中的异常信号,用于地震机理研究和地震预测。

图 2 给出了微观前兆综合监测系统 AETA 构成的监测网络和安装方式。

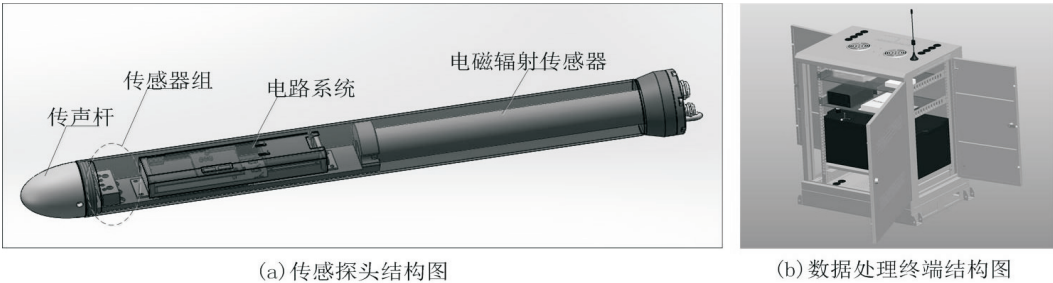
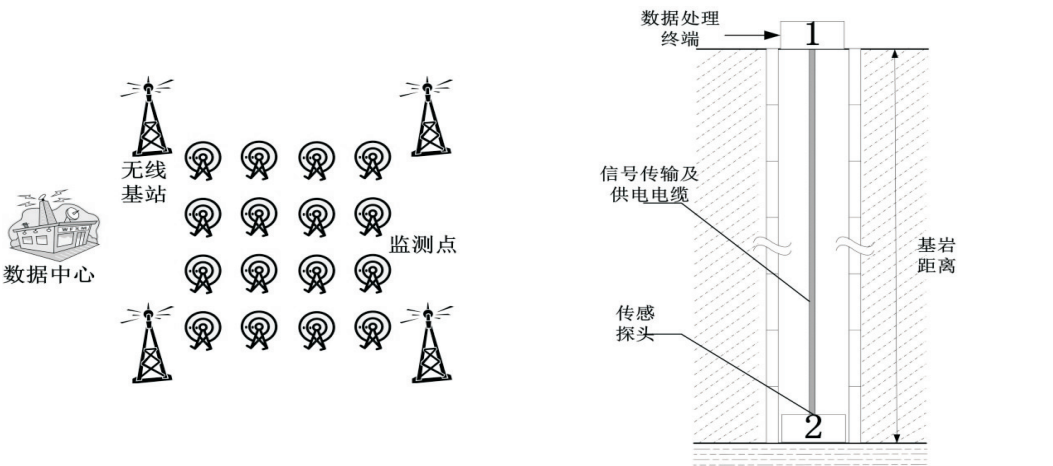


图 1 微观前兆综合监测系统 AETA



(a) 基于微观前兆综合监测系统的监测网络 (b) 基于微观前兆综合监测系统的安装方式

图 2 微观前兆综合监测系统 AETA 构成的监测网络和安装方式

传感探头通过深孔放置在基岩附近,消除地表人为干扰,以及不同地区土壤结构不同带来的地震前兆

信号特性的差别。数据处理终端放置在地上,通过电缆给传感探头供电,通过光缆实现地下地上数据传输。

监测网络共享一个数据中心,该数据中心对各监测点的数据进行大数据存储^[16]与分析^[17],挖掘前兆信号与地震机理的相关性。

2 基于 FPGA 的传感信号采集模块

传感探头的电路系统包括模拟信号调理电路和数字采集部分,本节对数字采集的设计和实现进行介绍。数字采集电路的功能包括将来自传感器的原始信号变成数字信号并放入本地缓存中,由传输管理模块控制数据读取模块按照一定的顺序将传感数据送到数据打包和发送模块,最后将一定格式的数据通过光缆接口

传输至数据处理终端。

如图 3 所示,四路传感数据采集包括加速度采集、温度采集、地声采集和电磁辐射采集。其中地声采集和电磁辐射采集模块均由接口电路、滤波器组、数据写入组和存储组组成。传输管理模块根据各路传感信号采样速度不同安排一定的传输顺序,控制数据读取模块将存储器中数据读出送至数据打包及发送模块。时钟和使能信号产生模块则为整个采集模块提供所需的时钟和使能信号。该模块在 FPGA 上实现,执行速度相对较快,适应性较强,易于调试和升级。

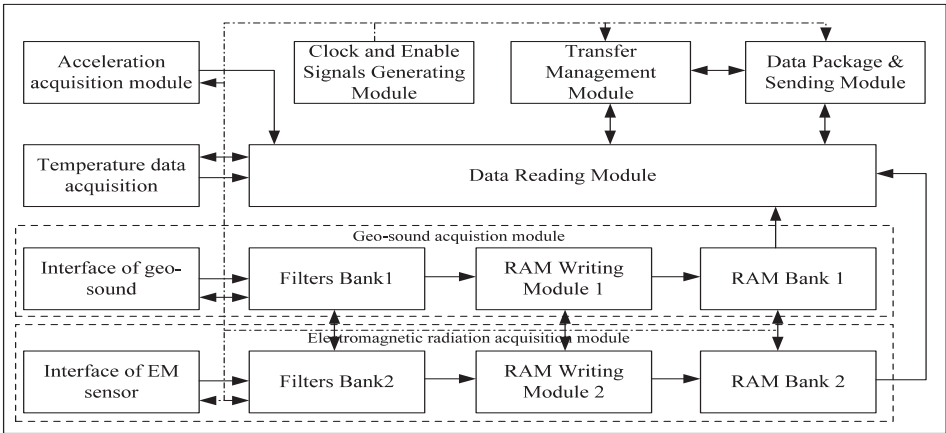


图 3 基于 FPGA 的传感信号采集模块框图

2.1 加速度采集模块

加速度的前端电路的输出为串行的数字信号,包括 x,y 和 z 轴三个数据。该模块与前端电路按照 I2C 协议进行通信并进行数据采集的控制和传输,实现了对加速度前端电路的读和写功能,每次持续采集 10 组数据。加速度采集模块包括读写管理模块和读写模块,读写管理模块在系统上电复位后,开始对加速度传感器进行初始化和工作模式的配置,然后在传输管理模块的控制下读取加速度值。

2.2 温度数据采集

温度传感器通过单总线发送指令来实现,在单线端口条件下,必须先建立 ROM 操作协议,才能进行存储器和控制操作,其工作流程为:

- (1)由总线控制器向温度传感器发送一个复位脉冲,具体为拉低总线并保持 480 μs 以上,然后释放总线;
- (2)温度传感器在接收到复位脉冲后,等待 15 ~ 60 μs ,然后发出一个 60 ~ 240 μs 的低电平作为存在脉冲表示 DS18B20 已准备就绪;
- (3)总线控制器发送 ROM 操作协议,具体包括:读 ROM,匹配 ROM,搜索 ROM,跳过 ROM,报警搜索。系统一次只开启一个温度传感器,所以直接发送跳过 ROM 的协议即可;

- (4)总线控制器向温度传感器写入操作指令,并读取温度传感器发出的数据,每次读写必须有 1 μs 以上的时间间隔。

在该系统中,对温度传感器的温度读取由温度采集模块完成,采用状态机对温度传感器进行指令操作和数据的读写。其中复位脉冲持续时间取为 500 μs ,每位数据的读/写间隔取为 5 μs ,每位数据的读/写持续时间取为 80 μs ,完成一次完整的温度数据读取所需走的流程如图 4 所示,状态定义如下:

- CMDIDLE:指令等待空闲, idle 状态;
- RSTIDLE:复位空闲,复位前 idle 状态;
- RSTPUL:复位脉冲,执行 500 μs 的复位脉冲;
- RSTWAIT:等待总线释放,释放拉低操作,等待存在脉冲到来;
- RSTPRE:存在脉冲,存在脉冲到来至存在脉冲完全过去;
- CMDFUN:功能函数,各状态功能之间转换;
- CMDDELY:指令延时,指令延时等待;
- WIREIDLE:写数据空闲,写数据前 idle 状态;
- WIREPUL:写脉冲,写数据前等待 5 μs (写每位数据之间的间隔时间);
- WIREBIT:写位,每次写入一位数据(写入最低位数据,持续时间为 80 μs);

WIRESFT:写数据移位,将数据右移一位,使得下次将写入的位到达最低位;

READIDLE:读数据空闲,读数据前 idle 状态;

READPUL:读脉冲,读数据前等待 5 μ s(读出每位数据之间的间隔时间);

READBIT:读位,每次读出一位数据(读出 LSB 数据,持续时间为 80 μ s);

READSFT:读数据移位,将数据右移一位,排在下次将读出的数据的低一位。

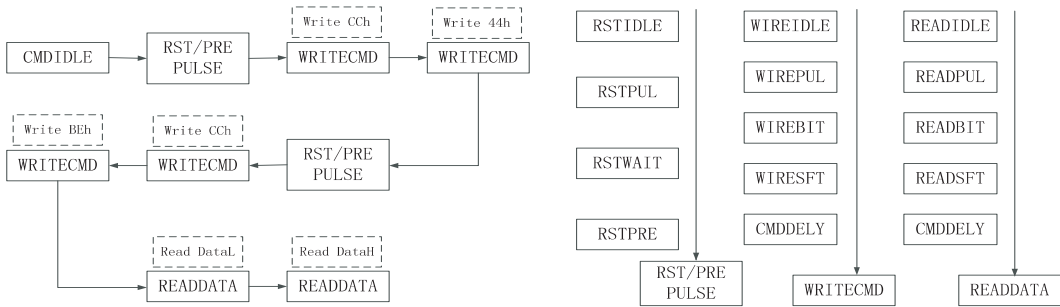


图 4 温度采集模块中状态机状态跳转流程图

2.3 地声与电磁辐射传感器的接口电路

系统中地声和电磁辐射传感器使用同一个模数转换模块,该模块的采样率为 3 M,可以满足采样需求。模数转换模块的信号为串口输出,所以需在 FPGA 上实现一个串口转并口的逻辑。当串口使能信号 CS 为低后,模数转换模块开始对输入的模拟信号进行采样

和转换,同时输出数字信号。每次输出为 16 个时钟信号周期,数据格式为:先输出两个 0 数据,再输出 12 位的转换后的数字信号数据,且高位在前,最后再输出两个 0 数据作为结尾。

2.4 数据写入模块

各路传感器数据属性统计见表 1。

表 1 各路传感器数据属性统计

序号	前兆信号	频段	数据位宽 /bits	采样率	数据点数	采集时间 /ms	<i>T</i> 传输时间 /ms	
0	电磁辐射信号	0.1 ~ 5 Hz	12	20 Hz	800	40 000	138.9	
1		5 ~ 200 Hz	12	800 Hz	640	800	113.8	
2		200 Hz ~ 10 kHz	12	40 kHz	800	20	138.9	
3		0.5 ~ 20 Hz	12	80 Hz	640	8 000	113.8	
4		20 Hz ~ 1 kHz	12	4 kHz	800	200	138.9	
5		1 ~ 50 kHz	12	200 kHz	800	5	138.9	
6	地声	50 ~ 800 kHz	12	3 MHz	800	0.27	138.9	
7		地温	—	16	2 Hz	1	500	0.356
8		加速度	—	8	50 Hz	30	20	4.267

数据写入模块的功能为将一个时间段内来自传感器的数据存储在 RAM 中。从表 1 中可以知道,系统中一共有 6 处需要数据采集模块,其中各路传感器的数据量和数据位宽均不同。为了让该模块具有通用性,所以在设计时考虑了参数化的设计方法。参数有:

一组写 RAM 的控制信号(即准备好地址、写使能和数据)。当数据采集个数达到上限,则进入等待写完成状态,否则状态不变,继续采集下一个数据;

等待写完成:当最后一个数据被写入后,跳入完成状态;

完成状态:在该状态将数据采集完成信号 ready 拉高,然后进入空闲状态。

2.5 滤波器设计

在该系统中涉及到多种滤波器的设计,针对带通滤波器,该项目采用 64 阶汉明窗的 fir 带通滤波器,而低通滤波器则采用 64 阶汉明窗的 fir 低通滤波器实现,抽取滤波器采用 4 阶梳状滤波器,25 倍降采样。借助 Matlab 中的 FDATool 获得滤波器的系数,对系数进行量化处理,系数的二进制编码采用 CSD 编码,可

D_WIDTH:数据位宽;

A_WIDTH:地址位宽;

D_NUM:数据个数;

WAIT_T:写等待时间。

功能实现时采用状态机,具体如下所述:

空闲状态:上电复位后状态机处于空闲状态,等待传输管理模块将 start 信号拉高,便进入采集状态,否则状态不变;

采集状态:在该状态下,当有效数据达到,则产生

减小系数中 1 的个数,在进行基于移位加的乘法处理中可以减小硬件消耗。

为了对设计结果进行功能验证,用 Simulink 搭建一个仿真平台,分别对比理想的滤波器和系数量化后的滤波器,对两个滤波器的结果进行频谱分析,结果一致则说明设计满足需求。

2.6 传感探头与数据处理终端的数据传输

传感探头与数据处理终端的数据传输按一定数据包格式,采用串口通过光纤传输。数据包的格式如图 5 所示,其中先导码为 16'hFFFF。

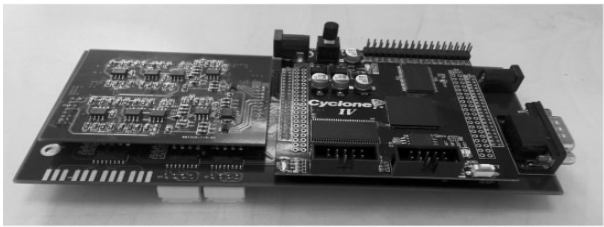
长度	16 bits	8 bits	8 bits	<i>n</i> bits	8 bits
属性	先导码	数据包字节数目	传感器序号	数据部分	字节对齐和校验

图 5 数据包格式

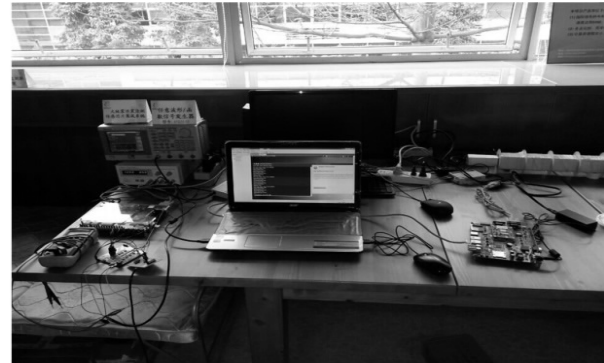
该部分的电路实现包括三个部分:传输管理、数据读取、数据打包及发送。传输管理模块采集基于最近最少传输和优先级的仲裁算法选择哪路传感器进行数据传输,当仲裁结束,则启动数据读取模块将该路传感器对应 RAM 中的数据取走,送到数据打包及传输模块按照数据包格式进行打包,并按照串口协议输出。

3 电路实现与调试

如图 6(a)所示,微观前兆综合监测系统 AETA 传感探头的电路系统由两层电路板组成,底板为模拟信号调理电路提供供电和信号输入,为 FPGA 核心板供电和接口连接电路,FPGA 核心板上采用 FPGA 为 Cyclone IV 系列。图 6(b)中,结合信号源、传感器模拟信号调理电路、FPGA 开发板、光纤接口以及嵌入式平



(a) 微观前兆综合监测系统 AETA 传感探头的电路系统



(b) 调试系统

图 6 微观前兆综合监测系统 AETA 传感探头的电路实现与调试

台,对 FPGA 上承载的信号采集功能进行仿真验证,并将结果显示在 PC 机上。实验证明,该设计正确实现了系统的功能。

4 结束语

文中介绍了一种适用于大地震临震监测的微观前兆综合监测系统 AETA,可监测地震波速、地温、地声和电磁辐射四种前兆信号,该系统满足密集布设、实时监测和抗地表干扰等特点。文中主要针对该系统的传感探头中的数字采集部分进行介绍,包括电路的基本功能和电路结构,以及实现,并搭建了功能调试的平台,该部分的基本功能调试通过。进一步的工作是完成与系统中其他部分的联合调试,并开展实地的实验。

参考文献:

[1] 张国民. 我国的地震灾害和震灾预防[J]. 科学与社会, 1999(2): 44-47.

[2] Seiya U. On earthquake prediction in Japan[J]. Proceedings of the Japan Academy, Series B, Physical and Biological Sciences, 2013, 89(9): 391-400.

[3] 陈运泰. 地震预测: 回顾与展望[J]. 中国科学, 2009, 39(12): 1633-1658.

[4] 丁 丹,倪四道,田晓峰,等. 地震相关的声音现象研究进展[J]. 华南地震, 2010, 30(2): 46-53.

[5] 田时秀. 地声和地震预报[J]. 物理, 1978, 7(1): 58-62.

[6] 李子殷,胡心康. 地声与地震相关性的初步探讨[J]. 地球物理学报, 1980, 23(1): 94-102.

[7] 陈化然,杨冬梅,李 琪,等. 1980 年以来我国电磁辐射地震前兆信息的观测与研究[J]. 中国地震, 2008, 24(2): 180-186.

[8] 希玉久. 地震电磁辐射观测是短临预测重要手段之一[J]. 国际地震动态, 2009(7): 39-46.

[9] 王冠军,李楠楠,叶 欣,等. 基于 PIC24 单片机井下温度探测电路系统设计[J]. 电子测试, 2012(7): 34-38.

[10] 刘桂生,张国育,吴怀壮,等. TDT-25 型地温传感器的设计[J]. 地震地磁观测与研究, 2003, 24(4): 56-60.

[11] 邱泽华,池顺良. YRY-4 型钻孔应变仪观测的 P 波剪应变[J]. 地震, 2013, 33(4): 64-70.

[12] 池顺良. 分量钻孔应变仪记录的汶川、芦山强震前兆应变异常[J]. 科技导报, 2013, 31(12): 27-30.

[13] 马钦忠. 中外几次重要地震预测与预报结果之启示[J]. 地震学报, 2014, 36(3): 500-513.

[14] 邱泽华. 关于用密集钻孔应变台网监测强震前兆的若干问题[J]. 地震学报, 2014, 36(4): 738-749.

[15] 地震台站建设规范-测震台站[S]. DB/T 16-2006, 2006.

[16] 孙 毅,韩坤亮. 地震数据的无损压缩存储[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(8): 177-180.

[17] 严霄凤,张德馨. 大数据研究[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(4): 168-172.

作者：

[韩朝相](#)，[雍珊珊](#)，[郑文先](#)，[曾敬武](#)，[林科](#)，[张国新](#)，[王新安](#)，[HAN Chao-xiang](#)，[YONG Shan-shan](#)，[ZHENG Wen-xian](#)，[ZENG Jing-wu](#)，[LIN Ke](#)，[ZHANG Guo-xin](#)，[WANG Xin-an](#)

作者单位：

[韩朝相](#)，[雍珊珊](#)，[曾敬武](#)，[林科](#)，[王新安](#)，[HAN Chao-xiang](#)，[YONG Shan-shan](#)，[ZENG Jing-wu](#)，[LIN Ke](#)，[WANG Xin-an](#)([北京大学深圳研究生院](#)，[广东 深圳](#)，[518055](#))，[郑文先](#)，[张国新](#)，[ZHENG Wen-xian](#)，[ZHANG Guo-xin](#)([深圳市微纳集成电路与系统应用研究院](#)，[广东 深圳](#)，[518055](#))

刊名：

[计算机技术与发展](#)

英文刊名：

[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：

[2015](#)，[25](#)([12](#))

引用本文格式：[韩朝相](#).[雍珊珊](#).[郑文先](#).[曾敬武](#).[林科](#).[张国新](#).[王新安](#).[HAN Chao-xiang](#).[YONG Shan-shan](#).[ZHENG Wen-xian](#).[ZENG Jing-wu](#).[LIN Ke](#).[ZHANG Guo-xin](#).[WANG Xin-an](#) 基于FPGA的大地震前兆传感信号采集模块[期刊论文]
]-[计算机技术与发展](#) 2015(12)