

沈玉松、康英、黄文辉等 2011 国家地震速报备份系统定位结果评估 中国地震 27(2) 155 ~ 164。

国家地震速报备份系统定位结果评估

沈玉松^{1 2)} 康英¹⁾ 黄文辉¹⁾ 刘军¹⁾

1) 广东省地震局 广州市先烈中路 81 号大院 510070

2) 中国科学技术大学 合肥市金寨路 96 号 230026

摘要 国家地震速报备份系统的自动实时处理系统能够在地震发生后几分钟之内自动确定出地震的 3 要素。分析 2009 年 1 月 ~ 2010 年 10 月的自动定位结果后发现 282 个 4 级以上地震的自动定位结果与中国地震台网中心 (CENC) 的人机交互速报结果 (CC) 匹配; 70% 的地震震级误差 ≤ 0.3 ; 69% 的国内及周边地区地震的震源水平位置定位误差 $\leq 20\text{km}$, 73% 的国外地震的震源水平位置定位误差 $\leq 50\text{km}$; 国内及周边地区地震的平均速报时间为 3.5 min, 国外地震平均为 11.1 min, 该系统速报速度明显高于人机交互速报速度。全球 6 级以上地震中有 284 个的定位结果与欧洲-地中海地震学中心 (EMSC) 的实时定位结果匹配, 其中 49% 的地震震级误差 ≤ 0.3 ; 73% 的地震水平误差 $\leq 50\text{km}$, 68% 的地震震源深度误差 $\leq 50\text{km}$, 对于震源深度大于 300 km 的深源地震, 90% 的地震震源深度误差 $\leq 50\text{km}$ 。另对未匹配及误差较大的地震事件进行了进一步的分析。

关键词: 国家地震速报备份系统 地震自动速报系统 定位结果评估

[文章编号] 1001-4683(2011)02-0155-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震自动速报系统是将地震发生后台站实时传回的地震波形, 通过震相自动识别、组合、定位, 确定出地震 3 要素 (地震的发震时刻、震源位置和震级) 的实时数据处理系统。目前, 国际上地震监测台网数据处理软件主要使用美国 USGS 的 Earthworm 软件 (Johnson et al, 1995)、德国 GEOFON 台网的 SeisComp 软件 (Winfried Hanka1 et al, 2000)、中国台湾的 VSN 软件 (Wu et al, 2002) 以及日本的 REIS 软件 (Hiromitsu et al, 2009)。根据台网的台站密度、分布的不同, 这些系统都能在几十秒至几分钟之内自动确定地震的 3 要素。在国内, 金星等 (2007) 开发了一套区域数字地震台网的实时速报系统, 该系统对区域台网内的地震事件能够实现比较快速可靠的自动定位。

国内很长一段时间内台站密度较低, 为了保证地震速报的可靠性, 一直采用人机交互的方式进行地震数据的处理和速报 (宋锐等, 2001), 对国内及周边地区地震 3 要素的速报时间一般需要 8 ~ 30 min。随着我国国民经济的快速发展, 国家对防震减灾的投入力度也越来

[收稿日期] 2011-03-31

[项目类别] 地震行业科研专项 (200808066) 和广东省科技计划项目 (20090308) 资助

[作者简介] 沈玉松, 男, 1979 年生, 博士研究生, 主要从事地震监测软件开发和地下结构反演研究。

Email: sysshenn@gddsn.org.cn

越大。特别是在“十五”中国数字地震观测网络项目建设完成后,我国已拥有近千个测震台站并实现了地震监测数据的实时传输和组网,监测能力也相应地提高。广东省地震局在 JOPENS(地震台网数据处理系统)实时定位的基础上,开发了一套自动速报系统。该系统能够同时处理上千个台站的实时地震波形数据,适用于数据量大的全球地震自动定位处理。对国内及周边地区地震,系统可在 1min 给出初步结果,3~5min 给出可靠结果并发布。该系统已部署在广东地震台网的国家地震速报备份系统中,目前承担国内首都圈地区 $M \geq 3.0$ 地震,青海、新疆、内蒙古、西藏、台湾等 5 个完整行政区 $M \geq 5.0$ 地震,除上述 5 个行政区之外的国内其他区域 $M \geq 4.0$ 地震,国境线及其外至 300km 范围内的 $M \geq 5.0$ 地震,国外其他地区 $M \geq 6.0$ 地震的自动速报任务。系统通过自动速报平台 EQIM 向中国地震台网中心发送上述地区地震的自动速报结果,并将速报结果通过手机短信方式,按照约定发送到有关单位和用户,同时在国家地震速报功能备份中心系统的地震信息 Web 服务器上发布最新的地震信息。国家地震速报功能备份中心系统 2008 年 12 月中旬开始试运行,2009 年 4 月通过验收,2009 年 7 月正式运行,其运行显著提高了地震速报的时效性。本文选取了 2009 年 1 月~2010 年 10 月国家地震速报功能备份中心系统的自动定位结果,通过与中国地震台网中心(CENC)的人机交互速报结果和欧洲-地中海地震学中心(EMSC)的实时定位结果对比,评估地震自动速报系统的实效性和准确度。

1 数据来源

国家地震速报功能备份中心数据的来源台站见表 1。台站的分布如图 1 所示。

表 1 系统接收数据的来源台站情况

台 站	台站数目	数据来源
区域台网台站及中国地震台网中心台站	849	中国地震台网中心
CDSN(中国数字地震台网)国际交换台站	10	中国地震局地球物理研究所
全球地震台网(GSN)台站	204	IRIS(美国地震学研究联合会)
印度尼西亚地震台网台站	112	印度尼西亚地震台网
合计	1175	

从台站分布图可以看出,台站主要集中在我国境内,国外的台站相对稀少。在国内,台站的密度也有所不同,东部密而西部疏。我们把 2009 年 1 月~2010 年 10 月国家地震速报功能备份中心系统的自动定位结果,分别与中国地震台网中心(CENC)的人机交互速报结果和欧洲-地中海地震学中心(EMSC)的实时定位结果进行了对比(图 2)。图 2 显示了可匹配地震的分布及定位的水平误差。从图 2 中可以看出,大部分地震的水平定位误差都 $\leq 50\text{km}$,只有很少部分地震的水平定位误差较大,结合图 1 的台站分布图可以看出,这些地震基本都分布在台站稀少的地区。

2 结果的对比分析

2.1 与中国地震台网中心人机交互速报结果的对比

2009 年 1 月~2010 年 10 月中国地震台网中心人机交互速报结果中震级 ≥ 4.0 的地震有 287 个,而国家地震速报功能备份中心自动触发定位的地震事件中,能够与之相匹配的有

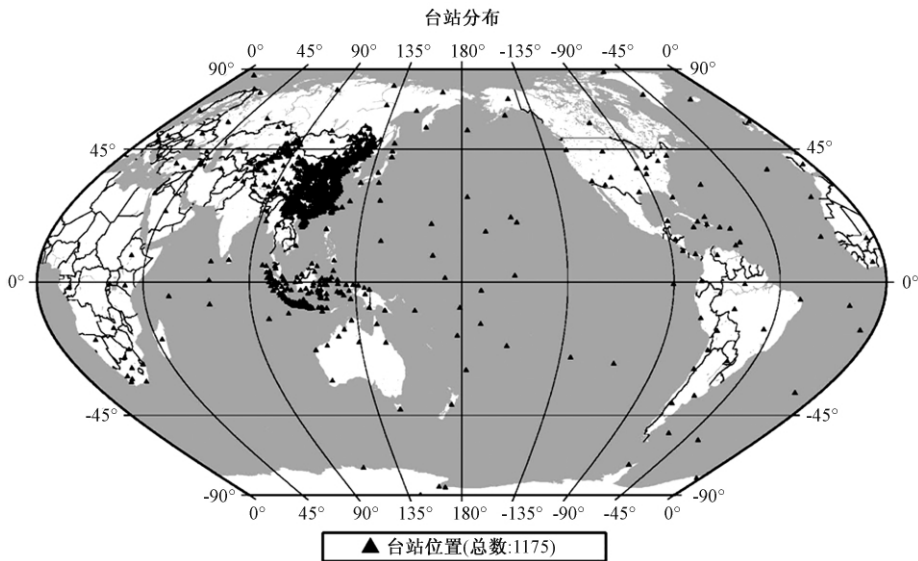


图1 自动速报系统台站分布图

282 个, 匹配成功率达到了 98.3%。在未能匹配的 5 个地震事件中, 有 3 个是受试运行期间系统故障的影响而未触发; 有 1 个巴拿马以南地区的 6.2 级地震发生在中国地震台站的背面, 由于台站少、震级较小而未触发; 还有 1 个地震因受到 1 分钟前发生于青海的 6.4 级地震的干扰未触发(表 2)。若排除系统故障的因素, 可以看出未触发的主要原因是受到台站分布的限制或前一个地震尾波的干扰。

表 2 未匹配的地震事件及未匹配的原因

序号	发震日期 (年-月-日)	发震时刻 (时:分:秒)	纬度 (°)	经度 (°)	深度 (km)	震级 <i>M</i>	未匹配的原因
1	2009-01-17	20:41:49	26.9	104.2	16	4	系统故障, 数据流服务中断
2	2009-01-19	11:35:13	-22.8	170.9	33	6.8	系统故障, 数据流服务中断
3	2009-02-12	11:49:38	3.9	126.5	33	6.1	电信切割, 网络中断
4	2009-03-13	7:23:35	5.5	-82.7	33	6.2	巴拿马以南地区地震处于中国台站的背面, 未检测到地震事件
5	2009-08-28	9:51:20	-7.1	123.4	667	6.7	未检测到地震事件(受当天 09:52 的青海 M6.4 地震的影响)

在匹配成功的事件中, 国内及周边地区地震事件 123 个, 国外 159 个。表 3 显示了系统自动定位结果与中国地震台网中心人机交互速报结果的对比, 其中自动速报系统平均速报时间为 8min; 而人机交互速报平均速报时间为 34min, 两者匹配事件的平均震级误差为 0.3, 平均震源水平位置误差为 44km。自动速报系统对国内及周边地区地震事件平均速报时间为 3.5min, 对国外事件为 11.1min, 明显高于人机交互速报时间。

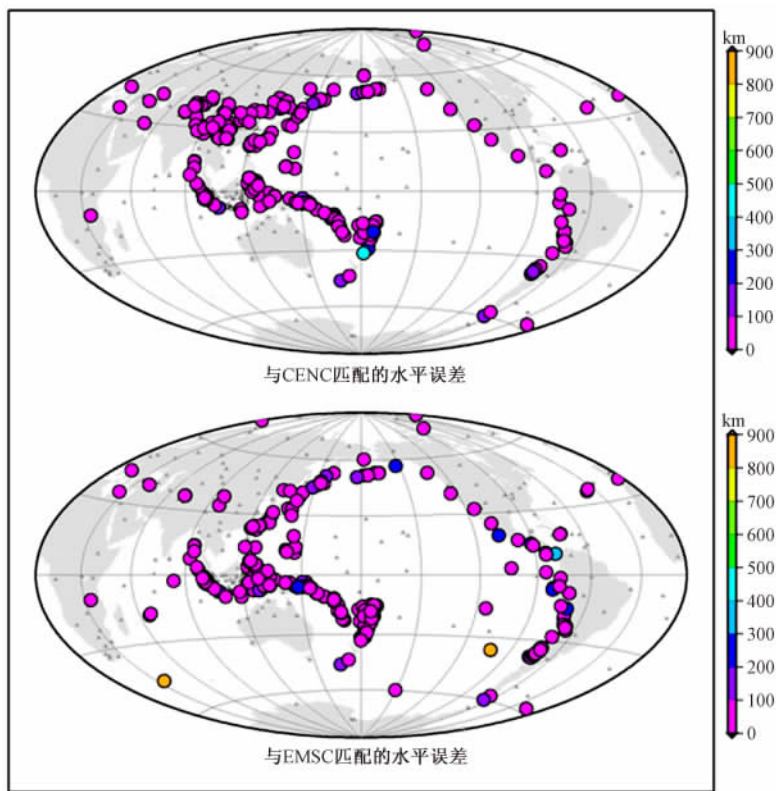


图2 可匹配的地震的定位分布及定位的水平误差显示图(圆形表示地震,三角形代表台站,中国只包括了CDSN台。上图为系统自动定位结果与中国地震台网中心的人机交互速报结果相匹配的地震(282个)的分布;下图为系统自动定位结果和欧洲-地中海地震学中心(EMSC)实时定位结果相匹配的地震(284个)的分布)

表3 系统自动定位结果与中国地震台网中心人机交互速报结果的对比

地震事件分类	匹配次数	匹配率 (%)	震级误差	水平误差 (km)	系统自动速报时间 (min)	人机交互速报时间 (min)
所有事件	282	98.3	0.3	44.3	8.0	33.7
国内及周边地区事件	123	99.2	0.3	33.3	3.5	18.7
国外事件	159	97.5	0.3	52.8	11.1	45.3

将国内及周边地区地震事件、国外地震事件按震级分类后,震级误差和震源水平定位误差对比结果见表4。由表4可见,70%的国内及周边地区事件、70%的国外事件震级误差 ≤ 0.3 ;22%的国内及周边地区事件、19%的国外事件震级误差在0.4~0.6之间,只有7%的国内及周边地区事件、11%的国外事件震级误差在0.7~1.0间,震级误差大于1.0的事件只有1个。41%的国内及周边地区事件的震源水平定位误差 $\leq 10\text{km}$,28%的事件震源水平定位误差大于10km而小于等于20km,12%的事件震源水平定位误差大于20km但小于等于40km,19%的事件震源水平定位误差大于40km。国外73%的事件震源水平定位误差 $\leq 50\text{km}$,14%的事件震源水平定位误差 $> 50\text{km}$ 但 $\leq 100\text{km}$,13%的事件震源水平定位误差大于100km。

表 4 分震级统计的震级误差和震源水平定位误差

	震级误差	震级 M					总计	
		4.0~4.9	5.0~5.9	6.0~6.9	7.0~7.9	8.0~8.9		
不同震级及误差的国内及 周边地震事件个数	0.0~0.3	17	45	19	5		86	
	0.4~0.6	13	5	7	2		27	
	0.7~1.0	4	2	2	1		9	
	>1.0	0	1	0	0		1	
	总计	34	53	28	8		123	
	水平定位误差 (km)	震级 M					总计	
		4.0~4.9	5.0~5.9	6.0~6.9	7.0~7.9	8.0~8.9		
		0~10	16	16	15	3		50
		11~20	9	18	5	3		35
		21~40	5	7	3	0		15
	>40	4	12	5	2		23	
	总计	34	53	28	8		123	
不同震级及误差的国外 地震事件个数	震级误差	震级 M					总计	
		4.0~4.9	5.0~5.9	6.0~6.9	7.0~7.9	8.0~8.9		
		0.0~0.3			87	22	2	111
		0.4~0.6			23	7	0	30
		0.7~1.0			13	5	0	18
		>1.0			0	0	0	0
		总计			123	34	2	159
	水平定位误差 (km)	震级 M					总计	
		4.0~4.9	5.0~5.9	6.0~6.9	7.0~7.9	8.0~8.9		
		0~50			92	22	2	116
	51~100			19	4	0	23	
	>100			12	8	0	20	
	总计			123	34	2	159	

震源的水平定位误差大于 100km 的国内及周边的地震事件有 8 个,其中有 5 个为台湾海域 5 级左右的地震,1 个为吉林 4.6 级地震,1 个为阿富汗 6.2 级地震,1 个为千岛群岛 6.3 级地震,这些地震主要分布在我国周边地区,水平定位误差较大主要是台站分布状况不好造成的。水平定位误差大于 100km 的国外地震事件有 20 个,这些事件的水平定位误差与深度定位误差基本成正比,其原因将在下述 2.2 中做进一步的分析。

2.2 与欧洲-地中海地震学中心(EMSC)的实时定位结果匹配情况

2009 年 1 月~2010 年 10 月 EMSC 全球实时定位结果中 $M \geq 6.0$ 的地震有 311 个,与其相对,自动速报系统能够匹配的地震有 284 个,匹配成功率为 91%,平均震中距误差为 68km,平均震级误差为 0.3 级,平均速报时间为 11min(表 5)。表 5 显示了系统自动定位结果与欧洲-地中海地震学中心(EMSC)的实时定位结果的对比情况。从表 5 可以看出,受国外台站相对稀少的影响,当震级越大时,匹配率越高。图 3 显示了未匹

表 5 系统自动定位结果与欧洲-地中海地震学中心(EMSC)的实时定位结果的对比

震级	地震次数	匹配率 (%)	速报时间 (min)
$M \geq 6.0$	311	91.0	11.0
$6.0 \leq M < 7.0$	274	90.9	10.9
$7.0 \leq M < 8.0$	35	94.3	11.8
$8.0 \leq M < 9.0$	2	100.0	19.0

配的 27 个地震(部分地震由于经纬度比较接近,从而在图上位置有所重叠),其平均震级只有 6.4,并且相对于国内台网来说,绝大部分都为极远震。国际台站信号的延时和中断,可能是造成一些极远震未匹配的重要原因。

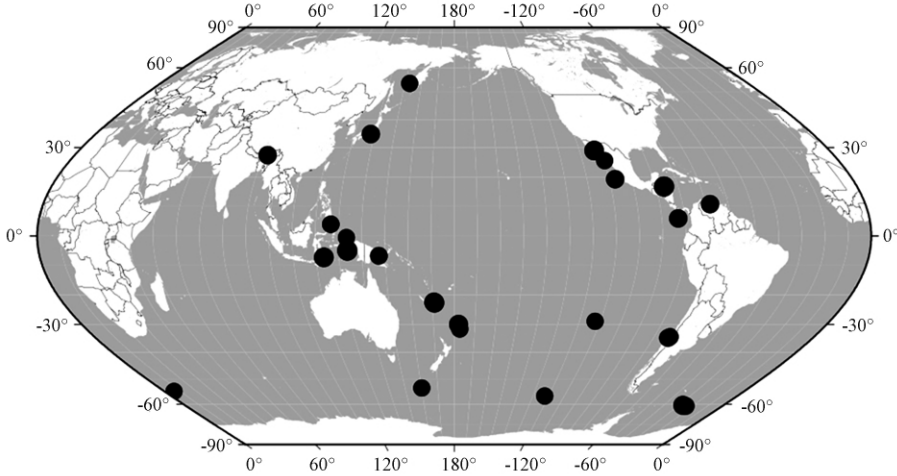


图 3 未与 EMSC 实时定位结果匹配的地震事件的分布图 ($M \geq 6.0$)

表 6 显示了系统自动定位结果与 EMSC 实时定位结果匹配的 284 次地震事件按震级、震源深度统计的震级误差和定位误差。

表 6 分震级、深度统计的震级误差和震源定位误差

	震级误差	震级 M			总计
		6.0 ~ 6.9	7.0 ~ 7.9	8.0 ~ 8.9	
不同震级及误差的地震事件个数	0.0 ~ 0.3	118	19	2	139
	0.4 ~ 0.6	83	10	0	93
	0.7 ~ 0.9	28	3	0	31
	> 0.9	20	1	0	21
	总计	249	33	2	284
	水平误差 (km)	震级 M			总计
		6.0 ~ 6.9	7.0 ~ 7.9	8.0 ~ 8.9	
不同震级及水平误差的地震事件个数	0 ~ 50	171	23	1	195
	51 ~ 100	40	5	1	46
	> 100	38	5	0	43
	总计	249	33	2	284
	深度误差 (km)	深度 (km)			总计
		0 ~ 70	71 ~ 300	> 300	
不同深度及深度误差的地震事件个数	0 ~ 10	62	8	9	79
	11 ~ 20	33	10	6	49
	21 ~ 50	54	11	1	66
	> 50	76	12	2	90
	总计	225	41	18	284

从表 6 中可以得出,全球 6 级以上地震事件中 49% 的事件震级误差 ≤ 0.3 ; 33% 事件震级误差在 0.4 ~ 0.6 间, 11% 事件的震级误差在 0.7 ~ 0.9 间, 7% 事件的地震级误差大于

1.0。69% 的事件水平误差 $\leq 50\text{km}$, 16% 的事件水平误差 $> 50\text{km}$ 而 $\leq 100\text{km}$, 15% 的事件水平误差 $> 100\text{km}$, 这与中国地震台网中心国外事件的结果较为一致。

深度值的误差统计表明 28% 的事件深度误差 $\leq 10\text{km}$, 17% 的事件深度误差 $\geq 11\text{km}$ 而 $\leq 20\text{km}$, 23% 的事件深度误差 $\geq 21\text{km}$ 而 $\leq 50\text{km}$, 32% 的事件深度误差大于 50km , 这个误差主要集中在深度小于 300km 的地震事件 , 对于深度大于 300km 的深源地震 , 误差大于 50km 的事件数只占 10% 。在地震为中深源且缺乏近台震相时 , 一般的定位程序很难搜索到正确的震源深度。而我们的自动速报系统由于在定位前先使用了 BEAM 方法对震相进行了组合 , 因此能够对一些历史上有过中深源地震的地区 , 提供多个合适的初始震源深度 , 最终根据定位残差选择合适的定位结果。这说明该系统对深源地震有较好的定位能力。

有 43 个地震的定位误差超过 100km , 图 4 显示了水平误差大于 100km 的事件的震中分

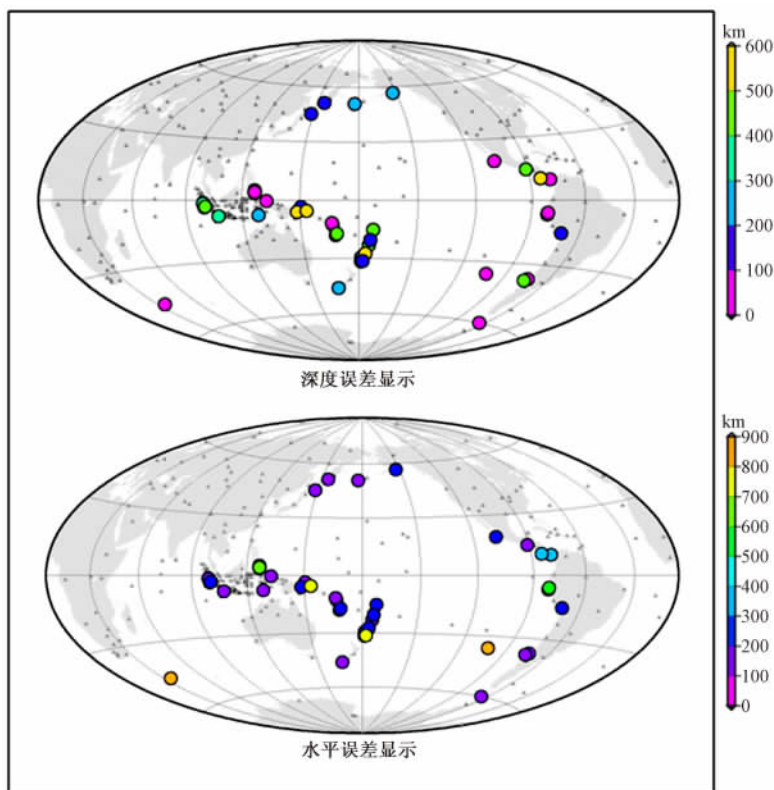


图 4 与 EMSC 对比结果中水平误差大于 100km 的事件的震中及误差分布图 (圆形表示地震 , 三角形代表台站 , 中国只包括了 CDSN 台 , 上图中的颜色代表定位深度误差 , 下图中的颜色代表定位水平误差)

布及误差分布。由图 4 可见 , 绝大部分地震震源的深度误差与水平误差是成比例的 , 造成这些事件定位误差大的直接原因是定位台站的分布不合理。图 5 显示了这些地震震源的水平误差和最大空隙角的关系 , 86% 的事件的定位台站的最大空隙角都远大于 180° ; 另外 14% 的事件的最大空隙角都小于 180° , 有 2 个事件的最大空隙角甚至小于 50° 。虽然它们的定位台站对震中包围得很好 , 但是如图 6 所示 , 在绝大部分方向上完全缺乏近台 , 参与定位的最近的台站的震中距都非常大。造成上述定位台站分布不合理的原因 , 一方面是一些国际

台站的数据传输不稳定而导致数据中断,另一方面是自动定位时,对近台的到时残差的权重设置偏小,而远台参与定位的震相到时又比较多,导致在自动定位过程中近台震相被不恰当地自动剔除。

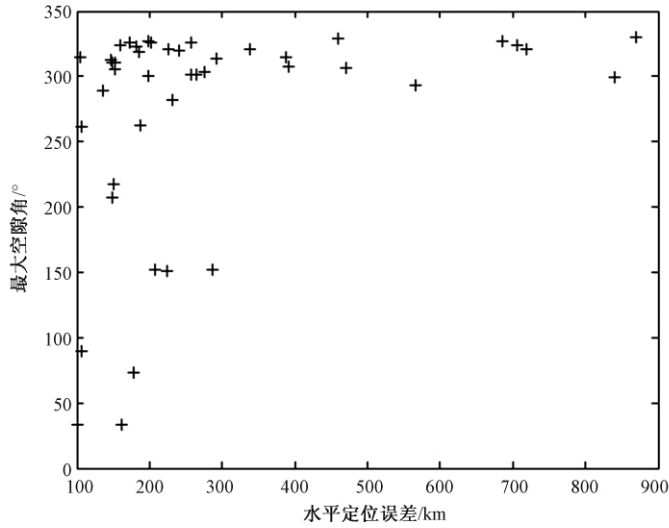


图5 与EMSC对比结果中水平定位误差大于100km的事件的水平误差与台站最大空隙角的关系

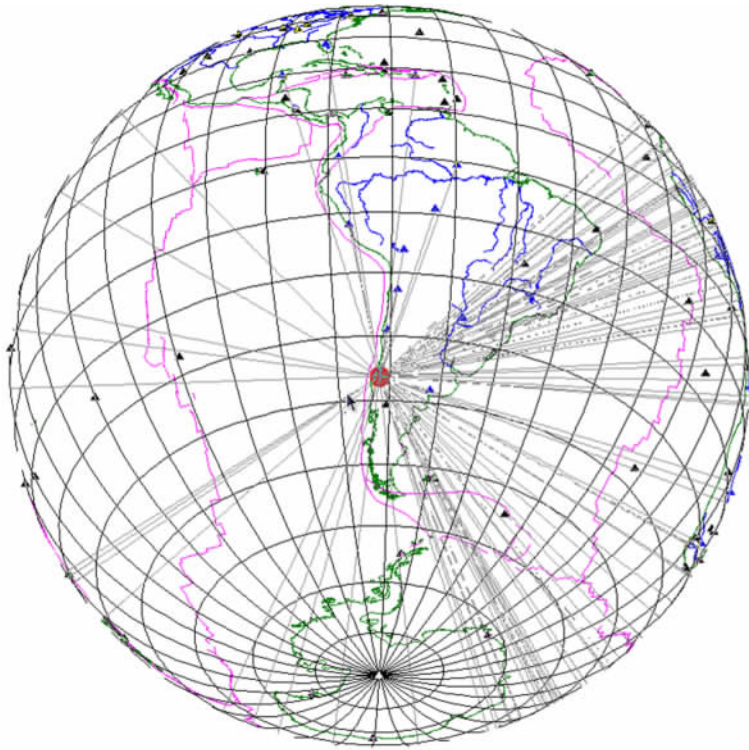


图6 一个最大空隙角为33°的事件的实时定位台站分布图(图中三角形代表台站,中间红色圆点表示震中,蓝色的三角形表示在这次定位中使用的台站)

3 结语

经过近两年在实际环境中的测试运行,地震自动速报系统(AGELS)的自动定位结果与中国地震台网中心人机交互速报结果,以及EMSC地震中心震级 ≥ 6 的地震的实时定位结果相对比,运行在国家地震速报功能备份中心的自动速报系统基本能够对我国境内及周边地区震级 ≥ 4 的地震及全球6级以上的绝大多数地震进行自动定位和快速速报,速报用时远小于人机交互速报,国内及周边事件为3.5min,国外事件为11.1min。国内及周边地区的事件的震级误差大部分能够控制在0.3级之内,震源水平定位误差基本能够控制在50km以内;对全球6级以上的事件,震级误差大部分不超过0.6级,水平定位误差大部分不超过100km。

当然,由于受国外地震台站的分布及其信号传输的连续性、稳定性以及在自动定位时台站震相到时残差的权重设置等因素的影响,一些发生在我国周边及全球的地震的定位台网的空隙角比较大,从而导致一些地震的震源水平定位误差比较大。因此,如何更合理地设置各参与定位的台站的震相残差的权重,使得在自动定位时既能够很好地压制错误的台站震相到时,又能够充分利用近台的震相,这将是我們下一步改进自动定位算法的关键工作之一。另外,由于完全没有人工干预,受大震后尾波的影响,大震后几分钟内的余震和该时段内的异地地震的自动识别和定位还存在一定的问题,我们将会在今后通过改进震相的自动组合算法来减少不同地震震相之间的干扰。

参考文献

- 金星、廖诗荣、陈绯雯,2007,区域数字地震台网实时速报系统研究,地震地磁观测与研究,28(1),65~72。
- 宋锐、顾小虹、王永力等,2001,国家数字地震台网中心实时处理及大地震速报软件系统,地震,21(4),47~59。
- Hiroimitsu N, Shigeki H, Wu C J, et al, 2009, Evaluation of the real-time earthquake information system in Japan, Geophys Res Lett, 36, L00B01, doi:10.1029/2008GL036470.
- Johnson C E, Bittenbinder A, Bogaert B, et al, 1995, Earthworm: A flexible approach to seismic network processing, IRIS Newsletter, 14(2), 1~4.
- Winfried H, Andres H, Karl H J, 2000, Networked Seismographs: GEOFON Real-Time Data Distribution, ORFEUS Newsletter, December.
- Wu Y M, Teng T L, 2002, A virtual sub-network approach to earthquake early warning, Bull Seismol Soc Am, 92(5), 2008~2018.

Evaluation of location results of the backup system for the national earthquake rapid determination

Shen Yusong^{1,2)} Kang Ying¹⁾ Huang Wenhui¹⁾ Liu Jun¹⁾

1) Earthquake Administration of Guangdong Province , Guangzhou 510070 , China

2) School of Earth and Space Sciences , University of Science and Technology of China , Hefei 230026 , China

Abstract An automatic real-time processing system of the Earthquake Administration of Guangdong Province is developed for the biggish earthquake events and installed as the backup system for the national earthquake rapid determination. The test running of the backup system started from the middle of December , 2008 , and then the official running was from July , 2009. The system can automatically determine three main parameters of earthquake within a few minutes after an earthquake occurs. We analyze the results of earthquakes automatically located from January , 2009 to October , 2010 , in which 282 earthquakes with magnitude larger than 4.0 can match the rapid reporting results of man-machine interactive earthquake location by CENC. The magnitude error of 70% matched events is within 0.3 , the location error of 69% matched events which occurred inside or around nation is smaller than 20km , and the location error of 73% matched events which occurred abroad is within 50 km. The initial location results cost about 3.5 minutes on average after earthquakes occurred inside or around nation , the events occurring abroad are reported after 11.1 minutes , and the automatically determined location is clearly more rapid than man-machine interactive determined location. The 284 global earthquakes with magnitude larger than 6.0 can match the results of real-time determined location by EMSC , of which the magnitude error of 49% events is within 0.3 , the horizontal error of 73% events is smaller than 50km , the depth error of 68% events is not more than 50km , and for the events whose depths are more than 300km the depth error of 90% events is within 50km. We also discussed the events which can not be matched or have large location error.

Key words: The backup system for national earthquake rapid determination The system of earthquake automatic rapid determination Evaluation of location results