

气枪主动源与天然地震信号的传播特征对比研究*

向涯¹, 王彬², 杨润海², 王伟涛³, 杨海燕¹

(1. 云南大学 资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650091; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224;
3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要:应用S变换对比分析云南宾川地震信号发射台单次气枪激发信号与同当量天然地震信号在传播过程中的波形和频率特征,并基于参考台聚类分析结果,对其他接收台站的地震信号进行线性叠加和相位加权叠加,研究结果表明:(1)气枪信号传播过程中主频为3~6 Hz,可以在距离为151 km的台站检测到信号,传播过程中能量衰减较慢。天然地震信号主频较高,在传播7.7 km时的主频为10~20 Hz,传播距离约为60 km,传播过程中能量衰减较快;(2)经过2 000余次的线性叠加和相位加权叠加,可以分别在距离为225 km和350 km的台站检测到气枪信号。与天然地震信号相比,气枪信号数据丰富、衰减慢、传播距离远,利用气枪数据可以研究更大范围的地壳介质结构。

关键词:宾川主动源;气枪激发;地震信号;聚类分析;信号叠加;波形特征;S变换

中图分类号: P315.31

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)04-0605-08

0 引言

地震波携带丰富的地下介质结构和物性的信息,是我们研究地球内部构造的重要基础(王彬等,2012)。地下介质的变化引起穿过的地震波发生改变,通过检测地震波这种细微的差别来研究地震的孕育和发震过程(王彬,2009;杨微等,2010;Chen *et al.*,2014),是当今地球物理学研究的一个重要方面。这种方法需借助能产生相似波形的重复震源,常用的重复震源有天然重复地震和人工震源。天然重复地震受限于时间和空间测量精度的影响,难以达到研究的要求(王宝善等,2016);不同人工震源也都有各自的缺点和不足,例如人工爆破对环境破坏较大且难以恢复,压电陶瓷震源、精密控制震源、锤击震源等产生的地震信号传播距离短,测量尺度较小(王宝善等,2011)。大容量气枪震源是近几年由海洋移植到陆地水域激发的人工可控震源(罗桂纯等,2006;丘学林等,2007),这种震源具有绿色环保无害、激发信号频率低和传播距离远等优点(陈颢等,2007),成为近年来地震学研究领域的热点。目前,气枪震源在国内已经有很好的发展和应用(王彬等,2015;张元生等,2016;夏季等,2016;

魏斌等,2016;张云鹏等,2016)。

2011年4月建成的云南宾川地震信号发射台,是世界上第一个陆地气枪震源固定发射台(王彬等,2015)。云南宾川气枪信号发射台激发系统配备了4×2 000 in³ Bolt气枪阵列,每支气枪工作压力为15 MPa,沉放深度为10 m左右(王彬等,2016)。地震信号的接收除云南省现有的测震台网外,以宾川地震信号发射台为中心,周围又布设了40个流动观测台站,其中在距离气枪50 m左右处布设了参考台(CKT0)作为震源函数。流动观测台站由英国GURALP公司生产的频带范围为2 s~100 Hz的CMG-40T短周期地震计和美国REFTEK公司生产的REFTEK-130B地震数据采集器组成(Wang *et al.*,2012;李孝宾等,2016),采样率CKT0为100 Hz和200 Hz双采样率,其他观测台站均为100 Hz。受水位的影响,自2011年信号发射台建成以来,除2016全年连续激发外,2011—2015年激发时间均为第一年9月初到第二年5月初。

从观测研究结果看,宾川气枪发射台气枪阵列单次激发地震动较小,杨微等(2013)和陈佳等(2016)通过计算得出,气枪源在沉放深度为10 m、工作气压为15 MPa条件下,单次激发能量相当于 $M_L 0.7$ 地震,但关于气枪和天然地震信号

* 收稿日期: 2017-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金(41474048)和云南省陈颢院士工作站专项经费(2014IC007)联合资助.

传播特征对比的研究则相对较少。

受气枪浮台移动、水位变化等因素影响,气枪激发信号会出现一些细微的变化,王伟涛和王宝善(2012)提出了将层次聚类方法用于重复地震检测。基于互相关运算的层次聚类可以将波形特征不同的信号自动归类,分别得到相位、振幅和频率等高度相似的信号。气枪一次激发信号传播距离较短,且随着震中距增大信噪比越来越低,通过叠加可提高较远台站记录的信噪比,从而提取出微弱的气枪信号。

本文选择了发生在宾川地区的一次 $M_L 0.7$ 地震与气枪震源进行对比研究,运用 S 变换方法得到地震信号的时频谱,对比分析单次气枪激发信号和同当量天然地震信号在传播距离相近时的波形和时频特征。基于气枪源重复性高的优点,将 2012 年至 2016 年 4 月底 CKT0 台所有数据的垂直分量进行聚类分析,并用得到的结果进行线性叠加和相位加权叠加,对比分析两种叠加方法在叠加相同次数下能够检测气枪信号的最远距离。

1 气枪信号与天然地震信号的振幅频率特征对比

1.1 时频分析方法

傅里叶变换是一种常用的信号频率的分析方

法,但傅里叶变换只能反映给定信号的整体频率特征。S 变换是由 Stockwell 等(1996)提出出来的一种无损可逆的加时窗傅里叶变换,变换过程中时窗宽度与频率呈反向变化,改善了傅里叶变换不能反映频率随时间变化的不足,能够很好的进行信号时频局部分析(李玲莉等,2012;郑成龙,王宝善,2015)。信号 $h(t)$ 的 S 变换表示为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau - t)^2 f^2}{2}\right] \exp(-i2\pi ft) dt \quad (1)$$

式中: $h(t)$ 是台站记录到的时域信号, $S(\tau, f)$ 是经 S 变换后的结果, f 为瞬时频率, τ 为时间窗在信号上的中点, i 为虚数单位。高斯窗函数定义为:

$$g_f(t) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2 f^2}{2}\right) \quad (2)$$

基本小波定义为:

$$w_f(t) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2 f^2}{2} - i2\pi ft\right) = g_f(t) \exp(-i2\pi ft) \quad (3)$$

1.2 气枪信号与天然地震信号对比

为对比研究气枪主动源地震波信号与同当量的天然地震波信号,我们选取北京时间 2013 年

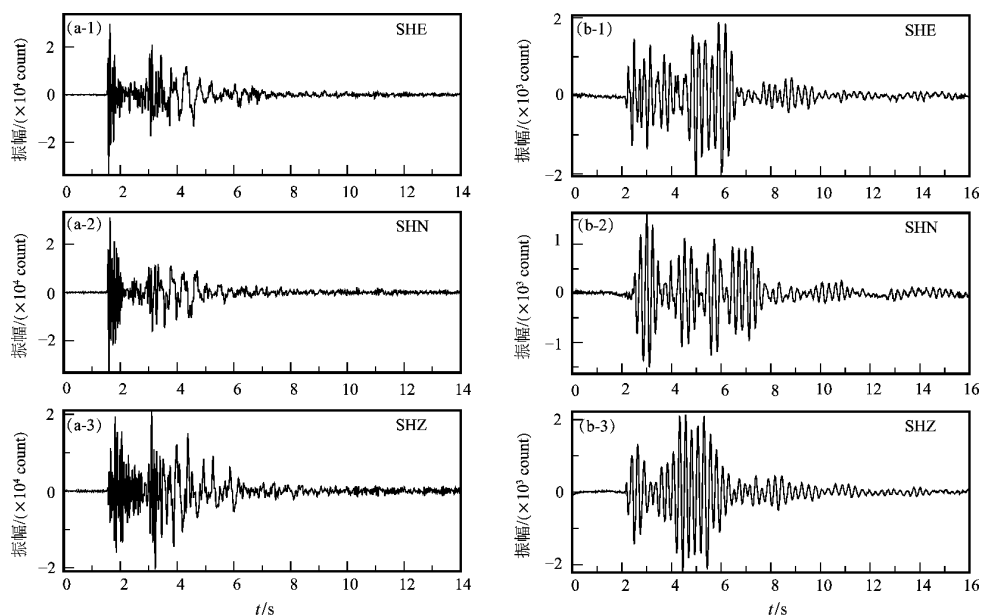


图 1 53274 台记录的 $M_L 0.7$ 天然地震信号 (a) 和单次气枪激发信号 (b)

Fig. 1 Waveform of the $M_L 0.7$ natural earthquake (a) and single air-gun excitation signals (b) recorded by the Station 53274

11月22日10时37分13.6秒发生在云南省宾川县(100.42°E, 25.73°N)的一次 $M_L 0.7$ 地震作为对比研究对象。此次地震震源深度5 km, 距气枪主动源发射台11 km。53274台距气枪源8.8 km、距天然地震的震中距7.7 km, 我们用53274台记录的地震信号和气枪信号进行对比研究。在53274台的记录数据中, 分别截取此次地震的记录和一次气枪激发(激发时间: 2016年2月22日7时14分59秒; 沉放深度: 10 m; 工作压力: 15 MPa)信号(图1), 应用S变换分析2种地震信号的时频特征。

将53274台接收到的气枪激发信号和天然地震信号的东西(SHE)、南北(SHN)和垂直(SHZ)三分量分别进行S变换, 得到2种地震信号三分量的时频特征。如图2所示, 通过S变换,

可以很清楚地分析各地震信号频率随时间的变化情况。频率特征上, 天然地震信号在传播7.7 km时三分量的频率范围为1~40 Hz, 主要频率为10~20 Hz; 气枪信号在传播8.8 km时三分量的频率范围为1~10 Hz, 主要频率为3~6 Hz。在信号震动时间上, 天然地震持续了约6 s, 而气枪震源持续了约9 s。在信号振幅上, 天然地震信号SHE、SHN、SHZ三分量最大振幅分别为 2.0985×10^4 count、 3.3280×10^4 count、 3.3186×10^4 count, 气枪信号三分量最大振幅分别为 2.0610×10^3 count、 1.6323×10^3 count、 2.2162×10^4 count, 天然地震波的振幅比气枪震源地震波的振幅大了一个数量级。综合对比分析可知, 天然地震信号相对气枪信号振幅大、频带宽, 震动时间短, 能量主要集中在高频部分。

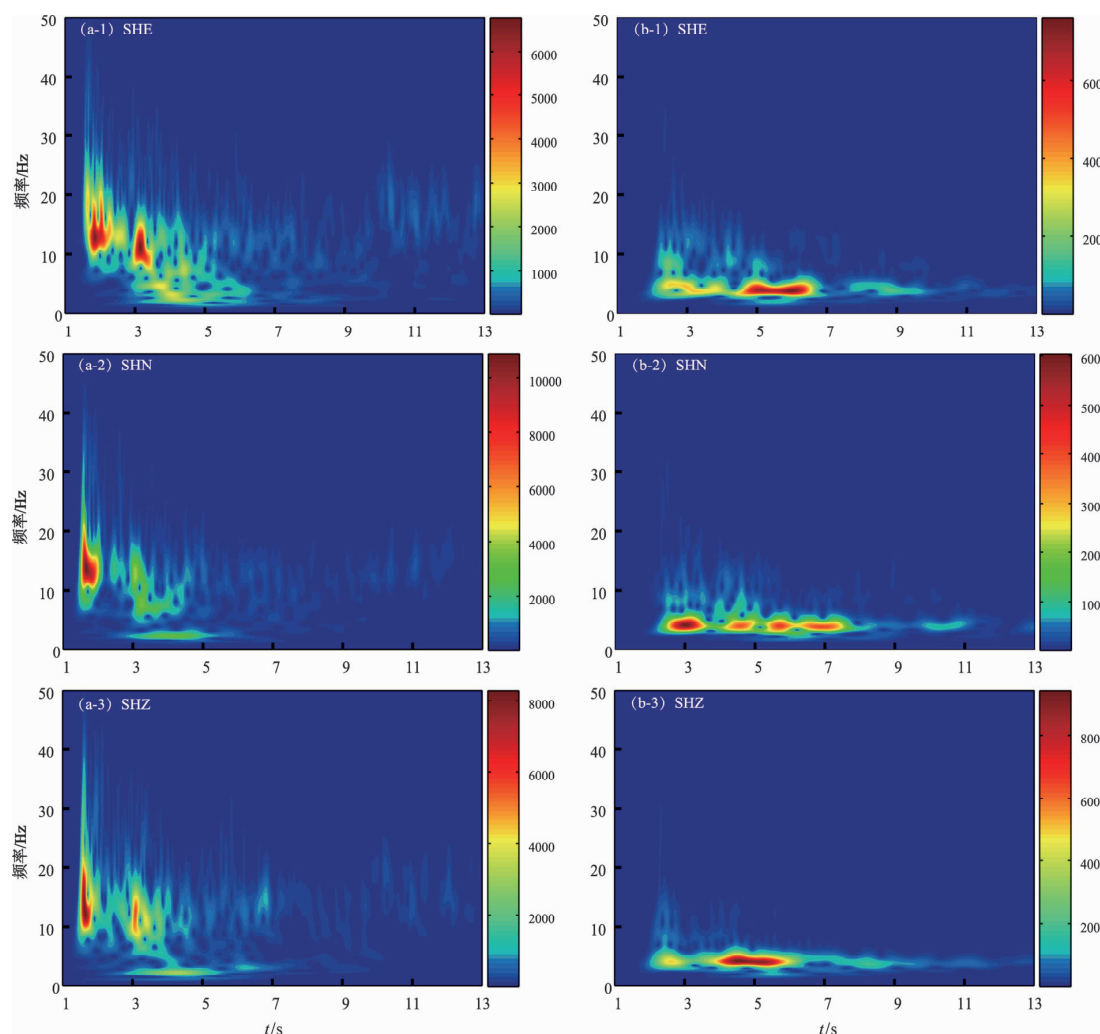


图2 53274台天然地震信号时频图(a)和气枪信号时频图(b)

Fig. 2 Time-frequency spectrum of natural earthquakes (a) and single air-gun excitation signals (b) of the Station 53274

为了得到天然地震信号和气枪激发信号的衰减特性,我们对比了2种地震信号不同震中距 Z 分量的最大振幅值。图3展示了2种地震信号的最大振幅衰减特征,其中实心圆和正方形分别表示天然地震信号和气枪激发信号幅值,实线和虚线分别是根据各振幅散点拟合的曲线。可见,天然地震信号的振幅衰减速度快于气枪激发信号。

分别对不同台站记录到的气枪信号进行2~7 Hz滤波,天然地震信号进行1~40 Hz滤波,得到

2种震源激发的地震波在不同距离上的记录(图4)。图4a为气枪单次激发归一化信号,图4b为 $M_L 0.7$ 天然地震信号归一化信号。在已有的流动观测台中,距离气枪源151 km的台站可以接收到气枪单次激发信号,而同当量的天然地震信号仅能传播约60 km。由此可见低频的气枪信号可以传播得更远,同当量天然地震信号则在传播过程中衰减较快,传播距离要短得多,且由于气枪信号传播距离较远,震相发育也更丰富。

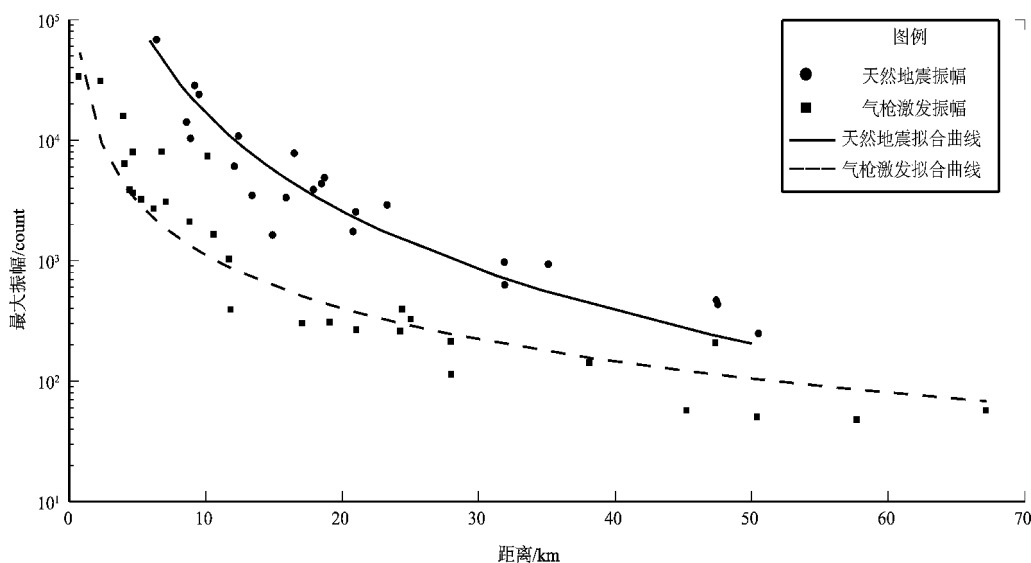


图3 天然地震信号和气枪信号的最大振幅衰减特性

Fig. 3 Characteristics of the maximum amplitude attenuation between natural earthquakes and single air-gun excitation signals

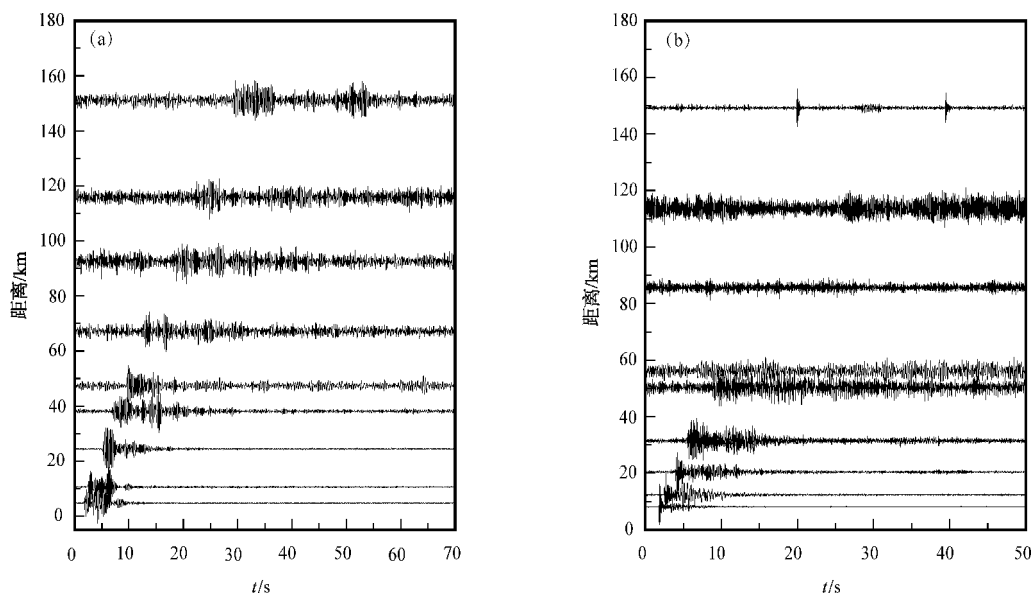


图4 单次气枪激发信号(a)和天然地震信号(b)传播对比

Fig. 4 Comparison of the signals of air-gun excitation (a) and natural earthquakes (b)

2 气枪信号聚类分析与叠加

受气枪浮台移动、水位变化等因素影响，气枪激发信号会出现一些细微的变化。基于互相关运算的聚类分析方法可进一步提升信号的相似性，从而提升后续数据处理的精确性。较远台站的气枪信号信噪比低，通过叠加可提高信号的信噪比从而提取出微弱的气枪信号。

2.1 聚类分析

聚类分析在天然地震方面已经有很多的应用（刁桂苓等，1992；高朝军等，2016），本文选用了层次聚类分析方法进行研究（王伟涛，王宝善，2012）。聚类过程中首先选取合适长度的信号窗口，然后计算 N 个样本中任意两次信号 j 和 k 的相关系数 c_{jk} 。定义这两次信号的相似度距离为：

$$d_{jk} = 1 - c_{jk} (j, k \leq N) \quad (4)$$

式中： d_{jk} 越小，两次信号越相似。所有信号都与其自身以及其他信号进行互相关运算，互相关运算结果构建一个 $N \times N$ 的相似度矩阵 M ，矩阵中有 $M_{jk} = M_{kj}$ 和 $M_{j=j} = 1$ ，所以聚类过程中只取上三角或者下三角矩阵即可。聚类分析之前，数据类别为 N ，要分为多少种类别是未知的，聚类时首先将相似度距离最小的 1 类信号聚为 1 类，此时数据类别减少为 $N - 1$ ，如此循环直到所有信号归为一类。两类信号 G_p 和 G_q 计算相似度距离时采用最长距离法，即是两类信号中信号的最大距离为两类信号的距离：

$$D_{pq} = \max(d_{pq}, p \in G_p, q \in G_q) \quad (5)$$

之后根据需要，给定阈值 α ，就可以将相似度距离小于或者等于 α 的信号聚成一类。给定的阈值不同，聚成的类别就有可能不同。聚类分析得到的结果，提高了叠加信号的相关性，使用叠加方法提高信号的信噪比更为有效。

取参考台记录的宾川主动源发射台 2012 年 9 月至 2016 年 4 月底激发的共 5 311 次信号的 Z 分量进行分析。由前述可知，气枪信号主频约为 3 ~ 6 Hz，聚类前先将参考台信号进行去均值、去线性趋势、2 ~ 7 Hz 滤波处理。经过互相关运算得到相似度矩阵 M 后，给定阈值 $\alpha = 0.1$ ，得到聚类结果如图 5 所示，其中纵坐标表示聚成类别数量，横坐

标表示信号的时间，信号上方的数字表示该类信号的数量。从图中可以看出，5311 次信号被分成 18 类，信号数量最多的是第 4 类，共有 2 125 次。

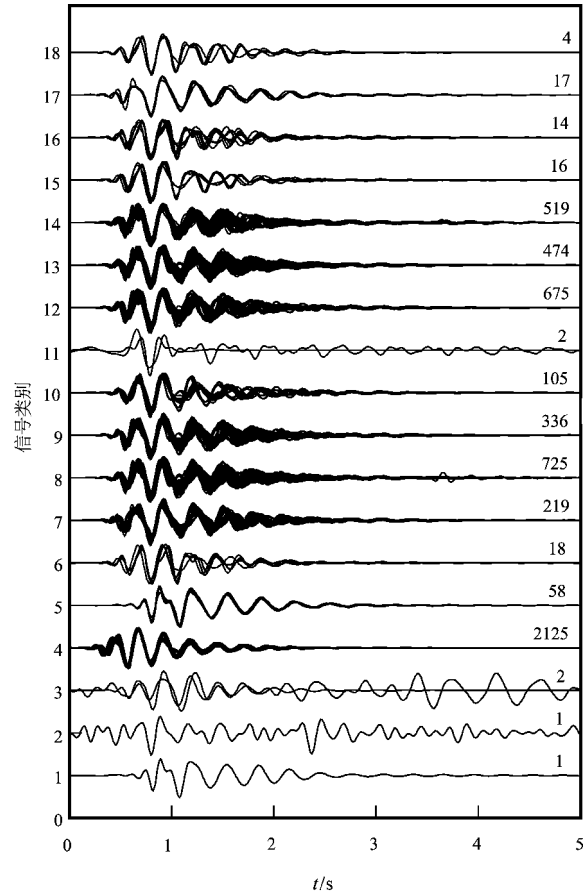


图5 2012年9月至2016年4月
CKT0台信号聚类结果

Fig. 5 The results of the hierarchical clustering of the CKT0's signals from September 2012 to April 2016

2.2 线性叠加与相位加权叠加

线性叠加就是将需要叠加的数据先进行算术相加，然后求其平均值，方法如下：

$$s(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j(t) \quad (6)$$

式中： $s(t)$ 表示线性叠加后的结果， N 表示需要叠加的信号数量， $s_j(t)$ 表示第 j 道信号。经 n 次叠加后，地震信号强度增强 n 倍，随机噪声信号强度增强 \sqrt{n} 倍，因此地震信号强度增长速度是随机噪音的 \sqrt{n} 倍（熊章强等，2010）。

相位加权叠加（Schimmel, Paulssen, 1997；陆一锋等，2011）是一种非线性叠加方法，其中

思想是在线性叠加结果的基础上,信号的每一个采样点乘以一个对应的权重值,从而得到相位加权叠加结果。相位加权叠加的实现,首先用气枪信号与其希尔伯特变换结果构造复数序列以得到瞬时相位,再将线性叠加结果与相位计算的权重值对应相乘,方法如下:

$$X(t) = x(t) + iH[x(t)] = A(t)\exp[i\Phi(t)] \quad (7)$$

$$s(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j(t) \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \exp(i\Phi_j(t)) \right|^v \quad (8)$$

其中:(7)式是处理单道信号得到瞬时相位的理论公式, $x(t)$ 是台站记录到的单次信号, $H[x(t)]$ 是单次信号的希尔伯特变换, $A(t)$ 是 $X(t)$ 的瞬时振幅, i 为虚数单位, $\Phi(t)$ 是瞬时相位;(8)式是处理所有信号得到叠加结果的理论公式,其中 $s(t)$ 是相位加权叠加的结果, $x_j(t)$ 是台站记录到的第 j 次信号, $\Phi_j(t)$ 是第 j 次信号经过(7)式处理过的瞬时相位, v 是指数, $v=0$ 时是线性叠加,本文中 $v=2$ 。噪声的瞬时相位随机不定,而气枪信号的瞬时相位基本一致,因此相位加权叠加是一种削弱噪声、增强气枪信号的方法。

选聚类结果中信号最多的第4类数据进行后续的叠加。其他台站选取相同激发时刻的数据,由于并不是所有台站都记录到了全部的激发数据,因此各个台站用于叠加的数据也不尽相同,叠加次数在1 900~2 125之间。在叠加前各台站也要进行去均值、去线性趋势、滤波处理,叠加后再将结果进行滤波、波形灭尖等处理。叠加结果如图6所示,图6a为线性叠加的信号,图6b为相位加权叠加的信号。经过约2 000次叠加后,线性叠加的结果在225 km处信号的震相还比较清晰,更远距离信号的震相已经不大清晰;相位加权叠加后,在更远的350 km处台站信号的震相清晰可见。

3 结论与讨论

在研究天然地震信号特征时,通常没有像宾川气枪信号观测系统中的参考台那样记录信号作为震源函数的台站,使得不能具体研究同当量天然地震的震源波形,我们只有选取距天然地震和气枪震源距离相近的一个台的记录进行分析研究。应用S变换,对比了单次气枪激发信号与同当量天

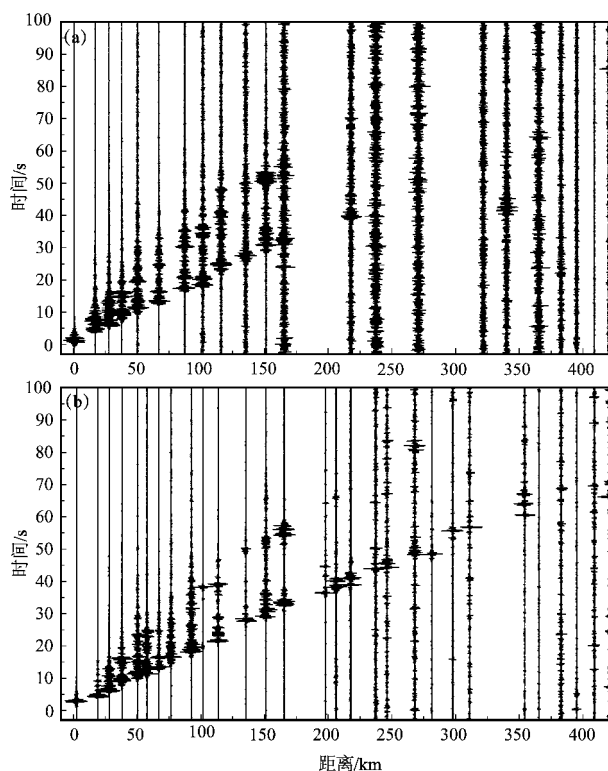


图6 线性叠加信号(a)和相位加权叠加信号(b)对比

Fig. 6 Comparison of signals between linear stacking (a) and phase-weighted stacking (b)

然地震信号在传播过程中的振幅、时频特性。参考台信号聚类分析后,对各台站同一类型的信号用不同的方法进行叠加,这对有效提取微弱的介质变化信息具有重要意义。通过这些工作,得到如下认识:

(1) 单次气枪激发信号与同当量天然地震信号在分别传播8.8 km和7.7 km时,天然地震信号的频带为1~40 Hz,优势频率在10~20 Hz之间,信号持续时间相对较短,能量集中在高频部分,在传播过程中能量衰减较快,传播距离约60 km;气枪信号的频带为1~10 Hz,优势频率在3~6 Hz之间,信号持续时间相对较长,能量集中在利于地震波传播的低频段,在宾川气枪主动源信号接收系统中,距离气枪源151 km的台站可以接收到信号。

气枪信号与天然地震信号在特征上的区别可能是由气枪特殊的震源信号引起的:气枪震源信号由主脉冲和气泡脉冲组成(林建民等,2010;夏季等,2016),主脉冲是指高压气枪在水中激发产生的第一个正压力脉冲,具有能量大、频带宽、

频率高的特点,主要与气枪阵列能量的大小有关;气泡脉冲是高压气体形成的气泡震荡引起的,频率低,主要与气枪容量、工作压力以及沉放深度等有关。主脉冲频率高,持续时间短,传播过程中频率急剧下降,传播距离短。气泡脉冲频率低,持续时间相对主脉冲较长,传播距离较远,53274台记录的气枪信号以气泡脉冲为主,主脉冲频率已经衰减到与气泡脉冲一致的频率上,整体频率较低,低频信号传播过程中有较强的能力来抵抗吸收和散射等因素的影响(管振清等,2009)。而天然地震通常被认为是由一个双力偶力系突然的应力释放引起的(许忠淮,李世愚,2013;万永革,2016),信号持续时间短,整体频率高,高频信号受低速层的吸收和高速层的强反射影响而衰减较快(管振清等,2009)。

(2) 宾川气枪信号发射台的位置相对固定,激发信号具有高度相似性,我们在聚类分析的基础上通过叠加来提高信号的信噪比,从而提取气枪激发的地震信号。本文应用线性叠加方法和相位加权叠加方法进行2 000次左右叠加处理后,分别在225 km和350 km处检测到了气枪信号。

350 km的观测距离小于国内类似实验的结果(魏斌等,2016)。主要因为宾川主动源信号发射台配备的 $4 \times 2\,000\text{ in}^3$ 阵列单次激发能量相当于 $M_L 0.7$ 地震(杨微等,2013;陈佳等,2016),魏斌等(2016)实验所用的 $6 \times 2\,000\text{ in}^3$ 气枪阵列单次激发能量相当于 $M_L 0.9$ 地震(杨微等,2013)。根据气枪激发能量计算公式(Ronen, 2002): $E = PV \ln(P/P_0)$,其中 E 为气枪释放能量, V 为高压气体的容积, P 为工作压力, P_0 为环境气压,也即1个大气压,魏斌等(2016)实验激发条件为 $P_1 = 15\text{ MPa}$, $V_1 = 12\,000\text{ in}^3$,宾川主动源激发实验激发条件为 $P_2 = 15\text{ MPa}$, $V_2 = 8\,000\text{ in}^3$,实验沉放深度都为10 m,可以得出魏斌等(2016)的实验激发能量 E_1 为宾川实验激发能量 E_2 的1.5倍。且云南位于青藏高原东南部,受造山运动的影响,地形复杂,构造活动剧烈,地壳内断层发育,介质破碎,因此,云南地区整体 Q 值较低(胡家富等,2003),地震波的衰减快于其它地区。且云南地区地震波衰减以吸收为主,而吸收衰减相比于世界其他地区处于中等偏高的水平(王勤彩等,2010)。

与同当量天然地震相比,气枪信号主频低,

虽然振幅小,但传播距离远,可用气枪信号精细地研究更大范围的地壳介质结构。由于气枪震源位置已知,震源定位、反演等方法有了精确的检验标准,气枪信号的高度相似性也为通过长期观测实验以及利用波速变化来监测地下介质的变化乃至地震孕育过程提供了可能。

感谢 ET-11 小队一期队员在气枪主动源学习过程中的帮助,感谢中国地震局地球物理研究所王宝善研究员提供的详细指导和叠加程序,感谢两位匿名审稿者提出的宝贵意见。

参考文献:

- 陈佳,李孝宾,杨军,等. 2016. 云南宾川大容量气枪震源波形频谱特征分析[J]. 中国地震,32(2):216-221.
- 陈颢,张先康,丘学林,等. 2007. 陆地人工激发地震波的一种新方法[J]. 科学通报,52(11):1317-1321.
- 刁桂苓,于利民,李钦祖. 1992. 震源机制解的系统聚类分析——以海城地震序列为例[J]. 中国地震,8(3):86-92.
- 高朝军,聂晓红,张志鹏,等. 2016. 新疆天山中段两次 $M_s 6.0$ 地震前异常特征的聚类分析[J]. 大地测量与地球动力学,36(5):446-450.
- 管振清,郭树祥,单联瑜. 2009. 利用低频信息改善地震成像质量[J]. 断块油气田,16(1):39-41.
- 胡家富,丛连理,苏有锦,等. 2003. 云南及周边地区 L_g 尾波 Q 值的分布特征[J]. 地球物理学报,46(6):1157-1164.
- 李玲莉,王清东,沈文渊,等. 2012. S变换在面波去噪中的应用[J]. 地震学报,34(6):830-840.
- 李孝宾,叶泵,杨军,等. 2016. 水库气枪震源不同组合激发效率的对比研究[J]. 地震研究,39(3):458-465.
- 林建民,王宝善,葛洪魁,等. 2010. 大容量气枪震源子波激发特性分析[J]. 地球物理学报,53(2):342-349.
- 陆一锋,徐鸣杰,王良书,等. 2011. 相位加权叠加方法在探测鄂尔多斯东南缘地壳结构中的应用[J]. 高校地质学报,17(4):562-568.
- 罗桂纯,王宝善,葛洪魁,等. 2006. 气枪震源在地球深部结构探测中的应用研究进展[J]. 地球物理学进展,21(2):400-407.
- 丘学林,陈颢,朱日祥,等. 2007. 大容量气枪震源在海陆联测中的应用:南海北部试验结果分析[J]. 科学通报,52(4):463-469.
- 万永革. 2016. 地震学导论[M]. 北京:科学出版社.
- 王宝善,葛洪魁,王彬,等. 2016. 利用人工重复震源进行地下介质结构及其变化研究的探索和进展[J]. 中国地震,32(2):168-179.
- 王宝善,王伟涛,葛洪魁,等. 2011. 人工震源地下介质变化动态监测[J]. 地球科学进展,26(3):249-256.
- 王彬,李孝宾,刘自凤,等. 2016. 宾川地震信号发射台的震源系统、观测系统和观测结果[J]. 中国地震,32(2):192-201.
- 王彬,吴国华,苏有锦,等. 2015. 宾川地震信号发射台的选址、建设及初步观测结果[J]. 地震研究,38(1):1-6.

- 王彬,杨润海,王宝善,等. 2012. 地震波走时变化精确测量的实验研究[J]. 云南大学学报(自然科学版),34(增刊2):15-20.
- 王彬. 2009. 利用多种震源测量介质波速变化的实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学.
- 王勤彩,陈章立,王中平,等. 2010. 云南地区散射衰减、吸收衰减及尾波衰减的综合研究[J]. 地球物理学进展,25(2):419-431.
- 王伟涛,王宝善. 2012. 基于聚类分析的多尺度相似地震快速识别方法及其在汶川地震东北端余震序列分析中的应用[J]. 地球物理学报,55(6):1952-1962.
- 魏斌,苏金波,王海涛,等. 2016. 新疆呼图壁人工水体大容量气枪信号发射台性能研究[J]. 中国地震,32(2):222-230.
- 夏季,金星,蔡辉腾,等. 2016. 大容量气枪震源子波时频特性及其影响因素[J]. 中国地震,32(2):249-260.
- 熊章强,周竹生,张大洲,等. 2010. 地震勘探[M]. 长沙:中南大学出版社.
- 许忠淮,李世愚. 2013. 地震学百科知识(二)——震源物理(上)[J]. 国际地震动态,(3):23-31.
- 杨微,葛洪魁,王宝善,等. 2010. 由精密控制人工震源观测到的绵竹5.6级地震前后波速变化[J]. 地球物理学报,53(5):1149-1157.
- 杨微,王宝善,葛洪魁,等. 2013. 大容量气枪震源主动探测技术系统及试验研究[J]. 中国地震,29(4):399-410.
- 张元生,郭晓,秦满忠,等. 2016. 甘肃祁连山主动源重复探测项目建设及震源重复性分析[J]. 中国地震,32(2):209-215.
- 张云鹏,王宝善,王伟涛,等. 2016. 安徽气枪实验固定台层析成像初步结果[J]. 中国地震,32(2):331-342.
- 郑成龙,王宝善. 2015. S变换在地震资料处理中的应用及展望[J]. 地球物理学进展,30(4):1580-1591.
- CHEN H C, GE H K, NIU F L. 2014. Semiannual velocity variations around the 2008 M_w 7.9 Wenchuan Earthquake fault zone revealed by ambient noise and ACROSS active source data[J]. EarthqSci, 27(5):529-540.
- RONEN S. 2002. Psi, pascal, bars, and decibels[J]. The Leading Edge, 21(1):60-62.
- SCHIMMEL M, PAULSEN H. 1997. Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks[J]. Geophy J Int, 130(2):497-505.
- STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. 1996. Localization of the complex spectrum: The S transform[J]. IEEE transactions on signal processing, 17(6):998-1001.
- WANG B S, GE H K, YANG W, et al. 2012. Transmitting seismic station monitors fault zone at depth[J]. EOS Transactions American Geophysical Union, 93(5):49-50.

Comparison of Propagation Characteristics of Signals Triggered by Air – gun Active Source and Natural Earthquakes

XIANG Ya¹, WANG Bin², YANG Runhai², WANG Weitao³, YANG Haiyan¹

(1. School of Resource Environment and Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China)

(2. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650024, Yunnan, China)

(3. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract

This article analyzes the waveform and frequency characteristics of the signals triggered by air – gun excitation and equivalent natural earthquake by S – transform. We stack the signals of other stations and analyze the propagation distance of air – gun signals after linear stacking and phase – weighted stacking based on clustering analysis to the reference station. The results show that: (1) the dominant frequency of air – gun signal is 3 – 6 Hz, and the station with distance of 151 km can receive the signal and its attenuation is slow. While the dominant frequency of equivalent natural earthquake is higher than air – gun signals, it is 10 – 20 Hz with distance of 7.7 km. Its propagation distance reaches 60 km and its attenuation is faster. (2) After stacking the same number of signals about 2000 times by linear stacking and phase weighted stacking, the stations with distance of 225 km and 350 km can receive the air – gun signals. Compared with the signals from natural earthquakes, the signals of the air – gun are rich, the attenuation is slow and the propagation distance is far. Applying airgun source can study a wider range of crustal medium structures.

Keywords: Binchuan active transmitting seismic station; airgun excitation; earthquake signals; Hierarchical clustering; signal stacking; waveform characteristic; S – transform