

# 利用背景噪声进行地震成像的新方法

齐诚<sup>1</sup>, 陈棋福<sup>2</sup>, 陈颢<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

**摘要** 利用背景地震噪声提取格林函数,即通过一对台站记录的地震噪声进行互相关计算,来近似台站间的格林函数,并进一步通过地震成像获取地下结构的认识,成为最近跨学科研究的热点问题之一.本文首先叙述了其发展背景及过程,然后分别从四个角度,简要介绍了目前对其物理原理解释.如果该方法能得到进一步的发展,将不再依赖于天然地震以及人工地震,而仅仅利用地震台站记录的地震噪声便可获取高分辨率的地下成像.该方法将会大大促进地震学的发展.

**关键词** 地震背景噪声,格林函数,互相关,地震成像

中图分类号 P315

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)03-0771-07

## A new method for seismic imaging from ambient seismic noise

QI Cheng<sup>1</sup>, CHEN Qi-fu<sup>2</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Institute of Earthquake science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

**Abstract** Recently, one of the hotly discussed problems in multidisciplinary fields is to use ambient seismic noise to extract the Green's function, i. e., cross-correlating the seismic noise recorded by two stations to get the Green's function between these two stations, thus to improve our knowledge about subsurface structures by use of seismic imaging. In this paper, the developing background and process of this new method will be introduced firstly. And then its physical principle will be also shown from four different viewpoints. If this method could be developed more, seismic images with high resolution will be acquired without natural earthquakes or artificial explosions, but just the seismic ambient noise. This new method may greatly advance the development of seismology.

**Keywords** ambient seismic noise, Green's function, cross-correlation, seismic imaging

## 0 引言

对地震波信号的处理,地震仪记录的背景噪声(简称为地震噪声)往往给我们带来许多麻烦.各种信号处理技术被用来针对噪声问题,以期降低噪声的影响,提高地震记录的信噪比<sup>[1~3]</sup>.地震噪声是由多种不同的,空间分布互不相关的连续源所产生的杂乱的记录,是一种平稳随机过程,并且没有确定的相谱<sup>[4]</sup>.

对于地震噪声,一般来说都是不加以研究的,除了在研究地球背景噪声模型时,人们会给予一些重视.但是,最近的跨学科研究表明,噪声中包含有大

量有用的信息,是完全可以被利用的.通过对长时间段内的噪声进行互相关运算,可以提取接收点间的格林函数.其实证明已经在太阳地震学<sup>[5]</sup>和声学领域给出<sup>[6~10]</sup>,在海洋声学<sup>[11~13]</sup>以及地震学<sup>[14~19]</sup>中开始初步应用.本文主要介绍其在地震学领域中的发展.通过对地面上两个地震台站记录的背景地震噪声信号在长时间段内进行互相关运算,提取格林函数,从而进行地震成像,获取对地下结构的认识.可以预见,这一新的进展将对地震学的发展会有不可估量的影响.

收稿日期 2006-10-10; 修回日期 2006-12-20.

基金项目 国家自然科学基金重点项目(40574019)资助.

作者简介 齐诚,男,1979年生,2001年毕业于中国科学与技术大学地球物理专业,现为中国科学院地质与地球物理研究所在读博士研究生.主要从事反演理论与地震成像研究. (E-mail: qicheng @seis. ac. cn)

## 1 发展

早在上世纪 50 年代,人们就提出这样的猜想:通过两点记录的噪声信号进行互相关计算,可以建立这样一种波场,即一点为源,另一点接收.该猜想可以简单描述为:通过互相关运算提取格林函数.

1987 年,Steve Cole 通过实验试图证明这样的猜想,但没有获得成功<sup>[20]</sup>.他在美国 Stanford 学校的校园里布设了面积为近 1 平方公里,由 4,096 个小型地震仪组成的台阵进行无源三维观测.没有人会想到能够记录到从远处传播过来明显的卷跃波浪(plunging waves),但事实是,可以清晰看到从美国中西部传来的地震波.地震学家为之非常惊讶,密集台阵可以接收到来自遥远的,频率高达 10 Hz 的地震波.很可惜,Cole 没有观察到小尺度的反射波,而这可以在台阵内进行互相关运算得到,并且由于实验上的一些问题<sup>[5]</sup>,错过了一次证实猜想的机会.

最早类似的想法出现在太阳地震学中<sup>[21]</sup>.有一项技术被称为“acoustic daylight imaging”,可以获取太阳内部的图像.随着 1995 年一种新型测量仪器 Michelson Doppeler Imager (MDI) 的发明,人们可以对太阳表面上一点的噪声进行测量.该仪器的使用相当于在太阳表面均匀布设了百万个地震台站( $1024 \times 1024$ ).通过对太阳表面噪声进行互相关,用来近似太阳表面的一系列脉冲源来得到“时间-距离”地震图,进而得到了太阳外层的三维流速度结构.太阳地震学家抢在地球物理学家之前证实了一个长期的猜想,对噪声的互相关计算能够提供脉冲响应地震图.如果在太阳上取得了成功,为何不能在地球上<sup>[5]</sup>?

近年在声学研究领域,Weaver 等<sup>[6,7]</sup>通过实验,不仅发现热起伏(thermal fluctuation)是可以测量的,并且发现由于电子撞击晶格缺陷或者空气分子与物体表面碰撞引起的热起伏噪声,当被两个传感器接收,进行互相关计算得到的波形可以看作两点间的格林函数.

此后不久,Campillo 等又一次在地震学领域进行尝试<sup>[14]</sup>.不同的是,他们没有选择地震噪声,而是先选择了同样特征杂乱无章的地震尾波(coda).通过对台站记录的 101 个远震事件的相同时间段的尾波记录两两进行互相关计算,然后经过叠加和“one-bit”技术<sup>[22]</sup>处理,进一步提高运算结果的信噪比.经过对比,计算结果与理论模型合成的格林函数相一致,并且发现得到的波形具有 Rayleigh 面波和 Love

面波的极化特征以及群速度特征.

根据 Weaver 等<sup>[6]</sup>的研究,通过互相关运算提取格林函数需要满足模式均分(modal equipartition)的条件.对于一个直接到达的波,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.而据 Hennino 等人的研究,地震尾波的能量在各种类型的地震波中确实是模式均分的,这种均分是多重散射的结果<sup>[23]</sup>.

从利用地震尾波到利用背景地震噪声提取台站间的格林函数的工作由 Shapiro 等人于 2005 年取得了成功<sup>[18]</sup>.他们对美国加州 USArray 台阵的 62 个地震台站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.之所以经过互相关计算得到的波形主要是由面波成分构成,原因是背景地震噪声多发生于地表,如传统背景噪声中的海洋脉动<sup>[24]</sup>以及大气扰动<sup>[25,26]</sup>.最新的研究结果表明,长周期的地震噪声来源与海洋深部海水的波动有关<sup>[27]</sup>.Roux 等<sup>[19]</sup>的解释是“当接收点相距较远,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能被两个接收点所记录.这就解释了为何衰减较慢的 Rayleigh 面波成为主要部分.”

目前,利用背景地震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,研究所覆盖的范围也越来越大.在欧洲<sup>[28]</sup>,日本<sup>[29]</sup>和西藏地区<sup>[30]</sup>以及更大的区域,如美国全境<sup>[31]</sup>及欧亚大陆<sup>[32]</sup>都取得了一些初步结果.从这些结果来看,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<sup>[33]</sup>.与传统方法相比,群速度图具有更高的分辨率<sup>[34]</sup>.

但是,在地震学中得到的格林函数仅是面波成分,最近获得体波成分取得了重大进展.Roux 等人<sup>[19]</sup>在 11 平方公里小范围内,对一个月内的地震

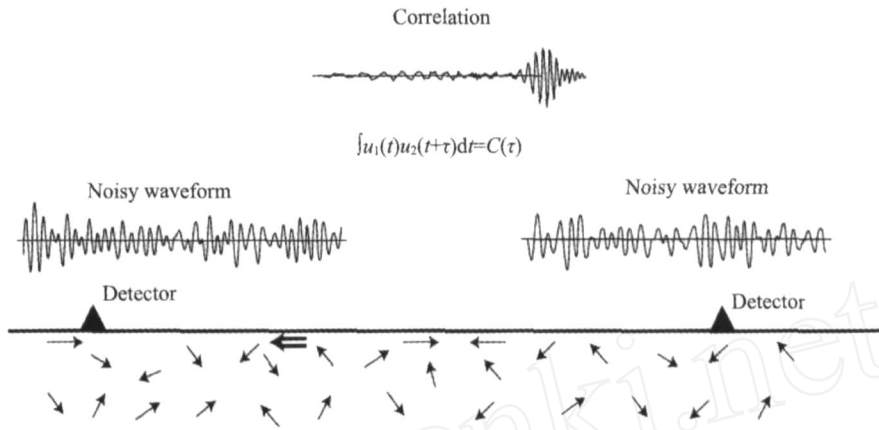


图 1 箭头代表由远处的源激发和多次散射形成的散射波场,接收台站(黑三角)记录到噪声信号.其中一部分地震射线(双尾箭头)连续穿过两个接收台站,这些信号具有弱的相关性.(根据[35]修改)

Fig. 1 A diffuse wave field is generated by distant sources and/or by multiple scattering (arrows), detectors (black triangles) report random signals. Occasionally a ray (an arrow with two tails) passes through both detectors. As a result, the signals are weakly correlated. (modified after Weaver[35])

背景噪声进行互相关计算,不仅发现 Rayleigh 面波,而且还通过时间-频率分析方法进行区分发现了 P 波.是什么机制在短距离内产生了 P 波? Roux 等认为 P 波有可能产生于当地人活动引起的地震噪声.除了不占噪声主要部分的少部分 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,使得 Rayleigh 面波的一部分转变成体波.因 P 波比 Rayleigh 面波衰减的快,因此目前仅在小范围内发现 P 波.

这些结果告诉我们,噪声并不是几乎无用的,而是包含着丰富的信息.人们可以直接利用噪声像利用确定源一样获取信息.这正是无源成像 (passive imaging) 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.

## 2 原理

这一现象确实非常有趣,那么其中的物理原理是什么? 2005 年 5 月份在美国新奥尔良召开的 Joint Assembly 会议上,就这一问题单独进行了讨论.当中的与会者对其物理原理从不同的角度进行了解释,基本代表了目前主要的几种观点.虽然没有取得一致的答案,但对其物理内涵的揭示越来越深入.在刚刚结束的 2005 年 AGU 秋季会议上,在专

题“Hearing the Noise”中,有关这一新方法的论文数目,与 Joint Assembly 会议相比也有了明显提高.

其物理原理可以从图 1 来直观的理解.在各向同性散射波场中,一条射线穿过一个接收点后,稍后再次穿过另一个接收点,震相不发生变化.因此,虽然是噪声信号,但却是相关的<sup>[35]</sup>.

下面简要介绍目前的四种解释.

### 2.1 基于模式均分假设

在 Weaver 的开创性的试验中,是基于模式均分解的<sup>[7]</sup>.认为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<sup>[7,16]</sup>.

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

$x$  是空间一点的位置,  $t$  是时间,  $u_n$  和  $n$  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是模式振幅是不相关的随机变量:

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

是 Kronecker 符号,  $F(n)$  是能谱密度. 由于取平均,上式的交叉项消失,  $x$  和  $y$  波场之间的相关变成简单的:

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

上面表达式与空间两点间格林函数仅有幅度因

子的不同. 这一结果容易让人联想起波动耗散理论<sup>[36]</sup>.

## 2.2 基于时间反转对称理论

然而, 上面的解释是基于封闭的介质, 不考虑吸收的影响. Derode 等人用“时间反转对称 (time-reversal symmetry)”来解释<sup>[37,38]</sup>.

假设在一个开放式的散射介质中有三点, 分别是  $A$ 、 $B$  和  $C$ . 在点  $C$  发送一个脉冲, 即激励函数  $e(t)$ , 那么在点  $A$  和点  $B$  收到的波场分别是

$$A(t) = e(t) \otimes h_{AC}(t) \text{ 和}$$

$$B(t) = e(t) \otimes h_{BC}(t),$$

$\otimes$ 表示卷积. 对点  $A$  和点  $B$  的波场进行互相关计算为:

$$\begin{aligned} C_{AB}(t) &= \Phi_A(t) \Phi_B(t + \tau) d \\ &= h_{AC}(t) \otimes h_{BC}(-t) \otimes e(t) \otimes e(-t), \end{aligned} \quad (4)$$

假设有下面一种实验: 点  $B$  发射一个脉冲, 点  $C$  记录到脉冲响应为  $h_{CB}(t)$ , 将时间反转, 并将信号送回, 那么在点  $A$  记录到的波场是  $h_{CB}(-t) \otimes h_{AC}(t)$ . 因散射点不发生变化, 波的传播是可逆的, 有

$$h_{CB}(-t) \otimes h_{AC}(t) = h_{AC}(t) \otimes h_{BC}(-t).$$

即当点  $C$  发射一个脉冲, 点  $A$  和点  $B$  之间的互相关是  $h_{AC}(t) \otimes h_{BC}(-t)$ .

然而, 上面还是没有出现点  $A$  和点  $B$  之间的格林函数  $h_{AB}$ . 这次, 取许多不同的点  $C$ , 同样进行时间反转操作. 根据 Helmholtz-Kirchhoff 理论, 如果这些点  $C$  连续分布在散射介质周围的表面, 那么用时间反转的假设是非常合理的. 在“向前”传播过程中, 点  $B$  发送一个脉冲, 经过多次散射, 逐渐被周围的点  $C$  没有损耗地接收. 将波场时间反转, 所有的波又从介质的每一个角落传播回来. 这样, 经过时间反转, 点  $A$  接收到的波场是  $h_{BA}(-t)$ . 那么, 一旦波聚集在点  $B$  ( $t=0$ ) 后, 再离开点  $B$ , 在  $t>0$  时点  $A$  接收到的波场为  $h_{BA}(t)$ . 因此, 当我们选用了一系列的点  $C$ , 就有:

$$\int_C h_{AC}(-t) \otimes h_{CB}(t) = h_{BA}(t) + h_{BA}(-t), \quad (5)$$

也就是说, 在开放式的介质中, 根据时间反转理论, 通过合理布设点  $C$ , 对散射波场进行互相关可以得到两点间的脉冲响应. 关于时间反转的详细说明可参考<sup>[39]</sup>.

## 2.3 基于稳相近似理论

Snieder<sup>[17]</sup> 认为在 Campillo 和 Paul 的工作中<sup>[14]</sup>, 地球的简正模式和面波模式都不能解释他的实验. 从稳相近似 (stationary phase approximation) 理论的角度可以给出证明, 并适用于封闭式和开放式系统<sup>[17,40]</sup>.

考虑一个简单的模型, 两个接收点分别放置在笛卡尔三维坐标系的  $x$  轴上  $(0, 0, 0)$  和  $(R, 0, 0)$ , 介质中的传播速度为常数  $c$ . 接收点确定的一条直线称为接收线. 接收点外围为一系列的散射点. 当取时间上和散射点上充分的平均后, 根据稳相近似理论, 接收点间互相关计算的傅里叶变换为:

$$\begin{aligned} C(\omega) &= 8 \int \frac{e^{-ikR}}{4R} \int \frac{e^{-ikR}}{4R} dx \\ &\times \left[ -\frac{e^{-ikR}}{4R} \int_0^R dx - \frac{e^{-ikR}}{4R} \int_R^\infty dx \right], \end{aligned} \quad (6)$$

$n$  为单位体积内散射点数目,  $|S(\omega)|^2$  为对所有散射点  $s$  发送的信号  $S_s(t)$  的功率谱做平均. 式中  $-\exp(ikR)/4R$  即为格林函数, 这一项来自于对  $x<0$  的积分, 波沿  $x$  轴的正方向传播, 被称为滞后 (retarded) 格林函数. 后面一项  $-\exp(-ikR)/4R$ , 来自于对  $x>R$  的积分, 波沿  $x$  轴反方向传播, 被称为前置 (advanced) 格林函数.

由此可以看出, 一般来说, 除了从接收线附近散射点发射出的波, 两点记录到的散射波是互不相关的. 无源成像实质是基于沿接收线附近传播的散射波的相长干涉.

## 2.4 基于反射响应同传输响应的关系

以 Claerbout<sup>[41]</sup> 建立的层状模型中反射响应同传输响应的关系为基础, Wapenaar<sup>[15]</sup> 根据两种传播不变量, 即基于卷积和相关的单向波互易理论, 得出了在三维不均匀完全弹性介质中情况下两种响应的关系. 继而证明了如何从传输测量中得到反射响应, 即本文所说的从噪声中提取格林函数.

考虑卷积和相关, 单向波和双向波的不同, 建立了四个基本互易定理. 其中在空间频率域内, 单向波相关类型的互易定理为:

$$\begin{aligned} &\int_{\partial D_0} \left\{ (P_A^+)^* P_B^+ - (P_A^-)^* P_B^- \right\} d^2x \\ &= \int_{\partial D_m} \left\{ (P_A^+)^* P_B^+ - (P_A^-)^* P_B^- \right\} d^2x, \end{aligned} \quad (7)$$

$P$  表示压力,  $A$ 、 $B$  代表两个独立的声学状态,  $\partial D_0$  和  $\partial D_m$  代表沿两个水平面积分.  $P^+$  和  $P^-$  分别代表下行波和上行波的波场.  $*$  表示复共轭. 在考虑自由面和多次波的状态下,  $\partial D_0$  界面以上和  $\partial D_m$  界面以下的空间为均匀的无源半空间, 以内为非均匀介

质. 在上面的自由面假定一个向下发射的源, 那么在  $\partial D_0$  上的波场包括源下面的空间函数和由于下面的自由表面而反射回来的波场. 根据源与接收点间的互易原理, 不考虑自由面和多次波的反射响应, 则有

$$R_0^+(x_A, x_B, ) = R_0^+(x_B, x_A, ), \quad (8)$$

根据单向波相关类型的互易定理以及与接收点间的互易性, 最后得到:

$$2\text{Re}[R^+(x_A, x_B, )] = (x_{H,B} - x_{H,A}) \int_{\partial D_m} \left\{ T^+(x_A, x, ) \right\}^* T^-(x_B, x, ) d^2x, \quad (9)$$

其中  $\text{Re}[g]$  表示实部. 从上式可以看出, 反射响应  $R^+(x_A, x_B, )$  与传输响应  $T^+(x_A, x, )$  和  $T^-(x_B, x, )$  有关, 式中  $\left\{ T^+(x_A, x, ) \right\}^* T^-(x_B, x, )$  一项即为对表面两点 ( $x_A$  和  $x_B$ ) 进行互相关计算. 该论文作者还采用数字模拟证实了该项关系, 并指出采用的噪声记录越长, 计算得到的反射响应的“信噪比”越高.

### 3 展望

利用地震背景噪声提取格林函数是一个崭新、诱人的方法. 以前通常被认为无用的噪声, 现在可以挖掘出更多有用的信息, 并带来新的发展. 对地下结构的认识, 不再需要主动源, 而仅需要地震噪声这样的“被动源”.

该方法的发展可能会带来一些变革. 从工业角度来说, 石油勘探中不再依赖于人工爆破及震源车等. 直接记录背景噪声并进行实时处理, 可以获得低成本的地下结构和连续的油藏监测. 对于科学研究来说, 在传统的方法中需要特定的震源, 比如人工源和自然源. 人工源, 如人工爆破和可控源等等, 需要考虑经济成本, 以及对环境造成的危害; 自然源, 如天然地震, 需要对震源的精确测量. 在缺少对震源精确的定位, 或震源参数存在不确定性的情况下, 会给地下成像带来很大的偏差. 并且, 由于天然地震多发生在特定的地区, 分布很不均匀, 由此给成像带来的影响也不小. 随着利用地震噪声无源成像方法的发展, 甚至可以不再需要等待地震的发生来进行地下成像. 这对获取地震活动性较低地区的精细地下结构尤为重要.

现在的技术可以使得固定台站以及流动台站进行长时间、不间断的高采样记录. 随着日益增多的区域地震台网布设和越来越多的地震台阵探测研究开展, 该方法将会得到广泛的应用. 如果采用更为均

匀、密集的地震台阵, 甚至可以获得更高分辨率的地震成像. 这种新技术的应用, 对地震成像结果的水平分辨率以及垂向分辨率都将会有所提高<sup>[16]</sup>.

除此之外, 在地震学领域其他方面, 该方法也提供了新的思路. 比如促进了对地震背景噪声本身的来源及其特征的研究<sup>[42,43]</sup>, 以及行星地震学的发展. 最近, 地震学家将该方法应用在 Apollo 17 计划中采集的数据, 提取出面波信息, 获得了月球表面浅部 10 m 深的速度剖面<sup>[44]</sup>. 在月球上的成功应用说明, 在未来的行星计划(如火星探测)中, 虽然缺少足够的天然地震信息, 但通过利用地震背景噪声的互相关运算, 使得详细获取行星内部结构的信息将成为可能.

近年来提出发展城市地球物理 (Urban Geophysics), 其核心科学问题是建立城市地下三维地图<sup>[45]</sup>. 如何来获取城市地区地下的弹性波场, 除了发展绿色震源以外, 发展该方法或许可以作为另一条尝试的路径. 最近, 已经有人开始尝试利用城市内因建筑施工, 汽车以及行人引起的地震背景噪声来获取城市地区地下浅层结构<sup>[46]</sup>. 其优点是不必担忧传统处理手段中地震噪声的干扰, 以及在城市内因实施爆破或其他震源产生的响声等等的扰民行为, 而只是简单地布设仪器对地震背景噪声进行长时间的记录.

利用这样一个新方法还能否从背景噪声中提取更多的信息, 仍然有很多问题需要回答. 比如怎样进一步提高面波成像的深度和精度? 如何发展大尺度的体波成像? 根据这种方法能否超越利用传统地震信息进行的全球成像? 能否进一步提高精度, 得到随时间变化的 4D 地图? 等等.

从地震背景噪声中提取格林函数定会大大促进地震学的发展, 我们应当继续关注该方法的进展, 并开展相应的应用研究.

致 谢 感谢同王宝善博士的讨论.

### 参 考 文 献 (References):

- [1] 陈凤, 李宗宗, 黄建明, 李冬冬. 利用数字图像处理技术提地震剖面图像信噪比[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(4): 758 ~ 764.
- [2] 王典, 刘财, 刘洋, 王培茂, 许卓. 反射法地震勘探噪声消除技术研究[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 957 ~ 970.
- [3] 苑益军, 周芝旭, 牛滨华, 王焕弟, 刘爱香. 浅谈地震资料处理中的提高信噪比处理技术[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(2): 168 ~ 171.

- [4] Peter B. IASPEI new manual of seismological observatory practice[M]. Geo Forschungszentrum Potsdam, 2002.
- [5] Rickett J, Claerbout J. Acoustic daylight imaging via spectral factorization: helioseismology and reservoir monitoring [J]. *The Leading Edge*, 1999, 18:957~960.
- [6] Weaver R L, Lobkis O I. Ultrasonic without a source: thermal fluctuation correlations at MHz frequencies[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(13):134301.
- [7] Lobkis O I, Weaver R L. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2001, 110(6):3011~3017.
- [8] Weaver R L, Lobkis O I. Elastic wave thermal fluctuations, ultrasonic waveforms by correlation of thermal phonons[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003, 113:2611~2621.
- [9] Derode A, Larose E, Campillo M, *et al.* How to estimate the Green's function of a heterogeneous medium between two passive sensors? Application to acoustic waves[J]. *Appl. Phys. Letts.*, 2003, 83(15):3054~3056.
- [10] Malcolm A E, Scales J A, Tiggelen B A. Retrieving the Green function from diffuse, equipartitioned waves[J]. *Phys Rev E*, 2004, 70:015601(R).
- [11] Roux P, Fink M. Green's function estimation using secondary sources in a shallow water environment[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003, 113:1406~1416.
- [12] Roux P, Kuperman W A. Extracting coherent waveforms from ocean noise[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, 116:1995~2003.
- [13] Sabra K G, Roux P, Kuperman W A. Arrival-time structure of the time-averaged ambient noise cross-correlation function in an oceanic waveguide[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005, 117:164~174.
- [14] Campillo M, Paul A. Long-range correlations in the diffuse seismic coda[J]. *Science*, 2003, 299:547~549.
- [15] Wapenaar K, Thorbecke J, Draganov D. Relations between reflection and transmission responses of three-dimensional inhomogeneous media[J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 156:179~194.
- [16] Shapiro N M, Campillo M. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, L07614, doi:10.1029/2004GL019491.
- [17] Snieder R. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase [J]. *Physical Review E*, 2004, 69, 046610.
- [18] Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, *et al.* High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise [J]. *Science*, 2005, 307:1615~1618.
- [19] Roux P, Sabra K G, Gerstoft P, *et al.* P-waves from cross-correlation of seismic noise[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L19303, doi:10.1029/2005GL023803.
- [20] Passive seismic and drill-bit experiments using 2-D arrays by Cole (1995 doctoral dissertation, Stanford University; <http://sepwww.stanford.edu/public/docs/sep86/>).
- [21] Duvall T L, Jefferies S M, Harvey J W, *et al.* Time-distance helioseismology[J]. *Nature*, 1993, 362:430~432.
- [22] Larose E, Derode A, Campillo M, *et al.* Imaging from one-bit correlations of wideband diffuse wave fields[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95:8393~8399.
- [23] Hennino R, Tregoures N, Shapiro N M, *et al.* Observation of equipartition of seismic waves[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86:3447~3450.
- [24] Friedrich A, Kruger F, Klinge K. Ocean-generated micro-seismic noise located with the Grafenberg array[J]. *J. Seismol.*, 1998, 2:47~64.
- [25] Lognonne P, Clevede E, Kanamori H. Computation of seismograms and atmospheric oscillations by normal-mode summation for a spherical Earth model with realistic atmosphere [J]. *Geophys. J. Int.*, 1998, 135:388~406.
- [26] Tanimoto T. Excitation of normal modes by atmospheric turbulence: Source of long-period seismic noise[J]. *Geophys. J. Int.*, 1999, 136:395~402.
- [27] Stehly L, Campillo M, Shapiro N M. Origin of the seismic noise investigated from its correlation properties. *Eos Trans. AGU*, 2005, 86(52), Fall Meet. Suppl.
- [28] Fry B, Stehly L, Campillo M, *et al.* Surface wave tomography of the central alps: merging traditional source and non-traditional noise dispersion measurements. *Eos Trans. AGU*, 2005, 86(52), Fall Meet. Suppl.
- [29] Takagi N, Sato H, Nishimura T, *et al.* Group velocity measurement of Rayleigh and Love waves in northeastern Japan on the basis of the cross-correlation analysis of micro-seisms. *Eos Trans. AGU*, 2005, 86(52), Fall Meet. Suppl.
- [30] Yao H, de Hoop M D. High resolution surface-wave tomography in SE tibet from ambient seismic noise and a two-station method. *Eos Trans. AGU*, 2005, 86(52), Fall Meet. Suppl.
- [31] Bensen G D, Ritzwoller M H, Shapiro N M, *et al.* Extending ambient noise surface wave tomography to continental scales: application across the united states. *Eos Trans. AGU*, 2005, 86(52), Fall Meet. Suppl.
- [32] Ritzwoller M H, Yang Y, Shapiro N M, *et al.* Broad-band ambient noise surface wave tomography across eurasia: early results. *Eos Trans. AGU*, 2005, 86(52), Fall Meet. Suppl.
- [33] Campillo M, Stehly L, Shapiro N. Absolute time measurements from seismic noise: monitoring temporal velocity changes and correction of station clock drifts. *Eos Trans. AGU*, 2005, 86(52), Fall Meet. Suppl.
- [34] Bensen G D, Ritzwoller M H, Shapiro N M, *et al.* Extending ambient noise surface wave tomography to continental scales: application across the united states. *Eos Trans. AGU*, 2005, 86(52), Fall Meet. Suppl.
- [35] Weaver R L. Information from Seismic Noise [J]. *Science*,

- 2005, 307:1568 ~ 1569.
- [36] van Tiggelen B A. Green function retrieval and time reversal in a disordered world[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91:243904.
- [37] Derode A, Larose E, Tanter M, *et al.* Recovering the Green's function from field-field correlations in an open scattering medium[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003, 113(6): 2973 ~ 2976.
- [38] Derode A, Tourin A, Fink M. Random multiple scattering of ultrasound. Is time-reversal a self-averaging process? [J]. *Phys. Rev. E*, 2001, 64(3):036606 ~ 036618.
- [39] Cassereau D, Fink M. Time-reversal of ultrasonic fields- Part III: theory of the closed time-reversal cavity [J]. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr. Freq. Control*, 1992, 39(5):579 ~ 592.
- [40] Roux P, Sabra K G, Kuperman W A, *et al.* Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005, 117:79 ~ 84.
- [41] Claerbout J F. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response[J]. *Geophysics*, 1968, 33:264 ~ 269.
- [42] Shapiro N M, Ritzwoller M H, Bensen G D. Locating the Source of the Twenty-six-second Microseism by Cross-correlating Records of Ambient Seismic Noise. *Eos Trans. AGU*, 2005, 86(52), Fall Meet. Suppl.
- [43] Krüger F, Pedersen H A. Influence of the seismic noise characteristics on noise correlations. *Eos Trans. AGU*, 2005, 86(52), Fall Meet. Suppl.
- [44] Larose E, Khan A, Nakamura Y, *et al.* Lunar subsurface investigated from correlation of seismic noise [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32, L16201, doi: 10.1029/2005GL023518.
- [45] 陈颢,陈龙生,于晟. 城市地球物理学发展展望[J]. *大地测量与地球动力学*, 2003, 23(4):1 ~ 4.
- [46] Folger D S, Doser D, Velasco I, *et al.* Determining subsurface structure from microtremors using a passive circular array. *Eos Trans. AGU*, 2005, 86(52), Fall Meet. Suppl.