

doi: 10.11720/wtyht.2024.0140

贾松,何展翔,杨辉,等.基于 MEMS 的节点式旋转地震仪的研发及 H/V 谱比测试[J].物探与化探,2024,48(6):1471-1478.http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0140Jia S, He Z X, Yang H, et al. Development of a nodal rotational seismometer with a micro-electro-mechanical system sensor and testing of H/V spectral ratios[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6):1471-1478.http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0140

基于 MEMS 的节点式旋转地震仪的研发 及 H/V 谱比测试

贾松¹,何展翔^{2,3,4},杨辉^{4,3,2},么永超^{2,3,4},王彩霞¹

(1.北京信息科技大学 理学院,北京 100192;2.南方科技大学 地球与空间科学系,广东 深圳 518055;3.南方科技大学 广东省地球物理高精度成像技术重点实验室,广东 深圳 518055;4.南方科技大学 深圳市深远海油气勘探技术重点实验室,广东 深圳 518055)

摘要:针对当前日益增长的大规模野外地震采集需求,综合考虑仪器的功能性、经济性与部署便捷性,研发一种基于 MEMS 传感器的低成本多功能节点式旋转地震仪 RBWL。仪器采用低成本、低功耗的 MEMS 传感器进行三分量平动(T_x, T_y, T_z)以及三分量旋转(R_x, R_y, R_z)进行地震信号采集。为降低环境因素对测量的影响,系统自动记录温度、姿态等实时信息,并对测量结果进行相应补偿校正。为实现采集节点的实时监控与数据传输,系统集成了基于 4G—云端—客户端的数据传输链路,经实测最大数据传输速率可达 100 Mbps。通过开展 H/V 谱比的实验,不仅验证了仪器系统功能与主要性能参数,而且证明了其在工程物探中的应用效果。

关键词:MEMS;旋转地震仪;无线数据传输; H/V 谱比

中图分类号:P631

文献标识码:A

文章编号:1000-8918(2024)06-1471-08

0 引言

地震信号测量是地球物理研究的重要手段^[1],其在地质灾害预警^[2]、环境监测^[3-4]、资源勘探^[5-6]、工程物探^[7]等领域发挥着极为重要的角色。当今地震野外采集对采集系统的测区范围、数据量、数据维度等提出了越来越高的要求,同时为了适应复杂的工程环境,地震采集系统向着低成本、分布式节点化发展,以利于采集系统的快速和大规模部署^[8]。传统地震信号采集主要关注测点在三维空间内平动分量的测量,而近年来的一系列研究表明,地震旋转分量测量在地下资源探测、建筑安全、灾害预警等诸多领域都有广泛应用^[9-10],因此能够同时测量平移分量和旋转分量的旋转地震仪发展迅速。

鉴于此,我们研发了一种低成本、多功能节点式旋转地震仪 RBWL。该仪器采用低成本(micro electro mechanical systems, MEMS)传感器测量加速度和角速度以及姿态、温度,从而实现平动分量和旋转分量以及环境因素的测量;在数据传输方面,本仪器采用 4G—云端—客户端的数据传输模式,实现了 RB-WaveLink 和客户端同步传输加速度、角速度、姿态角度和温度数据。

1 RBWL 节点式旋转地震仪的软硬件设计

1.1 硬件系统设计

RBWL 采集节点硬件部分主要由(advanced RISC machine, ARM)架构的嵌入式系统和 MEMS 传感器组成(如图 1 所示),其中包括 MEMS 传感器、

收稿日期:2024-04-01;修回日期:2024-07-29

基金项目:国家自然科学基金项目“微地震监测复杂结构偏移成像与速度建模研究”(41974122);广东省地球物理高精度成像技术重点实验室项目(2022B1212010002);北京市教育委员会科研计划项目(KZ20231123250);深圳市科技计划项目“深海深地资源探测技术系统研发”(KQTD 20170810111725321);深圳市深远海油气勘探技术重点实验室项目(ZDSYS20190902093007855)

第一作者:贾松(1998-),男,硕士研究生,研究方向为电子科学与技术。Email:13020066166@163.com

通讯作者:王彩霞(1972-),女,博士,教授,研究方向为信息处理及仪器研制。Email:caxwangee@bistu.edu.cn

GPS 模块、数据采集模块、数据存储模块、数据传输模块、电源模块,系统主要技术参数如表格 1 所示。

硬件系统主要功能为:

1) MEMS 传感器包括由 5 个加速度计组成的阵列和 1 个磁场传感器以及 1 个温度传感器,采集振动信号以及环境数据,加速度计阵列如图 2 所示。其中, MEMS 加速度传感器以十字形分布布置在仪器内部的电路板上,在直角坐标系下,传感器 C、E、B、D 分别布置在 x 轴和 y 轴的正方向和负方向,关于 A 对称分布。

2) GPS 模块用于节点定位以及系统时钟同步,以便后续的数据分析和研究。

3) 数据采集模块对各个传感器数据和 GPS 模块获取的数据进行预处理和解算,通过扩展卡尔曼滤波算法进行姿态角度估计,实现数据校正,从而减小仪器姿态的影响。

4) 数据存储模块采用 FATFS 虚拟文件系统,根据预设记录间隔创建文件夹,负责记录处理好的实

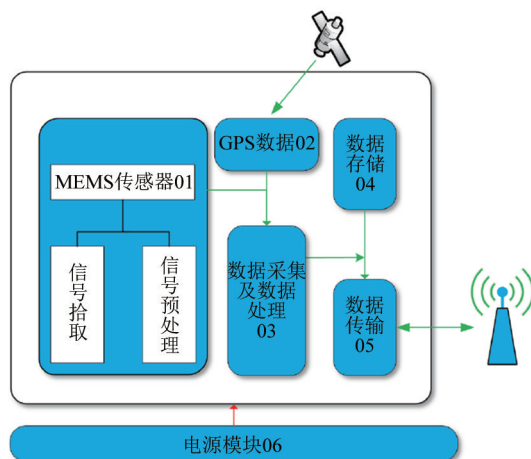


图1 节点式旋转地震仪硬件系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the hardware system of the nodal rotary seismometer

表1 RBWL 系统主要技术参数

Table 1 RBWL system main technical parameters

技术参数	取值范围
最大线性加速度/g	± 2
线性加速度最高分辨率/(LSB $\cdot g^{-1}$)	16384
角速度最高分辨率/(rad $\cdot s^{-1}$)	$4E^{-5}$
姿态角度量程/($^{\circ}$)	$x, y: \pm 180, z: \pm 90$
温度量程/ $^{\circ}C$	$-40 \sim 85$
频率响应范围/Hz	$7 \sim 500$
采样率/Hz	100, 200, 500, 1000
工作温度/ $^{\circ}C$	$-40 \sim 85$
实时传输连续工作时间@ 25 $^{\circ}C$ /d	3
存储容量/G	64
长、宽、高/mm	100 $\times$ 75 $\times$ 120
功耗/W	<2.5

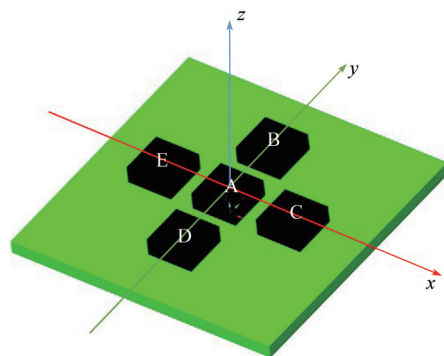


图2 加速度计阵列示意

Fig.2 Schematic of accelerometer array PCB layout

时振动信号(实时钟、平动及旋转加速度信号)、状态及环境数据(仪器工作状态、姿态、GPS 定位、温度等),并分别存储在两个独立的文件中。

5) 数据传输模块如图 3 所示,数据传输模块用于节点仪与用户端之间的双向数据交互,提供 USB 和 Wifi 接口进行离线数据下载,还可以通过 4G 模块进行远程数据传输。

6) 电源模块采用 18650 锂电池组作为储能单元,同时集成了充放电保护及 UPS 电路,能够实现野外自容式与室内外供电两种工作模式的自主切换。

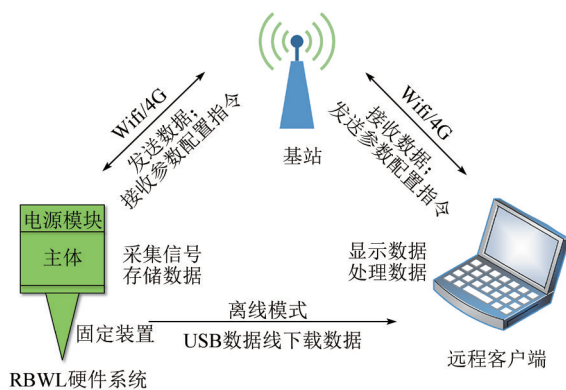


图3 数据传输示意

Fig.3 Schematic diagram of data transmission

1.2 软件平台设计

为方便用户对 RBWL 进行管理和设置,对利用 python 语言在 RBWL 远程监测平台的客户端上位机软件进行开发,具有方便快捷、兼容性高的优点,能够兼容 Win10 和 Linux 平台。其主要功能如下:

1) 用户界面:包括硬件参数配置,数据显示和时间序列波形显示;

2) 数据处理:包括数据预处理(数据解算、客户端将接收到的数据还原为地震信号数据)和补偿与校正(客户端对数据进行温度补偿校正,减小环境因素对数据的影响);

3)文件管理:用于文件格式的转换和数据回放。

远程监测平台客户端的上位机软件如图 4 所示。客户端软件首先对默认参数进行初始化,然后通过 4G 与 RBWL 建立连接,建立连接后对仪器参数进行配置并对数据进行接收与解算,实时显示振动信号的时间序列波形数据以及仪器状态数据,随后对数据进行保存。

软件的主要功能模块包括测试管理模块、设备测试管理模块、数据管理模块 3 部分,如图 5 所示。

测试管理模块主要负责数据解算、数据补偿校正和数据显示。用户界面如图 6、图 7 所示,能够监测加速度、角速度、姿态角度以及磁场的的数据并以时

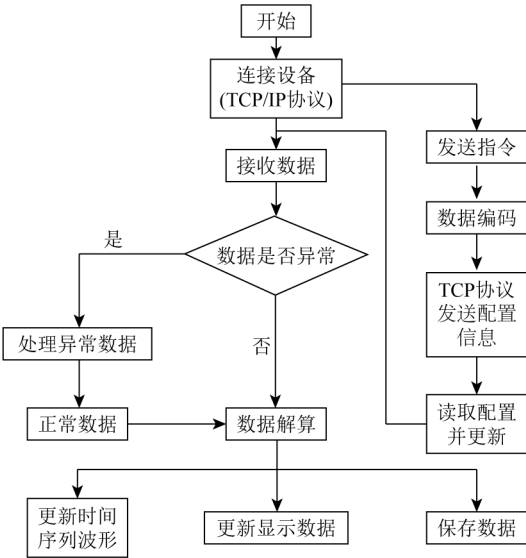


图 4 RBWL 客户端软件示意
Fig.4 RBWL client software schematic

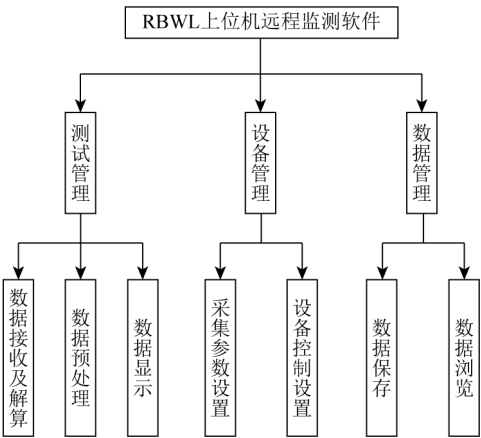


图 5 软件功能模块示意
Fig.5 Schematic diagram of system software functional modules

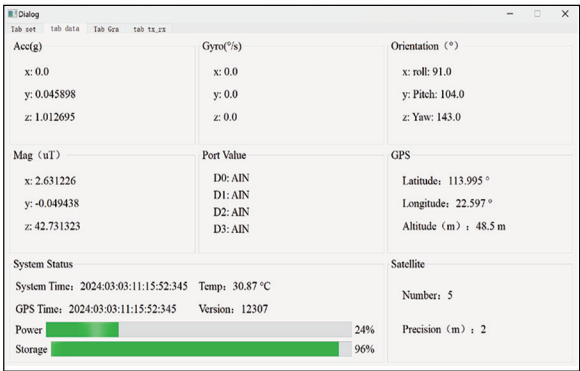


图 6 数据显示及设备状态监测界面示意
Fig.6 Schematic diagram of data display and equipment status monitoring interface

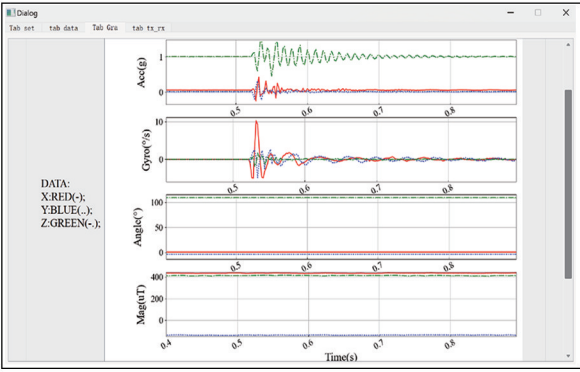


图 7 数据可视化界面示意 (加速度、角速度、姿态角度、磁场)
Fig.7 Schematic of the data visualization interface (acceleration, angular velocity, attitude angle, magnetic field)

间序列波形进行显示,还能够对仪器片上的系统时间以及 GPS 时间、环境温度、设备版本号、设备剩余电量和设备已用存储空间、位置信息数据进行显示,实时了解仪器工作状态。

数据补偿与校正:接收到的 MEMS 加速度计数据由于测试时环境温度的变化会导致测量数据产生误差即温漂,需要对数据进行预处理,利用温度数据进行温漂补偿以减小误差,温漂补偿如式(1)所示:

$$DATA'_{Accelerometer} = DATA_{Accelerometer} + (Temp - 25) \times 1.5 \times 10^{-4}, (1)$$

其中: $DATA_{Accelerometer}$ 为未进行温度补偿的加速度数据; $DATA'_{Accelerometer}$ 为温度补偿后的数据; $Temp$ 为温度数据。

设备管理模块如图 8 所示,主要负责数据采集参数的设置和设备控制。在采集参数配置中,能够对仪器的采样速率、带宽等进行设置;在设备控制设置中能够对 USB 端口通信的波特率、远程数据传输端口的 IP 地址和 Port、仪器的设备地址进行设置。

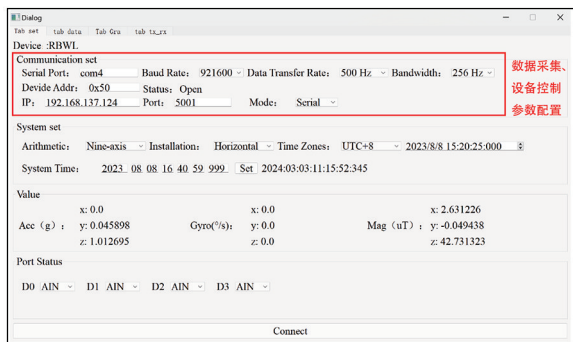


图 8 参数配置及数据显示界面示意
Fig.8 Parameter configuration and data display interface diagram

数据管理模块主要负责将振动信号数据和仪器状态及环境数据分类存储,并提供 SEED 和 miniSEED 文件格式转换功能,以便于预览和后续的数据处理。

2 间接法旋转分量测量

无论是地震、爆炸还是环境振动都包含平动分

量和旋转分量,而旋转分量中含有的波场梯度信息能够进一步揭示地壳的复杂结构等。平动分量和旋转分量的结合能够在地震波场的重建中更加准确、细致地分析地震波的类型、传播特性、波速等,对地震工程领域的结构抗震性能研究具有重大意义,还能够更加细致地分析地层所蕴含的丰富资源,以及提高灾害防御能力等。

目前,旋转分量的测量分为两种:一种是直接对旋转分量进行测量,另一种是通过平动分量间接计算旋转分量^[11-13]。

如表 2 所示,直接法通常利于电化学或光学陀螺仪来测量旋转分量,其灵敏度更高,并且在数据测量和预处理方面操作更加简单,但是其成本高、体积和功耗都较大,部署较为复杂。间接法测量旋转分量的优势在于保持高灵敏度的同时降低了成本、功耗和部署难度,因而选择传感器阵列方式间接测量旋转分量。

表 2 RBWL 与同类测量设备比较

Table 2 Comparison of RBWL with similar rotating component measurement devices

仪器名称	仪器类型	观测类型	观测分量	精度	部署难度	功耗	体积	质量
RBWL	MEMS	平动+旋转	6	中	低	低	小	小
6DOF	速度计阵列	平动+旋转	6	高	中	中	大	大
R-1	电化学	旋转	3	高	中	高	大	大
G-Ring	激光陀螺仪	旋转	3	超高	超高	超高	超大	超大
FOSREM	光纤陀螺仪	旋转	3	高	中	高	大	大
Titan	加速度计	平动	3	中	中	低	中	中

平动分量计算旋转分量的方法主要分为单测站法和密集台阵法,其中,密集台阵法包括差分法和测地学法。差分法相对简单和便于理解,任意质点的旋转运动可以分解到 x 、 y 、 z 这 3 个相互正交的方向上^[14]:

$$\boldsymbol{\omega} = \omega_x \hat{i} + \omega_y \hat{j} + \omega_z \hat{k} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ T_x & T_y & T_z \end{vmatrix}, \quad (2)$$

根据 MEMS 加速度传感器阵列的结构,旋转分量计算公式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_x &= \frac{T_z^C + T_z^E - 2T_z^A}{d_{BD}}, \\ \omega_y &= -\frac{T_z^B + T_z^D - 2T_z^A}{d_{CE}}, \\ \omega_z &= \frac{1}{2} \times \left(\frac{T_x^C + T_x^E - 2T_x^A}{d_{BD}} - \frac{T_y^B + T_y^D - 2T_y^A}{d_{CE}} \right). \end{aligned} \right. \quad (3)$$

其中: T_x 、 T_y 和 T_z 分别 x 、 y 、 z 方向相互正交的平动分量; d_{BD} 和 d_{CE} 分别为传感器 B 、 D 之间的距离以

及 C 、 E 之间的距离; ω_x 、 ω_y 和 ω_z 分别是计算得到的绕 x 、 y 、 z 轴的旋转分量。

3 H/V 谱比测试分析

3.1 H/V 谱比法

H/V 谱比是地表采集的不同频率地震数据的水平分量和垂直分量的傅里叶振幅谱的比值,通常用 H 表示水平分量, V 表示垂直分量^[11,15-16]。 H/V 谱比法通过单点的三分量数据建立谱比曲线,根据谱比曲线的峰值与地层结构基阶共振频率的相互关系计算相关地层属性,被广泛应用于估计地面基本共振频率以及研究土壤—建筑结构共振^[17]。因其具有操作简单快捷和受场地限制少等优点被广泛应用于工程地震领域的节点测试中,用于进行快速场地特性的研究^[18-22]。因此,选用 H/V 谱比法来验证本仪器的可靠性和所采集数据的有效性。

Nakamura 提出的 H/V 的定义^[19]如下:

$$HVS R \triangleq \frac{H}{V} = \frac{H(f)}{V(f)}, \quad (4)$$

其中: H 表示水平分量; V 表示垂直分量。本文用 $U_x(t)$ 、 $U_y(t)$ 、 $U_z(t)$ 分别表示记录的南北、东西和垂直 3 个方向的分量,对应的傅里叶谱分别为 $U_x(f)$ 、 $U_y(f)$ 、 $U_z(f)$ 。水平分量 H 可定义为^[23-24]:

$$H(f) = \sqrt{[U_x^2(f) + U_y^2(f)]/2} \quad (5)$$

则 H/V 可表示为:

$$H/V = \sqrt{\frac{[U_x^2(f) + U_y^2(f)]/2}{U_z^2(f)}} \quad (6)$$

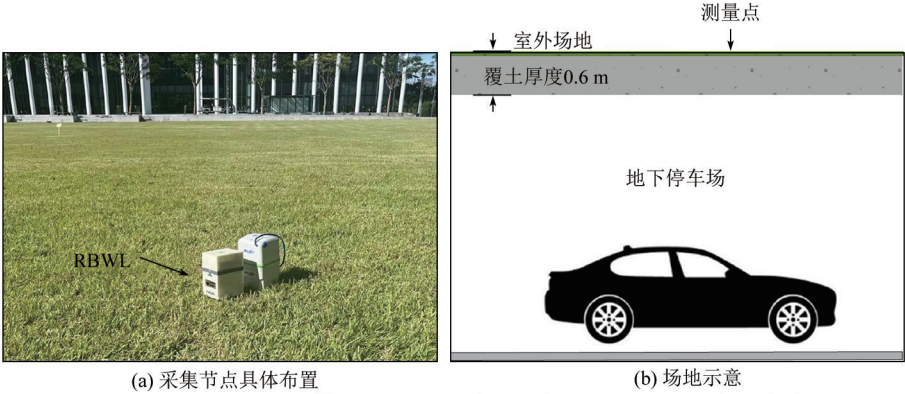


图 9 测试场地布置示意
Fig.9 Schematic diagram of the test site arrangement

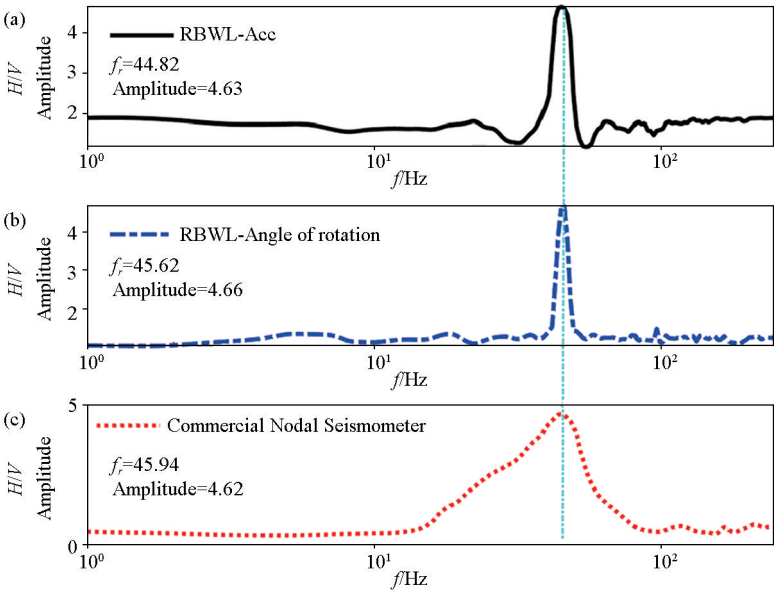
表 3 共振频率与记录时长关系
Table 3 The relationship between resonance frequency and recording duration

f_r /Hz	Lw 最小值 /s	最小有效周期数 / n_c	最小窗口数	最小有用信号持续时间/s	建议的最短记录持续时间/min
5	5	200	10	40	3
10	5	200	10	20	2

3.2 H/V 谱比法实验及结果分析

选择 1 处地下停车场上方作为实验场地,地面与地下停车场顶部之间覆土厚度为 0.6 m, H/V 谱比法观测场地测量布局如图 9 所示。RBWL 装置和商业节点地震仪经过调平后布置在测试场地中,两种仪器同步进行观测,欧洲 SESAME 项目提出的共振频率与记录时卡标准^[25]如表 3 所示,本次观测所记录的数据满足标准。

本次测量中,两种仪器的采样率均设置为 500 Hz,数据采集时长为 20 min,使用 Geopsy 软件进行数据分析和处理。采用反触发式长短时窗法在采集到的噪声时间序列中选择没有强瞬态信号的窗口计算 H/V 谱比曲线,如图 10 所示。



a—RBWL 的 3 个加速度分量绘制的 H/V 谱比曲线;b—RBWL 计算的旋转分量绘制的 H/V 谱比曲线;c—节点地震仪三轴数据绘制的 H/V 谱比曲线
a— H/V curves plotted for the three acceleration components of the RBWL;b— H/V curves plotted for the rotational components calculated by RBWL;c— H/V curves plotted for the three-axis data of the nodal seismometer

图 10 H/V 谱比曲线
Fig.10 H/V spectral ratio curves

图 10a 是通过 Geopsy 软件计算 RBWL 采集的三分量的加速度数据得到的 H/V 谱比曲线,图 10b 是 RBWL 根据其加速度得到的旋转分量数据再通过 Geopsy 软件计算得到的 H/V 谱比曲线,图 10c 是节点地震仪采集的三分量平动数据所对应的 H/V 谱比曲线。图 10 中 3 条曲线的共振频率 f_r 都在 45 Hz 附近,比值都约为 4.6。场地的共振频率 f_r 由 S 波速度和土层厚度共同决定,可通过厚度与共振频率的关系估计厚度 h 。

假设土层厚度为 h ,根据 Abu 等提出的共振频率 f_r 与 h 的关系^[26]:

$$h = \left[\frac{V_{s0}(1-x)}{4f_r} + 1 \right]^{\frac{1}{1-x}} - 1, \quad (7)$$

其中: x 是与土层厚度和质地相关的参数,根据 Abu 等^[26]的建议, x 取值为 0.44, V_{s0} 取 100 m/s。

将图 10 三条曲线的共振频率 f_r 带入式(7),厚度估算结果如表 4 所示。该结果与实际测量结果基本一致,误差小于 4%,表明仪器在降低成本的同时仍然保持了良好性能。估算结果误差产生的原因可能是模型采用的是单层均匀介质而实际土层为多层非均匀介质,实际情况更加复杂导致估算厚度 h 与实际值存在误差。

表 4 土层厚度 h 估算结果

Table 4 Estimation results of soil thickness h

f_r / Hz	h / m	误差 / %
44.82	0.62	3.3
45.62	0.61	1.7
45.94	0.61	1.7

4 结论

RBWL 采集节点选用价格低但性能稳定的 MEMS 传感器元件,并且优化电路设计,将多个传感器集中在一个单元,缩小了系统尺寸,能够一次测量多种类型数据,减少了所需测量仪器的种类和数量,降低了仪器成本,仪器总成本在万元以内,而目前光纤陀螺仪市面价格则在 3 万元以上。RBWL 采集节点采用模块化设计,通过选配不同模块以适应不同环境和需求。在后期维护方面,也仅需更换受损模块即可快速投入工作,不仅降低了制造和后期的维护成本,而且后期维护更加简易和便捷。在功耗方面,MEMS 传感器元件功耗相对光纤陀螺仪传感器元件功耗更低,单个 MEMS 器件功耗仅为 2.5 mW, RBWL 采集节点整机功耗也不大于 2.5 W,远远小

于光纤陀螺仪传感器的功耗 4 W。RBWL 采集节点体积小,仅为 1 支笔的长度,更加便于携带和部署。RBWL 内置电池模块无需外部供电,数据传输采用无线通信设计,无需布置传输电缆,从而使得 RBWL 更加易于部署。

本研究设计的基于 MEMS 传感器的低成本、多分量节点式旋转地震仪 RBWL,通过 MEMS 技术将不同类型检波器、主控制器以及电池集成到一个单元,并以低成本、低功耗实现了对平动分量的采集和旋转分量的计算以及监测。该仪器在实现微型化、无线化和模块化的基础上,能够同时采集加速度、角速度、磁场、姿态、温度等多种类型数据,并提供友好的用户界面。RBWL 与其他多分量旋转地震仪产品相比,具有更低的制造成本和更强的灵活性和可维护性,有利于在实际工程中的应用与推广。通过与商业三分量地震仪器的 H/V 谱比对比实验,证实了 RBWL 仪器在工程地震领域的所采集数据的有效性以及仪器的可靠性。本研究所设计的基于 MEMS 的多分量节点式旋转地震仪为平动分量和旋转分量在地震观测、资源勘探和工程领域的观测提供了一种新型、经济高效的解决方案。

参考文献 (References):

- [1] Hudnut K W. Earthquake geodesy and hazard monitoring[J]. Review of Geophysics, 33(S1):1995, 249-255.
- [2] 严炎,崔一飞,周开来,等.基于地震动信号分析的地质灾害过程重构方法研究与应用[J].工程地质学报,2021,29(1):125-136.
Yan Y, Cui Y F, Zhou K L, et al. Research and application of geological hazards process reconstruction based on seismic signal analysis[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1):125-136.
- [3] 刘庚,刘文义,路珍,等.地面运动旋转分量观测综述——以中国台湾地区旋转运动观测为例[J].地球物理学进展,2020,35(2):422-432.
Liu G, Liu W Y, Lu Z, et al. Review of the measurement of rotational component in ground motions: A case study of rotating motion observation in Taiwan, China[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(2):422-432.
- [4] 王赞,孙丽霞,李栋青,等.勘探地震中的六分量观测[J].石油物探,2021,60(1):13-24.
Wang Y, Sun L X, Li D Q, et al. Six-component observation for exploration seismology[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(1):13-24.
- [5] Zhao B L. Application of multi-component seismic exploration in the exploration and production of lithologic gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(4):397-412.
- [6] 王丹,魏水建,贾跃玮,等.地热资源地震勘探方法综述[J].物探与化探,2015,39(2):253-261.
Wang D, Wei S J, Jia Y W, et al. An overview of methods for geo-

- thermal seismic exploration[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(2): 253–261.
- [7] 秦林鹏, 王赞, 张东明, 等. 六分量地震观测在工程勘查中的应用试验[J]. *地球物理学报*, 2024, 67(1): 308–317.
- Qin L P, Wang Y, Zhang D M, et al. A case study: Application of six-component seismic observations in urban engineering investigation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(1): 308–317.
- [8] 岩巍. 地震勘探节点采集系统设计的要点[J]. *物探与化探*, 2022, 46(3): 570–575.
- Yan W. Key points of the design of a nodal acquisition system for seismic exploration[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(3): 570–575.
- [9] 陈畅, 王赞, 郭高源, 等. 几种旋转地震仪在深部地下巷道的观测对比[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(12): 4569–4582.
- Chen C, Wang Y, Guo G Y, et al. Deep underground observation comparison of rotational seismometers[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(12): 4569–4582.
- [10] Li Z H, Van der Baan M. Tutorial on rotational seismology and its applications in exploration geophysics[J]. *Geophysics*, 2017, 82(5): W17–W30.
- [11] Nawrocki D, Mendecki M J, Teper L. Estimation of the resonance frequency of rotational and translational signals evoked by mining-induced seismicity[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2024, 12: 2296–6463.
- [12] Huang B S. Ground rotational motions of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake as inferred from dense array observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(6): 1307–1310.
- [13] Lin C J, Liu C C, Lee W H K. Recording rotational and translational ground motions of two TAIGER explosions in northeastern Taiwan on 4 March 2008[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009, 99(2B): 1237–1250.
- [14] 李栋青, 王赞, 孙丽霞. 差分法计算地震动旋转分量[J]. *地球科学*, 2021, 46(1): 369–380.
- Li D Q, Wang Y, Sun L X. Calculating rotational components of ground motions by finite difference method[J]. *Earth Science*, 2021, 46(1): 369–380.
- [15] 秦彤威, 王少瞳, 冯宣政等. 微动 H/V 谱比方法[J]. *地球与行星物理论评*, 2021, 52(6): 587–622.
- Qin T W, Wang S T, Feng X Z, Lu L Y. 2021. A review on microtremor H/V spectral ratio method[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(6): 587–622.
- [16] 秦彤威, 冯宣政, 王少瞳, 等. Rayleigh 波 ZH 幅度比(椭率)研究综述[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(1): 39–66.
- Qin T W, Feng X Z, Wang S T, et al. Review on rayleigh wave ZH amplitude ratio(ellipticity)[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(1): 39–66.
- [17] Gosar A. A microtremor HVSR study of the seismic site effects in the area of the town of brežice (se slovenia)[J]. *Acta Geotechnica Slovenica*, 2009, 6: 31–45.
- [18] Arai H, Tokimatsu K. S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(1): 53–63.
- [19] Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 1989, 30(1): 25–33.
- [20] Nogoshi M, Igarashi T. On the amplitude characteristics of microtremor, Part II[J]. *Journal of the Seismological Society of Japan*, 1971, 24(1): 26–40.
- [21] Parolai S, Galiana-Merino J J. Effect of transient seismic noise on estimates of H/V spectral ratios[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96(1): 228–236.
- [22] Fäh D, Kind F, Giardini D. Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site-effects[J]. *Journal of Seismology*, 2003, 4(7): 449–467.
- [23] Bonnefoy-Claudet S, Cotton F, Bard P-Y. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 79(3–4): 205–227.
- [24] Bonnefoy-Claudet S, Köhler A, Cornou C, et al. Effects of love waves on microtremor H/V ratio[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98(1): 288–300.
- [25] Bard P Y, Acerra C, Aguacil G, et al. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2008, 6(4): 1–2.
- [26] Abu Z N, Corradini E, Bignardi S, et al. The passive seismic technique ‘HVSR’ as a reconnaissance tool for mapping paleo-soils: The case of the pilastrì archaeological site, northern Italy[J]. *Archaeological Prospection*, 2017, 24(3): 245–258.

Development of a nodal rotational seismometer with a micro-electro-mechanical system sensor and testing of H/V spectral ratios

JIA Song¹, HE Zhan-Xiang^{2,3,4}, YANG Hui^{4,3,2}, YAO Yong-Chao^{2,3,4}, WANG Cai-Xia¹

(1. School of Applied Science, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Department of Earth and Space Science, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geophysical High-resolution Imaging Technology, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 4. Shenzhen Key Laboratory of Deep Offshore Oil and Gas Exploration Technology, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In response to the increasing demand for large-scale field seismic acquisition, this study developed a low-cost multifunctional nodal rotational seismometer (RBWL) with a micro-electro-mechanical system (MEMS) sensor, considering the functionality, eco-

conomic feasibility, and the ease of arrangement. The RBWL employs a low-cost and low-power MEMS sensor to acquire seismic signals, involving three-component translational motions (T_x, T_y, T_z) and three-component rotational motions (R_x, R_y, R_z). To reduce the impacts of environmental factors on measurements, the system of the RBWL automatically records real-time information including temperature and attitude while performing compensation correction on the measurement results. For real-time monitoring and data transmission at acquisition nodes, the system establishes a data transmission link integrating 4G, cloud, and client, with the measured maximum data transmission rate up to 100 Mbps. The testing of H/V spectral ratios verifies the system functions and principal performance parameters of the RBWL and its effectiveness in engineering physical exploration.

Key words: MEMS; rotational seismometer; wireless data transmission; H/V spectral ratio

(本文编辑:王萌)

熊盛青等荣获自然资源科学技术奖一等奖

自然资源科学技术奖是经国家奖励办备案面向全国自然资源行业的重要科学技术奖项,旨在奖励在科技活动中做出突出贡献的单位和个人。

中国自然资源航空物探遥感中心“航空地球物理与遥感地质”国家重点领域创新团队联合中国人民解放军国防科技大学、北京自动化控制设备研究所完成的“航空重力关键技术突破及应用”荣获自然资源科学技术奖一等奖,主要完成人为熊盛青、周道卿、周锡华、曹聚亮、罗锋、胡平华、曹宝宝、姜作喜、张开东、屈进红、郑宇舟、蔡劭琨、胡悦、王冠鑫、胡夏炜。

该项目攻克了航空重力传感器等“卡脖子”技术,自主研制出两种类型航空重力仪,实现了高端装备研制技术的自主创新和重大突破;突破了强动态干扰下信噪分离等系列关键技术,研制出航空重力数据处理方法和软件,实现了航空重力技术“软装备”的国产化;创建了我国航空重力勘查技术体系,实现了地质调查、能源资源勘查、工程地质安全风险评价、测绘、融合应用等领域的重大应用。相关成果获授权发明专利 25 项、实用新型专利 4 项、软件著作权 15 项,制定行业和内部技术标准 3 项,出版专著 3 部,发表论文 47 篇。项目成果总体达到国际先进水平,在起伏飞行条件下的仪器测量精度、稳定性等方面达到国际领先水平,实现了我国资源领域航空重力勘查技术从无到规模化生产的跨越,产生了显著的社会、经济效益,已成为新一轮找矿突破战略行动优先推广的高新技术。



(万建华,2024 年 11 月 20 日报道)