arXiv:2305.01468v1 [physics.geo-ph] 2 May 2023

未经同行评审的 arXiv 稿件

通过主动相位噪声消除实现远距离光纤地震探测

塞巴斯蒂安·诺埃[1], 多米尼克·胡斯曼[2], 尼尔斯·穆勒[1], 雅克·莫雷尔[2], 和安德烈亚斯·菲希特纳[1,*]

[1]苏黎世联邦理工学院地球物理研究所，8092 苏黎世，瑞士[2]瑞士联邦计量研究院，METAS，3003 伯尔尼-瓦贝恩，瑞士[*]andreas.fichtner@erdw.ethz.ch

摘要

我们提出了一种远距离光纤环境形变传感器，其基于计量频率传递中的主动相位噪声消除（相位噪声消除）。相位噪声消除传感利用对补偿频率的记录，而这种频率通常会被丢弃。该方法无需专用测量设备，便可与计量服务同步运行，这表明现有的相位稳定计量网络可以轻松兼用为环境传感器。相位噪声消除传感与在线放大兼容，因此能够探测长度超过 1000 千米的电缆，有望为海洋地震探测和预警作出贡献。我们采用谱元波场模拟，准确考虑复杂的电缆几何结构，并对比了法国东南部一次震级为 3.9 的地震，以及瑞士伯尔尼与巴塞尔之间一条长 123 千米的光纤链路所对应的补偿频率观测记录和计算记录。相位和振幅均吻合，表明相位噪声消除传感可用于定量分析，例如地震探测与特征描述。

引言

过去十年间，分布式声学传感（DAS）已发展为一项成熟技术，可在毫赫兹至千赫兹范围内提供高空间采样率和宽频带[1,2]。由此，它开辟了多种具有直接社会价值的研究方向，例如地震成像，以及对近地表结构和储层的监测[3–7]、用于潜在早期预警的火山地震活动探测与表征[8–11]，以及对冰川和冰盖结构与动态的研究[12–15]。

随着分布式声学传感的普及，人们开发了新的传感方法，以克服其两项缺点：设备成本高，以及通常只有几十千米的最大探测距离。研究表明，利用依赖于形变的双折射，跨洋电信光缆中累积的光偏振变化能够记录地震引起的地面运动[16,17]。早期一项研究表明，超稳激光器信号经由数百至数千千米长的计量学或电信网络传输时，其光学相位变化对多种环境信号都很敏感，其中包括地震[18]。采用概念上类似的方法，研究人员开发出微波频率光纤干涉仪（MFFI），其成本仅为商用分布式声学传感设备的一小部分[19],，使这项技术在低收入国家的环境与自然灾害应用中颇具吸引力。对分布式声学传感和MFFI进行并列比较，凸显了后者用于定量科学研究的潜力[20]。基于相位传输的技术只能提供空间积分而非分布式的形变测量，不过可通过在光纤段之间使用中继器[21]，或对信号进行时变分析[22]，实现一定程度的空间分辨率。基于偏振或相位传输的光纤传感技术大幅扩大了覆盖范围，尤其是在海洋区域，显然有利于地震成像以及地震和海啸早期预警。然而，这些技术需要专用测量设备[16,18,19]，而且可能需要中断光纤原本主要承载的服务[18]。

本文提出一种基于主动相位噪声消除（PNC）的远距离光纤形变传感替代方案。PNC 通常用于稳定计量光纤网络中的频率传递；它会产生光相位变化测量结果，作为副产品，而这些结果通常会被丢弃，或仅用于系统健康监测。通过与区域地震的全波形模拟结果进行比较，我们证明，PNC 能够定量测量地面形变，同时不中断计量频率传递。这意味着，现有计量网络无需额外成本和工作量，即可改造为远距离形变传感器。

测量原理与仪器响应

相位稳定光纤网络被广泛用于将高度稳定且准确的光频率从一个地点传输到另一个地点。光纤沿线的机械或热扰动所引起的频率扰动，可借助主动相位噪声补偿予以补偿。近期已开发出多个相位噪声补偿光纤网络，其主要目标是提升频率传递性能，使其超越卫星技术；这对于最先进的原子钟比对而言不可或缺[23–29]。尽管主动相位噪声补偿所施加的随时间变化的频率或相位校正本身并非具有计量学价值的信号，但其中包含着有关地面形变的潜在宝贵信息，例如由地震引起的形变。本文所用相位噪声补偿网络的详细说明见[30]。此处我们简要概述其核心内容，并在图1a 中以示意图总结。

相位噪声消除基于相干光相位测量和反馈环路[31]，：低噪声连续波激光器信号通过长度为L的光纤，从本地站发送至远端站。在远端站，部分信号被耦出供本地使用，其余信号则反射回本地站进行相位检测。在光纤上的某一位置z，沿线应变 $\varepsilon(z,t)$会引起光学相位扰动

$$\delta\varphi(z,t) = \frac{2\pi\nu\alpha}{c}\,\varepsilon(z,t)\,, \tag{1}$$

其中，ν 是激光频率，c 是光纤中的光速[22]。系数 α 描述光纤与固体地球之间的机械耦合，通常需要通过实验推断。它涵盖了多种效应，例如光纤在缆线中的机械隔离，以及与未知的小尺度地下结构有关的场地效应。假设最大传播时延$2L/c$ 相对于形变的时间尺度足够小，则本地站累积的相位变化等于

$$\varphi(t) = 2\int_{z=0}^{L}\delta\varphi(z,t)\,dz = \frac{4\pi\nu\alpha}{c}\int_{z=0}^{L}\varepsilon(z,t)\,dz\,. \tag{2}$$

测得的相位误差被转换为校正频率 $\Delta\nu$，并通过声光调制器施加到光学频率上。若 $\varphi(t)$相对于相位噪声补偿带宽$c/(4L) = 406$ 赫兹变化缓慢，则时间导数 $\dot{\varphi}(t)$可很好地近似表示 $\Delta\nu$，后者即为我们的测量量。因此，总之，形变 ε 与测量电压 $\Delta\nu$ 之间的仪器响应为

$$\Delta\nu(t) = \frac{4\pi\nu\alpha}{c}\int_{z=0}^{L}\dot{\varepsilon}(z,t)\,dz\,. \tag{3}$$

在常规实践中，校正频率 $\Delta\nu$ 会被记录下来用于系统健康监测，或被完全舍弃。这里我们存储其时间序列，从而将相位噪声消除转变为形变传感器。

实验装置

我们在一条长123 千米的光纤上实施了相位噪声消除系统，该光纤连接伯尔尼的瑞士联邦计量研究院（METAS）与巴塞尔大学的远端站，如图所示。1b。该段光纤属于一个规模更大的光纤网络，该网络最初为精密光谱学研究而开发[30]，并接入由SWITCH提供的瑞士国家研究与教育网络的电信基础设施。要将相位稳定的频率信号接入运行中的光纤网络，必须仔细考虑网络设计，以避免干扰共存的电信光谱波段。一种简单但成本高昂的方法是使用专用暗光纤。更具成本效益的方案是使用暗通道，将信号复用到未使用的光谱波段中。不同于其他采用C波段（波长1530–1565 纳米）的成熟频率计量网络，我们在L波段（波长1565–1625 纳米）选择了一个频率为190.7 赫兹（波长1572.06 纳米）的暗通道，对应ITU-T第7信道。除了降低光纤租赁成本外，这一方案还能与C波段电信数据流量保持较大的光谱保护带间隔。

在网络中的两个位置，安装了双向掺铒光纤放大器，以补偿网络中的光功率损耗。我们系统的环路带宽，即可以补偿相位噪声的最高频率，为$\nu_{\mathrm{PNC}} \approx 250$ 赫兹，略低于由光纤延迟决定的理论极限$L/4c = 406$ 赫兹。因此，我们以每秒 500 个样本的速率测量$\Delta\nu$，对应的奈奎斯特频率为 250 赫兹，远高于地震事件的频率范围。

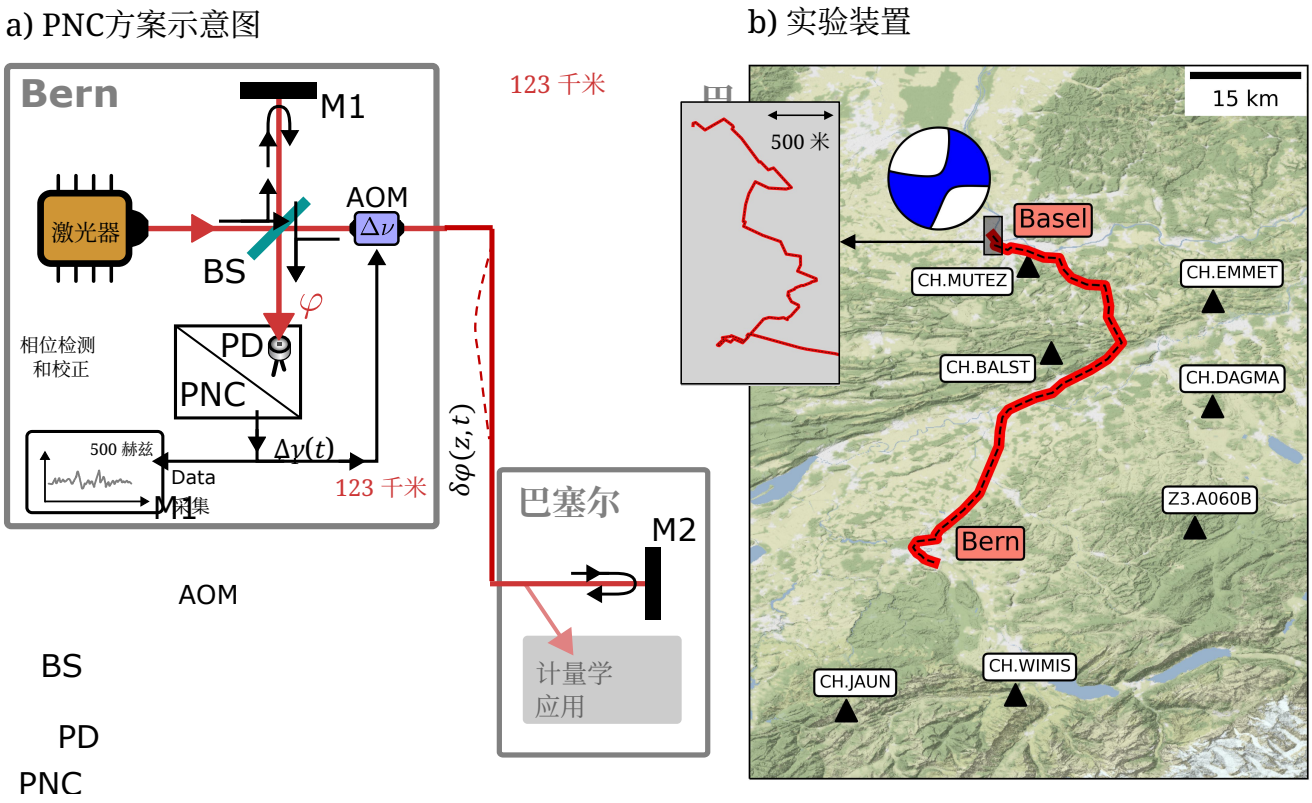

图 1. 相位噪声消除的测量原理与实验装置。(a) 相位噪声消除的干涉相位测量示意图。信号源为超稳激光器。一个分束器（BS）和两面反射镜（M1 和 M2）构成迈克耳孙型干涉仪，用于测量光学相位噪声 φ 在连接伯尔尼和巴塞尔两地实验室的 123 千米长干涉仪臂上累积的光学相位。光学相位由光电二极管（PD）检测，并经过处理以生成校正频率 $\Delta\nu(t)$，再通过相位噪声消除装置（PNC）实现。此频率校正通过声光调制器（AOM）施加到光频率上，从而补偿相位噪声。我们以 $\Delta\nu$ 500 赫兹的采样率进行记录。在巴塞尔，部分光频率被耦合输出，供当地计量应用使用。(b) 连接伯尔尼的 METAS 与巴塞尔大学的光纤电缆几何结构。局部放大图显示了巴塞尔市内复杂的电缆几何结构。米卢斯地震的震中和震源机制以沙滩球标出。黑色三角形表示提供记录数据的地震台站，这些数据用于验证地震速度模型（见图 3）。

2022年3.9级米卢斯地震的观测与建模 ke

2022年9月10日，3.9级米卢斯地震为测试PNC系统作为地震传感器的能力提供了独特的机会。图中展示了校正频率的原始记录和经过低通滤波的记录 $\Delta\nu(t)$。 ~30 在高于赫兹的频率下，占主导地位的人为噪声会掩盖地震信号。应用5赫兹低通滤波器后，地震引起的相位畸变便显现出来。

为了评估 $\Delta\nu(t)$在地震学问题的定量求解中可发挥多大作用，我们将其与模拟数据进行了比较。为此，我们对现有的阿尔卑斯地区较大范围的一维地震速度模型[32], 稍作修改，使其能够将光缆附近最短周期为3 s的三分量地震仪记录解释到大致处于噪声水平的程度。在此过程中，我们没有尝试拟合光纤记录，以避免结果产生乐观偏差。图 3a 显示了 P 波和 S 波速度的深度分布。波场模拟基于谱元求解器 Salvus[33], ，并将地形变化纳入考量。地震震源信息，包括位置和矩张量，由GEOFON提供[34]。不同台站和分量的代表性波形比较见图 3b。结果表明，尽管该一维模型较为简单，但其到时解释的精度达到 ~1 s，振幅的误差则在 ~10 %以内。

为继续模拟校正频率 $\Delta\nu(t)$，我们将 123 千米光纤电缆加入谱元网格。必须特别注意，因为传输的相位变化高度依赖电缆高曲率段的几何形状[22]。为此，我们沿相对笔直的电缆段每隔 ~50 m 设置锚点，并在更

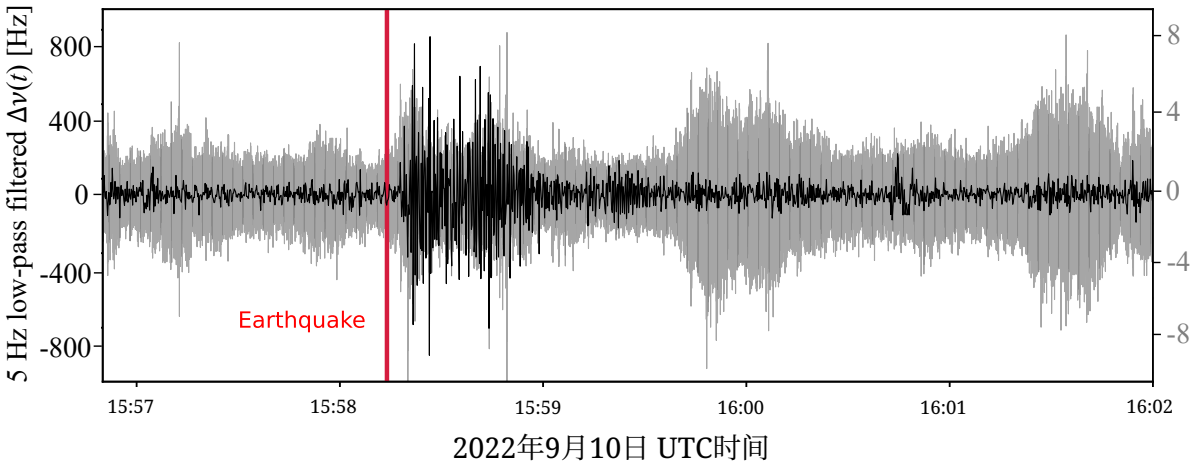

图 2. 相位噪声消除校正频率的原始记录和 5 Hz低通滤波记录 $\Delta\nu(t)$。在低于 ~5 赫兹的频率下，地震信号的强度超过电子噪声和人为噪声。

密集地布设在狭窄弯道周围。在锚点之间，电缆以三次样条表示。沿数值电缆，我们每隔 2 m 输出轴向应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$，根据公式 (3) 进行积分和缩放，初始时假设耦合系数为 $\alpha = 1$.

观测频率 $\Delta\nu^{\mathrm{obs}}(t)$及其模拟对应量 $\Delta\nu(t)$ 在图 4 中给出，涵盖了不同周期频段，其中主要观测到的是表面波。尽管波形差异总体上大于图 3中的传统位移记录，但相邻振荡周期之间有明显的对应关系，时间偏移约为几秒。振幅差异主要由未知的 α造成；图 4 显示，在 7 - 25 s 周期频带内该值为 ~0.95，在较短的 3 - 10 s 周期频带内为 ~0.66。因此，大部分地震诱发变形都有效地传递到了光纤中。在波形中，随时间变化的振幅差异约为百分之几十。通常，单个地震仪的位移时间序列较为简单，而校正频率时间序列更为复杂，因为波与电缆相互作用的时间更长，约为 20-30 s。电缆沿线的高曲率点尤其会在 $\Delta\nu$ 时间序列[22]中产生高振幅振荡。

讨论

本文介绍的基于PNC的传感具有以下主要优势：(1) 与在线放大兼容，因此该方案可部署于长度超过 1000 km 的光纤上。(2) 除了许多计量网络中已投入运行的主动相位噪声补偿外，无需专用测量设备，因此不会增加成本和工作量。(3) 基于PNC的传感运行时不会中断计量服务。相比之下，据我们所知，早期地球物理应用中使用的计量链路在测量期间[18] 并未进行稳频，以便不经校正频率而直接记录光学相位变化。虽然这种方法能够更直接地读取相位，但它不兼容计量频率传递与网络同时使用。

尽管以往研究[18,21] 已对相位传输信号进行了有益分析，但据我们所知，图 4 首次比较了观测值与计算得到的相位传输波形。该比较基于严谨的正演建模理论[22]，并结合谱元波场模拟，恰当地考虑了光纤电缆几何结构的细节。虽然其效果略逊于图 3b 中的位移地震图对比，但时间偏移约为 1 s。这与区域地震波形反演中的到时残差相当[35,36]。在我们的实验中，周期大于 ~3 s 时，振幅失配低于 ~66 %。这意味着地震震级的估计误差仅为 ~0.12。总之，我们的结果表明，PNC传感有助于定量地震学研究，包括地下模型的层析成像细化以及地震特征的刻画。

耦合系数的估计值 α 表明，在周期大于 ~3 s 时，大部分应变实际上都传递到了光纤中。尽管这条电信电缆并非为传感应用而安装，但这一结果与专用光纤传感装置类似，其中 α 可达到接近 1^{2} 的值。

本研究展示了一种仍有改进空间的原型应用。最重要的是，应借助沿电缆不同位置开展的主动源测试，并结合共址地震仪，更精确地估算 α。此外，电缆的实际几何形态可能无法准确获知。事实上，图中所示的电缆地理长度

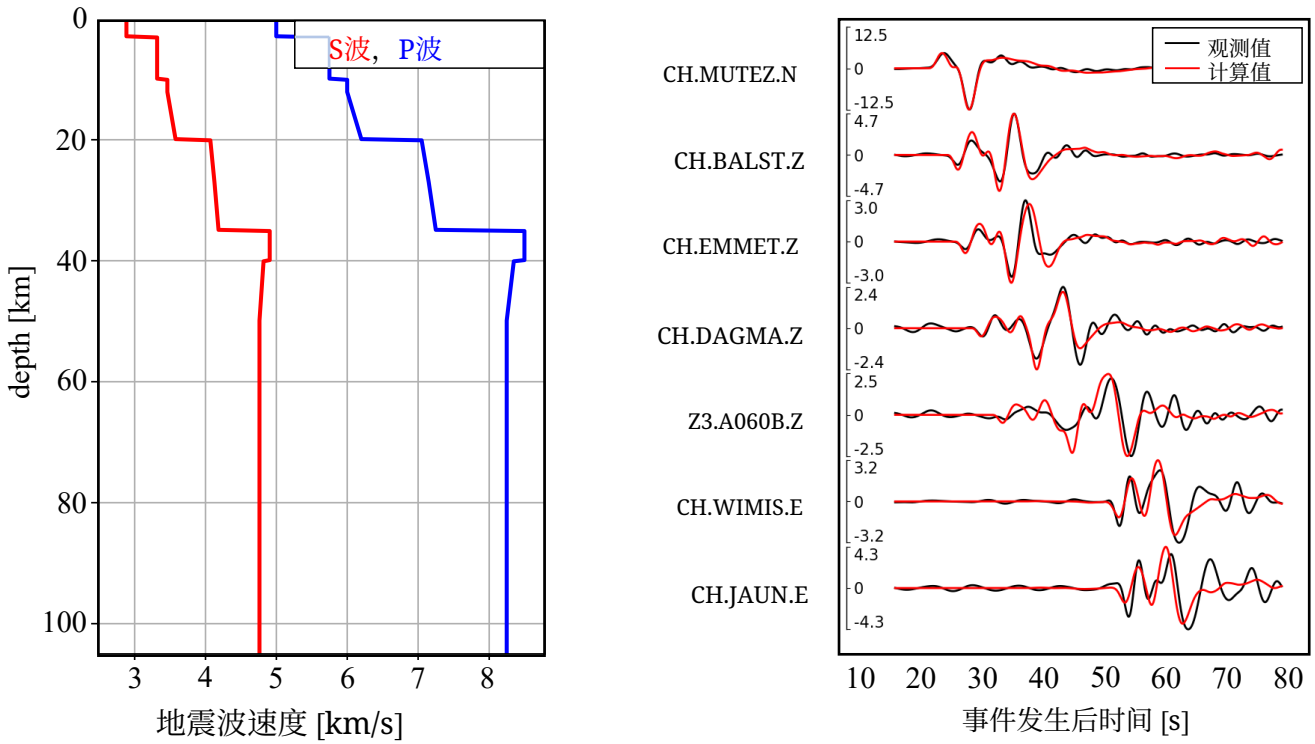

图3. 区域地球模型与地震图对比。a）P波和S波速度的区域一维模型，略微改自阿尔卑斯地区较大范围的地震模型[32]，以更好地匹配米卢斯地震事件的观测波形。b）巴塞尔-伯尔尼地区部分分量和台站的观测值（黑色）与计算位移波形（红色）对比。

图 1b 比 ~8光学测得的电缆长度 123 千米短了若干千米，该长度的测量精度很高。很可能，缺失的 ~8 千米电缆以环圈形式铺设，这可能显著影响图 4中的波形差异。

参考文献

1. Lindsey, N. J., Rademacher, H. & Ajo-Franklin, J. B. 光纤分布式声学传感阵列的宽频带仪器响应。《地球物理研究杂志》125，doi.org:10.1029/2019JB018145 (2020)。2. Paitz, P. 等。跨越 17 个八度的分布式声学传感（DAS）仪器响应实证研究。《美国地震学会通报》111，1–10 (2021)。3. Daley, T. M. 等。光纤分布式声学传感（DAS）用于地下地震监测的现场测试。《前沿》2013 年 6 月，936–942 (2013)。4. Daley, T. M., Miller, D. E., Dodds, K., Cook, P. & Freifeld, B. M. 在阿拉巴马州 Citronelle 同步使用分布式声学传感和检波器垂直地震剖面进行模块化钻孔监测的现场测试。《地球物理勘探》64，1318–1334 (2016)。5. Dou, S. 等。用于近地表地震监测的分布式声学传感：一项交通噪声干涉测量研究。《科学报告》7，doi:10.1038/s41598–017–11986–4 (2017)。6. Martin, E. R. 等。在 SDASA 利用现有电信基础设施进行地震监测：主动、被动和环境噪声分析。《前沿》36，1025–1031 (2017)。7. Ajo-Franklin, J. B. 等。利用暗光纤进行近地表表征和宽频带地震事件检测的分布式声学传感。《科学报告》9，doi:10.1038/s41598–018–36675–8 (2019)。

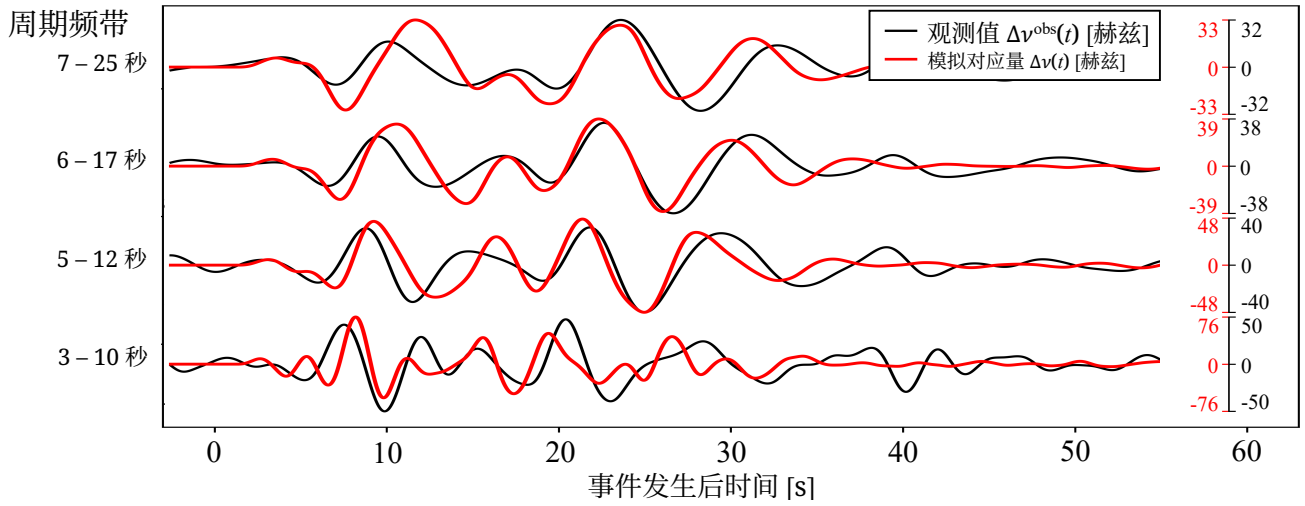

图 4. 周期频段分别为 7 - 25 s、6 - 17 s、5 - 12 s 和 3 - 10 s 时，黑色曲线表示观测到的校正频率 $\Delta\nu^{obs}(t)$，红色曲线表示其模拟对应量 $\Delta\nu(t)$。

8. Currenti, G., Jousset, P., Napoli, R., Krawczyk, C. & Weber, M. 埃特纳火山（意大利）的光纤应变测量与密集地震仪阵列的比较。《固体地球》12，doi:10.5194/se–12–993–2021 (2021)。9. Klaasen, S., Paitz, P., Lindner, N., Dettmer, J. & Fichtner, A. 火山冰川环境中的分布式声学传感——不列颠哥伦比亚省米格尔山。《地球物理研究杂志》159，doi:10.1029/2021JB022358 (2021)。10. Jousset, P. 等。光纤分布式声学传感对火山事件的探测。《自然通讯》13，doi:10.1038/s41467–022– 29184–w (2022)。11. Klaasen, S., Thrastarson, S., Fichtner, A., Cubuk-Sabuncu, Y. & Jonsdottir, K. 用“埋藏的头发”感测冰岛最活跃的火山。《EOS》103，doi:10.1029/2022EO220007 (2022)。12. Walter, F. 等。在冰川地形中利用分布式声学传感探测微震震源和波传播。《自然通讯》11，doi:10.1038/s41467–020–15824 (2020)。13. Hudson, T. S. 等。用于天然微震研究的分布式声学传感（DAS）：南极洲案例研究。《地球物理研究杂志》126，doi:10.1029/2020JB021493 (2021)。14. Fichtner, A. 等。利用浮动冰盖共振进行火山震颤的光纤观测。《地震记录》2，148–155 (2022)。15. Fichtner, A. 等。东北格陵兰冰流上的光纤地震学。《地震记录》，已提交 (2023)。16. Mecozzi, A. 等。利用海底光缆进行偏振传感。Optica 8，doi:10.1364/OPTICA.424307 (2021)。17. Zhan, Z. 等。跨洋电缆上的光学偏振地震和水波传感。《科学》371，931–936 (2021)。18. Marra, G. 等。利用陆地和海底电缆进行地震探测的超稳激光干涉测量。《科学》361，486–490 (2018)。19. Bogris, A. 等。基于商用部署电缆中微波频率光纤干涉测量的高灵敏度地震传感器。《科学报告》12，doi:10.1038/s41598–022–18130–x (2022)。20. Bowden, D. C. 等。连接分布式和集成光纤传感。《地球物理研究快报》49，doi:10.1029/2022GL098727 (2022)。21. Marra, G. 等。利用跨洋海底电缆构建基于光学干涉测量的海底环境传感器阵列。《科学》376，874–879 (2022)。22. Fichtner, A. 等。相位传输光纤传感理论。《国际地球物理学杂志》231，doi:10.1093/gji/ggac237 (2022)。23. BACON 合作组等。利用光学时钟网络实现 18 位精度的频率比测量。《自然》591，564–569，DOI: 10.1038/s41586-021-03253-4 (2021)。24. Fujieda, M. 等。用于远距离光学时钟直接比对的全光链路。Optica 19，16498–16507，DOI: 10.1364/OE.19.016498 (2011)。

25. Cantin, E. 等. 用于相干光频率传递的精确、稳健计量网络. 新物理学杂志 23, DOI: 10.1088/1367-2630/abe79e (2021). 26. Predehl, K. 等. 用于在小数点后第19位进行频率计量的920公里光纤链路. 《科学》336, 441–444, DOI: 10.1126/science.1218442 (2012). 27. Clivati, C. 等. 通过长距离光频率传递测量超越GPS极限的绝对频率. 《光学快报》24, 11865–11875, DOI: 10.1364/OE.24.011865 (2016). 28. Cizek, M. 等. 用于远端原子钟同步的相干光纤链路. 《光学快报》30, 5450–5464, DOI: 10.1364/OE.447498 (2022). 29. Schioppo, M. 等. 通过2220公里光纤网络比较超稳激光器，分数频率不稳定度达到 7×10-17. 《自然·通讯》13, DOI: 10.1038/s41467-021-27884-3 (2022). 30. Husmann, D. 等. 在环形拓扑稳频光纤网络中以1572.06 nm实现可溯源至国际单位制的频率传递. 《光学快报》29, 24592–24605, DOI: 10.1364/OE.427921 (2021). 31. Ma, L.-S., Jungner, P., Ye, J. & Hall, J. L. 在两地传递相同光频率：精确抵消光纤或其他时变路径引入的相位噪声. Opt. Lett. 19, 1777–1779, DOI: 10.1364/OL.19.001777 (1994). 32. Diehl, T., Kissling, E., Husen, S. & Aldersons, F. 区域层析成像模型的一致震相拾取：在大阿尔卑斯地区的应用. 《国际地球物理学杂志》176, 542–554 (2009). 33. Afanasiev, M. V. 等. 二维和三维模块化、灵活的谱元波形模拟. 《国际地球物理学杂志》216, doi: 10.1093/gji/ggy469 (2019). 34. Hanka, W. & Kind, R. GEOFON计划. 《地球物理年鉴》37 (1994). 35. Tape, C., Liu, Q., Maggi, A. & Tromp, J. 基于谱元方法和伴随方法的加利福尼亚南部地壳地震层析成像. 《国际地球物理学杂志》180, 433–462 (2010). 36. Çubuk Sabuncu, Y., Taymaz, T. & Fichtner, A. 土耳其西部三维地壳速度结构：全波形层析成像的约束. 《地球物理与行星内部》270, 90–112 (2017).

致谢

我们感谢Stefan Willitsch教授及其团队持续为巴塞尔的相位噪声消除装置提供支持。我们感谢SWITCH提供光纤网络基础设施及其地理数据，感谢Fabian Mauchle为网络提供技术支持，也感谢Daniel Bowden、Sixtine Dromigny、Pascal Edme、Sara Klaasen、Patrick Paitz和Krystyna Smolinski就本研究展开了许多富有成效的讨论。本研究获得欧盟地平线2020研究与创新计划资助，资助依据为玛丽·斯克沃多夫斯卡-居里资助协议第955515号（SPIN ITN）；同时也获得瑞士国家科学基金会（SNSF）Sinergia项目资助，项目编号为CRSII5_183579。

作者贡献声明

D.H.、S.N.、A.F.和J.M.构思了该实验。D.H.开展了实验并收集了数据。A.F.和S.N.构思了地震数据比较，该比较由S.N.完成。N.M.完善了地震速度模型。所有作者均撰写并审阅了稿件。

补充信息

所有作者均不存在任何利益冲突。本研究期间分析的所有数据均可在合理请求后向通讯作者获取。