

王伟涛、倪四道、王宝善 2011, 地球背景噪声干涉应用研究的新进展, 中国地震 27(1), 1~13。

· 综述 ·

## 地球背景噪声干涉应用研究的新进展

王伟涛<sup>1)</sup> 倪四道<sup>2)</sup> 王宝善<sup>1)</sup>

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京市海淀区民族大学南路 5 号 100081

2) 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077

**摘要** 对地震台记录到的长时间的地球背景噪声进行互相关处理, 得到的互相关函数可以近似地表征这两个台站之间的格林函数, 这种数据处理方法被称为背景噪声干涉。近年来, 背景噪声干涉研究在理论和实践上都有了长足进展, 并被广泛用于地下波速结构及其演化规律的研究。本文首先简单介绍了背景噪声干涉研究的概念和理论依据, 进而重点介绍了针对噪声源性质、互相关函数的波形到时和振幅特性的应用研究。通过对这三个方面研究的回顾, 分析总结了该研究领域的新进展及需要解决的问题, 并对背景噪声干涉研究的新特点进行了分析和展望。

**关键词:** 背景噪声 互相关 格林函数 地震成像

[文章编号] 1001-4683(2011)01-001-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

### 0 引言

现代地震仪可以连续记录地球震动, 这些记录中大部分是地球的背景噪声。在对天然地震事件进行研究时, 为了凸显地震信号, 要通过各种方式来祛除噪声, 这时背景噪声被视为一种无用的干扰信号。实际上, 背景噪声也能用于研究地下介质的性质。Aki 在 1957 年提出空间自相关方法 (Spatial Autocorrelation, SPAC), 指出通过合理布设台站, 可利用背景噪声对浅层介质进行研究 (Aki, 1957)。近年来, 研究人员发现, 通过对地震台记录到的长时间背景噪声进行互相关处理, 其互相关函数可以表征两个台站间的格林函数 (Shapiro et al, 2004)。这种方法也被称为地球背景噪声干涉 (Ambient Noise Interferometry) 方法, 同 SPAC 方法不同的是, 背景噪声干涉方法中台站的距离往往要大于几个波长, 而 SPAC 方法中台站间距在几个波长之内 (Yokoi et al 2008; Zhan et al 2010a; 李昱等 2010)。

背景噪声干涉实际上是一种特定的波场干涉现象。Weaver 和 Lobkis 通过实验研究和理论分析指出, 两个接收点记录到的漫布波场信号的互相关函数同这两点之间的格林函数

[收稿日期] 2011-03-01; [修定日期] 2011-03-10

[项目类别] 中国地震局地球物理研究所基本科研专项 (DQJB10A01, DQJB10B20, DQJB11C05) 和国家自然科学基金 (41004019, 40874095) 共同资助

[作者简介] 王伟涛, 男, 1979 年生, 理学博士, 中国地震局地球物理研究所助理研究员, 主要从事重复震源研究

仅有幅度上的差异(Weaver et al 2003; Lobkis et al 2001)。由于这种方法可以从杂乱的随机信号之中得到确定性信号(格林函数),因此在声学、海洋声学、日震学和地震学等多个领域得到广泛应用(Derode et al 2003; Roux et al 2004; Rickett et al 2000; Campillo et al 2003; Shapiro et al 2005; Sabra et al 2005)。在地震仪记录的信号中,背景噪声和地震尾波都可以被视为漫布的波场,故可用于干涉研究(Campillo and Paul 2003; Hennino 2001)。

室内实验和野外观测所发现的地震信号干涉现象,促使众多研究人员对其背后隐含的物理原理从多个角度进行研究(Lobkis and Weaver 2001; Derode et al 2003; Snieder 2004; Wapenaar 2004)。目前地震波场干涉方法主要存在模式均分理论、时间反转对称理论、单向波互易理论和稳相近似理论等几种解释(齐诚等 2007)。Wapenaar 等(2006)指出在任意非衰减介质中,都可以利用互相关计算来提取两点之间的格林函数。Snieder 等则进一步指出干涉方法不仅适用于波动现象,对其余以薛定谔方程、扩散和对流方程所描述的物理现象也成立(Snieder et al 2007)。

理论和实验研究的相互促进,使得地震波场干涉研究在近年来得以蓬勃发展。由于背景噪声的获得不受天然地震空间分布不均匀性和发震时间的影响,其处理仅需地震台的连续记录,因此,基于背景噪声的干涉研究广泛用于地震学研究。本文将介绍背景噪声干涉研究在应用方面的新进展,主要介绍对噪声源性质的研究以及基于噪声相关函数中信号的到时与振幅信息所进行的层析成像和时延监测等研究。此外,我们也分析了目前背景噪声干涉处理的新趋势并展望了其发展前景。

## 1 地球背景噪声源的性质及其对提取经验格林函数的影响

背景噪声干涉技术的重要优势是利用随机的背景噪声信号的互相关函数来表示两点之间的格林函数,因此噪声互相关函数对格林函数的近似程度十分关键。地球背景噪声的分布特征和演化规律是影响经验格林函数形态和精度的重要因素。

Peterson 等(1993)选取了分布在全球的 75 个地震台的数据,在去掉明显的仪器噪声、非典型噪声和地震事件之后,得出了每一个台站上的噪声功率谱密度曲线。用折线表示的该曲线簇的上下界被分别称为地球新高背景噪声模型(NHNM)和新低背景噪声模型(NLNM),如图 1 所示。从图 1 可看出,地球背景噪声在 5~10s 和 10~20s 之间存在两个明显的峰值,地震学家习惯将此周期范围内的背景噪声称之为地脉动(Microseism),并认为地脉动的产生同海浪与海岸的相互作用有关(Friedrich et al, 1998; Tanimoto, 2007)。周期 10~20s 的地脉动被称为第一类地脉动(Primary Microseism),该信号的周期同全球海浪的主要周期一致,一般认为是浅海海岸在海浪压力驱动下产生的(Hasselmann, 1963)。周期为 5~10s 的地脉动被称为第二类地脉动(Secondary Microseism),被认为是在近海岸两列方向相反、频率相同的第一类地脉动经过非线性耦合产生的(Longuet-Higgins, 1950),这两类地脉动的产生,都同海洋与陆地的相互作用有关。周期为 100s 以上的背景噪声,有研究人员称之为 Earth Hum(Nawa et al, 1998),认为是大气同地球相互作用引起的。也有研究人员认为,这个周期内的噪声源于海洋次重力波的驱使,是大气、海洋和海岸三者共同作用的结果(Tanimoto 2005; Rhie et al 2004, 2006)。也有很多研究人员对更为高频的噪声做了研究,有结果指出,频率高于 1Hz 的噪声更多显示出日变化和周变化,可能同人类活动有关

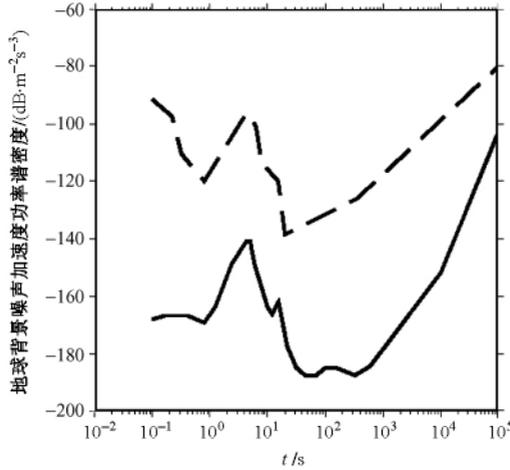


图 1 全球背景噪声模型加速度功率谱密度

实线表示新低背景噪声模型(NLNM),虚线表示新高背景噪声模型(NHNM)(Peterson,1993)

(Bonney-Claudet et al,2006)。而 Koper 等利用分布在全球的 18 个台阵研究了 0.24 ~ 2.50s 的噪声成分,发现 Lg 波是主要的噪声来源,同时噪声中也含有 Pn、Pg 等体波成分(Koper et al 2010)。Young 等(1996)也指出,在风力驱动下,可以产生 10 ~ 60Hz 的高频广谱噪声。

背景噪声的来源及能量的差异,会极大影响噪声相关函数的形态。Stehly 等首次基于噪声互相关函数对噪声源的性质进行分析(Stehly et al 2006)。他们指出,对任意两个地震台站记录到的背景噪声进行互相关处理,理论上得到的互相关函数中都有一正、一负两个分支,分别表示台站对路径上的因果和非因果信号。当台站两侧的噪声源分布均匀时,因果信号和非因果信号的到时一致,振幅相同,如图 2(a)所示。而当噪声源分布不均匀时,两个方向的信号到时相同,但振幅不同,在噪声源能量较强的一侧产生的信号振幅较大,如图 2(b)、(c)所示。利用因果和非因果信号幅度的差异,可以对“台站对”两侧的优势噪声方向

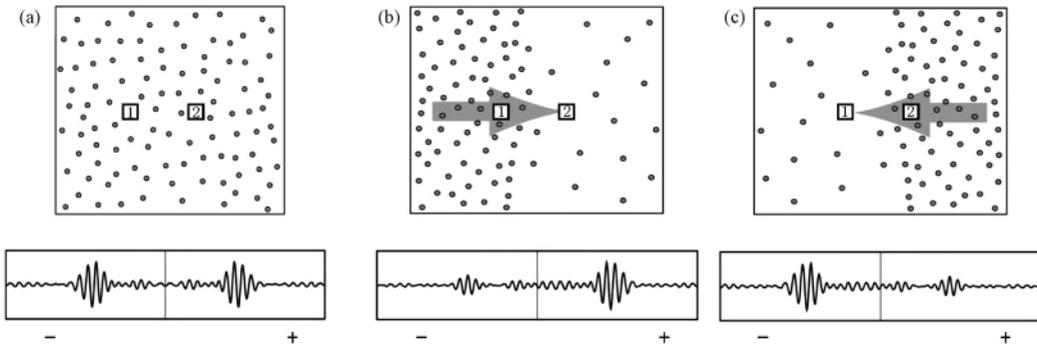


图 2 噪声源的分布对噪声互相关函数的影响示意图

1 和 2 表示台站,每个子图上部表示噪声源分布,下部表示对应的噪声互相关函数

(a) 噪声源均匀分布时,噪声互相关函数是对称的;(b)、(c) 噪声源分布不均匀时,噪声互相关函数两侧信号的到时一致,振幅不同(据 Stehly 等(2006)修改)

进行分析。基于这个原理, Stehly 等利用美国、欧洲和坦桑尼亚若干台站 1 年的数据对不同周期的噪声进行了分析, 发现 5 ~ 10s 的噪声源能量十分稳定, 并不随季节变化, 且其来源集中在海岸线附近。但 10 ~ 20s 的噪声则显示了明显的季节性变化, 并且其变化趋势同 20 ~ 40s 的噪声相似。他们据此认为 10 ~ 20s 的噪声可能并不来自于海岸线, 而是同更长周期面波一样, 起源于大洋深水区的海浪波动。Yang 和 Ritzwoller 选用了更多的台站资料用类似方法对噪声来源进行了研究后发现, 10 ~ 20s 以及 5 ~ 10s 的噪声优势方向都表现出了明显的季节性变化, 且都源自海岸线。10 ~ 20s 的噪声在部分地区有方向变化, 可能是地震波的传播和衰减引起的, 而不是因噪声源位置的不同引起的 (Yang et al 2008)。Pedersen 等利用台阵 FK 分析的方法研究了芬兰地区的噪声, 也认为地脉动频段内的噪声起源于海岸线 (Pedersen et al 2007)。

地震干涉的模式均分原理要求噪声源的分布是均匀且随机的, 而地球上真实的噪声源分布并非如此, 而是具有明显的方向性和季节性变化。为什么我们依然能够提取到有效的格林函数信息呢? Snieder 基于稳相近似理论指出, 对两点之间格林函数的提取影响最大的是位于两个台站连线两侧的稳相区域, 如图 3 (a) 中的灰色区域所示 (Snieder, 2004)。在这个稳相区域之外的噪声源, 对格林函数提取的贡献较小。同时, 地下介质的不均匀性和散射体的存在, 会导致噪声的散射现象, 而使其分布更为随机化。研究人员建议在背景噪声干涉研究中可以用 1 年或者更长时间的叠加来实现噪声的随机化, 消除噪声源季节变化的影响 (Yang et al 2008; 鲁来玉等 2009)。Bensen 等也指出, 可以对因果和非因果信号作叠加处理, 以等效噪声源的均匀分布。这样, 虽然损失了振幅信息, 但在一定程度上提高信号的信噪比 (Bensen 2007)。

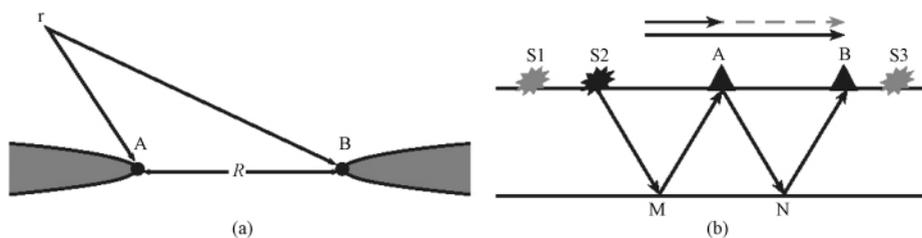


图 3 (a) 地震干涉的稳相近似理论示意图

其中 A 和 B 为台站, 间距为  $R$ ,  $r$  为任意一个噪声源, 灰色区域为稳相区域 (据 Snieder (2004) 修改)

(b) 基于稳相理论的体波震相提取示意图

其中 A 和 B 为接收台站,  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  代表地球表面噪声源, M 和 N 表示地下界面的反射点

然而, 在地球上还有一种特殊的噪声源, 可持续产生噪声, 其空间尺度较小且位置相对固定。Shapiro 等发现在非洲几内亚湾附近就有一个持续定域 (Persistent Localized) 的噪声源, 常年产生周期为 26s 的噪声 (Shapiro et al 2006)。此噪声源导致在噪声相关函数中产生了周期为 26s 的窄带信号, 该信号表现为面波形式, 能量很强且稳定。这类噪声源的位置固定, 其信号持续存在, 因此通过长时间的平均以及因果和非因果信号的叠加处理都不能将其消除。时间叠加效应会使其能量大大加强, 甚至高于台站对所在大圆路径的面波信号, 从而严重影响后续研究的可靠性。Gu 等在意大利南部和北部、Zeng 等在日本九州岛附近也发

现了类似的噪声源(Gu et al 2007; Zeng et al 2010)。这种持续定域噪声源的产生机制,可能同当地特殊的地势结构有关,也有可能同火山活动等非海洋因素有关。这种噪声源值得进一步研究。

Koper 等人的研究表明,背景噪声中有相当一部分能量以体波的形式存在(Koper et al, 2010),Zhang 等人的研究表明,海洋风暴引起的噪声中含有强烈的 P 波信号,甚至可以用于风暴轨迹的追踪(Zhang et al 2009、2010)。据地震干涉理论可从互相关函数中得到两点之间完整的格林函数,因此如何提取体波震相,是研究者十分关心的问题。Draganov 等(2007)利用沙漠中的噪声记录提取了折射 P 波并进行了成像研究,Roux 等(2005)从相距 2~10km 的台站对记录提取出远场 P 波信号,Wang 等(2010)从台间距为 50m 左右的小孔径台阵记录中提取了微弱的 P 波信号,Zhan 等(2010b)利用噪声互相关得到了 Moho 面的反射震相 SmS。

相比于被广泛研究的面波信号,噪声相关函数中体波信号的提取仅有寥寥几例。研究者认为可能有以下几个方面影响着体波震相的提取(Forghani et al 2010)。首先,相比面波成分而言,能够产生稳相体波信号的噪声源较少,其原理可用图 3(b)来描述。黑色三角 A 和 B 表示位于地表的两台站,根据稳相近似理论,对 AB 间格林函数的提取贡献最大的是能够产生稳相信号的源。对于面波格林函数而言,源 S1、S2 和 S3 均为稳相震源。而若要提取 AB 间的折射信号,则仅有 S2 可以视为稳相震源。再者,要从布设在地表的台站提取体波信号,需要分布在地表以下的噪声源(Wapenaar, 2004、2006),而实际上地球上绝大部分的噪声源都分布于地球表面。第三,相比噪声中面波,体波的信号更为微弱。体波的几何衰减较面波要快,其频率一般也高于面波,能量容易衰减。同时,稳相相位的体波信号的振幅受界面的反射系数影响也较大。以图 3(b)为例,假设地表反射系数为  $K$ ,则稳相震源 A 到达接收台站 A 和 B 的体波振幅分别正比于  $K$  和  $K^2$ ,互相关之后,其能量会因反射衰减  $K^3$  倍。原本就微弱的体波信号变得更弱。在已有的成功提取体波信号的研究中,往往需要较近的台站间距以减少衰减(Roux et al 2005; Wang et al 2010),或者地下具有较多的散射体来提供深部噪声源(Roux et al 2005),或者选择能量较强振幅较大并由强反射界面反射的震相进行研究(Zhan et al 2010b)。但体波震相中携带有深部信息,如何有效地从噪声中提取体波信息并加以研究,对拓展背景噪声干涉的研究领域具有重要意义。

## 2 基于噪声经验格林函数中信号到时的波速成像和监测研究

目前,绝大多数背景噪声干涉得到的信号都是 5~100s 的面波格林函数,利用这些面波格林函数,结合传统的面波层析成像技术,可以对地壳和上地幔的速度结构进行研究,相关的研究往往被称为背景噪声层析成像(Ambient Noise Tomography)。相对于传统的面波层析成像,基于背景噪声的层析成像有较多优点。首先,背景噪声层析成像克服了传统面波层析成像对地震事件的依赖,理论上任意两个台站之间都可以得到面波格林函数。这使得我们可以在一些地震活动性较低的区域进行层析成像研究,同时射线路径覆盖也较传统面波层析成像好。再者,两个台站的位置都是已知的,可以消除由于地震定位差异可能造成的走时误差。第三,利用背景噪声可以得到周期较短(小于 20s)的面波信号,因此更易获得高精度的层析图像。同时,噪声格林函数中的面波信号相对简单,干扰信号少,更易进行精确

的频散曲线测量。

自研究者利用背景噪声干涉对美国加州地区进行了高精度的面波层析成像之后 (Shapiro et al 2005; Sabra et al 2005), 噪声成像方法得到了广泛应用。其研究范围涵盖小尺度、区域尺度和大陆尺度, 甚至到全球尺度。研究者利用干涉提取出的面波信号对研究区域进行群速度成像、相速度成像, 进而得到该地区的 S 波速度结构乃至进行各向异性研究。所用的面波形式涵盖瑞利面波和勒夫面波 (Fang et al 2010; Zheng et al 2010; Li et al 2009; Lin et al 2007; Bensen et al 2008; Yao et al 2008; Zheng et al 2008; Liang et al 2007; Nishida et al 2009; Yang et al 2007; Lin et al 2008; Huang et al 2010; 房立华等 2009)。

噪声成像方法也有其局限性。利用噪声干涉提取高信噪比的长周期面波需要较大台间距和长时间数据叠加。虽然 Nishida 等 (2009) 指出利用噪声干涉可以提取 100 ~ 400s 的面波信号进行全球范围内的面波成像, 但类似研究并不多, 噪声成像主要集中于对地壳和上地幔速度结构的探测。Baig 等提出用 S 变换的方式, 提高干涉信号的信噪比, 以获取有效长周期面波信号 (Stockwell 2007; Baig et al 2009)。如何有效获取和利用噪声干涉中的长周期面波信号, 是值得深入研究的重要问题。

由于地震台的位置是固定的, 在不同时段内提取到的两个台站之间的噪声格林函数组成一组虚拟重复震源 (Poupinet et al 2008)。噪声格林函数中不仅含有沿大圆路径传播的直达面波, 而且含有经过散射的尾波 (Stehly et al 2008)。尾波在介质中的传播路径较长, 可用于检测介质波速的微小变化 (Gret et al 2006; Wang et al 2008)。这使我们可用噪声干涉得到的格林函数监测地下介质的波速变化。基于背景噪声的波速变化测量初期主要应用于火山活动区域。Sens-Schonfelder 等 (2006) 利用背景噪声分析了印度尼西亚 Merapi 火山地区的波速变化, 发现介质波速呈明显的季节性变化, 监测精度达 1%。Breguier 等发现在法国 Piton 火山喷发之前几周, 面波波速有 0.05% 的降低 (Breguier 2008a)。之后, 背景噪声干涉被用于监测与地震相关的波速变化。Breguier 等利用 Parkfield 地区 2002 ~ 2007 年的噪声记录, 分析了该地区长期的波速变化, 发现在 2003 年 San Simeon 和 2004 年 Parkfield 地震之后, 波速有 0.1% 的同震降低。且随着时间的推移, 波速有逐渐升高的趋势, 显示了断层的愈合过程 (Breguier et al 2008b)。Wegler 等 (2009) 对 2004 年日本 Niigata  $M_w$  6.6 地震进行了研究, 发现在 0.1 ~ 0.5 Hz 和 2 ~ 8 Hz 两个频段上, 震后波速明显降低。刘志坤等 (2010) 也发现 2008 年汶川地震之后, 震源区波速降低, 最大降幅达 0.4%。以上研究都是基于单个和多个台站路径进行的波速测量, Cheng 等利用龙门山断裂带周边的台站在 2008 年汶川地震前后各 50 天的记录, 获得了多条路径上的走时变化并进行了时延成像研究。研究表明, 在汶川地震同震效应作用下, 沿断裂带的区域内波速最大降低了 0.4% (Cheng et al 2010)。

对波速变化的时延监测, 一般通过对比直达面波或者后续尾波的波形进行。根据其测量手段的不同, 可以分为波形互相关和波形延展两种。波形互相关是测量走时变化的经典方法 (Poupinet et al 2008), 选择有效测量窗口, 计算两组波形的相关系数, 以获得最大相关系数对应的实验延迟  $\delta t$ , 如图 4(a) 所示。对不同窗口对应的  $\delta t$  进行测量, 可以得到  $\delta t$  同走时  $t$  的比值, 表征地下介质波速的相对变化, 即:

$$\frac{\delta V}{V} = -\frac{\delta t}{t} \quad (1)$$

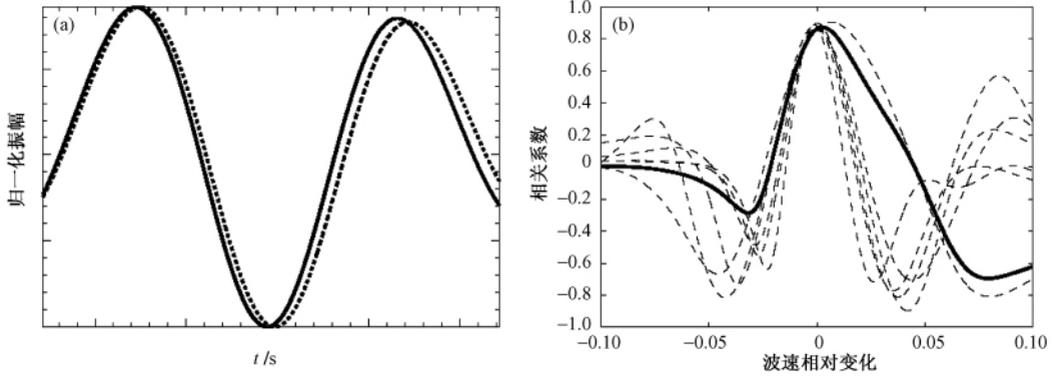


图 4 时延测量方法示意图

(a) 波形互相关方法 实线和虚线分别表示两组参与测量的有效波形信号；(b) 波形延展方法

横轴表示波速相对变化率 纵轴表示相关系数 实线表示参考波形 虚线表示不同程度的延展波形

波形延展方法是新发展的一种直接测量波速相对变化的方法 (Sens-Schonfelder et al 2006; Hadziioannou et al 2009)。假设路径上波速的相对变化是均匀的, 相对变化率为  $\varepsilon$ , 测量使用的基准波形为  $f_{ref}(t)$ , 待测波形为  $f(t)$ 。则通过对待测波形  $f(t)$  做时间域的时间延展变换, 可以得到一个延展变化波形  $f_\varepsilon(t)$

$$f_\varepsilon(t) = f(t[1 - \varepsilon]) \quad (2)$$

改变  $\varepsilon$  的取值, 将得到一系列  $f_\varepsilon(t)$ 。选择合适的窗口, 计算每一个  $f_\varepsilon(t)$  同基准波形  $f_{ref}(t)$  的相关系数  $CC(\varepsilon)$ , 则

$$CC(\varepsilon) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} f_\varepsilon(t) f_{ref}(t) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} f_\varepsilon^2(t) f_{ref}^2(t) dt}} \quad (3)$$

$CC(\varepsilon)$  最大值所对应的  $\varepsilon$ , 即测量得到的波速相对变化。通过对不同窗口测量得到的  $\varepsilon$  进行分析, 可以对测量精度和误差进行估计。

虽然基于背景噪声的波速变化监测得到了部分应用, 但用其对与地震相关的波速变化, 尤其是震前的波速变化进行监测, 依然是具有挑战性的工作。首先, 同孕震过程相关的波速变化十分微小, 监测难度很高。再者, 噪音格林函数本身会受到噪声源性质的影响。如何消除噪声源变化的干扰, 获得可靠的地下介质波速变化信息, 需要进行更多研究。同时背景噪声干涉研究往往需要长时间的叠加, 其时间分辨能力有限。虽然有研究人员指出可以用 S 变换的方法提高其时间分辨率 (Baig et al 2009), 但其可靠性和有效性, 尚需待更多的研究进行检验。

### 3 基于噪声经验格林函数中信号的振幅研究介质衰减特性

在 2001 年进行的超声实验研究中, Lobkis 等通过互相关处理不仅获取了信号的走时,

也得到了不同信号的振幅 (Lobkis et al 2001)。然而,在背景噪声干涉研究中,对经验格林函数振幅特性的研究远少于对信号走时的研究。理论研究表明,在三维介质中, a、b 两点之间的互相关函数和格林函数在频域中有如下正比关系 (Snieder 2004; Sanchez-Sesma et al, 2006)。

$$i\omega C_{ab}(\varepsilon) \propto |S_a(\omega)|^2 G_{ab}(\omega) \quad (4)$$

其中  $C_{ab}$  和  $G_{ab}$  分别为两点之间的互相关函数和格林函数,  $S_a$  为 a 点的噪声频谱密度。据 (4) 式可知, 两点之间的格林函数同噪声源的频谱密度有关。在噪声干涉处理中, 为压制地震信号, 往往引入 Onebit 和频谱白化等非线性处理, 这些处理将影响参与互相关计算的信号振幅, 从而干扰对噪音干涉信号振幅衰减特性的研究。

然而, 在一些特定情况下, 依然可以得到经验格林函数信号幅度的变化规律。Cupillard 等利用数值模拟的方法研究了不同的噪声源分布和数据处理方法得到的噪声格林函数中信号振幅的衰减特性。(Cupillard et al 2010)。他们首先利用数值模拟在不同台站上得到噪声记录, 之后以某一台站作为源台, 计算它同其余台站之间的噪声互相关函数  $C_{ab}$ , 并对其进行源台的频谱校正以获得台站之间的格林函数  $G_{ab}$ 。通过对格林函数面波信号振幅变化的分析, 发现当噪声源均匀分布时, 利用原始噪声数据、Onebit 处理数据以及频谱白化处理后得到的格林函数中面波信号的衰减都同理论衰减关系相吻合。当源分布不均匀时, 基于原始数据得到的格林函数经过几何衰减校正后, 其振幅变化仍能反映介质的弹性衰减。而此时, 基于 Onebit 和频谱白化处理后的数据得到的格林函数中面波信号的振幅变化则无明显规律。

数值模拟实验表明, 源的分布及数据处理方法会对利用噪声得到的格林函数中信号振幅衰减关系产生影响。实验研究也得到了类似结论。Larose 等利用气体冲击圆盘得到的噪声对噪声格林函数的振幅衰减进行了研究, 发现基于原始数据相关得到的衰减关系同主动源模拟得到的衰减关系相同, 而对原始数据进行频谱白化之后, 则无法得到可信的衰减规律 (Larose et al 2007)。Gouedard 等利用一个极为密集的台阵, 记录了伪随机震源产生的信号, 并通过互相关干涉处理来研究源的分布对得到的信号振幅衰减规律的影响。他们使用原始数据进行互相关, 得到直达面波及后续尾波的干涉信号。发现当信号源均匀分布时, 干涉得到的直达面波的振幅变化符合面波的几何衰减规律。当只使用稳相区域内的信号源时, 观测不到干涉信号中直达面波的几何衰减关系。而通过干涉得到的尾波振幅变化特征则不受信号源分布的影响, 在多重散射作用下, 利用不同分布的源均可以得到较好的几何衰减关系 (Gouedard et al 2008)。

噪声干涉得到信号的振幅衰减特性也在实际研究中得到了部分应用。Prieto 等计算了美国加州若干地震台站间的噪声互相关函数, 用临海的 1 个台站的噪声频谱对互相关函数进行源区校正以得到格林函数并用于地面震动模拟研究。研究结果表明, 通过噪音得到的地面震动模拟同真实的地震波形吻合较好, 并可明显识别出沉积盆地的场地放大效应 (Prieto et al 2008)。在进一步的工作中, Prieto 等用类似的方法对美国加州地区的  $Q$  值分布进行了研究, 其结果同以往基于天然地震的研究相符, 并且可以获得短周期面波的衰减特征 (Prieto et al 2009)。

噪声格林函数中信号幅度的变化在地震学研究中也具有潜在的应用价值, 随着对噪音

来源的深入研究及对数据处理方法的改进,将会从噪声相关函数中挖掘更多有价值的信息。

## 4 讨论和展望

背景噪声干涉方法获取数据容易,数据处理相对简便,已被用于诸多方面。除上述研究之外,噪声干涉方法也被用于台阵钟差检测、速度模型评估和建筑物响应检测等 (Stehly et al 2007; Ma et al 2008; Prieto et al 2010)。由于背景噪声干涉得到的是真实介质的格林函数,因此可用于修正简单的波速模型,从而对地震事件进行准确的定位研究 (Barmin et al, 2011)。随着地震台站密度的增加,利用背景噪声干涉获得面波格林函数库,进而对中强地震进行准确定位,这将是背景噪声干涉研究的重要应用。

随着噪声干涉理论研究的深入以及对噪声源的研究,人们可以提高噪声格林函数的可靠性。对噪声格林函数中多种信息的研究,也使将其应用于更多领域成为可能。

经过多年的发展,噪声干涉研究的处理流程逐渐显示出海量数据和密集计算的特点。首先,地震监测台网的发展,使得可用于噪声干涉研究的台站数目逐渐增加。目前,中国境内共有 1000 余个地震台,以后还会逐渐增加。同时,随着流动观测能力的提高,在特定地区布设密集的流动台站进行长时间观测的实验研究也越来越多。第二,对噪声源特性的研究,需要较大范围的台站。由于噪声干涉研究中往往要进行累加处理,不仅近场噪声会起作用,远场噪声也在累加作用下影响格林函数的提取。要详细精确地研究噪声源的特征,则需要联合较大范围内的台站来进行处理。第三,随着研究的深入,高频噪声逐渐引起关注。这是因为高频噪声中可能存在较多的体波成分,提取体波信号有利于获取更丰富的信息。同时,频率较高、周期较短的面波可以较好地反映浅层介质的信息,这对于基于噪声的波速变化监测尤为重要。要想获得深部介质的精确变化状态,必须了解和祛除浅层结构的影响。要对海量数据进行密集计算,完善的处理流程设计以及计算能力的提高都显得尤为必要。

背景噪声干涉可以将看似杂乱无章的噪声信号转换为具有物理意义的确定信号,这是近年来地震学研究的重要进展。深入挖掘噪声干涉处理所获得信号中包含的介质信息,将背景噪声干涉用于更多领域,需要更多研究人员进行深入探索。

致谢:感谢中国地震局监测预报司对本研究给予的大力支持。

## 参考文献

- 房立华、吴建平、吕作勇, 2009, 华北地区基于噪声的瑞利面波群速度层析成像, *地球物理学报*, **52**(3), 663 ~ 671。
- 李昱、姚华建、刘启元等, 2010, 川西地区台阵环境噪声瑞利波相速度层析成像, *地球物理学报*, **53**(4), 842 ~ 852。
- 刘志坤、黄金莉, 2010, 利用背景噪声互相关研究汶川地震震源区地震波波速变化, *地球物理学报*, **53**(4), 853 ~ 863。
- 鲁来玉、何正勤、丁志峰等, 2009, 华北科学探测台阵背景噪声特征分析, *地球物理学报*, **52**(10), 2566 ~ 2572。
- 齐诚、陈棋福、陈颢, 2007, 利用背景噪声进行地震成像的新方法, *地球物理学进展*, **22**(3), 771 ~ 777。
- Aki K, 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors, *Bull Earthq Res Inst*, **35**, 415 ~ 456。
- Baig A M, Campillo M and Brenguier F, 2009, Denoising seismic noise cross correlations, *J Geophys Res*, **114**, B08310, doi: 10.1029/2008JB006085。
- Barmin M P, Levshin A L, Yang Y and Ritzwoller M H, 2011, Epicentral location based on Rayleigh wave empirical Green's functions from ambient seismic noise, *Geophys J Int*, **184**(2), 869 ~ 884。

- Bensen G D , Ritzwoller M H and Shapiro N M , 2008 , Broadband ambient noise surface wave tomography across the United States , *J Geophys Res* , **113** , no. B05306 , doi 10. 1029/2007JB005248.
- Bensen G D , Ritzwoller M H , Barmin M P et al , 2007 , Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements , *Geophys J Int* , **169** , 1239 ~ 1260.
- Bonnefoy-Claudet S , Cotton F and Bard P Y 2006 , The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review , *Earth Sci Rev* , **79** , 205 ~ 227.
- Brenguier F , Campillo M , Hadziioannou C et al , 2008a , Postseismic relaxation along the San Andreas Fault at Parkfield from continuous seismological observations , *Science* **321** , 1478 ~ 1481.
- Brenguier F , Shapiro N M , Campillo M , Ferrazzini V et al , 2008b , Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise , *Nat Geosci* , **1** , 126 ~ 130.
- Campillo M and Paul A , 2003 , Long-range correlations in the diffuse seismic coda , *Science* , **299** , 547 ~ 549.
- Cheng X , Niu F , Wang B , 2010 , Coseismic velocity change in the rupture zone of the 2008  $M_w$ 7.9 Wenchuan earthquake observed from ambient seismic noise , *Bull Seismol Soc Am* , **100** (5B) , 2539 ~ 2550.
- Cupillard P and Capdeville Y , 2010 , On the amplitude of surface waves obtained by noise correlation and the capability to recover the attenuation: a numerical approach , *Geophys J Int* , **181** (3) , 1687 ~ 1700.
- Curtis A , Gerstoft P , Sato H , et al , 2006 , Seismic interferometry—turning noise into signal , *Leading Edge* , **25** , 1082 ~ 1092.
- Derode A , Larose E , Tanter M , et al , 2003 , Recovering the Green's function from field-field correlations in an open scattering medium (L) , *J Acoust Soc Am* , **113** , 2973 ~ 2976.
- Draganov D , Wapenaar K , Mulder W , et al 2007 , Retrieval of reflections from seismic background-noise measurements , *Geophys Res Lett* , **34** (4) .
- Fang L H , Wu J P , Ding Z F , et al , 2010 , High resolution Rayleigh wave group velocity tomography in North China from ambient seismic noise , *Geophys J Int* **181** , 1171 ~ 1182.
- Forghani F and R Snieder , 2010 , Underestimation of body waves and feasibility of surface-wave reconstruction by seismic interferometry , *The Leading Edge* , **29** , 790 ~ 794.
- Friedrich A , Kruger F and Klinge K , 1998 , Ocean-generated microseismic noise located with the Grafenberg array , *J Seismol* , **2** , 47 ~ 64.
- Gouedard P , Roux P , Campillo M et al , 2008 , Convergence of the two-points correlation function toward the Green's function in the context of a prospecting dataset , *Geophysics* , **73** (6) , V47 ~ V53.
- Gret A A , Snieder R , and Scales J , 2006 , Time-lapse monitoring of rock properties with coda wave interferometry , *J Geophys Res* , **111** , B03305 , doi:10. 1029/2004JB003354.
- Gu Y J , Dublanko C , Lerner L A , et al , 2007 , Probing the source of ambient seismic noise near the coasts of southern Italy , *Geophys Res Lett* , **34** , L22315 , doi:10. 1029/2007GL031967.
- Hadziioannou C , Larose E , Coutant O et al , 2009 , Stability of Monitoring Weak Changes in Multiply Scattering Media with Ambient Noise Correlation:Laboratory Experiments , *J Acoust Soc Am* , **125** (6) , 3688 ~ 3695.
- Hasselmann K A , 1963 , A statistical analysis of the generation of microseisms , *Rev Geophys* , **1** , 177 ~ 209.
- Hennino R , Tregoures N , Shapiro N M et al 2001 , Observation of equipartition of seismic waves , *Phys Rev Lett* , **86** , 3447 ~ 3450.
- Huang H , Yao H and Hilst R D van der , 2010 , Radial anisotropy in the crust of SE Tibet and SW China from ambient noise interferometry , *Geophys Res Lett* , **37** , L21310 , doi:10. 1029/2010GL044981.
- Koper K D , Seats K and Benz H , 2010 , On the composition of Earth's short-period seismic noise field. *Bull Seismol Soc Am* , **100** , 606 ~ 617.
- Larose E , Roux P and Campillo M , 2007 , Reconstruction of Rayleigh-Lamb dispersion spectrum based on noise obtained from an air-jet forcing , *J Acoust Soc Am* , **122** (6) , 3437 ~ 3444.
- Li H , Su W , Wang C Y et al , 2009 , Ambient noise Rayleigh wave tomography in western Sichuan and eastern Tibet , *Earth Planet Sci Lett* , **282** , 201 ~ 211.

- Liang C , and Langston C A 2007 , Ambient seismic noise tomography and structure of eastern North America , *J Geophys Res* , **113** , no. B03309 , doi 10. 1029/2007JB005350.
- Lin F C , Ritzwoller M H , Townend J et al , 2007 , Ambient noise Rayleigh wave tomography of New Zealand , *Geophys J Int* , **170** , 649 ~ 666.
- Lin F C , Moschetti M P and Ritzwoller M H 2008 , Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh and Love wave phase velocity maps , *Geophys J Int* , **173** , 281 ~ 298.
- Lobkis O I and Weaver R L , 2001 , On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field , *J Acoust Soc Am* , **110** , 3011 ~ 3017.
- Longuet-Higgins M S , 1950 , A theory of the origin of microseisms , *Philos Trans R Soc London , Ser A* , **243** , 1 ~ 35.
- Ma S , Prieto G A and Beroza G C , 2008 , Testing community velocity models for southern California using the ambient seismic field , *Bull Seismol Soc Am* , **98** (6) , 2694 ~ 2714.
- Nawa K , Suda N , Fukao Y et al , 1998 , Incessant excitation of the Earth's free oscillations , *Earth Planets Space* , **50** , 3 ~ 8.
- Nishida K , Montagner J and Kawakatsu H , 2009 , Global surface wave tomography using seismic hum , *Science* , **326** , 112 ~ 112.
- Pedersen H , Kruger F and the SVEKALAPKO Seismic Tomography Working Group , 2007 , Influence of the seismic noise characteristics on noise correlations in the Baltic Shield , *Geophysical Journal International* , **168** , 197 ~ 210.
- Peterson J , 1993 , Observation and Modelling of background Seismic Noise , Open File Report 93-322 , U. S.
- Poupinet G , Got J L and Brenguier F , 2008 , Monitoring temporal variations of physical properties in the crust by cross-correlating the waveforms of seismic doublets , in "Advances in Geophysics" , Elsevier , doi:10. 1016/S0065-2687(08)00014-9.
- Prieto G A and Beroza G C 2008 , Earthquake ground motion prediction using the ambient seismic field , *Geophys Res Lett* , **35** , L14304 , doi 10. 1029/2008GL034428.
- Prieto G A , Lawrence J F and Beroza G C , 2009 , Anelastic earth structure from the coherency of the ambient seismic field , *J Geophys Res* , **114** , B07303 , doi 10. 1029/2008JB006067.
- Prieto G A , Lawrence J F et al , 2010 , Impulse Response of Civil Structures from Ambient Noise Analysis , *Bull Seismol Soc Am* , **100** , 2322 ~ 2328.
- Rhie J and Romanowicz B , 2006 , A study of the relation between ocean storms and the Earth's hum , *Geochem Geophys Geosyst* , **7** , Q10004 , doi:10. 1029/2006GC001274.
- Rhie J and Romanowicz B , 2004 , Excitation of Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor , *Nature* , **431** , 552 ~ 556.
- Rickett J E and Claerbaut J F , 2000 , Calculation of the Sun's impulse response by multi-dimensional spectral factorization , *Sol Phys* , **192** , 203 ~ 210.
- Roux P , Sabra K G , Gerstoft P et al , 2005 , P-waves from cross-correlation of seismic noise , *Geophys Res Lett* , **32** ( 19 ) , L19303 , doi:10. 1029/2005GL023803.
- Roux P , Kuperman W A and the NPAL Group , 2004 , Extracting coherent wavefronts from acoustic ambient noise in the ocean , *J Acoust Soc Am* , **116** , 1995 ~ 2003.
- Sabra K G , Gerstoft P , Roux P et al 2005 , Surfacewave tomography from microseism in southern California , *Geophys Res Lett* , **32** , L14311 , doi:10. 1029/2005GL023155.
- Sanchez-Sesma F J and Campillo M , 2006 , Retrieval of the Green's function from cross-correlation: the canonical elastic problem , *Bull Seism Soc Am* , **96** , 1182 ~ 1191.
- Sens-Schönfelder C and Wegler U , 2006 , Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi volcano , Indonesia , *Geophys Res Lett* , **33** , L21302.
- Shapiro N M and Campillo M , 2004 , Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise , *Geophys Res Lett* , **31** , L07614 , doi:10. 1029/2004GL019491.
- Shapiro N M , Ritzwoller M H and Bensen G D 2006 , Source location of the 26 sec microseism from cross correlations of ambient seismic noise , *Geophys Res Lett* , **33** , L18310 , doi:10. 1029/2006GL027010.
- Shapiro N M , Campillo M , Stehly L et al , 2005 , High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise , *Science* ,

- 307 , 1615 ~ 1618.
- Snieder R , Wapenaar K and Wegler U , 2007 , Unified Green's function retrieval by crosscorrelation; connection with energy principles , *Phys Rev E* , **75** , 036103.
- Snieder R , 2004 , Extracting the green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase , *Phys Rev E* , **69**.
- Stehly L , Campillo M and Shapiro N M , 2006 , A study of the seismic noise from its long-range correlation properties , *J Geophys Res* , **111** , B10306.
- Stehly L , Campillo M and Shapiro N M , 2007 , Travel time measurements from noise correlation: Stability and detection of instrumental errors , *Geophys J Int* , **171** , 223 ~ 230.
- Stehly L , M Campillo , Froment B et al , 2008 , Reconstructing Green's function by correlation of the coda of the correlation (C3) of ambient seismic noise , *J Geophys Res* , **113** , B11306 , doi:10. 1029/2008JB005693.
- Stockwell R , 2007 , A basis for efficient representation of the S-transform , *Digital Signal Processing* , **17** (1) , 371 ~ 393.
- Tanimoto T , 2005 , The oceanic excitation hypothesis for the continuous oscillations of the Earth , *Geophys J Int* , **160** , 276 ~ 288.
- Tanimoto T , 2007 , Excitation of microseisms , *Geophys Res Lett* , **34** , L05308 , doi:10. 1029/2006GL029046.
- Wang B , Zhu P , Chen Y et al 2008 , Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry , *J Geophys Res* , **113** , B12313 , doi:10. 1029/2007JB005023.
- Wang W , Ni S and Wang B , 2010 , Composition of high frequency ambient noise from cross-correlation: A case study using a small aperture array , *Earthquake Science* , **23** , 433 ~ 438.
- Wapenaar K , 2004 , Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by crosscorrelation , *Physical Review Letters* , **93** , 254301.
- Wapenaar K , 2006 , Green's function retrieval by cross-correlation in case of one-sided illumination , *Geophys Res Lett* , **33** (19) , L19304 , doi:10. 1029/2006GL027747.
- Wapenaar K , Slob E and Snieder R , 2006 , Unified Green's function retrieval by cross correlation , *Physical Review Letters* , **97** , 234301-1 ~ 234301-4.
- Weaver R L and Lobkis O I 2003 , Elastic wave thermal fluctuations , ultrasonic waveforms by correlation of thermal photons , *J Acoust Soc Am* , **113** , 2611 ~ 2621.
- Wegler U , Nakahara H , Sens-Schoenfelder C et al 2009 , Sudden drop of seismic velocity after the 2004  $M_w$  6.6 mid-Niigata earthquake , Japan , observed with Passive Image Interferometry , *J Geophys Res* , **114** , B06305 , doi:10. 1029/2008JB005869.
- Yang Y and Ritzwoller M H 2008 , Characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography , *Geochem Geophys Geosyst* , **9** , Q02008 , doi:10. 1029/2007GC001814.
- Yang Y , Ritzwoller M H , Levshin A L et al 2007 , Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe , *Geophys J Int* , **168** , 259 ~ 274.
- Yao H , Beghein C and Hilst R D van der 2008 , Surface wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis—II. Crustal and upper-mantle structure , *Geophys J Int* , **173** , 205 ~ 219.
- Yokoi T and Margaryan S , 2008 , Consistency of the spatial autocorrelation method with seismic interferometry and its consequence , *Geophysical Prospecting* , **56** , 435 ~ 451.
- Young C J , Chael E P , Withers M M et al , 1996 , A comparison of the high-frequency (> 1 Hz) surface and subsurface noise environment at three sites in the United States , *Bull Seismol Soc Am* , **86** , 1516 ~ 1528.
- Zeng X and Ni S , 2010 , A persistent localized microseismic source near the Kyushu Island , Japan , *Geophys Res Lett* , **37** , L24307 , doi:10. 1029/2010GL045774.
- Zhan Z and Ni S , 2010a , Stationary phase approximation in the ambient noise method revisited , *Earthquake Science* , **23** , 425 ~ 431.
- Zhan Z , Ni S , Helmberger D V et al 2010b , Retrieval of Moho-reflected shear wave arrivals from ambient seismic noise , *Geophys J Int* , **182** , 408 ~ 420.
- Zhang J , Gerstoft P and Shearer P M , 2009 , High-frequency P-wave seismic noise driven by ocean winds , *Geophys Res Lett* , **36** ,

L09302. doi:10.1029/2009GL037761.

Zhang J, Gerstoft P and Bromirski P D, 2010, Pelagic and coastal sources of P wave microseisms: Generation under tropical cyclones, *Geophys Res Lett*, **37**, L15301, doi:10.1029/2010GL044288.

Zheng X, Jiao W, Zhang C et al, 2010, Short-period Rayleigh wave group velocity tomography through ambient noise cross-correlation in Xinjiang, northwest China, *Bull Seismol Soc Am*, **100**, 1350 ~ 1355.

Zheng S, Sun X, Song X et al, 2008, Surface wave tomography of China from ambient seismic noise correlation, *Geochem Geophys Geosyst*, **9**, Q05020, doi 10.1029/2008GC001981.

## New advances in application of ambient noise interferometry

Wang Weitao<sup>1)</sup> Ni Sidao<sup>2)</sup> Wang Baoshan<sup>1)</sup>

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Institute of geodesy and geophysics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430077, China

**Abstract** Ambient noise seismic interferometry is the methodology by which the Green's Function between two seismic stations can be extracted from long time cross correlation of ambient noise recorded by these two stations. Recent years, seismic interferometry based on ambient noise gains lots of advances both in theoretical derivations and practical applications, including ambient noise tomography as well as time lapse monitoring of velocity variations and many others. In this paper, we first give a brief introduction to the concept and theory of seismic interferometry, then put more words on the new advances in its applications. After introduction and discussion on the advances and barriers related to research on ambient noise source properties, phase and amplitude of noise cross correlation function, we show the new trend in ambient noise interferometry processing.

**Key words:** Ambient noise Cross-correlation Green function Seismic imaging