

陈畅,王赟,郭高原等. 2022. 几种旋转地震仪在深部地下巷道的观测对比. 地球物理学报, 65(12):4569-4582, doi:10.6038/cjg2022Q0318.

Chen C, Wang Y, Guo G Y, et al. 2022. Deep underground observation comparison of rotational seismometers. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(12):4569-4582, doi:10.6038/cjg2022Q0318.

几种旋转地震仪在深部地下巷道的观测对比

陈畅^{1,2}, 王赟^{1,2*}, 郭高原^{1,2}, 操玉文³, 李帅⁴,
张东明⁵, 菅一凡^{1,2}, 汪超⁶

1 中国地质大学(北京), 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

2 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, “多波多分量”研究组, 北京 100083

3 北京大学电子学院, 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871

4 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

5 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074

6 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

摘要 光纤旋转地震仪具有宽频带、高灵敏度、便携等优点, 在地震旋转运动的观测中有着广阔的应用前景. 光学旋转地震仪的性能会受观测环境噪声的影响, 因此, 在低噪环境下测试仪器的自噪声、验证其对远震信号的分辨能力是非常有意义的. 利用淮南停产的潘一东煤矿-848 m 的地下巷道空间, 我们开展了深部地下地震联合观测试验, 对比了 R-2 型电化学式旋转地震仪与 FOS1、FOS2、FOS3 三种光纤旋转地震仪的自噪声水平, 及其记录的远震 Love 波信号垂向旋转分量与切向加速度的相干性. 观测与分析结果表明: 光纤旋转地震仪的灵敏度高于 R-2 电化学式; 较小的体积使得 FOS3 型六分量地震计的自噪声较高, 而相对大体积的 FOS1 型单分量与 FOS2 型双分量光纤旋转地震计具有更低的自噪声和 Allan 方差, 能有效捕获 1000 km 左右的远震旋转信号, 且二者观测地震事件的波形具有较高的一致性. 表明深地环境可用于光纤旋转地震仪的自噪声测试和比对, 且有助于国内旋转地震仪性能的提高.

关键词 光纤; 旋转地震仪; 深部地下; 自噪声; Allan 方差

doi:10.6038/cjg2022Q0318

中图分类号 P315

收稿日期 2022-05-09, 2022-09-28 收修定稿

Deep underground observation comparison of rotational seismometers

CHEN Chang^{1,2}, WANG Yun^{1,2*}, GUO GaoYuan^{1,2}, CAO YuWen³, LI Shuai⁴,
ZHANG DongMing⁵, JIAN YiFan^{1,2}, WANG Chao⁶

1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2 Multi-Wave & Multi-Component (MWMC) Research Group, School of Geophysics and Information Technology,
China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3 State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Electronics,
Peking University, Beijing 100871, China

4 School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

5 Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China

6 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

Abstract In the observation of seismic rotational motion, fiber-optic seismometers with wide frequency band, high sensitivity and portability have broad application prospects. The performance of

基金项目 国家自然科学基金项目(U1839208,62127815,42150201,41874166)和黔科合平台人才项目([2021]5629)联合资助.

第一作者简介 陈畅, 1997 年生, 在读博士, 主要从事六分量地震研究. E-mail: chch6108@163.com

*** 通讯作者** 王赟, 1969 年生, 教授, 主要从事地震各向异性理论与多分量地震技术研究. E-mail: wangyun@mail.gyig.ac.cn

fiber-optic rotational sensors is affected by the ambient noise of the observation environment. Therefore, it is of great significance to test the limit of instrument self-noise and verify its teleseismic signal resolution ability in low-noise environment. In the underground tunnel of the discontinued Huainan Panyi-East Coal Mine, which is located at a depth of -848 meters, we carried out a joint deep underground seismic observation. The self-noise and Love wave recording capabilities of four types of rotational seismometers, including molecular-electronic rotational seismometer (R-2) based on electrochemical technology and three types of fiber-optic rotational seismometers (FOS1/FOS2/FOS3), were compared to figure out instrument sensitivity and characteristics. Results indicate that the sensitivity of the fiber-optic rotational seismometer is higher than that of R-2 electrochemical seismometer; the size of fiber-optic seismometer limits the high self-noise of FOS3 six-component seismometer (three translational components + three rotational components); FOS1 and FOS2 fiber-optic seismometers have lower self-noise and Allan deviation, which can effectively record the teleseismic rotational signals with an epicentral distance of about 1000 km, and the waveforms recorded by the two seismometers keep higher coherence. It can be deduced that the deep underground environment can be used to test and compare the self-noise of fiber-optic rotational seismometers, which will help to understand and improve the performance of rotational seismometers in China.

Keywords Fiber-optic; Rotational seismometer; Deep underground; Self-noise; Allan deviation

0 引言

地震时地面的运动形式有多种. 尽管目前的地震观测以平动三分量速度或加速度记录以及应变观测为主, 但人类对于地震引起旋转运动的探索由来已久 (Aki and Richards, 1980, 2002; Lee et al., 2009a). 国内外的很多研究表明, 地震旋转分量提供的波场信息, 能为波型识别与波场分离、后方位角的估算、面波相速度计算、地球自由振荡、火山地震与震颤等研究提供新的解决方案 (Igel et al., 2007, 2011; Wassermann et al., 2016; Sollberger et al., 2020; Yuan et al., 2021; Eibl et al., 2022). 在缺乏旋转地震仪的情况下, 通过平动观测记录换算是获得旋转分量的常用方法, 但换算值并不能完全替代观测的旋转 (Li et al., 2004; Chen et al., 2020; 李栋青等, 2021). 近年来, 地震旋转运动研究逐渐兴起, 离不开旋转地震观测仪器的快速发展.

根据传感原理可将旋转地震仪分为机械式 (Teisseyre et al., 2003)、电化学式与光学式. 其中, 电化学式旋转地震仪是通过电容换能器采集流体运动引起的压力或带电粒子分布特性变化, 转换为电压或电流值进而测量旋转运动 (Bernauer et al., 2012); 光学式旋转地震仪是依据 Sagnac 效应, 通过测量旋转角速度 Ω 实现旋转运动测量 (Vali and Shorthill,

1976). 光学式旋转地震仪包括环形激光陀螺仪与光纤旋转地震仪两种类型. 环形激光陀螺仪是目前精度最高的旋转地震仪, 代表性的包括单轴大型激光陀螺仪 G-ring (Schreiber et al., 2009) 与 GINGERino RLG (Simonelli et al., 2016; Belfi et al., 2017; Simonelli et al., 2018), 以及四轴大型激光陀螺仪 ROMY 等 (Sollberger et al., 2020; Igel et al., 2021). 相比于体积庞大、成本高昂、寿命有限的环形激光陀螺仪, 光纤旋转地震仪更具实用性与便携性, 典型的包括 blueSeis-3A 与 RotSensor3C 等, 其精度可达 $2 \times 10^{-8} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 与 $1.2 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 可广泛用于旋转运动的地震观测 (Bernauer et al., 2018; Cao et al., 2021; Izgi et al., 2021).

光纤旋转地震仪具有较高的灵敏度, 但对观测环境的要求也较高. 由于中远震的旋转信号能量往往较弱 (孙丽霞等, 2021), 旋转地震仪对环境噪声的响应与抑制程度对中远震旋转运动的捕获是十分关键的. 淮南煤矿地下巷道深达海拔 -848 m, 相比于地面环境, 具有“超静”的低干扰、低背景噪声环境优势 (Hauksson et al., 1987; Carter et al., 1991; Boese et al., 2015; 王芳等, 2017; 张苗苗等, 2021). 相比常见的井中观测, 利用停产矿区庞大的地下巷道, 能为更多仪器同步开展观测试验提供空间资源与人员驻留实验环境. 为此, 我们布设多种国内研发的新型光纤旋转地震仪在淮南深部地下实施了地震

联合观测. 本文通过无明显地震时段的噪声信号分析, 对比了电化学式 R-2 旋转地震仪与三种光纤旋转地震仪器的自噪声水平; 并通过一次地震事件的观测, 验证了光纤旋转地震仪对地震信号的捕获能力.

1 地震观测系统

1.1 淮南深地观测

淮南矿业集团下属的潘一东矿区位于安徽省淮

南市境内, 郟庐断裂带的西侧, 淮河北岸. 矿区停产, 留下了巨大的地下巷道空间与完整的供电、供水等配套设施, 非常适合包括地球物理场观测在内的众多学科的深地科学实验. 在海拔高度 -848 m 的井下巷道空间, 我们自 2021 年 4 月开展了有多种仪器参与的六分量地震联合观测实验. 图 1 是用 GMT(Wessel et al., 2019)绘制的淮南观测台站位置示意图, 其中红色圆圈表示观测期间发生于台湾省花莲的两次较强地震震中位置.

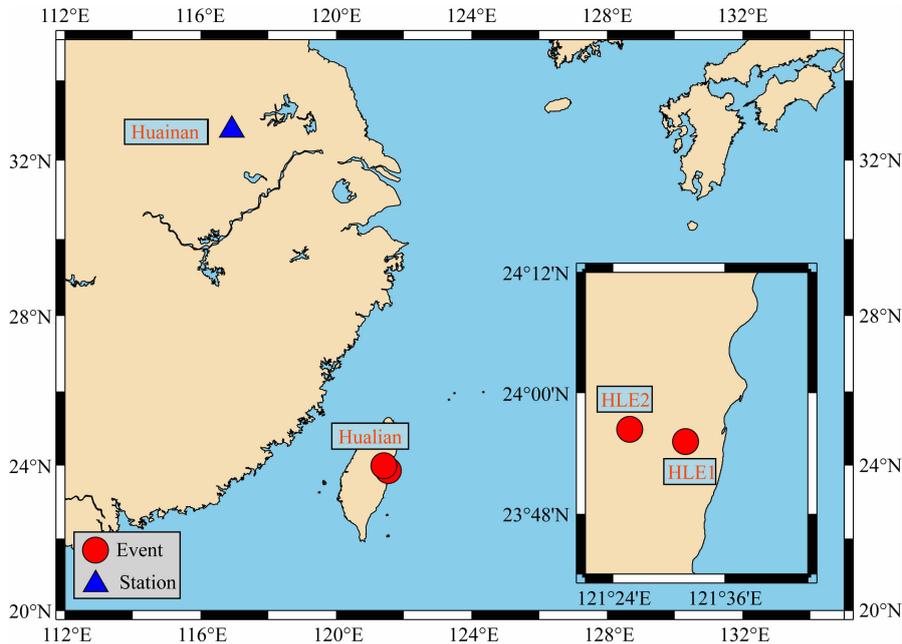


图 1 淮南深部地下观测地点与花莲地震震中相对位置

Fig. 1 Deep underground observation site in Huainan and relative locations of Hualian earthquakes' epicenter

1.2 观测仪器

深地实验的仪器布置如图 2 和图 3 所示, 大部分仪器放置在海拔 -848 m 巷道的制冷洞室内; 其中三台光纤旋转地震仪, 分别编号为 FOS1、FOS2、FOS3, 一台电化学式旋转地震仪 R-2 以及数台宽频带地震仪组成了图 2b 所示的观测阵列. 同时, 在地面海拔 +22 m 的建筑物房间内, 放置了一台电化学式旋转地震仪 R-2 与三台宽频带地震仪, 作为噪声对比与时间校正的参考台站. 地上与地下所有仪器的采样率等观测参数设置如表 1 所示, 观测使用的地震仪具体性能介绍如下.

1.2.1 单分量光纤旋转地震仪 FOS1

FOS1 型光纤旋转地震仪只记录垂向旋转分量 R_z , 它具有低自噪声、高分辨率、宽频带范围等特点. 该仪器采用新型的双光源差分陀螺方案, 在同一个光纤敏感环路中实现两个不同波长等效光纤陀螺

表 1 观测仪器的参数

Table 1 Parameters of observation instruments

地震仪	采样率(sample per second)	观测分量	时间源	时差偏移量(s)
FOS1	200	1C rotation (R_z)	Computer	3.520
FOS2	100	2C rotation (R_z/R_y)	Computer	39.010
FOS3	1000	3C rotation & 3C translation	None	-412.155
R-2	250	3C rotation	GNSS	0.000
CMG-40TDE	200	3C translation	GNSS	0.315
EPS	200	3C translation	GNSS	1.560

同时工作, 将其差分运算结果作为输出. 由于共用相同的光纤敏感环路, 由环境因素引起的大部分漂移和噪声被视为共模误差, 经差分运算后被大大降低, 从而可有效降低光纤旋转地震仪的本底噪声并提高

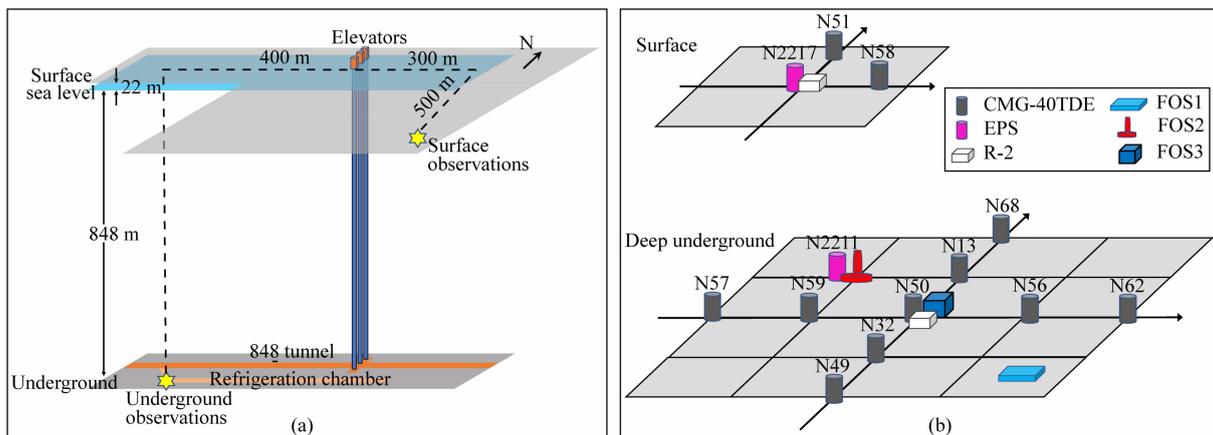


图 2 深地与地面观测位置示意图(a)与仪器阵列(b)

Fig. 2 Position diagram (a) and instrument array (b) of deep underground and surface stations

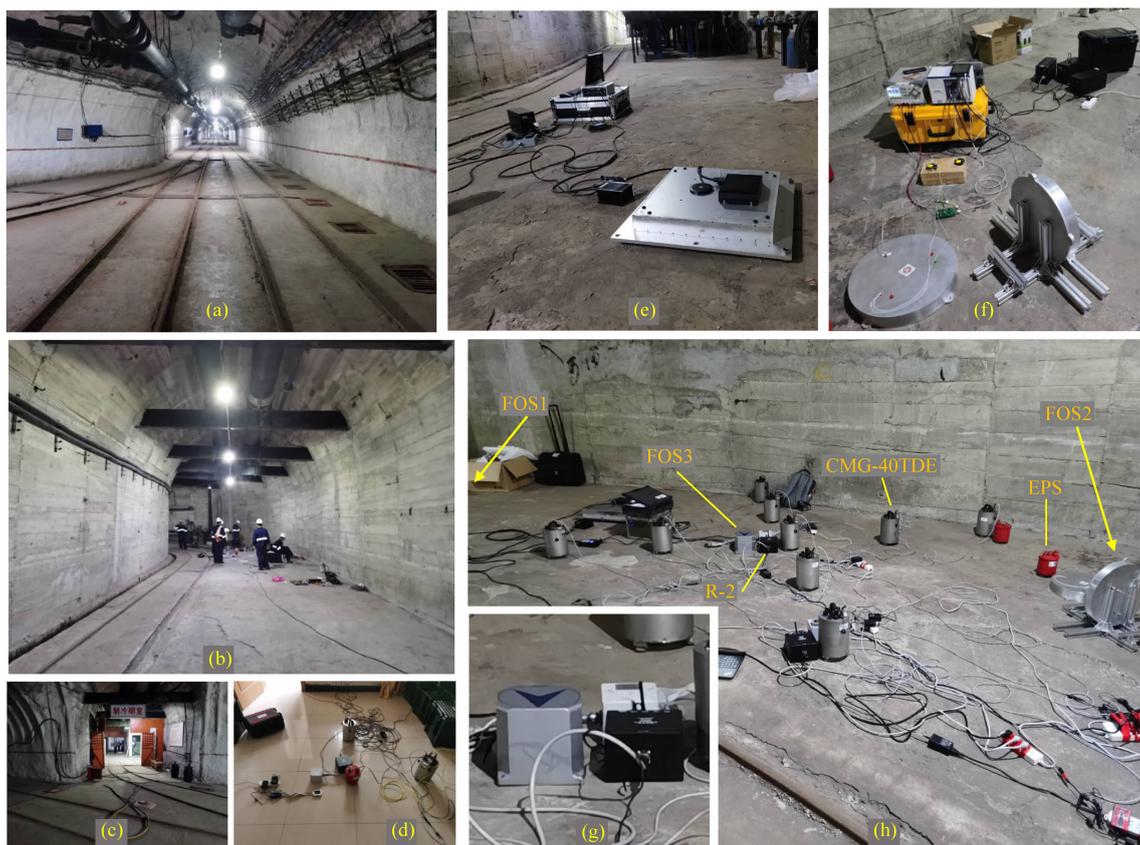


图 3 观测现场图片

(a) -848 m 井下巷道; (b) 深地仪器布设现场图; (c) 制冷洞室; (d) 地面观测仪器阵列; (e) FOS1 光纤旋转地震仪; (f) FOS2 光纤旋转地震仪; (g) FOS3 六分量地震仪(左)与 R-2 旋转地震仪(右); (h) 深地观测仪器阵列。

Fig. 3 Photos of observation stations

(a) -848 m underground tunnel; (b) Photos when arranging instruments; (c) Refrigeration chamber; (d) Surface observation instrument array; (e) FOS1 fiber-optic rotational seismometer; (f) FOS2 fiber-optic rotational seismometer; (g) FOS3 six-component seismometer (left) and R-2 rotational seismometer (right); (h) Deep underground observation instrument array.

长期稳定性(Yang et al., 2020)。在结构设计上,该陀螺在物理空间上将源器件与无源器件分离,有效地减少了电路及有源器件发热对光纤光路的影响。

1.2.2 两分量光纤旋转地震仪 FOS2

FOS2 型光纤旋转地震仪由两个单分量光纤陀螺组合而成,可观测垂向旋转与某一个水平旋转分量,本次实验观测是垂直向(R_z)和东西向旋转分量

(R_y)。该光纤陀螺采用了基于单模光纤敏感环的消偏陀螺结构,与保偏光纤相比,单模光纤的光学传输损耗更低,有利于提高光纤光路输出的探测功率,以减小散粒噪声水平(Cao et al., 2021; 操玉文等, 2022)。

1.2.3 六分量地震仪 FOS3

FOS3 型光纤旋转地震仪集成了三轴正交的光纤陀螺仪和石英挠性加速度计,可同时观测垂直正交的三轴平动加速度与三轴旋转角速率,具备直接观测完整六分量波场的能力。其中平动观测采用石英挠性加速度计,旋转观测采用高动态范围光纤陀螺。该仪器集成度和成熟性较高,配备了外接 GNSS 接收机的能力,GNSS 提供的位置和 GPS 信息可以为 FOS3 提供精准的相对位置时间信息。

1.2.4 电化学式旋转地震仪 R-2

R-2 型旋转地震仪的测量原理是利用四电极电化学电池中电解质运动对电荷转移的影响和变化(Agafonov et al., 2015),它可以同时观测垂直正交的三分量角速率。本次深地观测使用的 R-2 是 eentec 公司(<http://www.eentec.com/>)研制的第二代电化学式旋转地震仪(Bernauer et al., 2012),频带范围为 0.033~50 Hz,标称自噪声水平达到 -125 dB($0 \text{ dB} = 1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$)。

1.2.5 宽频带平动地震仪 CMG-40TDE/EPs

本次深地观测还使用了两种平动三分量宽频带地震仪。一种是 Guralp 公司(<http://www.guralp.com/>)生产的 CMG-40TDE 宽频带地震仪,频带范围 0.033~100 Hz;另一种是中地装(重庆)地质仪器有限公司(<http://www.cgif.com.cn/>)生产的 EPs 宽频带地震仪,频带范围 0.1~100 Hz。

2 数据处理与对比

我们首先利用无地震事件时间段的噪声信号计算功率谱密度,对比各台仪器的自噪声水平;然后通过 Allan 方差的分析进行各仪器的性能参数对比;最后,通过台湾花莲地震事件对比了旋转分量的波形、时频分布、交叉小波变换与小波相干谱。

2.1 数据预处理

地震数据预处理一般包括仪器响应校正、去均值、去趋势等步骤。地震仪器的原始观测记录一般表现为数据采集器电子计数的时间序列,需要经过去仪器响应等预处理得到真实的速度或加速度等物理量。所以,宽频带地震仪需要对仪器响应的传递函数

进行卷积,而光学传感器的一大优点就是其功率谱密度随频率变化平缓,从而拥有简单的频率均匀传递函数,一般不需要进行去仪器响应(Igel et al., 2007)。

时差校正也是本次观测试验数据预处理的重要一环。地面放置的平动与旋转地震仪均采用 GNSS 授时,深部地下的光纤旋转地震仪采用计算机授时。而对于深部地下需要卫星授时的仪器,由于无法接收到 GNSS 信号,经过试验,我们在地面将仪器开机预授时,后期再与地面参考台站观测数据进行对比,通过滑动互相关方法校正时间差,对地下仪器观测的信号进行了准确时间定位。

2.2 仪器自噪声

仪器的自噪声水平是评价仪器精度与分辨率的重要参数,表示仪器自身产生的可能叠加在被测信号上的一定频率范围内的能量(中国地震局, 2007);一般可选择环境温度变化小、周围无振动干扰、场地台基噪声低的观测室进行自噪声测试,利用传感器静止且无振动信号输入时段的记录计算地震仪器的自噪声。但这种计算有一个前提条件,即环境噪声要低于仪器本底噪声。例如, Bernauer 等(2021)利用精度很高的大型激光陀螺仪 ROMY 确定了真实环境噪声的上限,并以此为依据对比同址观测的其他旋转地震仪的自噪声水平。本次试验中,为尽可能地降低人类活动的干扰,选择夜间 22 时至次日凌晨 3 时的深部地下 5 h 观测记录作为噪声对比,三个旋转分量各台仪器的噪声均方根功率谱密度(root PSD)如图 4 所示。

从图 4 中可以看到, FOS1 旋转地震仪观测噪声的均方根功率谱密度曲线(蓝色)在 10 Hz 以下低频段趋于平稳,约为 $1 \times 10^{-8} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,但在 1.2 Hz 与 2.2 Hz 左右有两处明显凸起,推测为井下通风系统产生的气流影响(Bonnefoy-Claudet et al., 2006)。与实验室测量的后续图 12 显示的法国 iXblue 公司的旋转地震仪响应曲线(Elliot et al., 2017)对比, 1~10 Hz 间存在的这一突出能量或是与仪器和环境有关的某一相对固定频率的扰动。10 Hz 以上频段噪声水平逐渐升高,且存在多处谐波噪声。FOS2 的功率谱密度在 0.2 Hz 以下的低频区低于 FOS1,随后至 1 Hz 经历了一个逐渐增大的过程,但依然处于 $2 \times 10^{-8} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的较低水平。在 10 Hz 以上高频段, FOS2 的噪声水平明显小于 FOS1。值得注意的是, FOS2 在整个频段的功率谱密度变化较为明显,其主要原因可能是测试

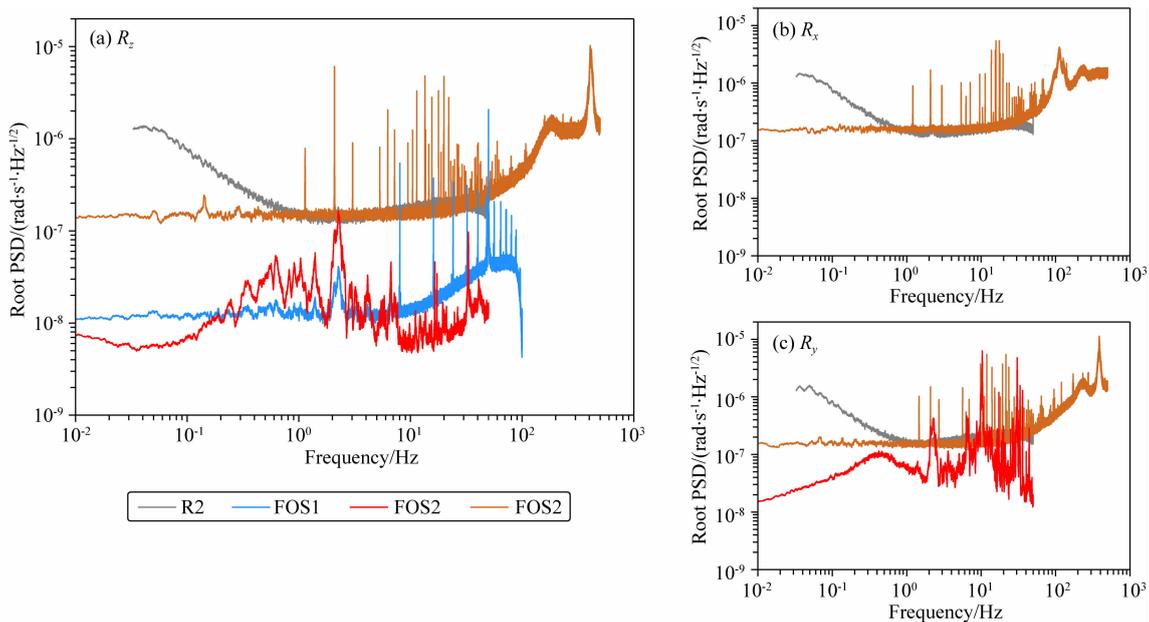


图 4 旋转地震仪 R_z (a), R_x (b) 与 R_y (c) 分量噪声均方根功率谱密度

Fig. 4 Root PSD of R_z (a), R_x (b), R_y (c) component of rotational seismometers

环境本身在该频段能量较高, FOS2 响应明显, 而 FOS1 响应较弱, 导致两者在频谱上的差异; 也可能是二者在通频带内的响应稳定性方面存在差异, 以后需要利用更高精度的仪器进行标定和比测。

FOS3 的均方根功率谱密度在 50 Hz 以下频段呈平稳态势, 在 $2 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 左右; 在 50 Hz 以上频段逐渐增大. R-2 旋转地震仪观测噪声在 1~50 Hz 频带内与 FOS3 近似, 说明二者灵敏度相近; 但在 1 Hz 以下频带内 R-2 的自噪声水平升高, 将可能影响对常见低频地震信号的观测。

在同址同时段背景噪声观测中, 环境噪声是相同的, 但四种仪器并未显示响应一致性, 尤其 R-2 的低频响应与其他三种差异巨大. 对比 R-2 观测噪声的功率谱密度曲线与 eentec 公司发布的参数说明页 (<http://eentec.com/r2eng2018.pdf>) 上的仪器自噪声曲线(图 5), 二者具有近似的平缓趋势与数值; 再根据 FOS1 和 FOS2 的噪声谱, 可推测 R-2 呈现的仅是仪器的本底噪声, 而非环境噪声, 说明该仪器精度较差, 本次地下观测记录的是仪器本底噪声, 而非环境振动, 不适于深地“超静”环境的旋转观测. 同理可以推测 FOS3 记录的也是仪器的本底噪声, R-2 和 FOS3 的精度低于 FOS1 和 FOS2 近一个量级。

通过 R_z 分量的均方根功率谱密度对比可以看出, 在 100 Hz 以上的相对高频端, 除 FOS3 具有较宽的高频段, 其他三种旋转地震仪均为 50 Hz 或 100 Hz 以下的低频类型. 且不容忽视的是, 三种光

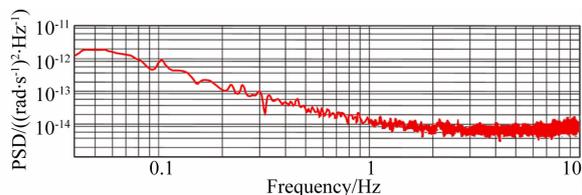


图 5 R-2 旋转地震仪自噪声曲线(根据仪器手册修改)

Fig. 5 Self-noise of R-2 rotational seismometer (modified from the instrument manual)

纤地震仪在 1 Hz 以上频段均存在强能量和不同基频的谐波干扰, 而电化学仪器则没有。

在绕水平轴的旋转分量上, FOS3 与 R-2 表现出与 R_z 分量相似的自噪声水平与频率变化趋势. 值得注意的是, FOS2 的 R_y 分量均方根噪声功率谱密度整体上高于 R_z 分量. 造成这种现象的主要原因是 R_z 分量使用了精度高于 R_y 分量的改进型光纤陀螺; 此外, 观测绕水平轴旋转分量的光纤陀螺是利用钢制支架垂直立于地面的, 更容易受到与地面耦合不佳(Diaz et al., 2010; 马鑫等, 2019)以及井下不间断通风系统带来气流扰动的影响(Bonnefoy-Claudet et al., 2006)。

2.3 谐波噪声对比

根据噪声功率谱密度曲线图 4 可以看出, FOS1 与 FOS3 观测到了大量谐波噪声. 提取谐波噪声的频带分布信息, 如图 6 所示, 可以看出, FOS1 主要存在一组谐波信号, 基频约为 8.031 Hz, 对应最大振幅约为 $0.044 \mu\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; 对谐波频率与阶数对应

关系进行线性拟合,拟合曲线的斜率为 8.0311,与基频相等,相关系数 $R^2 = 1$;各阶谐波的最大振幅 (dB)随频率的增大而降低,也近似呈线性. FOS3 主要存在三组谐波信号,基频分别为 1.138 Hz(HW1)、2.087 Hz(HW2)、3.036 Hz(HW3),倍频随阶数的增大呈近似线性增长;谐波 HW2 的最大振幅 (dB)随频率变化趋势可用对数函数拟合,而 HW1 与 HW3 变化较为复杂,可能是受其他混杂信号的干扰. 尽管 FOS1 和 FOS3 的谐波噪声基频均大于 1 Hz,后文分析中的 HLE1 与 HLE2 两次远震信号主要能量都集中在 1 Hz 以下,经过带通滤波后可去除谐波噪声对这两次地震信号的影响;但对于震中距较小的小弱震与微震信号,其主频相对偏高,谐波噪声会产生明显影响,因此需要对谐波噪声来源进行专门的

定位与分析,并在未来的仪器设计中优化抗干扰能力.

2.4 Allan 方差

为了进一步评估旋转地震仪的性能,对上述 5 h 噪声记录进行 Allan 方差的计算 (Allan, 1966; El-Sheimy et al., 2008). 表 2 展示了各台仪器的角度随机游走 (ARW)、零偏不稳定性 (BI) 与速率随机游走 (RRW) 三个特征参数的对比. 综合来看, FOS1 与 FOS2 的三个噪声参数均远小于 FOS3 与 R-2,且光纤旋转地震仪 (包括 FOS3 型) 在零漂稳定性与速率随机游走走上优于电化学式仪器 R-2.

Allan 曲线 (图 7) 也显示了相似的结论. FOS1 与 FOS3 的 Allan 曲线基本呈线性,斜率约等于 -1 ,表示这两种仪器在这 5 h 内主要受到角度随机

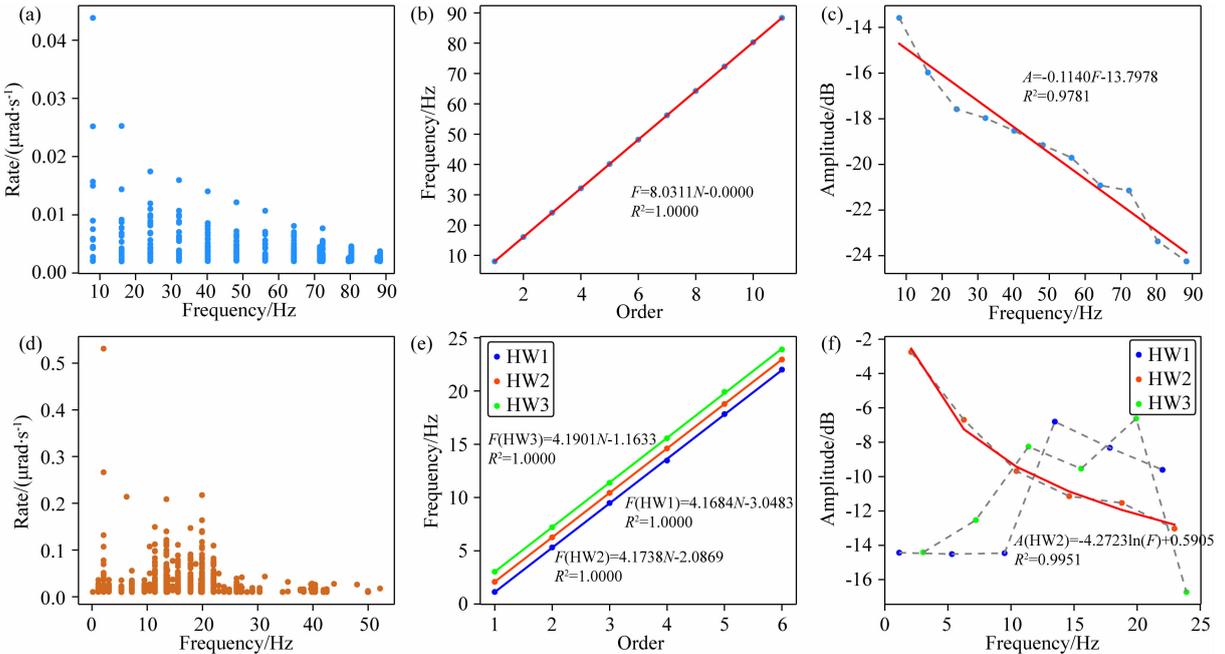


图 6 FOS1(a—c)与 FOS3(d—f)谐波噪声频带分布

(a, d) 谐波噪声振幅与频率散点图; (b, e) 谐波阶数对应频率关系; (c, f) 振幅 (dB)-频率衰减关系.

A —Amplitude, F —Frequency, N —Order.

Fig. 6 FOS1 (a—c) and FOS3 (d—f) harmonic noise frequency band distribution

(a, d) Harmonic noise amplitude and frequency scatter plot; (b, e) Frequency relation of harmonic order;

(c, f) Amplitude (dB)-frequency attenuation relationship.

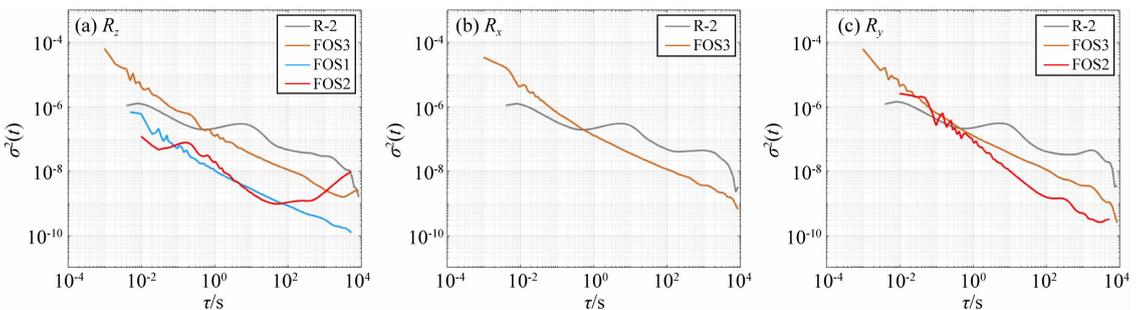


图 7 旋转地震仪 Allan 方差曲线

Fig. 7 Allan deviation of rotational seismometers

游走噪声的影响. FOS1 在小于 100 s 周期内与 FOS2 近似, 在更长周期上体现了一定的优势. FOS2 的 R_z 分量 Allan 曲线非常接近经典 V 型曲线 (Vaccaro and Zaki, 2012), 在 100 s 周期以上有明显抬升, 所包含的噪声比较丰富. 与功率谱密度曲线对比类似的是, 两个分量上存在差别. R-2 的 Allan 方差曲线在 0.2~20 s 的范围内有一个凸包, 原因可能是: (1) 此阶段代表相关噪声干扰, 也可能是 (2) 此频率范围内 R2 的传递函数为非线性的 (Bernauer et al., 2012).

表 2 仪器测试特征参数

Table 2 Instrument test characteristic parameters

旋转分量	仪器型号	ARW(rad · s ^{-1/2})	BI(rad · s ^{-1/3})	RRW(rad · s ^{-1/2})
R_z	FOS1	8.0601×10^{-9}	2.5870×10^{-10}	5.4394×10^{-12}
	FOS2	3.2342×10^{-8}	1.7853×10^{-9}	9.8743×10^{-11}
	FOS3	1.0623×10^{-7}	2.3998×10^{-9}	4.6819×10^{-11}
	R-2	1.0688×10^{-7}	4.3448×10^{-7}	1.6499×10^{-9}
R_x	FOS3	1.0343×10^{-6}	5.3496×10^{-9}	1.9141×10^{-10}
	R-2	4.6565×10^{-7}	6.5485×10^{-8}	2.6672×10^{-9}
R_y	FOS2	1.5191×10^{-8}	2.1524×10^{-9}	7.8055×10^{-12}
	FOS3	1.1581×10^{-7}	5.1934×10^{-9}	2.7604×10^{-11}
	R-2	1.2256×10^{-7}	4.8453×10^{-8}	6.5229×10^{-11}

2.5 地震观测对比

根据中国地震台网中心记录的淮南观测期间地震目录 (<https://news.ceic.ac.cn/>), 遍历淮南深地观测的地震数据, 共识别出对应的 107 次 3 级以上地震的平动信号. 但由于多为震中距大于 1000 km 的远震, 旋转信号比平动信号相对更弱, 仅识别出 2 次地震事件, 即 2021 年 4 月 18 日在台湾花莲发生的两次 5 级以上地震 (图 1 中 HLE1 与 HLE2, 地震目录见表 3). 两次地震震中的距离仅约 10 km, 发震时刻仅相差约 3 min, 均为浅源地震. 图 8 展示了淮南深地不同仪器观测的地震波到达时段的信号. 其中, 旋转地震记录的是共同观测的 R_z 旋转速率, 宽频带地震记录的是切向平动加速度分量 (由于新冠疫情和数采存储问题, R-2 未记录到该时段的数据). 每张子图的上半部分是滤波前后的波形 (灰色为滤波前的波形), 并标注了滤波后波形的信噪比 SNR (本文使用的信噪比计算方法为有效信号最高振幅与噪声段振幅均方根的比值); 下半部分为连续小波变换时频谱 (Kristekova et al., 2006). 宽频带地震仪的地震记录中标注了根据 iasp91 模型计算的地震波理论到时 (Kennett and Engdahl, 1991).

表 3 花莲 M5.6 与 M6.1 地震时间与位置信息

Table 3 Earthquake catalog of Hualian M5.6 and M6.1 earthquakes

编号	发震时刻 (UTC)	震级 (M)	纬度 (°)	经度 (°)	深度 (km)	震中距 (km)
HLE1	2021-04-18 14:11:39	5.6	23.92	121.53	7	1078.80
HLE2	2021-04-18 14:14:38	6.1	23.94	121.43	5	1072.71

由图 8 可以看出, 旋转信号的信噪比最高仅为 9.85 (FOS2), 远低于平动信号信噪比, 一方面说明旋转信号传播衰减快, 另一方面对旋转地震仪的精度提出了更高要求, 或需要提出新的观测方法提高信噪比. 而相比于大型激光陀螺仪对上万千米震中距的地震事件的观测能力 (Lee et al., 2009b), 此次的试验显示了光纤旋转地震仪的精度仍有较大提升空间 (Aki and Richards, 2002).

在各向同性介质中, 水平极化的 SH 波与 Love 波只产生 R_z 方向的旋转运动, 而 SV 波与 Rayleigh 波会产生绕水平轴的旋转. 显然, FOS1 与 FOS2 有效记录了两次地震的 R_z 旋转信号, 在时频谱上能看到两处较强的 Love 波的能量. 在滤波器通带内的不同频率, 旋转信号也表现出不同的强度: FOS1 的记录在 0.3~0.4 Hz 频段响应高, FOS2 在 0.6~0.7 Hz 频段响应高; 受限于明显高于另两台仪器的自噪声水平, FOS3 没有记录到这两次地震事件.

已有研究表明, 联合应用旋转分量与平动分量可为地震后方位角与相速度的计算提供新的解决方案 (Igel et al., 2005). 即理论上, 利用观测的 Love 波垂向旋转速率与切向加速度可实现 Love 波相速度的直接反演. 实际观测中, 大量实例证明旋转地震仪观测的 Love 波 R_z 分量与同址观测的平动切向加速度 A_t 具有较高的相关性 (Kurrle et al., 2010; Yuan et al., 2020), 这也为评估旋转地震仪精度与性能提供了参考. 图 9 展示了 HLE2 地震 Love 波到达后的平动与旋转信号归一化波形对比. 为了量化 Love 波时窗内垂向旋转速度与切向加速度的相关性, 我们沿时间序列滑动长度为 2 s 的时间窗, 计算并标记每个时间窗内波形的互相关系数. 与 FOS1 相比, FOS2 观测的 R_z 分量表现出与切向加速度更高的相关性, 大多数时间窗内相关系数都在 0.75 以上, 说明 FOS2 对于地震事件的观测和识别具有一定的优势.

为了更清晰地对比垂向旋转与切向加速度在时间与频率域的相干性, 我们对观测信号进行了小波相

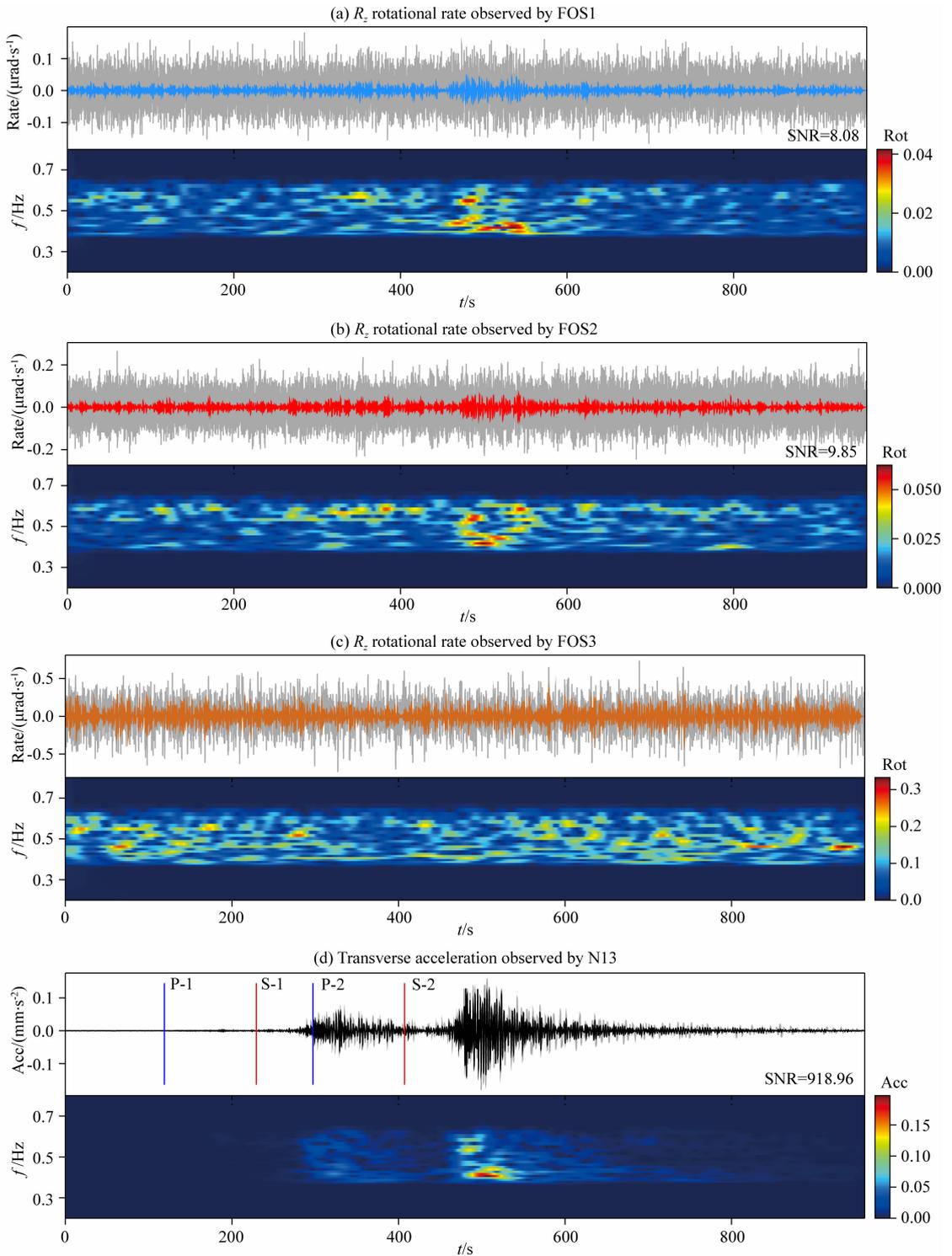


图 8 光纤旋转地震仪 FOS1 (a), FOS2 (b), FOS3 (c) 与宽频带地震仪 CMG-40TDE (d) 的花莲地震观测记录及其时频谱子图上半部分灰色波形为原始信号, 其他颜色为带通滤波后信号 (pass band: 0.3~0.7 Hz).

Fig. 8 Waveform and time-frequency spectrum of Hualian earthquake recorded by fiber-optic rotational seismometers FOS1 (a), FOS2 (b), FOS3 (c) and broadband seismometer CMG-40TDE (d)

The gray waveform in the upper half of the sub-graph is the original signal, and the other colors are band-pass filtered signals (passband: 0.3~0.7 Hz).

干分析 (Grinsted et al., 2004; Mao et al., 2020). 图 10 中第一列的功率谱密度首先展示了频率域能量上的对比, FOS1 观测旋转分量的能量弱于 FOS2, 尤其是在 0.5~0.7 Hz 的频带中. 交叉小波

变换谱 (Cross Wavelet Transform, XWT) 揭示了 R_z 旋转速率与 A_t 平动加速度在两次地震信号到达的时间段具有较明显的共同功率和相对相位. 而在地震信号到达之前的噪声时段, FOS1 与 FOS2 之

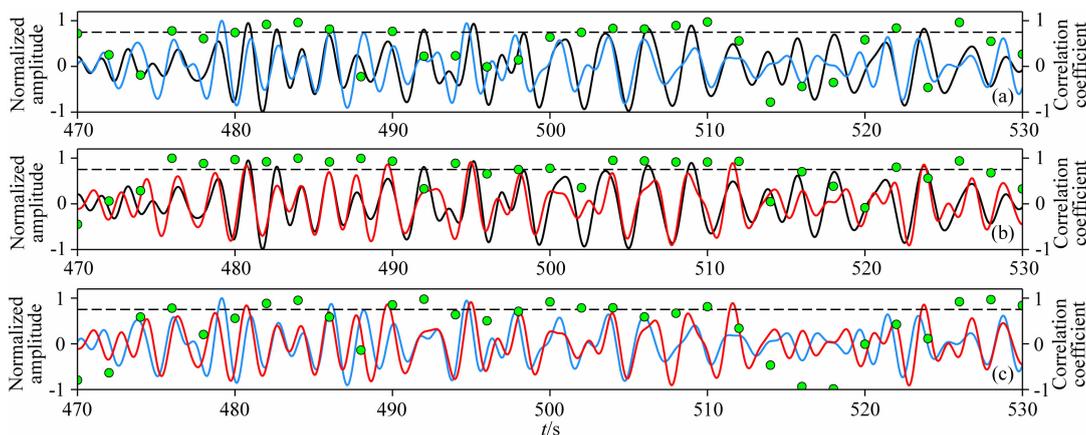


图 9 R_z 旋转速率与 A_t 平动切向加速度拟合程度与时域相关性

(a) A_t 与 R_z (FOS1 观测); (b) A_t 与 R_z (FOS2 观测); (c) R_z (FOS1 观测) 与 R_z (FOS2 观测). 黑色曲线为宽频带地震仪 CMG-40TDE 观测的切向加速度, 蓝色与红色曲线分别为 FOS1 与 FOS2 旋转地震仪观测的垂向旋转速率, 虚线为相关系数 0.75 的对照线. 绿色圆圈为对应时间窗内波形的相关系数.

Fig. 9 The fitting degree of R_z rotational rate and A_t transverse acceleration and their correlation coefficients in time domain

(a) A_t and R_z (FOS1); (b) A_t and R_z (FOS2); (c) R_z (FOS1) and R_z (FOS2). The black curve is the transverse acceleration observed by broadband seismometer CMG-40TDE. The blue and red curves are the vertical rotational rate observed by FOS1 and FOS2 rotational seismometers, respectively. The dotted line is the control line with the correlation coefficient of 0.75. The green circle is the correlation coefficient of waveform in the corresponding time window.

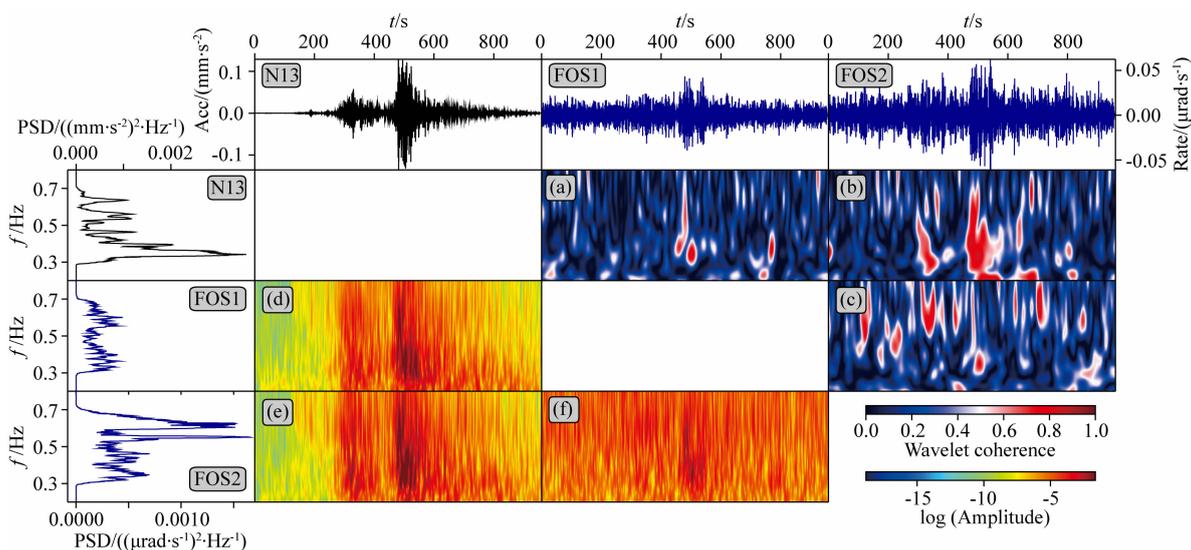


图 10 切向加速度与垂向旋转速率的小波相干分析

第一行为时间域的加速度/旋转速率波形, 第一列为功率谱密度. (a)–(c) 为对应行列两台仪器信号的小波相干谱 (WTC), (d)–(f) 为交叉小波变换谱 (XWT) 对数标度振幅.

Fig. 10 Wavelet coherence analysis of transverse acceleration and vertical rotational rate

The first row displays the acceleration/rotation rate waveform in the time domain, and the first column shows the Power Spectral Density. (a)–(c) is the Wavelet Coherence (WTC) of the two instrument signals corresponding to the row and column, and (d)–(f) is the logarithmic scaling amplitude of the Cross Wavelet Transform (XWT).

间的 XWT 也体现了较强的功率一致性. 小波相干谱 (Wavelet Coherence, WTC) 进一步揭示了三段信号连续小波变换谱的相干性, 与 FOS1 相比, FOS2 观测的 R_z 旋转与切向平动加速度之间体现了更强的相干性与更宽的相干频带.

3 讨论

理论上, 巨厚覆盖层对源于地表或浅层的人类活动干扰等噪声具有吸收和衰减的作用, 因此, 深部地下的噪声水平应当显著低于地面 (Carter et al., 1991; Marfaing et al., 2009; Rosat et al., 2016). 通过与地面参考台站宽频带平动地震仪的噪声对比, 我们也验证了深部地下的噪声平动分量功率谱密度低于地面最高达 50 dB (张苗苗等, 2021; 王赟等, 2022). 这在为高精度的光纤陀螺提供了绝佳的观测环境的同时, 也对仪器的自噪声与精度提出了新的挑战. 本次试验验证了在深部地下低噪环境中开展旋转地震观测的可行性, 为未来更高精度的光学式旋转地震仪的仪器标定与自噪声测试提供了新的途径.

3.1 低频稳定性与仪器便携性

对比 FOS1 与 FOS2 的噪声功率谱密度, FOS1 在低频段更为平稳, 但在 10 Hz 以上高频段噪声水平较高; FOS2 的高频噪声更低, 这是由于 FOS2 具有更长的光纤长度以及开环光学结构, 而低频段的噪声变化目前还无法确认来自于环境还是传感器本身. 参照 iXblue 公司在研发旋转地震仪时两代样机

自噪声 PSD 对比曲线, 如图 11 所示, 可以发现 FOS1 与 FOS2 面临相同的问题——如何在提高低频稳定性与降低高频噪声之间寻找一个平衡点, 这是光纤陀螺仪设计与改进的挑战之一 (de Toldi et al., 2017).

仪器的便携性也是需要考虑的因素之一. 实际观测中, 更小巧的体积意味着更高的便携性与更灵活的安装场地要求. 光纤陀螺的精度水平与其光纤环圈的直径和长度有直接关系, 而 FOS1 与 FOS2 的体积远大于 FOS3, 这也是造成前两者精度高于后者的主要原因. 但不可否认的是高度集成的六分量观测能力与相对成熟的、近乎商用的 FOS3 在工程地震领域应具有较高的适用性.

3.2 观测系统环境噪声与授时保障

本次联合观测试验环境存在的一些问题也引起了我们的关注. 一方面, FOS1 与 FOS3 在功率谱密度上出现了大量谐波噪声, 而在 FOS2 上表现不明显, 我们推测是受井下电磁环境的干扰. 另一方面, 矿井巷道内不平整的地面可能带来了仪器与地面的耦合问题; 为维持深部井下人员驻留与适宜的观测环境, 井下通风系统保持不间断运行, 电梯与大型水泵也会不定期运转; 这些设备也会产生额外的噪声, 影响对仪器精度的准确评估. 在将来的深地观测中, 对仪器底座与地下环境进行适当改造, 应能降低这些环境因素带来的干扰.

此外, 本次观测使用的平动与旋转地震仪多为 GNSS 授时或计算机授时, 在不能直接接收卫星信号的深部地下存在时间源精度与漂移的问题. 在未

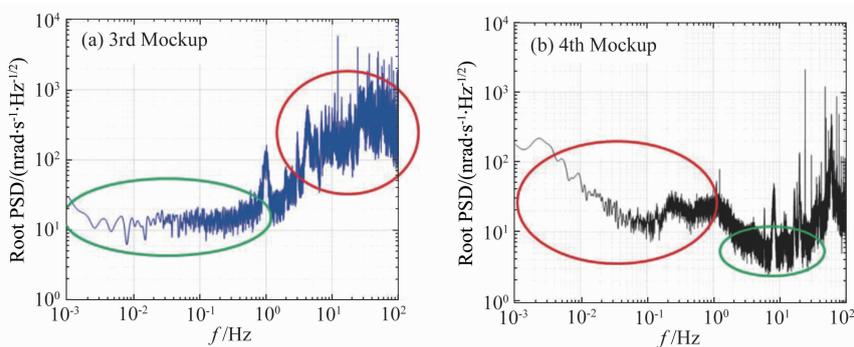


图 11 iXblue 公司 (a) 第 3 代与 (b) 第 4 代光纤陀螺样机的均方根功率谱密度. 第 3 代样机低频段平稳 (绿圈), 但在高频段表现出较高噪声 (红圈); 改进后的第 4 代样机成功降低了高频段的噪声 (绿圈), 但牺牲了低频段的平稳性

(红圈) (de Toldi et al., 2017)

Fig. 11 Root PSD of 3rd and 4th mockups of fiber-optic gyroscopes developed by iXblue Co. The 3rd mockup has stable low-frequency band, but high noise in high-frequency band; the improved 4th mockup get a decreasing of the high-frequency noise (green circle on the right), but at the expense of low-frequency band stability (red circle on the right) (de Toldi et al., 2017)

来的观测中,可通过 NTP(Network Time Protocol, 网络时间协议)网络授时等方法,改善深地观测的时间精度。

3.3 更高的精度需求

对两次花莲地震的观测结果显示,平动地震仪观测的信噪比远高于旋转地震仪。除了较远震中距导致旋转运动信号较弱,以及仪器对环境噪声敏感外,仪器本底噪声较高可能也是造成本次观测旋转信号信噪比较低的重要原因。因此,进一步提高光纤旋转地震仪精度、降低仪器本底噪声,以及使用更合适的滤波方法分离处于同一频段的地震信号与噪声信号,对未来地震旋转运动的观测与研究是十分必要的。

高精度光学旋转观测目前已经证实具有 10^{-13} rad · s⁻¹ 以上的分辨能力,并在地面实验室实现了大型旋转多分量观测,在深地实验室构建了大型旋转观测装置用于引力波探测(Simonelli et al., 2016)。华中科技大学在喻家山防空洞实验室中实现了约 $7 \times 10^{-11} \sim 9 \times 10^{-11}$ rad · s⁻¹ 的激光旋转高精度测量(Li et al., 2018),在深地条件下有望将旋转观测的精度提升至 $10^{-12} \sim 10^{-14}$ rad · s⁻¹ 水平。因此有理由推测现测试的旋转地震仪精度不足;深地环境期待更高精度旋转观测装备,深地实验室作为高精度、大型旋转观测装置的标定、比测平台也是值得期待且具有优势条件的。

4 结论

利用淮南煤矿深部地下—848 m 的巷道空间,我们进行了三种不同光纤旋转地震仪的联合比测,通过低噪环境三种新型光纤旋转地震仪噪声水平、Allan 方差与地震观测能力对比分析,可以获得如下结论。

(1)FOS1 与 FOS2 具备更低的自噪声水平与 Allan 方差;在震害学感兴趣的 1 Hz 以下的频段,FOS1 的自噪声功率谱密度在 1×10^{-8} rad · s⁻¹ · Hz^{-1/2},FOS2 的自噪声功率谱密度最低为 5×10^{-9} rad · s⁻¹ · Hz^{-1/2},基本满足地震观测需要;FOS1 的噪声水平在低频段更具平稳性,而 FOS2 在整体频段噪声水平更低,信号响应更为明显。

(2)由于光纤长度的巨大差异,FOS3 的分辨率较低,在 1 Hz 以下频段自噪声均方根功率谱密度约为 2×10^{-7} rad · s⁻¹ · Hz^{-1/2};R-2 旋转地震仪的自噪声在 1 Hz 以下频段高于 FOS3,且稳定性较差,

但在 1 Hz 以上频段表现平稳。

(3)与 R-2 电化学式旋转地震仪相比,光纤旋转地震仪具备更好的低频响应与更平直的传递函数,但也更易受谐波噪声的干扰。

(4)FOS1 与 FOS2 均观测到了两次花莲地震的旋转运动;其中,FOS2 观测的 R_z 分量与宽频带地震仪观测的切向加速度分量具备更高的相位一致性,二者的小波变换时频谱也体现了更强的相干性,证明了其可以有效的捕获地震事件。

致谢 感谢军事科学院国防工程研究院与淮河能源(集团)股份有限公司、安徽理工大学对观测期间安全保障与设备维护提供的大力支持和便利条件。

References

- Agafonov V M, Neeshpapa A V, Shabalina A S. 2015. Electrochemical seismometers of linear and angular motion. // Beer M, Kougioumtzoglou I A, Patelli E, et al eds. Encyclopedia of Earthquake Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, 1-19, doi: 10.1007/978-3-642-36197-5_403-1.
- Aki K, Richards P G. 1980. Quantitative Seismology: Theory and Methods. San Francisco: W. H. Freeman.
- Aki K, Richards P G. 2002. Quantitative Seismology. 2nd ed. Sausalito, CA: University Science Books.
- Allan D W. 1966. Statistics of atomic frequency standards. *Proc. IEEE*, 54(2): 221-230, doi: 10.1109/PROC.1966.4634.
- Belfi J, Beverini N, Bosi F, et al. 2017. Deep underground rotation measurements: GINGERino ring laser gyroscope in Gran Sasso. *Review of Scientific Instruments*, 88(3): 034502, doi: 10.1063/1.4977051.
- Bernauer F, Wassermann J, Igel H. 2012. Rotational sensors—a comparison of different sensor types. *J. Seismol.*, 16(4): 595-602, doi: 10.1007/s10950-012-9286-7.
- Bernauer F, Wassermann J, Guattari F, et al. 2018. BlueSeis3A: Full characterization of a 3C broadband rotational seismometer. *Seismological Research Letters*, 89(2A): 620-629, doi: 10.1785/0220170143.
- Bernauer F, Behnen K, Wassermann J, et al. 2021. Rotation, strain, and translation sensors performance tests with active seismic sources. *Sensors*, 21(1): 264, doi: 10.3390/s21010264.
- Boese C M, Wotherspoon L, Alvarez M, et al. 2015. Analysis of anthropogenic and natural noise from multilevel borehole seismometers in an urban environment, Auckland, New Zealand. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1): 285-299, doi: 10.1785/0120130288.
- Bonnefoy-Claudet S, Cotton F, Bard P Y. 2006. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review. *Earth-Science Reviews*, 79(3-4): 205-227.
- Cao Y W, Chen Y J, Zhou T, et al. 2021. The development of a

- new IFOG-based 3C rotational seismometer. *Sensors (Basel)*, 21(11): 3899, doi: 10.3390/s21113899.
- Cao Y W, Zeng X F, Li Z B, et al. 2022. Rotational and translational motions induced by the M_s 6.4 Yunnan Yangbi earthquake recorded by co-located FOGs and seismometer. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 65(2): 663-672, doi: 10.6038/cjg2022P0551.
- Carter J A, Barstow N, Pomeroy P W, et al. 1991. High-frequency seismic noise as a function of depth. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(4): 1101-1114.
- Chen C, Wang Y, Wei Y X, et al. 2020. Methods for estimating rotational components of seismic ground motion and their numerical comparisons. *Earthquake Science*, 33(4): 201-208.
- China Earthquake Administration. 2007. DB/T 21-2007 Technical requirements of instruments in network for earthquake monitoring. The description of common technical parameter and test method (in Chinese). Beijing: Seismological Press.
- de Toldi E, Lefèvre H, Guattari F, et al. 2017. First steps for a Giant FOG: Searching for the limits. // 2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). Karlsruhe, Germany; IEEE, 1-14, doi: 10.1109/InertialSensors.2017.8171491.
- Diaz J, Villasenor A, Morales J, et al. 2010. Background noise characteristics at the IberArray broadband seismic network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(2): 618-628, doi: 10.1785/0120090085.
- Eibl E P S, Roszkopf M, Sciotto M, et al. 2022. Performance of a rotational sensor to decipher volcano seismic signals on Etna, Italy. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 127(6): e2021JB023617, doi: 10.1029/2021JB023617.
- El-Sheimy N, Hou H Y, Niu X J. 2008. Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(1): 140-149.
- Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(5-6): 561-566, doi: 10.5194/npg-11-561-2004.
- Hauksson E, Teng T L, Henry T L. 1987. Results from a 1500 m deep, three-level downhole seismometer array: Site response, low Q values, and f_{max} . *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(6): 1883-1904.
- Igel H, Schreiber U, Flaws A, et al. 2005. Rotational motions induced by the M 8.1 Tokachi-Oki earthquake, September 25, 2003. *Geophys. Res. Lett.*, 32(8): L08309, doi: 10.1029/2004GL022336.
- Igel H, Cochard A, Wassermann J, et al. 2007. Broad-band observations of earthquake-induced rotational ground motions. *Geophysical Journal International*, 168(1): 182-196.
- Igel H, Nader M F, Kurrle D, et al. 2011. Observations of Earth's toroidal free oscillations with a rotation sensor: The 2011 magnitude 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 38(21): L21303, doi: 10.1029/2011GL049045.
- Igel H, Schreiber K U, Gebauer A, et al. 2021. ROMY: a multicomponent ring laser for geodesy and geophysics. *Geophysical Journal International*, 225(1): 684-698, doi: 10.1093/gji/ggaa614.
- Izgi G, Eibl E P S, Donner S, et al. 2021. Performance test of the rotational sensor blueSeis-3A in a huddle test in Fürstfeldbruck. *Sensors*, 21(9): 3170, doi: 10.3390/s21093170.
- Kennett B L N, Engdahl E R. 1991. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, 105(2): 429-465.
- Kristekova M, Kristek J, Moczo P, et al. 2006. Misfit criteria for quantitative comparison of seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(5): 1836-1850.
- Kurrle D, Igel H, Ferreira A M G, et al. 2010. Can we estimate local Love wave dispersion properties from collocated amplitude measurements of translations and rotations?. *Geophys. Res. Lett.*, 37(4): L04307, doi: 10.1029/2009GL042215.
- Lee W H K, Celebi M, Todorovska M I, et al. 2009a. Introduction to the special issue on rotational seismology and engineering applications. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2B): 945-957.
- Lee W H K, Igel H, Trifunac M D. 2009b. Recent advances in rotational seismology. *Seismological Research Letters*, 80(3): 479-490, doi: 10.1785/gssrl.80.3.479.
- Li D Q, Wang Y, Sun L X. 2021. Calculating rotational components of ground motions by finite difference method. *Earth Science* (in Chinese), 46(1): 369-380, doi: 10.3799/dqkx.2019.265.
- Li H N, Sun L Y, Wang S Y. 2004. Improved approach for obtaining rotational components of seismic motion. *Nuclear Engineering and Design*, 232(2): 131-137.
- Li Q, Xue C, Liu J P, et al. 2018. Measurements of the gravitational constant using two independent methods. *Nature*, 560(7720): 582-588.
- Ma X, Zhou Y Y, Lü Y Q. 2019. Coupling relationship between noise of a very broad seismometer and the environment. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 41(2): 545-548.
- Mao S J, Mordret A, Campillo M, et al. 2020. On the measurement of seismic traveltime changes in the time-frequency domain with wavelet cross-spectrum analysis. *Geophysical Journal International*, 221(1): 550-568, doi: 10.1093/gji/gg495.
- Marfaing J, Bois J J, Blancon R, et al. 2009. About the world-wide magnetic-background noise in the millihertz frequency range. *EPL*, 88(1): 19002, doi: 10.1209/0295-5075/88/19002.
- Rosat S, Hinderer J, Boy J P, et al. 2016. First analyses of the iOSG-type superconducting gravimeter at the low noise underground laboratory (LSBB URL) of Rustrel, France. *E3S Web of Conferences*, 12(3): 06003, doi: 10.1051/e3sconf/20161206003.
- Schreiber K U, Klügel T, Velikოსeltsev A, et al. 2009. The large ring laser G for continuous earth rotation monitoring. *Pure Appl. Geophys.*, 166(8-9): 1485-1498, doi: 10.1007/s00024-004-0490-4.
- Simonelli A, Belfi J, Beverini N, et al. 2016. First deep underground observation of rotational signals from an earthquake at teleseismic distance using a large ring laser gyroscope. *Annals of Geophysics*, 59: 1-6, doi: 10.4401/ag-6970.

- Simonelli A, Igel H, Wassermann J, et al. 2018. Rotational motions from the 2016, Central Italy seismic sequence, as observed by an underground ring laser gyroscope. *Geophysical Journal International*, 214(1): 705-715.
- Sollberger D, Igel H, Schmelzbach C, et al. 2020. Seismological processing of six degree-of-freedom ground-motion data. *Sensors*, 20(23): 6904, doi: 10.3390/s20236904.
- Sun L X, Wang Y, Yang J, et al. 2021. Progress in rotational seismology. *Earth Science* (in Chinese), 46(4): 1518-1536.
- Teisseyre R, Suchcicki J, Teisseyre K P, et al. 2003. Seismic rotation waves; basic elements of theory and recording. *Annals of Geophysics*, 46(4): 671-686.
- Vaccaro R J, Zaki A S. 2012. Statistical modeling of rate gyros. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(3): 673-684.
- Vali V, Shorthill R W. 1976. Fiber ring interferometer. *Applied Optics*, 15(5): 1099-1100.
- Wang F, Li L, Wang B S. 2017. Ability of decreasing noise and the characteristics of near-surface wave field around Dazhai borehole in Pu'er. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 39(6): 831-847, doi: 10.11939/jass.2017.06.002.
- Wang Y, Yang Y, Sun H, et al. 2022. Observation and research of deep underground multi-physical fields—Huainan —848 m deep experiment. *Science China Earth Sciences*, 65, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-9998-2>.
- Wassermann J, Wietek A, Hadziioannou C, et al. 2016. Toward a single-station approach for microzonation: Using vertical rotation rate to estimate Love-wave dispersion curves and direction finding. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(3): 1316-1330.
- Wessel P, Luis J F, Uieda L, et al. 2019. The generic mapping tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11): 5556-5564, doi: 10.1029/2019GC008515.
- Yang Y H, Li S, Yang F L, et al. 2020. Differential fiber optic gyroscope driven by two broadband sources of different wavelengths. *IEEE Access*, 8: 65443-65449. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984006.
- Yuan S H, Simonelli A, Lin C J, et al. 2020. Six degree-of-freedom broadband ground-motion observations with portable sensors: Validation, local earthquakes, and signal processing. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(3): 953-969, doi: 10.1785/0120190277.
- Yuan S H, Gessele K, Gabriel A A, et al. 2021. Seismic source tracking with six degree-of-freedom ground motion observations. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126(3): e2020JB021112, doi: 10.1029/2020JB021112.
- Zhang M M, Chen X D, Xu J Q, et al. 2021. A preliminary analysis of gravity noise levels at the deep geophysical experimental field in Huainan. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 36(5): 500-509.

附中文参考文献

- 操玉文, 曾祥方, 李正斌等. 2022. 云南漾濞 $M_s6.4$ 地震信号的旋转和平动分量面波记录分析研究. *地球物理学报*, 65(2): 663-672, doi: 10.6038/cjg2022P0551.
- 李栋青, 王赞, 孙丽霞. 2021. 差分法计算地震动旋转分量. *地球科学*, 46(1): 369-380.
- 马鑫, 周云耀, 吕永清. 2019. 甚宽频带地震计噪声与环境耦合研究. *地震工程学报*, 41(2): 545-548, doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.545.
- 孙丽霞, 王赞, 杨军等. 2021. 旋转地震学的研究进展. *地球科学*, 46(4): 1518-1536.
- 王芳, 李丽, 王宝善. 2017. 普洱大寨深井噪声压制效果及井孔附近波场特征研究. *地震学报*, 39(6): 831-847, doi: 10.11939/jass.2017.06.002.
- 王赞, 杨亚新, 孙和平等. 2022. 深部地下多物理场观测研究——淮南—848 m 深地试验. *中国科学: 地球科学*, 52: 1-17, doi: 10.1360/SSTe-2022-0092.
- 张苗苗, 陈晓东, 徐建桥等. 2021. 淮南深部地球物理实验场重力噪声水平初步分析. *地球科学进展*, 36(5): 500-509.
- 中国地震局. 2007. DB/T 21-2007 地震观测仪器进网技术要求 常用技术参数表述与测试方法. 北京: 地震出版社.

(本文编辑 何燕)