



基于分布式光纤振动传感的陆地和海底断层快速探测

胡敏哲¹, 李泽峰^{1,2*}

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 精密大地测量与定位全国重点实验室, 合肥 230026

2. 中国科学技术大学蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 蒙城 233500

* 联系人, E-mail: zefengli@ustc.edu.cn

2025-05-06 收稿, 2025-07-11 修回, 2025-09-04 接受, 2025-09-15 网络版发表

国家重点研发计划(2022YFC3005602)和科技创新2030-重大项目(2024ZD0300203)资助

摘要 断层的空间分布是地震灾害评估的关键依据, 断层的存在指示了潜在的地震风险. 当地震发生时, 断层正上方的建筑和基础设施可能因为显著的断层位错和强烈的地震波而遭受严重破坏, 因此工程建设中断层的探测和避让尤为重要. 本文提出了一种利用现有光纤通信网络和分布式振动传感的快速断层探测框架, 利用分布式光纤振动传感对断层散射波的高灵敏度特性, 通过散射波溯源算法检测散射源识别断层. 我们将该方法应用至覆盖逾 330 km 的三个陆地光纤阵列和三个海底光纤阵列上, 其结果与已知断层存在高度一致性, 证明了方法准确性和可移植性. 我们进一步证明了该方法在背景噪声相关图和主动源记录上同样有效. 该方法能基于现有广泛存在的城市和海底光纤通信网络, 以极低的时间成本和经济成本辅助工程尺度的精细断层探测. 尤其是在地质调查和传统地球物理方法难以开展的城市地区和海底环境, 该方法有望提供关键的断层探测方法支撑.

关键词 分布式光纤振动传感, 断层探测, 散射波, 偏移

断层是地壳断裂、位移形成的一种特殊构造. 地震活动一般集中在大型断层上^[1], 断层的形成和发展与地震的发生密切相关^[2]. 国内外大量震例表明, 在地震发震时断层和沿线的显著位错和高振幅地震波导致建筑物容易遭受到更严重破坏和倒塌^[3]. 断层区介质的地震波速显著低于周围区域, 其流变性质也会发生改变^[4], 从而放大地震波振幅, 增大地震波对建筑和设施的威胁^[5]. 从断层向两侧延伸超过 1 km 的区域都可能受这种危险性放大作用的影响^[6]. 因此, 穿过断层的公共基础设施和建筑物面临潜在的结构性损坏风险^[7]. 在工程建设中断层避让是防范和减轻地震灾害风险的重要举措, 准确可靠的断层探查是其关键步骤.

地质调查是目前探测断层最常用的手段, 该方法综合活动断层位置和产状, 获取地震活动性质、幅度、时代、滑动速率及地震复发间隔等参数, 是深入了解

断层危险性的有效手段. 然而全面的地质调查耗时费力, 且易忽略小断层和未破裂至地表的盲断层. 特别是城市区域的建筑和铺装路面较多, 难以进行全面的地质调查; 对于海洋区域的断层, 地质调查代价更高. 在油气勘探领域, 由地震记录偏移获得的三维地震图像可以帮助识别断层和其他地质特征^[8,9]. 尽管勘探方法精度高, 但其成本高昂, 不适用于大范围普查. 另一种经典地震学方法是对断裂带及周边介质的速度结构进行层析成像^[10-12]. 但层析成像的分辨率低, 对断层的识别能力较差, 在实际断层探测较少采用.

近年来, 分布式光纤振动传感(distributed acoustic sensing, DAS)在地球物理和地质工程领域发展迅速. 该技术可以将城市通信网络中已有的普通光纤转变为密集的应变或应变率传感器, 用以监测广泛存在的振动信号^[13-17]. 观测表明低速的断层介质会导致显著的应

引用格式: 胡敏哲, 李泽峰. 基于分布式光纤振动传感的陆地和海底断层快速探测. 科学通报

Hu M, Li Z. Rapid fault detection in terrestrial and submarine environments with fiber-optic sensing (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2025-0624](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0624)

变率振幅放大^[18], 且断裂带波场模拟研究表明该放大效应要高于传统地震记录的速率振幅放大^[19]. 因此, 从DAS数据中观察波形幅度和相位的扰动可能直接识别断层^[20]. 更重要的是, DAS的空间超密集应变测量可以记录高频、快速衰减的断层散射波, 这种波场难以被传统地震台阵观测到. 最近, Lindsey等人^[21]、Spica等人^[22]、Li等人^[23]、Bao等人^[24]和Xiao等人^[25]都从DAS的地震波场记录中直接观测到了断层散射波(图1(a))并确定断层的大致位置^[23-25]. 此外, Cheng等人^[26]利用背景噪声干涉测量法, 对散射的Scholte波进行偏移成像约束了Monterey湾的海底断层和古河道沉积物位置; Atterholt等人^[27]和Yang等人^[28]分别采用反投影法和背景噪声干涉测量法, 利用Ridgecrest地区DAS阵列^[23]记录到的面波和体波产生的断层散射波约束了断层的位置、速度结构和几何形态等属性. 然而现有地震学方法依赖于对特定DAS数据集进行复杂的数据处理, 过程和结果高度依赖专家分析解释, 普适性和时效性较差, 难以应用于大范围断层普查工作.

基于近年来众多研究中不同DAS阵列中共同观测到的“人”字型断层散射波, 本文提出了一种通用的断层散射波溯源方法, 通过回溯散射能量来实现全自动断层探测(图1). 我们将该方法应用至在三个陆地区域和三个海底区域的公开DAS阵列(表1), 通过与已知断层数据库的对比验证其准确性和可靠性. 我们还在Ridgecrest南边横跨Garlock断层的DAS阵列上测试了该方法对背景噪声互相关图和主动源记录的适用性. 最后, 我们讨论了该技术在难以开展地质调查区域识别断层以及补充和校正已知断层数据库等方面的应用前景.

1 数据和方法

本研究中6个地区的9个DAS阵列均使用现有的通信光缆作为传感器, 所有数据集均为公开数据, 相关信息和参数如表1所示. 由于不同数据集之间的仪器噪声、测量物理量、光缆几何等特征有所区别, 我们对部分数据集做了专门的预处理: 采用去噪算法去除了Ridgecrest北侧DAS数据集中的尖峰噪声^[29,30]; 对于Ridgecrest南侧DAS, 根据公开信道坐标数据, 将相邻信道距离大于50 m处(同时也是几个显著的光缆拐点)断开(图2). 对其他5个数据集不做任何预处理. 之后, 我们对所有的数据集采用完全相同的数据处理流程.

对于DAS数据, 激光实际经过的路程由光缆线路决定. 当光纤弯曲时, DAS相邻信道在实际地理空间中

的直线距离(地理道间距)会小于产生邻道数据的光路径长度差(光学道间距或理论道间距). 出于便利维护的目的, 光缆需要间隔地保留为环路^[14,23], 尤其是陆地光缆. 光缆环路不仅会产生耦合异常、数据质量低的坏道, 而且在环路处各道的地理道间距几乎为0, 远小于光学道间距, 这破坏了光纤传感器的空间等距性, 限制了FK滤波算法以及下文中散射波溯源算法的应用. 为了解决光纤弯曲和环路导致地理道间距不均匀的问题, 我们在对应位置弃用部分信道, 使剩余信道的地理道间距接近光学道间距, 保留较好的等间距性. 利用已知的DAS信道坐标, 我们应用了一种动态规划算法, 为各个DAS系统自动选择了需要弃用的信道, 使剩余信道的地理道间距最接近光学道间距, 即每个地理道间距与光学道间距的绝对值误差和达到理论最小值. 根据计算结果, 五个陆地地区的DAS系统均弃用了部分信道, 而四个海洋地区的DAS系统无需弃用任何信道. 其他非光缆环路原因(如光缆悬挂等原因)产生的坏道可能会导致无法使用的数据, 但并不破坏DAS等间距性. 对于这些情况, 可以使用坏道检测算法(如DASPy内置算法^[31])对坏道进行自动检测, 并将其数据全部置零.

选用等间距信道后, 所有事件数据去除线性趋势、余弦尖灭后带通滤波至1~20 Hz这一典型的地震信号频率范围. 由于DAS的不同信道有着不同的震源-传感器距离和光缆-地面耦合条件, 同一事件在不同信道上记录的振幅差异可能很大. 为消除这种振幅空间变化的影响, 我们对每个通道的波形应用Z-score标准化(图1(a)). 为了尽可能地去掉直达波和其他噪声, 保留散射波, 我们使用频率-波数(FK)滤波将波场滤至视速度 $v_{\min} \sim v_{\max}$ 的范围(图1(b)), 并在 v_{\min} 和 v_{\max} 的 ± 50 m/s范围内应用余弦尖灭, 以减少FK滤波产生的伪影. v_{\min} 和 v_{\max} 为估得的散射波速度上界和下界. 包含尖灭操作的FK滤波与曲波变换加窗法^[30]的效果非常接近^[27,31], 但运行效率更高. 经过上述数据处理后, 断层散射信号显著增强(图1(c)).

Atterholt等人^[27]采用的反投影方法基于这几个假设: (1) 每一个DAS信道都可能存在潜在的散射源, 即光缆与断层相交或非常接近的位置; (2) 散射源产生以一定速度向两侧传播一定距离的“人”字形散射波; (3) 考虑到断层散射波的性质为面波^[26-28], 存在频散, 因此将波场滤波至不同频率, 并在已知的一维速度模型所约束的速度范围内反投影散射波. 本研究优化了Atterholt等人的方法, 设计了更快速、更通用的散射波溯

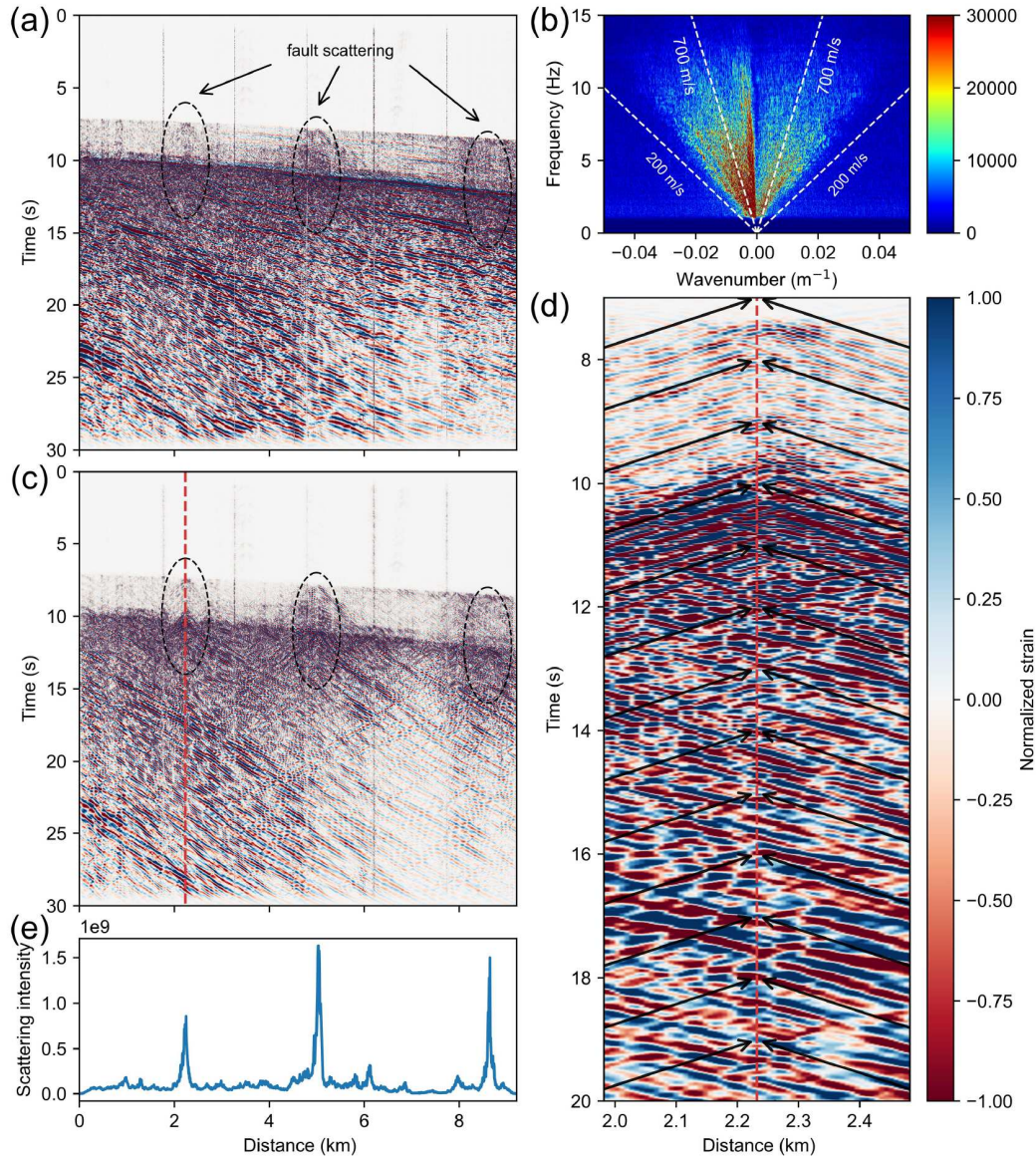


图 1 (网络版彩色)Ridgecrest DAS记录的包含断层散射波的M2.95地震波形及散射波溯源流程。(a) 选用等间距信道的M2.95地震DAS波形, 已去除尖峰噪声、去趋势、余弦尖灭、带通滤波至1~20 Hz并做标准化, 黑色虚线椭圆显示了三处显著的断层散射波; (b) (a)中波形的FK谱和FK滤波的速度范围(200~700 m/s); (c) FK滤波后的波形, 红色虚线为(d)所示窗的中心信道; (d) 散射波溯源窗, 红色虚线为中心信道, 黑色箭头表示两侧波形以假设的波速倾斜叠加; (e) 用该地震事件溯源得到的散射波强度空间分布

Figure 1 (Color online) Waveforms of an M2.95 earthquake with fault scattering waves recorded by Ridgecrest DAS array and the scatter source localization procedure. (a) DAS waveforms of the M2.95 earthquake from equally-spaced channels, processed with despiking, detrending, cosine tapering, 1–20 Hz bandpass filtering, and normalization. Three prominent fault-scattered waves are marked by black dashed ellipses. (b) FK spectrum of the waveform in (a) and the velocity range (200–700 m/s) used for FK filtering. (c) Waveform after FK filtering. The red dashed line indicates the central channel of the window shown in (d). (d) Scattering source localization window. The red dashed line indicates the central channel, and the black arrow shows the slant stacking of waveforms on both sides at the assumed wave velocity. (e) Spatial distribution of the scattering wave intensity obtained from this earthquake

源算法. 以每一信道为潜在散射源, 假设一个散射速度 v , 将中心信道左侧距离 d 以内的信道记录(包括中心信道本身)以速度 v 倾斜叠加至中心信道记录上(图1(d)),

产生表示向左散射波的时间序列. 对中心信道右侧距离 d 以内的信道做相同操作, 产生表示向右散射波的时间序列. 左右两个时间序列点乘的平方作为中心信道

表1 研究区域、DAS参数及事件信息^{a)}

Table 1 Study regions, DAS parameters, and event information

地区	研究区域	DAS分支	物理量	道间距(m)	标距(m)	监测距离(km)	采样率(Hz)	事件个数	事件类型
陆地	Ridgecrest	北	应变	10	未知	10	250	50	天然地震
				10	50	50	100	5	天然地震
		南	应变率	10	50	21.2	25	160	互相关图
	Arcata Bay			2	16	1.96	500	140	主动源
		/	应变	2.04	8.17	15.5	250	21	天然地震
海底	Long Valley	北	应变	10.2	20.42	47.7	200	3	天然地震
		南	应变	10.2	20.42	51.0	200		
	Monterey Bay	/	应变率	2	未知	20.0	100	1	天然地震
	Cook Inlet	北	应变	9.57	17.55	43.1	25	40	天然地震
		南	应变	9.57	17.55	43.1	25		
	València	/	应变率	16.8	30.4	50.0	500	1	天然地震

a) Ridgecrest、Long Valley和Cook Inlet地区均包含南、北两个DAS系统; 而Arcata Bay、Monterey Bay和València地区只有一个DAS阵列。“标距”一列, “未知”表示未从数据集和相关文章中找到该信息

的散射强度. 在 $v_{\min} \sim v_{\max}$ 的范围内以速度间隔 dv 假设不同的散射速度 v , 所得最大的散射强度作为该信道的最终散射强度. 在应用多个事件波形进行断层探测时, 要求每一中心信道的散射波速 v 不随事件而变化, 即将不同事件在假设不同 v 时得到的散射强度对应相加再求最大值. 相比直接将多个事件的最大散射强度相加, 该约束可以降低个别事件中误检测的影响. 对于一条DAS阵列, 计算得的每个散射强度峰值(图1(e))都对应了一个潜在的断层位置(此处和下文中“断层位置”均指代DAS光缆与断层的相交处). 最后, 对于每一条DAS, 我们将每一道的散射强度减去所有道上的中位值后再除以绝对中位偏差(MAD), 得到散射波强度的显著度(即扣除中位值的峰值与MAD的比值, 记为 $*MAD$)^[23,32].

虽然断层散射波存在频散, 因为断层的散射响应强度和地震波波长相关, 即对于某一断层, 只有一个较窄频带范围(对应一定的波长范围)的地震波会产生较强的散射, 这个频带范围内的波速变化小, 可以近似地以单一相速度衡量散射波, 因此本方法没有将波场在不同频段分别处理. 这减少了算法的计算量需求, 并使结果更易于解释. 此外, 我们将表示向左散射的时间序列与表示向右散射的时间序列相互点乘(即无时移的互相关)而不是像反投影方法中直接叠加^[27], 潜在假设向左和向右都存在较显著的断层散射波, 使相干叠加后可以有较高的互相关系数. 对于视波速在 $v_{\min} \sim v_{\max}$ 范

围内的单向传播的波, 单侧波形具有较好的相干性, 左右散射波点乘可以抑制简单叠加方法产生的假响应. 综上, 经过对反投影方法^[27]的改良优化, 我们发展了一种更快速且不易产生假检测的通用断层散射波检测算法.

本文应用的参数为散射波波速下界 $v_{\min}=200$ m/s、散射波波速上界 $v_{\max}=700$ m/s、散射波波速搜索间隔 $dv=20$ m/s、散射波传播距离 $d=250$ m. 上述为对Ridgecrest DAS断层散射波(图1)测试得到的经验参数, 我们将其直接应用于其他区域的DAS记录. 最后, 我们将结果与公开的断层数据库进行对比验证.

2 结果

2.1 基于陆地DAS的断层探测

美国加利福尼亚州Ridgecrest地区, 属东加利福尼亚剪切带(Eastern California Shear Zone)的一部分, 地震活动频繁. 2019年发生了7.1级Ridgecrest地震, 该地区周围有大量已探明的断层, 其中有绵延250 km的Garlock断层(图2, 断层E)和三条小断层(图2, 断层A、断层B和断层C&D). 在美国地质调查局(United States Geological Surveys, USGS)第四纪断层数据库中, 断层位置的不确定度从低到高有“良好约束”“中度约束”和“推测”三个级别, 而Ridgecrest地区南北两条DAS阵列穿过断层的5个位置分属三种约束级别. 算法利用50个

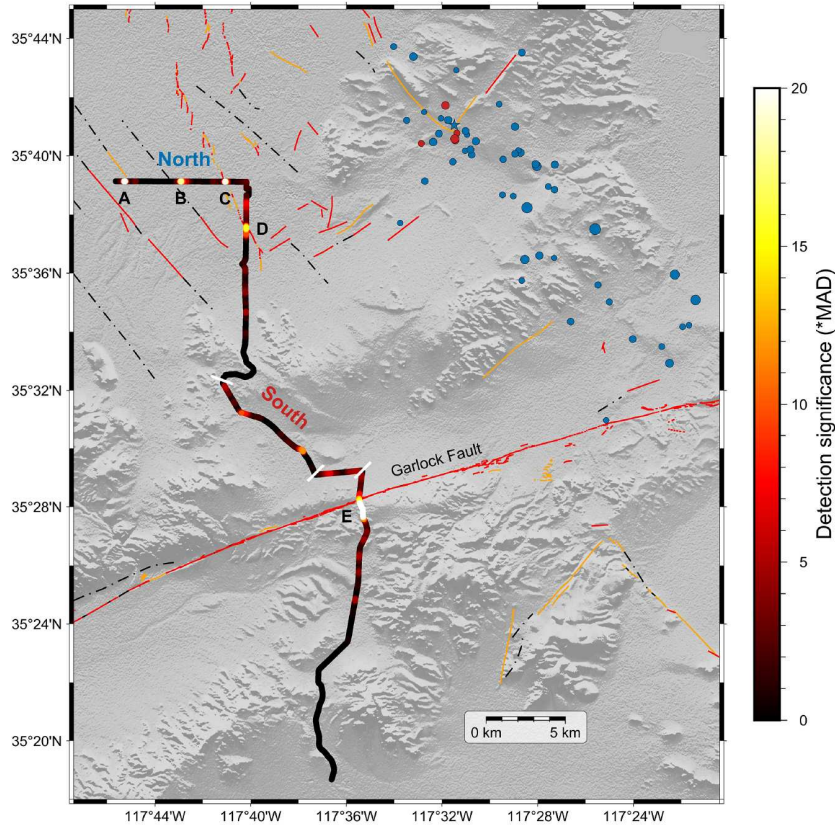


图 2 (网络版彩色)Ridgecrest地区南北两条阵列的断层探测结果. 光纤阵列的颜色表示算法检出的散射强度显著度(*MAD). 红色线段、橙色线段和黑色点划线是USGS第四纪断层数据库给出的断层, 其约束级别分别为“良好约束”“中度约束”和“推测”. 蓝色和红色圆圈分别表示用于北DAS阵列和南DAS阵列进行断层探测的地震, 大小表示其震级; 蓝色星号为图1所示的示例地震. A~E是五个散射强度峰值, 对应了DAS阵列穿过断层的位置

Figure 2 (Color online) Fault detection of north and south DAS arrays in Ridgecrest. The color of the fiber arrays indicates the significance (*MAD) of the scattered intensity detected by the algorithm. The red, orange and black dashed-dotted lines denote faults from the USGS Quaternary Fault Database, with constraint levels classified “well constrained”, “moderately constrained” and “inferred”, respectively. The blue and red circles indicate earthquakes used for fault detection by north and south DAS arrays, with circle size representing their magnitudes; the blue star marks the example earthquake shown in Figure 1 peaks A–E in scattering intensity correspond to five locations where the DAS arrays intersect faults

地震探测到了Ridgecrest北侧DAS阵列^[23]穿过的三条断层(图2, 断层A~C), 利用5个地震探测到了南侧DAS阵列穿过的两条断层(图2, 断层D和E). 该地区所使用的55个地震震级普遍小于3级. 探测出的五条断层位置与USGS断层库给出的位置高度吻合. 值得注意的是, 探测到的断层B的位置位于USGS所给位置以东数百米处. 我们认为本研究得到的断层B位置更为可靠, 依据有二: (1) USGS数据库中断层B的位置为“推断”级, 具有较大不确定性; (2) Atterholt等人^[27]采用反投影法和Yang等人^[28]采用背景噪声干涉测量法的结果中, 断层B的位置同样位于USGS数据库给出的东侧, 与本研究结果一致.

断层E即Garlock断层是南加州主要大断层之一, 对地震波表现出很强的散射效应, 其强散射区域宽度约为2 km, 散射最强处位于USGS给出的断层位置以南700 m处(图3(a)). 对160个背景噪声互相关图和140个主动源记录同样采用本算法进行断层探测, 并将天然地震、互相关图和主动源的散射强度结果都截取至USGS Garlock断层南北各2 km范围内再计算显著度(*MAD), 发现三种数据得到的散射强度峰值都在断层南侧(图3). 应用南北共160个虚拟源的互相关图识别断层(图3(b))和分别应用南侧85个虚拟源或北侧75个虚拟源(图3(c))识别断层, 散射强度的峰值位置会发生一定的变化, 但都处于USGS断层位置以南700 m左右. 说

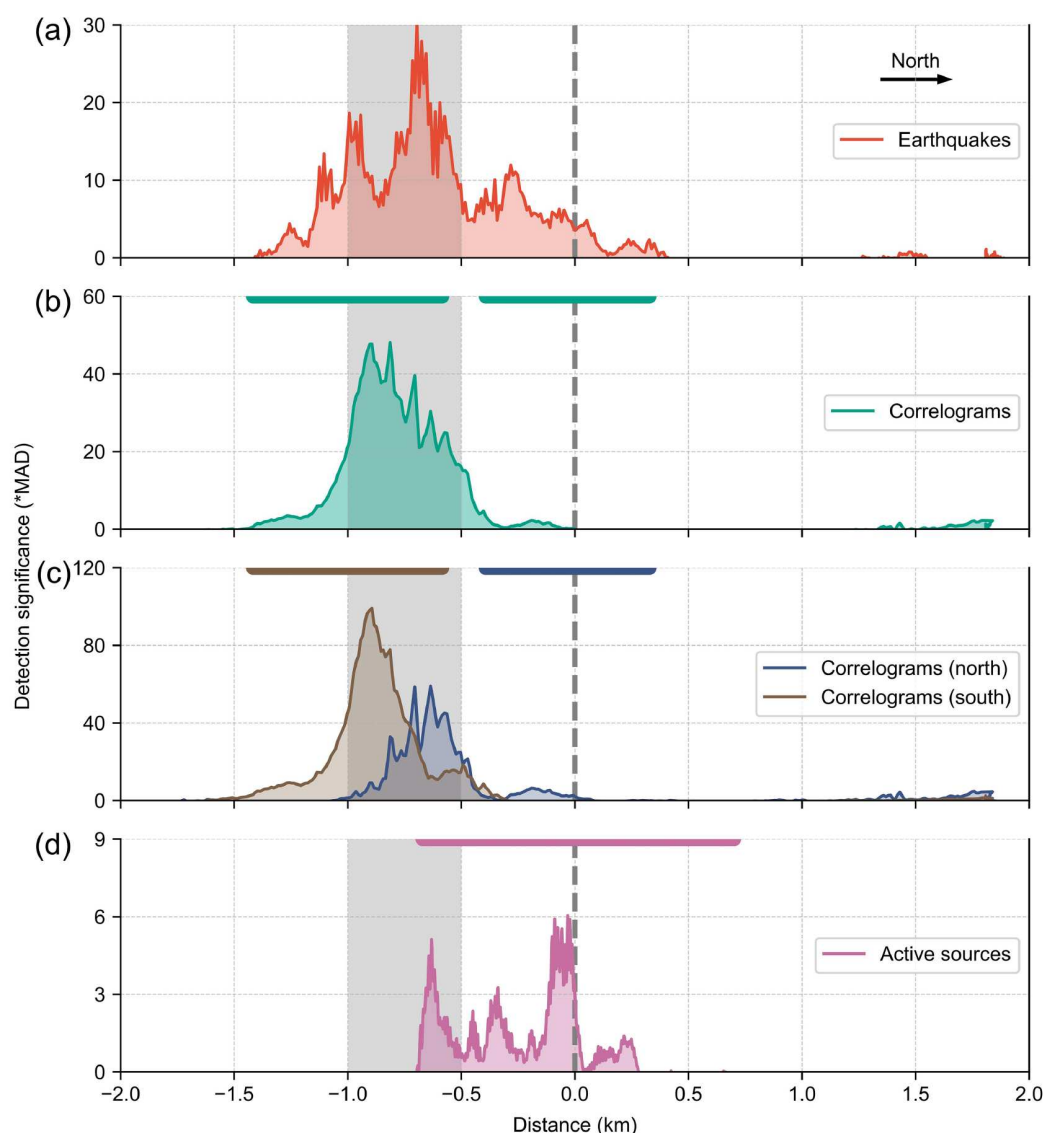


图 3 (网络版彩色)对天然地震、互相关图和主动源分别应用本算法探测得到的Garlock断层散射强度. (a) 使用天然地震得到的Garlock断层散射效应显著度分布. (b) 使用背景噪声互相关图得到的Garlock断层散射效应显著度分布, 顶部的绿色线段是160个虚拟源的位置. (c) 分别使用南侧虚拟源和北侧虚拟源的互相关图得到的Garlock断层散射效应显著度分布, 顶部的棕色线段是85个南侧虚拟源的位置, 蓝色线段是75个北侧虚拟源的位置. (d) 使用主动源记录得到的Garlock断层散射效应显著度分布, 顶部的粉色线段是140个主动源的位置. 对于每个主动源炮集, 数据集中只公开了偏移距在300 m以内(共600 m)的数据

Figure 3 (Color online) The scattering wave intensity of the Garlock fault detected with earthquakes, correlograms and active sources. (a) Distribution of scattering significance of the Garlock fault obtained from earthquakes. (b) Distribution of scattering significance of the Garlock fault obtained from ambient noise correlograms, with green line segment at the top indicating positions of 160 virtual sources. (c) Distribution of scattering significance of the Garlock fault obtained from correlograms of the 85 southern virtual sources (brown line segment at the top) and 75 north virtual sources (blue line segment at the top), respectively. (d) Scattering significance of the Garlock fault obtained from active source records, with pink line segment at the top indicating position of 140 active sources. For each active source shot gather, only the data within 300 meters of offset (total 600 m) is publicly available in dataset

明虚拟源位置会小幅影响散射源识别结果, 但不影响方法的有效性. 数据集中仅包含每个主动源炮集偏移距在300 m以内(共600 m)的数据, 因此大量主动源记录

在已知断层位置以南700 m附近是缺失的, 但用主动源记录依然得到了散射源在USGS断层位置以南的结果. 上述分析验证了本算法对于互相关图和主动源记录的

有效性; 三种数据的结果相互印证也表明Garlock断层的散射中心确实位于已知位置以南, 与之对应, 基于DAS和密集台阵对Garlock断层成像的结果也显示断层低速区中心位于已知位置以南^[33,34]。造成这些散射中心与已知断层位置有偏差的原因将在第3节中进一步讨论。

加州Arcata Bay地区为一海湾, 有数条已知断层接近或延伸至海岸。Arcata Bay的DAS阵列靠近海岸, 与五条已知断层相交或非常接近(图4(a)), 断层A~C、 α 和 β 。利用21个地震, 新算法检测到了北侧A、B、C三个断层(图4(a))。参考检测结果, 相比较断层C在USGS断

层数据库中“中度约束”级的位置, 它实际可能在末端延伸至与DAS相交。算法还检测到了一个散射强度峰值X, 而对断层 α 和 β 没有响应, 其原因将在第3节中讨论。

Long Valley地区的长谷火山口是地球上最大的火山口之一, 大小约为16 km \times 32 km。受区域构造应力和岩浆或热液活动的综合影响, 该区域发育有大量小断层^[35,36]。该区域南北两条DAS阵列从Old Mammoth出发, 分别向东南和西北两个方向延伸, 总长约100 km。我们的算法检测到光纤沿线有两个主要的密集断层区域(图4(b)), 断层密集区A和B)。在这个断层密集的区域, 对单个断层的识别结果难以衡量, 但经过大量小断层

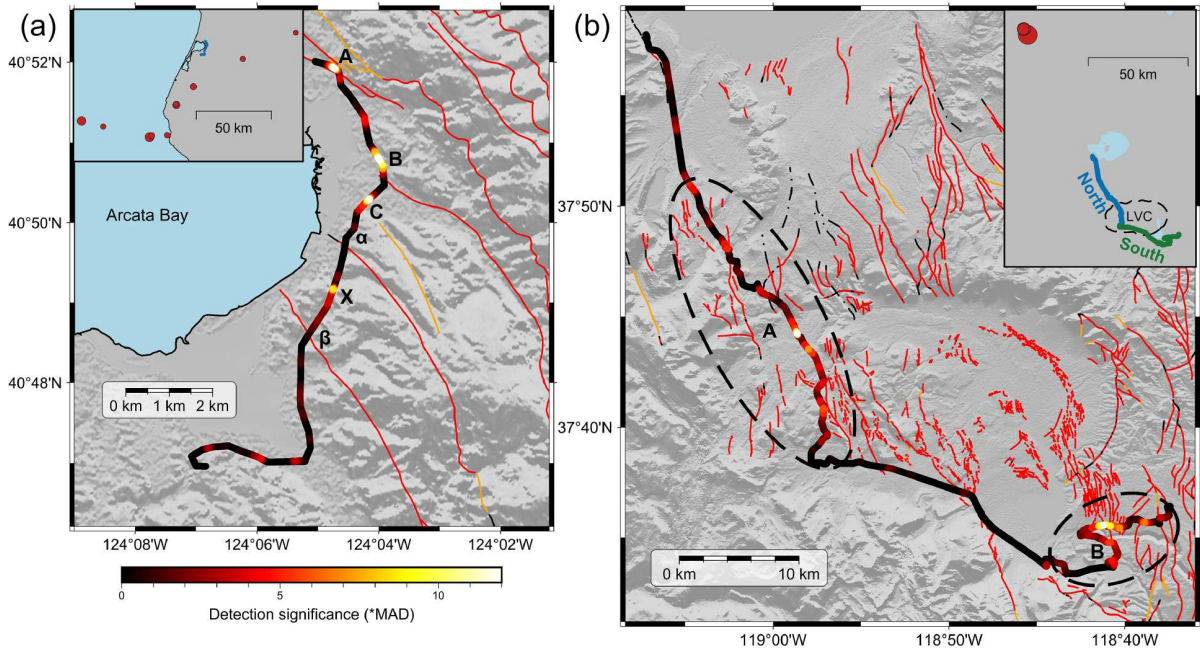


图 4 (网络版彩色) Arcata Bay地区和Long Valley地区的断层探测结果. (a) Arcata Bay地区DAS阵列的断层探测结果. 光纤阵列的颜色表示算法检出的散射强度显著度(*MAD). 红色线段、橙色线段和黑色点划线是USGS第四纪断层数据库给出的断层, 其约束级别分别为“良好约束”“中度约束”和“推测”. A~C是对应于三条已知断层的散射强度峰值, X是无对应断层的散射强度峰值, α 和 β 是两条没有检测到显著散射能量的断层. 缩略图中的蓝色线段表示DAS阵列, 红色圆圈表示用于断层探测的地震中10个位置已知的, 大小表示其震级. 另有11个用于断层探测但位置未知的地震未绘出. (b) Long Valley地区南北两条DAS阵列的断层探测结果. 光纤阵列的颜色表示算法检出的散射强度显著度(*MAD). 红色线段、橙色线段和黑色点划线是USGS第四纪断层数据库给出的断层, 其约束级别分别为“良好约束”“中度约束”和“推测”. A和B是两个散射强度高的光纤段, 对应了两个DAS阵列穿过大量小断层的区域. 缩略图中的绿色和蓝色线段表示南北两条DAS阵列, 红色圆圈表示用于断层探测的3个地震, 大小表示其震级. LVC为长谷火山口(Long Valley Caldera)

Figure 4 (Color online) Fault detection in Arcata Bay and Long Valley with DAS. (a) Fault detection of the DAS array in the Arcata Bay. The color of the fiber arrays indicates the significance (*MAD) of the scattered intensity detected by the algorithm. The red, orange and black dashed-dotted lines denote faults from the USGS Quaternary Fault Database, with constraint levels classified “well constrained”, “moderately constrained” and “inferred”, respectively. Peaks A~C in scattering intensity correspond to three known faults, while peak X shows no fault association. Faults α and β exhibit no significant scattering energy. In the inset map, the blue line represents the DAS array, and the red circles denote 10 located earthquakes used for fault detection, with circle sizes indicating magnitudes. Additional 11 earthquakes with unknown locations are used but not plotted. (b) Fault detection of the north and south DAS arrays in Long Valley. The color of the fiber arrays indicates the significance (*MAD) of the scattered intensity detected by the algorithm. The red, orange and black dashed-dotted lines denote faults from the USGS Quaternary Fault Database, with constraint levels classified “well constrained”, “moderately constrained” and “inferred”, respectively. Fiber segments A and B show high scattering intensity, corresponding to zones where the two DAS arrays intersect numerous minor faults. In the inset map, the green and blue lines represent the south and north DAS arrays, and the red circles denote 3 earthquakes used for fault detection, with circle sizes indicating magnitudes. LVC denotes the Long Valley Caldera

的光缆段(图4(b), 断层密集区A和B)确实检测出了较强的散射源, 而几乎没有经过已知断层的光缆段(图4(b), 断层密集区A西北侧、断层密集区A和B之间)没有检测出断层散射源, 验证了算法的可靠性。

2.2 基于海底DAS的断层探测

Monterey Bay地区有大量已探明的海底断层, 它们是由加州海底测绘计划(California Seafloor Mapping Program, CSMP)通过对swath声纳数据、背向声散射、海底视频和摄影, 高分辨率地震反射剖面以及海底沉积物采样数据进行集成和解释得到的, 是高度详细的海底断层数据。仅使用Monterey Bay DAS记录的一次M3.4的区域地震, 我们发现了Monterey Bay的断层A和断裂带B、X、Y(图5(a))。与已知的水底断层位置对比, 断层A可能指示了西边的已知断层与光缆相交且实际位置比已知位置偏东, 断裂带B与已知位置对应良好, 而断裂带X、Y是未编目的。我们结果中断层A和断裂带B、X的位置与Cheng等人^[26]的对成像结果的解释非常一致, 且断裂带X亦被Lindsey等人^[21]和Cheng等

人^[26]识别为未编目的断层带。根据Cheng等人^[26]的推断, 检测到的断裂带Y可能实际为古河道。

根据美国阿拉斯加地质调查局利用地震反射剖面和航磁数据汇编得到的Cook Inlet地区断层位置报告, 仅有一条Border Ranges断层在Cook Inlet南北两条DAS附近, 且DAS没有穿过该断层。Cook Inlet地区南北两个DAS系统各显示出两个散射强度峰值(图6(a), A、B和A'、B'), 推测其可能为两条未编目的小断层, 分别于南北DAS阵列相交。

西班牙地质调查局管理和维护的伊比利亚第四纪活动断层数据库显示, València地区近海DAS阵列^[37]的南侧有五条大致呈南北走向的断层。根据地震反射剖面中的上新世-第四纪地震反射层的不连续性, 它们被识别为证据强度为“近似”级的断层。对DAS阵列记录到的3.6级地震应用断层识别算法, 看到了两个强散射中心A、B和两个弱散射中心C、D。我们推测它们可能指示了南侧已知断层向北的延伸, 或是未知的小型海底断层。由于海底断层识别的困难, 在大部分海域, 已被探明的断层分布都较稀疏, 仅有少量海底断层的

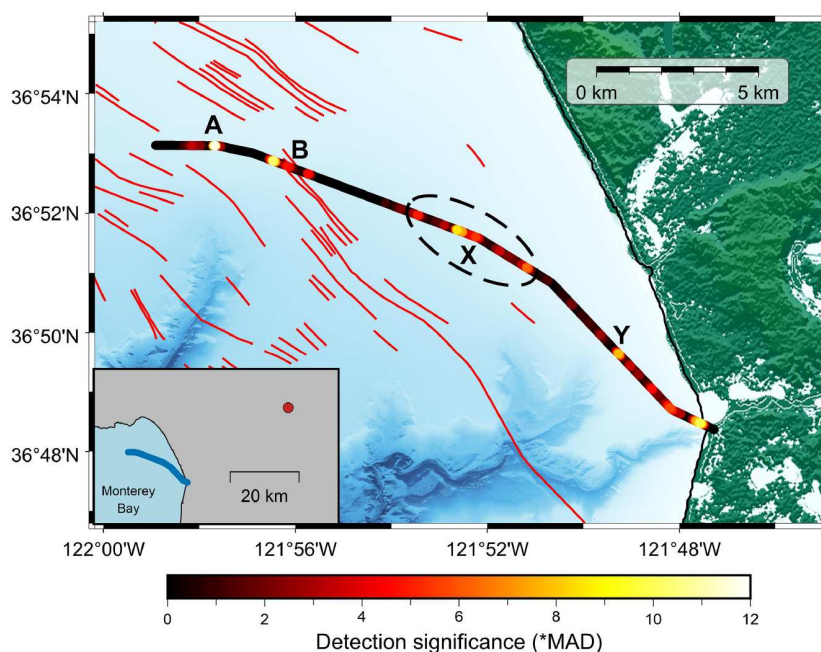


图5 (网络版彩色)Monterey Bay地区的断层探测结果。光纤阵列的颜色表示算法检出的散射强度显著度(*MAD)。红色线段是CSMP项目给出的断层。A是对应于已知断层的散射强度峰值, B是对应于已知断裂带的三个散射强度峰, X和Y是对应于未编目断层或古河道的几个连续散射强度峰。缩略图中的蓝色线段表示DAS阵列, 红色圆圈表示用于断层探测的地震, 大小表示其震级

Figure 5 (Color online) Fault detection in Monterey Bay with DAS. The color of the fiber arrays indicates the significance (*MAD) of the scattered intensity detected by the algorithm. The red lines represent faults identified by the CSMP. Peak A in scattering intensity corresponds to a known fault, while B indicates three scattering intensity peaks associated with a known fault zone. X and Y mark several continuous scattering intensity peaks that correspond to uncataloged faults or paleochannels. In the inset map, the blue line shows the DAS array, and the red circles represent the earthquakes used for fault detection, with circle size indicating its magnitude

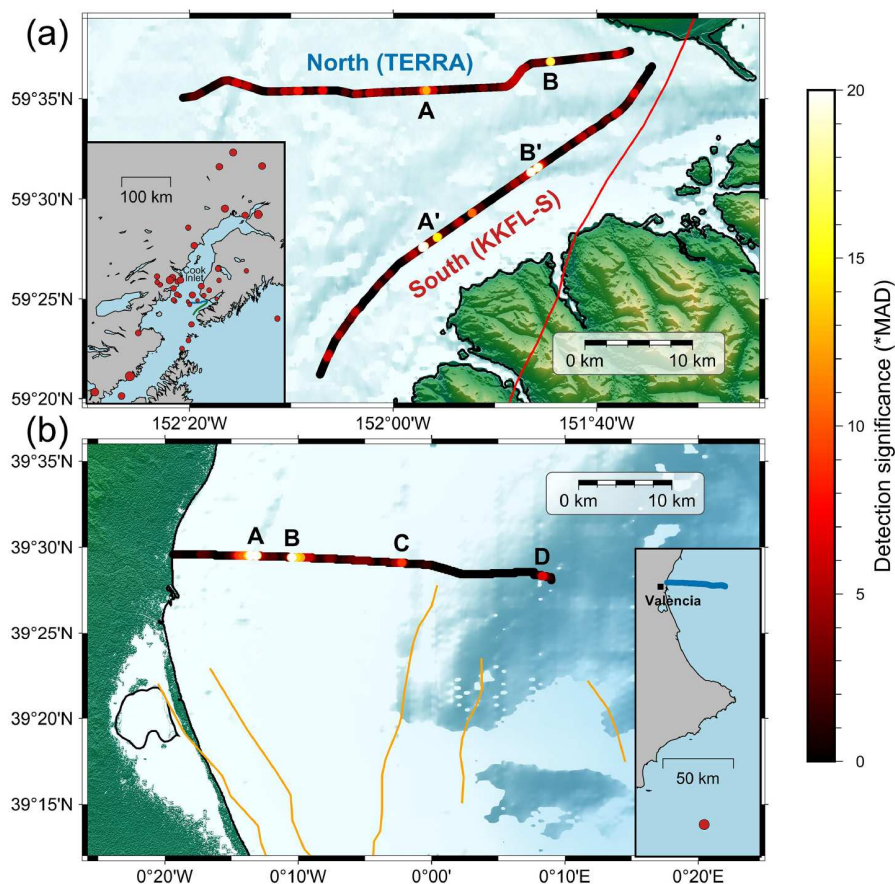


图 6 (网络版彩色)Cook Inlet和València地区的断层探测结果。(a) Cook Inlet地区DAS阵列的断层探测结果。光纤阵列的颜色表示算法检出的散射强度显著度(*MAD)。红色线段是USGS阿拉斯加断层位置报告中给出的Border Ranges断层, 其存在置信度为“确定”级, A、A'、B、B'是四个散射强度峰值, 可能对应了两条未知断层。缩略图中的蓝色线段表示DAS阵列, 红色圆圈表示用于断层探测的地震, 大小表示其震级。(b) València地区DAS阵列的断层探测结果。光纤阵列的颜色表示算法检出的散射强度显著度(*MAD)。橙色线段是QAFI断层库给出的证据强度为“近似”级的断层, A~D是四个散射强度峰值, 可能对应于未知的小型断层。缩略图中的蓝色线段表示DAS阵列, 红色圆圈表示用于断层探测的地震

Figure 6 (Color online) Fault detection in Cook Inlet and València with DAS. (a) Fault detection of the DAS array at Cook Inlet. The color of the fiber arrays indicates the significance (*MAD) of the scattered intensity detected by the algorithm. The red line indicates the Border Ranges fault from the USGS Alaska Fault Map, classified with ‘certain’ confidence level. Peaks A, A', B, B' in scattering intensity potentially correspond to two uncatalogued faults. In the inset map, the blue line represents the DAS array, and the red circles denote earthquakes used for fault detection, with circle sizes indicating magnitudes. (b) Fault detection of the DAS array in València. The color of the fiber arrays indicates the significance (*MAD) of the scattered intensity detected by the algorithm. The orange lines represent faults cataloged in the QAFI database with ‘approximate’ evidence level, where peaks A~D in scattering likely correspond to unmapped minor faults. In the inset map, the blue line represents the DAS array, and the red circles denote earthquakes used for fault detection

位置有强证据约束(图6)。由此可见, 基于本方法利用已有海底光缆进行断层探测, 可以低成本快速检测和约束断层位置。

3 讨论

3.1 基于DAS断层探测的潜力

在六个陆地和海洋区域的应用表明, 本方法获得

的断层位置和其他DAS研究得到的具有高度一致性(图2、Atterholt等人^[27]和Yang等人^[28], 图5、Lindsey等人^[21]和Cheng等人^[26]), 与地震勘探和地质调查得到的精确断层位置也总体对应(图2、图4和UGSG第四纪断层库; 图5和加州海底测绘计划)。且在完全相同的数据下, 本方法获得了比反投影方法^[27]更为显著的探测结果。使用不同地震学方法(图2、Atterholt等人^[27]和Yang等人^[28]; 图5和Cheng等人^[26])及本方法在不同类型的数

据上(图3)获得的结果证明, 识别到一些偏离已知断层位置的散射体位置(图2断层B、E; 图4断层A)是合理的, 可能是因为断层散射体的位置与断层出露地表处有偏差. 此外, 该方法还可以帮助发现一些隐伏断层和未探明的断层(图4(a), 断层X; 图5, 断裂带X; 图6(a), 断层A/A'、B/B'; 图6(b), 断层A~D).

对于地震活动性较低的地区, 仅1次(图4(a))或3次(图2(b))的地震记录, 背景噪声互相关图(图3(b), (c))和主动源记录(图3(d))都可有效用于本算法. 在不同区域和数据类型上的尝试验证了我们的方法具有出色的可移植性. 此外, 我们对所有地区的DAS都采取了相同的散射波波速度范围和传播距离参数, 都获得了较理想的探测结果, 也体现了其可移植性. 对每个地区分别调参也预计会获得更好的结果. 算法优秀的可移植性有利于将此框架应用于广泛的断层普查工作.

算法在20核2.80GHz英特尔酷睿i9-10900处理器的工作站上处理50个Ridgecrest DAS(图1和图2(a))地震波形(包括数据处理和散射波溯源), 共耗时452.05 s, 每个事件平均仅9.04 s, 显示出较高的计算效率. 相较于其他需要复杂数据处理和分析解释的地震学方法, 本方法具有较高可靠性、强可移植性和计算效率高的优势. 利用现有广泛存在的城市通讯光缆和海底光缆, 本方法可以实现大规模、低成本的断层调查; 在缺乏地震活动的地方, 也可以结合背景噪声互相关或主动源试验进行应用.

此外, 已有DAS断层散射波研究通过正演模拟、网格搜索断层参数等方法约束约束断层几何形态和速度结构^[24,27,28]. 后续有望将本方法获得的散射强度大小和空间变化与倾角等断层参数相关联, 以实现对断层参数的测定.

3.2 基于DAS断层探测的局限性

断层对地震波的散射响应受断层尺度与地震波长的关系控制, 当二者有着数量级的差异时, 散射会很弱甚至消失. 这可能是部分已知断层没有被算法探测到的原因(图4(a), 断层 α 、 β). 一个典型的例子是较宽的断层带可能更倾向于产生围陷波而不是散射波^[20]. 此外, 断层的几何形状、速度降、断层靠近光纤但没有相交的情况也会影响散射波场, 从而影响算法的结果.

非断层的小尺度结构(如城市地区建设中常见的河道等沉积结构)也可能产生散射, 干扰算法探测结果. 由于这些结构的速度异质性普遍弱于断层且形态与断层不同, 它们在地震波中的散射较弱、波形不完全呈“人”字形^[22], 因此本方法对这类结构测得的散射显著度也较弱. 综上, 可以基本确认本方法得到的强散射峰(*MAD ≥ 10)是断层结构; 而弱散射峰可能是小型断层或其他地质结构(图4(a), 地质结构X; 图5, 断裂带或古河道Y), 需要通过已知地质信息辅助进一步判断.

最后, 由于算法利用了散射波场的对称性, 本方法会受到光缆非线性的影响. 具体而言, 具有一定曲率的光缆可能导致低估散射强度; 而光缆有大角度拐点可能会导致单向传播的波产生“人”字形的波形, 从而导致误检测. 因此具有明显拐点的DAS阵列须从拐点处分隔为两段分别运行算法(图2).

4 总结与展望

我们开发了一种算法, 基于简单的假设和简便的数据处理溯源分布式光纤事件波形上的断层散射波, 从而快速探测和定位断层. 我们在分别利用陆地和海底的DAS, 在不同类型的事件数据(天然地震、背景噪声虚拟源和主动源)上证实了该方法的可靠性和可移植性. 结合DAS将光纤通信网络转换为地震传感器的低成本优势, 以及使该检测框架可用于大范围的断层勘测. 由于传统的地质调查在城市和海洋地区难以进行, 受益于我国丰富的城市和海底通信光缆资源以及近海风电等新型能源设施的快速发展, 这种基于通信光缆的快速断层探测方法预计在大型建筑和基础设施选址和设计以及近海地震灾害评估等领域具有广泛的前景. 该技术仍存在一些局限, 比如其他地质结构(如古河道、小尺度速度异常块体、显著的地形变化等)也可以产生散射波, 未来需要研究如何利用散射波特征来进一步分辨断层和其他结构. 此外, 硬件上, 通信光缆接入受限、DAS远距离监测能力有限等问题也可能限制技术的推广. 未来可能通过研发“通感一体”复用式DAS技术, 实现不影响通信传输的振动传感, 避免占用通讯资源; 通过升级优化激光光源和解调技术增强DAS长距离传感能力, 实现单次大范围断层探测, 提升探测效率.

致谢 本工作使用的公开数据来源: [https://data.caltech.edu/records/e1acg-e0k08\(Ridgecrest北\)](https://data.caltech.edu/records/e1acg-e0k08(Ridgecrest北))、<https://data.caltech.edu/records/>

t923s-4p068(Ridgecrest南)、<https://www.sciencebase.gov/catalog/item/62fd776fd34e3a444286cd54>(Arcata Bay)、<https://data.caltech.edu/records/n47vy-s0s65>(Long Valley)、[https://github.com/njlindsey/Photonic-seismology-in-Monterey-Bay-Dark-fiber1DAS-illuminates-offshore-faults-and-coastal-ocean\(Monterey Bay\)](https://github.com/njlindsey/Photonic-seismology-in-Monterey-Bay-Dark-fiber1DAS-illuminates-offshore-faults-and-coastal-ocean(Monterey Bay))、[https://dasway.ess.washington.edu/gci/index.html\(Cook Inlet\)](https://dasway.ess.washington.edu/gci/index.html(Cook Inlet))、[https://www.fdsn.org/networks/detail/ZH_2020/\(València\)](https://www.fdsn.org/networks/detail/ZH_2020/(València)); 使用的公开元数据: [https://data.caltech.edu/records/n47vy-s0s65\(Ridgecrest南, DAS坐标\)](https://data.caltech.edu/records/n47vy-s0s65(Ridgecrest南, DAS坐标))、[https://zenodo.org/records/11642688\(Cook Inlet, DAS坐标\)](https://zenodo.org/records/11642688(Cook Inlet, DAS坐标)); 使用的公开地理数据: [https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/faults\(USGS第四纪断层数据库\)](https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/faults(USGS第四纪断层数据库))、[https://www.cityofarcata.org/DocumentCenter/View/3551\(Arcata水体数据\)](https://www.cityofarcata.org/DocumentCenter/View/3551(Arcata水体数据))、[https://pubs.usgs.gov/ds/781/\(加州海底测绘计划\)](https://pubs.usgs.gov/ds/781/(加州海底测绘计划))、[https://pubs.usgs.gov/pp/1776/d/\(Cook Inlet构造数据\)](https://pubs.usgs.gov/pp/1776/d/(Cook Inlet构造数据))、[https://info.igme.es/qafi/\(伊比利亚第四纪活动断层数据库\)](https://info.igme.es/qafi/(伊比利亚第四纪活动断层数据库)); 使用的开源数据处理软件: [https://github.com/HMZ-03/DASPY\(DASPy^{\[32\]}\)](https://github.com/HMZ-03/DASPY(DASPy[32])), 包括等间距信道提取、数据去趋势、余弦尖灭、带通滤波、Z-score标准化、FK滤波)。感谢王巍(中国科学院地质与地球物理研究所)、韩雪菲(中国科学技术大学)和胡艳澜(斯坦福大学)对本工作给予的宝贵建议。

参考文献

- 1 Thakur P, Huang Y, Kaneko Y. Effects of low-velocity fault damage zones on long-term earthquake behaviors on mature strike-slip faults. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2020, 125: 1–20
- 2 Perrin C, Manighetti I, Ampuero J, et al. Location of largest earthquake slip and fast rupture controlled by along-strike change in fault structural maturity due to fault growth. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2016, 121: 3666–3685
- 3 Bilgin H. Effects of near-fault and far-fault ground motions on nonlinear dynamic response and seismic damage of masonry structures. *Eng Struct*, 2024, 300: 117200
- 4 Caine J S, Evans J P, Forster C B. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 1996, 24: 1025
- 5 Kurzon I, Vernon F L, Ben-Zion Y, et al. Ground motion prediction equations in the San Jacinto Fault Zone: significant effects of rupture directivity and fault zone amplification. *Pure Appl Geophys*, 2014, 171: 3045–3081
- 6 Spudich P, Olsen K B. Fault zone amplified waves as a possible seismic hazard along the Calaveras Fault in central California. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 2533–2536
- 7 Saribudak M, Ruder M, Van Nieuwenhuise B. Hockley fault revisited: more geophysical data and new evidence on the fault location, Houston, Texas. *Geophysics*, 2018, 83: B133–B142
- 8 Hale D. Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images. *Geophysics*, 2013, 78: O33–O43
- 9 Xiong W, Ji X, Ma Y, et al. Seismic fault detection with convolutional neural network. *Geophysics*, 2018, 83: O97–O103
- 10 Papaleo E, Cornwell D G, Rawlinson N. Seismic tomography of the North Anatolian fault: new insights into structural heterogeneity along a continental strike-slip fault. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 2186–2193
- 11 Tong P, Yang D, Huang X. Multiple-grid model parametrization for seismic tomography with application to the San Jacinto fault zone. *Geophys J Int*, 2019, 218: 200–223
- 12 Zigone D, Ben-Zion Y, Campillo M, et al. Seismic tomography of the southern California plate boundary region from noise-based Rayleigh and Love Waves. *Pure Appl Geophys*, 2015, 172: 1007–1032
- 13 Lindsey N J, Martin E R. Fiber-optic seismology. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2021, 49: 309–336
- 14 Zhan Z. Distributed acoustic sensing turns fiber-optic cables into sensitive seismic antennas. *Seismol Res Lett*, 2019, 91: 1–15
- 15 Cheng F. Photonic seismology: a new decade of distributed acoustic sensing in geophysics from 2012 to 2023. *Surv Geophys*, 2024, 45: 1205–1243
- 16 Li Z. Recent advances in earthquake monitoring I: ongoing revolution of seismic instrumentation. *Earthquake Sci*, 2021, 34: 177–188
- 17 Wang B, Zeng X, Song Z, et al. Seismic observation and subsurface imaging using an urban telecommunication optic-fiber cable (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 2590–2595 [王宝善, 曾祥方, 宋政宏, 等. 利用城市通信光缆进行地震观测和地下结构探测. 科学通报, 2021, 66: 2590–2595]
- 18 Ma K F, von Specht S, Kuo L W, et al. Broad-band strain amplification in an asymmetric fault zone observed from borehole optical fiber and core. *Commun Earth Environ*, 2024, 5: 402
- 19 Jousset P, Currenti G, Schwarz B, et al. Fibre optic distributed acoustic sensing of volcanic events. *Nat Commun*, 2022, 13: 1753
- 20 Jousset P, Reinsch T, Ryberg T, et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features. *Nat Commun*, 2018, 9: 2509
- 21 Lindsey N J, Dawe T C, Ajo-Franklin J B. Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing. *Science*,

- 2019, 366: 1103–1107
- 22 Spica Z J, Nishida K, Akuhara T, et al. Marine sediment characterized by ocean-bottom fiber-optic seismology. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2020GL088360
- 23 Li Z, Shen Z, Yang Y, et al. Rapid response to the 2019 ridgecrest earthquake with distributed acoustic sensing. *AGU Adv*, 2021, 2: e2021AV000395
- 24 Bao F, Zeng X, Lin R, et al. Detecting aftershocks of the M_s 6.9 Menyuan earthquake and mapping blind faults by a distributed acoustic sensing array with an existing fiber-optic cable (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 3340–3347 [包丰, 曾祥方, 林融冰, 等. 分布式光纤高密度地震观测揭示门源 M_s 6.9地震余震活动与隐伏断层. 科学通报, 2022, 67: 3340–3347]
- 25 Xiao H, Zhang S, Moss R, et al. Imaging underwater faults and tracking whales with optical fiber sensing. *Seismol Res Lett*, 2025, 96: 678–690
- 26 Cheng F, Chi B, Lindsey N J, et al. Utilizing distributed acoustic sensing and ocean bottom fiber optic cables for submarine structural characterization. *Sci Rep*, 2021, 11: 5613
- 27 Atterholt J, Zhan Z, Yang Y. Fault zone imaging with distributed acoustic sensing: body-to-surface wave scattering. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2022, 127: e2022JB025052
- 28 Yang Y, Zhan Z, Shen Z, et al. Fault zone imaging with distributed acoustic sensing: surface-to-surface wave scattering. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2022, 127: e2022JB024329
- 29 Bakku S K. Fracture Characterization from seismic measurements in a borehole. Doctoral Dissertation. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2015
- 30 Atterholt J, Zhan Z, Shen Z, et al. A unified wavefield-partitioning approach for distributed acoustic sensing. *Geophys J Int*, 2022, 228: 1410–1418
- 31 Hu M, Li Z. DASPy: a python toolbox for DAS seismology. *Seismol Res Lett*, 2024, 95: 3055–3066
- 32 Li J, Kim T, Lapusta N, et al. The break of earthquake asperities imaged by distributed acoustic sensing. *Nature*, 2023, 620: 800–806
- 33 Atterholt J, Zhan Z, Yang Y, et al. Imaging the Garlock fault zone with a fiber: a limited damage zone and hidden bimaterial contrast. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2024, 129: e2024JB028900
- 34 Qiu H, Chi B, Ben-Zion Y. Internal structure of the central Garlock fault zone from ridgecrest aftershocks recorded by dense linear seismic arrays. *Geophys Res Lett*, 2023, 50: e2022GL101761
- 35 Prejean S, Ellsworth W, Zoback M, et al. Fault structure and kinematics of the Long Valley Caldera region, California, revealed by high-accuracy earthquake hypocenters and focal mechanism stress inversions. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2002, 107: 1–9
- 36 Shelly D R, Ellsworth W L, Hill D P. Fluid-faulting evolution in high definition: connecting fault structure and frequency-magnitude variations during the 2014 Long Valley Caldera, California, earthquake swarm. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2016, 121: 1776–1795
- 37 Spica Z J, Ajo-Franklin J, Beroza G C, et al. PubDAS: a public distributed acoustic sensing datasets repository for geosciences. *Seismol Res Lett*, 2023, 94: 983–998

Summary for “基于分布式光纤振动传感的陆地和海底断层快速探测”

Rapid fault detection in terrestrial and submarine environments with fiber-optic sensing

Minzhe Hu¹ & Zefeng Li^{1,2*}

¹ State Key Laboratory of Precision Geodesy, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

² Mengcheng National Geophysical Observatory, University of Science and Technology of China, Mengcheng 233500, China

* Corresponding author, E-mail: zefengli@ustc.edu.cn

The spatial distribution of faults provides a critical basis for seismic hazard assessment, since the presence of faults directly reflects potential earthquake sources. Infrastructure and buildings located above or near active faults face heightened seismic risks, including severe structural damage from both static fault displacement and amplified ground shaking. Accurate and efficient fault detection is therefore an indispensable step for seismic hazard mitigation and for guiding civil engineering design. Conventional geological surveys, while effective, are often labor-intensive, time-consuming, and limited in urban or offshore environments. Seismic reflection imaging and tomography methods provide high-resolution subsurface characterization but are costly and difficult to implement at large scale. Consequently, there is a critical need for alternative approaches that are rapid, low-cost, and broadly applicable in both terrestrial and submarine settings.

In this study, we propose a general framework for rapid fault detection using distributed acoustic sensing (DAS) on existing fiber-optic communication networks. DAS technology transforms standard telecommunication cables into dense seismic arrays capable of recording ground motion with meter-scale spatial sampling. Its high sensitivity to scattered seismic waves from faults makes it uniquely suited for large-scale fault mapping. Building on this advantage, we design a scatter source localization algorithm that automatically identifies fault-related scattering by backtracking seismic energy. The method requires minimal assumptions and simple preprocessing, making it computationally efficient and highly portable across different datasets.

We tested this approach on six publicly available DAS arrays, including three on land (Ridgecrest, Arcata Bay, and Long Valley) and three offshore (Monterey Bay, Cook Inlet, and València). The combined length of these arrays exceeds 330 km, covering diverse tectonic and environmental settings. In Ridgecrest, California, the method successfully identified five fault segments intersecting the DAS arrays, consistent with the U.S. Geological Survey Quaternary Fault Database. At Arcata Bay and Long Valley, the algorithm detected both well-mapped faults and clusters of small faults, demonstrating its ability to resolve distributed fault networks. In Monterey Bay, the method identified not only cataloged submarine faults but also uncataloged fault zones, in agreement with earlier high-resolution marine geophysical studies. Applications in Cook Inlet and València further highlighted its potential to detect previously unmapped structures in regions where existing fault databases are sparse.

Beyond natural earthquakes, we also tested the framework using ambient noise correlograms and active source records. In the Ridgecrest region, the method yielded consistent results across three independent datasets—earthquake records, ambient noise correlations, and controlled active sources—confirming its robustness and versatility. Even with a small number of events, significant scattering anomalies corresponding to fault locations were reliably detected, underscoring the efficiency of the approach. The algorithm achieved high computational performance, requiring only seconds per event on a standard workstation, which makes it suitable for near-real-time or large-scale applications.

Overall, our results demonstrate that DAS-based scatter source localization enables accurate, rapid, and low-cost fault detection at an engineering scale. The method provides reliable constraints on fault positions across varied geological settings, including urban areas where surface investigations are restricted and submarine environments where conventional surveys are expensive or impractical. By leveraging existing fiber-optic communication infrastructure, this framework minimizes both economic and temporal costs while extending fault detection capabilities to regions that are otherwise inaccessible.

This study demonstrates the potential of DAS to complement and, in certain contexts, substitute traditional geophysical methods for seismic hazard assessment. With expanding urbanization and offshore infrastructure, DAS-based fault detection provides an efficient tool for fault mapping and site assessment, and is expected to play an important role in future large-scale fault surveys and infrastructure siting.

distributed acoustic sensing, fault detection, scatter waves, migration

doi: [10.1360/CSB-2025-0624](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0624)