

基于MEMS的无线数字地震检波器

陈家焯¹, 林熙鹏^{2*}

¹哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨

²福建平潭旭坤实业有限公司, 福建福州

收稿日期: 2024年7月4日; 录用日期: 2024年7月25日; 发布日期: 2024年8月5日

摘要

介绍一种完全自主开发的体积小的基于MEMS无线数字地震检波器。该检波器主要包括以下几个部分: MEMS传感器板、放大采集板、FPGA控制主板、无线触发接收板、无线WIFI模块板和供电电源设计等。该传感器的设计涉及多个关键技术点, 包括微弱信号获取、低功耗设计、总体结构的合理布置、高精度和高灵敏度、无线数据通讯以及无线触发信号接收等。应对这些关键技术点, 本设计首先对芯片和材料精挑细选、对电路和结构进行合理设计, 满足该检波器各项技术指标。最后通过一系列的室内测试和野外试验, 验证了该检波器的各项功能和性能, 为地震勘探提供高精度、高灵敏度、稳定可靠的地震检波器。

关键词

MEMS加速度计, 无线数字检波器, 信号处理, 地震勘探

Wireless Digital Seismometer Based on MEMS

Jiaye Chen¹, Xipeng Lin^{2*}

¹School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

²Fujian Pingtan Xukun Industrial Co., LTD., Fuzhou Fujian

Received: Jul. 4th, 2024; accepted: Jul. 25th, 2024; published: Aug. 5th, 2024

Abstract

This paper presents the development of a compact, independently developed, MEMS-based wireless digital seismometer. The seismometer primarily comprises several key components: the MEMS sensor board, amplification and acquisition board, FPGA control board, wireless trigger receiver board, WIFI module board, and power supply design. The design of this sensor involves ad-

*通讯作者。

addressing multiple critical technical points, including weak signal acquisition, low power consumption design, rational overall structural layout, high precision and sensitivity, wireless data communication, and wireless trigger signal reception. To address these critical technical points, the design carefully selects the appropriate chips and materials and reasonably designs the circuitry and structure to meet the various technical specifications of the seismometer. A series of indoor tests and field experiments were conducted to verify the functions and performance of the seismometer, providing a high-precision, high-sensitivity, stable, and reliable seismometer for seismic exploration.

Keywords

MEMS Accelerometer, Wireless Digital Seismometer, Signal Processing, Seismic Exploration

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

近年来,随着计算机和电子技术的快速发展,并应用到地震勘探领域,同时也提高了探测技术和数据采集技术的水平。在交通领域[1][2]、建筑领域[3][4]、海洋领域[5][6]以及矿山领域[7][8]普遍存在着地震勘探,对我国甚至世界查找资源、地质普查以及安全预报做出卓越贡献。但是,用于分析地震勘探数据的理论和系统虽然已逐渐完善,但是,作为地震勘探中最关键的部件,地震检波器的发展较慢。目前,在国内应用得比较广泛的地震检波器种类是模拟地震检波器[9],它是运用电磁感应的方式将地震波的振动信号转化为电信号并进行模拟传输。它存在精度不高、灵敏度低、频响范围小的缺点,满足不了日益发展的地震勘探的需要。在数字地震检波器的应用方面,国内尚处于起步阶段,主要由部分大学、检波器厂家和科研院所在进行相关的研发,但目前大都处于实验室研发阶段,还没有成熟的相关产品大范围地投入实际应用[10]。由此可见,开发一种高精度、高灵敏度、宽频带稳定可靠的地震检波器势在必行。

2. 地震检波器总体设计

2.1. 地震检波器组成

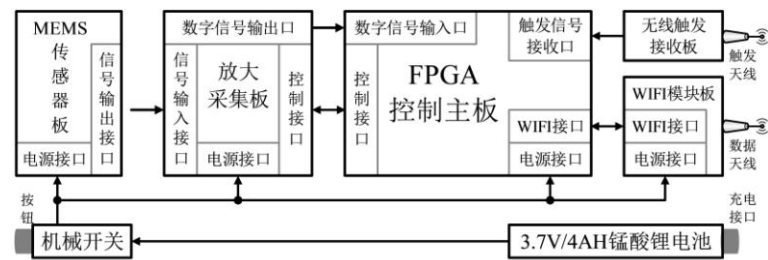


Figure 1. Block diagram of MEMS-based wireless digital seismic detector
图 1.基于 MEMS 的无线数字地震检波器结构框图

基于 MEMS 的无线数字地震检波器由 MEMS 传感器板、放大采集板、FPGA 控制主板、无线触发接收板、无线 WIFI 模块板和供电电源电路组成的。它的功能包括接收触发信号并感知地震信号,并把此

信号进行抗干扰处理后，转换成地震数字信号，存储该地震数字信号，同时可把地震数字信号以无线 WIFI 方式传输给与之关联的地震主机。另外，基于 MEMS 的无线数字地震检波器也可以通过无线 WIFI 接收地震主机传来的参数和命令。基于 MEMS 的无线数字地震检波器组成如图 1 所示。

2.2. 地震检波器设计的难点与对策

基于 MEMS 无线数字地震检波器设计的难点在于：1) 微弱信号的获取：微弱信号低至几百纳伏，而干扰信号与之相比要大得多，消除干扰信号尤为重要；2) 低功耗设计：本检波器野外连续工作时间长，而供电电池容量有限，必须采用低功耗设计；3) MEMS 传感芯片安装设计：要保证 MEMS 传感芯片获得高精度微弱信号，必须设计有与该 MEMS 芯片具有很好的耦合的固定机构；4) 传感器总体结构设计：合理设计线路板，布置各个部件得当，降低部件及器件间的相互干扰；5) 无线通讯设计：由于本检波器要求低噪声、低功耗、高精度和体积的小设计，致使无线传输功率比较小，设计时必须对传输距离和传输速率进行合理平衡。

针对以上难点，应对的方法有：1) 芯片选择低噪声，相关信号芯片必须是高精度、低温漂。设计有去除干扰信号专用电路。电源设计有 RC 滤波电路；2) 在充分满足性能和功能的要求下，选择低功耗芯片和功能模块，同时也采用低功耗电路设计，保证连续工作时间超过 12 小时；3) MEMS 传感芯片耦合结构设计：根据 MEMS 传感芯片形状大小在外壳内底部中心挖一个与该传感芯片大小相符的方坑，安装时把传感芯片紧密嵌入方坑，安装后使传感芯片紧密耦合传感器外壳底部，感知微弱信号；4) 总体结构设计：将传感器线路板分为三个部分：传感芯片及模拟信号处理模块，数字处理模块以及无线通讯模块，做到模拟电路、数字电路以及通讯高频电路分开，降低干扰信号。

2.3. 地震检波器工作原理

首先，本检波器和关联的地震主机联机后，接收地震主机传输的参数和命令，在 FPGA 控制主板的控制下，对放大采集板进行增益、采样间隔、采样点数以及各部件初始化设置，之后进入等待接收无线触发接收板传来的触发信号。当接收到触发信号时立即启动采集工作，MEMS 传感器板感知地震信号变为电信号，此信号经过放大采集板的放大、滤波和缓冲放大电路的信号调理，并在 FPGA 控制主板的控制下，通过放大采集板 24 位 AD 采集电路转换为数字信号并存储，同时利用无线 WIFI 模块板把所采集的地震数据传输给地震主机进行存储、处理和显示。

2.4. 地震检波器的技术指标

Table 1. Technical specifications of MEMS-based wireless digital seismic detector

表 1. 基于 MEMS 无线数字地震检波器技术指标

性能指标	技术参数	性能指标	技术参数
处理器(FPGA)	120MHz	存储容量(GB)	8
采集方式	单次采集	触发方式	外或内信号触发
采集长度(dot)	$2^k(k=9、10...18)$	采集间隔(uS)	$8 \times n(n=1、2、...、1000)$
采集精度	24 位	动态范围(dB)	130
通讯协议	遵循标准 WIFI 协议	数据通讯(Kbps)	1000
物理量	加速度	灵敏度	1000mV/g
轴数	三轴	测量范围	$\pm 1.7g$
频率范围	0.4Hz~1.6KHz	非线性误差	$\pm 0.2\%$
噪声密度	$200\mu g/\sqrt{Hz}$	尺寸	75mm×75mm×95mm

基于 MEMS 无线数字地震检波器整体技术指标如表 1 所示。

3. 地震检波器硬件设计

3.1. MEMS 传感器板

MEMS 传感器板核心芯片选择美国模拟器件公司(ADI)生产的 ADXL203 加速度芯片, 它是一款具有高精度、高灵敏度、低噪声、低功耗的 iMEMS 型双轴加速计, 性价比极高, 其基本性能完全满足本检波器设计的要求。由于 ADXL203 芯片只有两轴, 满足不了三轴的要求, 现采用两片 ADXL203, 通过结构和电路上的合理设计, 完全可以满足三轴的要求, 其结构设计示意图如图 2 所示。

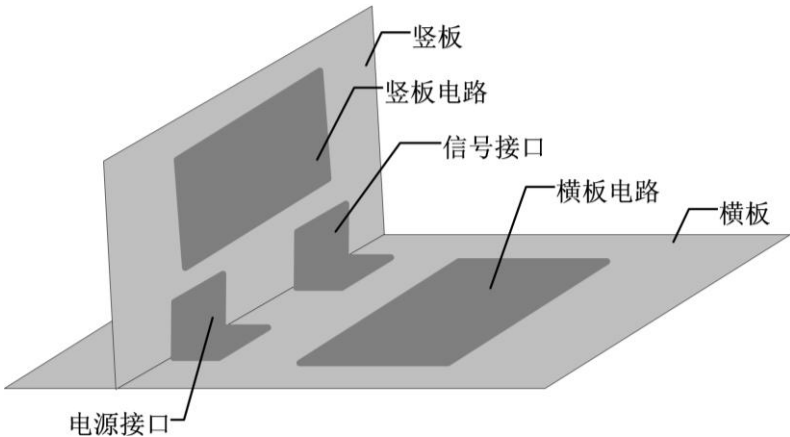


Figure 2. Schematic of triaxial detector using two ADXL203 chips
图 2. 两个 ADXL203 芯片实现三轴检波器结构示意图

在图 2 中, MEMS 传感器板由两块板组成的, 一块 ADXL203 板横向布置, 简称横板, 另一块 ADXL203 板纵向布置, 简称竖板。其中, 横板规定为 X 轴方向、Y 轴方向采集信号, 竖板规定为 Z 轴方向采集信号, 这样就可完成三轴功能。无论是横板, 还是竖板, ADXL203 传感器的基本电路原理图如图 3 所示。

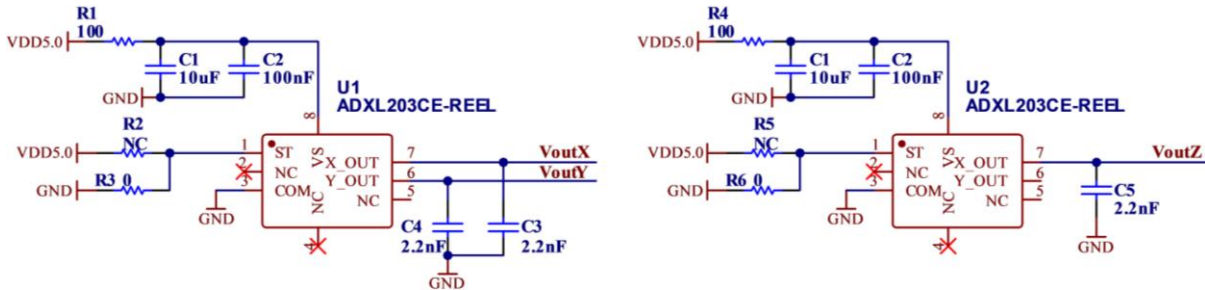


Figure 3. Basic circuit diagram of the ADXL203 sensor board, (a) horizontal board schematic, (b) vertical board schematic
图 3. ADXL203 传感器板基本电路原理图, (a)横板原理图, (b)竖板原理图

3.2. 放大采集板

放大采集板电路包括前置放大电路和 A/D 采集电路。前置放大电路 1 的前端是 RC 差模共模电路, 对 MEMS 传感器板 X 轴输出的振动信号进行抗干扰滤波, 后经过放大及二阶低通滤波进行信号放大滤波后, 再经过单端转差分滤波匹配电路输出到 AD 采集电路 1 转换为数字信号存储在 FPGA 控制主板存储器中。放大采集板电路原理图如图 4 所示。

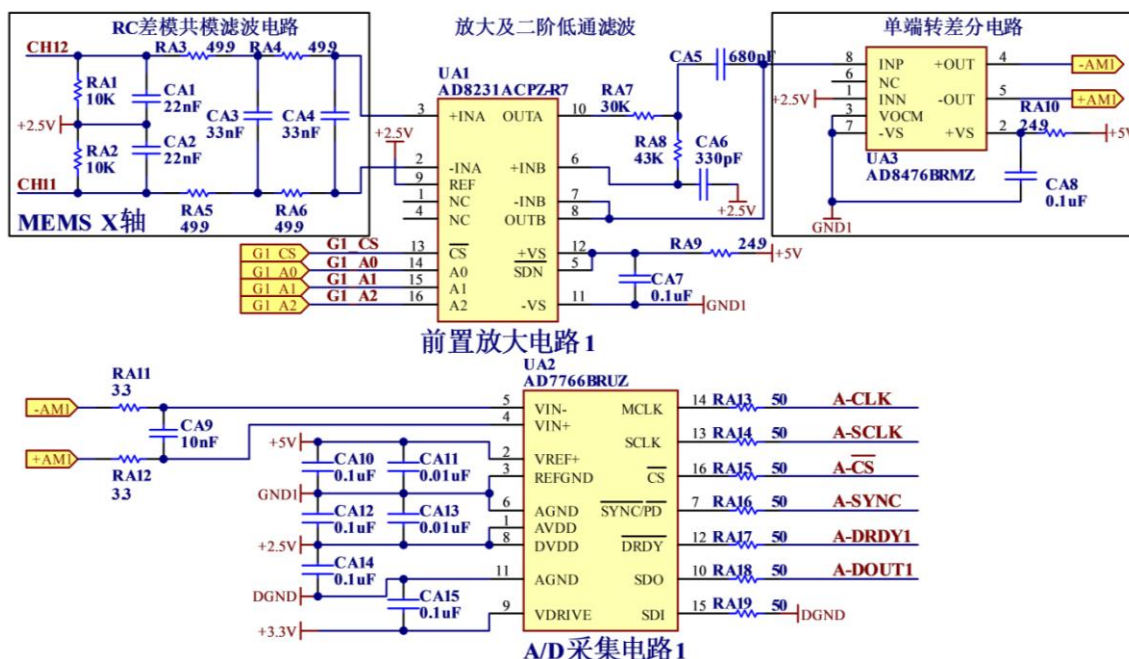


Figure 4. Basic circuit diagram of the amplification and acquisition board

图 4. 放大采集板基本电路原理图

在图 4 中, 放大器选择美国模拟器件公司(ADI)生产的一款高精度、低噪声、低失调以及低功耗的仪表放大器 AD8231, 增益 $\times 1$ 、 $\times 2$ 、 $\times 4$ 、 $\times 8$ 、 $\times 16$ 、 $\times 32$ 、 $\times 64$ 、 $\times 128$, 并可编程控制。采集器选择美国模拟器件公司(ADI)生产的一款高精度、低噪声、低功耗的模数转换器 AD7766, 精度 24 位, 采样率 125KHz。这两款芯片完全满足基于 MEMS 无线数字地震检波器设计要求。

3.3. FPGA 控制主板

FPGA 控制主板核心芯片选择美国 Altera 公司生产的 CycloneIV 系列 EP4CE22F17C8。主要包括 EP4CE22F17C8 控制器、FLASH 存储电路、模数转换控制接口、放大器增益控制接口、无线触发接收板接口、WIFI 模块板接口、电源电路以及 3.7V 电池输入接口, 其组成如图 5 所示。从图中可以看出, 除了电源部分, 其余均由 FPGA 芯片 EP4CE22F17C8 控制。

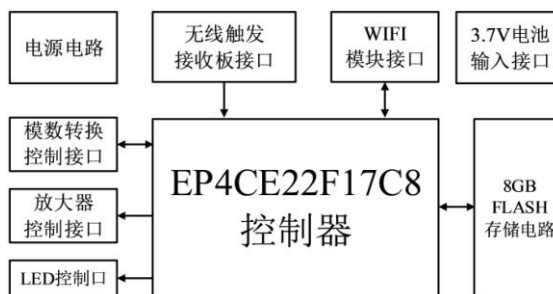


Figure 5. Block diagram of the FPGA control mainboard

图 5. FPGA 控制主板基本组成框图

3.4. 无线触发接收板

无线触发接收板核心是无线触发接收模块, 其接收到的触发信号经过放大电路、绝对比较电路和触

发混合信号输出电路后, FPGA 控制主板接收到触发信号, 启动采集地震信号。触发信号是模拟信号, 传输极快, 从发出触发信号至采集开始这段时间极短, 不超过 20 μ S, 这为不同检波器的同步采集提供至关重要的基础。无线触发接收板基本原理图如图 6 所示。

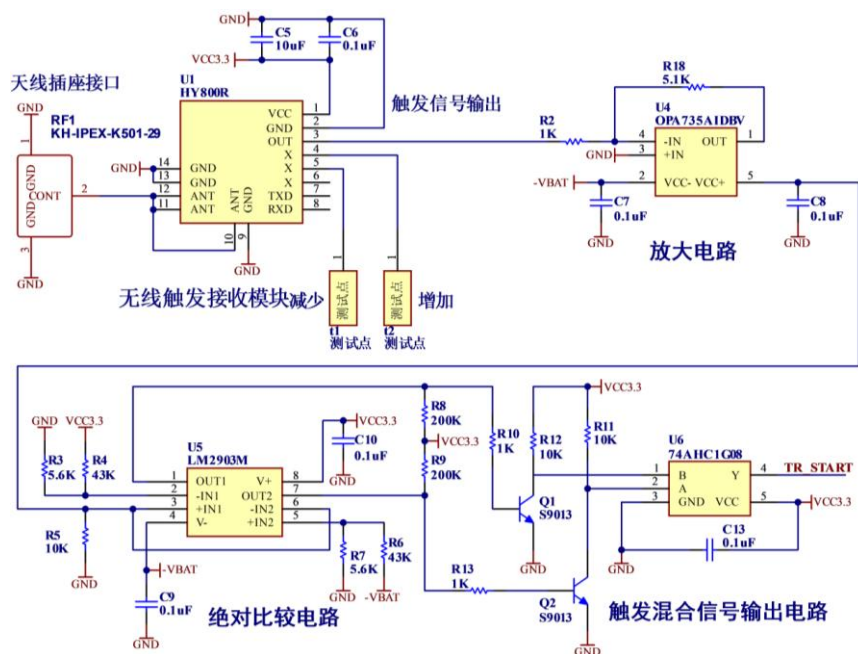


Figure 6. Basic circuit diagram of the wireless trigger receiver board
图 6.无线触发接收板基本电路原理图

3.5. 无线 WIFI 模块板

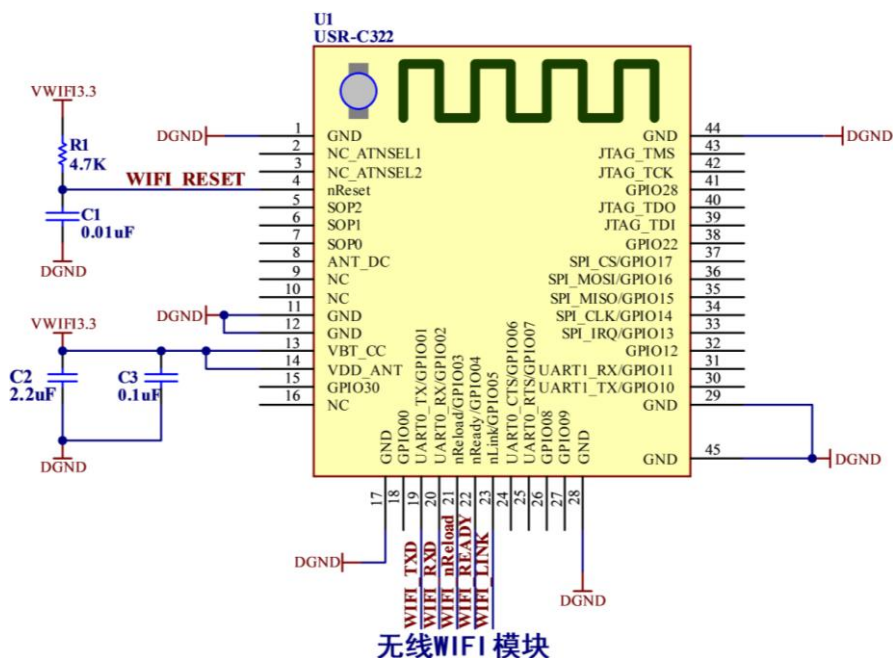


Figure 7. Basic circuit diagram of the wireless WIFI module board
图 7.无线 WIFI 模块板基本电路原理图

无线 WIFI 模块核心是 WIFI 模块, 完全遵循国际标准的 WIFI 协议, 在 FPGA 控制主板的控制下, 负责与相关的地震主机进行数据传输, 传输速率 1000Kbps。无线 WIFI 模块基本原理图如图 7 所示。

3.6. 供电电源设计

电源供电部分采用适配器和内部电池双供电, 当在野外施工时, 适配器不能供电, 内部电池开始供电。内部电池工作时间一般不超过 12 个小时, 电源设计示意图如图 8 所示。

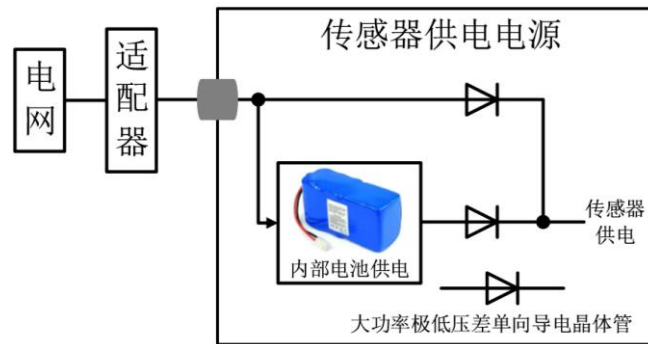


Figure 8. Block diagram of the power supply design

图 8. 供电电源设计框图

4. 地震检波器软件设计

基于 MEMS 无线数字地震检波器软件设计主要包括初始化程序编程、信号处理程序编程(包括放大增益设置程序和 DSP 滤波程序)、数据采集控制编程、数据存取编程(FLASH 读取控制程序)以及无线通讯程序编程。当基于 MEMS 无线数字地震检波器工作时, 其整体地震信号数据采集控制程序编程框图如下图 9 所示。

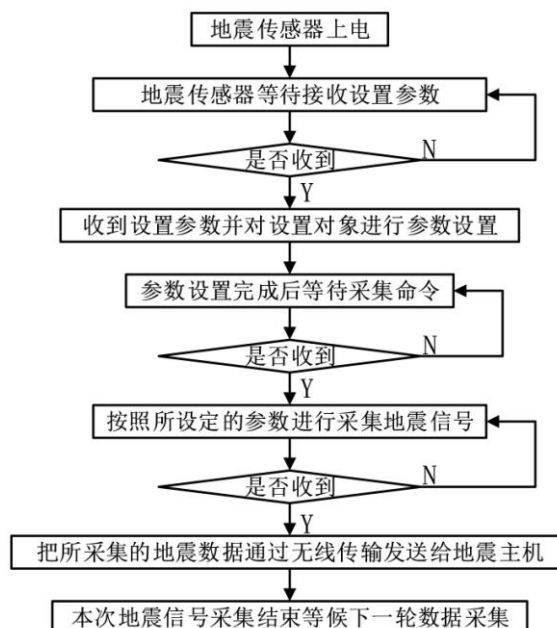


Figure 9. Block diagram of the seismic signal data acquisition design

图 9. 地震信号数据采集设计框图

5. 地震检波器测试

为了验证设计的基于 MEMS 无线数字地震检波器的性能和功能是否能达到预期要求, 进行了室内测试(如图 10 所示)和野外测试(如图 11 所示)来验证所设计的地震检波器是否能正确接收到地震波。



Figure 10. Schematic of indoor testing

图 10. 室内测试示意图



Figure 11. Schematic of field experiment

图 11. 野外实验示意图

图 12 所示是在室内用相同大小的震源, 分别在距离 0.3m、0.6m 以及 0.9m 处的振动试验得到的时域波形。

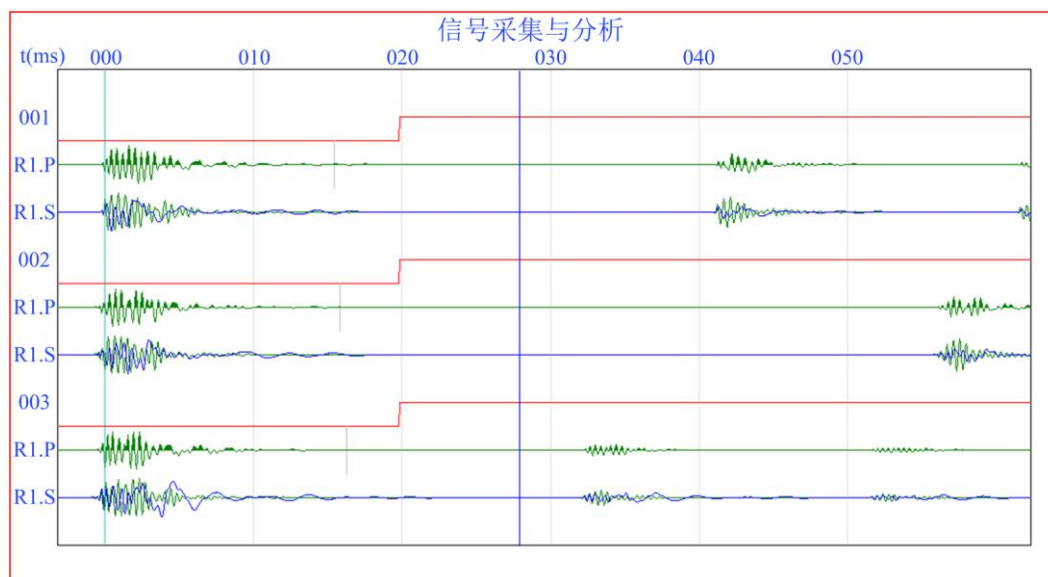


Figure 12. Time domain waveform of seismic waves

图 12. 地震波时域波形

从室内和室外对本设计的基于 MEMS 无线数字地震检波器测试结果分析, 其功能和性能满足设计的要求。

6. 结论

本文详细介绍并设计了一款基于 MEMS 无线数字地震检波器的硬件设计与实现, 系统主要包括 MEMS 传感器板、放大采集板、传感器主板、无线触发接收板、无线 WIFI 模块板和供电电源设计等部分。设计的关键技术点如下:

1)微弱信号获取: ADXL203 传感器能够感知微弱的地震波并输出低至 $1\mu\text{V}$ 的信号, 因此在设计过程中, 信号的获取和干扰的排除成为主要挑战。通过优化芯片选型、线路板的合理设计和合理的摆放结构, 提高了信号的准确性和可靠性。

2)低功耗设计: 为实现电池供电 12 小时持续工作, 系统采用了低功耗设计策略。AD8231 仪表放大器、AD8476 缓冲放大器和 AD7766 模数转换器的选择, 不仅保证了高精度、低噪声和低功耗, 还在不同环境下具备稳定的性能表现。

3)高精度和高灵敏度: 系统采用高精度放大器和 24 位高分辨率模数转换器, 实现了对微弱地震波信号的准确捕捉和数字化处理。这样设计确保了信号的高灵敏度和数据采集的高效率。

4)无线通讯: 利用 WIFI 模块进行信号的无线传输, 增强了系统的便携性和实用性, 适应了现代地震勘探的需求。

综上所述, 本系统针对现代地震勘探中对高精度、高灵敏度和低功耗的需求, 设计并实现了一套基于 MEMS 无线数字地震检波器。其创新点在于解决了微弱信号的获取与传输、低功耗设计及高效无线通讯等技术难题, 具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 陈支兴.多源频率域地震勘探法在探测城市隧道洞室中的应用[J].隧道建设(中英文),2023, 43(9): 1583-1589.
- [2] Lavoué F., Coutant, O., Boué P., Pinzon-Rincon, L., Brenguier, F., Brossier, R., et al. (2020) Understanding Seismic Waves Generated by Train Traffic via Modeling: Implications for Seismic Imaging and Monitoring. *Seismological Research Letters*, **92**, 287-300. <https://doi.org/10.1785/0220200133>
- [3] 杨道林. 工程建设场地地震安全性评价应用研究[D]: [硕士学位论文].合肥: 安徽建筑大学,2014.
- [4] 孟立朋,彭远黔,冉志杰,等.浅层地震勘探在工程选址中的应用及断层活动性鉴定[J].华北地震科学,2016, 34(4): 20-27.
- [5] Fernando, B., Leng, K. and Nissen-Meyer, T. (2020) Oceanic High-Frequency Global Seismic Wave Propagation with Realistic Bathymetry. *Geophysical Journal International*, **222**, 1178-1194. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa248>
- [6] 杜万兴.应用于海洋地震勘探的震源技术探讨[J].石化技术,2024, 31(5): 307-309.
- [7] Cheng, J.Y., Jiang, H., Ji, G.Z. and Wu, H.(2015) Channel Wave Seismic Exploration Technology Based on Node Digital Seismograph in Underground Mine. *Coal Science & Technology*,**43**,25.
- [8] 李江.花园煤矿床五采区岩浆岩分布地震预测[J].矿产勘查,2024, 15(5): 811-817.
- [9] 段疾病.基于串行通信的地震检波器综合测试系统的设计实现[D]: [硕士学位论文].青岛: 中国海洋大学,2013.
- [10] 罗忠琴,刘鹏,唐建益,等.煤矿隐蔽致灾因素地震勘探现状与发展方向[J].中国煤炭,2023, 49(1): 16-29.