

用相关分析法检测两种地震计性能及记录数据差异^{*}

崔庆谷, 安晓文, 邓存华, 蔡绍平

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 阐明利用同点记录数据相关性检测两种地震计性能及记录数据差异的方法, 并用两台经过测试且性能相同的 FBS-3B 型地震计进行验证, 最后用该方法检测了 STS-2、KS-2000 型地震计的高频段性能及记录数据差异。

关键词: 地震计; 数据差异; 相关性; 检测

中图分类号: P315.62

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)03-0313-04

0 引言

目前国内用于地震观测的地震计有多种(刘瑞丰等, 2008), 多种地震计记录数据之间的一致性尚未得到深入研究。2009年, 个别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常值, 从而对该类数据提出质疑。

崔庆谷等(2011)用模型验算的方法从理论上证明, 在检测上限附近, KS-2000 型地震计与 FBS-3 型地震计的记录数据在高频段存在差异, 但没有利用真实的地震记录数据对此问题作深入分析。

真实的地震记录表明, 一般情况下, KS-2000型地震计记录的数据与同点观测的其它仪器记录的数据有较好的一致性, 因此上述模型验算方法并不能完全解释个别研究人员的质疑。因此, 必须直接针对受到质疑的观测数据, 采用新的分析方法进一步对数据进行处理并得出结论。

众所周知, 同一地震在地球上同一点处引起的地面运动是唯一的, 地震计作为检测该地面运动的科学仪器, 两种地震计在同一地震事件中同点检测到的同类型(速度、加速度、位移)记录数据在没有信号损失的前提下应该完全相同, 否则说明有一组记录数据不能完全真实地反应地面运动。因此, 通过对比两种地震计的同点观测数据可以检测它们的性能差异。本文利用 KS-2000

与 STS-2 型宽频带地震计同点记录到的地震事件及背景噪声数据, 用相关分析法证明两者的地震记录数据在高频段存在差异。

1 相关分析法的原理

地震记录数据由地面运动和仪器噪声两个部分组成, 在地震计通频带内, 地面运动(包括背景噪声、干扰和地震事件)的振幅远大于仪器噪声, 在通频带之外, 这种差别将明显减小(Mark *et al*, 1990; Berger *et al*, 1979)。如果把两台响应类型相同(如速度平坦型)的地震计并列架设于同一点, 对它们记录到的数据做相关分析, 在两者共同的通频带内, 数据的相关系数应该接近于 1.0, 而在通频带之外则相关系数较小(崔庆谷等, 2008, 2010)。

相关性检测方法的测试原理(Rodgers, 1992, 1993)为: 用两台传递函数分别为 H_1 、 H_2 的地震计平行架设在同一观测台基上, 假设 H_1 为参数已知的标准地震计, H_2 为待测地震计, 两台地震计的输入地振动相同, 其记录数据分别为 $y_1(t)$, $y_2(t)$, 其中 $y_1(t)$, $y_2(t)$ 包含地震计的仪器本底噪声 $n_1(t)$, $n_2(t)$ 。

假设两台地震计输出数据的自相关功率谱密度分别为 P_{yy1} , P_{yy2} , 互相关功率谱密度为 P_{y12} 。仪器本底噪声的自相关功率谱密度分别为 P_{nn1} , P_{nn2} , 地面运动信号的自相关功率谱密度为 P_{ss} , 由于系统是线性的, 仪器噪声与地背景噪声相互独立,

^{*} 收稿日期: 2010-11-11.

基金项目: 云南省自然科学基金面上项目(2008CD220)资助.

因而有下列关系存在

$$P_{yy1} = P_{ss} |H_1|^2 + P_{nn1}, \tag{1}$$

$$P_{yy2} = P_{ss} |H_2|^2 + P_{nn2}, \tag{2}$$

$$P_{y12} = P_{ss} |H_1| |H_2|, \tag{3}$$

$$\gamma^2 = \frac{|P_{y12}|^2}{|P_{yy1} P_{yy2}|}. \tag{4}$$

式中, P_{y12} 为 $y_1(t)$, $y_2(t)$ 中的相关成分, 将 (1)、(2)、(3) 式代入 (4) 式可得

$$\gamma^2 = \frac{1}{1 + \frac{P_{nn1}}{P_{ss} |H_1|^2} + \frac{P_{nn2}}{P_{ss} |H_2|^2}}. \tag{5}$$

在两台地震计通频带的重叠频带内, (5) 式分母中的 $\frac{P_{nn1}}{P_{ss} |H_1|^2}$ 和 $\frac{P_{nn2}}{P_{ss} |H_2|^2} \ll 1.0$, 故 (5) 式变为

$$\gamma^2 \approx 1.0. \tag{6}$$

相反, 在两台地震计通频带的重叠频带范围之外, γ 值逐渐变小。如果令 $y = \frac{1}{\gamma^2}$, $x = \frac{1}{|H_2|^2}$, $c =$

$\frac{P_{nn1}}{P_{ss} |H_1|^2}$, $k = \frac{P_{nn2}}{P_{ss}}$, 其中, 在每一个频率点对应 c 和 k 为常数, 代入 (5) 式可得

$$y = kx + c. \tag{7}$$

可见, 相关系数的变化曲线直接反映并检查待测地震计的幅频特性 $|H_2|$ 的变化情况。2003 年在北京马道峪台用两台经过严格测试、性能已知的 FBS-3B 型地震计在相同台基上作测试, 得到的相关系数经分段拟合后如图 1 所示。图 1 中的相关系数曲线真实反应了 FBS-3B 型地震计幅频特性: 通频带为 0.05 ~ 25 Hz (采样频率为 50 Hz)。

上述方法中用于计算相关系数的数据可以是一段包含地震记录和干扰的数据, 也可以是一段背景噪声记录数据。由于输入地面运动的振幅在不同频段可能相差很大, 如果直接用原始数据计算整个频率轴上的相关系数, 得到的相关系数曲线因计算精度较低而出现很多毛刺。为提高计算精度, 笔者先对原始输入数据用不同通频带的带

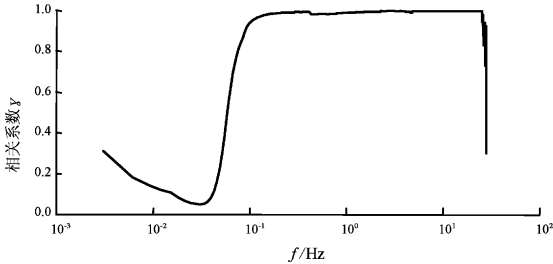


图 1 两台 FBS-3B 型地震计同点记录数据的相关系数 γ

Fig. 1 Cross-correlation coefficient γ of two series of data recorded by two FBS-3B seismometers at the same site at Kunming station

通滤波器进行滤波, 利用滤波之后的数据分段求取相关系数并作分段平滑后得到较光滑的曲线 γ 。

2 利用地震事件记录检测 KS-2000 型地震计性能及数据差异

为检测 KS-2000 型地震计的性能, 笔者把该地震计与 STS-2 型地震计架设在昆明地震台同一个仪器墩上, 同点记录到 2008 年 8 月 30 日 14 分 30 秒攀枝花—会理 6.1 级地震波形数据 (图 2)。

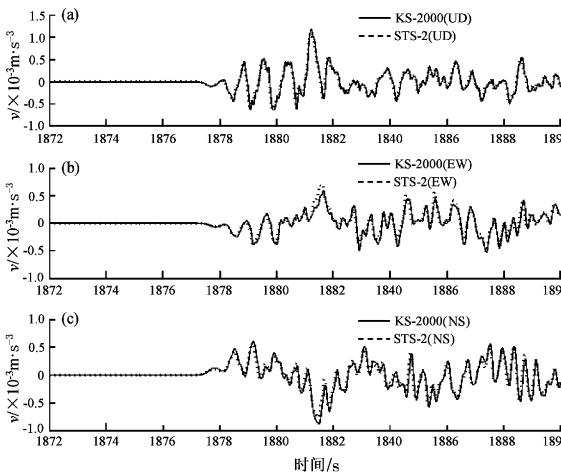


图 2 昆明台 STS-2 与 KS-2000 型待测地震计同点记录的攀枝花—会理 6.1 级地震波形 ($\Delta \approx 140$ km)

Fig. 2 Waveform recordings of Panzhihua-Huili $M_s 6.1$ earthquake recorded by STS-2 and KS-2000 under test at the same site at Kunming station ($\Delta \approx 140$ km)

昆明台 STS-2 型地震计工作正常、性能稳定, 其通频带为 0.02 ~ 120 s (彼得·鲍曼, 2006), 采

样率为 40 Hz。利用图 2 中的同点记录数据作相关分析，得到的相关系数经分段平滑后见图 3。

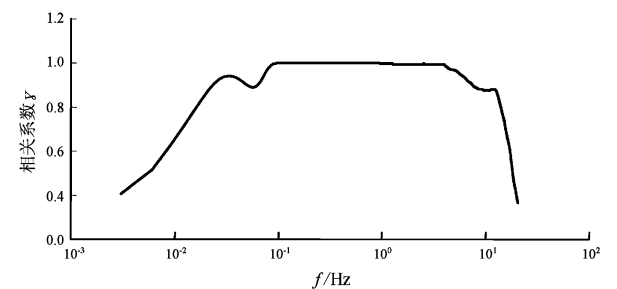


图 3 用 STS-2 与 KS-2000 型待测地震计同点记录的 2008 年攀枝花—会理 6.1 级地震数据计算得到的相关系数

Fig. 3 Cross-correlation coefficient of two series of data of Panzhihua-Huili seismic event ($M_L 6.1$, $\Delta \approx 140\text{km}$) recorded by STS-2 and KS-2000 under test at the same site at Kunming station

从图 3 可以看出，KS-2000 型待测地震计的系统特性在低频段 10 ~ 60 s、高频 5 ~ 20 Hz 都偏离正常值。笔者对该记录数据做进一步分析，截取地震波到达前的一段背景噪声数据进行对比，发现 KS-2000 型待测地震计记录数据中存在周期为 20 s 左右的自振信号（图 4），说明该仪器的低频响应性能出现故障，故障产生的自由震荡导致了相关系数曲线中低频段的异常。

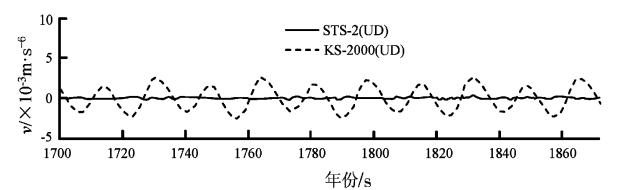


图 4 KS-2000 型待测地震计记录数据中的自激震荡

Fig. 4 Self-excited oscillation of recordings of KS-2000 under test

相关系数曲线中 5 ~ 20 Hz 段的异常可以从 KS-2000 型待测地震计检测上限及结构的特殊性来解释。由于 KS-2000 型待测地震计是基于加速度地震计构建的速度地震计，其速度检测上限随频率增高而减小，导致震中距较近的中强以上地震在高频段的记录数据因限幅而失真，这种失真在相关分析中被揭示出来。

3 利用背景噪声记录数据再次检测 KS-2000 型待测地震计高频性能

为进一步检测 KS-2000 型待测地震计的高频性能，笔者把图 4 中 STS-2 型地震计与 KS-2000 型待测地震计同点记录背景噪声资料（不含地震波）通过一个高通滤波器（通频带为 0.1 ~ 100 Hz）去掉待测地震计数据中的自由震荡，然后做相关分析来做进一步研究。由于此次用于分析的信号不包括地震波，信号强度较小，振幅远小于待测地震计的检测上限，相关系数曲线中高频段的异常应该不会出现，计算结果见图 5。

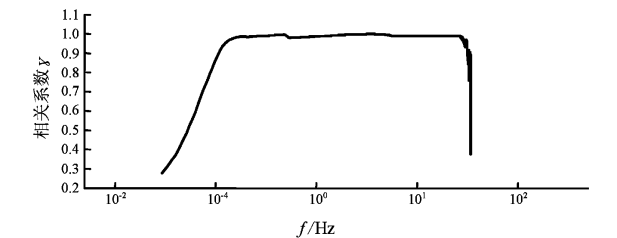


图 5 用 STS-2 与 KS-2000 型待测地震计同点记录的背景噪声数据计算得到的相关系数

Fig. 5 Cross-correlation coefficient of two series of background noise of recordings of STS-2 and KS-2000 under test at the same site at Kunming station

从图 5 中可见，对于强度处于检测上、下限之间的地面运动信号，KS-2000 型待测地震计的记录数据与标准地震计的记录数据具有良好的相关性，两者之间的相关系数不偏离正常值，此时 KS-2000 型待测地震计记录数据完全能够反映真实地面运动。

4 结论与讨论

对于中等强度以下的地面运动，由于其振动强度位于 KS-2000 型地震计的检测上、下限之间条带，此时 KS-2000 型地震计与其它仪器的记录数据有较好的一致性。但是对于振动强度接近检测上限的地面运动，KS-2000 型地震计的记录数据与常规地震计记录数据在高频段存在差异，这一差异可以利用两套地震计同点记录数据的相关性分析方法检测出来。

参考文献:

彼得·鲍曼. 2006. 新地震观测实践手册[M]. 中国地震局监测预报司,译. 北京:地震出版社.

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[J]. 地震学报,33(3):397-403.

崔庆谷,宋金燕,秦波,等. 2010. 台基对地震波、干扰的选择性抑制及其抗干扰品质的实验研究[J]. 地震研究,33(2):222-226.

崔庆谷,杨玲英,蔡绍平,等. 2008. 系统动态特性对重力地倾斜仪器抗干扰性能的影响[J]. 地震研究,31(4):394-398.

刘瑞丰,高景春,陈运泰,等. 2008. 中国数字地震台网的建设与发展[J]. 地震学报,30(5):533-539.

Berger J, Agnew D C, Parker R L, *et al.* 1979. Seismic system calibration;

2. Cross-spectral calibration using random binary signal [J]. BSSA, 69(1):271-288.

Mark A R, Robert D M, John A O. 1990. Limits of sensitivity of inertial seismometers with velocity transducers and electronic amplifiers[J]. BSSA, 80(6A):1725-1752.

Rodgers P W. 1992. Frequency limits for seismometers as determined from signal-to-noise ratios. Part 2. The feedback seismometer [J]. BSSA, 82(2):1099-1123.

Rodgers P W. 1993. Maximizing the signal - to - noise ratio of the electromagnetic seismometer: The optimum coil resistance, amplifier, characteristics, and circuit[J]. BSSA, 83(2):561-582.

Checking Performance and Recording Differences of Two Kinds of Wide-band Seismometers by Correlation Analysis Method

CUI Qing-gu, AN Xiao-wen, DENG Cun-hua, CAI Shao-ping

(*Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

The Cross-correlation method for checking two types of seismometers' performance and recording differences is clarified through two series of data at the same site at Kunming station. And this method is demonstrated by an example of two FBS-3B seismometers whose performances are similar. Then the method is applied to checking the performance of STS - 2 and KS - 2000 wide-band seismometers in high-frequency band and the difference between the recordings of these two kinds of seismometers.

Key words: seismometers; recording differences; correlation; performance checking