Vol.44 No.6 June, 2018

doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018.06.013



高精度分布式面波地震仪

王书纯,黄用勤,葛健,陈珺

(中国地质大学(武汉)自动化学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:针对基于折射波或反射波法的传统地震仪存在对波阻抗差异较小的地下介质的分辨率较低的问题,设计一种高精度分布式面波地震仪。利用数字检波器对人工震源产生的面波信号进行采集,实现具有大动态范围、宽频带响应的面波检波阵列的设计。研制基于 FPFA 的地震信号采集节点,实现强干扰背景下地震信号的纯数字滤波与采集。此外,通过 4G 模块实现数据的无线传输和控制,从而提高探测效率。现场测试表明:在某高层建筑地基施工现场,仪器可实现对地震面波信号的高精度阵列采集,其探测反演结果与直接打钻结果基本一致,可有效验证其面波探测功能。 关键词:高精度;地震法;面波;地震仪

文献标志码: A 文章编号: 1674-5124(2018)06-0066-05

High precision distributed surface wave seismograph

WANG Shuchun, HUANG Yongqin, GE Jian, CHEN Jun (School of Automation, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: As the traditional seismometer based on refracted wave or reflected wave method has the problem that it has low sensitivity to underground media with less difference of wave impedance, a high-precision distributed surface wave seismograph was designed. It used digital geophone to collect surface wave signals generated by artificial sources, which avoided the disadvantages of analog geophones and thus realized the design of surface wave detection array with large dynamic range and wideband response. The FPFA-based seismic signal acquisition node was developed to achieve the pure digital filtering and acquisition of seismic signals under strong interference. In addition, the detection efficiency was enhanced by the 4G module which achieved wireless data transmission and control. Field tests show that the instrument realizes the high-precision array acquisition of seismic surface wave signals at the construction site of a high-rise building foundation. The inversion result is basically consistent with the result of direct drilling, which verifies its surface wave detection function.

Keywords: high precision; seismic method; surface wave; seismograph

0 引 言

地震法是基于地震波的折射或反射原理,利用

地下介质的弹性差异来实现目标探测,目前是地球 物理工程勘探的主要方法之一^[14],在大型基建工程

收稿日期: 2018-01-12; 收到修改稿日期: 2018-02-11 基金项目: 国家自然科学基金项目 (61603354) 作者简介: 王书纯(1964-), 男, 河南南阳市人, 高级工程师, 主要从事测控仪器研制、检测方面的研究。 中得到广泛应用。传统的地震仪是利用人工震源产 生的地震波在地下介质传输过程中,在波阻抗界面 形成反射或者折射来进行探测。该类地震仪对波阻 抗差异较小的地下介质的分辨率较低,特别是折射 法的应用前提是要求上层介质的波速小于下层介质 的波速。对此,面波法被提出来改进传统方法的不 足。面波是介质分层处由横波和纵波互干涉形成的 合成波,主要在地表传播,因此能量较强;且利用其 频散特性,可同时对地震波在地层中的运动学和动 力学进行分析,因此具有更高的分辨率,且受到的 限制也更少^[54]。所以,有必要开展基于面波法的地 震仪研究。

与传统地震仪可采用炸药等方式产生强人工震 源不同,面波地震仪主要面向工程现场应用。为保 证安全,震源只能采用重锤产生,因此所产生地震 波信号较微弱,同时也特别容易受到周围振动噪声 的影响,这就对仪器在强干扰背景下的微弱信号检测能力提出了更高要求,虽然部分单位通过弱信号提取电路的优化来改善这一问题,但效果并不明显^[78]。其次,面波主要是利用地震波在不均匀土层中的频散特性来划分介质结构,因此要求仪器具有宽带接收能力。针对上述问题,本文设计一种面向工程应用的高精度分布式面波地震仪,可以满足面波法对仪器的特殊需求:通过采用数字检波器以提高地震波信号的检测带宽;通过纯数字滤波与采集设计,来提高强干扰背景下的弱信号提取能力。

1 系统设计

基于面波地震法的探测原理,分布式面波地震 仪的系统设计如图1所示,主要由数字面波检波器 阵列、数据采集节点、控制中心站组成,该阵列的长 度即为检波器间距的总和。

在仪器启动后,首先由人工操作重锤产生震



图1 分布式面波地震仪方案

源,触发数据采集节点通过数字检波器阵列进行数 据处理和模数转换。然后,利用无线传输模块将数 据实时传输到控制中心的 PC 机进行进一步处理, 由于检波器接收到的地震波信号同时包含了反射 波、折射波以及面波,通过设置合适的采样启动时 间即可提取到面波信号。最后将面波信号进行频散 处理得到地层信息。

2 仪器设计

2.1 数字面波检波器

在经典的地震折射法或反射法中,信号频谱单 一、作业背景干扰较少,因此一般采用传统的模拟 检波器(如电磁感应式、压电式等)即可满足要求^{[9-11}; 而面波则要求检波器具有大动态范围、宽频带响应 能力。为此本文设计了基于闭环结构的数字检波器,传感器结构如图2所示。



图 2 面波数字检波器原理图

该传感器直接以电信号的平衡变化来检测地 震波信号,主要包括 MEMS 加速度传感器、伺服 电路、静电力反馈3部分。利用加速度传感器中的质量块,可将振动加速度信号转换为电容比变化信号;伺服电路则将电容比信号转化为可测的加速度电信号,并利用Σ-Δ单元将其进一步转化为数据流;静电力反馈则是用于将加速度电信号作为输入,迫使质量体恢复为平衡状态。该传感器的动态范围大于120 dB,频响大于600 Hz,等效输入噪声小于900 ng(RMS, 600 Hz 带宽内),失真度低于0.003%。

在检波器布置中,应保证阵列长度不小于目标

深度;同时在施工现场周围应尽可能远离墙体,以 降低地震波反射或折射的可能性。

2.2 分布式数据采集节点

由于数字面波检波器直接输出的是数字信号, 与模拟检波器相比,并不需要信号调理电路。但仍 然需要对一位数据流信号进行数字滤波¹¹²,同时将 其变化为 24 bit 的并行数据;此外,由于面波通常要 求的检波器数量较多,数据处理难度大。对此,本 文设计一种基于 FPGA 的数据采集节点,如图 3 所示。



图 3 数据采集节点

每个数据采集节点通过有线的方式可挂载5个 数字检波器,安装在重锤上的触发器可以检测到震 源发出人工地震波信号,并触发控制器开始数据采 集和处理;节点控制器采用低功耗的STM32,用于 数字滤波器的参数配置,并将处理后的数据通过 4G通信模块,发送到控制中心站。

2.2.1 数字滤波器

由于在面波信号的采集中,检波器虽然会对面 波以外的信号进行有效抑制,但仍还会引入转换 波、纵横波以及作业现场周边的机械振动信号,因 此数字滤波器不仅要实现1bit数据流到24bit并 行数据的抽取转换,还要对上述干扰进行抑制。数 字滤波器的结构如图4所示。

通常,抽取滤波器可以用 FIR 半带滤波器或 CIC 滤波器来实现^[13]。对于 CIC 滤波器,其特殊结构使该 类型滤波器主要面向于采样速率远远大于信号频率 的情况;而对于 FIR 半带滤波器,其通阻带对称性使 该滤波器在 2 倍抽取和内插滤波器中较为适用。此 外,为了满足抽取倍数要求,也可以通过滤波器串联的 方式来实现。但由于面波信号主要集中在地震波的 高频段 10~100 Hz,当检波器数量较多时,运算量很 大,一般的单片机难以满足运算要求,本文采用 FPGA 实现数字滤波器算法,以满足快速处理要求,设计的 多相分解结构的抽取数字滤波器如图 5 所示。



图 4 数字滤波器结构



图 5 多相抽取滤波器结构

由于在工程现场也有可能存在起重器、打桩 机、压路机等带有大量振动噪声的设备,因此在实 现抽取后,还要进行有针对性的背景噪声抑制。由 于通常振动噪声的频带集中在 5~10 Hz 之间,因此 本文利用 FIR 滤波器的 IP 核实现了振动噪声陷波 器的设计,其阻带为 3~12 Hz,增益大约为-40 dB。

在背景噪声抑制的基础上,针对反射波和折射 波,本文设计了带宽为 600 Hz 的带通滤波器,以进 一步提高面波信号的信噪比,该滤波器利用 Matlab 中的 FDAtool 工具来实现。在设计过程中,首先对 滤波器的带宽、阶数、窗口类型进行配置,然后利 用 Simulink 进行性能分析,最后利用 DSP Builder 来生成相应的 Verilog 语言。

由于每个采集节点可同时挂接 5 路检波器,因 此当对多路 24 bit 数据进行处理时,由于 STM32 的 并行处理有限,因此必须保证处理带宽足够高,否 则会出现数据丢包现象。对此,本设计提出了一种 基于 FIFO 和 SDRAM 结合的数据缓存结构。 2.2.2 控制板

控制板主要实现数据采集站的控制和数据传输。由于面波数据量较大,因此传统的高频通信在现场容易受到小型电台等信号源的干扰,而 GPRS通信难以满足速率和带宽要求,因此本设计采用了最新的 4G 模块 U8300 来进行数据传输。该模块主要包含射频单元、模拟基带单元、数字基带单元,其下行速度可达 100 Mb/s,上行速度可达 50 Mb/s。可配置为 GSM、GPRS、CDMA、TD-SCDMA、LTE等模式,对网络适应能力较强。由于采用的 AT 指令集,因此通信操作较为简单。U8300 的复位有RESET 引脚复位、AT 指令复位两种模式。为了尽可能提高仪器在现场的待机时间,可通过 AT 指令"AT+CFUN=1"将 4G 模块设置为飞行模式。

3 控制中心站软件

分布式数据采集节点所获取的数据经由 4G 模

块传输到控制中心站,并由中心控制软件来实现数 据采集的控制和处理显示。软件的人机交互界面主 要分为频散曲线显示区、采集参数配置区、文件存 储区。软件工作流程如图 6 所示。



图 6 仪器工作流程图

4 测 试

为验证本仪器的探测性能,将本文研制的仪器 在某高层建筑地基施工现场进行了测试,测试结果 如图 7 所示。图 7(a)为面波(S 波)偏移剖面,图 7(b) 为相应的反演结果,根据反演结果可以在地下 13~ 40 m、43~76 m 范围内分别看到清晰的覆盖层与半 风化层、半风化层与基岩间的分层界面,该结果与 直接打钻结果基本一致,验证了本文仪器的功能。

5 结束语

本文针对传统折射波或反射波地震法存在的问

题,在面波法探测理论的基础上,设计了一种高准确度分布式面波地震仪,该系统具有接收信号能量

强、人机交互简单友好、对地下分层信息分辨率高等优势。利用该系统在某高层建筑地基施工现场进



图 7 某高层建筑地基施工现场探测结果

行了实际测试,测试结果表明仪器采集数据处理后 的反演结果与地下分层信息基本一致。该系统在大 型水电站、高速铁路、超高层大楼等工程中具有一 定的应用前景。

参考文献

- [1] 黎爱琼, 王春明. 高分辨率隧道地震超前预报系统[J]. 中国 测试, 2016, 42(05): 84–88.
- [2] 陈瑛, 宋俊磊. 地震仪的发展历史及现状综述[J]. 地球物理 学进展, 2013 (3): 1311-1319.
- [3] 王小宁, 郭庆彪, 郭广礼, 等. 反射波地震法在武云高速下伏 采空区探测中的应用[J]. 煤炭技术, 2016 (12): 111–113.
- [4] JAROSZEWICZ L R, KURZYCH A, KRAJEWSKI Z, et al. Review of the usefulness of various rotational seismometers with laboratory results of fibre –optic ones tested for engineering applications[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2161.
- [5] JAROSZEWICZ L R, KRAJEWSKI Z, TEISSEYRE K P. Usefulness of AFORS —autonomous fibre –optic rotational seismograph for investigation of rotational phenomena[J]. Journal of seismology, 2012, 16(4): 573–586.
- [6] 王尔觉,潘广山,胡庆辉.近海工程勘察中单道与多道地震

方法对比研究[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(4): 502-507.

- [7] 席超强,张平松,李建宁,等.多道瞬态面波在复杂地形条件 下岩层划分中的应用研究[J].物探化探计算技术,2017(5): 669-676.
- [8] 蔡伟, 宋先海, 袁士川, 等. 新的瑞雷波多模式频散曲线反演 目标函数[J]. 地球科学, 2017, 42(9): 1608–1622.
- [9] PRATT M J, WYSESSION M E, ALEQABI G, et al. Shear velocity structure of the crust and upper mantle of madagascar derived from surface wave tomography[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 458: 405–417.
- [10] 张帅帅,林君,张林行,等.动圈式检波器的测试标定方法研究[J].中国测试,2016,42(4):25-28.
- [11] 孙富津, 张林行, 曹家铭,等. 基于 SOPC 的 8 通道地震数据 采集系统设计[J]. 中国测试, 2016, 42(3): 73-76, 89.
- [12] 李宗敏, 张法全, 王国富, 等. 基于 FPGA 高精度微震信号采 集系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016 (4): 108-110.
- [13] 郑应强, 张振仁. 基于多相结构的内插脉冲成形滤波器的 DSP 实现[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(5): 66-69.

(编辑:李妮)