

背景噪声成像研究综述*

郑定昌¹, 杨润海¹, 沈亚红², 毛燕¹, 李正光¹

(1. 云南省地震局, 昆明 650224; 2. 云南大学 地球物理系, 昆明 650091)

摘要: 背景噪声成像方法采用的是自然稳定的噪声源, 具有可重复和时间上稳定等特点, 回避了传统成像方法的地震分布不均和定位不准等缺点, 因而成为当前地球物理研究的热点。从格林函数提取、噪声源特性和成像工作中取得的成果几个方面对背景噪声成像方法进行综述。

关键词: 背景噪声; 格林函数; 随机场

中图分类号: P315.02

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2009)增刊-0516-06

0 前言

背景噪声成像是一种崭新的, 有广阔前景的方法。最近几年, 背景噪声成像技术日益变为一种可靠的速度结构成像方法。无论是在小地区范围内 (Sabra *et al.*, 2005; Shapiro *et al.*, 2005; Yao *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2007; Moschetti *et al.*, 2007) 还是在大地区范围内 (Bensen *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2007) 都得到了比较好的结果。另外, 将此方法用于更长周期 (> 50 s) 也开始引起了人们的注意。

从传统意义上来看, 地震成像是通过对天然地震或人工地震激发的弹性波实现的。例如通过测定体波的走时来进行走时成像研究, 利用面波的频散曲线进行面波成像等。通过这些地震学的方法就可以了解地球内部的相关信息。

然而, 地震发生是沿着地震带分布的, 这种分布的非均匀性严重制约了地震成像分辨率的提高。所以人们便将目光转向了时刻都在发生的“背景噪声”, 希望通过噪声得到能反映出地下特征的信息。

Aki (1957) 利用噪声提取出地表的传播特性, Claerbout (1968) 提出用噪声来构建反射波剖面。之后, 研究者利用相同的思路将其成功的应用于太阳地震学 (Duvall *et al.*, 1993; Rickett, Claerbout, 1999, 2000)。在海洋水声学中, 背景噪声一直都是固定的研究方向 (Kupermann, In-

genito, 1980), 并且由海洋破碎和船只产生的噪声来重新构建海洋中的声响应 (Sabra *et al.*, 2004)。在声学中, Weaver 和 Lobkis (2001) 在铝块中成功取得了反射路径。这些应用都采用了互相关来提取格林函数的方法。

根据 Weaver 等 (2001) 的研究, 通过互相关运算提取格林函数需要满足模式均分条件。对于一个直达波, 相空间的能量分布依赖于源具体的性质和位置。虽然激发波场的源在空间上分布不均匀, 但随着散射程度的加大, 多次散射倾向于均匀化相空间, 使能量在相空间变得均一, 因此满足提取格林函数对模式均分的要求。

Shapiro 等 (2005) 成功地从背景噪声中提取台站间的格林函数。他们对美国加州 USArray 台阵的 62 个地震台站所记录的一个月的地震背景噪声进行互相关计算, 得到的波形与台站间的理论格林函数仅有幅度的差异, 并由此得到了短周期 (7 ~ 18 s) 的面波频散图。根据这些结果, 他们进一步获取了该地区 7.5 s 和 15 s 周期的面波速度成像图, 其水平分辨率为 60 ~ 100 km。

采用这一思想的技巧是对长时间的地震背景噪声进行互相关计算。取长时间的作用是可以使噪声源的空间位置随机化, 且在噪声传播过程中, 由于地球介质的不均匀性产生散射而进一步随机平均化。互相关计算得到的波形主要是由面波成分构成, 因为背景噪声多发生于地表, 如传统背景噪声中的海洋脉动 (Friedrich *et al.*, 1998) 以及大气扰动 (Tanimoto T, J Um, 1999)。最新研究

* 收稿日期: 2009-10-26.

基金项目: 云南省基金项目 (2009ZC179M) 和昆明市地震活断层探测项目联合资助。

结果表明,长周期的背景噪声来源与海洋深部海水的波动有关 (Stehly *et al*, 2006)。Roux 等 (2005) 的解释是“当接收点相距较远时,由于几何扩散和衰减的影响,相干传播噪声必须有足够幅度的信号才能被两个接收点记录,这就解释了为何衰减较慢的 Rayleigh 面波成为主要部分。”

目前,利用背景噪声进行浅层面波成像得到了广泛应用,不仅进一步拓宽了频带范围,研究覆盖的范围也越来越大。从已取得的成果来看,采用这种背景噪声相关的方法可以在长时间内取得更为精确的群速度测量 (Campillo *et al*, 2005)。与传统面波方法相比,群速度图具有更高的分辨率 (Bensen *et al*, 2005)。Roux 等 (2005) 在 11 km^2 小范围内,对 1 个月内的地震背景噪声进行互相关计算,不仅发现 Rayleigh 面波,而且通过时间-频率分析方法进行区分还发现 P 波。是什么机制在短距离内产生了 P 波? Roux 等 (2005) 认为 P 波有可能产生于当地人为活动引起的背景噪声。除了不占噪声主要部分的少量 P 波,还来源于占噪声主要部分的脉动产生的 Rayleigh 面波,因地球介质的不均匀性,其中一部分转变成为体波。由于 P 波比 Rayleigh 面波衰减快,因此目前仅在小范围内发现 P 波。这些结果告诉我们,噪声包含着丰富的信息。人们可以直接利用噪声就像利用确定源一样获取信息,这正是无源成像的概念。如果将这种无源成像应用在地震学中,可以想象地震学家甚至无需通过释放人工爆破和记录天然地震,而仅仅利用地震仪记录到地震背景噪声信息就可以进行地下结构成像。背景噪声成像可以极大地改进成像的分辨率,它可以广泛的应用于地壳的成像、沉积盆地结构、火山和断层活动的监测、海洋和大气过程等。

1 格林函数的求取

两个点在介质中的格林函数所代表的意义是一个脉冲源在另外一点产生的响应。在完全随机波场中,两个点的互相关记录收敛于介质的完全格林函数,包括了所有的反射、散射和传播模式 (Weaver, 2005)。大量的实验、数值模拟和理论推导都对此问题的证明进行了阐述。

从历史上来说,太阳地震学是第一个应用噪声相关求取格林函数的领域。在太阳地震学中,

对太阳表面的随机振动记录做噪声互相关就可以提取太阳表面的时距信息 (Dubvall *et al*, 1993; Gilles *et al*, 1997)。Weaver 和 Lobkis (2001) 得到了铝块表面两个传感器上完整的格林函数记录。他们从理论上解释了铝块上的模式均分。这种随机性不是由源的分布产生,而是由于不均匀介质的多重散射产生 (Weaver, Lobkis, 2001)。谱表示的应用 (Weaver, Lobkis, 2001)、涨落耗散方法 (Weaver, Lobkis, 2001, 2003; van Tiggelen, 2003; Godin, 2007) 和相关表示理论 (Wapenaar, 2004) 都可以从理论上严格的解释这个实验结果。

实验的结果充分证明这种无源成像的可行性。在地震学中, Campillo (2003) 首次将互相关提取格林函数方法运用于地震尾波。首先对台站所记录的 101 个远震事件中相同时间段的尾波记录两两进行互相关计算。经过对比,计算结果与理论模型合成的格林函数相一致,并发现所得的波形具有 Rayleigh 面波和 Love 面波的极化特征以及群速度特征。这就意味着可以从随机的或扩散的波场中可通过提取格林函数来得到地球介质的弹性响应。

基于波场的均分模式 (Weaver, Lobkis, 2001) 简单的表达了这种特性。系统的简正模式互不相关,并具有相同的能量,基于弹性体散射波场的离散模式展开表示为:

$$\phi(x, t) = \sum_n a_n u_n(x) e^{i\omega_n t}. \quad (1)$$

式中, x 是空间一点的位置, t 是时间, u_n 和 ω_n 是地球的本征方程和本征频率, a_n 是激励函数。散射波场一个重要的性质为模式振幅是不相关的随机变量:

$$\langle a_n a_m^* \rangle = \delta_{nm} F(\omega_n). \quad (2)$$

式中, δ 是 kronecker 符号, $F(\omega)$ 是能谱密度。由于取平均, (2) 式的交叉项消失, x 和 y 波场之间的相关变为

$$C(x, y, \tau) = \sum_n F(\omega_n) u_n(x) u_n(y) e^{-i\omega_n \tau}. \quad (3)$$

上述表达式与空间两点间格林函数相比,仅有幅度因子的不同。也就是说,通过对充分长时间的随机波场做相关就可以得到两点间的格林函数。

2 背景噪声的源

背景噪声主要是由面波组成 (Friedrich *et al.*, 1998; Ekstrom, 2001), 观测噪声振幅是不能用背景的地震活动来解释的 (Tanimoto, Um, 1999)。而且主要噪声源被认为是由大气和海洋的压力扰动引起的。进一步的研究表明, 不同频段的地震噪声的产生机制是不一样的。

背景噪声成像的一个基本假设就是在很长的时间范围之内的随机波场分布。一个完美的波场分布会得到左右相同对称的互相关延迟到时, 但在实际数据处理的过程中得到的互相关函数往往却是非对称的。这有可能是部分区域源的能量比较强。

背景噪声在相对的短周期 (<20 s) 频带范围内一般认为与海底的涌浪有关。在短周期频段内有两个主要能量分布: $10 \sim 20$ s 和 $5 \sim 10$ s。这两个能量的激发机制还不完全清楚, 但是一般认为与浅部海洋涌浪 (Gutenberg, 1951) 相关, 第一微震能量在周期上 ($10 \sim 20$ s) 与主要的涌浪非常相似, 第二微震能量 ($5 \sim 10$ s) 是来源于直达涌浪和反射涌浪波的非线性干扰, 也就是在一半周期 ($5 \sim 10$ s) 内的压力变化 (Longuet - Hiffins, 1950)。长周期的背景噪声 (或者地球的“嗡嗡声”) 与地球的自由振荡有关 (Nawa *et al.*, 1998; Suada *et al.*, 1998; Tanimoto *et al.*, 1998; Roul, Crawford, 2000; Kobayashi, Nishida, 1998; Nishida *et al.*, 2000)。早期的研究认为长周期的噪声来源于大气的运动 (Tanimoto, Um, 1999; Ekstrom, 2001), 现在认为是一种海洋亚重力波, 一个长周期的海洋重力波 (Rhie, Romanowicz, 2004, 2006)。根据 Webb (1991) 的观点, 海洋亚重力波在自由水中传播, 并导致海洋底部产生长周期压力扰动。对于长周期地震背景噪声, 因为 Wata-da (2001) 观测到在海洋周期 70 s 以上有比较小的压力, 所以 Tanimoto (2005) 排除了大气压力变化的可能性。海洋底部观测台网观测结果显示: 海洋亚重力波和当地的短周期海洋波有较强的相关性 (Dolenc *et al.*, 2005), 这说明附近产生的长周期亚重力波主要来源是海洋涌浪。Dolenc 等 (2005) 同样观测到了亚重力波振幅和潮汐之间的相关性, 认为亚重力波与大洋环流是相关的

(Longuet - Higgings, Stewart, 1964; Kobayashi, Nishida, 1998; Nishida *et al.*, 2000)。地震背景噪声显示出强烈的季节变化。Rhie 和 Rmanowicz (2004) 根据台阵研究得出: 北半球冬季长周期信号 ($150 \sim 500$ s) 的源在北半球的海洋里, 而在南半球冬天时偏向于南半球的海洋。这些特性都很好同海洋波的振幅季节变化吻合。长周期的地震噪声是大气—海洋—海底的耦合过程。

最近, Stehly 等 (2006) 分析了加州、美国东部、欧洲、坦桑尼亚地区的台网数据, 发现第二微震能量 ($5 \sim 10$ s) 较稳定, 信号很可能来自海岸线附近; 同时证实了第二微震能量是由海洋涌浪和海岸线的非线性影响产生的, 与此相比, 第一微震能量 ($10 \sim 20$ s) 和长周期噪声信号 ($20 \sim 40$ s) 会随着季节发生周期性变化, 从方向上来说并不是靠近最近的海。这说明, 周期超过 10 s 的地震背景噪声是与海洋波的活动性有关, 它的产生机制很可能类似于亚重力波。Yang 和 Ritzwoller (2008) 采用了相同的方法对欧洲、南美洲、亚洲和北美内部的 3 个地区进行了更详细的研究。在研究区内, 第一微震能量和第二微震能量季节变化性很明显, 在 $8 \sim 50$ s 频带内的源均与近海岸线的海水有关。

3 背景噪声成像的应用

南加州的台网首次进行背景噪声层析成像的研究 (Shapiro *et al.*, 2005; Sabra *et al.*, 2005), 经研究得到了 $7.5 \sim 15$ s 的 Rayleigh 波群速度结构, 而且与加州的主要地质块体有很好的相关性, 低速异常对应于重要的沉积盆地, 高速异常对应于重要的山脉火成岩核。其后, 背景噪声成像发展迅速, Cho 等 (2006) 估计出韩国的短周期 Rayleigh 波和 Love 波的特性。Yao 等 (2006, 2008) 用噪声成像的方法得到了西藏地区 $10 \sim 50$ s 的 Rayleigh 波相速度结构, 并结合其他方法得到了西藏地区的地壳和上地幔的 S 波速度结构。Yang 等 (2007) 通过欧洲 125 个宽频地震台的研究得到了 $8 \sim 50$ s 的 Rayleigh 波群速度结构。Lin 等 (2007) 采用超过 250 个宽频地震仪的背景噪声数据, 得到了美国西部地区的 Rayleigh 波和 Love 波的速度成像结构。此方法在新西兰 (Lin *et al.*, 2007)、中国 (Zheng *et al.*, 2008)、澳洲大陆 (Erdinc *et al.*,

2008)、西班牙 (Villasenor *et al*, 2007) 等地均得到了应用。Brenguier 等 (2008) 利用超过 18 个月记录到的背景噪声来提取格林函数, 并计算出相对的地震速度扰动, 用来研究火山的波速变化。研究结果显示: 每次火山喷发前能够清晰地识别到速度降低。这项新的观测提高了预报火山喷发及先验地估计火山喷发的强度和对环境影响的能力。Sens - Sch nfelder 和 Wegler (2006) 用背景噪声数据来连续监测 Merapi 火山附近地震波速度的微弱变化, 在研究中, 每天的速度变化测量精度达到 0.1%。Wegler 和 Sens - Sch nfelder (2007) 用背景噪声做自相关函数来监测断层区在地震前后的速度变化, 并研究相应的应力变化。Prieto 和 Beroza (2008) 从记录到的背景噪声数据中用反卷积的方法来提取格林函数相位和振幅。Xu 和 Song (2009) 利用该方法观察到大地震过后地区地壳介质波速变化, 这就为我们了解地震发生和地震预报提供了很好的思路。几乎所有的应用数据处理都由以下的四方面组成 (Bensen *et al*, 2007): (1) 单台信号的数据处理准备, 主要包括去仪器响应、消除直流分量和线性趋势项、时域的归一化处理和谱白化处理; (2) 选择一定时间长度 (一般以一天为单位), 对台站对做互相关处理; 然后按照需求对相关函数进行叠加; (3) 利用时频分析技术测定群速度和相速度曲线; (4) 误差分析: 空间上密集分布的台站簇与其他远距离台站格林函数的可重复性分析或同一台站对不同时间段的格林函数的可重复性分析。

4 小结

背景噪声成像的出现弥补了传统成像方法的不足, 尤其加强了对地壳的解读能力。水平分辨率高、不依赖地震已成为背景噪声这种无源成像的独特优势。作为一种新的成像方法, 背景噪声成像将会在地壳成像、沉积盆地结构、火山和断层活动监测、海洋和大气过程等研究中起重大的作用和具有深远的意义。同样地, 利用背景噪声对弹性性质变化进行探测也逐渐成为一种新的稳健方法, 尤其在介质非破坏性检测的工程中也会发挥作用。而在另一方面, 能否从背景噪声中提取更多的信息, 仍然有很多工作要做。比如怎样进一步提高面波成像的深度和精度? 如何提高格

林函数的信噪比, 得到随时间变化的 4D “地下云图” (陈颢, 朱日祥, 2005) 等。随着观测技术和研究的深入, 背景噪声反演一定会有更广阔的天地、更大的发展空间。

参考文献:

- 陈颢, 朱日祥. 2005. 设立“地下明灯研究计划”的建议[J]. 地球科学进展, 20(5): 485 - 489.
- Aki K. 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, (35): 415 - 456.
- 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[J]. Geophys J Int, 169: 1 239 - 1 260.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Shapiro N M. 2008. Broad - band ambient noise surface wave tomography across the United States[J]. JGR, 113: B05306, doi:10. 1029/2007JB005248.
- Brenguier F, Shapiro N M, Campillo M, *et al*. 2008. Toward forecasting volcanic eruptions using seismic noise[J]. Nat Geosc, 1(2): 126 - 130.
- Campillo M, A Paul. 2003. Long - range correlations in the diffuse seismic coda Science, 299(5606): 547 - 549.
- Campillo M. 2006. Phase and correlation in random seismic fields and the reconstruction of the Green function[J]. Pure and Appl Geophys, 163(2 - 3): 475 - 502.
- Cho K H, Hermann R B, Ammon C J, *et al*. 2007. Imaging the upper crust of the Korean Peninsula by surface - wave tomography[J]. BSSA, 97(1B): 198 - 207.
- Claerbout J F. 1968. Synthesis of a layered medium from its acoustics transmission response[J]. Geophysics, 33(2): 264 - 269.
- Dolenc D, B Romanowicz, D Stakes, *et al*. 2005. Observations of infragravity waves at the Monterey ocean bottom broadband station (MOBB) [J]. Geochem Geophys Geosyst, 6: Q09002.
- Duvall T L, Jefferies S M, Harvey J W, *et al*. 1993. Time distance helioseismology[J]. Nature, 362(6419): 430 - 432.
- Ekstrom G. 2001. Time domain analysis of Earth's longperiod background seismic radiation[J]. JGR, 106(26): 483 - 493.
- Friederich A, F Kruger, K Klinge. 1998. Ocean - generated microseismic noise located with the GRFO array[J]. Journal of Seismology, (2): 47 - 64.
- Godin O A. 2007. Emergence of the acoustic Green's function from thermal noise[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 121: EL96 - EL102.
- Gutenberg B. 1951. Observation and theory of microseisms, in Compendium of Meteorology[J]. BULL Am Meteorol Soc: 1303 - 1311.
- Hasselmann K. 1963. A statistical analysis of the generation of microseisms[J]. Rev Geophys, 1(2): 177 - 210.
- Kobayashi N, K Nishida. 1998. Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances[J]. Nature, 395(6700): 357 - 360.
- Kuperman W A, F Ingenito. 1980. Spatial correlation of surface generated

- noise in a stratified ocean [J]. *J Acoust Soc Am*, 67 (6): 1 988 – 1 996.
- Lin F – C, Ritzwoller M H, Shapiro N M. 2006. Is ambient noise tomography across ocean basins possible [J]. *Geophys Res Lett*, 33: L14304, doi:10. 1029/2006GL026610.
- Lin F – C, Ritzwoller M H, Townend J, *et al.* 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography of New Zealand [J]. *Geophys J Int*, 170 (2): doi:10. 1111/j. 1365 – 246x. 2007. 03414. x.
- Longuet – Higgings M, R Stewart. 1964. Radiation stresses in water waves: A physical discussion with applications [J]. *Deep Sea Res*, 11: 529 – 562.
- Longuet – Higgins M S. 1950. A theory on the origin of microseisms [J]. *Philos Trans R Soc London*, 243: 1 – 35.
- Moschetti M P, Ritzwoller M H, Shapiro N M. 2007. Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh wave group velocity maps [J]. *Geochem Geophys Geosys*, 8: Q08010, doi:10. 1029/2007GC001655.
- Nawa K, N Suda, Y Fukao, *et al.* 1998. Incessant excitation of the Earth's free oscillations [J]. *Earth Planets Space*, 50: 3 – 8.
- Nishida K, N Kobayashi, Y Fukao. 2000. Resonant oscillations between the solid earth and the atmosphere [J]. *Science*, 287 (5461): 2 244 – 2 246.
- Prieto G A, G C Beroza. 2008. Earthquake ground motion prediction using the ambient seismic field [J]. *Geophys Res Lett*, 35: L14304, doi: 10. 1029/2008GL034428.
- Rhie J, B Romanowicz. 2004. Excitation of Earth's continuous free oscillations by atmosphere – ocean – seafloor coupling [J]. *Nature*, 431: 552 – 554.
- Rickett J, J Claerbout. 1999. Acoustic daylight imaging via spectral factorization: Helioseismology and reservoir monitoring [J]. *The Leading Edge*, 18 (1): 957 – 960.
- Roult G, W Crawford. 2000. Analysis of “backgrounds” oscillations and how to improve resolution by subtracting the atmospheric pressure signal [J]. *Phys Earth Planet Inter*, 121 (3): 325 – 338.
- Roux P, K G Sabra, W A Kuperman, *et al.* 2005. Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach [J]. *J Acoust Soc Am*, 117: 79 – 84.
- Roux P, W A Kuperman, the NPAL Group. 2004. Extracting coherent wavefronts from acoustic ambient noise in the ocean [J]. *J Acoust Soc Am*, 116: 1 995 – 2 003.
- Sabra K G, Gerstoft P, Roux P, *et al.* 2005b. Surface wave tomography from microseism in southern California [J]. *Geophys Res Lett*, 32 (14): L14311, doi:10. 1029/2005 GL 023155.
- Sabra K G, Gerstoft P, Roux P, *et al.* 2005. Extracting time – domain Green's function estimates from ambient seismic noise [J]. *Geophys Res Lett*, 32 (3): L03310, doi:10. 1029/2004GL021862.
- Saygin E, Kennett B L N. 2008. Ambient seismic noise tomography of Australian continent [J]. *Tectonophysics* doi: 10. 1016/j. tecto. 2008. 11. 013.
- Sens – Schönfelder C, Wegler U. 2006. Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi volcano, Indonesia [J]. *Geophys Res Lett*, 33 (21): L21302, doi: 1029/2006 GL 027797.
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, *et al.* 2005. High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise [J]. *Science*, 307 (5715): 1 615 – 1 618.
- Shapiro N M, Campillo M. 2004. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise [J]. *Geophys Res Lett*, 31 (7): L07614, doi:10. 1029/2004 GL 019491.
- Shapiro N M, Ritzwoller M H, Bensen G D. 2006. Source location of the 26 sec microseism from cross correlations of ambient seismic noise [J]. *Geophys Res Lett*, 33 (18): L18310, doi: 10. 1029/2006 GL 027010.
- Shapiro N M, Ritzwoller M H. 2002. Monte – Carlo inversion for a global shear velocity model of the crust and upper mantle [J]. *Geophys J Int*, 151 (1): 88 – 105.
- Stehly L, Campillo M, Shapiro N M. 2006. A study of the seismic noise from its long range correlation properties [J]. *Journal of Geophysical Research*, 111 (10): B10306, doi:10. 1029/2005 JB 004237.
- Stehly L, Campillo M, Shapiro N M. 2007. Travel time measurements from noise correlation: stability and detection of instrumental time – shifts [J]. *Geophysical Journal International*, 171 (1): 223 – 230.
- Suda N, K Nawa, Y Fukao. 1998. Earth's background free oscillations [J]. *Science*, 279: 2089 – 2091.
- Tanimoto T, J Um, K Nishida, *et al.* 1998. Earth's continuous oscillations observed seismically quiet days [J]. *Geophys Res Lett*, 25: 1 553 – 1 556.
- Tanimoto T, J Um. 1999. Cause of continuous oscillations of the earth [J]. *Geophys Res Lett*, 104 (B12): 723 – 739.
- Tanimoto T. 2005. The oceanic excitation hypothesis for the continuous oscillations of the Earth [J]. *Geophys J Int*, 160: 276 – 288.
- van Tiggelen B A. 2003. Green function retrieval and time reversal in a disordered world [J]. *Physical Review Letter*, 91 (24): 243904.
- Villasnar A, Yang Y, Ritzwoller M H, *et al.* 2007. Ambient noise surface wave tomography of the Iberian Peninsula: implications for shallow seismic structure [J]. *Geophys Res Lett*, 34 (11): L11304, doi:10. 1029/2007 GL 030164.
- Wapenaar K. 2004. Retrieving the elastodynamic Green's Function of an arbitrary, inhomogeneous medium by cross – correlation [J]. *Physical Review Letters*, 93: 254 – 301.
- Weaver R L, Lobkis O I. 2004. Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116 (5): 2 731 – 2 734.
- Weaver R L, Lobkis O I. 2006. Diffuse fields in ultrasonics and seismology [J]. *Geophysics*, 71 (4): S15 – S19.
- Weaver R L, Lobkis O I. 2003. Elastic wave thermal fluctuations, ultrasonic waveforms by correlation of thermal phonons [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113: 2 611 – 2 621.
- Weaver R L, Lobkis O I. 2005. Fluctuations in diffuse field correlations and the emergence of the Green's function in open systems [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117: 3 432 – 3 439.
- Weaver R L, Lobkis O I. 2005. The mean and variance of diffuse field correlations in finite bodies [J]. *The Journal of the Acoustical Society of*

- America, 118(6):3 447 – 3 456.
- Weaver R. L., Lobkis O. I. 2001. Ultrasonics without a source: thermal fluctuation correlations at MHz frequencies[J]. *Physical Review Letter*, 87(13):134301.
- Weaver R. L. 2005. Information from seismic noise [J]. *Science*, 307, 5715:1 568 – 1 569.
- Wegler U, Sens – Sch nfelder C. 2007. Fault zone monitoring with passive image interferometry[J]. *Geophys J Int*, 168(3):1 029 – 1 033.
- Xu Zhen J, Song Xiaodong. 2009. Temporal changes of surface wave velocity associated with major Sumatra earthquakes from ambient noise correlation[J]. *PNAS*, 106(34):14207 – 14212.
- Yang Y, M H Ritzwoller. 2008. Characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography[J]. *Geochem. Geophys, Geosyst*, 9(2):Q02008, doi:1029/2007 GC 001814.
- Yang Y, Ritzwoller M H., Levshin A L., et al. 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe[J]. *Geophysical Journal International*, 168:259 – 274.
- Yao H, Caroline Beghein, Robert D Van der Hilst, Maavten V de Hoop. 2006. Surface – wave tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two – station analysis: I. —Phase velocity maps [J]. *Geophys J Int*, 166(2):732 – 744.
- Yao H Caroline Beghein, Robert D Van der Hilst, Maavten V 2008. Surface – wave tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two – station analysis – II. Crustal and upper – mantle [J]. *Geophys J Int*, 173(1):205 – 219.
- Zheng S H, X L Sun, X D Song, et al. 2008. Ritzwoller, Surface wave tomography of china from ambient seismic noise correlation [J]. *Geochem. Geophys Geosyst*, (9): Q05020, doi: 10. 1029/2008 GC 001981.

A Review on Ambient Noise Tomography

ZHENG Ding-chang¹, YANG Run-hai¹, SHEN Ya-hong², MAO Yan¹, LI Zheng-guan¹

(1. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(2. *yunnan university, kunming, 650091, yunnan, china*)

Abstract

Ambient noise tomography based on natural noise is repeatable and stable, it overcomes several important limitation of traditional methods based on earthquakes, ie. uneven distribution of earthquake sources and uncertainty in earthquake location. Now it is a new promising technique. In the present show the extracting Greens function, origin of ambient noise and tomography.

Key words: ambient noise, Greens function, random field