

利用经验格林函数识别地下核爆炸与天然地震*

何永锋 陈晓非 **

(北京大学地球与空间科学学院地球物理学系, 北京 100871; 西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要 利用目标区域内的小当量地下核爆炸事件作为经验格林函数(EGF), 来估计发生在该目标区域内的可疑地震事件的相对震源时间函数(RSTF). 天然地震和地下核爆炸的震源物理过程的本质区别会通过震源时间函数, 表现出不同的特征. 研究结果表明, 地下核爆炸的远场 RSTF 表现为简单的、与方位角无关的单脉冲或双脉冲形式, 宽度约为 1.0 s; 而基于地下核爆炸事件作为经验格林函数反演得到的天然地震的 RSTF 通常表现出很复杂的形式; 不仅表现为周期不固定的多脉冲形式, 而且随方位角、震中距的变化而变化. 对目标区域范围内发生的可疑地震事件, 利用已有的经验格林函数来反演其 RSTF, 并通过对 RSTF 的分析来研究是否为地下核爆炸, 对地下核爆炸检测及识别研究不失为一种有效的参考手段.

关键词 目标区域 经验格林函数 相对震源时间函数 反卷积

随着全面核禁试条约(CTBT)的签订, 各条约国将如何监测及识别地下核爆炸的研究工作摆在了首位, 其中, 基于地震学的方法, 是最主要的远区识别手段. 地下核爆炸的识别通常是通过若干判据联合实现的, 一个好的判据应该满足如下要求: (1)能够将地下核爆炸事件和天然事件完全区分开来; (2)具有明确的理论根据; (3)不易被用模拟天然地震的方法所干扰; (4)易于操作, 以便能够在较短的时间内做出判断. 迄今为止, 还没有一条判据能够同时满足这四个要求.

地下核爆炸地震和天然地震的本质区别在于他们的震源特性不同, 包括空间特性和时间特性的不

同. 地下核爆炸空间震源机制被认为主要是球对称压缩的, 远区震源时间函数应表现为单脉冲形式^[1], 体现了能量的快速释放过程; 而绝大多数天然地震的空间机制被认为是多个不同空间取向的破裂面形成的有限剪切破裂, 通常破裂面积很大, 远区震源时间函数通常表现为持续时间较长、周期变化较大的复杂的多脉冲形式^[2,3]. 因此, 从震源特征的研究角度出发, 来完善识别地下核爆事件与天然地震技术, 其理论依据明确, 可信度更高. 地下核试验往往在一些特定的地区进行, 如美国的内华达试验区, 前苏联的塞米帕拉金斯克试验区等, 本文将这些特定区域称为目标区域, 并且只对发生在目标区域内的可疑事

收稿日期: 2004-07-28; 接受日期: 2005-08-11

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40134010)

** 联系人, E-mail: xfchen@pku.edu.cn

件进行识别, 发生在这些目标区域内的地震事件通常都会被列为重点可疑事件加以认真研究. 因此, 及时有效地识别或澄清这些可疑事件对维护国家声誉及国防安全具有重要意义.

自从Hartzell的先驱性工作以来, 利用经验格林函数(EGF)方法来识别地下核爆炸与天然地震得到了较快的发展^[3,4], 所用的方法基本上为: 将小地下核爆炸事件作为EGF来反演大地下核爆炸的震源时间函数, 将小天然地震事件作为EGF来反演较大天然地震事件的源时间函数, 然后进行对比分析. 小天然地震事件, 尤其是余震事件, 其震源过程与被反演的大天然地震事件的震源过程非常相似, 所以, 所得到的大天然地震事件的震源时间函数是较真实的, 它更能反映天然地震的复杂物理过程, 但是, 在实际操作时, 小天然地震事件的选取并非易事, 有时可能根本就没有可用来作为EGF的小天然地震事件发生. 本文在基于目标区域的概念上, 提出了一种新方法: 统一利用已有的地下核爆炸事件作为EGF来反演目标区域的一切可疑事件的RSTF, 并通过RSTF的复杂性分析来识别目标区域内的天然地震与地下核爆炸事件. 1999年的一次 $m_b=5.4$ 的天然地震, 其震中恰好位于我们定义的目标区域范围内, 能否利用EGF方法澄清该事件是否为地下核爆炸, 为本文提出的目标区域监测方法的可行性, 提供了一次很好的检验机会. 研究表明, 天然地震事件与地下核爆炸的震源物理过程, 可以通过它们的相对震源时间函数(RSTF)很好地表现出来, 并且具有明显的区别; 该方法从震源的角度出发, 不仅理论依据充分, 而且易于操作.

1 方法及原理

所谓的经验格林函数方法, 就是利用与被估计的目标地震事件具有相近的震源机制的小地震事件^[5], 来消除路径^[6]、观测点场地的影响及记录仪器响应的影响^[7]. 欲从地下核爆地震记录中提取出描述震源特征的震源时间函数一般需要考虑如何从观测资料中去除波的传播路径的影响、观测点场地的影响及记录仪器响应的影响. 实际地球介质是复杂的, 因此计算真实地球模型的波传播响应及场地影响并非易事, 即理论格林函数往往不能满足某些应用方面

的要求, 在这种情况下, 经验格林函数(EGF)近年来被广泛应用于路径、观测点场地的影响及记录仪器响应的影响的估计中, 它可以有效地去除复杂传播路径的影响及场地影响, 为提取能够反映一定震源特征的相对震源时间函数(RSTF)提供了有效手段. 因为天然地震往往伴有余震事件的发生, 而余震事件是很好的经验格林函数, 所以EGF方法被广泛用来合成天然地震的波形^[8]、震源函数特征的研究等方面, 如破裂过程^[9]、震源频谱特征^[10]、震源地震矩等^[7].

1.1 用经验格林函数方法求相对震源时间函数

目标地震事件记录 $U(\theta, t)$ 通常可以表示为源时间函数 $S(t)$ 、路径响应 $P(t)$ 、观测点场地响应 $A(t)$ 及记录仪器响应 $I(t)$ 的卷积

$$U(\theta, t) = M_0 R_T(\theta) S(t) * P(t) * A(t) * I(t), \quad (1)$$

其中, M_0 为标量地震矩, $R_T(\theta)$ 为震源辐射因子. 相应地, 在同一台站接收到的发生在同一地点的 EGF 的记录 $G(\theta, t)$ 可表示为

$$G(\theta, t) = m_0 R_G(\theta) S_G(t) * P(t) * A(t) * I(t), \quad (2)$$

其中, m_0 , $R_G(\theta)$ 和 $S_G(t)$ 分别为小事件的标量地震矩、震源辐射因子和震源时间函数; 小事件的拐角频率要高于目标事件的拐角频率, 所以, 在小于目标事件拐角频率范围内我们可以假定小地震事件的震源时间函数为 δ 函数. 目标事件相对于小地震事件的 RSTF 由小地震事件记录反卷积目标事件的记录来定义, 即在频率域中

$$\tilde{S}_R(\theta, \omega) = \frac{\tilde{U}(\theta, \omega)}{\tilde{G}(\theta, \omega)} = \left(\frac{M_0 R_T(\theta)}{m_0 R_G(\theta)} \right) \tilde{S}(\omega), \quad (3)$$

$\tilde{U}(\theta, \omega)$, $\tilde{G}(\theta, \omega)$ 和 $\tilde{S}_R(\theta, \omega)$ 分别为频域中的目标事件、EGF的源时间函数及相应RSTF, 再由傅里叶变换得到时间域的RSTF. 实际计算中, 基于频谱相除的反卷积过程是一个不稳定的过程, 尤其是高频部分除以分母中接近零的值会成为结果的优势成分, 从信号与噪声频谱比可看出, 这部分成分往往是我们不需要的. 为了克服这种不稳定性, 我们采用高斯滤波与最低水准限制相结合的办法来优化反卷积过程^[11].

$$\tilde{S}_R(\theta, \omega) = \frac{\tilde{U}(\omega)\tilde{G}(\omega)^*}{H(\omega)} \cdot g(\omega) \quad (4)$$

其中， $H(\omega) = \max\{\tilde{G}(\omega)\tilde{G}(\omega)^*, c \max[\tilde{G}(\omega)\tilde{G}(\omega)^*]\}$ ， $g(\omega) = e^{-\omega^2/4a^2}$ ， $\tilde{G}(\omega)^*$ 为 $\tilde{G}(\omega)$ 的复共轭， c 为水准量，其取值视具体事件而定，范围一般是 $0 < c < 1$ 。高斯函数 $g(\omega)$ 用来排除高频噪声，参数 a 控制着高斯滤波器的宽度，其取值原则是使高斯时间函数的脉冲宽度与观测地震波中所考虑的震相的脉冲宽度大体相当，以保证源时间函数具有较高的分辨率，又不含有实际上并不存在的高频信息；最后对 $\tilde{S}_R(\theta, \omega)$ 做反傅里叶变换得到相对时间函数 RSTF。

1.2 用相对震源时间函数识别目标区域内的地下核爆炸与天然地震

利用相对震源时间函数可以识别地下核爆炸与天然地震事件，其原理如下：

首先在目标区域内选择一已知较小的地下核爆炸事件作为经验格林函数，相应地， $R_G(\theta) = 1$ 。如果发生在该目标区域内的目标事件是核爆炸，则 $R_T(\theta) = 1$ ，由(3)式反傅立叶变换得到

$$S_R(\theta, t) = \left(\frac{M_0}{m_0}\right) S_N(t), \quad (5)$$

看出 RSTF 正比于目标事件的震源时间函数 $S_N(t)$ ，比值为—常数，与方位角无关。如果发生在目标区域的事件为天然地震，则 $R_T(\theta) \neq 1$ ，仍为一具有方向性的辐射因子。相应地，所得到的 RSTF 为

$$S_R(\theta, t) = \left(\frac{M_0}{m_0} R_T(\theta)\right) S_E(t) \quad (6)$$

与地下核爆炸事件的 RSTF 相比，它不仅正比于目标事件的震源时间函数 $S_E(t)$ ，同时也正比于震源辐射因子，即与方位角有关。此外，地下核爆炸事件的震源时间函数 $S_N(t)$ 与天然地震事件的震源时间函数 $S_E(t)$ 也有很大的差异。基于 RSTF 的这些差异，我们可以识别地下核爆炸事件与天然地震。

2 应用实例

文中所利用的数据为发生在本文定义的某一目

标区域中的 2 次地下核爆炸地震数据及 1 次天然地震数据，数据采自 IRIS(www.dmc.iris.washington.edu)；表 1 给出了这些事件的具体参数(因涉及到敏感地区，事件的位置及发震时刻均以 xx 替代，如读者需要，请与作者联系)，地下核爆炸的发震时间、震中位置、震级等参数引自 Li^[3]。本文利用宽频带远震 P 波资料来反演 RSTF；时间窗宽度取 10 s，补零至 512 点。代号为 T1, T2 的事件为欲求震源时间函数的目标事件，EGF 即为经验格林函数事件。

表 1 事件基本参数列表

代号	发震时间 (年-月-日)	经度	纬度	震级/mb	事件性质
T1	xx-xx-21	xx.x2°	xx.x3°	6.5	地下核爆炸
EGF	xx-xx-10	xx.x3°	xx.x9°	5.0	地下核爆炸
T2	xx-xx-30	xx.x8°	xx.x3°	5.4	天然地震

表 2 记录台站基本参数列表(单位：度)

台站名称	col	kiv	kev	chto
震中距	65	34	94	24
方位角	23	290	332	350

图 1 为目标事件 T1, EGF 的地震记录波形图(垂向)及 T1 的 RSTF, T1 右上角为记录台站名称,纵轴单位为点数(Counts)。从该图中可以看出，相邻地下核爆炸在同一台站记录的波形具有一定的相似性，也说明这两次地下核爆炸的震源特征是相似的(表 2)。

从图中的相对震源时间函数(幅值经归一化处理)可看出，虽然各个记录台站的方位角和震中距变化很大，分别从约 23°到 350°及 25°到 95°，但反演出来的 RSTF 却很相近，都为简单的脉冲形式，符合地下核爆炸的远区震源时间函数特征。

1999 年 1 月发生的一次 $m_b=5.4$ 的天然地震，其震中位置与曾经公布过的该目标区域的历次地下核爆炸的震中位置非常近，显然位于我们定义的目标区域范围内，能否利用 EGF 方法澄清该事件是否为地下核爆炸，为检验本文提出的目标区域监测方法的可行性，提供了一次很好的机会。首先，根据其定位结果，我们假设该事件为一次地下核爆炸，并根据其震级大小，选择合适的地下核爆炸地震作为经验格林函数来反演其远区 RSTF，并根据其 RSTF 特征，来判断其源特征是倾向于爆炸源特征还是倾向于天然地震源特征。

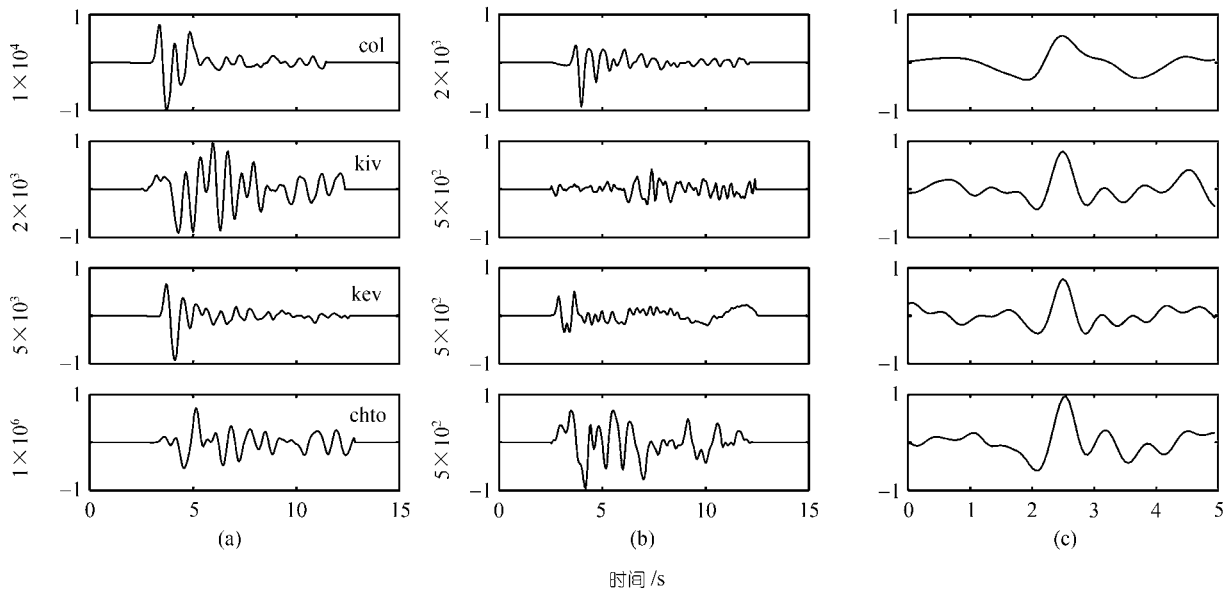


图 1

(a) 目标事件 T1 速度记录波形; (b) EGF 事件速度记录波形; (c) 目标事件 T1 的 RSTF

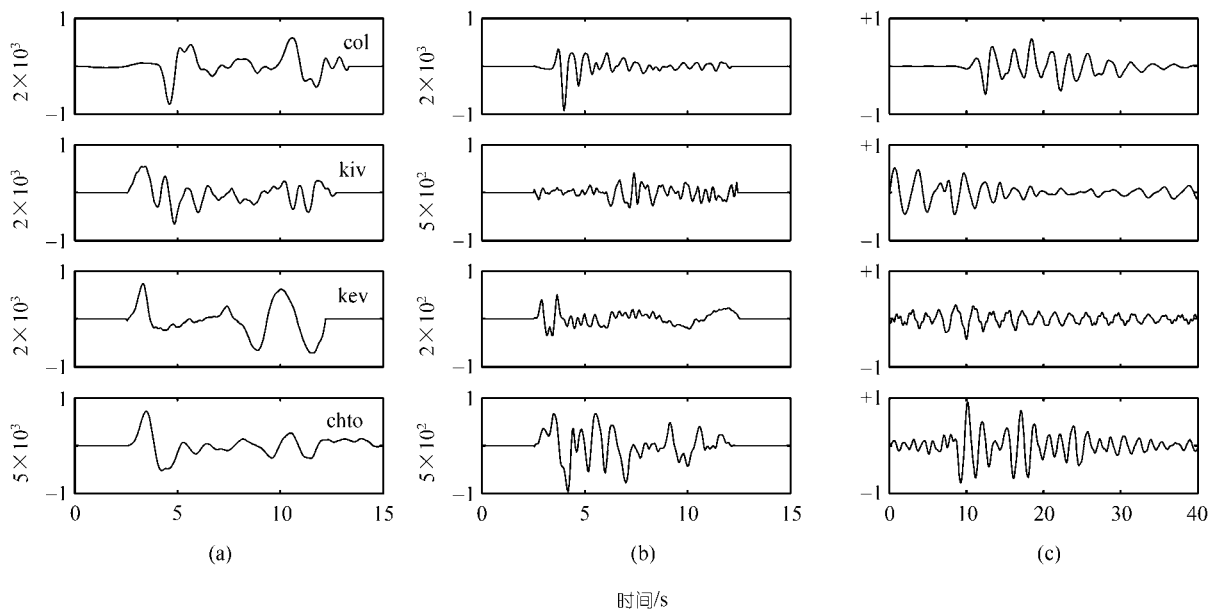


图 2

(a) 目标事件 T2 速度记录波形; (b) EGF 事件速度记录波形; (c) 目标事件 T2 的 RSTF

图 2 为目标事件 T2、EGF 的垂向宽频带速度记录波形及相应的 RSTF; 可见其 RSTF 是非常复杂的, 持续周期通常为几十秒, 表现出多脉冲形式, 而且表现出很强的方向性, 与地下核爆炸的结果差异很大,

导致这种差异的因素可以从公式(6)看出来, 天然地震的 RSTF 不仅与 $R_T(\theta)$ 成正比, 而且与经验格林函数的辐射因子及其源时间函数有关, 通常, 天然地震的震源为多重位错源, 其辐射因子表现出很强的方

向性；其震源时间函数一般表现为持续时间较长的多次破裂形式，另外，由于天然地震震源深度一般较深，使得其传播路径与 EGF 事件的传播路径差异较大，导致我们选取的 EGF“失效”，即使从理论上讲该 EGF 的选取是合理的，如果我们要反演的可疑事件为天然地震，导致这种“失效”性也是情理之中的，由于这种“失效”性导致的 RSTF 的复杂性也正是我们利用小当量地下核爆炸事件作为 EGF 来识别天然地震与地下核爆炸的理论依据。

综上所述，我们有理由认为该目标事件极有可能是一次天然地震事件。

3 结论

利用小地下核爆炸事件作为经验格林函数，我们分析了某一地下核试验场地下核爆炸地震震源的相对时间函数，表现为简单的脉冲形式，持续时间约为 1.0 s；而发生在该目标区域的天然地震的远区 RSTF 往往表现出随方位角变化的、持续周期很长的多次脉冲形式。

基于目标区域的概念，利用经验格林函数方法反演震源时间函数，有可能对该地区范围内发生的地震事件的震源特征，给出某种意义上的定量解释，这样，我们就可以对有核国家的地下核试验场区，进行有目标范围的监测，只要经验格林函数选取的合理，通过本文的分析可知，利用小地下核爆炸事件作为经验格林函数来反演目标区域内的可疑事件的相对震源时间函数来作为识别手段，不仅理论依据充分，而且易于操作，可信度较高，不失为一种较好的判据。

参 考 文 献

- 1 Hough S E. Empirical Green's Function Analysis of Recent Moderate Events in California. *Bull Seism Soc Am*, 2001, 91: 456~467
[\[DOI\]](#)
- 2 许力生, 陈运泰. 利用经验格林函数方法从长周期数字资料中提取共和地震的震源时间函数. *地震学报*, 1996, 18: 156~169
- 3 Li Y P, Toksoz M N, William R. Source time functions of nuclear explosions and earthquakes in central Asia determined using empirical Green's functions. *J Geophys Res*, 1995, 100: 659~672
[\[DOI\]](#)
- 4 Li Y P, Toksöz M N, Rodi W. Investigation of source process of large earthquakes and nuclear explosions with the EGF method. *Seismol Res Lett*, 1993, 64:31~40
- 5 Frankel A. Simulating strong motions of large earthquakes using recordings of small earthquakes: the Loma Prieta mainshock as a test case. *Bull Seism Soc Am*, 1995, 85: 1144~1160
- 6 Mueller C. Source pulse enhancement by deconvolution of an empirical Green's function. *Geophys Res Lett*, 1985, 12: 33~36
- 7 Aki K, Richards P G. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. San Francisco, W H Freeman and Co, 1980, 1~557
- 8 Hutchings L, Wu F. Empirical Green's functions from small earthquakes: A waveform study of locally recorded aftershocks of the 1971 San Fernando earthquakes. *J Geophys Res*, 1990, 95: 1187~1214
- 9 Li Y P. Source properties of two microearthquakes at Kilauea volcano, Hawaii. *Bull Seism Soc Am*, 1988, 78: 1123~1132
- 10 Archuleta R J, Cranswick E, Muller C, et al. Source parameters of the 1980 Mammoth lakes, California earthquake sequence. *J Geophys Res*, 1982, 87: 595~607
- 11 Clayton R W, Wiggins R A. Source shape estimation and deconvolution of teleseismic bodywaves. *Geophys J Rastr Soc*, 1976, 47: 151~177