

陈建涛, 谢剑波, 劳 谦. 广东阳江小孔径井下型地震监测台阵介绍[J]. 华南地震, 2017, 37 (1):42-48. [CHEN Jiantao, XIE Jianbo, LAO Qian. Introduction of Yangjiang Small Aperture Borehole Seismic Array in Guangdong[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(1):42-48.]

广东阳江小孔径井下型地震监测台阵介绍

陈建涛^{1, 2, 3}, 谢剑波^{1, 2, 3}, 劳 谦^{1, 2, 3}

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070;
3. 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室, 广州 510070)

摘要: 广东阳江小孔径地震监测台阵于 2008 年开始立项, 2013 年完成建设, 2014 年 1 月正式运行; 台阵由规则圆圈排列的 10 个井下型子台组成, 分别为圆心点 1 个子台, 内圈平均半径为 766 m, 圈上均匀分布 3 个子台, 外圈平均半径为 1 551 m, 圈上均匀分布 6 个子台, 井下仪器海拔基本控制在 -60 m 的同一平面上。本文简单介绍阳江台阵规划设计和建设过程, 重点描述了台阵的基础建设、技术系统、直角坐标位置、井下仪器类型等科技信息成果, 以及井下仪器水平方位角校正处理工作, 最后总结了阳江台阵的创新亮点和先进技术, 并展望下一步研究工作。

关键词: 小孔径; 井下型; 地震监测台阵

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) 01-0042-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.01.007

Introduction of Yangjiang Small Aperture Borehole Seismic Array in Guangdong

CHEN Jiantao^{1,2,3}, XIE Jianbo^{1,2,3}, LAO Qian^{1,2,3}

(1. Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Project, Guangzhou 510070, China)

Abstract: The project of Yangjiang small aperture seismic array in Guangdong was started in 2008 and completed in 2013, which was formal running in January 2014. The array consists ten underground sub stations which are arranged by the circle array rules with the center point of the one stations, the average inner radius of 766 m, three stations evenly distributed on the inter ring, the average outer radius of 1 551 m, six stations evenly distributed on the outer ring. The altitude of the borehole seismometer was at the same level of -60 m. This paper simply introduces the design and construction process of Yangjiang array, and focuses on the science and technology information description of the basic construction, array technology system, coordinate location,

收稿日期: 2016-05-26

基金项目: 中国大陆综合地球物理场观测仪器研发专项“地震计步进标定方法试验及其标定处理软件研发”(Y201617)

作者简介: 陈建涛(1982-), 男, 工程师, 主要从事地震观测研究和台站运维工作。

E-mail: 37539836@qq.com.

type of borehole seismometer, as well as the correction work of the borehole seismometer horizontal azimuth. Finally it summarizes the innovation and advanced technology of Yangjiang array, and the prospect of further research work.

Keywords: Small aperture; Borehole type; Seismic monitoring array

0 引言

四十多年前地震监测台阵的目的是监测核爆实验,经过这些年的发展,地震监测台阵主要目的发生了很大变化,现已转变成运用台阵其独特的观测技术手段,开展多方面的地球物理领域研究^[1]。地震监测台阵是在与所观测地震波波长相当的孔径范围内有规则排列的一组地震计,通过这些地震计的输出信号进行各种组合分析,采用独特的地震数据处理方法,将各子台的数据会聚在一起,抑制地面噪声,压低干扰背景,提高信噪比,突出有用地震信号和获取有关震源及地球内部结构的信息,从而获得比单个地震台更强的地震监测能力,特别是提取微弱地震信号的能力^[2-3]。

广东阳江是中小地震活动频繁地区,1969年7月26日阳江发生6.4级地震^[4],是华南沿海地区20世纪以来仅有的几次6级以上地震之一;1986年1月28日^[5]和1987年2月25日^[6]分别发生5.0和4.7级中强余震;每年均有发生2~3级小地震,因此需要在阳江地区加密地震观测台站,这也是在阳江建设小孔径台阵提高该地区地震监测能力的重要考虑因素。根据广东省发展和改革委员会的粤发改资[2008]217号文的批复,即广东省南海地震观测网络及地震海啸监测预警系统建设工程项目,建设阳江地震监测台阵,主要目的是要加强对广东省阳江地区以及广东南部海域地区的地震活动监测,提高对南海地震的监测和预警能力,为地震海啸监测预警系统奠定基础。

1 规划设计

1.1 建设要求

在广东阳江东南部临海位置,建设小孔径地震监测台阵,根据建设目的、前期研究和规划设计要求,阳江地震监测台阵由10个测震台组成,台阵中心有1个子台,以中心子台为圆心,半径大约750 m构成的圆周上分布三个子台,称为内圈,内圈3个子台按照120度角度均匀分布;以中心子台为圆心,半径大约1 500 m构成的圆周上分布六个子台,称为外圈,外圈6个子台按照60

度角度均匀分布;中心子台、内圈子台、外圈子台,任何3种类型的子台均不在一条直线上,需要稍微错开,并且要求全部子台井下仪器海拔为同一水平面、岩层面一致、基岩完整性条件好。

1.2 子台命名

第一和第二位代码是一样的:均以地名拼音首字母大写开头;第三位代码:中心子台编为大写字母“A”,内圈编为大写字母“B”,外圈编为大写字母“C”;第四和第五位代码:每圈的子台编号从正北方向上的台站开始编起,顺时针依次编为“01, 02, 03, …”,因此十个子台命名为(为了节省文章篇幅,省去前两位代码,下同):A01、B01、B02、B03、C01、C02、C03、C04、C05、C06。

2 建设过程

建设过程按照建设时间顺序进行简单描述,具体如下:

(1) 立项阶段。根据2008年广东省防震减灾“十一五”建设《关于广东省南海地震观测网络及地震海啸监测预警系统建设工程项目的批复》,进行立项建设。

(2) 勘选阶段。2009年5月底至同年7月初,完成野外初步勘选、专业仪器测试勘选和用地协调等勘选工作。

(3) 建设阶段。分两步走,2010年9月先完成10个子台钻井工程建设;2011年5月完成10个子台基建建设。

(4) 仪器安装阶段。2011年11月完成10个子台设备安装,包括井下设备、机柜、通信仪器、太阳能、避雷系统等。

(5) 服务器安装:安装单独服务器,系统使用Jopens0.5.2版本^[7]进行数据流接入、数据库管理、台站数据实时监控、地震事件分析等,2012年11月完成该项工作。

(6) 试运行阶段。根据项目验收要求,2013年8月至同年12月进行验收试运行。

(7) 验收。2014年1月通过项目验收。

(8) 正式运行。2014 年 1 月开始进入正式运行。

3 台阵详细介绍

3.1 基建信息

基建信息内容主要包括钻井工程和观测房建设两大部分^①。

钻井工程是本次项目建设重要内容之一。一是可以获得较好基岩条件，二是降低地面干扰，获得较好地噪声水平，三是控制 10 个子台井下仪器海拔在同一水平面上。因此，钻井与成井的技术成为井下地震观测台阵的一项关键技术，地面海拔高度测量是在勘选阶段通过专业 GPS 测量仪器进行 24 小时以上连续观测(Leica 生产的双频 RTK 设备 GRX1230 进行测量，精度为 3 mm+0.5 ppm)，其稳定平均值作为最终结果，这是控制钻井深度的重要数据。阳江台阵钻井工程的技术达

到如下指标：① 10 个子台并斜均小于 3 度的技术要求，并且井底高度大约为 -60 m，误差控制在正负 5 m 内。② 岩心岩性都是中微风化花岗岩，每个子台观测房里均保存放置一块井底岩心。③ 采用探矿无缝钢管套管，无缝钢管外径 146 mm，内径 137 mm，其中最下端 10 m 采用无磁材料不锈钢管。④ 水泥翻浆固井，保证井底水泥砣高度不小于 1 m，保证井壁内侧和井底清洁、干燥。

仪器观测房是保障仪器稳定连续正常工作的重要保护环境，井口、设备、机柜等全部放置在观测房里。阳江台阵 10 个子台根据不同的地形和用地协调情况，采用不同的土建方案。C03 和 C04 子台交通条件和用地条件较好，建设面积为 12 m² (长 4 m，宽 3 m，高 3 m)，其余 8 个子台 (即除 C03 和 C04 外) 由于交通不便，施工难度大，建设面积为 6 m² (长 3 m，宽 2 m，高 3 m)。台阵详细信息见汇总表 1。

表 1 台阵基建内容和技术系统详细信息汇总表

Table 1 Detail information about the construction and technical system of the seismic array

序号	台站位置	站名	传输方式	地震计类型	井下仪器深度/m	地面海拔/m	井下仪器海拔/m	供电方式
1	中心点	A01	3G	BBVS-60DBH	106	46	-60	太阳能
2	内圈	B01	3G	FSS-3BDH	76	16	-60	太阳能
3		B02	WiFito C03	FSS-3BDH	52	-4	-56	太阳能
4		B03	3G	FSS-3BDH	91	30	-61	太阳能
5	外圈	C01	3G	FSS-3BDH	55	-10	-65	太阳能
6		C02	3G	FSS-3BDH	57	-2	-59	太阳能
7		C03	SDH WiFi 汇集	FSS-3BDH	55	-5	-60	太阳能
8		C04	WiFi to C03	FSS-3BDH	57	-4	-61	太阳能
9		C05	3G	FSS-3BDH	77	18	-59	太阳能
10		C06	3G	FSS-3BDH	78	18	-60	太阳能

注：地面海拔由 Leica 双频 RTK 设备 GRX1230 测量；井深由北京港震仪器设备有限公司测量。

3.2 技术系统

台阵每个子台的技术系统由供电、防雷、通信、数据汇集等组成^②，见汇总表 1，具体介绍如下：

(1) 供电系统：所有台站均采用太阳能供电带 2 个 100 AH 直流电瓶的供电系统，可以保证在没有太阳输入的情况下供电一周，并且架设了广东省智源抗震科技公司生产的 GL-3BR 电源设备，

可以通过手机短信远程控制各个设备的电源进行重启。

(2) 防雷地网：在观测井周围钻四个深度为 6 m、直径大于 150 mm 的井孔，埋入一条 6 m 长，外径为 146 mm 钢管，上端入地面约 30 cm，管内填水泥，用土掩埋夯实后在地面做标志，4 条钢管通过扁铁埋地连接一起，作为掩埋防雷接地极用。

① 广东省地震局. 广东阳江地震监测台阵建设报告. 广东省立体地震监测预报系统及地震海啸监测网建设工程项目验收, 2013.

② 广东省地震局. 广东阳江地震监测台阵技术报告. 广东省立体地震监测预报系统及地震海啸监测网建设工程项目验收, 2013.

利用较少的投资达到较好的防雷接地效果,全部子台接地电阻均小于 $4\ \Omega$ 。

(3) 通信系统:有7个台(A01、B01、B03、C01、C02、C05、C06),通过广东省智源抗震科技公司生产的专用设备IP数据传输终端(简称IP盒)进行数据打包,然后采用IP盒的3G无线传输模块,将数据传输到广东台网中心台阵服务器;有2个台(B02和C04)通过IP盒进行数据打包后,通过UBNT的专业WIFI网桥设备传输到具有光纤专线(SDH)条件的C03子台,在C03台汇集三个台数据,再通过光纤专线传输到台阵服务器上。

(4) 数据汇集:安装使用Jopens0.5.2服务器,实现了数据流接入、数据库管理、台站数据实时监控、地震事件分析等台阵台网功能,地震事件记录波形见图1。

3.3 地震计类型

地震计和数据采集器均是北京港震仪器设备有限公司生产,地震计有两种类型,数据采集器只有一种,由于篇幅有限,详细参数不一一展列,简单介绍如下:

(1) 宽频井下地震计BBVS-60DBH,三分向一体结构,动态范围大于140 dB,带宽60 s至40 Hz(速度平坦),搭配24位3通道数据采集器EDAS-24GN,该类型台站只有一个,即A01。

(2) 短周期井下地震计FSS-3DBH,三分向一体结构,动态范围大于120 dB,带宽2 s至40 Hz(速度平坦),搭配24位3通道数据采集器EDAS-24GN,该类型台站有9个,即除了A01外,全部都是该仪器类型(B01, B02, B03, C01, C02, C03, C04, C05, C06)。

这两种地震仪系统传递函数的频率响应(count转换为速度m/s)见图2,可以看出,两种类型仪器在速度平坦和相位变化的频率响应带宽是不一样的,仅在2 s至20 Hz有比较好的一致性(速度平坦一致性比较好,相位一致性相对差一些),因此在应用数据的时候,超出此频带范围或是对相位要求比较高的,需要进行去除仪器响应、滤波、仿真等数据处理操作。

3.4 台阵直角坐标系

由于台阵其几何分布的独特性,每个台站的经纬度需要比较高的精度,是由Leica生产的双频RTK设备GRX1230进行测量24小时以上观测获得,精度为 $3\text{ mm}+0.5\text{ ppm}$ 。把中心点A01定为直角坐标系原点,其他9个子台相对于A01位置,基于WGS-84地球椭圆模型,把各子台经纬度换算成直角坐标系相对位置,海拔均为-60 m左右,基本同在一个平面上。把各子台直角坐标系位置进行绘制,如图3所示,台阵直角坐标系

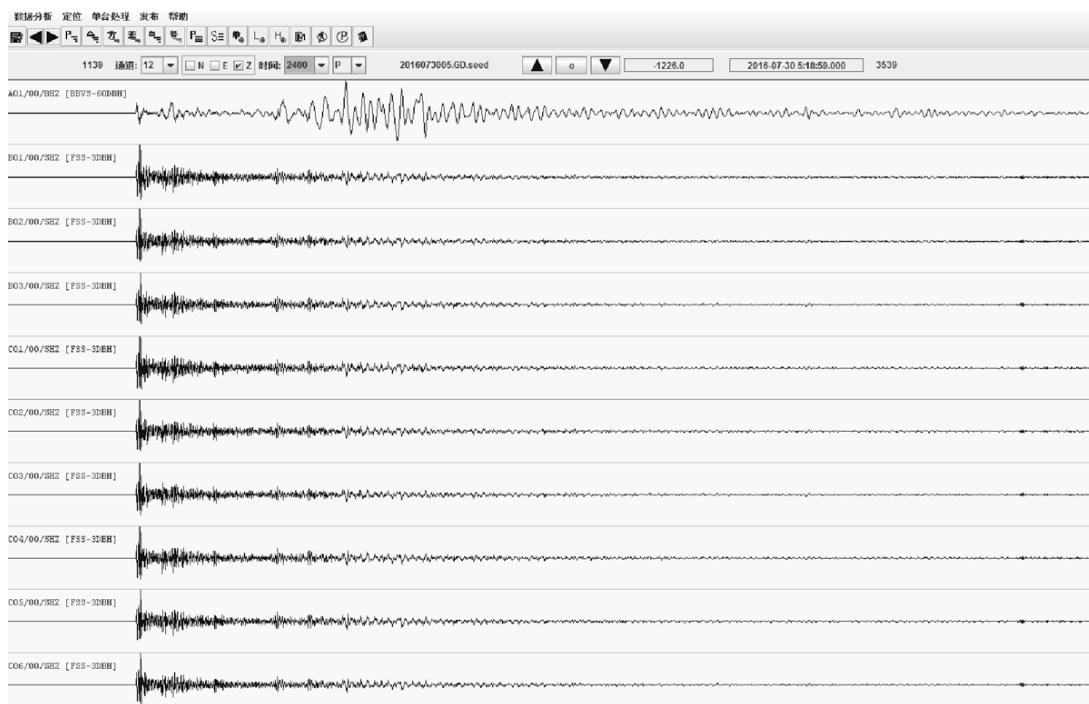


图1 台阵10个子台垂直向2016年7月30日马里亚纳群岛7.8级地震事件记录波形(Jopens MSDP软件)

Fig.1 All the sub stations vertical direction record of the seismic array for the Mariana Islands $M7.8$ earthquake event in July 30, 2016(MSDP Jopens software)

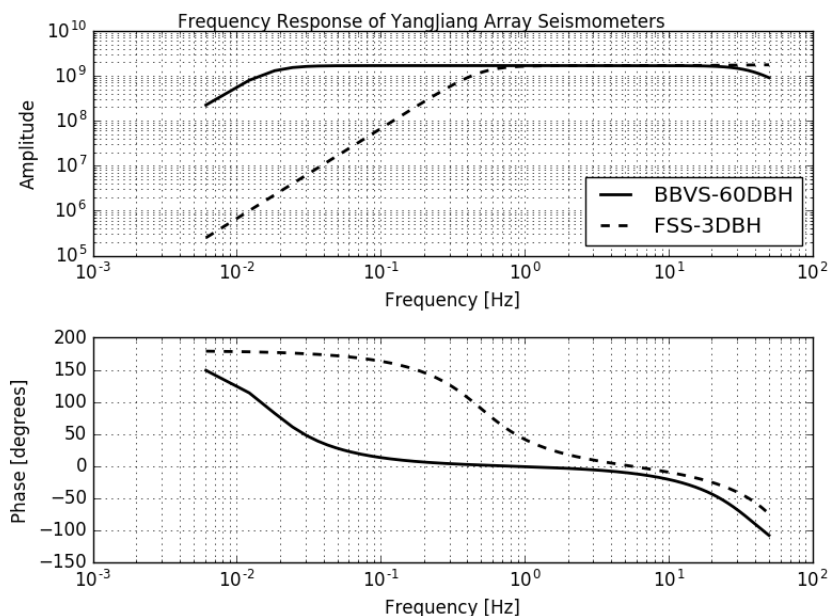


图2 阳江台阵子台地震仪记录系统传递函数频率响应图 (共2种类型)

Fig.2 The frequency transfer functions of Yangjiang array seismograph record system (two types)

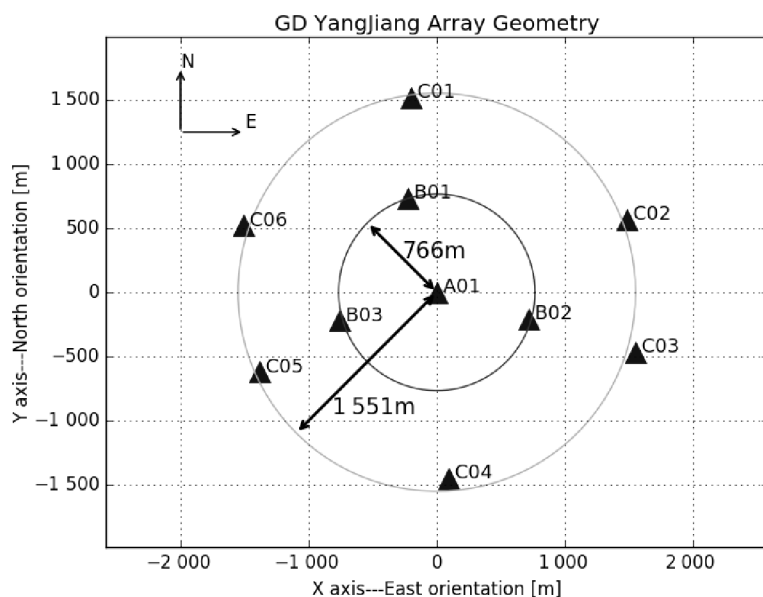


图3 广东阳江台阵直角坐标系几何分布图

Fig.3 Geometric distribution from the rectangular coordinate system of Yangjiang array

几何分布图其内圈平均半径为 766 m, 外圈平均半径为 1 551 m, 可以看出, 中心子台、内圈子台、外圈子台, 任何 3 种位置类型的子台均不在一条直线上, 稍微错开, 符合规划设计要求; 通过直角坐标系, 很容易获得各子台之间的相对距离和相对方位角。

4 井下仪器方位角校正

由于井下仪器水平向方位角在安装的过程中,

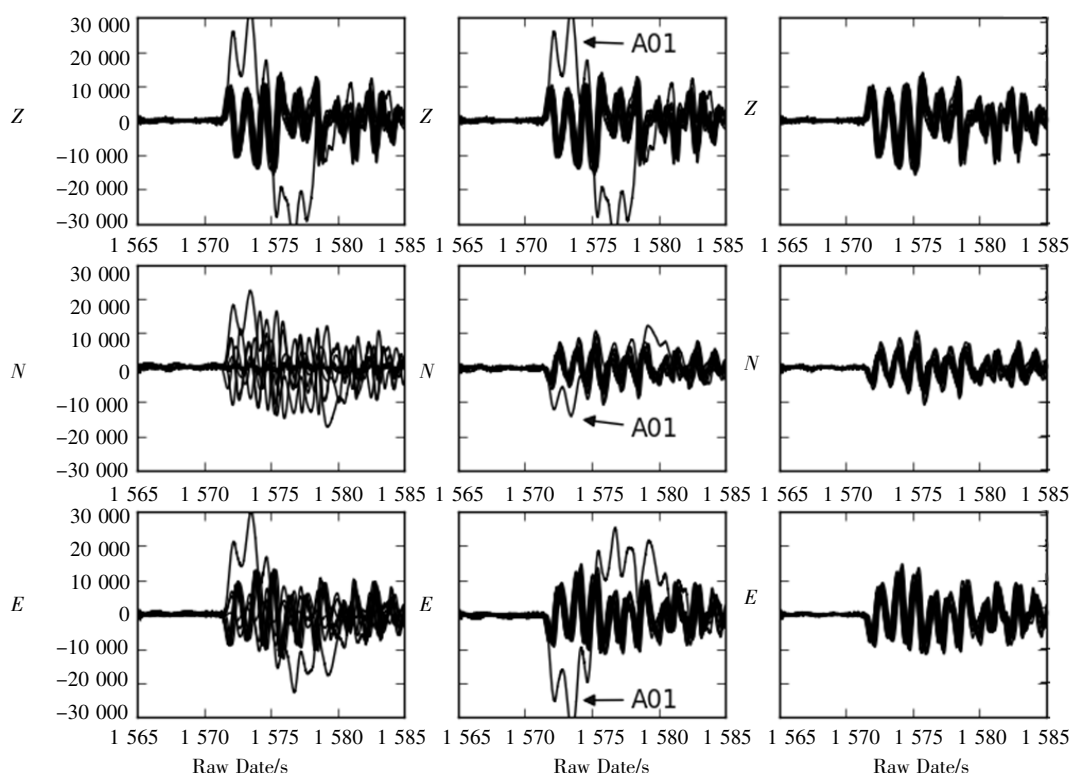
无法准确根据地面 N 和 E 方向进行安装, 因此地震计的 NS 和 EW 方向均有误差, 需要对井下地震计进行比测获得水平向方位角。谢剑波等人 2014 年开展的井下方位角比测工作^[8], 即在地面架设地震计, 与井下地震计进行较长时间对比观测, 使用地噪声 (短时间内观测) 或地震事件 (长时间观测), 进行相关性分析, 得到台阵各子台井下摆水平向方位角。由于台站所在位置的地表覆盖土层深浅情况不同, 地噪声相关性好坏也不一样, 如地噪声相关性比较低, 则使用地震事件进行计算。

使用地噪声相关计算的台站有 A01、B01、B03、C03、C04、C05、C06, 使用地震事件相关计算的台站 B02、C01、C02。根据谢剑波等人台阵比测工作结果, 有些子台的水平向方位角偏差比较大, 在没有校正偏差的情况下, 数据应用方面将会有比较大的误差, 比如在地震定位、结构反演等, 因此这项工作十分重要, 在台阵数据应用时候必须对每个子台进行水平向方位角校正。

地震台阵整个覆盖地区地质构造基本上是一致的, 震中距又远远大于台阵尺度, 那么在地震台阵各子台记录的一个地震的同一震相的视速度可以认为是彼此相等的, 把到达台阵的地震波看作为平面波, 这时台阵记录的某一震相相对于各个子台而言, 其震相波形应该是一致的, 只是各子台震相到时不同而已^[4]。

基于上述原理, 使用 2016 年 5 月 31 日 13 点台湾新北市海域 6.2 级地震(深度 239 km) 数据进行检验比测方位角结果的正确性。该地震震中距离台阵大约 1 200 km, 远远大于台阵 1.5 km 的半径尺度, 把 10 个子台波形重叠绘制在一起, 为了

方便放大对比, 仅显示该地震事件 20 秒 P 波头, 所有数据的预处理仅是去零漂, 即减去原始数据振幅 count 平均值。结果如图 4 所示, 一共九个小图, 每个小图的 X 轴为时间, Y 轴为数据 count 值, 九宫格局上、中、下分别代表垂直分量(简称 Z)、南北水平分量(简称 N)、东西水平分量(简称 E); 左边 3 个小图为 10 个子台三分量原始波形重叠绘制, 可以看出, Z 分量重叠比较好, N 和 E 分量重叠很差, 震相五花八门, 说明 10 个子台水平向方位角不一致, 差别比较大; 中间 3 个小图是经过水平向方位角校正后, 把 10 个子台三分量波形进行重叠绘制, 可以看出这三个分量重叠比较好, 说明井下方位角比测工作获得的结果是正确的, 但 A01 波形与其他子台波形不一致, 这是因为 A01 仪器是宽频, 其他子台是短周期, 对于低频段波形(远震 P 波属于低频段), 其振幅和相位是不一样的; 右边 3 个小图, 仅对 A01 的数据波形, 去除宽频仪器响应, 再仿真成 FSS-3DBH(其他子台短周期仪器), 然后把这 10 个子台三分量数据进行方位角校正, 重叠绘制一起,



一共九个小图, 每个小图都重叠绘制了全部子台的单分量波形, X 轴为时间, Y 轴为 count 值; 九宫格局上、中、下分别表示垂直分量(简称 Z)、南北水平分量(简称 N)、东西水平分量(简称 E); 左、中、右分别表示原始数据波形、对原始数据全部 N 和 E 分量进行方位角校正、对原始数据 A01 三分量仿真成 FSS-3DBH 并对全部 N 和 E 分量进行方位角校正。

图 4 广东阳江台阵 10 个子台井下方位角校正前后波形重叠对比 (2016 年 5 月 31 日台湾 6.2 级地震 20 秒 P 波头)。

Fig.4 Waveform overlap contrast between all the ten sub stations of Yangjiang array (May 31, 2016 in Taiwan $M_{6.2}$ earthquake, twenty seconds long record of the P wave)

结果比较理想。因此,通过方位角校正和 A01 仿真处理,三个分向的波形一致性比较好,基本重叠一起,验证了方位角比测工作结果的正确性;但如果把波形再放大一看,存在着细微的延时差异,这是由于各个子台的地理位置不同,P 波到时不一样造成的,这些细微到时差异对于地震定位是非常重要的。

5 结语

5.1 创新成果

广东阳江小口径井下型地震监测台阵位于阳江东南部靠海区域,该项目从立项、设计、勘选、施工、竣工、验收、正式运行等,每个阶段都应用了新的和先进的地震观测技术及通信技术,保证台阵运行始终在一个安全、稳定、技术可靠的环境下,提高子台运行率,保障台阵数据质量,主要创新亮点和技术成果如下:

(1) 使用了井下观测设备,获得较好的信噪比数据,同时控制 10 个子台海拔基本在同一平面的基岩上,这些对慢度定位、波束生成、聚束等台阵独特数据处理技术有很大帮助^[2-3]。

(2) 采用了稳定和安全的多种数据传输方式,根据各子台的通信条件,充分利用光纤传输、3G 无线传输和 WIFI 无线网桥等现代通讯技术,为台阵地震数据传输服务。

(3) 数据服务器使用 Jopens 系统,实现数据流实时接入、台阵实时监控、波形数据库、地震事件管理等功能,方便数据汇集、保存和分析等工作。

(4) 进行井下仪器方位角校正,由于仪器位于井下,无法判断其方位,而方位角偏差对于台阵数据应用有着很大影响,因此该项工作十分重要,同时也检验了谢剑波等人 2014 年井下方位角比测结果的正确性。

5.2 后续工作

(1) 加强对台阵子台和台网的运行和维护,保障其运行率,做好数据保存和备份工作。

(2) 深入跟踪和研究台阵数据质量,提供详细的仪器参数、井下仪器方位角、台阵直角坐标系位置、断计信息统计、地噪声长时 PSD 计算等数据文件汇总。

(3) 全面分析台阵监测能力,包括震相清晰、震相模糊、微弱地震、核爆破等相关方面研究。

参考文献:

- [1] 寿海涛. 上海台阵精确定位及应用[D]. 合肥:中国科技大学硕士学位论文, 2005.
- [2] 中国地震局监测预报司. 新地震观测实践手册[M]. 北京:地震出版社, 2006.
- [3] S Rost, C Thomas. ARRAY SEISMOLOGY: METHODS AND APPLICATIONS [J]. Reviews of Geophysics, 2002, 40 (3): 2-1-2-27.
- [4] 钟贻军, 任镇寰. 1969 年阳江 6.4 级地震发震构造研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23 (4): 92-98.
- [5] 魏柏林, 薛佳谋, 秦乃岗, 等. 1986 年 1 月 28 日阳江 5.0 级地震[J]. 华南地震, 1986, 6 (1): 1-11.
- [6] 任镇寰, 李富光, 秦乃岗, 等. 1987 年 2 月 25 日阳江 5.0 级地震[J]. 华南地震, 1988, 8 (1): 1-11.
- [7] 吴永权, 黄文辉. 数据处理系统软件 JOPENS 的架构设计与实现[J]. 地震地磁观测与研究, 2010, 31 (6): 59-63.
- [8] 谢剑波. 地震记录的时间域反褶积、仿真及在地震计方位角相对测量中的应用[J]. 地球物理学报, 2014, 57 (1): 167-178.