第36卷 第5期 地球物理学报 Vol. 36, No. 5
1993年9月 ACTA GEOPHYSICA SINICA Sep., 1993

600-608

GDS-1000 宽频带通用流动数字地震观测系统

P315.62

刘启元[1)] 李志明[2)] 沈立人[1)] 李沙白[4)] 周燕云[2)]
金国维[5)] 陈鸿志[2)] 沈 扬[1)] 刘胜千[3)] 李顺成[1)]

A

摘 要

GDS-1000 宽频带通用流动数字地震观测系统主要用于大陆岩石层的人工及天然地震台阵研究、强震观测以及余震观测台网的临时布设.其主要技术指标为:动态范围 120dB,前放增益 1,16,128 倍可调,高端频率 6.25,25,45Hz 可调,采样率 25,100,200Hz 可调,1MB 固态数据存储器借助地震数据的压缩软件可以存储 3MB 以上的数据,工作温度范围 −10—45℃,功耗小于 3W. 定时接受的 BPM 无线电授时信号可保证记录系统时钟校正误差小于 10ms. 其智能化地震触发系统可处于下列模态: 近震触发,远震触发,近震和远震触发,任意地面运动信号触发,以及手动触发和定时触发. DSR-1000 数字地震数据回收系统用于 GDS-1000 的参数预置、地震事件数据的转储和地震图的现场绘制. 该系统在野外试验期间已取得大量近震、远震及核爆炸记录.

关键词 数字地震仪,地震台阵,强震观测,岩石层构造.

数字式地震仪,宽频带,地震,观测

一、引 言

自80年代初以来,各国科学家对宽频带数字地震观测技术以及相应的资料解释方法给予越来越大的关注. 美国全球数字地震台网计划和大陆岩石层地震台阵计划以及欧洲13个国家的地震学家联合制定的地震学观测与研究计划, 突出地反映了这一发展动向[1-3]. 这些计划的技术基础是正在迅速开发和部署的新一代宽频带、大动态数字地震观测台网和大型宽频带、大动态流动数字地震台阵. 其目的在于满足人们进一步对地震活动性、地震过程以及综合利用天然地震和人工地震资料对岩石层精细结构进行定量化综合研究的需要. 尤其是为了进行高密度空间采样的大陆岩石层地震台阵研究, 需要大大提高整个观测系统的通用性、智能化程度和时间服务系统. 与上述研究计划相似,但思路不同,由 Chiu[4] 领导的研究小组研制成功了可用于地震高分辨率空间采样研究的数字多

1) 国家地震局地质研究所,北京 100029.
2) 地质矿产部机械电子研究所,河北省三河 101601.
3) 中国电子学会电子测量与仪器咨询开发中心,北京 100039.
4) 国家地震局工程力学研究所,哈尔滨 150080.
5) 国家地震局地球物理勘探大队,郑州 450003.
本文1992年12月28日收到.

路遥测传输地震观测系统.目前,他们已做到动态范围为 90dB，记录频带为 0.1—40Hz. 其优点是可避免不同台站的时钟误差及因数据搜集不及时造成的数据丢失. 因此，加速开发我国新一代流动数字地震观测系统，尽快部署我国的宽频带流动地震台阵已成为十分迫切的问题.

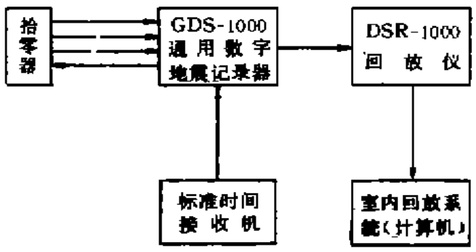

图 1 宽频带通用流动数字地震观测及回放系统框图

本文的目的在于介绍我们研制成功的 GDS-1000 宽频带通用流动数字地震观测系统. 它主要用于人工地震及天然地震的流动台阵观测，也可以用于强地面运动观测以及大地震余震观测台网的迅速部署. GDS-1000 通用流动地震观测及其回放系统的流程框图如图 1 所示. 其总体设计主要依据当前国际上对宽频带流动地震台阵观测仪器的基本要求,即整个观测系统必须具有宽频带、大动态的响应特性,精确的时间服务系统,以及为地方震、近震和远震启动的自动触发及定时触发系统,以适用于各种目的的人工地震及天然地震的流动台阵观测[2]. 1989 年 7 月我们完成了两套试验样机,1991 年建成了由 9 台 GDS-1000 数字地震仪组成的宽频带流动数字地震台阵,1992 年 6 月完成了室内和野外试验.

二、拾震器系统

为了实现整个观测系统的宽频带、大动态特性,传统的动圈式拾震器已经遇到了严重的挑战. 力平衡式拾震器不但在强地面运动观测中，而且在天然地震的远场观测中也已得到日益广泛的应用[3]，但它们尚不能完全满足流动地震台阵观测的要求. 就目前的技术条件，要做到这一点还有一定的困难. 这需要对传统的拾震检测技术进行根本性的变革.

GDS-1000 流动数字地震观测系统配置的拾震器均为可用于流动地震观测的三分量宽频带拾震器. 用于地震波远场观测的为 BKD-1 型反馈式速度拾震器1)，其频率范围为 0.05—6Hz. 用于地震波近场观测的为 WLJ-2 型力平衡式加速度拾震器2)，其频率范围为 0—80Hz.

三、野外地震数据采集系统

GDS-1000 地震采集系统的原理框图如图 2 所示. 由图 2 可见，为了实现多用途流动数字地震观测的要求,我们采用了由 4 个 80C31 单片机网络构成的分模块数据管理系统. 其主要特点和主要技术指标综述如下:

1) 由国家地震局地球物理研究所工厂研制.
2) 由国家地震局工程力学研究所研制.

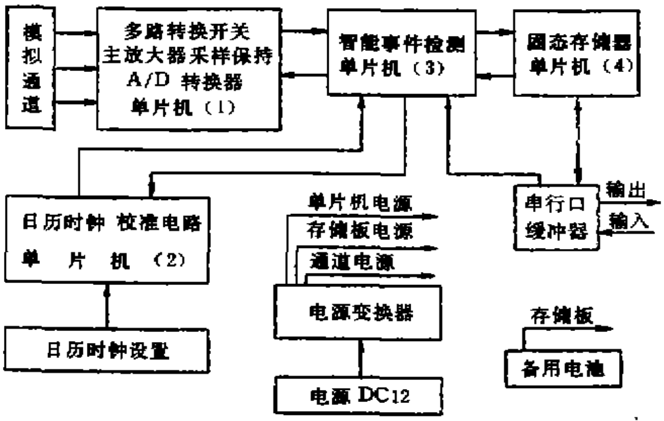

图 2 GDS-1000 宽频带通用流动数字地震仪框图

1. 大动态模拟和数字信号通道 主放大器单元由模拟通道、多路转换开关、可变增益放大器、采样保持电路、ADC 1210 CMOS 12 位 A/D 转换器、80 C31 单片机及稳压电源等组成. 利用单片机可充分发挥软件功能来简化电路的硬件设计,增加设计的灵活性,提高整机的稳定性和可靠性. 另外,系统检测(包括加速度拾震器和速度拾震器)和各种电源电压检测电路也包括在此模块之内.

为了记录各种天然地震和人工地震信号,尽量减少数据的冗余度,采用了分级可调的前置放大器 (1, 16, 128 倍) 和去假频滤波器 (6.25, 25, 45 Hz). 相应的采样率为 25, 100, 200 样/s. 整个通道设计可以满足除地声观测以外的各种地震观测的要求. 图 3 给出了 GDS-1000 地震记录仪的实测频率特性 (采样率为 200Hz).

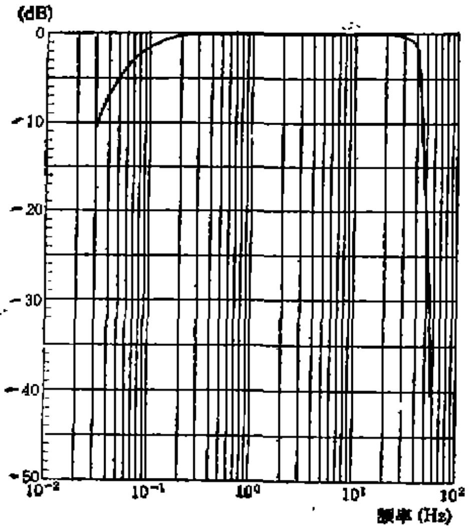

图 3 GDS-1000 宽频带通用流动数字地震仪实测频率特性

2. 固态地震数据存储系统 在环境温度低于 0℃ 时,由于误码率增加,数字盒式磁带机一般不能保证记录的可靠性. 另外,由于卡带和防尘不良,也影响了数字盒式磁带机野外流动观测中的可靠性. 为此,除了对关键性部分采用低温器件之外,我们采用了 1MB 固态数据存储器. 每个事件记录的时间长短可预先设定,也可由系统自动检测确定. 其判据为连续 20s 内信号振幅均小于规定的阈值.

3. 宽频带、大动态浮点数据压缩 由于固态存储器的容量有限,为了扩大存储数据的能力,降低成本,减少野外工作量,我们开发了适用于宽频带、大动态地震数据的综合分片逻辑压缩和物理压缩的数据压缩技术[6]. 理论和实际观测数据检验的结果表明,这一方法的事件压缩比大于 3, 压缩数据的恢复精度在时域中优于 1%,在频域中优于 5‰.

4. 智能化地震事件检测系统 采用模糊模式分类地震事件识别技术,其中包括定

时触发和手动触发功能，而不是通常采用的长短项平均比(STA/LTA)的地震触发检测方法．这不但实现了区分地面噪音信号和地震事件信号，还可以对近震和远震事件进行分类识别，从而大大提高了触发器工作的可靠性，且使野外地震采集系统有很好的通用性[7]．

5. 自动定时校正的绝对时间服务系统　近年来服务于各种研究目的的地震学观测对时间服务的钟差要求越来越高．国际上，包括流动地震台阵观测，已开始使用卫星授时系统．我国虽有不少人进行了无线电授时自动时钟校正的努力，但效果尚不够理想．原因是对接受到的时号缺乏良好的处理和自动搜索控制，对短波信号的自动增益控制不强也是一个原因．为此，在改善接收时号质量的同时，我们利用单片机提高时号自动搜索的检测能力和对时的可靠性．

6. 记录系统的自检和系统响应特性的检测　所谓记录系统的自检是指对记录系统各模块工作电源的电压和固态存储器事件存储空间和剩余空间的检测．由于整个记录系统采用了多单片机控制，从而可以在实时状态下对上述参数进行监测，并把这些信息保存起来．GDS-1000 数字地震记录系统还具有系统响应特性检测的功能．图 4 给出了系统检测的结果．检测系统由 BKD-1 宽频带拾震器和 GDS-1000 数字地震仪组成，检测信号是由记录器自身给出的阶跃电压信号．由图 4 可见，其 3 个信号道有很好的一致性．

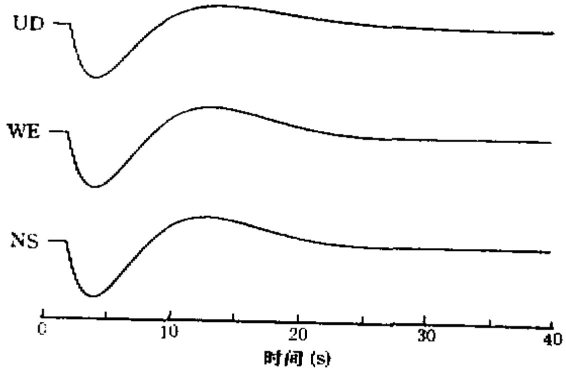

图 4　GDS-1000 数字地震仪记录的阶跃函数响应特性
UD，WE 和 NS 分别表示垂直、东西和南北分量．

GDS-1000 地震记录仪的主要实测技术指标如下：

通道：3 个信号道；输人方式：双端差动输人或单端输人(由放大器人口开关设置)；去假频滤波器：7极点，42 dB/oct；高通滤波器：0.05 Hz，单极点，6 dB/oct；前放增益：1，16，128；频带宽度：0.05—45 Hz；动态范围：>120 dB；数据分辨率：12 位；系统噪音：<1LSB；系统线性度：<1%；失真度：1.8‰；采样率：25，100，200 Hz；道间串扰的抑制能力：>100 dB；晶振稳定度：3×10^{-7}；时间服务的钟差：<10ms；时间校正方式：中国标准无线电授时信号；数据存储介质：CMOS 静态存储器；存储存容量：1MB；数据传输速率：19 200 位/s；数据压缩方式：不压缩、逻辑压缩、抽样压缩和混合压缩；数据压缩比：>3；

触发方式：包括人工触发、定时触发、任意地面振动信号触发及天然地震信号触发；工作温度范围：−10—+45℃；电源电压：12V/DC；体积：41cm × 26cm × 35cm；重量：25kg；功耗：3W；传感器供电：±7.5V，10mA．

四、地震数据回收系统

DSR-1000 地震数据回收系统由数字盒式磁带机、数字笔式绘图仪、显示液晶屏、操

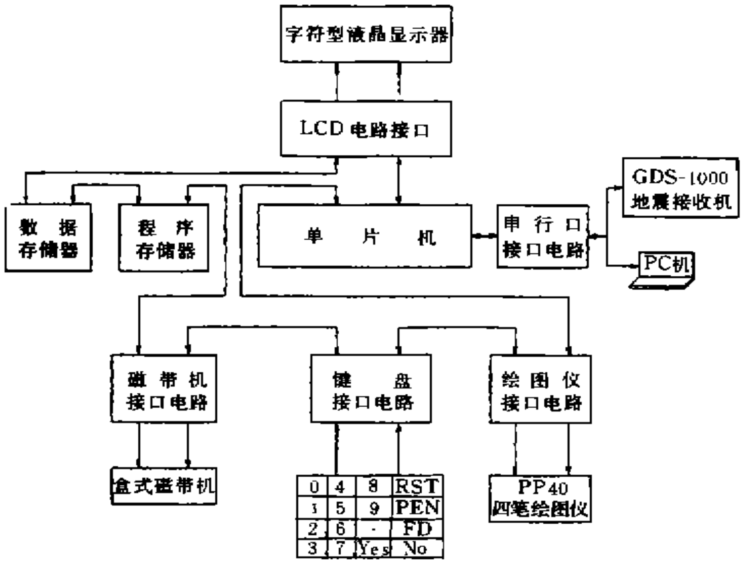

图 5 DSR-1000 地震数据回收系统框图

作键盘和 RS-232 数据通讯口等几部分组成.它主要用于在野外或室内条件下设置记录系统的各种控制参数,回收地震数据,现场绘图,对数据采集系统的工作状态(各模块工作电压、已存储的事件个数、存储体内剩余空间大小等)进行检测,以及把记录的数据传送给室内回放系统. 所有操作均由键盘键入,以人机对话的方式进行. 各种信息则显示在液晶屏上.

磁带机读数据和传送数据是交替进行的. 数据以块方式记录,每个数据块有同步码、标记码、数据和块结束标记码组成. 为确保数据的可靠,从磁带上读出的数据必须经过奇偶校验. 数据传输波特率为 19.2 KB. 传输方式为 10位(1 位起始位, 8 位数据, 1 位停止位). 在单片机管理下,数字盒式磁带机的所有操作通过人机对话执行下列功能: 磁带重绕和定位、块数据和事件数据查找、块数据和事件数据读取和传送、数据重读及块数据或事件数据写入. DSR-1000 地震数据回收系统技术指标如下:

1. 盒式数字磁带机 记录介质: 普通音频盒式带; 记录磁道: 单缝四轨磁头; 数据记录方式: 相位编码; 磁带记录密度: 800 BPI (每一记录道); 误码率: $<10^{-6}$; 记录和重放带速: 4.75cm/s; 文件搜索带速: 50 cm/s.

2. 数字绘图仪 记录笔数: 四笔四色; 记录介质: PB-700 打印机纸; 记录道: 3 道; 最大振幅: ±15 mm; 绘图步长: 0.2mm; 绘图长度: 30—80s (取决于采样率); 时间标度: 最小刻度 0.1s, 标称时间根据采样率自动标度.

3. 数据传输与通讯 数据传递速率: 19 200 位/s; 数据传送方式: 串行传送; 与 IBM-PC 计算机通讯: 单机双向传送; 与 GDS-1000 地震仪通讯: 多机双向传送; 通讯接口: 标准 RS-232.

4. 整机特性 电源电压: 12V/DC, 220V/AC 电压变化的允许范围: ±10%; 功耗: 检测状态: <1W; 记录或重放状态: <3W; 绘图状态: <8W; 仪器外形尺寸:

40 cm×27cm × 18cm；仪器重量：7kg.

五、室内数据回放系统

室内数据回放系统由建立在 IBM-PC 计算机上的地震数据回放处理软件 DSR 和 DXY-880 平板绘图仪构成．其主要功能是：1. DSR-1000 型地震数据回收系统与 IBM-PC 的双工数据通讯；2. 压缩或非压缩地震数据的解编；3. 形成磁盘或磁带文件(磁盘文件是指数据解编后形成的二进制数据文件；而磁带文件则是指数据解编后生成的 ASCII 码数据文件)；4. 三分量地震波形的计算机屏幕显示和开窗，相对时间显示和振幅数据标度；5. 在平板绘图仪 DXY-880 上根据用户需要绘制三分量地震图及其相应的事件参数和有关信息．所有操作均为人机对话方式．

由 GDS-1000 型通用流动数字地震仪生成的数据文件由头段信息和地震数据两部分组成．数据文件有 4 种类型：非压缩数据、仅作逻辑压缩的数据、仅作物理压缩的数据，及经过逻辑压缩和物理压缩两种处理方式形成的数据．解编后，每个事件的数据文件由头段信息子文件和各分量的道数据子文件构成．它们可通过软盘进行数据交换．

图形显示软件采用了灵活的屏幕开窗技术，使一般的中分辨率的显示终端也可以用于地震波形的显示和分析．用户可以根据工作的需要显示完整的三分量地震波形，或利用图形采样的方法对某一段感兴趣的地震波形进行任意开窗显示．除了指定显示地震波形的时间长度之外，给用户的选择方式包括：重新显示、显示上一屏、显示下一屏和显示另外一个事件．地震波形屏幕显示软件提供光标快速移动和慢速移动方式．在屏幕显示状态下，除了地震波形之外，屏幕上给出的信息有相对时标、绝对时间、振幅数据和选择餐单(menu)．根据地震数据类型，振幅数据的单位可以分别为电压、速度和加速度的单位．相对时标的最小单位为 ms．解编后的地震波形数据除了可在屏幕上显示以外，还可以在 DXY-880 平板绘图仪上直接绘制三分量地震图．

由于 GDS-1000 数字地震仪主要用于岩石层的地震台阵研究，为了研究分析和出版需要，在屏幕和打印机上显示和绘制多道地震剖面常常是必要的．另外，由于 GSS*CGI 图形系统可以支持在各种通用点阵打印机，包括激光打印机、滚动式绘图仪和多种显示器上输出图形数据，为此开发了名为 GDSPLT 的多道地震图绘制软件．其功能及可选择的项目包括地震波形输出的道数，选择输出波形的时间段，时间轴上的标度间隔，是否有零基线，每一道波形的标题，是否给出事件参数(包括年、月、日和时、分、秒，震级、震中距和方位角)以及台站名等，波形的放大、缩小比例，单道或多道振幅谱以及是否包括振幅谱的 Fisher 置信水平．

六、野外试验结果

野外试验的地震观测系统由 BKD-1 三分量宽频带速度拾震器、GDS-1000 数字地震记录仪和无线电时号接收机组成．数据解编回放由室内地震数据处理软件包完成．试验地区在北京附近的延怀盆地，时间为 6 个月．整个试验期间共取得 90 多个近震、远震及

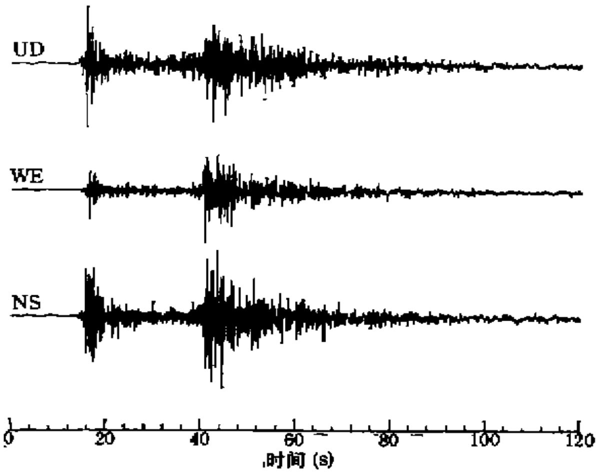

图 6 在西拨子记录到的 1992 年 5 月22日
15 时 22 分 22.4 秒(北京时间)地震
震级 $M_L=3.4$,震中距 $\Delta=209$km,震源深度 $h=10$km,
震中位置在河北里坦附近.

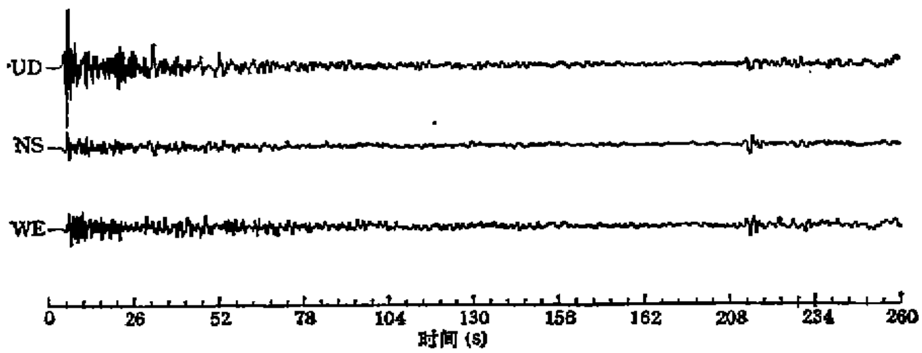

图 7 在西拨子记录到的 1992 年 1 月 22 日 9 时 6 分 55.4 秒
(北京时间)日本本州地震.
震级 $m_b=5.5$, 震中距 $\Delta=18.87°$, 震源深度 $h=116$ km.

核爆炸记录.记录的远震的震中距为 17.04°—122.8°, 震级 m_b=4.0—6.6, 方位角覆盖了 28°—282° 的区域. 图 6 给出了记录到的近震例子,图 7 和图 8 则给出了记录的远震体波宽频带三分量记录. 这些图形均用 GDSPLT 软件绘制.

七、结 语

GDS-1000 宽频带通用流动数字地震观测系统主要用于大陆岩石层的人工及天然地震台阵研究、强震观测以及余震观测台网的临时布设. 野外试验结果表明,智能化触发控制系统具有明显的抗干扰能力, 数据压缩技术对扩展固态存储器的存储能力有明显的效

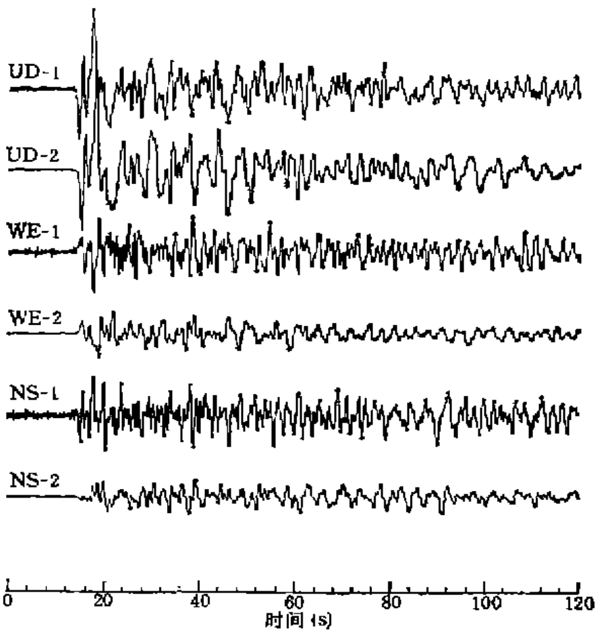

图 8　在黄柏寺、董庄记录到的 1992 年 5 月 12 日 18 时 5 分 45.4 秒 (UTC) 萨摩亚地震
震级 $m_b = 6.3$，震中距 $\Delta = 87.3°$，震源深度 $h = 33$km.

果，压缩的数据能可靠地进行恢复．这套通用流动地震观测及回放系统现已投入野外的实际使用．

本文的工作由国家地震局震害防御司资助，并得到国家地震局工程力学研究所、国家地震局物探大队、国家地震局地球物理研究所工厂、国家地震局分析预报中心西拨子地震台等单位的大力支持．对李裕彻、徐宗和、吴宁远、王庆修、李定一的帮助表示感谢．

参　考　文　献

[1] IRIS, Science Plan for a New Global Seismographic Network, Washington DC, USA, 1984.
[2] Phinney, R. A., Program For Array Seismic Studies of the Continental Lithosphere (PASSCAL), IRIS, 1984.
[3] Nolet, G., Romanowics, B., Kind, R. and Wielandt, E., ORFEUS Science Plan, Reidel, Dordrecht, 1986.
[4] Chiu, J. M. Steiner, G. Smalley, Jr. R. and Johnston, A. C., PANDA: a simple, portable seismic array for local-to regional-scale seismic experiments, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 1000—1014, 1991.
[5] Wielandt, E. & Streckeisen, G., The leaf-spring seismometer: design and performance, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 2349—2367, 1982.
[6] 李沙白、刘启元、沈立人，宽频带大动态地震数据压缩的实时算法，地震学报（待刊）.
[7] 刘启元、沈立人、李志明，地震事件实时检测的模式识别算法，地震学报（待刊）.

GDS-1000 GENERAL PORTABLE DIGITAL SEISMIC OBSERVATION SYSTEM

LIU QI-YUAN [1] LI ZHI-MIN [2] SHEN LI-REN [1] LI SHA-BAI [4] ZHOU YAN-YUN [2]
JIN GUO-WEI [5] CHEN HONG-ZHI [2] LI SHUN-CHENG [1]
LIU SHEN-QIAN [3] LI SHUN-CHENG [1]

Abstract

The GDS-1000 broadband general portable digital seismic observation system is designed for temporary array seismic studies, including refraction and reflection survey, of the continental lithosphere as well as for strong motion observation and rapid deployment in aftershok studies. The main features are: dynamic range 120 dB; preamplifier gain 1, 16, 128 adjustable; the upper cut-off frequency 6.25, 25, 45 Hz adjustable; sampling rate 25, 100, 200 Hz adjustable; operation temperature range -10 to $45°C$; power consumption less than 3 W; data more than 3 MB can be stored in the 1 MB solid memory bank. The system-clock error can be automaticlly rectified down to less than 10 ms by radio time signals. The smart trigger can be in the following modes: local and regional events; teleseismic events; earthquake events; any ground motion; time-preset and hand trigger. The DSR-1000 digital seismic retriever is used for the GDS-1000 parameter preset, data restore and seismogram plot. A large amount of seismic events and nuclear explosions have been recorded during the field test of this system.

Key words Digital seismograph, Seismic array, Strong motion observation, Lithosphere structure.

1) *Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing* 100029

2) *Institute of Mechano-electronics, Ministry of Geology, Sanhe, Hebei* 101601

3) *Consultant Centre of Electronic Measurement and Instrument, Beijing* 100039

4) *Institute of Engineering Mechanics, State Seismological Bureau, Harbin* 150080

5) *Geophysical Survey Brigade, State Seismological Bureau, Zhengzhou* 450003