

地震台阵滤波及子台分布对聚束效果的影响(I)

——滤波与相关性的规律

刘 旭^{1,2}, 朱元清³, 佟玉霞²

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 3. 上海市地震局, 上海 200062)

摘要: 以上海佘山实验地震台阵的测震记录为基础, 研究了近震事件、远震事件及噪声不同的幅频特征. 分析了影响台阵记录之间相关性质的一些主要因素: 当子台间距增大时, 记录之间相关性降低; 当间距固定时, 所记录事件的相关性质受信号的频率、震中距(波阵面的入射角)及噪声振动背景的影响. 提出了一维时间序列滤波函数的优化结果并不是二维台阵的最佳频率窗. 欲取得较好的聚束信噪比, 滤波函数不仅考虑压制噪音振动, 还要考虑压制信号的非相关频段.

关键词: 地震台阵; 滤波; 相关性

中图分类号: P315.3⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2003)02-0097-06

0 前言

地震台阵的概念起源于 1958 年日内瓦禁止核实验谈判. 初衷在于侦察远处的微弱事件. 自 20 世纪 60 年代起, 欧美建成了 LASA, NORSAR 为代表的大孔径(200, 100 公里)地震台阵. 70 年代后期, 由于运行经费的问题以及研究区域近距离事件的需要, 一些小口径(几公里)台阵也建立起来. 2002 年联合国 CTBTO 组织在中国兰州、海拉尔两地分别建成了孔径约为 4 公里的地震台阵. 我国于 2001 年建成了上海佘山地震台阵, 是针对区域小震事件监测及地震学研究的永久性宽带地震台阵. 所有地震台阵的建设之前, 都要在拟建场地布设实验台阵, 以了解该地区的振动噪音背景及信号的响应特性. 它们是地震台阵设计的依据.

台阵优化设计的目的之一, 是要通过对多道记录的处理得到更高信噪比的输出, 或较高的信噪比增益. 影响信噪比增益的主要因素有: 信号与噪音的幅频特性、相关特性; 台阵的几何性质, 包括子台数目、子台分布形状; 对原始记录的处理方法, 包括滤波及聚束的方法.

台阵记录的相关性是台阵设计的基础资料. 如果台阵记录的相关性很差, 就不能称其为台阵. 这或许是台阵与台网的一个主要区别. 因此研究台阵记录的相关性是非常重要的研究内容. 通过分析上海佘山实验地震台阵的测震记录, 我们发现: 除了子台之间的距离可明显地影响记录的相关性之外, 对于间距固定的两个子台, 所记录事件的相关性质受信号的频率、震中距(波阵面的入射角)及噪声振动背景的影响. 本文对此影响规律做了较详细的分析. 而对于台阵的几何分布及相关系数对地震台阵聚束效果的影响在本文的第二部分中论述.

1 实验台阵简介

上海佘山实验台阵设在上海市西南方向约 30 公里的佘山出露基岩上, 子台共由 16 个 FBS-3 宽带地震计及国产 EDAS-3M 数据采集器组成. 子台分布的原则主要考虑尽量均匀, 高差不大于 10 米. 实验台阵的中心位置是纬度 $32^{\circ}05'44''$, 经度 $121^{\circ}11'17''$; 子台基本上均匀分布在 3.5 公里长, 2.5 公里宽的

收稿日期: 2001-12-26

* 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2003020

作者简介: 刘 旭(1963—), 男(汉族), 副研究员, 博士, 现从事土动力学、地球物理学研究工作.

范围内;相邻子台的间距约 0.40.6 公里(图 1).该实验台阵进行地震观测时,由于仪器触发方式的影响,同一时间部分子台没有记录.记录文件的时间长度 60300 秒不等.

2 噪音及信号的频率特性

将实验台阵的记录分为远震、近震和噪声记录三种,在分析信号时所选取的信号记录有足够的信噪比.对远震记录做傅立叶谱分析时,选取 P_n 波震相;近震则分析比较完整的记录,这主要是考虑到将来许多微弱近震事件的原始记录难以清晰地定出各个震相;对噪声记录进行傅立叶变换时,尽量取完整的记录.总的看来,远震、近震事件、脉动噪音这三种记录的频谱有明显的差异.在不失一般情况的前提下,我们选择以下三个记录的垂直分量来分析.

(1) 03291311 记录,为中印边界 1999 年 3 月 29 日 ($30^{\circ}24'N$, $79^{\circ}12'E$) 的 $M_s6.9$ 地震的 P_n 震相,代表远震记录,见原始记录图(图 2(a)).

(2) 03250645 记录,为江苏射阳 1999 年 3 月 25 日 $M_L 4.1$ 地震 ($33^{\circ}32'N$, $120^{\circ}31'E$),代表近震事件,见原始记录图(图 2(b)).

(3) 03280040 记录,是 1999 年 3 月 28 日零点的无明显事件的记录,用来代表环境噪音,见原始记录图(图 2(c)).

记录的纵坐标单位是 count, $1\text{count}=0.016\mu\text{m/s}$.对此三个记录分别作傅立叶变换,经归一化的结果见归一化频谱图(图 3).远震 03291311 的频率集中在 $0.11\sim0.61\text{Hz}$ 之间;近震(射阳地震)03250645 的卓越频率为 0.66Hz ,随着频率的增高,振幅衰减的比较缓慢;噪声 03280040 记录的卓越频率为 0.37Hz ,这显然是海浪拍击海岸所引起的脉动成分,幅值大约 $1.6\mu\text{m/s}$.噪声振幅随着频率的增大而急剧衰减,但 0.83Hz 出现次级的频率峰值,从放大的原始记录上可读出幅值为 20 count 左右,也是脉动的成分.这种基岩频率的多峰现象或许与西太平洋地质特征有关,但 1.43Hz 的成分似乎难以归结为常时脉动.后经 1Hz 高通滤波,发现是幅值仅为 10 count 的事件,但它在记录中所占的能量很小,不影响对噪音特性的研究.

对比噪声及近震的频谱分布,很明显 0.5Hz 的高通滤波将有效的压制噪声.用熟悉的 Wiener 一维理论公式^[2]

$$H(f) = \frac{P_s(f)}{P_s(f) + P_n(f)}$$

式中 f 为频率; $P_s(f)$ 为信号的功率谱密度函数; $P_n(f)$ 为噪声的功率谱密度函数; $H(f)$ 为最佳滤波窗函数.结果见 Wiener 最佳滤波窗函数图(图 4).在实际工作中往往用近似的窗.很明显,对于近震用 f 大于 0.5Hz 滤波,将会得到最佳的信噪比;对远震 f 应小于 3.8Hz .这里需要注意的是,一维 Wiener 滤波函数并没有考虑信号、噪声的相关性质.

3 噪声及信号的相关性质

文献[1]对于两个时变信号的相似性,在时间域里也用信号的相关性来描述.并用自相关积分对互相关积分进行归一化,得到相关系数 $Y_{ij}(\tau)$.这里 i, j 代表两条时变记录; τ 为相关系数的自变量,其物理

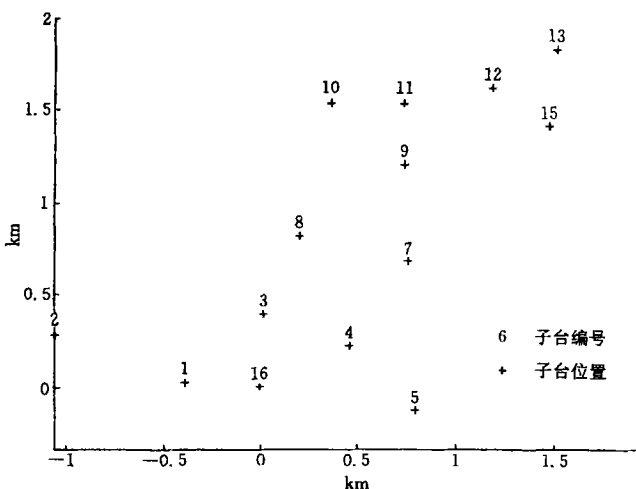


图 1 实验台阵子台分布图

Fig. 1 Distribution of Sheshan testing seismic array in Shanghai.

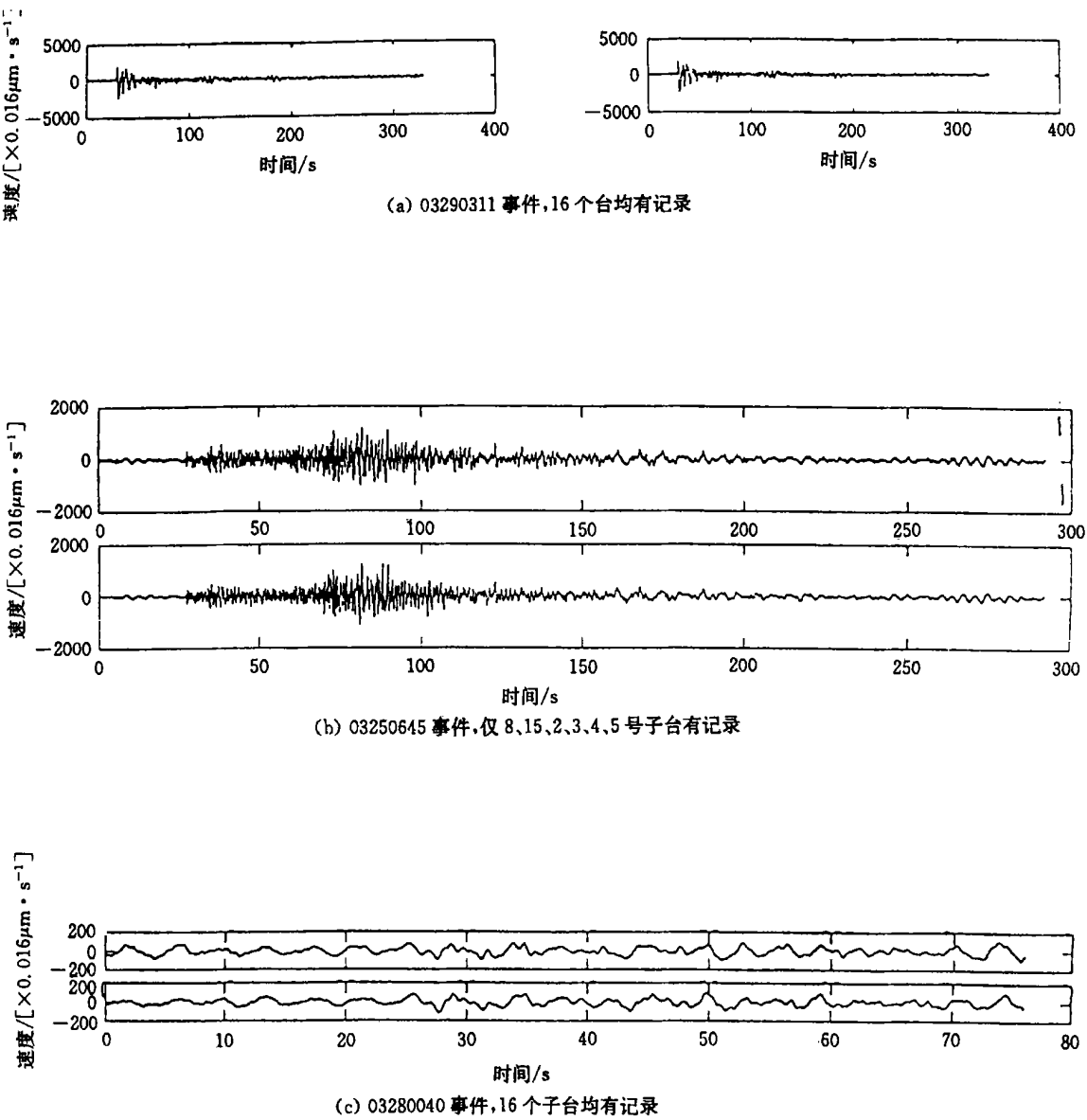


图 2 实验台阵原始记录

Fig. 2 Representative examples recorded by the testing array.

意义就是延时。

在实际工作中, 我们遇到的问题是: i, j 是经过改造的记录. 例如对原始记录采用方式不同的滤波方法, 就得到不同的 i, j 数组, 其相关系数不同. 另外相关系数作为延时 τ 的函数不能直接用于台阵增益的计算. 我们用相关系数为最大值来表示两组数据的相关性质. 对于噪声而言, 如果是宽平稳随机序列, 做两组数据的相关分析时, 考虑相位延迟是没有意义的, 但必须数据的长度对噪音的宽平稳要求一般是可以满足的. 我们在分析的数据长度均大于 20 秒.

相关性与做相关分析的各子台间距的关系十分密切. 为了分析频率对相关性的影响, 先对固定的两个子台的原始记录做不同频段的带通滤波后, 求得此两子台间的记录在此频段的相关系数; 再由不同间距的各子台记录重复上述分析拟合出不同频段的相关系数随子台间距的变化曲线; 对于不同事件的记录, 如 03291311 记录、03250645 记录及 03280040 记录分别重复上述分析, 可以得到代表远震、近震及噪声振动

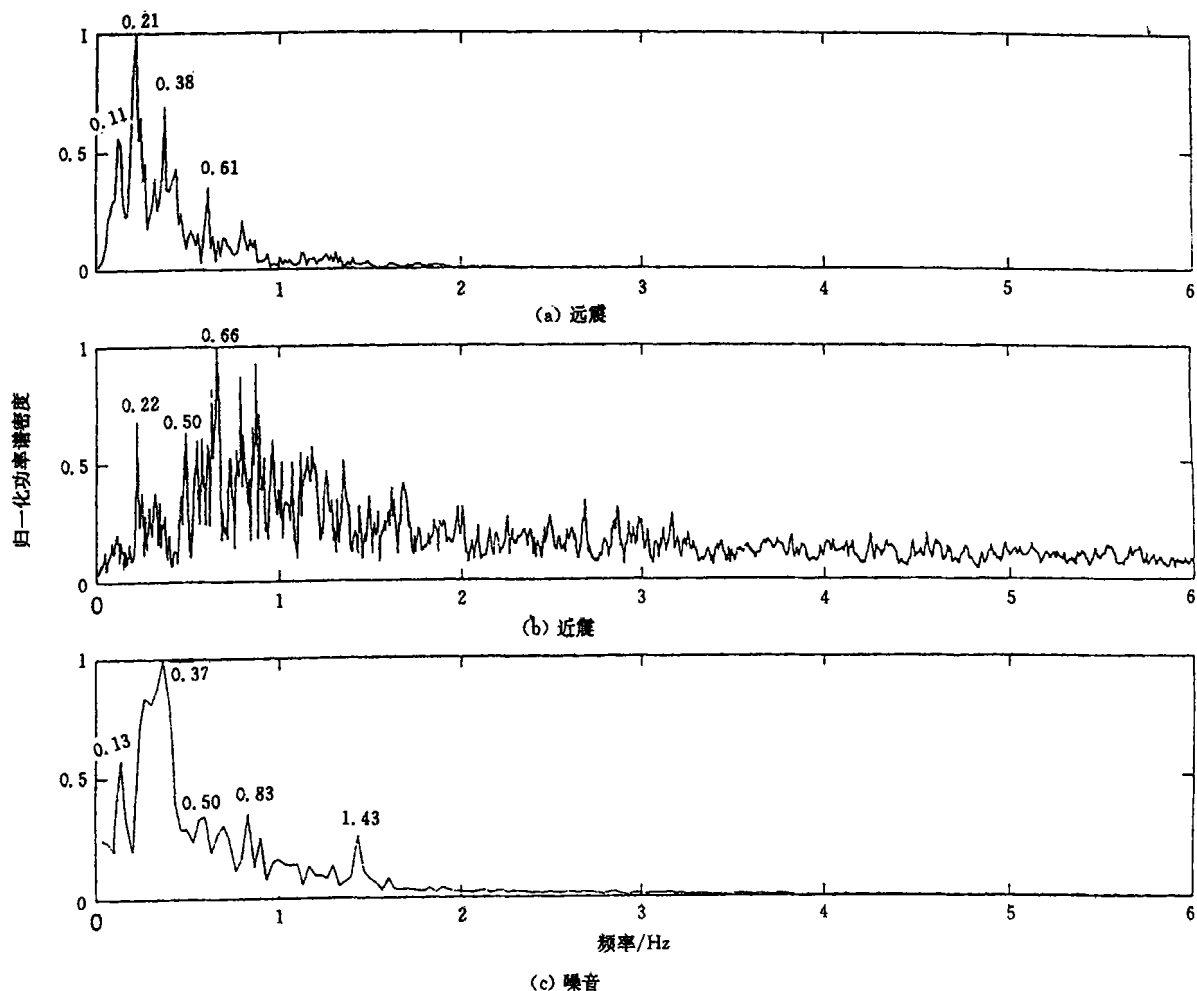


图 3 记录的归一化频谱图

Fig. 3 Unitary spectrums of the representative records.

各自的相关系数与频率-子台间距的关系图(图 5)。

从图 5 的各条相关系数曲线可以看出,随着子台间距的增大,相关系数以不同的方式减小;对于相同的子台间距,频率越低相关系数越高;对于同一子台间距、同一频率段而言,远部事件的相关系数高于近事件。地震台阵压制噪声提高信噪比的方法是波形聚束,在子台个数一定时信噪比的增益取决于子台间信号与噪声各自的相关系数。要想获得较好的台阵聚束效果,要求记录信号的相关系数很高,同时噪音相关系数很低。与通过滤波提高信噪比的方法完全不同,Wiener 最佳滤波窗是以信号与噪声的功率谱比值所得的,因此不能直接用作聚束前滤波的最佳频率通带。但是,各子台间的相关系数没有给出信号与噪声的能量(振幅)的分布特征,因此应将二者结合起来确定台阵聚束前的滤波方法。例如:对于 03250645 记录(近震),按 Wiener 最佳滤波窗函数图(图 4)所得的最佳频率通带是 f 大于 0.5 Hz,而噪声记录在此通带内的 0.51.0 Hz 的相关系数是比较高的(图 5);对于 03291311 记录(远震),按 Wiener 最佳滤波窗函数图(图 4)所得的最佳频率通带是 f 小于 3.8 Hz,而噪声记录的的相关系数在子台间距小于 0.5 公里时, f 小于 2 Hz 的相关系数仍是比较高的(图 5)。

噪音在 0.51.0 Hz 的相关系数随距离的变化非常缓慢,且均大于 0.8,说明该频率下所有噪音成分是不会被聚束的方法所压制的。噪音记录中频率大于 2.0 Hz,距离大于 450 米的相关系数远低于 0.2,这说

明噪音记录中频率大于 2.0 Hz 的成分通过聚束会有有效的被压制. 另外, 做相关分析所用的各频带很窄, 基本上以 1 Hz 为带宽(如 23 Hz), 而实际工作的带宽要比 1 Hz 大得多(25 Hz). 这样以 2 Hz 为低频截止, 就显得太保守, 我们选 1.5 Hz 做为低频截止; 远震 P 波信号频率小于 5 Hz, 子台间距小于 3.5 公里, 相关系数均大于 0.5, 结合远震的 Wiener 滤波函数要求频率小于 4 Hz, 我们得出适合于远震 Pn 震相聚束的频率为 1.5~4 Hz.

近震信号的相关系数显然不如远震. 可以看到, 当选 1.5 Hz 为低频截止后, 大于 1.0~2.0 Hz 频段的相关系数在当子台间距超过 0.5 km 后迅速降至 0.5 以下, 而且 3.0~4.0 Hz 的曲线与噪音记录的 3.0~4.0 Hz 相关曲线已很相似, 几乎接近于零, 但是为了有效抑制背景噪音, 我们仍然取 1.5 Hz 为聚束前的滤波的低频截止. 信号相关系数的降低, 必然导致

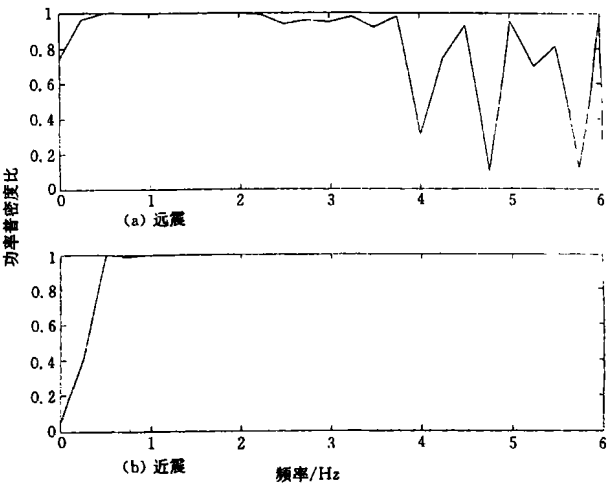


图 4 Wiener 最佳滤波窗函数图
Fig. 4 The wiener optimal band filters for far and near events.

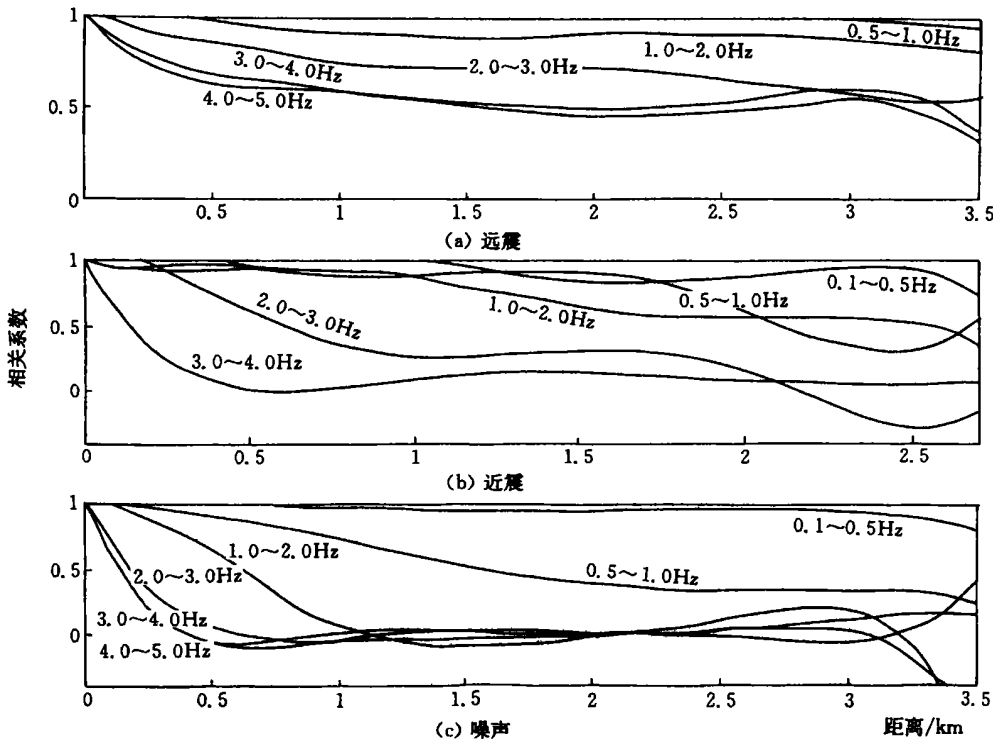


图 5 不同频带信号、噪音的相关系数
Fig. 5 Curves of correlation coefficient-distance between substations for signals with varying frequencies and noises.

聚束后信噪比的降低. 为了选取近震的高频截止, 以 0.5 Hz 为通带宽度对近震的各主要震相做聚束, 看不同的频率下信噪比的变化(图 6)(这里信噪比中的噪音是指同一记录中信号前的噪声背景). 由图可见, 聚束后的信噪比随频率的变化关系密切. 照顾到各震相都有好的增益, 频带取 1.57Hz 是比较合适的.

4 结论

(1) 上海佘山区域地震台阵阵址的噪音特征为: 噪声的卓越频率为 0.37 Hz, 幅值大约 $1.6 \mu\text{m/s}$; 在 0.83 Hz 出现次级的频率峰值, 振幅 $0.32 \mu\text{m/s}$ 左右. 近震事件的卓越频率远高于远震事件.

(2) 对于各类事件及噪声振动, 相关系数的共性是: 随着子台间距的增大, 相关系数减小; 对于相同的子台间距, 频率越低相关系数越高; 对于同一子台间距、同一频率段而言, 远部事件的相关系数高于近事件.

(3) 一维时间序列 Wiener 滤波函数, 不能直接作为二维台阵的最佳频率窗. 欲取得较好的聚束信噪比, 滤波函数不仅考虑压制噪音, 还要考虑抑制信号的非相关频段.

本文就建设我国第一个永久性地震台阵的基础研究中遇到的部分实际问题, 做了一些分析, 作者都是参加这项工作的同志. 由于我们的水平有限, 对台阵的认识也只是在积累之中, 文中出错也难免, 望读者指正.

在工作中, 中国地震局的刘启元研究员, 赵仲和研究员多次来现场指导, 特此致谢.

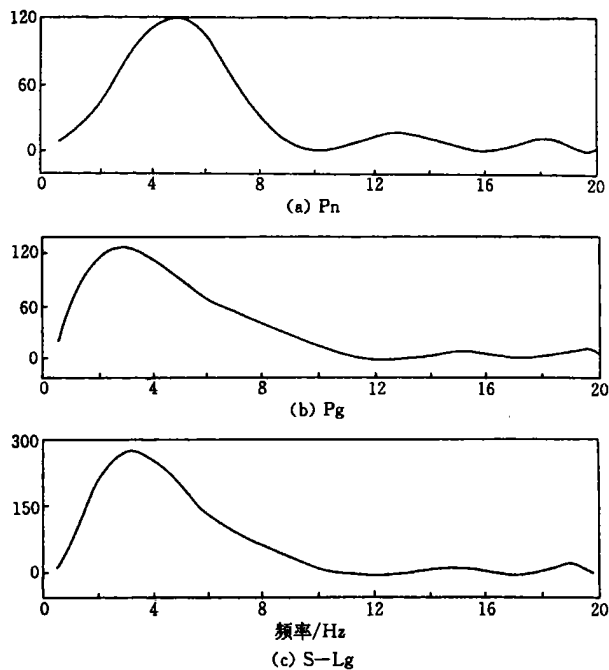


图6 近震各震相聚束后信噪比—频率关系

Fig. 6 Curves of SNR-frequency of Pn, Pg,

S-Lg phases after beam-forming.

[参考文献]

- [1] 国家地震局科技监测司. 地震观测技术[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [2] John P B. Three-dimensional filtering with an array of seismometers[J]. Geophysics 1964, 29(5): 693—713.

INFLUENCE OF THE WAVE FILTER AND THE DISTANCE BETWEEN SUBSTATIONS TO BEAM-FORM IN SEISMIC ARRAY (I)

—WAVE FILTER AND THE FEATURES OF CORRELATION

LIU Xu^{1,2}, ZHU Yan-qing³, TONG Yu-xia²

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Gansu Lanzhou 730000, China;

2. Institute of Geophysics, CSB, Beijing 100081, China;

3. Seismological Bureau of Shanghai, Shanghai 200062, China)

Abstract: On the base of the data of Sheshan seismic testing array in Shanghai, the features of frequency and amplitude of noise, near event and far event are studied. Some factors affecting correlation among the records of substations in the array are discussed. With the distance between substations getting longer, the correlation tend to be smaller; with the distance fixed, the correlation depends on single frequency, epicentral distance (angle of incidence), and the noise vibration. Wiener single-channel frequency filters are not best to use in filtering original data for beam-form. The filters would be designed not only to depress noise but also to keep the well correlated signals in order to beam-form better.

Key words: Seismic array; Wave filter; Correlation