

# 利用二次相关时延检测方法提升气枪信号 时延估计精度的研究<sup>\*</sup>

向 涯<sup>1</sup>, 杨润海<sup>2♣</sup>, 王 彬<sup>2</sup>, 周云耀<sup>1</sup>

(1. 中国地震局地震研究所 中国地震局地震大地测量重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 由于观测台站距离较远、观测环境不佳以及前处理过程的干扰等因素, 气枪主动源部分台站的格林函数信噪比较低, 波速变化检测结果误差较大。利用二次相关时延检测, 先经模拟测试, 再将其应用到宾川主动源气枪信号的时延检测中。通过模拟研究和实际资料处理对比, 结果表明: 二次相关方法具有较好的抗干扰性, 二次相关后的时延检测结果比直接时延检测结果更加稳定。

**关键词:** 二次相关; 时延估计; 气枪信号; 宾川主动源

**中图分类号:** P315.61

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2019)01-0072-08

## 0 引言

中强震孕育过程中通常伴随着比较明显的应力变化, 监测地震前后应力变化过程和规律是深入了解和研究地震的一种重要手段(陈颢等, 2009), 而直接测量深部介质的应力难以实现, 往往通过利用重复震源测量介质波速变化的方式代替(杨润海等, 2011)。气枪震源是一种目前应用较广的重复震源, 与传统人工震源相比, 它既不会污染和破坏生态环境, 又能传播较远的距离; 与背景噪声等被动源相比, 有明显的时间分辨率优势; 与天然地震相比, 有人工可控、震源已知等优点, 因此被认为是目前探索地球介质结构和介质变化的最佳人工震源(陈颢等, 2007; Chen *et al.*, 2008, 2017; Wang *et al.*, 2016)。气枪子波分为压力脉冲和气泡脉冲, 压力脉冲频率高, 传播距离短, 气枪信号的远距离传播得益于其低频的气泡脉冲, 但其能量相对于压力脉冲较小, 因此较远台站接收信号信噪比较低, 甚至难以辨认。为了提高信噪比, 通常会对信号进行滤波和叠加等处理, 但部分台站由于随机噪声干扰太大, 处理后的信号信噪比仍然较低。而根据克拉默—拉

奥下界(Cramer-Rao Lower Bound)(Carter, 1987; 王伟涛, 2009; 杨微, 2013), 在波速变化的计算过程中, 信噪比是最重要的影响因素之一, 因此在计算气枪信号波速变化(或走时差变化)时, 较低的信噪比会使计算结果出现较大的误差, 甚至不能反映介质的真实变化情况。

二次相关时延检测方法(唐娟, 行鸿彦, 2007)是一种简单易实现的运算方法, 利用有效信号与噪声之间、噪声与噪声之间的弱相关特征, 将自相关和互相关相结合, 可在较低的信噪比信号中获得较高的时延估计精度。目前, 该方法在声信号时延估计、闪电辐射源定位及卫星干扰源定位等领域有较为广泛的应用(杜鹃, 程播, 2010; 周康辉等, 2013; 窦慧晶等, 2016)。本文将该方法应用于地震信号的时延检测, 首先利用模拟信号检测二次相关时延检测方法应用于地震信号的可行性, 随后利用该方法计算宾川较远台站气枪信号的走时变化。

## 1 二次相关时延检测方法

相关函数是信号间相似度的一种表现形式。自相关函数表示相同信号间的相关程度, 互相关

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-05-17.

**基金项目:** 国家自然科学基金(41574059, 41474048)、云南省地震局科技专项基金(ZX2015-01)和中国地震局地震科技星火计划(XH16028)联合资助。

**♣通讯作者:** 杨润海(1965-), 正高级工程师, 主要从事实验地震学方面的研究. E-mail: runhaiyang@163.com.

函数表示不同信号间的相关程度。

互相关函数在背景噪声中已经有相当广泛的应用 (Aki, 1957; Shapiro, Campillo, 2004), 背景噪声中隐藏着微弱的周期性地脉动信号, 通过互相关创建经验格林函数可以将背景噪声与地下结构联系起来 (Friedrich *et al*, 1998; Hasselmann, 1963; Longuet-Higgins, 1950)。地震背景噪声周期较长、振幅较小, 单次互相关所得信号信噪比低 (王伟涛等, 2011)。本文处理信号的时间尺度较小, 噪声可认为是随机噪声, 并假设有效信号与噪声之间、噪声与噪声之间不相关。因此经互相关处理后, 有效信号与噪声之间、噪声与噪声之间互相关函数值被压制, 有效信号之间函数值被放大。

将两道信号  $f_1(t)$  和  $f_2(t)$  分别定义为:

$$f_1(t) = x(t) + n_1(t) \quad (1)$$

$$f_2(t) = x(t+D) + n_2(t) \quad (2)$$

式中:  $x(t)$  为信号源辐射的有效信号;  $D$  为两次信号的相对延迟时间;  $n_1(t)$  和  $n_2(t)$  分别为两道信号中的加性高斯白噪声。

单道信号  $f_1(t)$  的自相关函数表示为:

$$R_{11}(\tau) = E[f_1(t)f_1(t+\tau)] = R_{xx}(\tau) + R_{xn_1}(\tau) + R_{n_1x}(\tau) + R_{n_1n_1}(\tau) \quad (3)$$

式中:  $R_{xx}$  为有效信号之间的互相关函数;  $R_{xn_1}$  和  $R_{n_1x}$  为有效信号与噪声之间的互相关函数;  $R_{n_1n_1}$  为噪声之间的互相关函数。

假设噪声与信号之间不相关, 式 (3) 可以简化为:

$$R_{11}(\tau) = R_{xx}(\tau) + R_{n_1n_1}(\tau) \quad (4)$$

两道信号  $f_1(t)$  和  $f_2(t)$  的互相关函数为:

$$R_{12}(\tau) = E[f_1(t)f_2(t+\tau)] = R_{xx}(\tau+D) + R_{xn_2}(\tau) + R_{n_1x}(\tau+D) + R_{n_1n_2}(\tau) \quad (5)$$

同样忽略有效信号与噪声之间的互相关函数, 可以将式 (5) 简化为:

$$R_{12}(\tau) = R_{xx}(\tau+D) + R_{n_1n_2}(\tau) \quad (6)$$

此时, 我们可以将自相关函数  $R_{11}$  和互相关函

数  $R_{12}$  看成两道新的关于时间  $t$  的信号, 对两道新的信号进行互相关运算, 得到二次相关函数:

$$R_{RR}(\tau) = E[R_{11}(t)R_{12}(t+\tau)] = R_{RX}(\tau+D) + E[R_{xx}(\tau)R_{n_1n_2}(t+\tau)] + E[R_{n_1n_2}(t)R_{xx}(t+D+\tau)] + R_{RN}(\tau) \quad (7)$$

忽略信号与噪声之间的二次相关函数, 式 (7) 可简化为:

$$R_{RR}(\tau) = R_{RX}(\tau+D) + R_{RN}(\tau) \quad (8)$$

式中:  $R_{RX}$  为有效信号的二次相关函数;  $R_{RN}$  为噪声的二次相关函数。

如果加性噪声之间是不相关的, 则忽略噪声的二次相关函数, 此时二次相关函数变为:

$$R_{RR}(\tau) = R_{RX}(\tau+D) \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 当时间  $\tau = -D$  时, 二次相关函数取得最大值  $R_{RR}(-D)$ 。通过对不同信号二次相关函数最大值对应时间的拾取, 可以获取不同信号间的时间延迟变化。前述假设噪声与信号之间不相关, 所以噪声与信号之间的互相关函数可以忽略。实际情况下, 噪声并不一定是高斯白噪声, 噪声与信号之间的互相关函数并不完全等于 0 (王彬, 2009), 但与二次相关运算之前的信号相比, 噪声相对于有效信号的幅度要小很多 (唐娟, 行鸿彦, 2007)。

## 2 模拟信号的二次相关时延检测

二次相关时延检测方法在低信噪比信号的基础上构建了信噪比更高的信号, 为了验证该方法应用于地震信号波速变化检测的可行性, 本文首先对理论地震数据进行二次相关检测实验。波速变化与走时变化存在如下关系:

$$\delta v/v = -\delta t/t \quad (10)$$

式中:  $\delta v$ ,  $\delta t$  为相对波速、走时变化;  $v$ ,  $t$  为原始路径的地震波速度和走时 (Schaff, Beroza, 2004)。

本文通过测量走时变化来代替波速变化。已知的理论信号长度为 1 400 个采样点, 信号带宽为 2~8 Hz, 采样率 100 Hz, 利用移动窗口压缩—拉伸法 (Meier *et al*, 2010; 刘志坤, 2010) 生成的波速变化率不超过  $\pm 5\%$ , 且具有 2 个正弦周期的

1 000 道信号, 然后在每道信号上随机加入高斯白噪声, 最后将生成的信噪比为 3 dB 的 1 000 道信号进行线性叠加作为参考模板信号  $c_f$ , 如图 1a 所示。图中黑色波形为叠加的参考信号, 其他 5 个波形为 1 000 道信号中随机选取的加入噪声和波速变化信号。从图 1a 中可以看出, 加入噪声的信号相对叠加信号已经基本看不出信号的有效相位。

对于加入噪声的 1 000 道信号, 我们从两个方面进行比较: 直接计算走时变化和经二次相关后计算走时变化。直接计算走时变化时, 利用基于移动窗口互相关的时延检测方法 (罗桂纯等, 2008; Wang *et al*, 2008; 刘志坤, 2010; 刘自凤等, 2015), 将这 1 000 道信号与叠加信号  $c_f$  进行互相关时延检测, 然后选取大多数信号走时变化比较平稳的相位提取走时变化。二次相关及计算

走时变化的处理步骤如下: ①对叠加的参考信号  $c_f$  进行自相关运算, 得到自相关函数  $c_0$ ; ②将加入噪声的每一道信号分别与参考信号  $c_f$  进行互相关运算, 得到 1 000 条互相关函数  $C_1$ ; ③将  $C_1$  里的每一条互相关函数与  $c_0$  进行互相关运算, 得到 1 000 条二次相关函数  $C_2$ ; ④将  $C_2$  里的所有二次相关函数进行线性叠加, 得到二次相关的参考函数  $c_s$ ; ⑤将  $C_2$  里所有二次相关函数分别与  $c_s$  进行互相关时延检测, 选取合适的相位提取走时变化, 并对检测结果进行插值以提高检测精度。二次相关方法本身具有时延检测的功能, 但考虑到精度方面的要求, 本文利用互相关时延检测方法对二次相关后的函数进行走时变化的提取。图 1b 为经二次相关后的信号波形, 与图 1a 中原始信号波形相比, 有效信号部分被凸显。

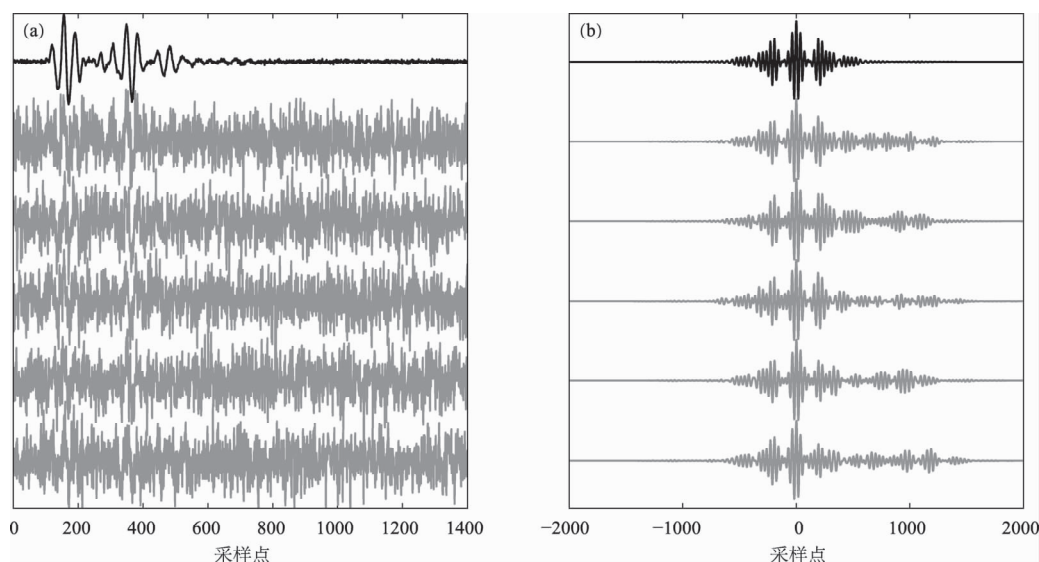


图 1 模拟地震信号 (a) 及二次相关后的信号 (b)

Fig. 1 The simulated earthquake signals (a) and their second correlation signals (b)

用以上两种方法计算的走时变化和理论波速变化率对比结果如图 2 所示。从图中可以发现, 直接计算的走时变化因为受到低信噪比等因素的影响, 与设定的波速变化相比基本没有趋势变化 (图 2a); 而二次相关后的走时变化趋势同设定的波速变化趋势较为吻合 (图 2b)。

从理论地震信号的二次相关时延检测的实验可以发现, 自相关和互相关运算的结合突出了有效信号而压制了不相干噪声, 从而提高了信号的信噪比和后续时延检测的精度。在实际数据处理中, 不同台站信号的噪声可能存在差异, 但由于

噪声是随机的, 根据式 (1) ~ (9), 相对于有效信号相同的相位和周期, 随机噪声二次相关后信噪比明显降低。而不同信号的高斯白噪声同样是随机的, 因此不同信号间高斯白噪声的互相关函数数值较小。

### 3 气枪震源信号的二次相关时延检测应用

宾川气枪信号发射台于 2011 年在云南大理宾川县大银甸水库建成, 位于红河断裂和程海—宾

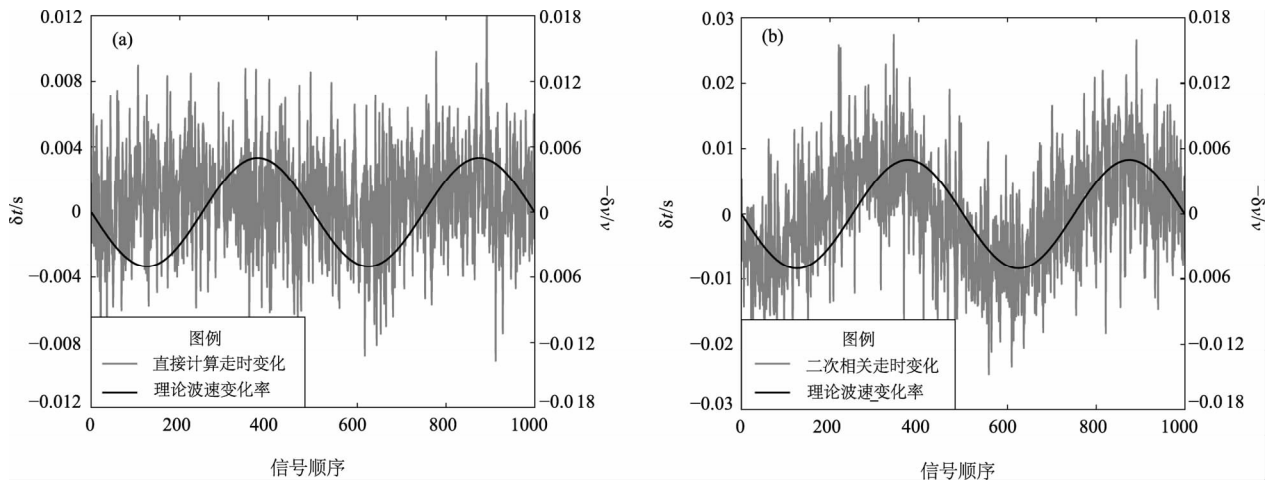


图2 直接计算 (a) 和二次相关后 (b) 的走时变化结果与理论波速变化率对比

Fig. 2 Comparison between the theoretical velocity variation rate and the travel-time delay variation by directly calculating (a) and the second correlation (b)

川断裂之间,该地区地震活动性明显(杨润海等, 2014; 陈佳等, 2017),气枪发射台气枪阵列由4支 Bolt 公司生产的1 500 LL 气枪组成(王彬等, 2015, 2016)。通常情况下,气枪阵列的工作气压为15 MPa,沉放深度为10 m,单次激发能量相当于一次 $M_L 0.7$ 天然地震(杨微, 2013)。气枪激发信号由分布在发射台周围的40个流动观测台站及原有的固定接收台站组成的接收台网接收,最远的流动接收台站为距离气枪发射台151 km的53252台,最近的为发射基地室内的CKT0台,距离气枪阵列约40 m,CKT0台被用作参考台,接收信号被视为震源函数。宾川气枪发射台激发信号最远可以传播300多千米,单次激发信号可以被53252台记录到,但震中距大于20 km台站的记录信号信噪比普遍较低(陈蒙, 2014; 向涯等, 2017)。

二次相关方法应用于模拟地震信号具有较好的效果,本文将其应用于气枪信号走时变化实际检测中,选择距离气枪震源67 km的53036台记录信号的SHZ分量进行走时变化的计算。原始记录信号中往往携带水位变化等震源信息或数据切取过程中的人为误差等干扰信息,因此在进行二次相关之前需要对53036台信号进行反褶积运算(王宝善等, 2012; 翟秋实等, 2016)。具体处理步骤如下:①53036台信号时频分析,确定滤波范围,并对53036台原始信号滤波以提升信号信噪比,剔除部分信噪比低或者难以辨认的信号;②53036台数据对CKT0记录信号进行反褶积运算,得到近似

格林函数;③单天所有的格林函数线性叠加以提升信噪比,得到这天的一条格林函数 $g_d$ ,再次进行滤波,并将所有格林函数进行叠加,得到参考格林函数 $g_0$ ;④参考格林函数 $g_0$ 进行自相关运算得到自相关函数 $c_0$ ,同时每天的格林函数 $g_d$ 与参考格林函数 $g_0$ 进行互相关运算得到每天的互相关函数 $c_d$ ,再将 $c_d$ 与自相关函数 $c_0$ 进行互相关运算,得到每天的二次相关函数 $c_{2d}$ ;⑤利用互相关时延检测技术分别对格林函数以及二次相关函数进行走时变化计算,并对检测出的走时变化结果进行插值以提高检测精度。

不同深度介质的速度变化敏感程度可能存在差异(赵盼盼等, 2012),波速变化的大小可能不同,因此为了计算不同相位的走时变化,对于不同时窗内的信号分别计算二次相关函数。图3为53036台的格林函数和不同相位的信号及其二次相关函数,其中图3a为选取的全部格林函数,黑实线为叠加的格林函数,图3b-1为所有格林函数的12.7~14 s信号(相当于P波信号),图3b-2为相对应的二次相关函数,图3c-1为27~27.5 s信号(相当于S波信号),图3c-2为对应的二次相关函数。图3中,由于53036台震中距较大,格林函数存在较多的干扰。选取的两段信号中,12.7~14 s内格林函数振幅较大、信噪比较高,相位之间同步性较好,二次相关函数与原始格林函数相比信号的同步性更好、信噪比更高;27~27.5 s内信号振幅相对较小、信噪比较低,相位同步性较12.7~14 s内的信号差,

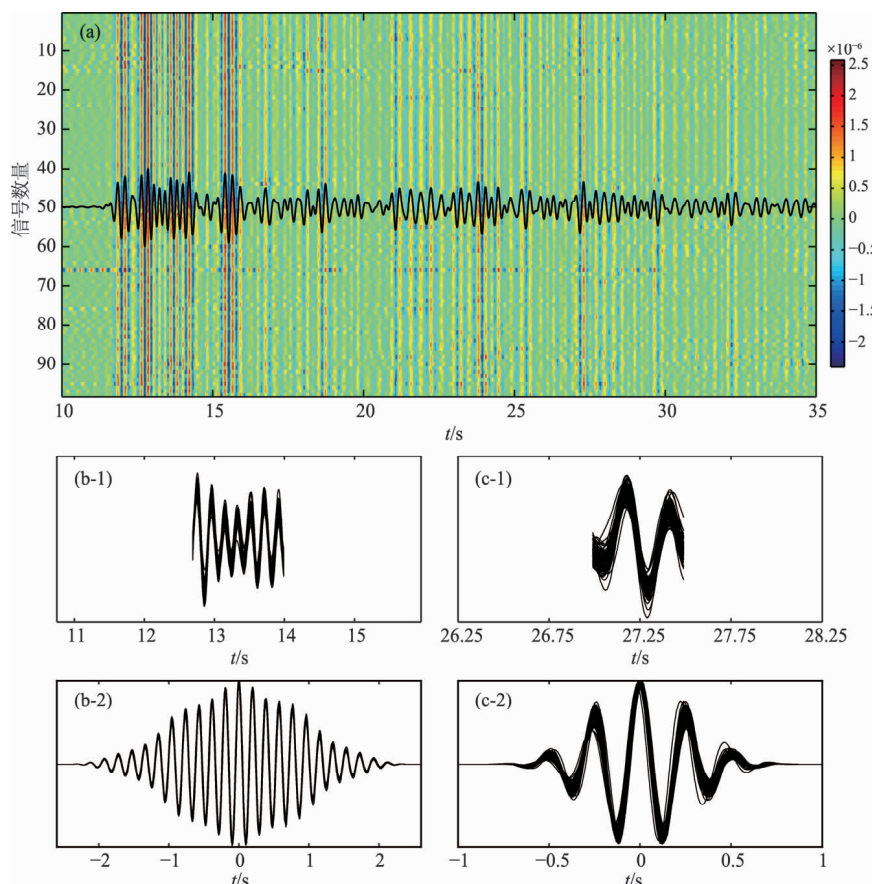


图3 53036 台格林函数 (a), 选取的 12.7 ~ 14 s 格林函数 (b-1) 及其二次相关函数 (b-2), 27 ~ 27.5 s 格林函数 (c-1) 及其二次相关函数 (c-2)

Fig. 3 The Green functions of station 53036 (a), the selected signal of 12.7 ~ 14 s (b-1) and its corresponding second correlation functions (b-2), Green functions of the selected signal of 27 ~ 27.5 s (c-1) and its corresponding second correlation functions (c-2)

二次相关同样提升了信号的信噪比。

分别计算选取时间段内格林函数和二次相关函数的走时变化, 结果如图 4 所示, 图 4a 为 12.7 ~ 14 s 内信号走时变化, 直接计算和二次相关后计算的走时变化结果趋势相近, 但二次相关后计算的走时变化误差相对更小, 变化更加稳定。图 4b 为 27 ~ 27.5 s 内信号走时变化, 两种方法计算结果显示的总体变化趋势存在一定差异, 但在某些时段的变化趋势相同, 这可能跟不同时段噪声水平存在差异有关, 且二次相关后的计算结果更加稳定。图 4c 为直接计算的走时变化对比, 12.7 ~ 14 s 内信号的走时变化总体趋势逐渐减小, 即波速逐渐增大; 27 ~ 27.5 s 信号的走时变化总体趋势是逐渐上升, 即波速逐渐减小, 两段信号的变化趋势存在差异。图 4d 为经二次相关后计算的走时变化对比, 12.7 ~ 14 s 信号的走时变化趋势为

逐渐减小; 27 ~ 27.5 s 信号的走时变化受信噪比影响波动较大, 但总体变化趋势也是逐渐减小。

## 4 讨论与结论

二次相关时延检测方法通过一次自相关和两次互相关运算构建新的格林函数, 压制了理论地震信号的噪声、加强了有效信号, 将该方法应用到气枪信号中有较好的效果。与直接计算的走时变化结果相比, 理论地震信号二次相关后得到与设定波速变化较吻合的走时变化, 说明二次相关时延检测方法具有一定的可靠性。但同时发现, 二次相关后的走时变化与设定的波速变化相比, 特别是在 500 道信号之前, 有较为明显的相位差, 这可能主要与信号较低的信噪比有关。信号的信噪比为 3 dB, 从图 1 中可以看出信号的有效相位



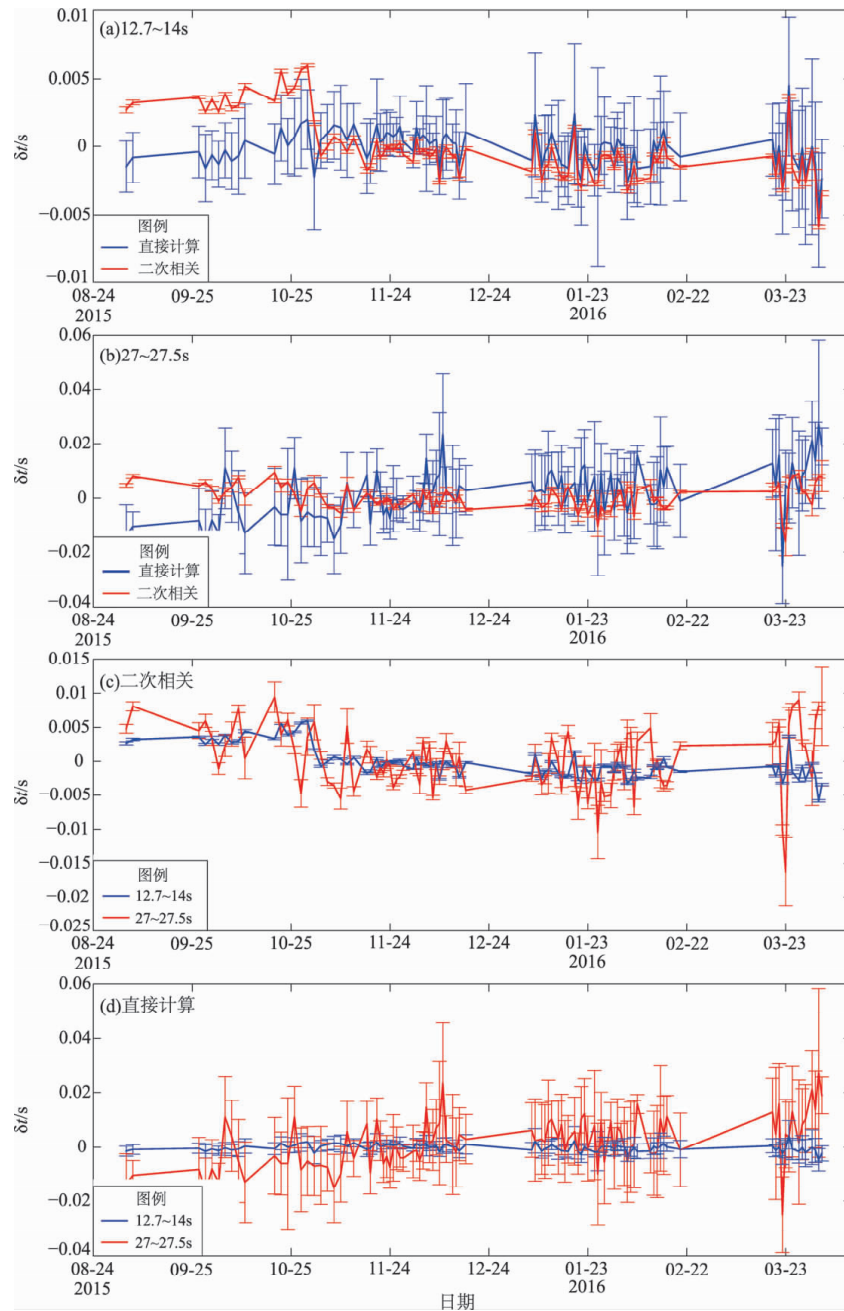


图 4 53036 台格林函数走时变化检测结果

Fig. 4 The results of travel-time delay variation of station 53036's Green functions

难以辨别，二次相关可在一定程度上提升信号的信噪比和运算结果的可靠性，但受限于信号的低信噪比，还未达到最理想的效果，因而出现一定的相位差。

将二次相关应用到计算气枪信号走时变化时，气枪信号二次相关后计算的走时变化更加稳定。信噪比较高的 12.7 ~ 14 s 信号，直接计算的和二次相关后计算的走时变化趋势相同；信噪比较低的 27 ~ 27.5 s 信号，两种方法的计算结果变化趋

势不同，但二次相关的计算结果与 12.7 ~ 14 s 信号的结果趋势相同，只是原始信号信噪比较低，计算结果波动较大。在应用互相关时延检测方法计算气枪信号走时变化时，利用 Cramer - Rao Lower Bound 计算走时变化的误差下限，方法如下：

$$\sigma_{\tau} \geq \sigma_{\tau}^m = \sqrt{\frac{3}{2\pi^2 f_0^3 T(B^3 + 12B)} \left[ \frac{1}{\rho^2} \left( 1 + \frac{1}{SNR^2} \right)^2 - 1 \right]} \quad (11)$$

式中:  $\sigma_r$  为实际算得的标准差;  $\sigma_r^m$  为理论标准差;  $f_0$  为信号主要频率;  $T$  为互相关窗口的长度;  $B$  为频宽比;  $\rho$  为待检测信号与模板信号间的相关系数;  $SNR$  为信号的信噪比。12.7 ~ 14 s 信号和 27 ~ 27.5 s 信号的二次相关函数的主要频率分别为 5 Hz 和 4 Hz, 频宽比分别为 2 和 3, 相关系数都约为 1, 信噪比分别约为 300 和 90, 相关窗口的长度都为 0.1 s, 分别带入式 (10) 求得两段信号的理论标准差约为  $6.50 \times 10^{-5}$  和  $2.16 \times 10^{-4}$ , 计算结果的标准差均值分别为  $1.58 \times 10^{-4}$  和  $1.30 \times 10^{-3}$ , 2 段信号二次相关的计算结果误差都大于理论误差下限, 因此本文气枪信号走时差测量计算结果较为可靠。

二次相关利用噪声与有效信号之间及噪声与噪声之间的弱相关特征, 将自相关与互相关运算相结合。本文通过模拟分析和实际资料处理对比, 发现二次相关可在滤波、叠加的基础上进一步提升信号的信噪比, 经过二次相关处理后计算得到的走时变化也更加稳定可靠。

本文计算走时变化所用互相关时延检测程序由中国科学技术大学王宝善教授提供, 在此表示衷心感谢。

## 参考文献:

- 陈佳, 叶泵, 高琼, 等. 2017. 利用气枪震源信号研究 2016 年云龙  $M_s 5.0$  地震前后波速变化[J]. 地震研究, 40(4): 550 - 526.
- 陈蒙. 2014. 利用水库大容量非调制气枪阵列进行区域尺度地下结构探测和监测[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 陈颢, 黄庭芳, 刘恩儒. 2009. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- 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.
- 窦慧晶, 王千龙, 张雪. 2016. 基于二次相关的广义互相关时差估计算法[J]. 北京工业大学学报, 42(2): 197 - 202.
- 杜娟, 程播. 2010. 基于二次相关的时延估计方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 30(6): 221 - 223.
- 刘志坤. 2010. 利用背景噪声研究汶川地震震源区及周边地壳介质地震波速度变化[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所.
- 刘自凤, 苏有锦, 王宝善, 等. 2015. 宾川主动源地震波走时变化分析方法研究[J]. 地震研究, 38(4): 591 - 597.
- 罗桂纯, 葛洪魁, 王宝善, 等. 2008. 利用相关检测进行地震波速变化精确测量研究进展[J]. 地球物理学进展, 23(1): 56 - 62.
- 唐娟, 行鸿彦. 2007. 基于二次相关的时延估计方法[J]. 计算机工程, 33(21): 265 - 267.
- 王宝善, 杨微, 王伟涛, 等. 2012. 利用反褶积消除激发环境对水库大容量气枪信号的影响[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理. 北京: 中国科学技术出版社.
- 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): 193 - 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. 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.
- 王伟涛, 倪四道, 王宝善. 2011. 地球背景噪声干涉应用研究的新进展[J]. 中国地震, 27(1): 1 - 13.
- 王伟涛. 2009. 基于人工震源的区域尺度介质波速探测研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学.
- 向涯, 王彬, 杨润海, 等. 2017. 气枪主动源与天然地震信号的传播特征对比研究[J]. 地震研究, 40(4): 605 - 612.
- 杨润海, 王彬, 庞卫东, 等. 2014. 云南地区中小震分布的活动构造意义[J]. 地震研究, 37(4): 603 - 606.
- 杨润海, 王彬, 郑定昌, 等. 2011. 云南地区波速变化与强震孕育[J]. 地震研究, 34(4): 420 - 427.
- 杨微. 2013. 区域尺度主动源探测技术及试验研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 翟秋实, 姚华建, 王宝善. 2016. 气枪震源资料反褶积方法及处理流程研究[J]. 中国地震, 32(2): 295 - 304.
- 赵盼盼, 陈九辉, Michel Campillo, 等. 2012. 汶川地震区地壳速度相对变化的环境噪声自相关研究[J]. 地球物理学报, 55(1): 137 - 145.
- 周康辉, 董万胜, 刘恒毅, 等. 2013. 利用二次相关改进的广义互相关时延估计算法[J]. 数据采集与处理, 28(6): 801 - 806.
- Aki K. 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors[J]. Bull Earthquake Res Inst, 35: 415 - 456.
- Carter G C. 1987. Coherence and delay time estimation[J]. Proc IEEE, 75(2): 236 - 255.
- Chen Y, Liu L, Ge H, et al. 2008. Using an airgun array in a land reservoir as the seismic source for seismotectonic studies in northern China: experiments and preliminary results[J]. Geophysical Prospecting, 56(4): 601 - 612.
- Chen Y, Wang B S, Yao H J. 2017. Seismic airgun exploration of continental crust structures[J]. Science China Earth Sciences, 60(10): 1739 - 1751.
- Friedrich A, Krüger F, Klinge K. 1998. Ocean - generated microseismic noise located with the Gräfenberg array[J]. Journal of Seismology, 2(1): 47 - 64.
- Hasselmann. 1963. A statistical analysis of the generation of microseisms[J]. Reviews of Geophysics, 1(2): 177 - 210.
- Longuet - Higgins M S. 1950. A Theory of the Origin of Microseisms[J]. Phil trans roy soc ser, 243(857): 1 - 35.
- Meier U, Shapiro N M, Breguier F. 2010. Detecting seasonal variations in seismic velocities within Los Angeles basin from correlations of ambient seismic noise[J]. Geophysical Journal International, 181(2): 985 - 996.
- Schaff D P, Beroza G C. 2004. Coseismic and postseismic velocity changes measured by repeating earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 109(B10): 67 - 85.
- Shapiro N M, Campillo M. 2004. Emergence of broadband Rayleigh waves

- from correlations of the ambient seismic noise [J]. *Geophys Res Lett*, 31(31):07614.
- Wang B S, Ge H K, Wang B, *et al.* 2016. Practices and Advances in Exploring the Subsurface Structure and Its Temporal Evolution with Repeatable Artificial Sources [J]. *Earthquake Research in China*, 30(3):284–297.
- Wang B S, Zhu P, Chen Y, *et al.* 2008. Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 113(B12):36–44.

## Study on Enhancing the Accuracy of Time Delay Estimation of Air-gun Signal Using the Second Correlation Delay Detection Method

XIANG Ya<sup>1</sup>, YANG Runhai<sup>2</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>, ZHOU Yunyao<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, Hubei, China*)

(2. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

### Abstract

Because of the further distance of the observation station, poor detection environment and interference in data processing, the signal to noise ratio of some stations' Green functions of the air-gun source receiving network are lower and the error of detection result of wave ratio is large. We first use the second correlation method for simulation testing, and then apply the method to the time delay detection of the Binchuan air-gun signal. Comparison results between the simulation and processing of air-gun signal shows that the time delay estimation based on the second correlation method has better anti-interference and the calculated results of it are more stable than that of the direct delay detection method.

**Keywords:** second correlation; time delay estimation; air-gun signal; Binchuan active source