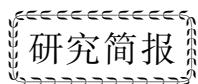


文章编号: 0253-3782(2001)01-0098-05



上海地震台阵的波数响应^{*}

佟玉霞 朱元清

(中国上海 200062 上海市地震局)

关键词 地震台阵 波数响应 子台布局建模

中图分类号: P315.63 文献标识码: A

地震台阵的历史起始于 50 年代末, 当时其目标主要是检测、区别核爆炸信号和地震信号。地震台阵研究包括地震台阵技术研究和地球物理学中应用研究。其中台阵技术研究可以分为台阵建设和数据处理方法研究两大部分(Anne, 1990), 地震台阵理论研究的发展可涉及到地球物理学领域的许多科学问题(Tormod, 1989; Mykkeltveit, Bungum, 1984)。

台阵主要用于监测微弱事件, 而台阵的响应特性是衡量台阵对微弱事件监测能力的一个很重要标志, 因此, 不论是考察一个台阵, 还是要着手建立一个台阵, 必做的内容之一就是计算台阵的响应特性(Harjes, 1990)。

台阵的两个主要几何特征是台阵的孔径和台阵的布局。国际上典型台阵的孔径一般为几十公里到几公里, 比如孔径达几十公里的 KSA, WRA, YKA 等台阵; 孔径为几公里的 ARC, FIN, GER 等台阵。从台阵布局上看, 圆形布局的有 NOR, GER 等台阵, 十字交叉布局的有 WRA, YKA 等台阵。

本文主要讨论台阵布局和波数响应的关系, 并结合上海地震台阵建设的技术要求, 寻找最佳台阵布局, 特别是不规则台阵布局设计。本研究采用简单延时相加技术来计算台阵的响应特性。应该指出, 不同处理方法得到的台阵响应特性相对于简单延时相加技术所得的结果会有所不同, 但简单延时相加的台阵响应特性已经足以反映一个台阵的性能。

1 理论思路

以可变的台阵参数建立不同的台阵模型, 从而分析台阵模型的波数响应特性, 同时, 结合所选区域地动信号特性、当地地动噪声特性的波数-频率域和慢度-时间域分析结果, 选出最佳台阵设计, 使台阵在抑制地震噪声和提高监测地震信号的灵敏度方面有最佳效果。对上海地震台阵, 由于受到地形及地质条件的限制, 上海地震台阵设计的目标是确定一种最多由 16 个子台组成、最大孔径约 3 km 的最佳台阵分布。

台阵的监测能力, 用它的接受图象来描述, 称为波数响应, 可用它来度量台阵记录到的地震信号的能量大小。能量与波数和方位有关。在给定约束条件下, 波数响应可以分辨率、抑制带的宽度和幅值、侧峰的出现情况来定义该台阵的波数滤波器特性。避免波数混叠是台阵的基本原理(国家地震局科技监测司, 1995)。

波数响应可以下式描述(安艺敬一, 理查兹, 1986):

* 2000-04-03 收到初稿, 2000-11-17 收到修改稿, 2000-12-08 决定采用。

设 \mathbf{k}_0 为波数矢量原点, \mathbf{k}_l 为波数矢量, 则

$$A(\omega, \mathbf{k}_l - \mathbf{k}_0) = \frac{1}{N^2} \sum_{I, J=1}^N \exp\{(-ik_{x_I} + ik_{x_0})(x_I - x_J) - \\ [(-ik_{y_I} + ik_{y_0})(y_I - y_J)] + i\omega(\tau_I - \tau_J)\} \quad (1)$$

其中, N 为台阵子台数目, 脚标为子台编号; $I, J=1, 2, \dots, N$; i 是虚数, (x_I, y_I) 为第 I 号子台的位置坐标; k_x, k_y 分别为波数在 x 轴、 y 轴上的分量, ω 为圆频率. 而 $i\omega(\tau_I - \tau_J)$ 项为台阵子台校正, 用于校正台阵下方介质的不均匀性. 上海地震台阵建于佘山, 台阵下方为较完整安山岩. 考虑到介质结构较均匀, 可忽略此项. 则式(1)为

$$A(\omega, \mathbf{k}_l - \mathbf{k}_0) = \frac{1}{N^2} \sum_{I, J=1}^N \exp\{(-ik_{x_I} + ik_{x_0})(x_I - x_J) - \\ [(-ik_{y_I} + ik_{y_0})(y_I - y_J)]\} \quad (2)$$

令

$$\mathbf{S} = 2\pi\mathbf{k}/\omega \quad (3)$$

其中, \mathbf{S}, \mathbf{k} 分别为慢度矢量和波数矢量.

将式(3)代入式(2), 可由波数域转换至视慢度域.

$$A(\omega, \mathbf{S}_l - \mathbf{S}_0) = \frac{1}{N^2} \sum_{I, J=1}^N \exp\{(-ik_{x_I} + ik_{x_0})(x_I - x_J) - \\ [(-ik_{y_I} + ik_{y_0})(y_I - y_J)]\} \quad (4)$$

对式(2)、式(4)取模, 即是台阵波数的振幅响应. 当 $\mathbf{k}_l = \mathbf{k}_0$ 时, $A(\omega, \mathbf{k}_l - \mathbf{k}_0) = A(\omega, 0) = 1$. 由此可知, 不同的 \mathbf{k}_0 值, 仅导致台阵响应图的顶点位置不同, 即整个分布图在波数空间平移. 选取 \mathbf{k}_0 为 0, 由式(3)得出, \mathbf{S}_0 为 0, 为地震波垂直于地平面入射的情况.

则有

$$A(\omega, \mathbf{k}_l) = \frac{1}{N^2} \sum_{I, J=1}^N \exp\{-ik_x(x_I - x_J) - [-ik_y(y_I - y_J)]\} \quad (5)$$

$$A(\omega, \mathbf{S}_l) = \frac{1}{N^2} \sum_{I, J=1}^N \exp\{-ik_x(x_I - x_J) - [-ik_y(y_I - y_J)]\} \quad (6)$$

习惯上, 可用分贝来描述台阵响应的峰值变化, 令

$$\beta(\mathbf{k}) = \beta(k_x, k_y) = 20 \lg \frac{A(\mathbf{k})}{A(0)} = 20 \lg A(k_x, k_y)$$

其中, β 单位为分贝(dB)

显然, 当 $\mathbf{S}_l = \mathbf{S}_0$ 时, 对不同频率的信号都有 $\mathbf{k}_l = \mathbf{k}_0$, 波数响应输出为峰值; 当 $\mathbf{S}_l \neq \mathbf{S}_0$ 时, 不同频率的信号就会偏离主峰, 而被衰减. 如果台阵的波数响应图中, 主峰高而且尖, 侧峰少而且低, 说明该台阵的波数分辨力高, 台阵模型设计合理.

2 规则及不规则台阵的波数响应分析

为讨论不同台阵布局的波数响应特性, 分别对规则及不规则台阵进行了计算.

2.1 规则台阵

(1) 环形台阵. 将子台分布于若干同心圆环上. 台阵子台分布及波数响应结果见图 1. 图 1 表明, 此布局的波数响应对不同方位有较一致的性能, 可用于各个方向微弱事件的监测, 并便于台阵数据处理. 所以在现有的台阵中, 这种布局占多数(Tormod, 1989).

(2) 正交型台阵. 子台布局呈正交型. 台阵子台分布及波数响应结果见图 2. 图 2 表明, 此布局在不同方位上性能差别较大.

(3) 混合型台阵. 将正交型台阵及环形台阵结合起来考虑, 即为混合型台阵模型. 台阵子台分布及波

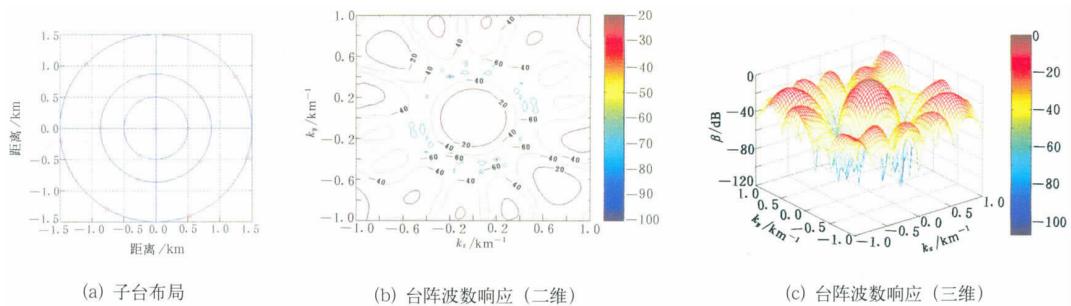


图 1 环形台阵子台分布及波数响应

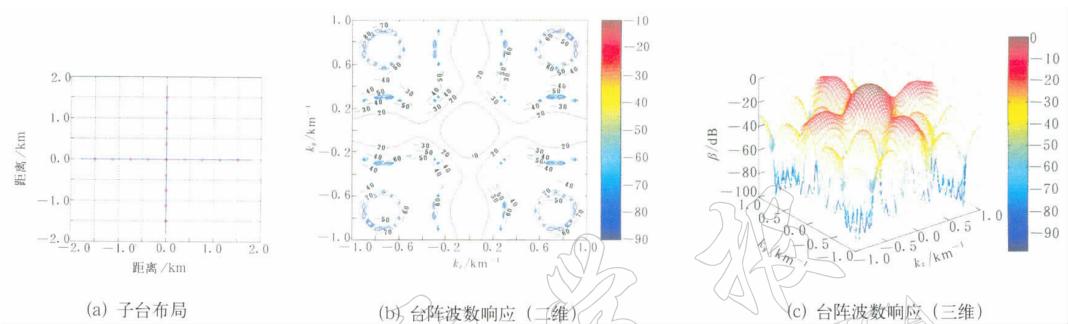


图 2 正交型台阵子台分布及波数响应

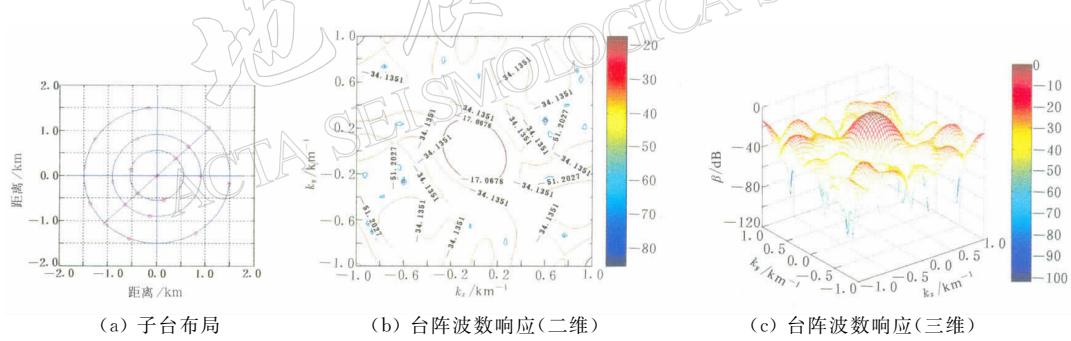


图 3 混合型台阵子台分布及波数响应

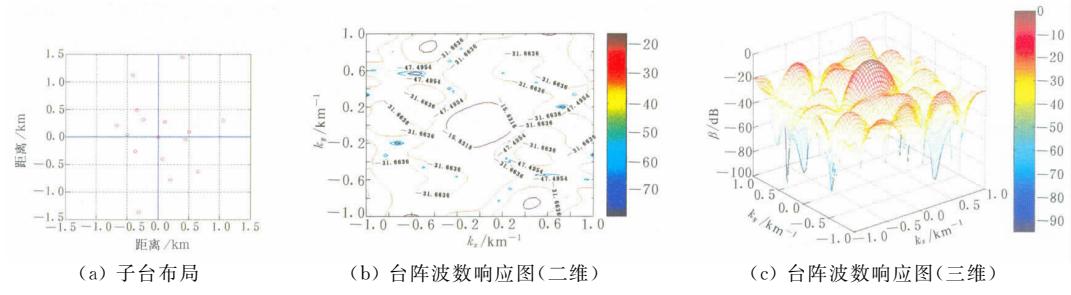


图 4 不规则台阵子台分布及波数响应

数响应结果见图 3.

图 3 表明, 此布局对不同方位有不完全一致的性能. 但波数响应显示了其特性良好, 有高而尖的主峰(或称之为瓣), 边瓣少而且低. 说明此台阵的波数分辨率高, 且某一方位敏感, 可监测此方向的极微弱事件.

2.2 不规则台阵

子台布局呈不规则分布. 利用网格节点选取子台位置的方法, 在生成的不规则台阵中, 选用一例.

台阵子台分布及波数响应结果见图 4. 图 4 表明, 此布局对不同方位有不完全一致的性能, 主瓣突出, 边瓣少且低. 不同布局的不规则台阵的波数响应分析表明, 子台分布的不同, 其不同方位的特性也不同. 由此可知, 不规则台阵同样可得到较合理的台阵波数响应.



图 5 上海台阵预选布局

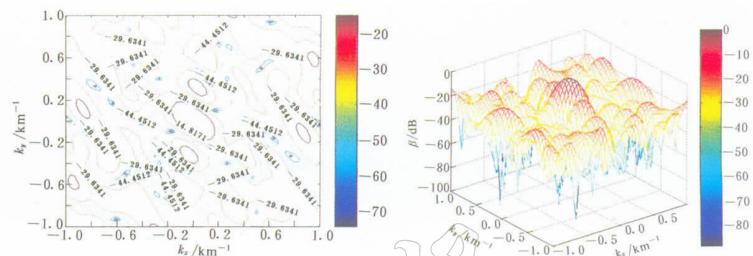


图 6 (a) 台阵波数响应(二维)

(b) 台阵波数响应(三维)

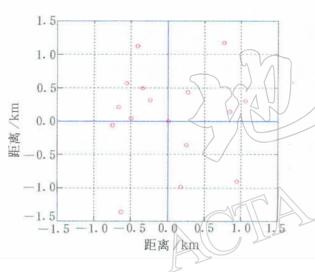
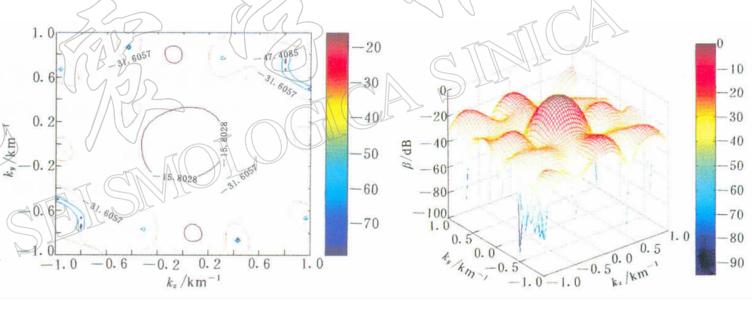


图 7 (a) 子台布局



(b) 台阵波数响应(二维)

(c) 台阵波数响应(三维)

3 对上海地震局的预选台阵布局方案的波数响应分析

在上海地震台阵布局设计中, 首先从确定的各种可能布局方案(该方案考虑实际地质及其它人为条件), 选出 16, 25 个子台等不同数目、不同布局的组合, 做出台阵响应图. 结果表明, 随着子台个数的增加, 响应图的主瓣越来越突出, 且随着子台间距的减少, 主瓣越来越突出, 但是, 随着主瓣的突出, 主瓣所能覆盖的波数范围在减少, 因此, 在合理地选择台阵布局时, 需同时考虑监测能力与定位能力两个方面.

由于上海地震台阵受佘山阵址基岩出露情况的限制, 所有台阵波数响应的主瓣方向基本指向东面海域.

以台阵响应图上 10 dB 的等值线来看, 当子台个数分别为 16 和 25 时, 指向南黄海的波数范围为 $-0.15 \sim -0.171/\text{km} < k_x < 0.15 \sim 0.171/\text{km}$, $-0.125 \sim -0.141/\text{km} < k_y < 0.25 \sim 0.141/\text{km}$. 指向舟山群岛方向(东南方向)的波数范围是: $-0.30 \sim -0.351/\text{km} < k_x < 0.35 \sim 0.351/\text{km}$, $-0.17 \sim -0.191/\text{km} < k_y < 0.17 \sim 0.191/\text{km}$.

虽然, 指向东南方向波数范围高于东北方向, 但是客观上, 佘山台阵周围的东南方向或西北方向已

无出露的基岩可用。

经过分析研究，基本确定了上海拟建地震台阵布局(图 5)。波数响应结果见图 6。图 6 表明，该布局对不同方位有不同的性能，有明显的主瓣，边瓣少且侧峰峰值不是很高。其敏感方位为东北方向，基本指向东面海域。

4 建立模型以期得到最佳台阵结构布局

(1) 理论思想。在所要布设台阵的区域以 $50m \times 50m$ 网格化，以网格的各节点的不同组合来建模。子台数目为一可变参数，由计算机输入值确定；以网格节点生成子台位置，形成不同的子台布局模型。

(2) 程序结果同时给出子台分布图及相应波数响应。现列出其中的一个结果(图 7)。图 7 表明，该布局为不规则台阵，对不同方位有较一致的性能。有相对突出的主瓣，边瓣较少。

(3) 此方法的实际应用。在实际应用中，首先拟定建设台阵的区域并进行实际考察，然后给出限制条件，同时也可就建设台阵的目的，再加以一定的约束条件。例如，由于地形及具体条件的限制，及所建台阵对某一方位性能的特殊要求等，可减少模型参数的自由度。根据不同建模得到的波数响应图，确定最佳的台阵设计方案。上海拟建台阵运用该方法，并以当地实际情况及建台目的(重点监视东面海域)加以约束，在生成的模型中选取最佳布局。

5 结论

本文着重研究了台阵布局和波数响应的关系，并以此为根据，设计了上海台阵。阐述了如何利用波数响应进行模型计算，为研究最佳台阵设计提供了可行的科学途径。

研究结果表明，台阵的性能并不完全取决于规则性布局与不规则性布局；对于不规则布局台阵，只要子台间距选取恰当，也可得到较好波数响应特性和聚束效果。台阵的孔径大小与台阵波数响应的主峰大小成反比；而台阵的子台数目越多，其响应特性主峰就越尖锐。

设计台阵时，还要综合考虑地震信号与噪声干扰的波长以及视速度等，选择合适的台阵参数，并在建立和确定台阵布局时，对台阵拟建区域进行地震实际观测和数据分析。

参 考 文 献

- 安艺敬一, 理查兹 P G. 1986. 定量地震学(第二卷)[M]. 北京: 地震出版社, 59~77
- 国家地震局科技监测司. 1995. 地震观测技术[M]. 北京: 地震出版社, 220~235
- Anne S H. 1990. Estimating azimuth and slowness from three component and array stations[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **80**(6): 1 987~1 998
- Harjes H P. 1990. Design and siting of a new regional array in central Europe. *Bull Seism Soc Amer*, **80**(6): 1 801~1 817
- Mykkeltveit S, Bungum H. 1984. Processing of regional seismic events using data from small-aperture arrays[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **74**(6): 2 313~2 333
- Tormod K. 1989. On exploitation of small-aperture Noress type arrays for enhanced P-wave detectability[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **79**(3): 888~990

WAVENUMBER RESPONSE OF SHANGHAI SEISMIC ARRAY

Tong Yuxia Zhu Yuanqing

(Seismological Bureau of Shanghai, Shanghai 200062, China)

Key words: seismic array; wavenumber response; modeling of array design