

崔庆谷, 师娅芳, 邓存华. 2011. 两种宽频带地震计高频段性能及记录数据差异的对比研究. 地震学报, 33(3): 397-403.

Cui Qinggu, Shi Yafang, Deng Cunhua. 2011. A comparative study on high frequency performance and records of two kinds of broadband seismometers. *Acta Seismologica Sinica*, 33(3): 397-403.

两种宽频带地震计高频段性能及 记录数据差异的对比研究^{*}

崔庆谷^{1)*} 师娅芳²⁾ 邓存华¹⁾

1) 中国昆明 650224 云南省地震局

2) 中国昆明 650093 昆明理工大学

摘要 通过对比两种宽频带地震计 FBS-3 和 KS-2000 的结构, 认为两种地震计在检测上限附近的高频段记录数据存在差异, 并以合成地震动为输入, 用模型验算方法证实了这一结论.

关键词 宽频带地震计 记录数据 对比研究

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.03.012 中图分类号: P315.62 文献标识码: A

A comparative study on high frequency performance and records of two kinds of broadband seismometers

Cui Qinggu^{1)*} Shi Yafang²⁾ Deng Cunhua¹⁾

1) Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

2) Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

Abstract: By comparing the structure of the FBS-3 and KS-2000 broadband seismometer, we argue that the high-frequency components of their records are different near upper detecting limit. This conclusion is demonstrated by the calculation using mathematical model of seismometers with artificial ground motion input.

Key words: broadband seismometer; record; comparative study

引言

同一次地震事件在地球上同一点引起的地面运动是唯一的, 但检测该地面运动的地震仪器却可能千差万别. 目前, 国内用于地震观测的地震计有多种(刘瑞丰等, 2008), 这些地震计记录数据之间的一致性没有得到深入研究. 2009 年, 一些研究人员在使用云南地震台网 KS-2000 型地震计记录数据计算震源谱时, 发现部分计算结果在高频段偏离正

* 基金项目 云南省自然科学基金面上项目 (2008CD220) 资助.

收稿日期 2010-02-26 收到初稿, 2010-12-05 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: cqg000123@yahoo.com.cn

常值,从而对该类数据提出了质疑. 另一方面,在地震定位和大震速报过程中,KS-2000 型地震计并没有出现明显缺陷,它所记录到的中远震及远震波形与同点观测的其它仪器有较好的一致性(图 1). 为了解释上述现象,有必要对 KS-2000 型地震计的记录数据进行系统分析.

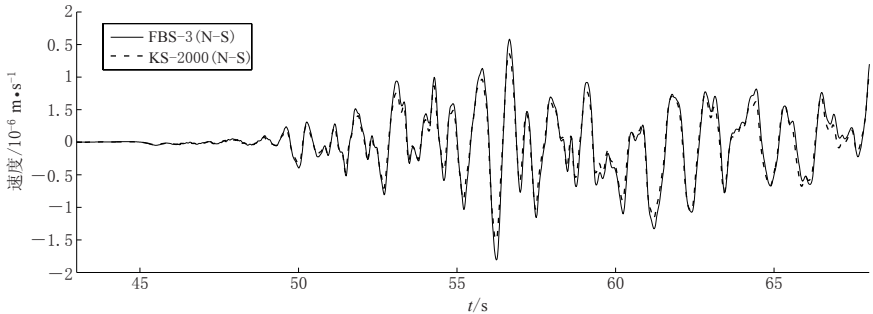


图 1 沧源台 FBS-3 与 KS-2000 同点记录的地震事件(2008-08-21T20:24 盈江 $M_L 5.3$)
Fig. 1 Seismic event (2008-08-21T20:24, Yingjiang, $M_L 5.3$) records of FBS-3 and KS-2000 seismometers at the same site in Cangyuan station

原始的地震观测数据是不可再生的. 从 KS-2000 型地震计投入运行至今,云南地震台网积累了 3 年多的原始资料,该类记录数据若不可使用将造成云南局部地区观测资料的永久性缺失. 因此,对于受到质疑的数据资料,必须针对所反映的问题,从仪器原理上对资料的可用性做出科学评价,为资料使用者提供参考意见,同时也为地震监测主管部门提供决策依据.

鉴于此,本文结合云南地震观测实践中所遇到的问题,把 KS-2000 型地震计与 FBS-3 型地震计进行对比,分析了两者的记录数据差异,并通过模型验算证实了所得出的结论.

1 两种宽频带地震计的结构性能对比

一般地,地震计由悬挂体系、换能器、检波放大器及反馈电路等几个主要部分构成. 其中悬挂体系的参数及换能方式决定了地震计的常见类型,即与记录数据成恒定比例关系的地面运动信号类型(速度、加速度、位移). 2003—2009 年,云南地震台网中用于微震观测的宽频带地震计有两类:一类是速度换能型宽频带地震计 FBS-3,这类地震计依靠反馈控制悬挂体系的自振周期和阻尼,使摆锤的响应速度与地面运动的速度成正比,摆锤的响应速度经放大后作为地震记录数据(刘庆伟等,2001);另一类是位移换能型地震计 KS-2000,该类地震计通过控制悬挂体系的自振周期和阻尼,使摆锤的响应位移量与地面运动的加速度成正比,由此构建一个加速度地震计,然后在加速度输出节点后增加一级积分器,把代表地面运动加速度的信号转变为速度信号,从而实现从加速度地震计到速度地震计的转变(崔庆谷,2003;赵建和,张学应,2004). 其构建方式如图 2 所示.

对于速度换能型宽频带地震计 FBS-3,摆体响应速度为

$$y'(t) = \frac{v_0 \omega^2}{\sqrt{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + 4D_s^2 \omega_s^2 \omega^2}} \sin(\omega t - \varphi_D + \frac{\pi}{2}) \tag{1}$$

其中, $y(t)$ 为摆锤偏离平衡位置的相对位移量, $y'(t)$ 为摆锤的速度, D_s 为单自由度体

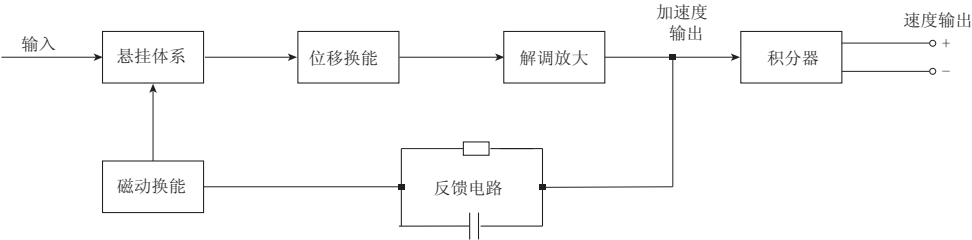


图 2 基于加速度计架构之上的速度地震计结构框图

Fig. 2 Block diagram of a velocity-flat seismometer based on accelerometer structure

系的阻尼系数， ω_s 为自振角频率， v_0 为地震动输入速度振幅， t 为时间， ω 为信号角频率。

对于位移换能型加速度型地震计，稳态响应的幅频特性表达式为(傅金华，2008)

$$y(t) = \frac{a}{\sqrt{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + 4D_s^2\omega_s^2\omega^2}} \sin(\omega t - \varphi_D) \tag{2}$$

在式(1)中代入 FBS-3 的实测参数($D_s=0.707$ ， $\omega_s=2\pi/23.0$)及换能器的检测上下限，可计算得到 FBS-3 的速度检测范围(不考虑噪声对检测下限的影响)为 $8.0 \times 10^{-9}—1.00 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ ，如图 3a 所示。

根据 KS-2000 的通带宽度、加速度灵敏度($220 \text{ V}/(\text{m/s}^2)$)及限幅电压(20 V)标称值，可计算得到悬挂体系参数并推算位移换能器的检测上限为 $2.5 \times 10^{-2} \text{ mm}$ ，下限为 $2.5 \times 10^{-8} \text{ mm}$ 。把上述参数代入式(2)可计算出该地震计的加速度检测范围约为 $1.0 \times 10^{-7}—0.1 \text{ m/s}^2$ 。由加速度与速度的转换关系，可得到 KS-2000 地震计对地面运动速度的检测范围(不考虑噪声对检测下限的影响)，如图 3b 所示。

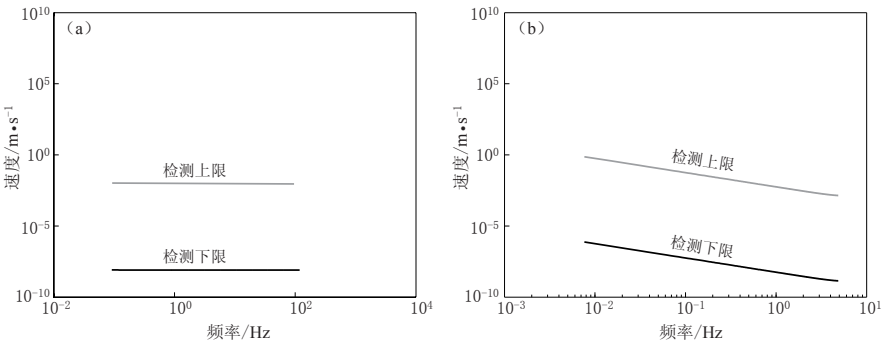


图 3 FBS-3 (a)与 KS-2000 (b)地面运动速度量检测范围

Fig. 3 Detecting range of FBS-3 and KS-2000

对比图 3a 和图 3b 可见，上述两种地震计记录数据的信号成分在接近检测上下限时是不一样的。对于 FBS-3 型地震计，在整个通带内，地震计对不同频率地面运动的检测强度是无差别的；但对于基于加速度计构建的 KS-2000 宽频带地震计，当强度接近检测上限时，高频段信号将比低频段信号提前限幅，使记录的地震波出现高频成分异常。为证实上述结论，可用人工合成地震动作为输入信号，计算两种地震计对同一输入信号的响应来分析检测上限附近的记录波形差异。

2 地震动合成与地震计响应计算

地震计摆体对地面运动的响应可以用以下方程表示:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2D_s \omega_s \frac{dy}{dt} + \omega_s^2 y = -\frac{d^2 x_g}{dt^2} \quad (3)$$

其中, x_g 为地面运动位移. 假设方程(3)的输入信号为由一系列正弦子波叠加而成的地面运动加速度, 即

$$\frac{d^2 x_g}{dt^2} = \sum_{i=1}^n a_i \sin \omega_i t \quad (4)$$

上式对应的速度表达式为

$$\frac{dx_g}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\omega_i} \sin(\omega_i t + \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

其中, a_i 为与 ω_i 对应的加速度振幅, ω_i 为信号角频率, $v_i = a_i / \omega_i$ 为速度振幅. 由于悬挂体系的模型为常系数线性微分方程, 摆体对叠加信号的响应等于对单个正弦信号响应的叠加.

假设体系的初始位移为 $d_0 = 0$, 初始速度为 $v_0 = 0$, 则摆体稳态响应表达式为(祁皑等, 2002; 徐龙军等, 2005)

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\sqrt{(\omega_s^2 - \omega_i^2)^2 + 4D_s^2 \omega_s^2 \omega_i^2}} \sin(\omega_i t - \varphi_{D_i}) \quad (6)$$

其中

$$\varphi_{D_i} = \arctan \frac{2D_s \omega_s \omega_i}{\omega_s^2 - \omega_i^2}$$

如果用人工方法合成式(4)中的地震动, 以图 3a 和图 3b 对应仪器的参数建立地震计模型, 即可根据式(6)分别求解 FBS-3 和 KS-2000 型地震计对地面运动的响应.

地震动的合成方法参考 Housner 及其改进方法(李英民, 赖明, 1998a, b; Housner, 1975), 可用随机到时的正弦子波系列叠加得到. 所使用的正弦子波系列见表 1.

由表 1 中的正弦子波合成的地震动速度波形如图 4a 所示. 该合成地震波的强度相当于一次震中距约 51.3 km, $M_L = 3.0$ 的地方震.

3 模型验算与误差分析

以图 3a 和图 3b 对应仪器的参数建立地震计模型, 用图 4a 中的人工合成地震动作为输入, 即可根据式(6)分别求解 FBS-3 和 KS-2000 型地震计对地面运动的响应.

FBS-3 型地震计对该输入的响应波形见图 4b 所示, KS-2000 型地震计的响应波形见图 4c 所示.

为了分析上述两种地震计的输出信号是否失真, 把输入信号分别按两种地震计的理论放大倍数(恒定常数)进行无失真的放大, 得到理想输出信号, 再进一步计算理想输出信号与模型验算结果的绝对误差 $\Delta E(V)$ 和相对误差 γ

$$\gamma = \frac{\Delta E}{E_{\max}}$$

表 1 合成地震动的正弦子波振幅、频率及到时
Table1 Parameters of sine waves for artificial ground motion simulation

序号	频率/Hz	周期/s	起始时间/s	$a_i/\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$	初相位
1	8	0.125	5.0	0.5	0
2	1/0.325	0.325	5.2	0.5	0
3	2.5	0.4	5.2	0.5	0
4	5	0.20	6.0	0.5	0
5	4	0.25	8.0	0.5	0
6	8	0.125	11.0	0.5	π
7	2.0	0.5	11.0	1.0	0
8	2.5	0.4	12.0	1.0	0
9	1.25	0.8	12.0	1.0	0
10	2.5	0.4	12.0	1.0	π
11	1/0.325	0.325	12.025	0.5	π
12	4	0.25	12.5	0.5	π
13	2.0	0.5	15.0	1.0	π
14	5	0.20	16.0	0.5	π
15	0.25	4	16.0	0.5	0
16	1.5	0.8	16.0	1.0	π
17	0.25	4	16.0	0.5	π
18	2.5	0.4	16.4	0.5	π

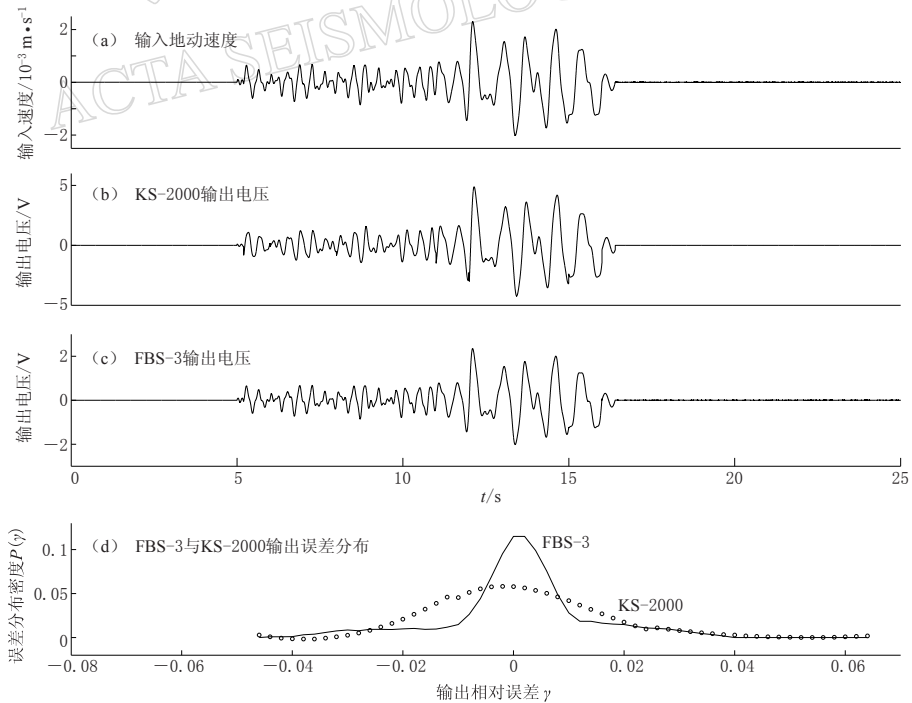


图 4 FBS-3 与 KS-2000 对合成地震事件($\Delta=51.3\text{ km}$, $M_L=3.0$)的记录模拟输出与误差分布
Fig. 4 Artificial seismic event ($\Delta=51.3\text{ km}$, $M_L=3.0$) simulation records of FBS-3 and KS-2000 seismometer and error statistic distribution

其中, E_{\max} 为理想输出信号的电压最大值, 单位为 V. 通过统计计算, 可以得到两种地震计模型验算结果的误差分布密度函数 $P(\gamma)$.

$$P(\gamma) = \frac{N(\gamma)}{N_0}$$

其中, $N(\gamma)$ 为相对误差等于 γ 的点的个数; $N_0=11\,500$ 点, 为波形总的采样点数. 最终得到 FBS-3 与 KS-2000 型地震计模型输出信号的误差分布密度函数值, 如图 4d 所示.

从图 4d 中可以看出, 两种地震计的相对误差都控制在 3% 以内, 波形失真度较小. 从模型的计算过程中发现, KS-2000 型地震计误差相对分散的原因在于积分器引起的微小相移. 但由于误差较小, 在波形上看不出差别.

总之, 对于震级较小、频率成分较少的地震, FBS-3 与 KS-2000 型地震计都能够准确记录真实的地面运动.

为了考查检测上限附近的记录情况, 把表 1 中的振幅放大 4 倍作为输入, 再次计算两次地震计的响应, 得到的记录波形见图 5b 和图 5c, 模型验算结果的误差分布密度函数 $P(\gamma)$ 见图 5d.

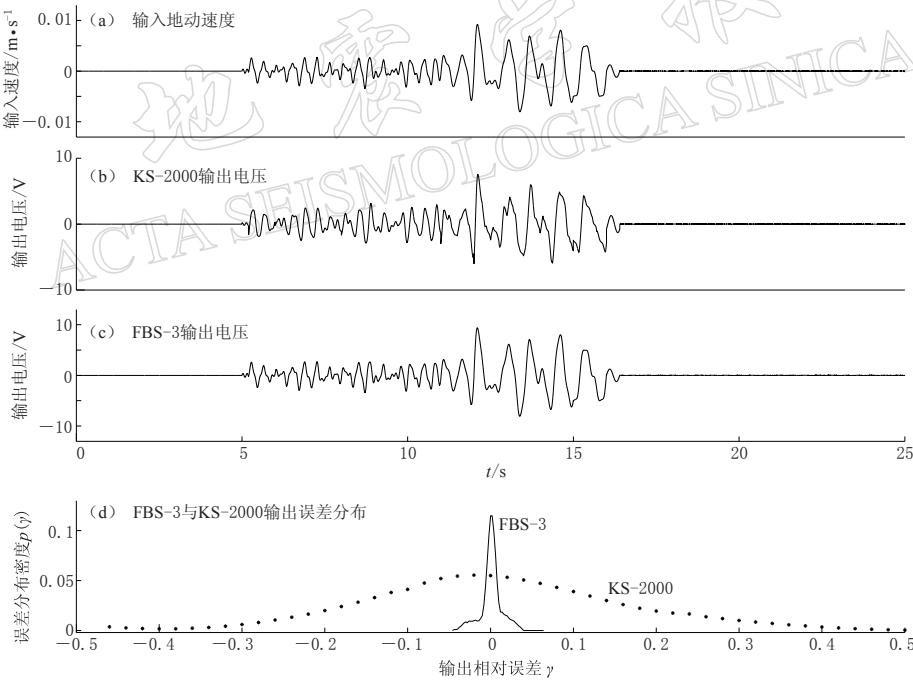


图 5 FBS-3 与 KS-2000 对合成地震事件($\Delta=51.3\text{ km}$, $M_L=3.4$)的记录模拟输出与误差分布

Fig. 5 Artificial seismic event ($\Delta=51.3\text{ km}$, $M_L=3.4$) simulation records of FBS-3 and KS-2000 seismometer and error statistic distribution

对比图 5a—c 可以看出, 图 5b 中的地震记录因高频畸变而引起了失真, 原因是图 5a 中合成的原始输入的振幅范围为 $3.8933\times 10^{-4}\text{—}1.25\times 10^{-2}\text{ m/s}$, 频率范围为 $0.25\text{—}8.0\text{ Hz}$ (用图 6 中方框区域 A 表示). 由于区域 A 被 KS-2000 的检测下限分为左下、右上两个部分, 右上部分的信号因限幅而不能记录到, 导致图 5b 中记录数据的误差增大, γ 最大值达 $0.35(35\%)$, 与理想输出信号相比发生了明显的畸变.

进一步分析模型的计算过程可知,畸变是由 1.25, 2.0 和 2.5 Hz 三个频点的子波限幅引起的。由于上述被限幅信号经过了从加速度到速度的积分过程,加速度输出中的“一刀切”并“剪齐”的限幅现象已经无法识别。

与上述情况不同的是, FBS-3 的检测下限线未穿过信号区域 A, 地震波能够被完整记录到。图 5c 相对于理想输出信号的误差依然很小, 保持在 0.04(4%) 以内。

云南的地震观测实践表明, 与常规地震计相比, KS-2000 对于近距离地震事件容易限幅, 对于远距离大地震则基本不限幅。例如, 2008 年 10 月 8 日 10 时 21 分元江地震台的 KS-2000 型地震计在记录震中距 $\Delta=21.4$ km, $M_L=3.8$ 地震时限幅甚至靠摆。这一现象可以从图 6 中得到很好的解释。

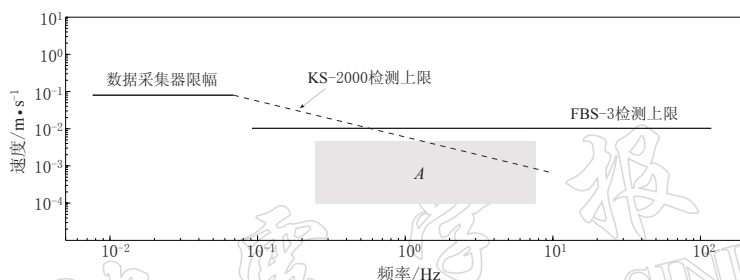


图 6 检测上限附近 FBS-3 与 KS-2000 型地震计记录数据的差异

Fig. 6 Difference in seismic records of FBS-3 and KS-2000 seismometer near their upper detecting limit

4 讨论与结论

KS-2000 型地震计的上述表现源于该地震计特殊的建构方式, 即采用积分电路实现地震计类型转换。这一建构方式导致了该地震计检测上限的形状与常规地震计不同, 从而使检测上限附近的记录数据组分与传统地震计不一致, 并可能导致高频信号的失真。这一现象可以用实验方法检测到。

对强度振幅位于检测条带中部的地震事件, KS-2000 的记录数据同样是地面运动的真实反应。

参 考 文 献

- 崔庆谷. 2003. 位移换能型加速度计中电子力与机械力的比例设计[J]. 地震地磁观测与研究, **24**(1): 7-13.
- 傅金华. 2008. 建筑抗震设计及实例: 建筑结构的设计及弹性反应分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社: 39-49.
- 李英民, 赖明. 1998a. 工程地震动模型化研究综述及展望(I)[J]. 重庆建筑大学学报, **20**(2): 192-203.
- 李英民, 赖明. 1998b. 工程地震动模型化研究综述及展望(II)[J]. 重庆建筑大学学报, **20**(4): 111-117.
- 刘庆伟, 庄灿涛, 刘慧宇. 2001. FBS-3 型反馈式宽频带地震计的传递函数[J]. 地震学报, **23**(1): 79-86.
- 刘瑞丰, 高景春, 陈运泰, 吴忠良, 黄志斌, 徐志国, 孙丽. 2008. 中国数字地震台网的建设与发展[J]. 地震学报, **30**(5): 533-539.
- 祁彪, 范洪伟, 陈永祥. 2002. 简谐荷载作用下伴生自由振动的研究[J]. 地震工程与工程振动, **22**(6): 155-161.
- 徐龙军, 谢礼立, 郝敏. 2005. 简谐波地震动反应谱研究[J]. 工程力学, **22**(5): 7-13.
- 赵建和, 张学应. 2004. Geotech 宽频带数字地震观测系统原理及应用[J]. 地震地磁观测与研究, **25**(增刊): 21-27.
- Housner G W. 1975. Properties of strong motion earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **45**(3): 197-218.