

# 地震台阵滤波及子台分布对聚束效果的影响( II ) ——子台分布及聚束效果的分析

刘 旭<sup>1,3</sup>, 朱元清<sup>3</sup>, 佟玉霞<sup>2</sup>

( 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** 本文假设对于确定的相关系数及子台间距存在一个相干波长, 将不同频率、震中距的相关性变化的原因归纳为视波长的变化. 对近事件而言, 几乎不存在相关系数十分理想的子台间距的区间范围. 对非理想相关的台阵, 应用 S. Mykkeltveit 等介绍的增益公式来预测台阵的增益, 其效果与实际情况吻合的较好. 论述了区域台阵与侦察远处事件的台阵有诸多不同之处.

**关键词** 地震台阵; 台阵形状; 信噪比增益

中图分类号: P315.3<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2003)04-0293-05

## 0 前言

在本文的 I 部分(简称前文, 见文献 [1])中, 我们分析了影响台阵记录相关性质的一些主要因素及规律. 在此 II 部分中主要论述台阵的几何分布及记录的相关性质对台阵聚束后信噪比增益的影响. 同时分析影响台阵记录相关性的原因.

对于台阵而言, 不能单纯的追求信噪比(监测能力), 还必需考虑台阵的分辨能力和定位能力. 在很多情况下台阵的定位能力与高信噪比的要求是矛盾的. 不少人认为台阵记录经过简单的延时相加, 即使会使信噪比提高  $\sqrt{N}$  倍的增益( $N$  为子台个数). 我们认为在台阵尤其是区域台阵设计中, 不能轻易地使用上述方法, 因为该结论是有“各种假设条件的”<sup>[2]</sup>. 上述结论的前提是噪音为相互独立并符合高斯分布的随机噪音, 而信号必须是相关系数为 1 的完全相关信号, 而这个要求与实际经常不相符. 一方面近事件信号相关程度远低于远事件信号的相关性, 另一方面同一事件的信号其不同频带成分的相关性也不一样. 因此, 同一个台阵因为所聚束的事件不同, 其增益不同; 对同一事件的数据处理方法不同(如滤波), 其增益也不同. 可见评价台阵设计的优化与否是决非一两项指标所能概括的. 但是如果小孔径台阵对近事件记录的聚束可得到  $\sqrt{N}$  倍的增益, 由于远事件各子台间信号的相关性远好于近事件, 那么对远事件聚束后其增益必然超过  $\sqrt{N}$ . 子台空间坐标对聚束的影响主要由台阵响应图来反映, 本文暂不着重考虑台阵响应图与增益的关系, 也不考虑带有方向的速度滤波方法. 但是对台阵而言, 频率域的滤波参数与空间域的参数根本分不开, 本文对这些制约台阵聚束效果的因素也作了一些分析.

## 1 影响台阵波形聚束效果的一些原因的探讨

在同一频带中不同的事件(远、近)相关系数大不相同. 根据前文分析<sup>[1]</sup>, 我们假设两个距离为  $d$  的子台对于确定的相关系数值  $r$  存在一个确定的相干波长  $L_c(r, d)$ , 它可定义如下: 分别用波长不同的波水平穿过间距为  $d$  的两个子台, 计算相关系数; 当相关系数值为  $r$  时, 所对应的波长为相干波长. 如果波长不

变,由于入射波阵面与台阵所在平面的可存在夹角  $i$ ,导致视波长  $L_v(r)/\sin(i)$  大于相干波长,可导致相关系数高于  $r$ .也可理解为对于确定的相关系数值  $r$  子台间距大于  $d$ .例如:垂直入射的波(如:极远震)波阵面与水平的台阵面平行,台阵上的所有子台均处于同一相位,或认为视波长很大,则远震的相关性很好.如果频率很高,且入射的角度于地表接近平行,则视波长较短,当其低于相干波长时,相关性系数也低于  $r$ .可见相关性质取决于视波长.但这决不是说远震的高频截止可以取的很高,因为远震在高频带的信噪比衰减的更快.随着震中距逐渐缩小,入射角越来越大,同一震相、同一频率的‘视波长’也越来越短,加之近震的高频成分越来越丰富,这样近震信号的相关系数随子台间距的增加迅速下降,也就不难理解了.

同理可简单地讨论子台的排列方向对聚束效果的影响.当射线与台阵所在平面的夹角较小时,与射线相垂直的波阵面方向的视波长远大于射线方向的视波长,沿着平行于波阵面布设的子台记录有较好的相关性,其聚束效果也较好.这就提示我们子台的几何排列应尽量与所关心的目标方向垂直.

不同的事件有不同的最佳滤波函数,甚至同一事件不同的震相也可以不相同,并不存在统一的适合于所有近震的最佳滤波函数.若频带的低频截止取的过低,相关噪音不能被聚束所抑制;当高频截止取的过高,使信号的相关系数降低不仅导致聚束后信噪比增益降低,而且会导致  $f-k$  分析、慢度-方向分析结果的畸变.因此应根据研究目的选取不同的频带.针对近震我们建议先采用  $f = 1.5 \sim 7$  Hz 带通滤波作为聚束计算前的预处理.

无线电通讯理论关于天线阵的研究中<sup>[3]</sup>,激励电流的叠加方式与地震台阵的延时相加是很相似的.作者曾将地震台阵的台阵响应图计算公式中的波数矢量代换成方位角及频率和相位,结果该公式与天线阵理论的方向图计算公式完全一致.天线阵方向图的计算结果表明相邻天线元的点距  $d$  必需低于半个波长  $\lambda$ ,否则天线方向图的边瓣会与主瓣齐高,天线阵就无法辨认有效信号.同理,地震台阵子台间距  $d$  大于半个波长,台阵响应图的主瓣会与旁瓣齐高,台阵无法得到理想的聚束效果.据此,由于波速  $v = \lambda f$ ,可以得出  $f < v/(2d)$ ,即便使射线水平入射,视波长与波长相等,那么地震波视速度最快的是 P 波约 7 km/s,实验台阵的  $d$  约 0.5 km,得出  $f < 7$  Hz,与前文所述的试验结果相符.这样可对那些震相不清晰的微弱近事件也不失优化性.当然,不同的台阵,不同的噪音背景,要做相应变动.

## 2 相关性对台阵几何分布的制约

接文献[2]“所谓‘聚束’就是按给定的视慢度矢量,利用简单或加权延时相加或其他合成方法形成一个合成信号”.该定义中的‘延时’显然是指视慢度矢量与台阵子台的对坐标矢量的点积.可见所选取的视慢度不同,各子台记录的延时也随之不同.在进行扫描聚束<sup>[2]</sup>时,对一具体的同源事件的某一震相只能有一个视慢度使聚束的效果最好,对噪音的压制最有效.也就是说该视慢度矢量所对应的延时  $\tau$  将各子台记录的同一震相对齐了,此时的相关系数为最大值,经聚束计算得出的增益代表了台阵对此事件的聚束能力.

台阵的几何形状及子台个数同样影响台阵的聚束能力.不同事件的信号及噪音振动的相关性的差异决定了台阵的几何形状及孔径的大小,这主要是因为不同震中距的事件在各子台间记录的相关性随子台间距的变化表现出不同的规律.因此,建设台阵的目的是针对近事件还是远事件,设计是遵循不同的方案.

Followill 等提出的同心圆环型台阵的优化设计方案<sup>[4,5]</sup>:

$$R = R_{im} \cdot a^n \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

式中  $R_{im}$  为内环半径; $R$  为各环半径; $a$  为一待定参数;各环上的子台个数为 3, 5, 7 等.

在前文中我们分析了适合于近事件台阵聚束的频率为 1.5 ~ 7 Hz.在此频带远震、近震、噪音的相关性随子台间距的关系见图 1.图中近震曲线是包含了 P、S、Lg 震相的相关系数.从这两张图非常清晰的看出,如果按常规的同心圆形状的台阵观察远事件,取内环半径为 0.7 km,外环半径还可大于 3.5 km.噪音与远震曲线在这两个半径区间内,噪音相关系数远小于 0.2,而信号相关系数大于 0.9,是理想的相关区间.但对于近震  $r$  随着子台间距的增大迅速下降,几乎不存在理想的相关区间(信号的  $r < 0.9$ ,噪音  $r <$

0.2)。这决定了设计近事件的区域台阵及资料分析与针对远事件的台阵有诸多不同之处。实际上,国外有不少形状各异的台阵,如“L”型,“十”型等,只要它们侦察远处事件,那么台阵记录的信号就会有很好的相关性,聚束后增益达到或超过 $\sqrt{N}$ 是完全可能的。

### 3 非理性相关性台阵记录的增益计算与实例

我们对 03250645 的近震记录做 0.5 ~ 7 Hz 带通滤波,再用文献 [2] 介绍的方法做聚束分析,觉得效果不理想,甚至找不到一个明显的慢度使得聚束的信噪比非常高,估计近震记录的非相关的高频成分、台阵下部岩性不均匀及台阵各子台不在水平面上均会使聚束效果受到影响。我们采取了另一种方法:选取一个子台为参考台,其余各子台所记录均对参考台做互相关分析,直接用互相关函数的最大值点作为各子台的延时,进行延时相加,我们称其为“互相关聚束”法。这种方法的使用条件要求记录本身的信噪比较高,滤波的通带低于 7 Hz,否则互相关函数没有明显的主峰。但该方法的好处是计算速度快;另外,由于各子台的延时均是各自对于参考台计算出来的,可反映台阵下部岩性不均匀的信息。

为了分析地震信号中各频率成分对聚束的影响,我们对 03250645 的近震记录在 0.5 ~ 20 Hz 频带内,以 0.5 Hz 为带通间隔做各通带的滤波,并对每个频率通带的滤波结果做相关聚束,得出信噪比增益随频率的变化(图 2)。很明显,当频率大于 7 Hz 时增益迅速降低。同理作 03291311 远震的聚束后的信噪比增益(图 2),当频率大于 3.5 Hz 时增益迅速降低。这与上述分析是一致的。

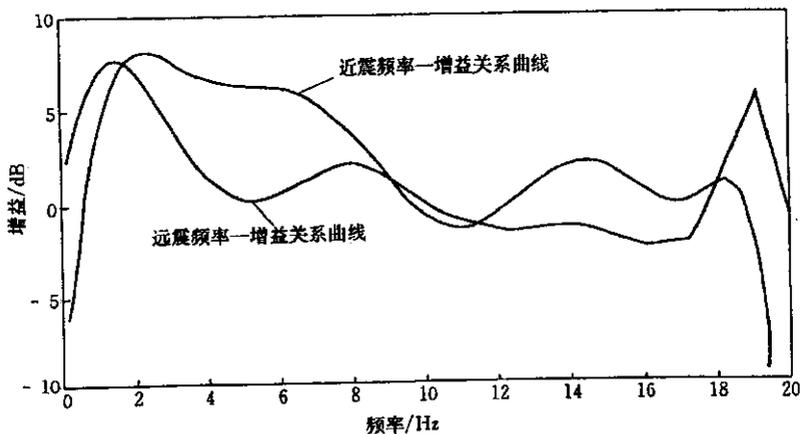


图 2 频率与增益的关系

Fig.2 Relationship between signal-noise ratio gains and frequencies.

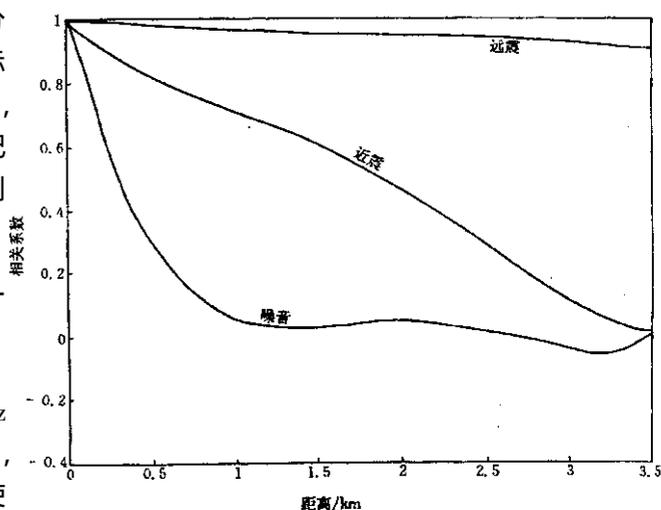


图 1 1.5 ~ 7.0 Hz 带通远震、近震、噪声的相关系数—子台间距

Fig.1 Relationship between correlation coefficients of the records in 1.5 ~ 7.0 Hz band pass and distances among substations.

文献 [6] 介绍了计算台阵延时相加信噪比的增益公式:

$$G^2 = \frac{1 + (N - 1) \cdot \bar{c}}{1 + (N - 1) \cdot \bar{\rho}}$$

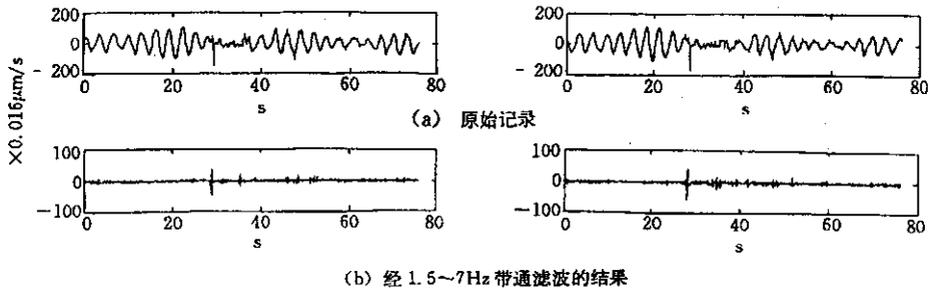


图3 03262235 近震事件原始记录及滤波结果

Fig.3 Original and 1.5~7.0 Hz band filter data of near event 03262235.

式中  $\bar{c}$   $\bar{\rho}$  分别为信号、噪音的平均相关系数;  $N$  为子台个数. 可用此公式预测具体台阵及滤波频带的聚束后信噪比的增益. 即由进行聚束的各子台相对于参考子台的相对距离, 在相关系数距离曲线上读取信号及噪音的相关系数, 分别求得  $\bar{c}$   $\bar{\rho}$ , 代入上式求得增益  $G$ . 应当注意, 不同的震中距相关系数曲线是不同的, 计算增益时应尽量选用相近的震中距所对应的关系系数曲线. 本文只计算了 03250645 事件的相关系数曲线, 震中距约为 340 km. 很明显,  $G$  式没有讨论台阵的方向性问题, 但它毕竟给出了不规则形状台阵的增益的估计方法.

试验台阵记录的 03262235 事件, 是几乎淹没在脉动噪音中的微弱事件, 原始记录见图 3 (a). 该事件所有 16 个子台均有记录, 可粗略看出事件的频率远高于脉动的频率. 该事件的震中距约为 270 km, 与图 1 中的近震事件的震中距相近. 仍采用 1.5~7 Hz 带通滤波后, 震相很清晰, 平均信噪比 22.4 (图 3(b)). 从台阵中选取编号为 1、2、5、6、7、8、10、13、14 的子台组合成 1 号子台阵, 平均信噪比为 21.46, 按  $G$  式及图 1 中曲线理论计算增益为 3.00; 实际聚束后的信噪比为 59.9, 增益为 2.87 (图 4(a)). 选取编号 2、3、4、5、6、7、8、9、14 的子台组合成 2 号子台阵, 平均信噪比为 19.1, 计算增益为 2.47; 实际的聚束后的信噪比为 50.93, 增益为 2.66 (图 4(b)). 理论值和实际值还算接近. 考虑到图 1 是统计的结果, 因试验台阵记录到的能有清晰近震震相的记录太少, 仅 30 多个样本. 可见这种方法还是比较有效的, 也是不规则台阵设计与资料处理的重要依据.

### 4 结论

对于间距一定的子台, 对于一相关系数值  $r$  存在一个相干波长, 子台记录的相关性随视波长的增大而增大. 对于近震而言, 频率增大使视波长小于相干波长时, 不存在远震那样理想的信号相关的区间, 因此也

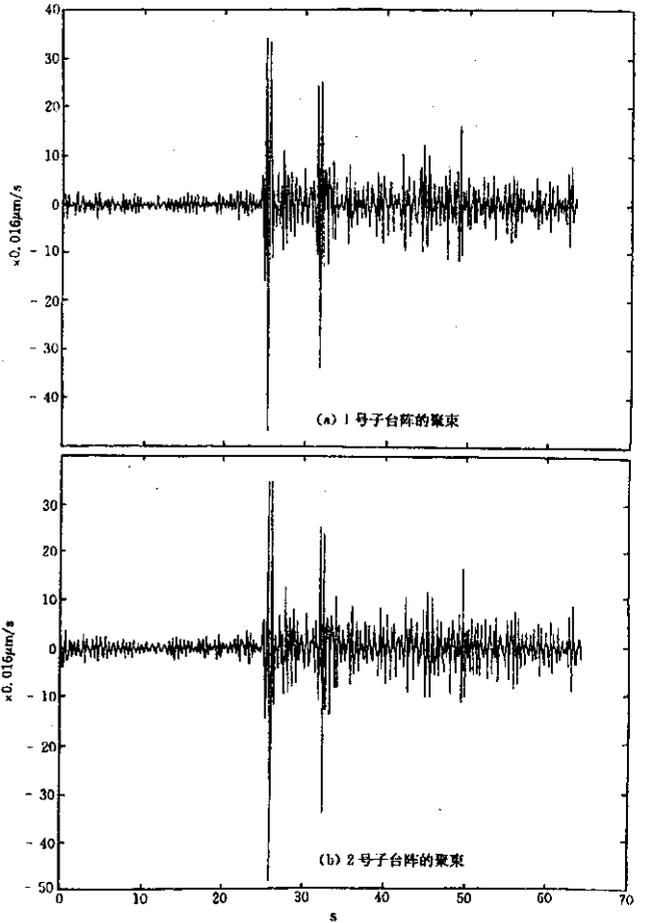


图4 03262235 事件 1 号、2 号子台阵的相关聚束

Fig.4 Beam-forms of near event 03262235 in sub-arrays 1 and 2.

不能直接用常规的确定内外环半径的办法来设计区域小孔径台阵. 具体的滤波函数应与台阵的监测目的联系起来. 对非环型、非规则的台阵, 可应用 S. Mykkeltveit 等介绍的增益公式, 预测台阵的理论增益.

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作了一些分析, 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.

### [ 参考文献 ]

- [ 1 ] 刘旭, 朱元清, 佟玉霞. 地震台阵滤波及子台分布对聚束效果的影响 [ J ]. 西北地震学报, 2003, 25( 2 ) : 97—102.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] 康行健. 天线原理与设计 [ M ]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [ 4 ] S Mykkeltveit etc. . Application of Regional Arrays in Seismic verification [ J ]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1990, 80( 6 ) : 1777—1800.
- [ 5 ] Hans-peter Harjes. Design and Siting of a new regional array in Central Europe [ J ]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1990, 80( 6 ) : 1801—1817.
- [ 6 ] S Mykkeltveit etc. . Seismic array configuration optimization [ J ]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73( 1 ) : 173—186.

## INFLUENCE OF THE WAVE FILTER AND THE DISTANCE AMONG SUBSTATIONS TO BEAM-FORM IN SEISMIC ARRAY ( II ) ——ANALYSIS ON BEAM-FORM EFFECT AND CONFIGURATION OF ARRAY

LIU Xu<sup>1,3</sup>, ZHU Yuan-qing<sup>3</sup>, TONG Yu-xia<sup>2</sup>

( 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 hypothesis that for a given correlation coefficient and a distance between two substations, there will be a referent correlative wavelength, and all the changes of correlation caused by frequency and epicentral distance can be regarded as changes of the apparent wavelength. For near events, there are no ideal correlation coverage of the distances among substations. In the case, using the gain formula reported by S. Mykkeltveit etc. to forecast signal-noise ratio gain of beam-form is proposed, without restriction on array configuration. The method appears to fit for our data. Some differences between a regional array and for far event one are discussed.

**Key words** Seismic array ; Array configuration ; Signal-noise ratio gain