

王宁, 杨春利, 李雪英, 等. 遗漏震相检测技术在 2016 年 9 月唐山震群中的应用[J]. 华北地震科学, 2017, 35(2): 38-43.

遗漏震相检测技术在 2016 年 9 月唐山震群中的应用

王宁¹, 杨春利², 李雪英¹, 常亮¹, 赵英萍¹

(1. 河北省地震局, 石家庄 050021; 2. 河北建设勘察研究院有限公司, 石家庄 050031)

摘要:以河北省数字测震台网测定的河北唐山震群目录中震级较大的地震事件为模板, 运用匹配滤波技术, 对 2016 年 09 月 10—12 日 3 天的连续波形做互相关扫描, 以进行唐山震群遗漏地震检测, 并确定遗漏地震的发震时刻; 运用 S 波振幅比方法估计遗漏地震震级; 用单纯型方法对遗漏地震进行定位, 确定震中位置。结果显示, 检测出 22 次遗漏地震, 进一步完善了地震目录。

关键词:监测能力; 目录完整性; 遗漏地震; 匹配滤波技术

中图分类号: P315.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-1375(2017)01-0038-06

doi: 10.3969/j.issn.1003-1375.2017.01.006

0 引言

地震目录是地震观测系统产出的最终成果, 目录的准确性、完整性直接影响区域地震活动、地震危险性分析及其后续科学研究的可信度^[1]。目前, 测震台网接收河北省属 53 个数字遥测地震台站, 加上周边地区共 166 个地震台站提供的实时地震数据, 河北省全省范围内地震监测能力达到 $M_L 2.0$, 唐山地区更是达到 $M_L 1.0 \sim 1.5$ ^[2](图 1a), 河北台网较高的地震监测能力为数据的产出提供了有力保证。随着监测能力的发展, 台网人员工作水平的不断提高, 使得地震目录的产出越来越精细。震群活动期间, 地震目录的产出向来是台网工作的重点和难点。在震群活动中, 震中附近短时间内往往发生大量地震, 震级大小不一, 不同地震相互交叠, 一些较小的地震难以辨别, 这些都给地震目录完整性造成了一定的影响。针对这种情况, 本文尝试用遗漏震相检测技术, 即波形匹配滤波技术对震群的遗漏震相进行检测。

2016 年 8—9 月河北唐山地区陡河台附近发生小震震群活动, 据《河北省测震台网地震观测报告》给出, 9 月 10—12 日为地震日频次最高的 3 天。仅这 3 天就发生地震事件 441 次, 其中 $M_L 1.0 \sim 2.9$

共 89 次, $M_L 3.0$ 以上 2 次, 最大地震震级为 $M_L 4.3$ (图 1b)。本文选取 $M_L 1.0$ 以上唐山地区地震为模板, 通过匹配滤波技术检测遗漏地震, 并对遗漏地震的震级和震中位置进行估计, 以补充现有地震目录。

1 研究方法

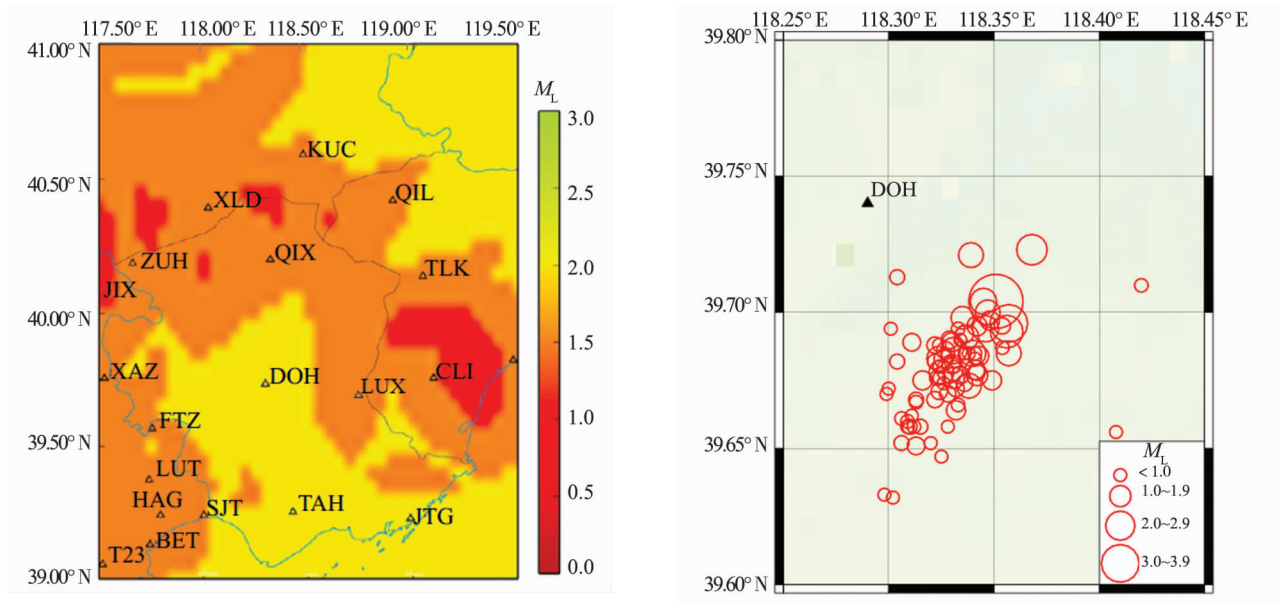
本文采用匹配滤波技术 (matched filter technique, MFT) 进行遗漏地震检测, 此方法是在低信噪比情况下提取信号的一种有效方法^[3]。经过快速发展, 匹配滤波技术已广泛应用于中强地震余震序列分析^[4-6]、非火山地脉动与低频地震^[7-8]、微震震群发震构造^[9-10]等方面的研究。

首先, 挑选地震序列中震级较大或记录波形信噪比较好的地震事件, 依据震相报告给出的到时数据, 从连续记录波形数据中截取相应地震事件波形作为模板, 以直达 S 波到时为中心, 截取其前 2 s 至后 2 s 波形。本次互相关扫描选用 $M_L 1.0$ 以上唐山地区地震 (表 1) 为模板, 若地震事件波形出现限幅、断计等情况, 则舍弃该地震。台站选取原则是: 宽频带地震计记录波形的台站, 地震记录较为清晰, 台站距离震中较近, 信噪比较高, 因此选取了 DOH、LUX、QIX、CLI、TLK、XLD 6 个台站参与互相关计算。

收稿日期: 2016-10-25

基金项目: 河北省地震局星火计划面上项目 (DZ20160408048)

作者简介: 王宁 (1988—), 女, 河北邯郸人, 助理工程师, 现主要从事地震监测方面研究. E-mail: 819087955@qq.com



a 唐山地区现有地震监测能力, 三角形为唐山地区台站

b 2016 年 9 月 10—12 日唐山震群震中分布图

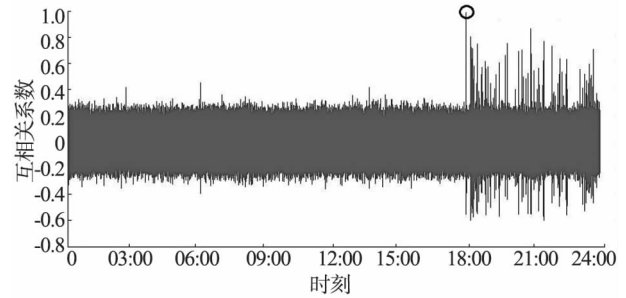
图 1 唐山地区地震监测能力及 9 月 10—12 日唐山震群震中分布图

表 1 模板地震选取

| 发震时刻 | 纬度/(°N) | 经度/(°E) | M_L | 发震时刻 | 纬度/(°N) | 经度/(°E) | M_L |
|-----------------------|---------|---------|-------|-----------------------|---------|---------|-------|
| 2016-09-10 17:57:12.5 | 39.670 | 118.299 | 1.0 | 2016-09-11 09:48:28.0 | 39.660 | 118.309 | 1.1 |
| 2016-09-10 18:09:01.8 | 39.685 | 118.340 | 2.1 | 2016-09-11 10:14:00.1 | 39.670 | 118.328 | 1.3 |
| 2016-09-10 18:09:37.8 | 39.704 | 118.351 | 4.3 | 2016-09-11 10:16:52.6 | 39.656 | 118.408 | 1.0 |
| 2016-09-10 18:13:00.8 | 39.693 | 118.356 | 2.6 | 2016-09-11 13:42:27.2 | 39.710 | 118.420 | 1.1 |
| 2016-09-10 18:14:18.5 | 39.691 | 118.337 | 1.9 | 2016-09-11 14:41:39.6 | 39.678 | 118.325 | 2.0 |
| 2016-09-10 18:15:19.5 | 39.658 | 118.310 | 1.2 | 2016-09-11 14:43:52.0 | 39.679 | 118.341 | 1.6 |
| 2016-09-10 18:17:28.0 | 39.658 | 118.309 | 1.1 | 2016-09-11 14:58:14.9 | 39.721 | 118.339 | 2.0 |
| 2016-09-10 18:19:15.4 | 39.696 | 118.357 | 3.0 | 2016-09-11 15:14:10.0 | 39.674 | 118.336 | 1.3 |
| 2016-09-10 18:28:04.4 | 39.664 | 118.332 | 1.5 | 2016-09-11 15:23:02.1 | 39.673 | 118.338 | 2.0 |
| 2016-09-10 18:54:15.9 | 39.652 | 118.306 | 1.2 | 2016-09-11 15:53:29.9 | 39.694 | 118.333 | 1.1 |
| 2016-09-10 18:56:22.0 | 39.672 | 118.300 | 1.0 | 2016-09-11 16:00:43.3 | 39.676 | 118.323 | 1.2 |
| 2016-09-10 18:56:27.9 | 39.698 | 118.335 | 1.8 | 2016-09-11 16:01:08.1 | 39.683 | 118.326 | 1.5 |
| 2016-09-10 19:17:43.4 | 39.688 | 118.322 | 1.3 | 2016-09-11 16:43:36.8 | 39.689 | 118.311 | 1.4 |
| 2016-09-10 20:19:41.7 | 39.658 | 118.315 | 1.2 | 2016-09-11 16:44:13.2 | 39.700 | 118.347 | 2.0 |
| 2016-09-10 21:25:58.6 | 39.658 | 118.328 | 1.0 | 2016-09-11 17:13:15.3 | 39.687 | 118.354 | 1.1 |
| 2016-09-10 22:17:26.7 | 39.662 | 118.311 | 1.0 | 2016-09-11 17:17:33.4 | 39.671 | 118.324 | 1.3 |
| 2016-09-10 23:14:45.5 | 39.652 | 118.320 | 1.0 | 2016-09-11 18:27:55.4 | 39.668 | 118.313 | 1.2 |
| 2016-09-10 23:18:33.5 | 39.692 | 118.336 | 1.4 | 2016-09-11 19:35:32.7 | 39.685 | 118.336 | 1.0 |
| 2016-09-10 23:18:57.7 | 39.675 | 118.349 | 1.5 | 2016-09-11 19:36:26.7 | 39.684 | 118.328 | 1.1 |
| 2016-09-10 23:22:07.1 | 39.688 | 118.324 | 1.1 | 2016-09-11 19:36:59.8 | 39.697 | 118.348 | 1.5 |
| 2016-09-10 23:30:39.8 | 39.676 | 118.331 | 1.7 | 2016-09-11 19:45:30.2 | 39.666 | 118.333 | 1.1 |
| 2016-09-10 23:35:59.2 | 39.679 | 118.329 | 2.1 | 2016-09-11 20:27:34.9 | 39.685 | 118.341 | 1.1 |
| 2016-09-10 23:39:59.4 | 39.674 | 118.326 | 1.0 | 2016-09-11 21:55:35.7 | 39.685 | 118.338 | 1.0 |
| 2016-09-11 00:01:16.6 | 39.672 | 118.332 | 1.3 | 2016-09-11 22:05:05.2 | 39.694 | 118.346 | 2.1 |
| 2016-09-11 00:12:47.1 | 39.686 | 118.327 | 1.4 | 2016-09-11 22:34:45.7 | 39.683 | 118.341 | 1.0 |
| 2016-09-11 00:33:20.2 | 39.677 | 118.342 | 1.7 | 2016-09-11 22:52:16.3 | 39.678 | 118.342 | 1.3 |
| 2016-09-11 00:35:21.5 | 39.676 | 118.324 | 1.0 | 2016-09-12 00:34:20.3 | 39.689 | 118.330 | 1.5 |
| 2016-09-11 01:17:33.4 | 39.690 | 118.334 | 1.0 | 2016-09-12 00:40:22.1 | 39.680 | 118.331 | 1.0 |
| 2016-09-11 04:14:26.8 | 39.684 | 118.343 | 1.5 | 2016-09-12 01:03:47.3 | 39.680 | 118.324 | 1.0 |
| 2016-09-11 07:20:44.1 | 39.683 | 118.324 | 2.0 | 2016-09-12 01:04:26.3 | 39.675 | 118.316 | 1.5 |
| 2016-09-11 07:27:59.0 | 39.658 | 118.312 | 1.1 | 2016-09-12 06:22:33.7 | 39.677 | 118.334 | 1.4 |
| 2016-09-11 07:38:15.2 | 39.661 | 118.306 | 1.1 | 2016-09-12 06:56:22.1 | 39.682 | 118.304 | 1.2 |
| 2016-09-11 07:40:35.4 | 39.667 | 118.313 | 1.1 | 2016-09-12 16:58:09.9 | 39.682 | 118.322 | 1.2 |
| 2016-09-11 07:41:31.7 | 39.686 | 118.331 | 2.1 | 2016-09-12 16:59:31.0 | 39.681 | 118.330 | 1.5 |
| 2016-09-11 08:17:12.9 | 39.695 | 118.354 | 1.3 | 2016-09-12 19:52:33.1 | 39.713 | 118.304 | 1.2 |
| 2016-09-11 08:49:35.5 | 39.695 | 118.342 | 1.6 | | | | |

模板选取后,基于匹配滤波技术,在连续波形上进行互相关扫描,得到地震与模板间的相关系数。在对地震波信号滤波时,需保证在保留地震信号的情况下滤掉噪声信号。本次运算中使用了 4 阶 Butterworth 零相移数字滤波器。通常所选台震中距不超过 50 km,选择 2~8 Hz 的滤波频段。计算中对模板地震波形和连续波形使用同样的滤波器和滤波频段滤波。若模板事件发震时刻处在所扫描的那一天,则每个台的互相关系数的最大值应为 1.0。此次震群计算中,以记录到的 9 月 10 日 17 时 57 分 12.5 秒地震的陡河台(DOH)连续波形的扫描结果为例(图 2)。在互相关序列图中最大值为 1.0(三分向互相关系数平均值),表明计算参数设置基本是正确的。

将互相关扫描的结果进行组合,计算序列的绝对离差中位数(MAD, median absolute deviation),以得到地震编目时遗漏的地震。绝对离差中位数倍数阈值是地震事件检测中最为关键的参数设置。MAD 倍数表示一个互相关系数在序列中脱离背景值的程度,其倍数越大表示在这一时间点连续波形与模板波形



注:小圆圈处表示互相关系数平均值为 1。

图 2 Eq910175712 对 DOH 台的互相关扫描序列图

相似程度越高,其为一次地震事件的可能性越大,本次运算中 MAD 倍数阈值默认值为 9^[4]。

2 遗漏地震事件检测

2.1 遗漏地震发震时刻和震级

基于互相关扫描模块的计算结果文件,给出每个模板地震所能够识别出地震事件的发震时刻,合并所有模板检测出来的地震事件,对比原始地震目录,就可找出遗漏地震。地震事件检测部分选取每 3 个台 1 天的互相关系数文件进行运算(表 2),本文

表 2 模板 Eq912165931 扫描 DOH、LUX、CLI 3 个台站检测出来的地震事件的发震时刻

| 检测地震发震时刻 | 3 台互相关系数均值 | 检测模板 | DOH 互相关系数 | LUX 互相关系数 | CLI 互相关系数 |
|------------------------|------------|-------------|-----------|------------|------------|
| 2016-09-12 01:04:26.05 | 0.234 018 | Eq912165931 | 0.792 945 | 0.002 360 | -0.093 250 |
| 2016-09-12 04:50:47.30 | 0.234 243 | Eq912165931 | 0.721 202 | -0.050 880 | 0.032 410 |
| 2016-09-12 04:54:00.75 | 0.263 165 | Eq912165931 | 0.798 422 | -0.200 790 | 0.191 866 |
| 2016-09-12 06:22:33.90 | 0.350 283 | Eq912165931 | 0.902 074 | 0.016 041 | 0.132 735 |
| 2016-09-12 06:23:34.05 | 0.190 312 | Eq912165931 | 0.788 237 | -0.110 750 | -0.106 560 |
| 2016-09-12 06:26:51.50 | 0.286 485 | Eq912165931 | 0.871 233 | -0.143 570 | 0.131 794 |
| 2016-09-12 06:35:30.45 | 0.319 836 | Eq912165931 | 0.878 873 | 0.064 971 | 0.015 664 |
| 2016-09-12 06:47:10.05 | 0.333 882 | Eq912165931 | 0.759 722 | -0.003 530 | 0.245 457 |
| 2016-09-12 06:55:35.75 | 0.217 072 | Eq912165931 | 0.742 893 | -0.158 540 | 0.066 866 |
| 2016-09-12 06:56:22.30 | 0.417 933 | Eq912165931 | 0.849 792 | 0.120 012 | 0.283 995 |
| 2016-09-12 06:56:49.65 | 0.422 099 | Eq912165931 | 0.961 175 | 0.245 767 | 0.059 356 |
| 2016-09-12 07:31:43.45 | 0.236 327 | Eq912165931 | 0.964 628 | -0.268 700 | 0.013 048 |
| 2016-09-12 09:19:30.35 | 0.266 491 | Eq912165931 | 0.675 882 | 0.109 966 | 0.013 624 |
| 2016-09-12 09:23:22.95 | 0.321 671 | Eq912165931 | 0.869 312 | 0.139 263 | -0.043 560 |
| 2016-09-12 09:30:23.15 | 0.254 706 | Eq912165931 | 0.726 411 | -0.054 160 | 0.091 861 |
| 2016-09-12 10:12:29.85 | 0.321 531 | Eq912165931 | 0.811 689 | 0.018 789 | 0.134 115 |
| 2016-09-12 12:59:01.20 | 0.432 261 | Eq912165931 | 0.930 276 | 0.193 979 | 0.172 528 |
| 2016-09-12 16:50:00.60 | 0.200 898 | Eq912165931 | 0.707 673 | -0.164 220 | 0.059 240 |
| 2016-09-12 16:53:08.10 | 0.295 149 | Eq912165931 | 0.800 406 | 0.181 062 | -0.096 020 |
| 2016-09-12 16:58:10.15 | 0.424 982 | Eq912165931 | 0.839 545 | 0.426 911 | 0.008 491 |
| 2016-09-12 16:58:49.50 | 0.317 635 | Eq912165931 | 0.849 838 | 0.093 067 | 0.010 001 |
| 2016-09-12 16:59:31.00 | 1.000 000 | Eq912165931 | 1.000 000 | 1.000 000 | 1.000 000 |
| 2016-09-12 17:00:36.35 | 0.318 384 | Eq912165931 | 0.896 042 | 0.188 658 | -0.129 550 |
| 2016-09-12 17:04:29.40 | 0.258 068 | Eq912165931 | 0.708 808 | 0.010 038 | 0.055 358 |
| 2016-09-12 18:17:50.20 | 0.224 006 | Eq912165931 | 0.666 484 | -0.083 438 | 0.088 973 |
| 2016-09-12 19:00:37.35 | 0.480 480 | Eq912165931 | 0.945 362 | 0.339 347 | 0.156 730 |
| 2016-09-12 19:52:33.40 | 0.362 403 | Eq912165931 | 0.961 291 | 0.116 595 | 0.009 322 |
| 2016-09-12 19:52:41.75 | 0.312 160 | Eq912165931 | 0.877 990 | 0.136 114 | -0.077 620 |
| 2016-09-12 23:27:48.65 | 0.288 471 | Eq912165931 | 0.826 258 | -0.035 229 | 0.074 384 |

选取 6 个台站, 每个模板地震对应 2 个地震事件检测结果文件。检查互相关扫描结果文件是否准确可靠的一种方法, 就是查看在模板地震发震时刻的平均互相关系数是否为 1.0。在模板地震的发震时刻, 互相关检测的结果应为模板波形的自相关, 即 3 个台站互相关系数都为 1.0, 平均互相关系数也为 1.0, 则表明计算参数设置合理。

需要注意的是, 同一个地震可能被很多模板检测出来, 即一条遗漏地震和目录地震均有多次扫描

结果, 如 9 月 10 日 22 时 29 分 58.8 秒遗漏地震, 被 Eq910181728, Eq910182804, Eq 910185622 等 8 个模板分别检测出; 9 月 10 日 22 时 31 分 55.9 秒遗漏地震, 被模板 Eq 910181519, Eq 910181728, Eq 910212558, Eq 911164336 共检测出 4 次, 等等。对于此种情况, 由于发震时刻差距很小, 故遗漏地震发震时刻取平均值。本次共检测出 22 处遗漏地震, 遗漏地震震级较小, 都在 $M_L 0.6$ 以下(表 3)。

表 3 遗漏地震发震时刻和震级

| 遗漏地震发震时刻 | 震级 (M_L) | 遗漏地震发震时刻 | 震级 (M_L) |
|------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| 2016-09-10 10:54:25.76 | 0.3 | 2016-09-11 07:17:25.58 | 0.3 |
| 2016-09-10 18:13:59.79 | 0.4 | 2016-09-11 07:58:37.34 | 0.3 |
| 2016-09-10 22:29:58.80 | 0.6 | 2016-09-11 12:13:20.94 | 0.6 |
| 2016-09-10 22:31:55.91 | 0.5 | 2016-09-11 14:22:48.17 | 0.4 |
| 2016-09-11 00:36:04.20 | 0.4 | 2016-09-11 15:26:13.20 | 0.6 |
| 2016-09-11 01:42:38.65 | 0.5 | 2016-09-11 15:29:35.50 | 0.6 |
| 2016-09-11 01:55:41.05 | 0.2 | 2016-09-11 23:04:15.36 | 0.4 |
| 2016-09-11 02:05:00.05 | 0.6 | 2016-09-12 04:33:43.58 | 0.4 |
| 2016-09-11 05:04:19.44 | 0.3 | 2016-09-12 08:15:40.13 | 0.3 |
| 2016-09-11 05:07:31.93 | 0.2 | 2016-09-12 05:51:14.00 | 0.2 |
| 2016-09-11 05:18:43.50 | 0.2 | 2016-09-12 22:05:32.30 | 0.2 |

在得到遗漏地震事件后, 接下来就是对遗漏地震震级的确定。测震台网一般利用水平向 S 波列最大振幅测量近震震级, 因而本研究使用 S 波到时后 2 s 振幅比测量遗漏地震震级。遗漏地震波形经过 4 阶 Butterworth 零相移数字滤波, 滤波频段是 2~8 Hz, 取其 S 波到时后 2 s 内最大振幅与模板地震 S 波到时后 2 s 内最大振幅之比, 即为遗漏地震 S 波震级。一个遗漏事件可以更换几个模板计算震级, 同一个模板也可以计算若干个遗漏事件的震级。本次运算取互相关系数大于 0.6 的震相的震级计算结果, 通过计算平均值得到遗漏地震最终的震级估计结果。互相关系数越大的, 震级计算结果也越可靠(图 3)。

波形模板为事件 Eq910181418 陡河台(DOH)记录, 扫描出的遗漏地震发震时刻为 2016-09-11 15:26:13.2; 图 3a 是 P 波通过垂直向波形互相关检测的互相关系数, 互相关最大值(CCmax)为 0.59; 图 3b 则是 S 波通过水平向的互相关系数, 互相关最

大值(CCmax)为 0.89。

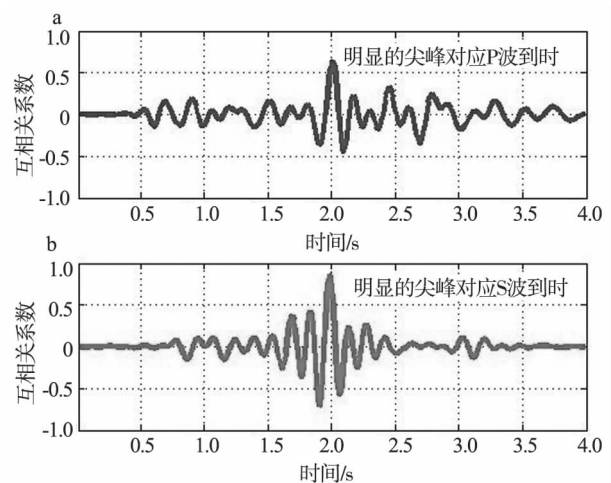


图 3 遗漏地震的 P、S 波到时及互相关系数示意图

2.2 遗漏地震定位

本次唐山震群台网目录已有地震事件共 441 次, 台网人员日常地震定位所使用的是单纯型

法^[11]。该方法是适用于地方震、近震和远震的地震定位程序。对于检测出来的遗漏地震也是运用单纯型法进行定位(表 4)。

表 4 遗漏地震事件定位及检测到震相的台站

| 遗漏地震发震时刻 | 震级(M_L) | 经度/(°E) | 纬度/(°N) | 检测到的台站 |
|------------------------|-------------|---------|---------|-------------------------|
| 2016-09-10 10:54:25.76 | 0.3 | 118.348 | 39.685 | DOH、LUX、CLI、QIX |
| 2016-09-10 18:13:59.79 | 0.4 | 118.424 | 39.770 | DOH、LUX、CLI、TLK、QIX |
| 2016-09-10 22:29:58.80 | 0.6 | 118.379 | 39.630 | DOH、LUX、CLI、TLK、XLD |
| 2016-09-10 22:31:55.91 | 0.5 | 118.388 | 39.642 | DOH、LUX、CLI、TLK、XLD |
| 2016-09-11 00:36:04.20 | 0.4 | 118.310 | 39.640 | DOH、LUX、CLI、TLK、QIX |
| 2016-09-11 01:42:38.65 | 0.5 | 118.343 | 39.661 | DOH、LUX、CLI、QIX、TLK、XLD |
| 2016-09-11 01:55:41.05 | 0.2 | 118.355 | 39.699 | DOH、LUX、CLI |
| 2016-09-11 02:05:00.05 | 0.6 | 118.336 | 39.675 | DOH、LUX、CLI、QIX、TLK、XLD |
| 2016-09-11 05:04:19.44 | 0.3 | 118.369 | 39.705 | DOH、LUX、CLI |
| 2016-09-11 05:07:31.93 | 0.2 | 118.334 | 39.606 | DOH、LUX、CLI |
| 2016-09-11 05:18:43.50 | 0.2 | 118.236 | 39.715 | DOH、LUX、CLI |
| 2016-09-11 07:17:25.58 | 0.3 | 118.435 | 39.757 | DOH、LUX、CLI、XLD |
| 2016-09-11 07:58:37.34 | 0.3 | 118.320 | 39.632 | DOH、LUX、CLI |
| 2016-09-11 12:13:20.94 | 0.6 | 118.342 | 39.673 | DOH、LUX、CLI、TLK、XLD |
| 2016-09-11 14:22:48.17 | 0.4 | 118.324 | 39.667 | DOH、LUX、CLI、TLK |
| 2016-09-11 15:26:13.20 | 0.6 | 118.399 | 39.656 | DOH、LUX、CLI、QIX、TLK、XLD |
| 2016-09-11 15:29:35.50 | 0.6 | 118.418 | 39.657 | DOH、LUX、CLI、QIX、TLK、XLD |
| 2016-09-11 23:04:15.36 | 0.4 | 118.365 | 39.685 | DOH、LUX、CLI、TLK、XLD |
| 2016-09-12 04:33:43.58 | 0.4 | 118.360 | 39.683 | DOH、LUX、CLI、TLK、XLD |
| 2016-09-12 08:15:40.13 | 0.3 | 118.322 | 39.668 | DOH、LUX、CLI、TLK |
| 2016-09-12 05:51:14.00 | 0.2 | 118.342 | 39.624 | DOH、LUX、CLI |
| 2016-09-12 22:05:32.30 | 0.2 | 118.239 | 39.700 | DOH、LUX、CLI |

3 结论与讨论

本文运用匹配滤波技术对 2016 年 9 月 10—12 日发生的唐山震群遗漏震相进行拾取检测,共检测出遗漏地震 22 条。运用 S 波振幅比对遗漏地震进行震级估计,并用单纯型地震定位方法对遗漏地震进行定位,得到以下结论:

1) 运用匹配滤波技术检测震群的地震事件,检测出来的结果地震个数比地震目录多。当一个地区发生震群之后,很短时间内出现大量地震,台网人员任务繁重,此种方法不仅能给台网人员提供一种震相拾取手段,而且可以作为一种对地震目录完整性

检测的方法。

2) 运用此方法虽然检测出一些遗漏地震,但由于震群中震级较小的地震波形信噪比低,可能难以检测到目录中所有的遗漏地震。

匹配滤波技术在震群中的应用,能有效地抑制低频干扰,检测出较多的遗漏地震事件。它对完善地震目录有一定的帮助,地震数目增加可使最小完整性震级降低;在以小震震群为基础的各项研究中,地震数目的增加,可以为震群发震构造的分析及其他的提供更为科学的依据^[12]。但是,模板数据量大,扫描时间长等这些问题是匹配滤波技术难以应用到台网日常工作的关键。随着科技和地震学研

研究的发展,以波形互相关方法来识别震相的相关研究将不断改进。另外,由于震群中震级较小的地震波形信噪比低,滤波过程中有很多较小的地震难以识别。我们会在接下来的工作中对程序进行优化,以期解决这一问题。

参考文献:

- [1] 冯建刚, 蒋长胜, 韩立波, 等. 甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析[J]. 地震学报, 2012, 34(5): 646-658.
- [2] 李冬圣, 蔡玲玲, 贾炯, 等. 河北省唐山地区小地震目录完整性分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2015, 36(4): 36-40.
- [3] 李璐. 台阵处理和模板匹配滤波技术在微弱地震信号检测中的应用研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2016.
- [4] Peng Z G, Zhao P. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(12): 877-881.
- [5] Schaff D. Improvements to detection capability by cross-correlating for similar events: a case study of the 1999 Xiuyan, China, sequence and synthetic sensitivity tests[J]. Geophysical Journal International, 2010, 180(2): 829-846.
- [6] Meng X F, Yu X, Peng Z G, et al. Detecting earthquakes around Salton Sea following the 2010 Mw7.2 El Mayor-Cucapah earthquake using GPU parallel computing[J]. Procedia Computer Science, 2012, 9: 937-946.
- [7] Shelly D R, Beroza G C, Ide S. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms[J]. Nature, 2007, 446(7133): 305-307.
- [8] Tang C C, Peng Z G, Chao K, et al. Detecting low-frequency earthquakes within non-volcanic tremor in southern Taiwan triggered by the 2005 Mw8.6 Nias earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(16): L16307.
- [9] 谭毅培, 曹井泉, 刘文兵, 等. 2013 年 3 月涿鹿微震群遗漏地震事件检测和发震构造分析[J]. 地球物理学报, 2014, 57(6): 1847-1856.
- [10] 谭毅培, 曹井泉, 卞真付, 等. 2013 年 8 月河北蔚县小震群遗漏地震检测与发震构造分析[J]. 地震学报, 2014, 36(6): 1022-1031.
- [11] Nelder J A, Mead R. A simplex method for function minimization[J]. The Computer Journal, 1965, 7(4): 308-313.
- [12] 蔡玲玲, 赵英萍, 李冬圣, 等. 河北地区中小地震震源参数的相关性研究[J]. 防灾减灾学报, 2016, 32(3): 101-106.

Application of Missing Seismic Phase Detection Technology in Tangshan Earthquake Swarm on September 2016

WANG Ning¹, YANG Chun-li², LI Xue-ying¹, CHANG Liang¹, ZHAO Ying-ping¹

(1. Earthquake Administration of Heibei Province, Shijiazhuang 050021, China;

2. Hebei Research Institute of Construction & Geotechnical Investigation Co., Ltd, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: In this paper, using matched filtering technology, the missing seismic phases of the Douhe earthquake swarm on september10 to 12 in 2016 in Tangshan region are detected. In the detection, the largest earthquake in the swarm is taken as the template of the existing earthquake catalog produced by Hebei seismic network. The continuous waveforms are cross-correlated scanned to determine the occurrence time of the missing earthquake; The magnitude of missing earthquakes is estimated by using S wave amplitude ratio method; Location of observed earthquakes is determined by simple seismic location method. The results show that a total of twenty two missed earthquakes were detected which improve the earthquake catalog.

Key words: monitoring ability; directory integrity; missing earthquake; matching filtering technique