

Visualization Methods for Discriminating between Earthquakes and Explosions

Ye Tian¹, Hanming Huang^{1*}, Yinju Bian², Chenjie Zhao¹

¹College of Computer Science and Information Engineering, Guangxi Normal University, Guilin

²Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing

Email: *hmmmentor@gmail.com

Received: Apr. 27th, 2014; revised: May 25th, 2014; accepted: Jun. 1st, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Seismic signals classification and discrimination between earthquakes and explosions are essential technology for implementation of the comprehensive nuclear test ban treaty (CTBT) and also are very important for keeping national security and world peace. Since 1959, this task has continuously been a hot spot and a hard problem of seismological researches. Based on the principles of scientific data visualization, using novel aesthetic graphics to reveal a lot of useful information contained in the data, this paper makes an attempt to put forward a kind of integrative visualization method for an event—earthquake or explosion with multi-observatories data in different locations. The method is to draw many intuitive graphics in a compact and integrative array form for each event in order to visually and conveniently distinguish earthquakes and explosions. Each picture in the graphical array for an event is drawn by an implementation of Symmetric Dot Pattern (SDP) for a seismic signal from a channel of an observatory. Totally 35 earthquake events and 27 explosion events are considered and drawn into arrays of SDP. These pictorial arrays of SDP show considerably significant differences between earthquakes and explosions. This provides a new potential measure to rapidly (can be less than 5 minutes) recognize the seismic source type—explosion or earthquake, whenever the seismic signal has been observed and prepared.

Keywords

Seismic Source Type, Visualization, Symmetric Dot Pattern (SDP), Earthquake, Explosion

区分天然地震和人工爆炸的可视化方法

*通讯作者。

田野¹, 黄汉明^{1*}, 边银菊², 赵晨杰¹

¹广西师范大学计算机与信息工程学院, 桂林

²中国地震局地球物理研究所, 北京

Email: nhmmentor@gmail.com

收稿日期: 2014年4月27日; 修回日期: 2014年5月25日; 录用日期: 2014年6月1日

摘要

地震信号分类与天然地震与人工爆炸识别是实施全面禁止核试条约(CTBT)的必不可少的技术手段, 对维护国家安全和世界和平都极其重要。自1959年来地震信号分类与天然地震与人工爆炸识别一直是地震学研究的热点和难点。本文依据科学数据可视化原则, 采用新颖的具有美感的图形揭示大量数据之中所蕴涵的有用信息, 试图提出一种以一个事件在多个不同位置观测台站的观测数据的综合可视化方法, 绘制出可直观区分天然地震和人工爆炸的图形。可视化方法是采用图阵形式, 每一事件的多个台站的各观测地震波形绘制成一个紧凑的和一体化的图形阵列; 图阵中的每一个图形从一个事件某一个观测台站同一个通道的时域波形采用对称点模式绘制。共绘制了35个地震事件和27个爆炸事件的对称点模式图阵。结果表明: 从这些事件的对称点模式图阵上看, 地震事件和爆炸事件的区别是相当显著的。这为快速识别震源类型提供了一个很有潜力的新工具, 只要地震波形已被观测得到了且可使用了, 可以在少于5分钟内做出推断。

关键词

震源类型, 可视化, 对称点模式, 天然地震, 人工爆炸

1. 引言

地震仪可以记录天然地震事件的地震波信号, 当然也可以记录非天然地震事件的振动信号。非天然地震事件主要包括人工爆炸、矿井坍塌、工厂机械震动等。由于非天然地震事件中的人工爆炸与天然地震的波形极为接近, 给各地的地震台网所测的地震波形数据的分析带来了很大的困难。人工爆炸和天然地震的识别对地震资料分析、区域天然地震的统计和地震预测的研究都有极其重要的作用。通过对地震台网所测得的地震波形分析, 用一系列的波形处理方法可以有效地识别天然地震和人工爆炸。20世纪50年代, 地震学家利用不同距离上的测震资料对核爆与天然地震的识别进行了广泛的研究和探索[1]。

天然地震大多为构造地震, 且多发生在地下10公里以上的深度[2], 此深度一般为花岗岩层或玄武岩层[3]。地震震源为非对称剪切源, 地壳弹性介质受到巨大应力的作用[4], 发生岩石破裂、岩层错位的结果。两个错位岩石面受到两种力的影响: 一方受压, 形成压缩波; 另一方被拉伸, 形成膨胀波。纵波初动方向由一点向四周扩散。天然地震持续时间较长, 所以波成分多样化, 衰减慢, 震相的低频高频部分呈现均匀分布。

由于技术的限制, 人工爆炸一般发生距地平面深度为零到几十米, 由于爆炸只是气体向外扩张, 震源为膨胀源, 能量快速释放, 使周围的岩体介质受到不同方向的压缩, 只产生纵波(P波), 初动均向上。与横波(S波)相比, P波极为发育。随着P波的传播, 当距震中距50 Km以上时, 会产生瑞利面波[5]。由于爆炸点的岩石层介质的不同, 也会产生S波, P波比S波的振幅大。由于爆炸是瞬间发生, 震源浅, 使高频成分大多被浅层的不均匀岩石层吸收[6][7], 波形的衰减较快, 震相急促短暂[3][8]。地震监测点

离爆炸震源的距离越远，检测到的高频部分越少。达到一定距离后，排除噪声的影响，波形中高频成分较少。

以上是识别天然地震和人工爆炸的理论基础。综上所述，由于天然地震力学机制复杂且持续时间长、深度大，而人工爆炸是近地表瞬时性的力学膨胀，所以，比起人工爆炸，天然地震激发出的频谱“分散”并且衰减缓慢。由于震源力学机制的不同，导致信号频域的不同，这是识别时域波形的重要依据。

2. 天然地震和人工爆炸的频谱分析

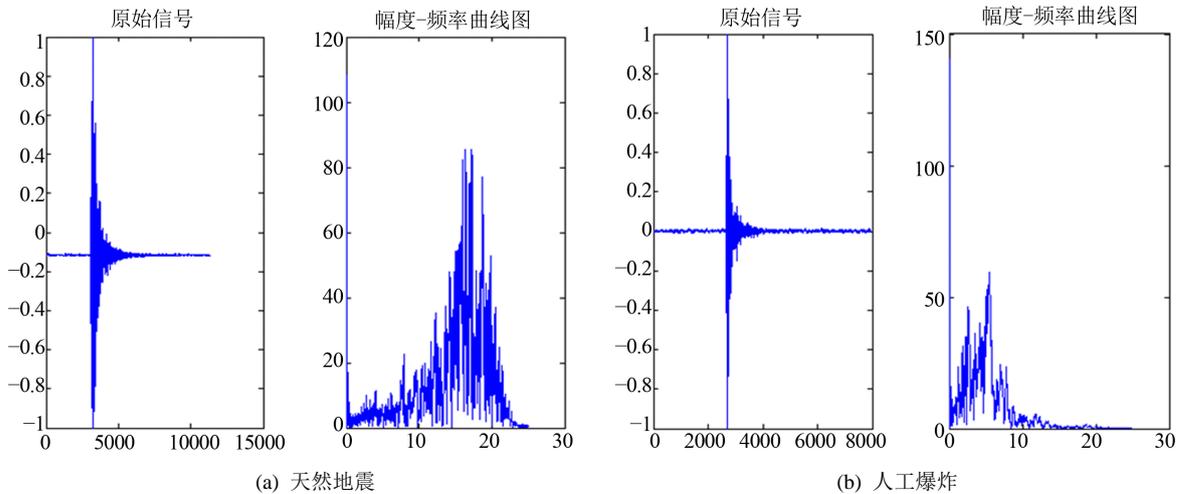
2.1. 频谱范围选择

由于天然地震和人工爆炸的震源性质不同，地震的频谱同人工爆炸的频谱有很大区别。研究者已经提出一些用于识别不同震源类型的特征和方法，例如震级比[9]、P波与S波振幅比[10]、倒谱[11]、小波多尺度时频分析[12]、P波和S波的信噪比计算[13]和频率拐角[14]等方法。

本文对35个地震事件和27个爆炸事件的所有台站波形(每个事件包括近100个台站波形)进行时频变换(这62个事件的来源见3.1和文献[24])。这些事件的波形数据取自采样频率为50 Hz的地震测量仪，测得频谱在0~25 Hz之间。从每个事件中随机抽取10个台站波形，即350个地震源数据和270个爆炸源数据，利用傅里叶变换将不同震源类型的时域波形作时频变换，得到时域波形的频谱。计算频谱能量，350个地震震源数据的能量谱在频域0.1~20 Hz之间的能量占总能量的91%，270个爆炸震源数据的能量谱在频域0.1~15 Hz之间的能量占总能量的93%。通过这些实验分析知，地震事件频域范围界于0.1~25 Hz，其中20~25 Hz频域对应的幅值较小，爆炸事件有效频域范围多为0.1~15 Hz之间(如图1所示)。根据以上分析，考虑采样期间噪声的影响，本文在频域范围为0.1~20 Hz研究不同类型的震源，可以消除噪声的影响，同时保持所有的显著频域特征。

通过文献研究(见表1)和图1的天然地震与非天然地震时域、频域波形对比，分析变换的特征时域和频域，有如下结论：

- 1) 天然地震频谱比爆炸频谱宽；
- 2) 天然地震频谱相对集中于高频区，人工爆炸频谱相对集中于低频区；



(原始信号：横轴表示地震台站间隔采样点的个数；纵轴表示地震台站测得的计数值的归一化后的结果。幅度-频率信号：横轴表示频率，单位 Hz；纵轴表示对相应频率波形的个数)

Figure 1. The comparison of original time-domain signal and amplitude-frequency distribution
图 1. 原始时域信号与幅度-频率曲线图的对比

Table 1. Frequency domain characteristics and frequency range proposed in literature to identify earthquakes and explosions**表 1.** 文献中提出的识别地震和爆炸的频率特征和主频域范围

频率范围(Hz)	频率特征说明	来源文献
0.5~20	由 6 阶巴特沃斯带通滤波得到, 趋势背景与高频成分已消除, 只保留特征频带信息	[1]
0~25	多数的天然地震频谱分布较“分散”, 而核爆相对较“集中”	[2]
1~8	通过时间窗选取具有代表性的区域频谱 1~8 Hz 范围	[14]
1~20	P 波和 S 波的平均频率: 地震的大于爆炸的, 地震时频谱比爆炸“分散” 在 1~20 Hz 范围内, 地震频谱有多个峰值, 而爆炸只有一个或两个峰值	[15]
0.1~25	选择 0.1~25 Hz 频带进行小波变换, 将整个信号频带 0.1~25 Hz 均分成 32 个频带	[16]
0.7~25	小波变换, 地震频段集中在 6.25~25 Hz 之间, 而爆炸集中在 0.7~3.1 Hz 之间	[17]
0~25	天然地震波频率成分丰富, 频带宽度较人工爆炸要宽	[18] [19]
0~25	在同样震级下, 爆炸源的拐角频率要小于天然地震的拐角频率	[20] [21]
0.01~8	80 个地震事件, 主导频率跨越 0.01~7.2 Hz 范围, 作者选取 0.01~8 Hz 计算平均能量	[22]
1~15	对地震和爆炸进行波谱分析, 结果显示其频率主要集中在 1~15 Hz 范围内	[23]

3) 天然地震和人工爆炸的频谱都集中分布在 0.1~20 Hz 的频带中。

通过对两类频域的分析, 进而选择不同的频域转化成时域波形进行实验分析, 进一步提取时域波形特征信息。

2.2. 频域不同的时域波形的识别

利用以上事件的波形数据, 在频谱为 0.1~20 Hz 中选取不同频率段, 并对频率段中的波形进行处理、分析。通过图像可视化, 不同的频域段对应的时域波形可以被直观地区分开来。为使对比过程更全面, 将频谱的时域波形识别分为两类: 孤立频域的时域波形对比和交叉频域的时域波形对比。

2.2.1. 孤立频域的时域波形对比

孤立频域对比是从两个不相交的频域中分别抽取一定量的频率。每个孤立频域中随机离散抽取 n 个频率。抽取的频率通过傅里叶逆变换转换为时域信号, 得到时域波形 $S(t)$ 。设置 0~10 Hz 和 10~20 Hz 两个频域, 分别对指定的两个频域进行抽取随机频率, 同时随机生成相位和振幅, 组成随机的时域信号。如图 2 所示。

2.2.2. 交叉频域的时域波形对比

在天然地震和人工爆炸的时域波形中, 分别对应着不同的频谱。由 1.1 得出的结论可知, 天然地震和人工爆炸的频谱交叉在一起。于是, 将频谱分为宽度不同的不同频域段, 即 0~15 Hz 和 5~20 Hz。按照上文提出的独立频谱分析方法, 生成如图 3 所示的时频波形图。通过对图 3 中(a)、(b)两图的对比, 可以看出, 与独立频谱相同, 包含高频的时域波形比包含低频的时域波形要复杂。对图 3(a)、(b)、(c)对比, 频谱范围越大, 对应的时域信号越复杂。

2.3. 频谱成分与波形复杂程度的关系

通过独立频谱和交叉频谱的分析, 可以得出如下结论:

- 1) 高频域比低频域的时域波形密集。
- 2) 频谱越宽, 对应的时域波形越复杂。

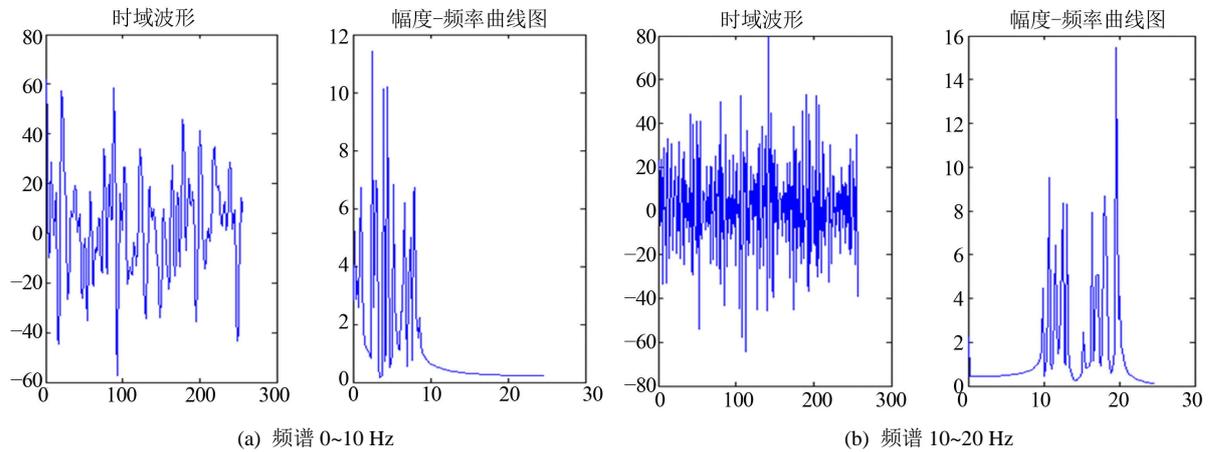


Figure 2. Time-domain signal and amplitude-frequency distribution generated from two different and independent spectrum

图 2. 两个独立频谱生成时域波形和幅度 - 频率波形

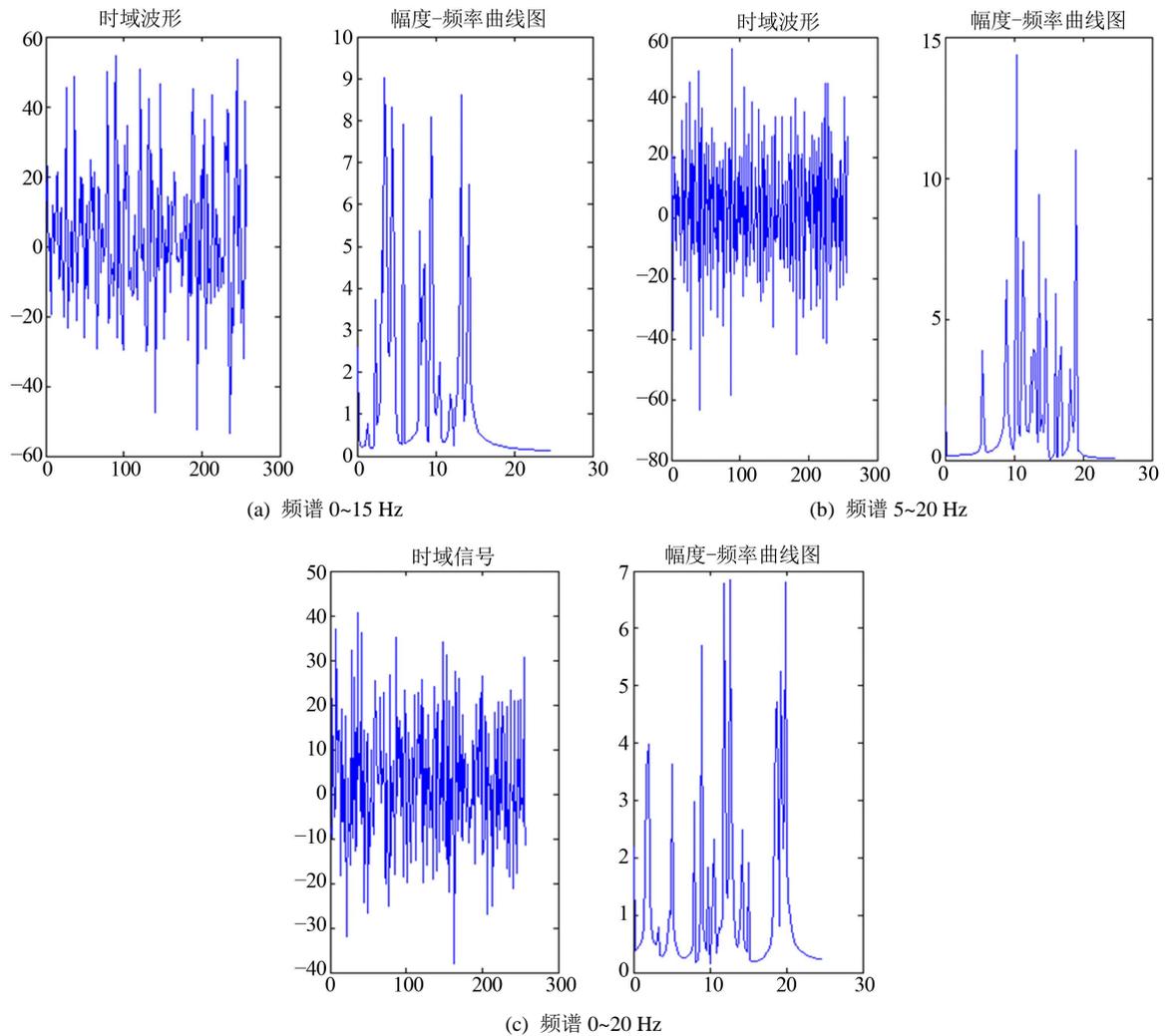


Figure 3. Time-domain signal and amplitude-frequency distribution generated from cross spectrums

图 3. 交叉频谱生成时域波形和幅度 - 频率波形

该结论与文献提供的天然地震和人工爆炸的频域的不同取值范围形成对应关系。不同的震源类型对应的力学机制不同，其产生的信号有效特征的频域范围也有所不同，因此，地震和爆炸的时域波形也各不相同。地震的时域波形更为复杂，而且各个台站测得的波形有过度的趋势。爆炸的时域波形相对简单。

3. 对称点模式的原理

3.1. 基于对称点模式的识别原理

Cymascope[25]是一个使声音可见的新型科学仪器。Cymascope 制造于 2002 年，需要乳胶和细颗粒物作为媒介使声音可见。随着仪器的推广，水作为新兴的媒介出现。水的表面张力具有较高的灵活性和快速响应于施加的震动，即使有瞬变极短的几毫秒的时间也能显现出来。因此水能够翻译一个给定的声音样本周期性的正弦信号。在电流的控制下，水中带有声音的高次谐波，在能量足够的情况下，音频频谱导致了水平面表面张力的偏移。在正弦结构水的表面上，呈现出部分的三维数据，表面和亚表面结构可以很容易的被水面上方的人眼所看到[3]。在一个给定的听得见声音中或者给定的声音样本中，基于声音信号的频域的不同，Cymascope 将所有的基本频率呈现可视化，从而对不同频率抽象的声音信号以图像形式区分开来[26]。

根据 Cymascope 的成像原理，基于上文分析的天然地震和人工爆炸的不同频谱的时域波形，本文提出了时域波形的对称点模式，希望对天然地震和人工爆炸可做出直观识别。对称点模式是将时域信号经过一系列的特征显著算法，使时域波形特征更为突出，通过角度分块投影得到轴对称的图形。对称点模式视图成像分为三步(如图 4 所示):时域波形转化归一化、置顶投影算法和极坐标作图。利用对称点模式，使天然地震和人工爆炸的时域波形以对称的形式呈现在人们眼前，并从同一事件的多个台站总体特征区分天然地震和人工爆炸。

3.2. 时域波形转化算法

Matlab 具有强大的科学计算和数据处理能力，界面友好，具有应用于广泛领域的工具箱。基于对称点模式的成像方法，本文使用 Matlab 进行可视化编程。时域波形转化算法的目的是为了让天然地震和人工爆炸时域波形特征更为突出，使做出的对称点图更有利于识别两种类型。该算法主要包括如下步骤：

1) 提取波形数据。通过“识别天然地震与人工爆炸的分类决策支持系统”读取.evt 文件，从各个台站测得的地震资料提取出地震波形(台站数据采样为 50 Hz)，并保存为每行一个数据的.txt 文件，便于一个事件各个台站的调取。

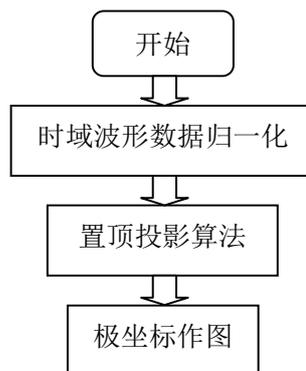


Figure 4. The algorithm flowchart of symmetric dot pattern
图 4. 对称点模式算法流程图

2) 时域波形数据读取。由于读取的 txt 数据 $H(k)|_{k=0,1,\dots,N-1}$ (N 为采样点总数) 是 n 行一列, 转置成一行 n 列的数据 H^T 有利于进一步处理, 并对其数值求绝对值(通过取绝对值, 可以增加图像的饱满度, 转换成对称点模式后, 更能突出天然地震和非天然地震的时域波形特征, 有利于可视化对比), 公式(1)、(2) 所示。

$$H = \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_{N-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S(k)|_{k=0,1,\dots,N-1} = |h_i|_{i=0,1,\dots,N-1}| \quad (2)$$

3) 时域波形数据归一化。由于地震和爆炸的波形振幅值不同, 在绘图时带来不便, 利用公式(3)对波形数据归一化得到数据 $S'(k)|_{k=0,1,\dots,N-1}$ 。通过对波形数据的归一化, 规范数据结构, 有利于进一步对数据进行处理, 进而控制最大值因素, 给极坐标映射图的对比带来便利。

$$S'(k)|_{k=0,1,\dots,N-1} = \frac{(\text{Max}(S') - \text{Min}(S')) \times (S(k) - \text{Min}(S))}{(\text{Max}(S) - \text{Min}(S)) + \text{Min}(S')}$$

(Max(S)、Min(S) 分别是 $S'(k)|_{k=0,1,\dots,N-1}$ 中的最大值和最小值,

Max(S)、Min(S) 分别是 $S(k)|_{k=0,1,\dots,N-1}$ 中的最大值和最小值) (3)

4) 置顶投影算法。本文提出置顶投影法使对称点模式视图更直观明显。由于对时域坐标 $S'(k)|_{k=0,1,\dots,N-1}$ 的直接极坐标投影, 使所有的时域波形集中在圆心之间, 很难区分波形特征。通过对一百多个台站时域波形的观察, 振幅最大值远远大于其他振幅值, 并且最大值衰减极快。为了使时域波形在极坐标中形成视觉突出, 采取定值 Amp 依次与其他幅度做差的方法, 从而使时域波形在极坐标边缘映射, 呈现出花瓣状的对称模型。定值 Amp 由该波形 $S'(k)|_{k=0,1,\dots,N-1}$ 最大值 Max(S) 和最小值 Min(S) 做差求出(公式(4)所示)。公式(4)通过控制权值 rate 使视图比例达到最优, 进而可以更好的区分天然地震和非天然地震。通过 max() 函数求取频谱中的最大值 max。由于 max 为波形幅度最大值, 为了让波形从圆心移到圆盘外侧, 把 max 与原时域波形函数 $S'(k)|_{k=0,1,\dots,N-1}$ 做差。为了突出地震时域波形的复杂性, 赋予权值 rate。通过权值 rate 的大小变化, 调节定值 Amp 的大小比重, 确定图形覆盖圆形的面积和半径大小, 一般 rate 取 0.5, 为该定值的均值。再进行数据取正运算, 使天然地震和非天然地震的对称点模式图形边缘得到光滑和毛刺的区别。运用公式(5)得到最后投影的时域波形 $Y(k)|_{k=0,1,\dots,N-1}$ 。

$$\text{Amp} = (\text{Max}(S') - \text{Min}(S')) \times \text{rate} \quad (0 < \text{rate} \leq 1) \quad (4)$$

$$Y(k) = |\text{Amp} - S'(k)| \quad (k = 1, 2, \dots, N-1) \quad (5)$$

3.3. 极坐标映射图

在极坐标映射图中, θ 是从零刻度到指定矢量半径的夹角, 单位为弧度, ρ 是数据空间单位指定的矢量半径单位。将极坐标 θ 域均分为 n 块, 每一块都用时域特征显著算法得到的时域谱进行映射, 求得 n 块相同的图像, 组合形成对称点模式。在映射中, 时域采样点 K 对应极坐标中的角度 θ , 即把一块花瓣按照间隔 θ 取 m 个采样点(公式(7)), 时域中的采样点与极坐标角度的采样点个数保持一致(公式(8)); 时域波形幅度对应极坐标中的半径 ρ (公式(9))。

$$\hat{\theta} = \frac{2\pi}{n} / N \quad (6)$$

$$\theta(m) \Big|_{m=0,1,\dots,N-1} = \hat{\theta} \times m + \frac{2\pi}{n} \times i \quad (i = 0, 1, \dots, n-1) \quad (7)$$

$$\theta(m) \Big|_{m=0,1,\dots,N-1} \xleftarrow{\text{映射}} k \quad (k = 0, 1, \dots, n-1) \quad (8)$$

$$\rho(m) \Big|_{m=0,1,\dots,N-1} = Y(k) \Big|_{k=1,2,\dots,N-1} \quad (9)$$

本文将极坐标圆饼图均分为 8 块 ($n = 8$), 对每一块进行时域坐标到极坐标的投影。通过极坐标绘图, 设置 n 的大小来控制圆饼图花瓣数, 对每一块的极坐标的投影并进行拼接组合, 得出对称点模式图。通过直观的对称点模式图, 使天然地震和人工爆炸的可视化波形特征更为突出, 达到区分效果。

4. 天然地震和人工爆炸的波形数据可视化

4.1. 天然地震和人工爆炸的对称点模式图

地震数据来自国家地震科学数据共享中心, 为了减少岩石层不同和实时环境的影响, 本文选取相近位置相近年份的天然地震和人工爆炸数据。其中的 35 个天然地震事件(每个事件近 100 个台站提供数据)发生在 2003~2007 年, 震中位置为首都圈, 纬度在 39.5001~40.5014 之间, 经度在 115.4495~116.5135 之间, 震级为 ML1.5~3.0 之间; 27 个非天然地震事件(每个事件近 90 个台站提供数据)发生在 2002~2008 年, 震中位置为河北怀来, 纬度在 40.1423~40.3306 之间, 经度在 115.1448~115.4285 之间, 震级为 ML0.6~2.0。根据对称点模式对天然地震和人工爆炸进行识别。设置模块数 $n = 8$, 经过反复的实验, 权值 rate 取 0.5 时, 两类特征区分最直观明显。确定 n 和 rate 的值后, 本文对以上 63 个事件进行了对称点模式可视化, 区分效果明显。下文以地震和爆炸在 2003 年、2005 年和 2007 年各取一个事件(见表 2)为例进行说明。其中, 每个事件随机抽取 10 个台站绘制成对称点模式图阵, 如图 5 所示。针对地震和爆炸的对称点模式图, 在发震时间、发震地区相近的情况下, 分别对样本事件(见表 2)进行举例测试即: 1) 震级相近; 2) 震级相差较大。从不同的角度展示对称点模式对地震和爆炸的区分。

由于区分度是从整体来看, 台站抽取的随机性可能呈现不同的图形。对此, 本文通过扩大抽取的比例来进一步说明对称点模式的可行性。从表 2 中 2007 年的天然地震数据和非天然地震数据(每类大约 100 个台站)分别抽取 35 个台站进行绘图, 如图 6 所示。

随着随机抽取台站数增多, 地震的对称点模式图的样式更为多样化, 过渡去趋势明显。爆炸的对称点模式图略微单一化, 花瓣状不明显。

Table 2. Basic information of some earthquakes and explosions

表 2. 部分地震事件和爆炸事件基本信息

类别	日期	纬度	经度	震级	波形文件名
天然地震事件	2003-06-19	40°06.95'	116°18.83'	ML1.6	20030618190122-1.sed
	2005-03-01	40°02.48'	115°57.93'	ML2.3	20050301122231-1.sed
	2007-05-05	40°32.54'	115°78.53'	ML2.4	20070504200909-1.sed
人工爆炸事件	2003-06-28	40°25.84'	115°28.89'	ML1.1	20030628144625-1.sed
	2005-03-12	40°31.45'	115°29.61'	ML1.2	20050312134536-1.sed
	2007-06-11	40°30.05'	115°25.83'	ML1.3	20070610175945-1.sed

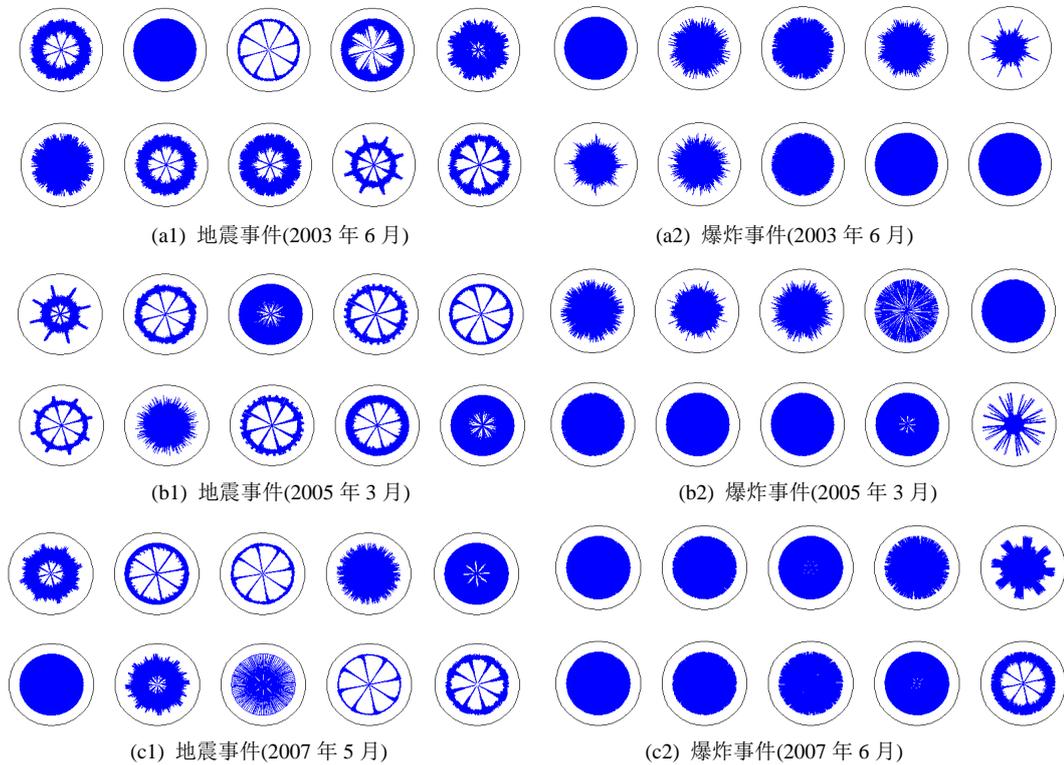


Figure 5. The pictorial DSP arrays of earthquakes and explosions with 10 observatories
图 5. 天然地震和人工爆炸事件对称点模式 10 个台站的对称点模式图阵

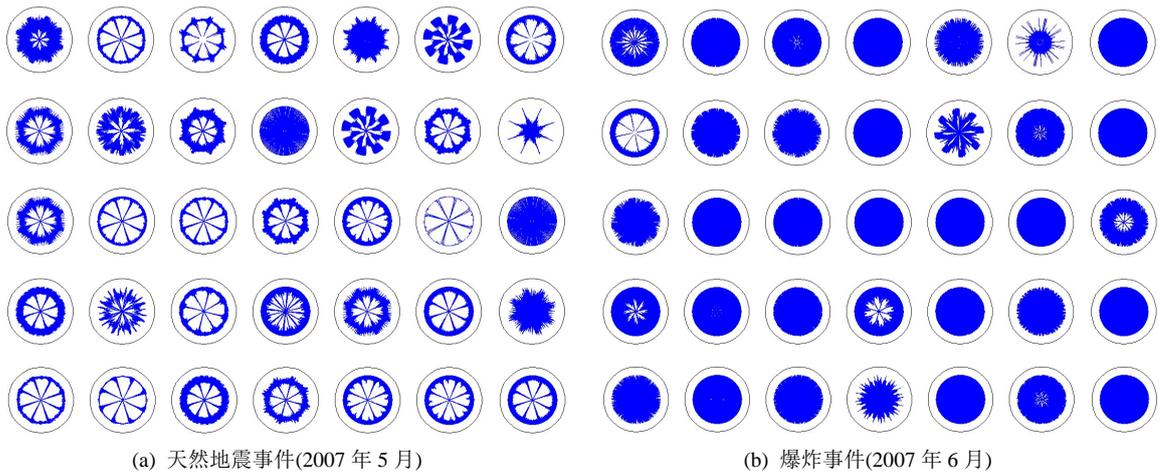


Figure 6. The pictorial DSP arrays of earthquakes and explosions with 35 observatories
图 6. 天然地震和非天然地震各 35 个台站的对称点模式图阵

4.2. 不同类型事件对称点模式图的差异结果与分析

对首都圈附近的 35 个天然地震事件和 27 个非天然地震事件(2002~2008 年, 每个事件含大于 90 台站的数据)进行大量的实验分析, 论文篇幅所限, 这里只列出了少量的典型对称点模式图形, 如图 5 所示。对称点模式呈现的图形可以大致非为两类: 一、多镂空复杂的中心对称花瓣图(见图 7(a)); 二、单一的少镂空的填充式圆饼对称图(见图 7(b))。

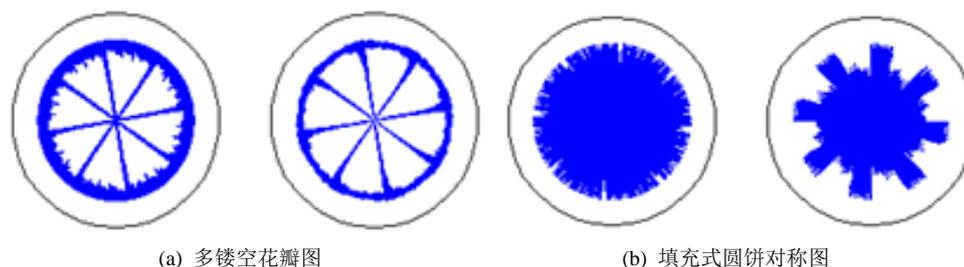


Figure 7. Two typical pictorial DSP patterns
图 7. 两类典型的对称点模式图形样式

通过对 35 个天然地震事件和 27 个非天然地震事件进行的对称点模式可视化绘图，可以得出如下结论：

1) 天然地震时域波形的对称点模式呈现花瓣样式的对称图较多，非天然地震的较少。

2) 天然地震各个地震台站测得数据对应的对称点模式有从无花瓣到有镂空大花瓣的过渡趋势，即随着台站位置的不同，对称点模式呈现多样化。非天然地震呈现较单一的填充圆饼图，且与花瓣图过渡不明显。

为了表明上述结论的可行性，我们可以扩大随机抽取台站百分比，如图 6 显示，分别从地震事件和爆炸事件的 100 多个台站中随机抽取 35 个台站的波形数据绘制对称点模式图。地震的对称点模式图种类繁多，且过渡明显。爆炸对称图类型单一且无明显过渡。与图 5 显示的结论一致。通过一个事件的多个台站的波形数据的对称点模式图，可以很直观地区分识别天然地震事件和非天然地震事件。通过对 35 个天然地震事件和 27 个非天然地震事件的进行高效快速的对称点模式可视化绘制，本文的实验结果表明：54 个事件可以高效直观区分识别天然地震事件和人工爆炸事件(正确识别率 87%)；余下的 8 个事件(误判率 13%)无法直观辨识。

5. 结论

天然地震事件一般是位错源，震源物理形成过程持续时间较长，地震波在不同地理位置上的观测台站上入射角各不相同，测得的地震波形形态各异，反映在对称点模式(SDP)图上，对应同一事件的多个观测台站的 SDP 图形态多样；而人工爆炸事件是膨胀源，地震波在不同地理位置的观测台站上入射角基本相同，测得的地震波形形态较单一，反映在对称点模式(SDP)图上，对应同一事件的多个观测台站的 SDP 图形态较单调。由于地震传播的路径的复杂多样，才使得由同一事件的多台站观测信号的 SDP 图形区分能力降低。

据此，我们可以做出如下假设：只要观测台站数量足够，观测台站比较均匀地分布于事件源周围，与事件源距离适当，对称点模式应该可以有效地区分识别天然地震和人工爆炸。天然地震的对称点模式图样式的更复杂多变也印证了地震时域波形比爆炸时域波形更复杂、地震频域比爆炸频域宽[1] [15] [17]-[19] [22]。

通过分析天然地震对称点模式的多样性和人工爆炸对称点模式的单一性所呈现的区别，可以利用对称点模式图生成某种可以识别地震和爆炸的算法，这为事件发生后快速定性、识别出震源类型开拓一条新的有效途径。

基金项目

国家自然科学基金(41264001)资助。

参考文献 (References)

- [1] 武安绪 (2012) 基于 HHT 倒谱计算与量子统计模拟的爆炸地震定量识别. *Proceedings of the 31st Chinese Control Conference*, Hefei, 20-27 July 2012, 5311-5316.
- [2] 沈萍, 郑治真 (1999) 瞬态谱在地震与核爆识别中的应用. *地球物理学报*, **2**, 233-240.
- [3] 李少睿 (2000) 利用数字地震记录资料识别地震与爆炸. *高原地震*, **3**, 39-43.
- [4] Shearer, P.M. (2009) Introduction to seismology second edition. Scripps Institution of Oceanography University of California, San Diego.
- [5] 赵永, 刘卫红, 高艳玲 (1995) 北京地区地震、爆炸和矿震的记录图识别. *敌阵地磁观测与研究*, **4**, 48-54.
- [6] 李金龙, 董长利 (2001) 数字地震记录的爆炸识别. *地震地磁观测与研究*, **3**, 28-35.
- [7] 吴娟, 雷强 (2001) 长江三峡地区地震与爆炸记录波形的识别. *地震地磁观测与研究*, **6**, 54-56.
- [8] 宋杰, 任寰, 袁海良 (2004) 地震波形与爆炸波形的比较. *四川地震*, **4**, 25-46.
- [9] Richards, P.G. and Zavales, J. (1990) Seismic discrimination of nuclear explosions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **18**, 257-286.
- [10] Bennett, T.J. and Murphy, J.R. (1986) Analysis of seismic discrimination capabilities using regional data from western United States event. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **76**, 1069-1086.
- [11] 魏富胜, 黎明 (2003) 震源性质的倒谱分析. *地震学报*, **1**, 47-54.
- [12] 中国生, 徐国元, 熊正明 (2006) 基于小波变换的爆炸地震信号能量分析法的应用研究. *爆炸与冲击*, **3**, 222-227.
- [13] Hsu, R.C. and Alexander, S.S. (1993) Recognition of earthquakes and explosions using a data compression neural network. *Proceedings of the 1993 IEEE-SP Workshop, Neural Networks for Processing [1993] III*, 6-9 September 1993, 421-430.
- [14] Hong, T.-K. (2013) Seismic discrimination of the 2009 North Korean nuclear explosion based on regional source spectra. *Journal of Seismology*, **17**, 753-769.
- [15] 张帆 (2006) 地震波时频谱分析及其在爆炸识别中的应用. 硕士论文, 中国科学技术大学, 北京.
- [16] 曾宪伟 (2008) 利用小波包变换识别地震和爆炸. 中国地震局兰州地震研究所, 兰州.
- [17] 刘希强, 沈萍, 张玲, 李永红 (2003) 用小波变换能量线性度方法识别天然地震与爆炸或塌方. *西北地震学报*, **3**, 204-209.
- [18] 孙甲宁, 夏爱国, 苏乃秦 (2006) 地震记录中小爆炸的识别与判据研究. *地震地磁观测与研究*, **5**, 29-33.
- [19] 孙甲宁, 夏爱国, 苏乃秦 (2005) 地震和爆炸时频域能量分布特征的对比分析. *华南地震*, **2**, 68-74.
- [20] 许健生, 尹志文 (1999) 地震与爆炸的波谱差异. *地震地磁观测与研究*, **3**, 18-23.
- [21] 夏爱国, 刘贤伦 (2002) 利用乌鲁木齐遥测地震台记录识别人工爆炸与地震. *内陆地震*, **4**, 337-345.
- [22] Huang, H.M., Li, R. and Lu, S.J. (2009) Discrimination of earthquakes and explosions using chirp-z transform spectrum features. 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, **7**, 210-214.
- [23] 唐兰兰, 王海涛 (2009) 爆炸与地震的波谱特征分析. *内陆地震*, **3**, 377-385.
- [24] 毕明霞, 黄汉明, 边银菊, 李锐, 陈银燕, 赵静 (2011) 天然地震与人工爆破波形信号 HHT 特征提取和 SVM 识别研究. *地球物理学进展*, **4**, 1157-1164.
- [25] http://www.cymascope.com/cyma_research/musicology.html
- [26] Steele, J. and Iliinsky, N. (2010) Beautiful visualization. O'Reilly Media, Inc., Sebastopol.