

引用格式: 韦红翱, 郭文阁, 王惜康, 等. 基于大型环形光学干涉仪数据的地震监测分析[J]. 时间频率学报, 2025, 48(4): 271-282.

基于大型环形光学干涉仪数据的地震监测分析

韦红翱^{1,2}, 郭文阁^{1,2,3}, 王惜康^{2,3,†}, 徐劲松⁴, 陈天恬^{1,3},

张立松^{2,3}, 严文华^{2,3}, 高玉平^{2,3}, 张首刚^{2,3}

1. 西安石油大学 理学院, 西安 710065;
2. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600;
3. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
4. 江苏师范大学, 徐州 221116

摘要: 大型环形光学干涉仪是一种高精度传感器, 在世界时精密测量, 旋转地震波监测, 地球物理学, 大地测量学等领域有广阔的应用前景。报道了基于中国科学院国家授时中心蒲城大型环形光学干涉仪世界时观测基站获取的 2025 年宁夏银川、西藏定日、山西临汾及日本九州岛等地多起地震事件数据, 对比分析了不同地质环境下地震波的传播特性。研究发现, 地震波在不同地质环境中的传导速度和振幅衰减程度存在一定差异, 地震波动会通过地基的振动对观测平台的稳定性产生干扰, 导致测量噪声增加, 对光学干涉仪世界时监测精度产生误差。研究结果不仅为后续基站的选址与环境结构设计提供了参考, 同时环形光学干涉仪数据为地震监测和预警提供新的支撑。

关键词: 大型光学干涉仪; 地震监测; 高精度测量; 时频分析

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-04-0271-12

Seismic monitoring and analysis based on large-scale ring optical interferometer data

WEI Hong-ao^{1,2}, GUO Wen-ge^{1,2,3}, WANG Xi-kang^{2,3,†}, XU Jin-song⁴, CHEN Tian-tian^{1,3},

ZHANG Li-song^{2,3}, YAN Wen-hua^{2,3}, GAO Yu-ping^{2,3}, ZHANG Shou-gang^{2,3}

1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
2. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
4. Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China

Abstract: Large-scale ring optical interferometers are high-precision sensors with broad application

收稿日期: 2025-03-25; 接受日期: 2025-04-26; †: wangxikang@ntsc.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0615702); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB1070102); 中国科学院“西部之光”人才培养计划(中国科学院人字[2018]6号文件); 中国科学院“十三”科教基础设施建设项目(发改投资[2020]1394号文件); 西安石油大学研究生联合培养基地“中科-西石油光电检测研究生联合培养基地”项目(西石大研[2017]43号)

prospects in Universal Time (UT) precision measurement, rotational seismic wave monitoring, geophysics, and geodesy. This paper reports on seismic event data from multiple locations, including Yinchuan (Ningxia), Dingri (Xizang), Linfen (Shanxi), and Kyushu (Japan), obtained from the UT observation station equipped with a large-scale ring optical interferometer at the National Time Service Center of the Chinese Academy of Sciences in Pucheng. A comparative analysis of seismic wave propagation characteristics in different geological environments was conducted. The study reveals variations in seismic wave propagation speed and amplitude attenuation across different geological conditions. It also demonstrates that seismic waves induce ground vibrations, which interfere with the stability of the observation platform, leading to increased measurement noise and affecting the precision of UT monitoring with the optical interferometer. These findings provide valuable insights for future site selection and structural design of observation stations, while also highlighting the potential of ring optical interferometer data in seismic monitoring and early warning systems.

Keywords: large scale optical interferometer; seismic monitoring; high-precision measurement; time-frequency analysis

地球自转的精确测量对世界时 (UT1) 的解算、地震监测及地球物理探测都具有重要意义^[1]。近年来,随着全球地震活动的频繁发生,研究表明,大型地震不仅会释放大量能量并改变地壳结构,还可能对大型光学干涉仪测量平台造成倾斜影响,进而对测量地球自转速率产生一定的噪声干扰。

大型环形光学干涉仪因其对旋转运动的高灵敏度,已成为研究地震对地球自转影响的重要工具。国际上,意大利 Gran Sasso 地下实验室的 GINGER (Gyroscopes IN General Relativity) 环形激光干涉仪阵列和德国 Wettzell 天文台的 G-ring 和 ROMY 环形激光干涉仪都成功记录远距离地震事件的旋转信号,并对比分析了地震引起的平动与旋转运动,为研究地震对地球自转的影响提供了观测依据^[2-3]。在低噪声环境下,长时间连续观测的环形光学干涉仪可捕捉地震后角速度变化的特征,为地球自转速率变化的研究提供了数据支撑。

中国科学院国家授时中心建设了基于大型环形光学干涉仪的世界时测量基站,并为其配备了恒温恒湿微振动精密观测环境;核心设备由国家授时中心联合北京航天控制仪器研究所研制。该世界时观测基站作为重要的世界时测量实验平台,其长期连续观测数据不仅可用于实时安全高精度世界时解算,还可监测地震波的传播特性。相比传统地震仪主要测量地震的平动分量,环形光学干涉仪能够直接测量地震引起的旋转运动,使得对地震波场的监测更加全面^[4]。近期地震发生较为频繁,干涉仪

获取到了不同时间和不同地点的地震旋转信号,并对其数据进行分析,分析讨论大型地震如何影响地球自转速率以及这种影响的持续时间及区域性传播差异^[5-6]。

地震活动可能对基站的世界时测量精度产生影响,因此世界时观测基站的选址和建设需要充分考虑区域地震活动特征、断层分布及土质条件等因素,以降低外部环境对观测数据的干扰^[7-8]。具体而言,基站选址应避免活动断裂带,并确保地基稳固性,以减小地震期间的非目标噪声影响^[9]。同时,通过采用抗振动结构及稳定的地基材料等优化基站,进一步提升光学干涉仪在监测中的稳定性和可靠性。

本文分析了干涉仪捕捉的地震旋转信号,探讨监测到的地震波信号特征,并为后续基站选址的地质层面的影响和建设强震仪观测地震噪声等研究提供参考。结果表明,光学干涉仪是一种捕捉地震波的高精度新方法,但对于测量地球自转速率工作来说是一种突发的噪声干扰,后续需要建立更精确的修正模型,采用强震仪等仪器对振动进行监测,减少地震等因素对光学干涉仪测量平台的振动倾斜影响,以提升其在地球自转测量和授时系统中的应用能力。

1 光学干涉仪测量基本原理

光学干涉仪 (optical interferometer) 是一种基于 Sagnac 效应测量角速度的精密仪器^[10],其原理为两

束光沿顺时针和逆时针方向传播,当系统发生旋转时,两束光的光程发生微小差异,导致干涉条纹变化,如图 1 所示。

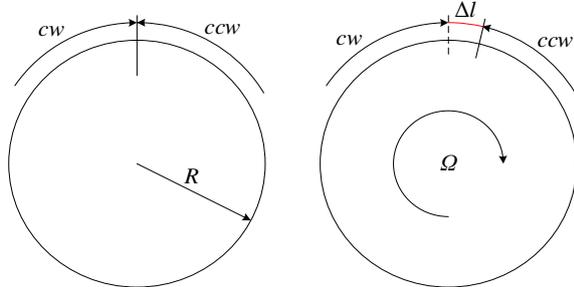


图 1 Sagnac 效应的基本原理

通过测量干涉信号的相位差 ($\Delta\phi$),即可精确计算旋转角速度,具体公式为

$$\Delta\phi = \frac{4\pi LRN}{\lambda c} \Omega \quad (1)$$

式(1)中, R 为光纤环的半径, L 为单圈光纤的周长, N 为光纤环的匝数, λ 为光纤陀螺仪工作波长, c 为光速, Ω 为旋转角速度, $\Delta\phi$ 为相位差。

图 2 所示,对于水平安装于地面的环形光学干涉仪来说,干涉仪测量输出的原始地球自转角速度值是瞬时地球自转角速度矢量在干涉仪平面法线方向上的投影,而测量平台的倾斜变化会引起干涉仪平面在赤道面上的投影面积发生相应的改变,从而对干涉仪的原始测量数据值产生影响^[11-12]。产生的倾斜变化对输出的地球自转角速度值的影响可

以表示为

$$\Omega = \Omega_0 \sin(\varphi_0 + T_{ns}) \cos T_{ew} \quad (2)$$

式(2)中, φ_0 是陀螺仪所在位置的地理纬度, T_{ns} , T_{ew} 代表随时间的推移测量平台产生的振动倾斜角度。目前大型环形光学干涉仪是能够有效测量旋转分量的角速度测量仪器之一,特别是对于长距离、微弱的信号。通过安装在正交方向上的三个 Sagnac 干涉仪装置可提供地震中常见的体波和面波引起的旋转信号监测^[13]。光学干涉仪仅对围绕其敏感面法线矢量的旋转敏感,但通常地震波均会有分量投影到干涉仪的敏感轴上,使干涉仪敏感地探测到相应角速度变化的信息,如表 1 所示,它们在传播机制和观测特性上存在显著区别^[14]。

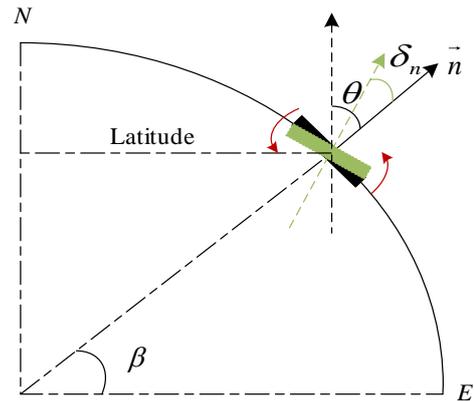


图 2 光学干涉仪平面倾斜示意图

表 1 光学干涉仪敏感的地震波特点

类型	名称	特点
体波	纵波 (P 波)	P 波主要运动方向是沿传播方向的线性振动速度快,不会产生明显的旋转运动
	横波 (S 波)	S 波运动方向与波的传播方向相垂直,破坏性强,在监测数据中可能表现为较明显的角速度变化,尤其是在 S 波到达时可能出现峰值变化
面波	洛夫波 (Love 波)	介质沿垂直于传播方向的水平运动,引起绕垂直轴的旋转效应(旋转分量信号)
	瑞利波 (Rayleigh 波)	沿地面传播的浅层地震波,振动方式与纵波相似,但振幅较大

光学干涉仪能够响应地震波引发的角速度变化,这些变化通常是比较微小的,但是基站大型环形光学干涉仪却能捕捉到地震的波动,且这些振动可能会导致平台产生振动倾斜,对干涉仪测量数据

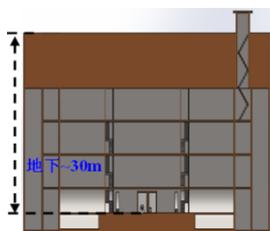
产生一定的影响^[15]。地震对地球自转角速度的影响主要通过改变地球的质量分布和转动惯量来实现,其影响机制是角动量守恒定律。例如 2011 年日本东北部太平洋海域发生了东日本大地震 9.0 级地

震，导致地球的惯性矩变小，自转角速度变快，日长缩短，计算表明，东日本大地震使得日长缩短了约 $1.8 \mu\text{s}/\text{d}$ ，此误差小于目前常规世界时解算精度^[16]。但随着测量技术的进步，在光学干涉仪环境噪声监测系统建设时也需要针对地震产生的影响进行一定的监测和记录，为后续建设误差模型时提供新的监测模块。

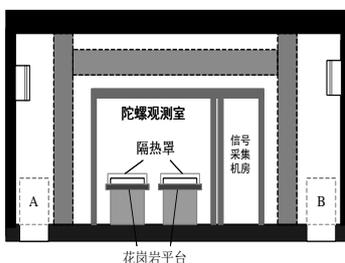
2 大型光学干涉仪基站环境介绍

监测到地震的核心设备是位于陕西蒲城的大

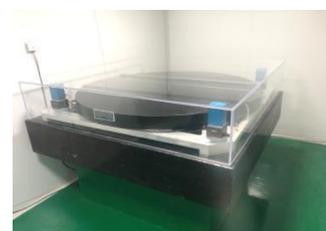
型光纤环形干涉测量仪。大型光纤干涉仪测量地球自转运动，误差的主要来源就是观测环境噪声，因此该设备放置场所需要选取稳定的，人为活动和自然干扰小的地点。如图 3 所示，为了远离地面干扰，放置在了距离地面 30 m 的地下环境中，该位置远离湖泊及海洋环境，受到海洋潮汐的影响较小，同时该地区条件稳定，周围没有任何工厂、工地，并远离公路，人类活动较少，环境良好，没有任何形式的干扰源。干涉仪放置处用混凝土浇筑基墩，与地壳的基岩相固连，基墩上放置热膨胀系数低的花岗岩平台。



(a) 地下 30 m 基站位置设计



(b) 光纤干涉仪观测实验室示意图



(c) 大型光纤干涉仪

图 3 中国科学院国家授时中心大型光学干涉仪测试基站

大型光纤干涉仪的光纤环直径 1.5 m，光纤总长约 30 km，激光输入波长为 1 550 nm，通过增加比例因子减小相关噪声，来获得观测精度的

提高^[17]。如图 4 所示，光纤干涉的零偏不稳定性约为 $1.44 \times 10^{-11} \text{ rad/s}$ 。

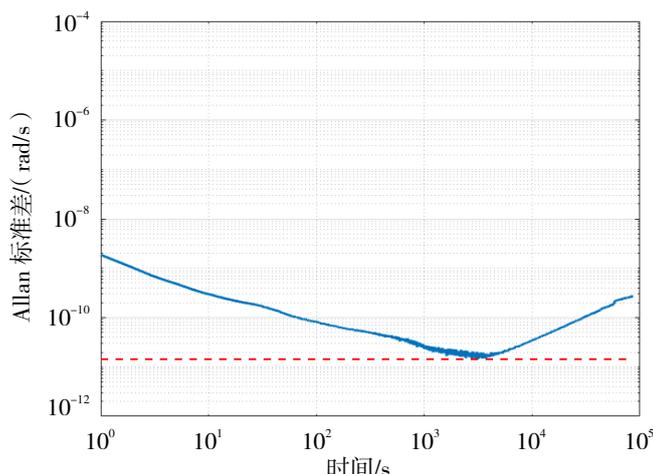


图 4 大型光纤干涉仪测试数据灵敏度

光学干涉仪世界时观测基站致力于精确测量世界时 (UT1)，为国家授时系统、空间计划以及我国时空基准系统提供重要服务。作为一种创新的

世界时测量技术，该基站通过大型光学环形干涉仪实时监测地球瞬时自转角速度，并结合地球自转模型进行高精度解算，从而实现世界时的高精度、实

时和安全测量。

光学干涉仪在测量地球自转的同时，还能采集到地震波引起的瞬时旋转信号。地震波引起的观测平台振动倾斜变化可能会导致干涉仪的测量误差增大。因此，对振动进行研究可以为后续环境振动误差监测系统的建立和未来基站选址等提供参考。

3 大型光纤干涉仪地震测量分析

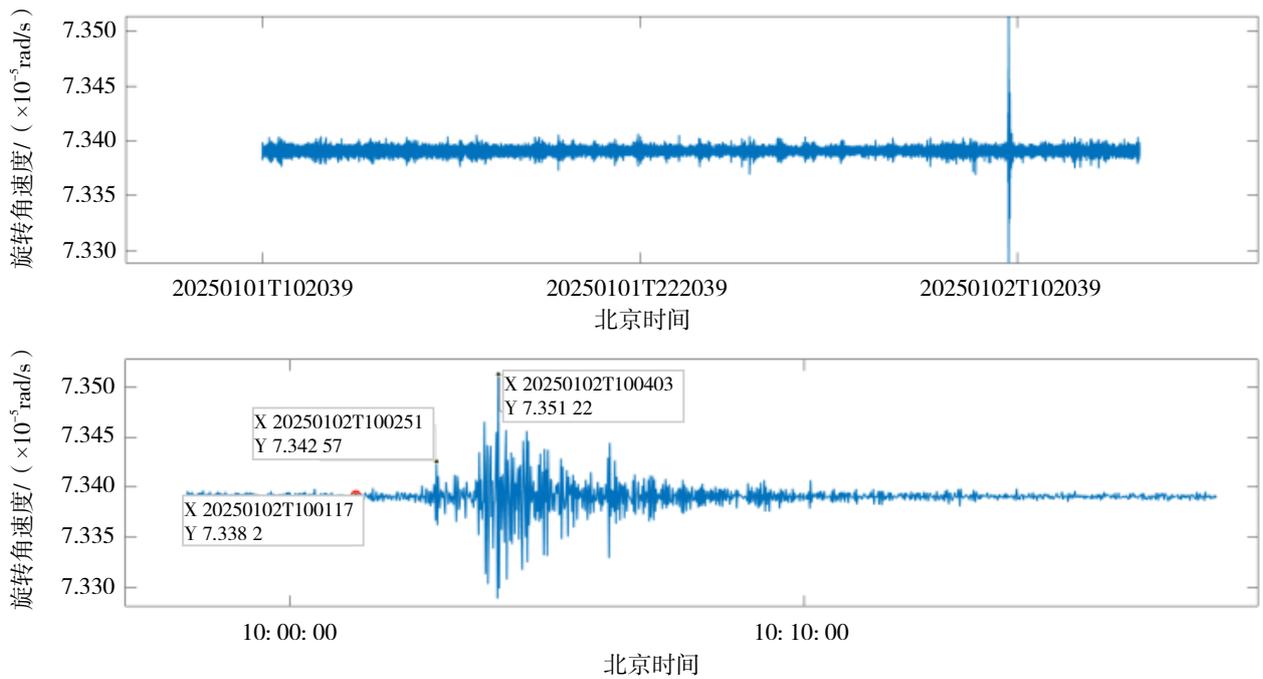
地震活动是地球物理学中一项重要的研究领域，尤其是地震波的传播特性对地震预测与监测有至关重要的意义。近年来，光学环形干涉仪作为一种高精度测量工具，逐渐在地震监测、地球物理探

测等领域中展现出了巨大的潜力^[18]。中国科学院国家授时中心大型光学干涉仪世界时观测基站，在地球自转角速度监测过程中清晰地捕捉到的 5 次地震数据信号。这些信号的精确测量为地震活动和基站选址建设振动环境监测系统的研究和分析提供了重要的数据支持。

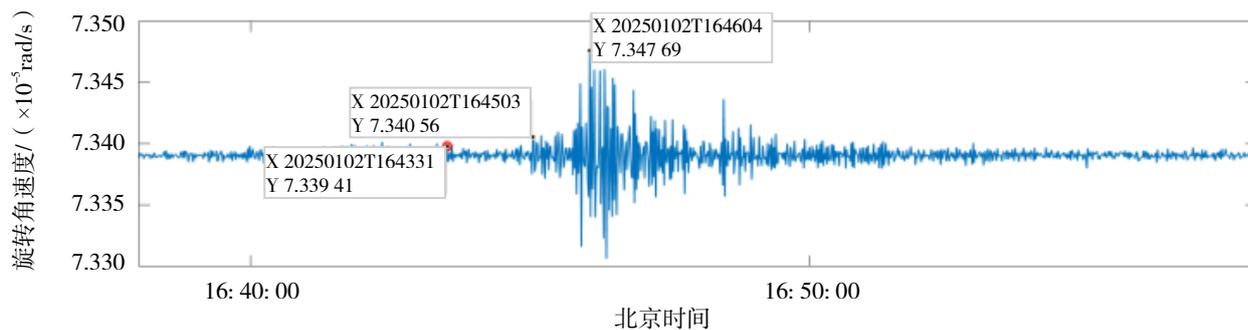
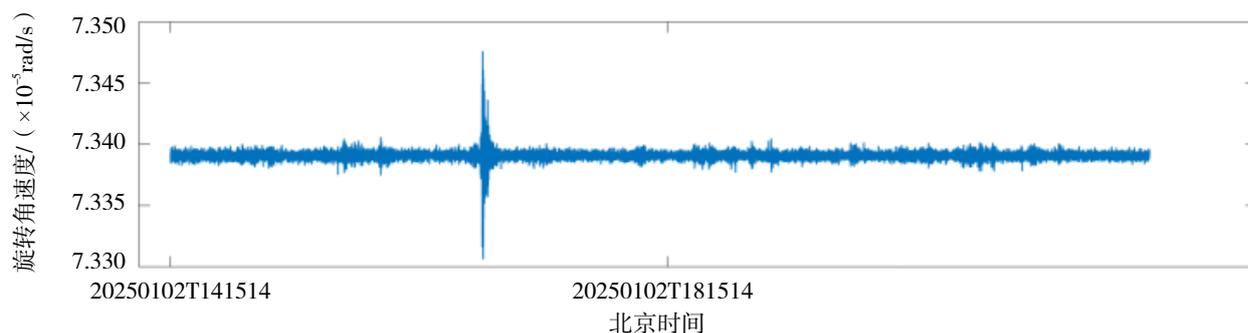
2025 年 1 月 2 日，宁夏银川市地区发生 4.8 级地震和 4.6 级地震；1 月 7 日，西藏日喀则市定日县发生 6.8 级地震；1 月 10 日，山西临汾市尧都区发生 4.1 级地震；1 月 13 日，日本九州岛附近海域发生 6.7 级地震，具体震源参数和光学干涉仪数据等内容在表 2 和图 5 中所展示。

表 2 震源参数

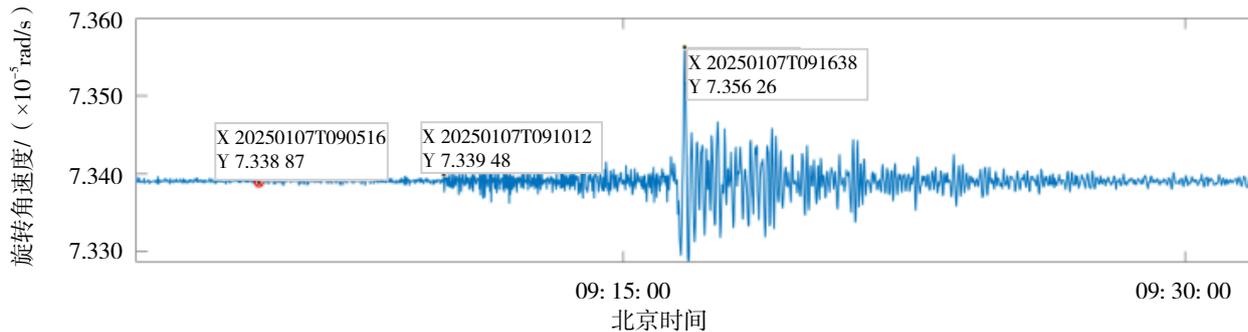
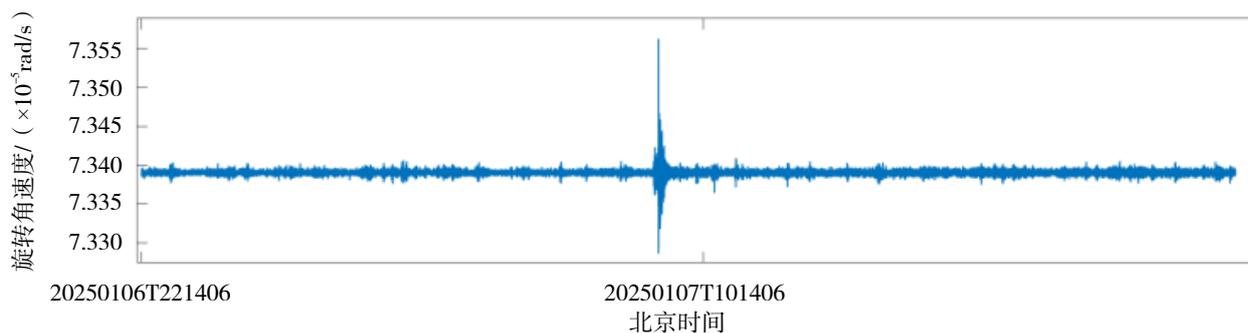
地震发生地点	地震发生时间	干涉仪监测到地震数据延迟时间	最大振幅发生时间	震中		震级
				经度/(°)E	纬度/(°)N	
宁夏银川市永宁县	20250102T100117	1 mim 34 s	10: 04: 03	106.22	38.40	4.8
宁夏银川市金凤区	20250102T164331	1 mim 32 s	16: 46: 04	106.26	38.41	4.6
西藏日喀则市定日县	20250107T090516	4 mim 56 s	09: 16: 38	87.45	28.50	6.8
山西临汾市尧都区	20250110T203127	43 s	20: 33: 15	111.23	36.16	4.1
日本九州岛附近海域	20250113T201932	4 mim 30 s	20: 24: 33	131.75	31.70	6.7



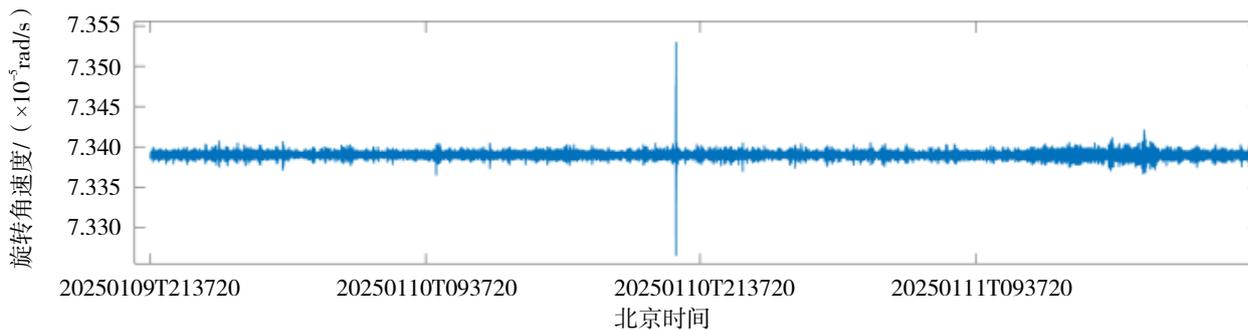
(a) 2025 年 1 月 2 日 10: 01 银川地震监测数据

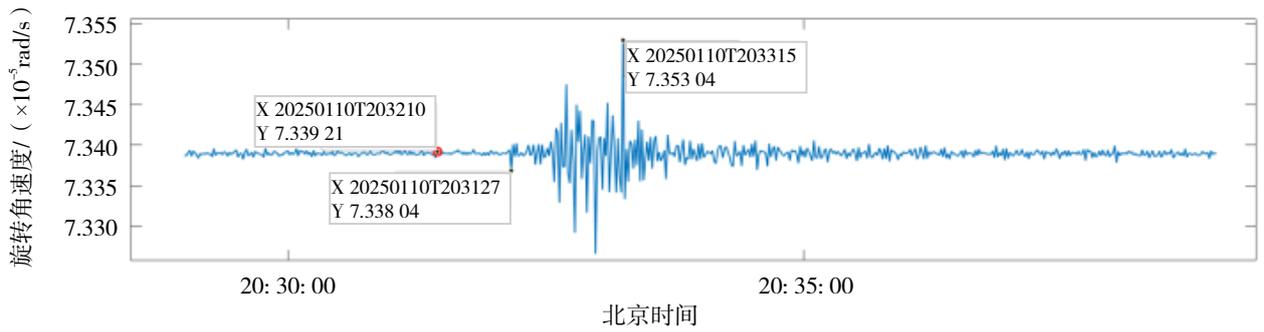


(b) 2025 年 1 月 2 日 16: 43 银川地震监测数据

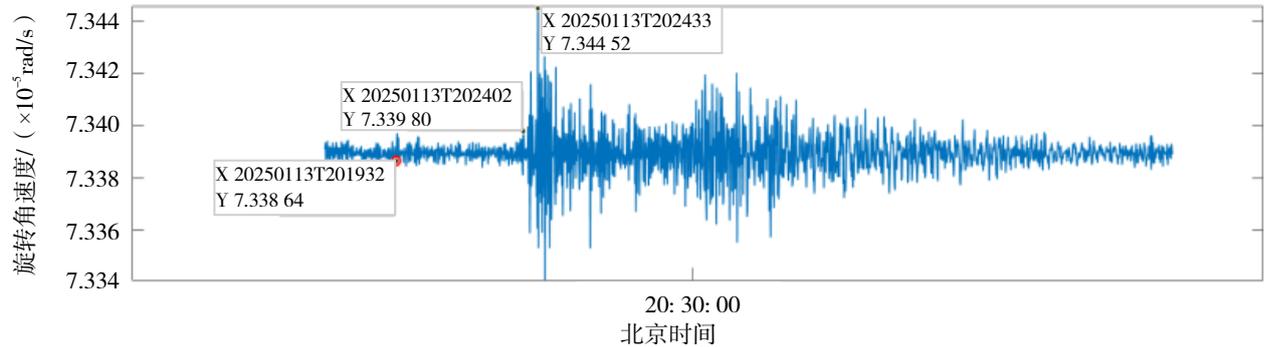
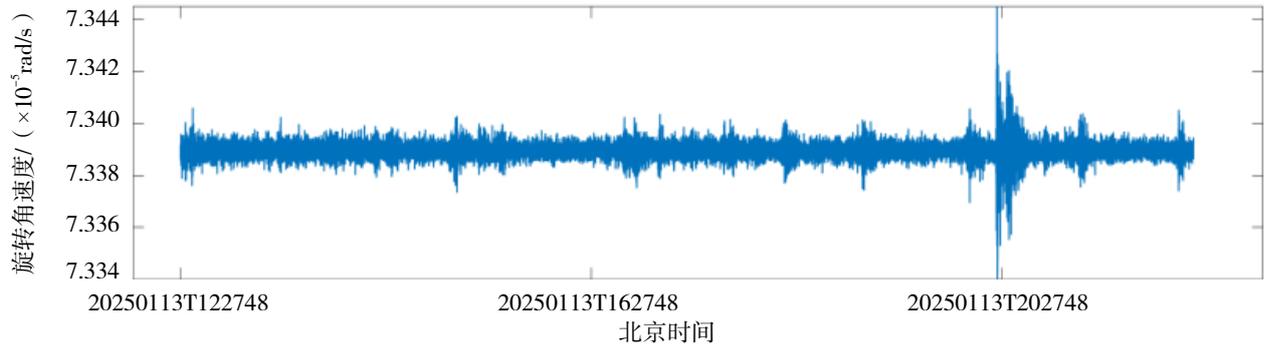


(c) 2025 年 1 月 7 日 09: 05 西藏地震监测数据





(d) 2025 年 1 月 10 日 20: 31 山西地震监测数据



(e) 2025 年 1 月 13 日 20: 19 日本地震监测数据

图 5 大型光纤干涉仪地球自转角速度初始数据

通过光纤干涉仪对宁夏银川两次地震及山西地震的记录显示，银川地震震中距离蒲城约 500 多千米，山西地震震中距离约 200 多千米，且地震波传播路径经过黄土高原和关中盆地等区域。由于大陆地壳结构相对稳定，地震波传播速度较快，震波到达时间较短，时间分别在 1 min 34 s 左右和 43 s 左右。

对于西藏地震，震中距离蒲城约 2 000 多千米，地震波需穿越青藏高原及秦岭等复杂地质构造。青藏高原地壳厚度较大且岩性复杂，地震波传播速度较慢，导致震波到达时间显著延长，大约在 5 min 左右的时间。相比之下，日本地震震中距离同样约为 2 000 多千米，其地震波传播路径涉及海洋地壳

和东海陆架等区域。由于海洋地壳较薄，地震波传播速度较快，因此日本地震波到达蒲城的时间略早于西藏地震，大约时间在 4 min 30 s 左右。

尽管时域分析为研究提供了基础性的时域特征参考，但在一些细节特征方面存在局限。为进一步分析地震的频谱特性参数，将采用时频分析的方法。该方法通过将时域信号转换至频域空间，可有效分析地震波的频谱和频率分布与能量差异的特征^[19-20]。

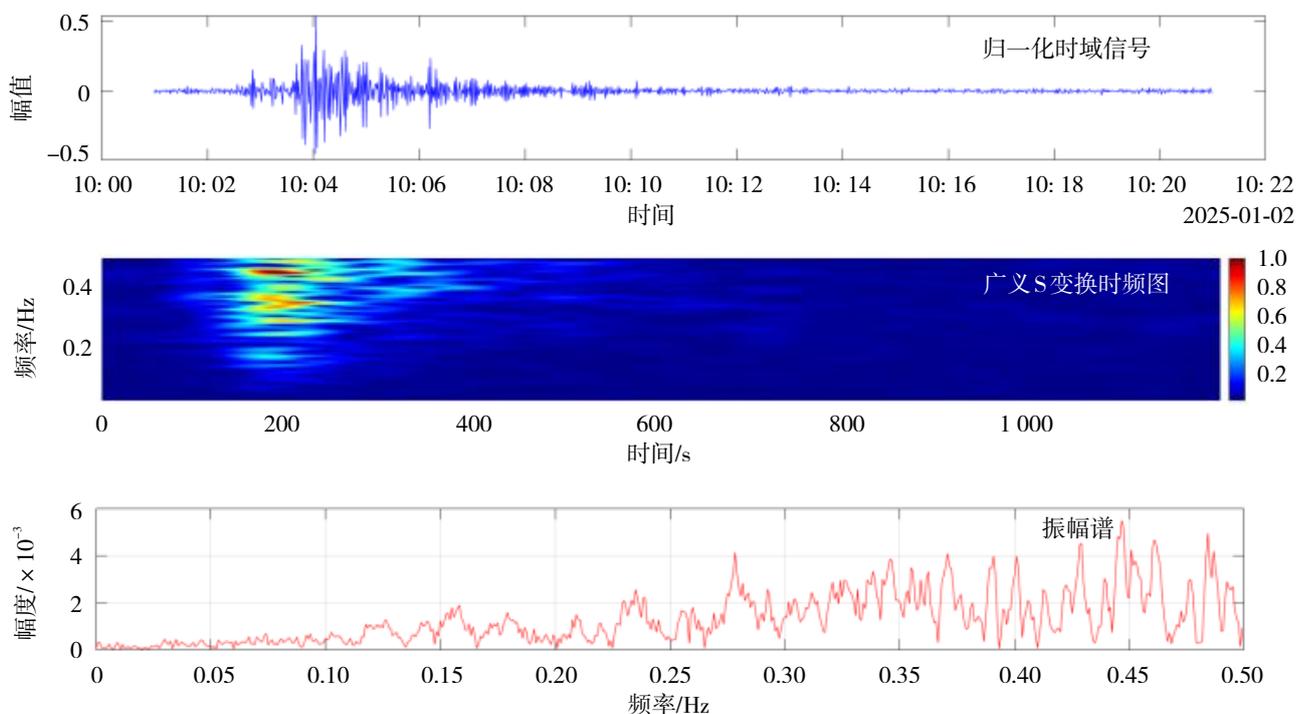
通常进行不同地震数据振幅谱对比时，需要“归一化”。经过归一化后的振幅谱反映了不同频率成分之间的相对强度，但是不反映不同曲线之间

的绝对能量差异^[21]。为了更好地研究地震信号,了解它们的频率随时间变化的关系需要使用时频分析方法。时频分析旨在揭示非平稳信号中频率成分随时间的变化规律。传统短时傅里叶变换(STFT)通过固定长度的滑动窗口对信号进行分段频谱分析,但是难以同时实现高时间与高频率分辨率。S变换作为一种自适应时频分析方法,通过引入频率相关的高斯窗函数改进STFT。而广义S变换则是S变换的扩展形式,通过引入可调节的参数来进行窗函数优化,适应不同类型的信号^[22]。其核心思想是通过调整窗函数的形状和大小,提供更灵活的时频分析能力。广义S变换的公式可以表示为

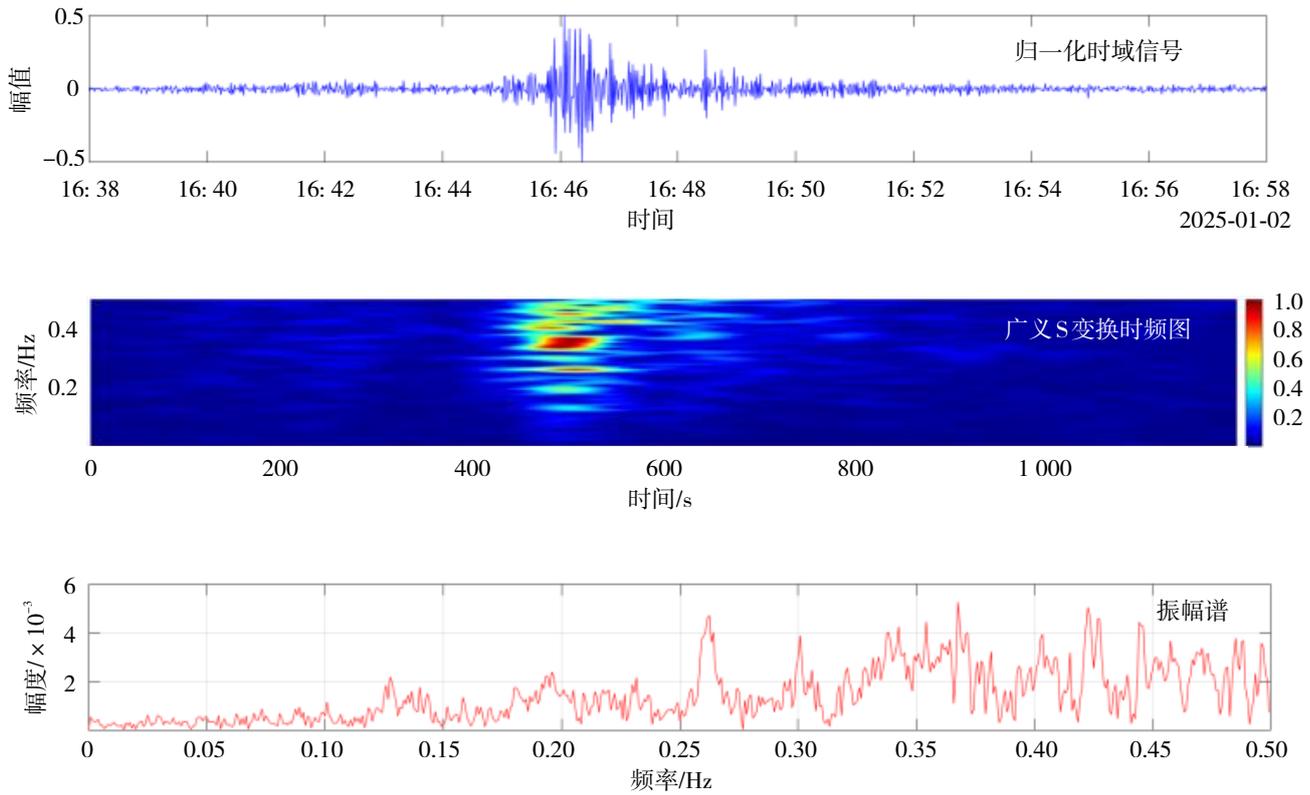
$$X(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot g(t - \tau; f) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (3)$$

式(3)中窗函数 $g(t - \tau; f)$ 是广义窗函数,可以通过调节参数来控制。为进一步抑制频谱泄漏,本研究将高斯窗替换为汉明窗,汉明窗是一种加权窗函数。改进后的S变换在保留相位信息的同时,利用汉明窗的快速旁瓣衰减特性,显著降低了频谱间的干扰,并通过优化窗口缩放速率平衡了不同频段的时频分辨率,能够有效地提取复杂信号的时频特征。

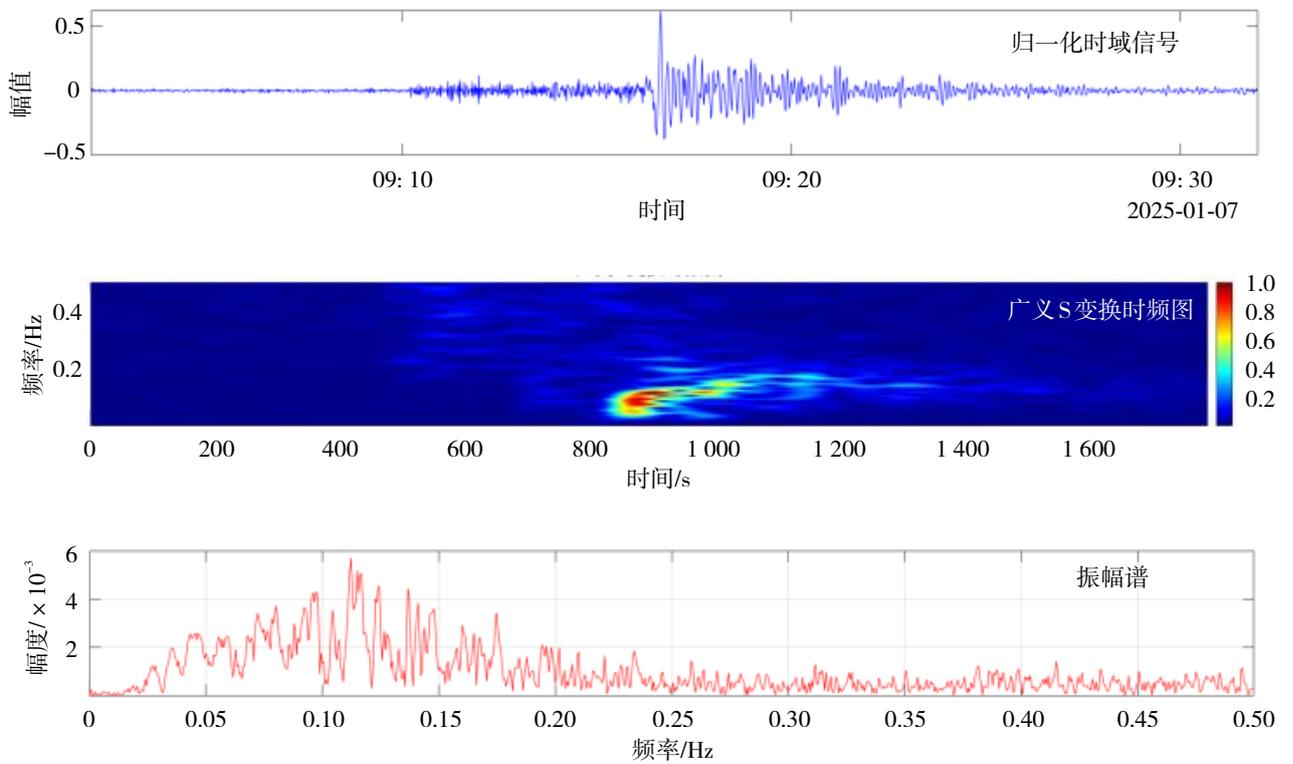
通过对不同地区地震数据的分析(图6),我们发现地震波的频率和能量分布与地质环境密切相关。银川两次地震(4.8级和4.6级)主要能量集中在0.3~0.4 Hz,而且上午地震的振幅峰值比下午高,这与震级的大小相一致。两次主震后都出现了小能量波动,可能是余震或其他地震波的叠加。山西4.1级地震虽然震级比银川的低,但是高频能量的占比更高,可能是由于山西地震发生地离蒲城监测站较近的缘故。西藏6.8级地震能量集中在更低的0.05~0.2 Hz,振幅比银川地震强且集中,这可能是因为印度板块挤压导致地层上下剧烈错动,同时青藏高原复杂的地质结构也削弱了高频能量。日本海域地震则表现出更宽泛的频率范围,高频和低频都有所保留,这可能因为地震波穿过海洋地壳时,高频衰减较少。日本地震发生前的2分半钟左右,西藏日喀则市定日县发生了一起3级的地震,这有可能是导致监测到的高低频信号同时出现的原因。地震波的特性不仅取决于震源本身,还受传播路径影响:坚硬稳定的地质结构利于高频传播,复杂地质可能会导致高频衰减;当多个地震叠加或距离较近时,信号特征也会发生混合。



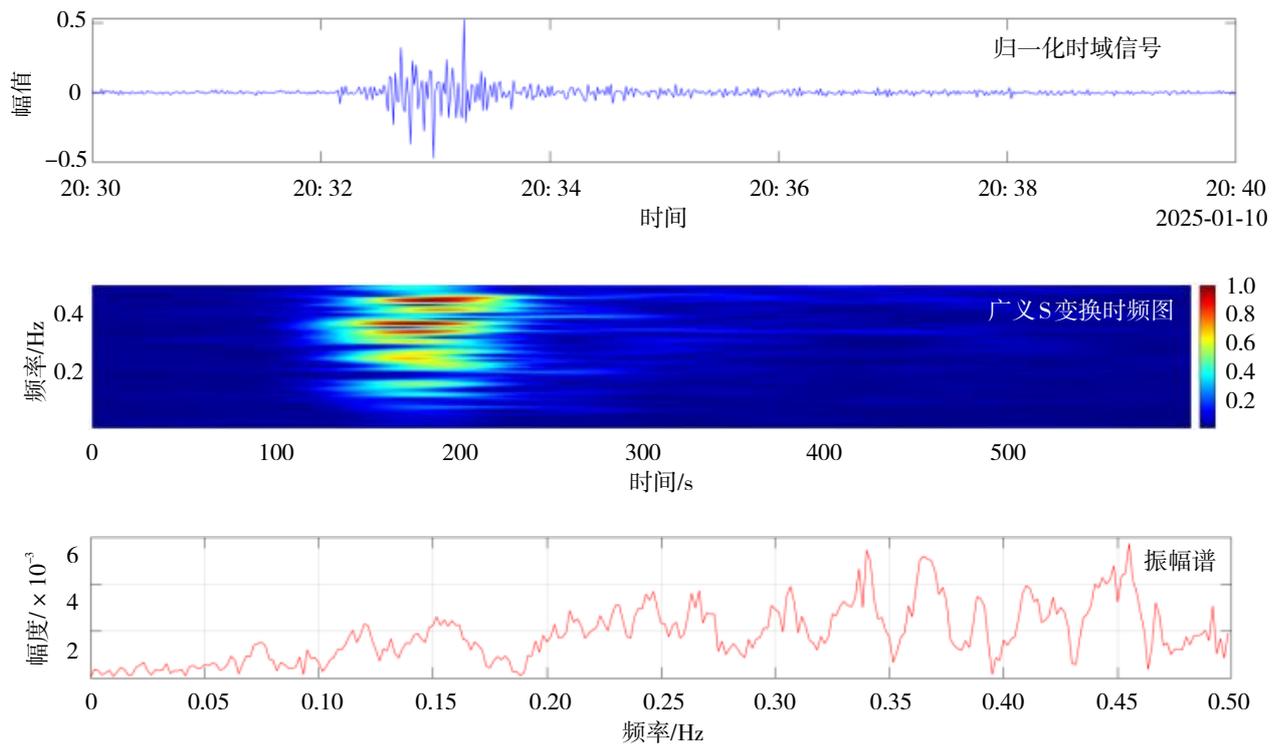
(a) 归一化银川地震数据时频分析(上午)



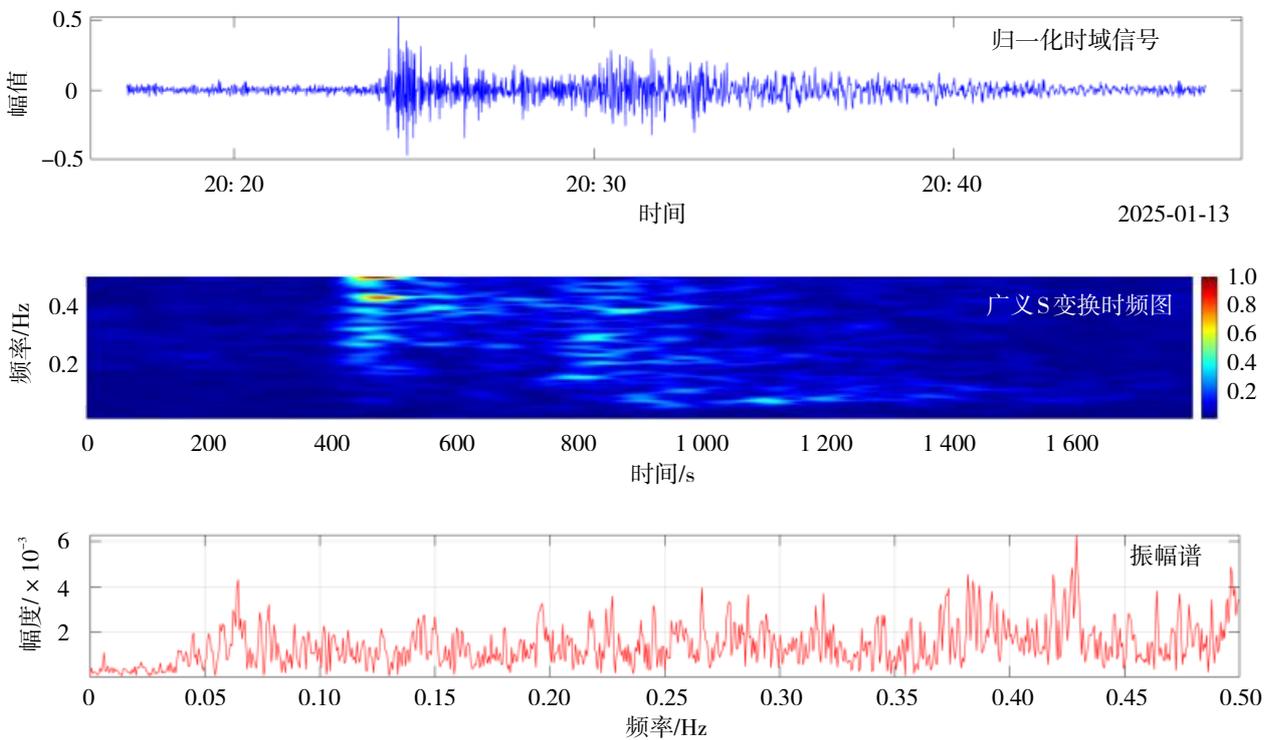
(b) 归一化银川地震数据时频分析(下午)



(c) 归一化西藏地震数据时频分析



(d) 归一化山西地震数据时频分析



(e) 归一化日本海域地震数据时频分析

图 6 归一化地震数据的波形、振幅谱和时频分析

这些分析数据表明,光学环形干涉仪能够有效捕捉地震波特征信号,通过分析地震旋转信号,地震虽然也会对地球自转速率和世界时解算产生一

定误差,但目前仪器测量精度和常规世界时解算精度都不足以产生强烈影响,但是通过对地震的分析不仅可以为后续优化自转测量误差修正方法和基

站选址以及环境噪声监测系统构建提供依据。合理选择地质稳定、低振动的站址，并优化基站结构设计，有助于提升测量稳定性，确保长期高精度观测，为地震测量、地球物理、相对论等科学领域提供精确的测量数据，成为一项重要的测地实验平台。同时，基于光学干涉仪获取的数据，能够进一步完善地震监测网络，为地震预警系统的优化和灾害风险评估提供关键技术支持。

4 结语

本文系统阐述了基于 Sagnac 效应的大型光学干涉仪的基本原理及其在高精度测量领域的广泛应用。通过光纤干涉仪的实测数据，研究分析了不同地质环境对光学干涉仪测量精度的潜在影响，为优化基站选址和建设方案提供了重要参考。在未来构建多站联合的陀螺观测系统时，需要进一步考虑不同构造板块的地质环境对振动传导的影响。同时，分析了地震波传播特性及时频特征，有助于提升光学干涉仪观测数据的稳定性和可靠性，并优化基站布局和环境噪声监测系统。后续可以构建更精确的板块运动模型将为地球自转测量提供关键参考，提高光学干涉仪在高精度地球物理研究中的应用价值。

该基站成功捕捉到宁夏银川、西藏定日、山西临汾等地震事件的传播信号，以及日本九州海域地震的显著特征，体现了光学干涉仪对于地震波传播信号的采集能力，在世界时测量、地球自转监测和地震信号探测等领域的应用前景将更加广阔。后续可以尝试与地震局进行合作，进行地震信号噪声剔除，振动噪声环境监测系统和地震噪声理论模型建立和搭建三维大型光纤干涉仪监测平台等工作。未来，在国家科技发展的大力支持下，我们将进一步提升光学干涉仪在全球授时系统中的作用，为时间基准的精确测定、地球物理研究及地震监测提供更可靠的技术支持。

参考文献：

- [1] 王惜康. 基于大型光纤干涉仪的世界时解算方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2019.
- [2] VELIKOSELTSEV A. The development of a sensor model for large ring lasers and their application in seismic studies[D]. M ü nchen: Technische Universität M ü nchen, 2005.
- [3] 操玉文, 曾祥方, 李正斌, 等. 云南漾濞 MS6.4 地震信号的旋转和平动分量面波记录分析研究[J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 663-672.
- [4] 朱兰鑫, 陈彦钧, 王文伯, 等. 高精度光纤旋转地震仪研制与应用[J]. 地球物理学报, 2024, 67(12): 4594-4610.
- [5] SIMONELLI A. Earthquake-induced rotational ground motion observed by optical rotational sensors[D]. M ü nchen: Ludwig Maximilians University M ü nchen, 2018.
- [6] PANCHA A, WEBB T H, STEDMAN G E, et al. Ring laser detection of rotations from teleseismic waves[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(21): 3553-3556.
- [7] CHUNG H P, CHANG S H, HSIEH C L, et al. Seismic waves of the 10 December 2020 M6. 6 Yilan earthquake observed by interferometric fiber-optic gyroscope[J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2022, 33(1): 32.
- [8] 曹瑜珈, 陈彦钧, 李正斌, 等. 光纤旋转地震仪的主、被动源观测实验与应用[J]. 物探与化探, 2024, 48(6): 1486-1497.
- [9] 吴耀方, 郭文阁, 黄冬, 等. 超大环光纤干涉仪的研究进展[J]. 信息记录材料, 2018, 19(12): 211-213.
- [10] IGEL H, BERNAUER M, WASSERMANN J, et al. Seismology, rotational, complexity[J]. Encyclopedia of complexity and systems science. New York: Springer, 2015: 1-26.
- [11] SCHREIBER U, WELLS J P. Rotation Sensing with Large Ring Lasers: Applications in Geophysics and Geodesy[M]. [S.l.]: Cambridge University Press, 2023.
- [12] 王惜康, 高玉平, 孙中苗. 用于测量世界时的大型光纤干涉仪的噪声分析[J]. 天文学报, 2019, 60(6): 19-27.
- [13] 秦明, 周江存, 韩保民. 大地震对地球自转的影响[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(3): 951-956.
- [14] 李正斌, 朱兰鑫, 操玉文, 等. 光纤旋转地震仪研制现状与发展趋势[C] // 2021 年中国地球科学联合学术年会论文集(十二)—专题三十四 井孔地球物理及深部钻测、专题三十五 光纤传感技术及其地球物理学应用、专题三十六 岩石物理与井中探测前沿. 北京: 北京大学信息科学技术学院区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 2021.
- [15] 张文涛, 李慧聪, 黄稳柱, 等. 光纤地震仪研究进展[J]. 应用科学学报, 2021, 39(5): 821-842.

- [16] XU C, SUN W, ZHOU X. Effects of huge earthquakes on Earth rotation and the length of day[J]. TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2013, 24(4): 649.
- [17] 李永兵, 张桂才, 杨清生. 光纤干涉测试数据的 Allan 方差分析[C] // 第五届光电惯性技术学术会议论文集, 深圳: 中国惯性技术学会光电技术专业委员会, 2002: 126-132.
- [18] 王巍, 冯文帅, 张首刚, 等. 基于高精度光纤干涉仪的世界时测量技术研究[J]. 导航与控制, 2023, 22(5): 1-11.
- [19] 马超群, 徐小远. 京津冀地区天然地震、非天然地震时频特征分析[J]. 四川地震, 2024, (4): 36-41.
- [20] 杨东辉, 纪春玲, 王嘉琦, 等. 承德地区宽频带倾斜仪与宽频带地震计同震响应融合分析[J]. 地震科学进展, 2025, 55(1): 21-29.
- [21] 曹国滨, 刘涛, 吕旅, 等. 振幅谱归一化方式对地震采集数据分析结果的影响[J/OL]. 地球物理学进展, (2025-01-11)[2025-03-13]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=hmNf6PfbabvcekECfZh1Tv4amUTIre_yg4EfG18I_0937vKgJFxAoZiT4sD8AZkFOwrceIm-vDmr54zWBj_eu5wFo7q4o1GkHwqR4wywkEO0bmLmEP9Z7F0qE4ovfb9G1cGORLTPrxA6RIZBsMHzt5pWJeGiYlA21hs631-xTUX2yE9Dybdq9A=&uniplatform=NZKPT&language=CHS&uid=WEEvREcwSljHSldTTEYyT1g4YlhIa1MyK1lXekdLVnpJazdIQzRVMkV4QT0=\\$9A4hF_YAuvQ5obgVAqNKPCYcEjKensW4IQMowHtwkF4VYPoHbKxJw!!](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=hmNf6PfbabvcekECfZh1Tv4amUTIre_yg4EfG18I_0937vKgJFxAoZiT4sD8AZkFOwrceIm-vDmr54zWBj_eu5wFo7q4o1GkHwqR4wywkEO0bmLmEP9Z7F0qE4ovfb9G1cGORLTPrxA6RIZBsMHzt5pWJeGiYlA21hs631-xTUX2yE9Dybdq9A=&uniplatform=NZKPT&language=CHS&uid=WEEvREcwSljHSldTTEYyT1g4YlhIa1MyK1lXekdLVnpJazdIQzRVMkV4QT0=$9A4hF_YAuvQ5obgVAqNKPCYcEjKensW4IQMowHtwkF4VYPoHbKxJw!!)
- [22] 马见青, 李庆春, 王美丁. 广义 S 变换在地震勘探中的研究进展[J]. 物探与化探, 2011, 35(2): 265-269.