

葛慧颖, 李红谊, 黄雅芬, 王同利, 刘敏, 李炎臻, 2020. 波形模板匹配定位方法在北京地区的应用. 震灾防御技术, 15 (4): 788-801. doi: 10.11899/zzyfy20200413

波形模板匹配定位方法在北京地区的应用¹

葛慧颖^{1,2)} 李红谊¹⁾ 黄雅芬¹⁾ 王同利³⁾ 刘敏¹⁾ 李炎臻¹⁾

1) 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083

2) 上海佘山地球物理国家野外科学观测研究站, 上海 201602

3) 北京市地震局, 北京 100081

摘要 在震害学研究中, 高效的微震检测方法是既重要又具有挑战性的问题。本文对波形模板匹配检测方法、匹配定位技术、波形自相关检测技术进行详细介绍和对比, 对国内外应用实例进行总结, 并展望微震检测方法应用前景和发展趋势。利用基于图形处理器加速的匹配定位技术和双差地震定位法, 对北京地区 19 个台站记录的 2015 年连续地震资料进行分析。基于中国地震台网中心提供的地震目录, 筛选出 245 个地震事件作为模板事件, 检测得到 1229 个地震事件, 约为地震台网原始地震目录数量的 5 倍。精定位结果可显示小震沿黄庄-高丽营断裂周边小断裂分布形态特征, 本文微震检测和定位结果可为研究北京地区地震活动性与发震断层深部构造提供基础数据支撑。

关键词: 微震 波形模板匹配检测 匹配定位技术 微震检测 北京地区

引言

微震检测在震害学诸多研究中均十分重要, 如大地震前震活动性(Kato 等, 2012; Brodsky 等, 2014)、地震触发(Hill 等, 1993; Kilb 等, 2000; Gombert 等, 2001; Peng 等, 2010; Meng 等, 2013, 2014; Wang 等, 2015)、大地震成核(Kato 等, 2012; Brodsky 等, 2014; Ellsworth 等, 2018)、断层形态刻画(Mori 等, 1990; Dreger 等, 2000; Kuge, 2003; Kao 等, 2007; Yang 等, 2009)、水力压裂诱发地震检测(House, 1987; Rutledge 等, 2003; Eisner 等, 2008; Anikiev 等, 2014)、小当量核试验检测(Waldhauser 等, 2004; Wen 等, 2010; Zhang 等, 2015a)等, 同时, 微震检测研究具有一定挑战性。国内外学者提出了多种地震事件识别方法, 如应用较多的长短时窗比检测法(Stevenson, 1976; Earle 等, 1994; Kao 等, 2004, 2007; Liao 等, 2012; Gharti 等, 2010; Grigoli 等, 2013a, 2013b; Drew 等, 2013; Langet 等, 2014)、利用互相关技术的波形模板匹配检测方法、震源扫描叠加法和波形自相关检测技术。由于微震记录信噪比较低, 长短时窗比检测法虽较简单、计算速度快, 但无法有效应用于微震检测中。震源扫描叠加法检测能力较低, 限制了对微震震级的检测, 对震源位置进行搜索时需利用绝对走时, 该过程十分依赖速度模型。因此, 本文对应用较广的波形模板匹配检测方法、匹配定位技术、基于图形处理器(Graphics Processing Unit, 简称 GPU)

1 基金项目 北京市自然科学基金项目(8212041); 上海佘山地球物理国家野外科学观测研究站开发基金(2020K02)

[收稿日期] 2020-09-08

[作者简介] 葛慧颖, 女, 生于 1996 年。硕士研究生。主要从事天然地震小震探测研究。E-mail: ghy9611@163.com

加速的匹配定位技术 (Liu 等, 2020) 与波形自相关检测技术进行研究, 应用基于 GPU 加速的匹配定位技术与双差地震定位法 (Waldhauser 等, 2000) 对北京地区 19 个台站记录的 2015 年连续地震资料进行分析, 获得完备的地震目录, 并进行精定位, 从而为北京地区地震活动性与发震断层深部构造研究提供基础资料。

1 波形模板匹配检测方法

存在噪声的情况下, 将模板事件波形与输入的待识别连续数据进行互相关是检测已知信号的主要手段, 可应用于多个台站的情况 (Gibbons 等, 2006), 以此为基础的波形模板匹配检测方法基本检测步骤为: (1) 对模板事件波形与连续波形进行相同参数滤波; (2) 选定滑动时间窗口与移动步长, 进行模板事件波形与连续波形之间的互相关, 搜索与模板事件相似的事件, 并得到相应的互相关系数 (Shelly 等, 2007; Peng 等, 2009; Meng 等, 2013); 接着对多个台站分量记录到的模板事件波形与记录的连续波形进行互相关叠加, 并计算平均互相关系数, 以此衡量检测到的事件与模板的相似度; (3) 将检测到的高于一定阈值的事件作为结果, 如果检测结果中出现重复事件, 则选取窗口长度内互相关系数最高的事件。判断检测到的事件是否作为地震事件, 取决于检测阈值, 因此阈值的设定尤为重要。通常对每个互相关系数进行中位数绝对偏差计算 (Shelly 等, 2007)。检测结果中的震中位置代替了相应模板检测事件的震中位置, 同时, 根据模板事件和检测事件之间的震级比与振幅对数比线性关系计算检测事件的震级 (Peng 等, 2009; Wang 等, 2015)。在数据处理过程中, Meng 等 (2013) 设置了数据自检环节, 为使所有模板事件均实现完美自检 (得到的互相关系数 >0.98), 在叠加互相关系数时允许 1 个数据点存在偏移, 即在每个时间点, 其自身及 2 个相邻点间的最高互相关系数均用于叠加。进行偏移处理后, 可叠加所有分量最佳相关窗口。

通过波形模板匹配检测方法可得到更完整的地震目录, 降低地震目录的完备震级。Shelly 等 (2007) 通过波形模板匹配检测方法, 将先前记录和定位的低频地震作为模板事件, 检测出了日本四国岛震颤活动, 同时认为此次震颤活动为低频地震。该方法可在时间和空间上以高分辨率寻找震颤来源, 表明震颤和缓慢异化是单个过程的不同表现。Peng 等 (2009) 应用该方法, 以发生在帕克菲尔德断层附近的 3647 个重定位地震事件作为模板, 检测 2004 年 9 月 28 日帕克菲尔德 $M_w6.0$ 地震发生后 3d 内漏掉的余震事件, 捕捉到了比北加利福尼亚地震台网标准目录给出的余震事件多 10 倍的地震事件, 并在此基础上研究了该次地震发生后早期余震的迁移特性。Meng 等 (2013) 应用波形模板匹配检测方法检测了 2003 年圣西蒙 $M_w6.5$ 地震发生前 46d 到发生后 31d 圣安德烈斯断层帕克菲尔德段的地震, 得到的地震事件数量为北加利福尼亚地震台网地震目录数量的 8 倍, 且发现沿圣安德烈斯断裂蠕动的部分的地震事件数量在圣西蒙主震后呈显著下降趋势, 这与主震产生的负静态应力变化 (即应力阴影) 密切相关。Kato 等 (2014) 应用波形模板匹配检测方法对 2014 年智利伊基克 $M_w8.1$ 地震震源附近记录到的连续波形数据进行了检测, 得到的地震事件数量为美国地质勘探局地震台网地震目录数量的 10 倍, 并确定了多个地震迁移序列, 还识别到了重复地震, 推测为前震序列中沿板块边界断层的地震滑动情况。Walter 等 (2015) 应用波形模板匹配检测方法分析了哥斯达黎加尼科亚半岛 2012 年 9 月 5 日 7.6 级地震发生前的地震活动, 大大提高了地震目录的完备性, 确定了主震前约 35min、距震源 15km 以内的小地震 (震级 <2.2), 并分析了地震事件触发的可能性。Huang 等 (2017) 通过波形模板匹配检测方法恢复 2015 年 $M_w8.0$ 戈尔卡地震发生前 80d 到发生

后 30d 的地震,检测到的余震数量是国际地震中心地震目录所列余震数量的 2 倍,发现 2015 年 5 月 12 日 7.3 级最大余震发生前,发生了 1 次沿主震破裂断层走向的余震扩展。

波形模板匹配检测方法可有效检测信噪比较低的地震信号,但进行模板事件波形与连续波形互相关耗时较长。目前,GPU 计算已从固定功能的图形设备演变为高度可编程的并行处理器。波形模板匹配检测方法在多个级别上表现出并行性:(1)存在多个模板,每个模板均需与连续波形进行匹配;(2)连续波形本身由一连串的数据点窗口组成;(3)模板和连续波形均包含多个台站记录的多个分量数据;(4)在并行结构的更底层,每个分量均包含多个数据点,这些数据点为互相关分析输入文件,可实现并行。

为降低时间成本,Meng 等(2012)提出了基于 GPU 显著提速的检测算法。为探索这种层次结构的并行性,研究人员将计算分解为多个任务,利用分解后的任务计算模板和滑动窗口内连续波形的相关性,其中每个任务均将 1 个模板通过滑动窗口与相同长度的连续波形进行匹配。该检测方法的设计集中在以下算法方面:(1)将总任务分组并分配给 GPU 进行计算;(2)将每个任务的 GPU 代码优化。与串行的 CPU 代码相比,Meng 等(2012)通过 GPU 处理将 1 张英伟达(Nvidia)显卡的速度提高了约 40 倍。

对于任务分配,需注意以下方面:(1)每组任务不应超过 GPU 的内存容量,使 GPU 有足够的内存容纳数据(包括输入、输出和临时处理数据);(2)分配时应涵盖所有任务,并在各小组间保持均衡,以确保将所有任务分配给 GPU,各任务 GPU 计算时间相对一致;(3)分配任务时应将传送和冗余的计算成本最小化。

Meng 等(2012)通过使用 GPU 提速代码,仅用约 48h 完成了以下计算:使用 2000 个模板波形、80d 的连续波形,共检测到约 24000 个地震事件,约为南加州地震台网地震目录数量的 70 倍,并根据新检测到的事件和南加州地震台网地震目录分析计算了地震活动率。Meng 等(2014)利用该方法,在 2010 年 $M_w7.2$ El Mayor-Cucapah 主震附近的索尔顿海地热田和圣哈辛托断裂带得到了更完整的地震目录,新检测到的目录揭示了 2 个研究区域在主震后的地震活动率均显著提高。Liu 等(2019)利用波形模板匹配检测方法和双差地震定位法研究门源主震后余震的时空演变,将中国地震台网中心提供的地震目录和重定位后的地震目录中的事件作为模板,扫描了 2016 年连续波形数据,得到的事件较中国地震台网中心提供的地震目录和重定位后的地震目录数量分别多 3 倍和 11 倍。利用更完整的地震目录,对研究区域余震时空演变进行分析。

波形模板匹配检测方法使用的互相关技术对于微弱信号极其敏感,检测到的地震震级远小于其他方法,但仅能检测模板事件附近的地震,并假设待检测地震与模板事件发生在同一位置,不能提供检测事件的位置信息(张森,2015)。

2 匹配定位技术

针对波形模板匹配检测方法的局限性,Zhang 等(2015a)研发了微震检测新方法,即匹配定位技术,该技术与波形模板匹配检测方法最大不同之处在于,在相关波形叠加前考虑了微震与模板之间的位置差,从而在检测的同时对检测事件进行了定位。

匹配定位技术首先根据已有台网地震目录确定扫描所需的模板事件,并确定模板事件的位置信息;然后在每个台站的所有分量上选取模板事件振幅最大的震相作为参考震相,并将其与连续波形进行滑动互相关;接着以模板事件所在位置为搜索中心,在经度、纬度和深度

方向上对可能存在微震的位置进行网格化搜索, 搜索过程中首先计算微震每个可能存在的格点位置与参考模板位置到同一台站的到时差, 通过到时差对每个台站各分量滑动互相关值进行位置校正; 最后计算各台站所有分量叠加后的滑动互相关系数平均值与信噪比, 当上述 2 个参数大于设定的阈值时, 即认为捕捉到了 1 个地震事件, 并将该网格点的空间位置确定为相应的震源位置。捕捉到的地震事件震级依靠于所有台站分量中参考震相的振幅比中位数(张森, 2015; Peng 等, 2009; Meng 等, 2013)。

匹配定位技术将滑动互相关系数平均值与信噪比作为阈值控制输出结果, 通过降低检测标准增加检测数量, 降低误检概率。另外, 为避免重复检测, 在特定时间窗口中选取相关系数最大的地震作为检测到的地震事件。

Zhang 等 (2015a) 应用匹配定位技术检测并定位了朝鲜于 2010 年 5 月 12 日进行的小当量核试验, 将朝鲜 2009 年和 2013 年核试验产生的地震作为模板事件, 对 2010 年 4 月 1 日至 2010 年 5 月 31 日距朝鲜核试验基地 200km 内的 7 个地震台站记录到的连续波形进行扫描, 得到 2010 年核试验位置, 进一步确认该事件的频谱比 Pg/Lg , 最终认定其为爆炸类型, 为朝鲜 2010 年 5 月 12 日小当量核试验的存在提供了地震学证据, 展示了利用地震数据对小当量核试验进行科学检测的能力。Zhang 等 (2015b) 利用匹配定位技术对 2007 年和 2014 年日本 Ontake 火山 2 次活动过程中产生的连续波形进行扫描, 检测到 2 次活动中的地震数量分别为日本气象厅提供的地震目录数量的 37 倍和 30 倍。根据新的完备地震目录, 发现 2014 年日本 Ontake 火山活动中存在地震数量增多和减少交替出现的规律, 该规律出现在大规模地震活动初期(张森, 2015)。

应用匹配定位技术时, 首先进行相对走时校正, 然后对互相关系数进行最大化叠加, 随后在模板周围三维范围内搜索新识别事件的最佳位置, 最后提供检测事件的位置信息。该方法虽已使用共享内存并行编程 (OpenMP) 进行加速计算, 但由于计算机 CPU 内核有限, 随着地震数据量的增加和搜索网格的减小, 处理数据产生的时间成本仍不可忽略。计算时间主要由匹配定位技术中的波形互相关及校正时间偏移后的互相关过程决定, 将任务进行合理分配是亟待解决的问题。Liu 等 (2020) 对匹配定位技术进行改进, 得到基于 GPU 加速的匹配定位技术, 该技术为模板事件波形添加了权重因子, 并进一步完善了 GPU 计算问题, 首先将模板事件波形和连续波形加载到 CPU 随机存取存储器; 然后计算所有模板事件位置与潜在事件位置的偏移量; 接着将模板事件波形和连续波形从 CPU 随机存取存储器传输到 GPU 随机存取存储器, 再传输到线程块共享内存, 每个模板有 2 个 GPU 内核循环, 以计算滑动相关系数, 并根据偏移量将滑动相关系数叠加, 将叠加后的滑动相关系数传回 CPU 随机存取存储器; 最后合格的检测结果形成了新目录。基于 GPU 加速的匹配定位技术增强了检测能力, 扩大了检测范围, 显著提高了计算效率, 且降低了可检测地震的震级, 可对检测到的地震事件进行定位。Liu 等 (2020) 利用基于 GPU 加速的匹配定位技术对 2015 年阿拉善左旗地震余震进行检测, 以中国地震台网中心提供的 38 次余震作为模板事件波形, 扫描主震后 7 天的连续波形, 检测到的余震数量为中国地震台网地震目录数量的 20 倍左右, 并依据余震空间分布与震源机制解, 判断此次 5.8 级地震发生在东西向隐伏走滑断层上。

3 波形自相关检测技术

Brown 等 (2008) 在解决地颤动中低频地震搜索问题时, 提出了波形自相关检测技术, 该技术无需先验的地震信号信息, 可认为是彻底的盲搜索技术。首先对连续波形进行适当的预

处理,如滤波等;然后将各台站各分量连续波形数据按一定时窗长度间隔分成若干部分,由于无先验的模板信息,相对于 Shelly 等(2007)使用的时间窗口,波形自相关检测技术时窗长度更长;接着将所有可能成对的时窗分别进行互相关并叠加,选取超过一定阈值的事件作为候选事件;最后将所有候选事件对应在同一台站的波形进行额外互相关运算,并按互相关系数高低进行分组并叠加形成高信噪比模板,运用波形模板匹配检测方法进行补充搜索(刘翰林等,2017)。

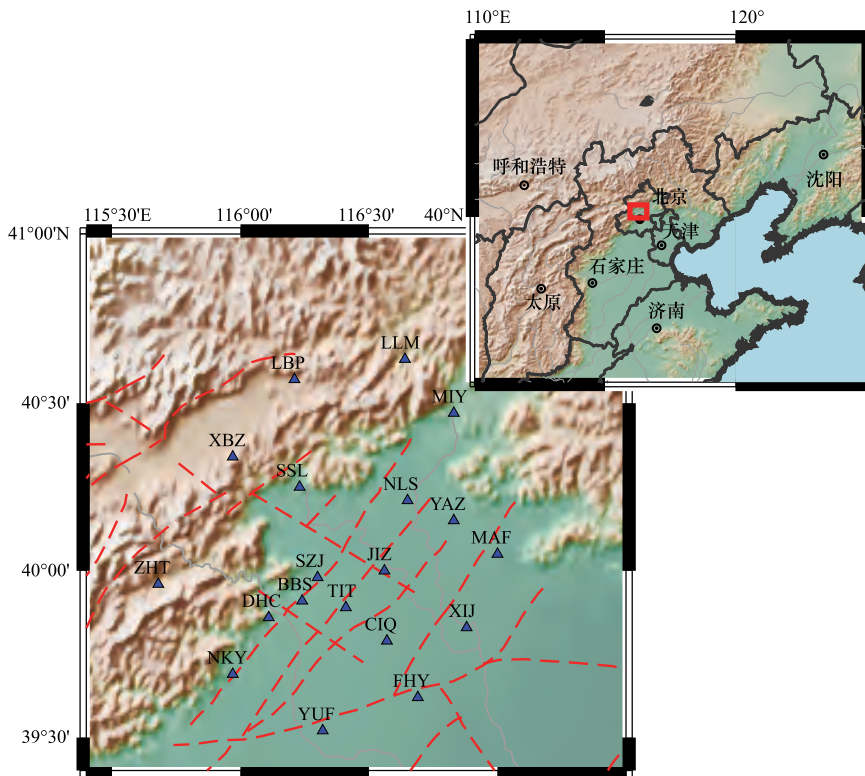
Brown 等(2008)运用波形自相关检测技术对 6 个台站数据进行处理,选取 6s 的时间窗进行计算,将大于 5 倍中位数绝对偏差的事件确定为候选事件,并利用这些事件进行模板匹配滤波扫描,得到 287 个低频地震事件,通过对低频地震事件进行分析,认为日本西南部的深部震颤是重复的低频地震群,发生在 30—35km、地震发生带板块界面下倾面处。

波形自相关检测技术可在模板准备阶段提供帮助,得到更多高信噪比模板事件,但该技术依赖于大量相关计算,对于数据量庞大的研究而言,仍存在计算量大和时间成本过高等问题。

4 基于 GPU 加速的匹配定位技术在 2015 年北京地区微震检测中的应用

4.1 台站分布与研究数据

本文收集了中国地震台网中心与北京市地震局在北京地区布设的 19 个固定地震台站记录到的 2015 年连续波形,研究区域位置和台站分布如图 1 所示。在台网中心提供的地震目录中筛选 245 个地震事件作为模板事件,利用基于 GPU 加速的匹配定位技术对连续波形进行扫描检测。



注:红色虚线表示研究区域断裂带,蓝色三角表示台站。

图 1 研究区域台站分布图

Fig. 1 Distribution of stations in the study area

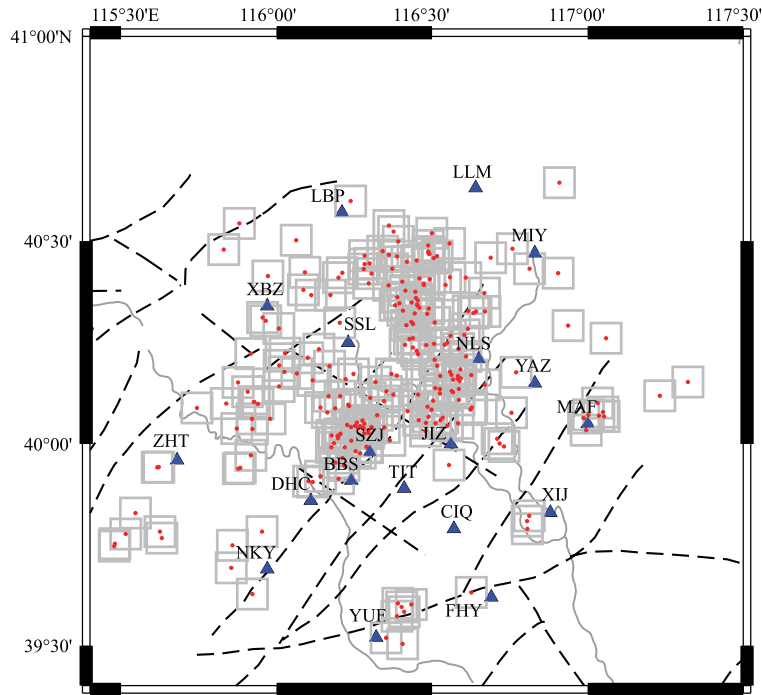
4.2 检测过程

(1) 模板事件和连续波形均进行相同参数的减采样率处理，将采样率由 100Hz 降至 20Hz，以提升计算速度。

(2) 对模板事件和连续波形进行 2—8Hz 带通滤波，根据区域一维速度模型，使用 TauP (Crotwell 等, 1999) 计算模板事件 P 波和 S 波理论到时，并对到时进行人工核验与校正。

(3) 模板扫描窗口为 S 波到时前 1s 至后 5s，对模板事件每个分量波形数据质量赋予权重因子。考虑研究区域范围、模板分布与时间成本，以模板事件位置为中心，设置搜索区域为 8km×8km，搜索步长为 2km (图 2)。

(4) 利用双差地震定位法对地震事件进行精定位 (杨智娴等, 2003; 朱艾澜等, 2005; 张广伟等, 2011; 胡幸平等, 2013)，共获得 922 个精确的地震位置。



注：蓝色三角表示台站，黑色虚线表示断层，红点表示 2015 年台网地震目录中筛选出的模板事件，灰色实线框表示对应模板事件的扫描范围。

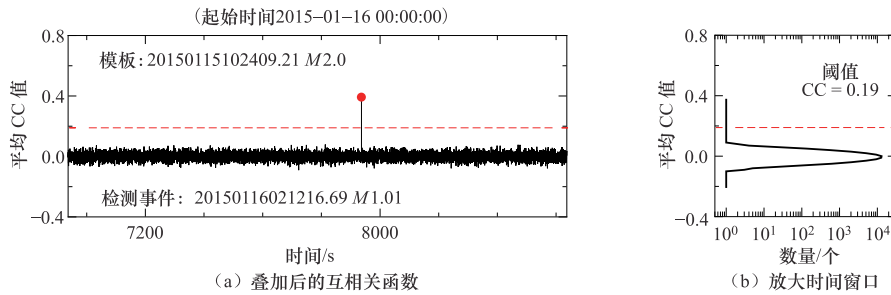
图 2 研究区域模板事件分布与扫描范围图

Fig. 2 The distribution of templates and scanning range for each event

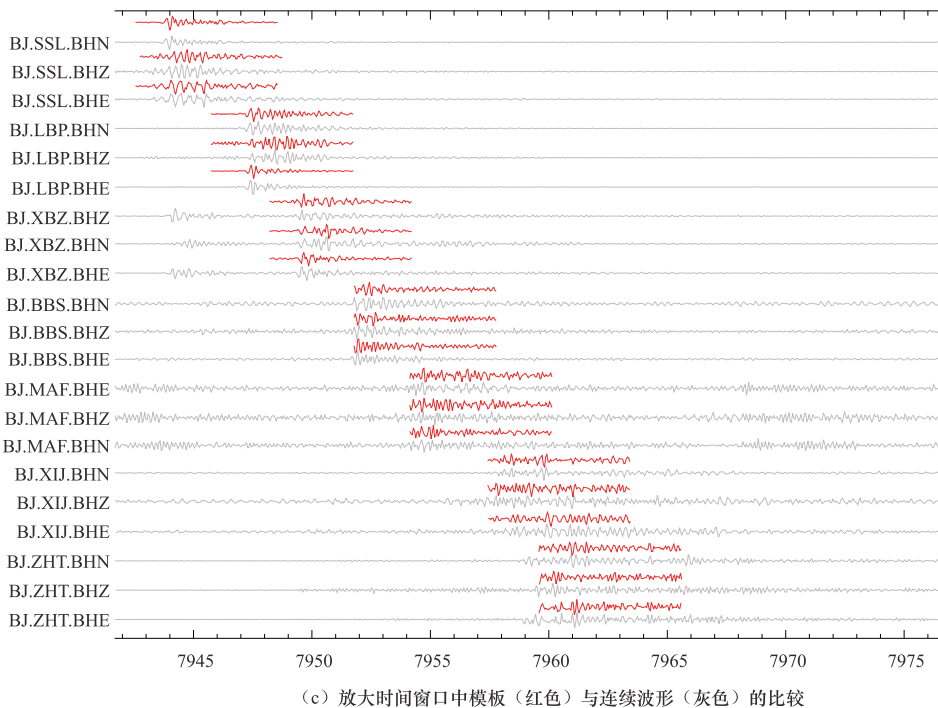
4.3 结果与分析

本文利用 245 个模板事件，经扫描检测得到高达 1229 个地震事件，约为地震台网地震目录数量的 5 倍。模板事件为 2015 年 1 月 15 日 2.0 级地震事件，检测到的事件为 2015 年 1 月 16 日 1.01 级地震事件 (图 3)。精定位后的地震分布如图 4 所示，由图 4 可知，地震主要集中在黄庄-高丽营断裂 (图 4 中白线) 附近。地震数量-震级关系如图 5 所示，由图 5 可知，

检测到的地震事件以 1 级以下微震为主。



(起始时间2015-01-16 00:00:00.00; 模板事件: 20150115102409.21; 平均CC值 = 0.3932; MAD = 30.6200)



注: 图 3 (a) 红点表示检测到的事件, 红色虚线表示检测标准为中位数绝对偏差的 9 倍; 图 3 (b) 为对应图 3 (a) 所示窗口的互相关值分布

图 3 利用基于 GPU 加速的匹配定位技术检测到的 1 个地震事件

Fig. 3 A seismic event detected by GPU-ML

检测到地震在潭柘寺地区密集分布, 震源深度主要为 5—10km, 分布趋势为北西向, 如图 6 所示, 这补充了台网中心地震目录在该范围的空缺。由于该区域附近的模板事件数量较少, 导致检测到的结果数量少, 可见南东侧地震分布较深, 北西侧地震分布较浅, 提示断裂倾向为南东。在黄庄-高丽营断裂带北端, 震源深度分布较广泛, 以 10—20km 为主, 震源深度较潭柘寺地区深, 总体分布情况与台网地震目录相似。在垂直于断裂带走向的剖面 (图 6 (e)), 地震集中分布情况显示出断裂倾向为南东, 且断层倾角较大。检测到的地震目

录完善了地震台网原始地震目录，更好地揭示了该地区断层形态。

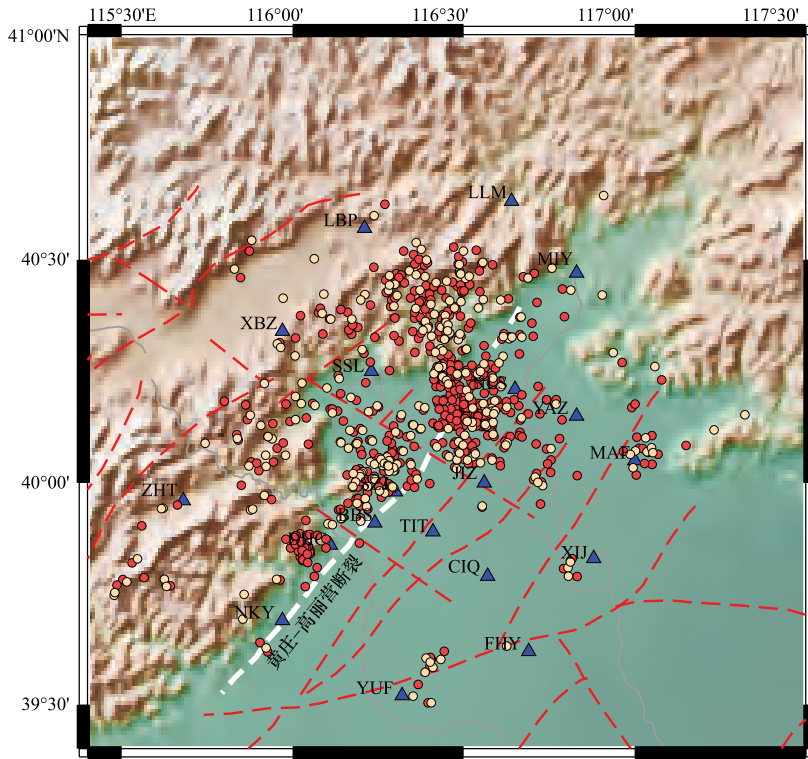


图 4 模板事件（黄色）与检测到的地震事件（红色）精定位后震中分布图

Fig. 4 The distribution of the catalog events (yellow) and detected events (red) after relocation

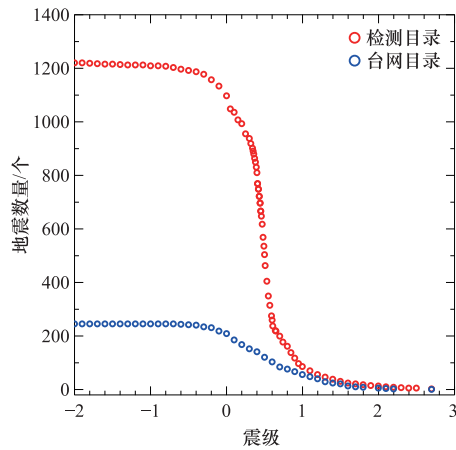
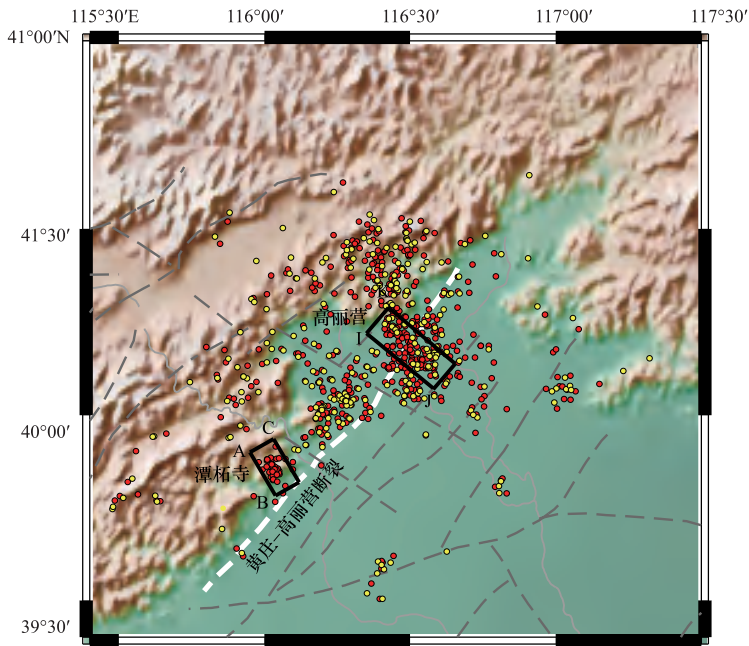
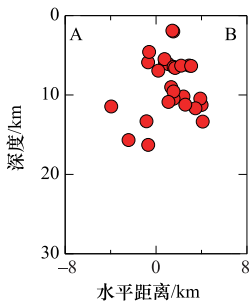


图 5 地震数量-震级关系图

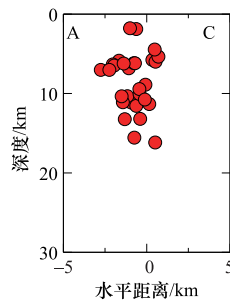
Fig. 5 The magnitude–frequency relation



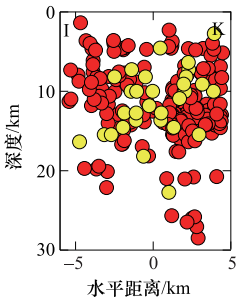
(a) 地震总体分布情况



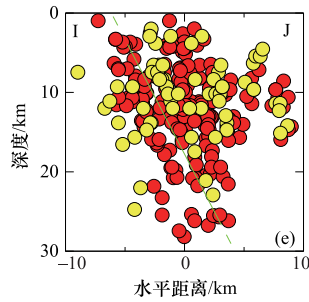
(b) 沿AB剖面的分布情况



(c) 沿AC剖面的分布情况



(d) 沿IK剖面的分布情况



(e) 沿IJ剖面的分布情况 (绿色虚线表示推测的断层形态)

图 6 扫描重定位后的台网地震目录事件 (黄色) 与检测到的地震事件 (红色) 震源深度沿不同剖面方向的垂直分布图

Fig. 6 The distributions of catalog events (yellow) and detected events (red) focal depth along the AB, AC, IK, and IJ sections after relocation

5 总结与讨论

完备地震目录在地震学研究中十分关键且重要, 近年来, 微震检测与识别是地震学研究的热门课题。本文主要介绍国内外有效且应用广泛的微震识别方法, 包括波形模板匹配检测方法、匹配定位技术和波形自相关检测技术, 其中波形模板匹配检测方法可在信噪比较低的连续波形数据中识别出与模板相似度较高的地震事件, 但不能同时进行地震定位; 匹配定位技术弥补了波形模板匹配检测方法的不足, 可在模板周围进行全方位检测, 将识别到与模板事件相似度高的事件作为结果, 且可对检测到的地震进行定位, 但时间成本随着搜索网格的缩小而增加; 基于 GPU 加速的匹配定位技术克服了匹配定位技术的缺点, 通过添加权重因子, 可更有效地进行地震检测和定位, 更好地丰富地震目录; 波形自相关检测技术虽可在模板准备阶段提供一定帮助, 但由于计算量过大, 时间成本过高, 不便应用于数据量较大的研究。

通过对微震识别方法进行总结与对比, 可知匹配定位技术适用于各类微弱信号的检测, 在地震迁移过程中可提供精准的位置信息, 也可较好地刻画断层走向, 对于地震活动性的研究具有十分重要的意义。在今后的研究工作中, 可利用该方法获取更完备的地震目录, 得到更多的地下断层信息, 为组织开展地震区划与各类基础工程建设提供充实的地震资料, 方便进行相应的风险评估工作, 提高地震防御能力。引入 GPU 并行计算可提升计算速度, 有效提高微震识别效率与精度, 不同学科的交叉与结合将成为地震学研究趋势。

利用基于 GPU 加速的匹配定位技术对北京地区 2015 年地震资料进行遗漏地震检测和识别, 共识别 1229 个地震事件, 约为地震台网地震目录数量的 5 倍, 获得了较精确的地震位置、震级等信息。对检测到的地震事件进行精定位, 可知地震在潭柘寺地区密集分布, 震源深度主要为 5—10km, 南东侧地震分布较深, 北西侧地震分布较浅, 提示黄庄-高丽营断裂倾向为南东; 黄庄-高丽营断裂北端震源深度以 10—20km 为主, 揭示出断层倾向为南东, 且断层倾角较大。本文研究结果为研究北京地区地震活动性与黄庄-高丽营断裂周边构造提供了重要的地震事件基础数据支撑。基于 GPU 加速的匹配定位技术能检测出大量台网地震目录中未记录的地震事件, 遗漏事件以小于 1 级的微震为主, 从而补充了台网地震目录。

致谢 感谢北京市地震局为本研究提供的连续波形数据。本研究得到北京市自然科学基金(8212041)与上海佘山地球物理国家野外科学观测研究站开发基金(2020K02)的资助。

参考文献

- 胡幸平, 崔效锋, 2013. 华北地区中部地震精定位与构造应力场研究. 震灾防御技术, **8** (4): 351—360.
- 刘翰林, 吴庆举, 2017. 地震自动识别及震相自动拾取方法研究进展. 地球物理学进展, **32** (3): 1000—1007.
- 杨智娴, 陈运泰, 郑月军等, 2003. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用. 中国科学(D 辑: 地球科学), **33** (S1): 129—134.
- 张广伟, 雷建设, 谢富仁等, 2011. 华北地区小震精定位及构造意义. 地震学报, **33** (6): 699—714.
- 张淼, 2015. 地震定位和检测. 合肥: 中国科学技术大学.
- 朱艾澜, 徐锡伟, 胡平等, 2005. 首都圈地区小震重新定位及其在地震构造研究中的应用. 地质论评, **51** (3): 268—274.
- Anikiev D., Valenta J., Staněk F., et al., 2014. Joint location and source mechanism inversion of microseismic events: Benchmarking on seismicity induced by hydraulic fracturing. *Geophysical Journal International*, **198**(1):

- 249—258.
- Brodsky E. E., Lay T., 2014. Recognizing Foreshocks from the 1 April 2014 Chile Earthquake. *Science*, **344**(6185): 700—702.
- Brown J. R., Beroza G. C., Shelly D. R., 2008. An autocorrelation method to detect low frequency earthquakes within tremor. *Geophysical Research Letters*, **35**(16): L16305.
- Crotwell H. P., Owens T. J., Ritsema J., 1999. The TauP toolkit: Flexible seismic travel-time and ray-path utilities. *Seismological Research Letters*, **70**(2): 154—160.
- Dreger D., Kaverina A., 2000. Seismic remote sensing for the earthquake source process and near-source strong shaking: A case study of the October 16, 1999 Hector Mine earthquake. *Geophysical Research Letters*, **27**(13): 1941—1944.
- Drew J., White R. S., Tilmann F., et al., 2013. Coalescence microseismic mapping. *Geophysical Journal International*, **195**(3): 1773—1785.
- Earle P. S., Shearer P. M., 1994. Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**(2): 366—376.
- Eisner L., Abbott D., Barker W. B., et al., 2008. Noise suppression for detection and location of microseismic events using a matched filter. In: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008. Society of Exploration Geophysicists, 1431—1435.
- Ellsworth W. L., Bulut F., 2018. Nucleation of the 1999 Izmit earthquake by a triggered cascade of foreshocks. *Nature Geoscience*, **11**(7): 531—535.
- Gharti H. N., Oye V., Roth M., et al., 2010. Automated microearthquake location using envelope stacking and robust global optimization. *Geophysics*, **75**(4): MA27—MA46.
- Gibbons S. J., Ringdal F., 2006. The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. *Geophysical Journal International*, **165**(1): 149—166.
- Gomberg J., Reasenberg P. A., Bodin P., et al., 2001. Earthquake triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes. *Nature*, **411**(6836): 462—466.
- Grigoli F., Cesca S., Amoroso O., et al., 2013a. Automated seismic event location by waveform coherence analysis. *Geophysical Journal International*, **196**(3): 1742—1753.
- Grigoli F., Cesca S., Vassallo M., et al., 2013b. Automated seismic event location by travel-time stacking: An application to mining induced seismicity. *Seismological Research Letters*, **84**(4): 666—677.
- Hill D. P., Reasenberg P. A., Michael A., et al., 1993. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake. *Science*, **260**(5114): 1617—1623.
- House L., 1987. Locating microearthquakes induced by hydraulic fracturing in crystalline rock. *Geophysical Research Letters*, **14**(9): 919—921.
- Huang H., Meng L. S., Plasencia M., et al., 2017. Matched-filter detection of the missing pre-mainshock events and aftershocks in the 2015 Gorkha, Nepal earthquake sequence. *Tectonophysics*, **714—715**: 71—81.
- Kao H., Shan S. J., 2004. The Source-Scanning Algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space. *Geophysical Journal International*, **157**(2): 589—594.
- Kao H., Shan S. J., 2007. Rapid identification of earthquake rupture plane using source-scanning algorithm. *Geophysical Journal International*, **168**(3): 1011—1020.

- Kato A., Obara K., Igarashi T., et al., 2012. Propagation of slow slip leading up to the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, **335**(6069): 705—708.
- Kato A., Nakagawa, S., 2014. Multiple slow-slip events during a foreshock sequence of the 2014 Iquique, Chile M_w 8.1 earthquake. *Geophysical Research Letters*, **41**(15): 5420—5427.
- Kilb D., Gomberg J., Bodin P., 2000. Triggering of earthquake aftershocks by dynamic stresses. *Nature*, **408**(6812): 570—574.
- Kuge K., 2003. Source modeling using strong-motion waveforms: Toward automated determination of earthquake fault planes and moment-release distributions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(2): 639—654.
- Langet N., Maggi A., Michelini A., et al., 2014. Continuous kurtosis-based migration for seismic event detection and location, with application to Piton de la Fournaise Volcano, La Reunion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **104**(1): 229—246.
- Liao Y. C., Kao H., Rosenberger A., et al., 2012. Delineating complex spatiotemporal distribution of earthquake aftershocks: an improved Source-Scanning Algorithm. *Geophysical Journal International*, **189**(3): 1753—1770.
- Liu M., Li H. Y., Peng Z. G., et al., 2019. Spatial-temporal distribution of early aftershocks following the 2016 M_s 6.4 Menyuan, Qinghai, China Earthquake. *Tectonophysics*, **766**(6): 469—479.
- Liu M., Li H. Y., Zhang M., et al., 2020. Graphics processing unit-based match and locate (GPU-M&L): An improved match and locate method and its application. *Seismological Research Letters*, **91**(2A): 1019—1029.
- Meng X. F., Xiao Y., Peng Z. G., et al., 2012. Detecting earthquakes around Salton Sea following the 2010 M_w 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake using GPU parallel computing. *Procedia Computer Science*, **9**: 937—946.
- Meng X. F., Peng Z. G., Hardebeck J. L., 2013. Seismicity around Parkfield correlates with static shear stress changes following the 2003 M_w 6.5 San Simeon earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**(7): 3576—3591.
- Meng X. F., Peng Z. G., 2014. Seismicity rate changes in the Salton Sea Geothermal Field and the San Jacinto Fault Zone after the 2010 M_w 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake. *Geophysical Journal International*, **197**(3): 1750—1762.
- Mori J., Hartzell S., 1990. Source inversion of the 1988 Upland, California, earthquake: Determination of a fault plane for a small event. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **80**(3): 507—518.
- Peng Z. G., Zhao P., 2009. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake. *Nature Geoscience*, **2**(12): 877—881.
- Peng Z. G., Hill D. P., Shelly D. R., et al., 2010. Remotely triggered microearthquakes and tremor in central California following the 2010 M_w 8.8 Chile earthquake. *Geophysical Research Letters*, **37**(24): L24312.
- Rutledge J. T., Phillips W. S., 2003. Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton Valley gas field, east Texas. *Geophysics*, **68**(2): 441—452.
- Shelly D. R., Beroza G. C., Ide S., 2007. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. *Nature*, **446**(7133): 305—307.
- Stevenson P. R., 1976. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana: A study using automatic earthquake processing. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **66**(1): 61—80.
- Waldhauser F., Ellsworth W. L., 2000. A double-difference earthquake location algorithm: method and application

- to the Northern Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**(6): 1353—1368.
- Waldhauser F., Schaff D., Richards P. G., et al., 2004. Lop Nor revisited: Underground nuclear explosion locations, 1976-1996, from double-difference analysis of regional and teleseismic data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**(5): 1879—1889.
- Walter J. I., Meng X. F., Peng Z. G., et al., 2015. Far-field triggering of foreshocks near the nucleation zone of the 5 September 2012 (M_w 7.6) Nicoya Peninsula, Costa Rica earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, **431**(12): 75—86.
- Wang W. J., Meng X. F., Peng Z. G., et al., 2015. Increasing background seismicity and dynamic triggering behaviors with nearby mining activities around Fangshan Pluton in Beijing, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **120**(8): 5624—5638.
- Wen L. X., Long H., 2010. High-precision location of North Korea's 2009 nuclear test. *Seismological Research Letters*, **81**(1): 26—29.
- Yang H. F., Zhu L. P., Chu R. S., 2009. Fault-plane determination of the 18 April 2008 Mount Carmel, Illinois, earthquake by detecting and relocating aftershocks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**(6): 3413—3420.
- Zhang M., Wen L. X., 2015a. An effective method for small event detection: Match and Locate (M&L). *Geophysical Journal International*, **200**(3): 1523—1537.
- Zhang M., Wen L. X., 2015b. Seismological evidence for a low-yield nuclear test on 12 May 2010 in North Korea. *Seismological Research Letters*, **86**(1): 138—145.

Application of Waveform Match and Location Method in Beijing

Ge Huiying^{1,2)}, Li Hongyi¹⁾, Huang Yafen¹⁾, Wang Tongli³⁾, Liu Min¹⁾ and Li Yanzhen¹⁾

1) School of Geophysics and information technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2) Shanghai Sheshan National Geophysical Observatory 201602, China

3) Beijing earthquake Agency, Beijing 100081, China

Abstract In seismology research, efficient microseismic detection is an important and challenging problem. In this paper, we first introduce the following methods in detail: (1) matched filter method; (2) match and locate method; (3) waveform autocorrelation detection technology. We summarize the domestic and foreign studies, and compare the advantages and disadvantages of different methods. Then, the future development of their application of the microseismic detection method is prospected. Meanwhile, we apply Graphics Processing Unit-based match and locate(GPU_M&L) and double-difference location algorithm to analyze the continuous seismic data during 2015 recorded by 19 stations in the Beijing area. Two hundred and forty-five earthquakes listed on the standard catalog provided by the China Earthquake Network Center were selected as templates. About 1,229 events are identified, which is about 5 times of the network catalog. Our results reveal the geometrical structure of the small faults surrounding the Huangzhuang-Gaoliying fault, and provide important basic data support for studying the seismic activity and the deep structure of the seismogenic faults in the Beijing area.

Key words: Microseisms; Matched filter method; Graphics Processing Unit-Based Match and Locate(GPU-M&L); Microseismic detection and location; Beijing