

# 和田台阵子台相关性分析与布局设计\*

段天山<sup>1</sup>, 范广超<sup>2</sup>

(1. 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011; 2. 西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘要:**介绍了新疆和田地震台阵勘址数据处理过程中, 候选台址子台噪声和信号相关性分析的结果, 并在相关性分析结果的基础上, 给出和田台阵子台的最终布局设计方案。

**关键词:**和田台阵; 子台布局; 相关性分析; 布局设计

**中图分类号:** P315.78

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2009)04-0409-06

## 0 引言

根据中国地震局地震监测规划, “十五”期间在新疆和田建设区域数字地震台阵, 以提高地震监测能力, 满足服务地震科学研究的需求。按照台阵建设的要求, 新疆地震局于2005~2006年期间对和田台阵场地组织了多次勘选, 在初勘选工作基础上, 2006年6月对皮牙曼背斜西北部和和田台阵场地进行了现场观测, 观测的主要目的包括了解掌握该场址本底噪声、噪声与信号相关性、台址监测能力等台阵设计的要素, 并在此基础上给出和田台阵设计与建设方案。

在段天山等(2009)台阵台址本底噪声分析和监测能力初步评估的基础上, 本文主要论述台阵勘址过程中各子台噪声和信号的相关特性。

## 1 分析方法

为阐述信号相关性分析的方法, 先简单介绍一下地震台阵通过聚束来提高信号信噪比的基本原理和方法(郑南宁, 1991)。设有 $N$ 个子台的台阵, 第 $k$ 个子台的坐标为 $\mathbf{x}_k = (x_k, y_k)$ 。设该子台的记录为

$$r_k(t) = s_k(t) + n_k(t). \quad (1)$$

其中 $s_k(t)$ 为信号在第 $k$ 个子台上的实际记录,  $n_k(t)$ 为该子台上的本底噪声。假定所有子台都在同一个水平面内, 并把信号看作是以后方位角 $\alpha$

(backazimuth, 即从台站到震中的方位角)及水平方向的视速度 $c$ 传播的平面波。假定在信号通过台阵时波形不发生变化, 则

$$s_k(t) = s_0\left(t + \frac{x_k \cos \alpha + y_k \sin \alpha}{c}\right) = s_0(t + \mathbf{p} \cdot \mathbf{x}_k). \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{p} = (p_x, p_y) = \frac{1}{c}(\cos \alpha, \sin \alpha) \quad (3)$$

为信号的慢度矢量, 它不但可以初步定位, 其大小也是判断信号震相类型的重要指标。

所谓聚束就是根据信号的实际慢度矢量对各个子台上的信号进行偏移叠加, 以提高信号的信噪比。聚束后的输出为

$$\begin{aligned} a(t) &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} r_k(t - \mathbf{p} \cdot \mathbf{x}_k) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k(t - \mathbf{p} \cdot \mathbf{x}_k) + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} n_k(t - \mathbf{p} \cdot \mathbf{x}_k). \end{aligned} \quad (4)$$

从上式可以看出, 假定信号在通过台阵时其波形保持不变, 同时各个子台上的噪声是互不相关的, 则聚束后信号幅值保持不变, 而噪声的幅值则因为相互抵消而被削弱, 从而达到提高信号信噪比的目的。对实际记录来说, 台阵增益与不同子台间信号与信号的相关系数和噪声与噪声的相关系数有关, 具体大小为

$$G^2 = \frac{\sum_{i,j} C_{ij}^s}{\sum_{i,j} C_{ij}^n}. \quad (5)$$

其中  $C_{ij}^s$  为信号相关系数, 而  $C_{ij}^n$  为噪声相关系数, 理想情况下  $C_{ij}^s=1$ ,  $C_{ij}^n=\delta_{ij}$ , 从而  $G=\sqrt{N}$ , 即台阵增益和台阵子台数目的平方根成正比。

基于上述原理, 分别按以下两种不同思路来对本底噪声和信号的相关性进行分析。

(1) 在无信号的情况下, 为获得对本底噪声相关系数的总体认识, 分析时任意选定不含信号的本底噪声记录。按指定的频带用 Butterworth 三阶滤波器对所有子台上的记录进行滤波。由于记录中并不包含信号, 为模拟有信号到达时的情况, 假定物理上可能的信号慢度矢量  $\mathbf{p}$ , 并按  $\delta t_k = \mathbf{p} \cdot \mathbf{x}_k$  将各个子台的记录做时间偏移, 然后将记录分成相互重叠长度一定的时间窗, 计算每个窗口内每两个子台之间的本底噪声相关系数。

(2) 在有信号的情况下, 计算每两个子台的信号记录之间的相关系数和相对时间延迟之间的关系。取相关系数的最大值作为这两个子台所记录的信号之间的相关系数, 将信号在这两个子台上的到时差相对于时间作延迟, 并在保持相同的相对时间延迟的情况下计算信号前面的本底噪声之间的相关系数。为检验这样确定的时间延迟是否为信号传播所引起的, 将测量的时间延迟和子台之间的相对位置矢量做回归分析, 根据 (2) 式, 两者之间的关系为

$$\begin{aligned} \delta t_{ij} &= t_j - t_i = -p_x(x_j - x_i) + p_y(y_j - y_i) \\ &= -\mathbf{p} \cdot (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i). \end{aligned} \tag{6}$$

即信号的相对到时差和子台的相对位置矢量在信号传播方向上的投影之间呈线性关系。因此, 利用这一关系, 一方面可以直接计算信号的慢度矢量, 另一方面可以利用实际测量的信号到时差和子台相对位置之间的线性相关程度或拟合误差来检验各个子台上的信号是否真正对齐, 以保证计算得到的信号相关系数确实和式 (5) 所要求的相关系数相一致。

2 本底噪声相关性

根据上节介绍的方法, 噪声处理过程参考了 Peterson (1993) 计算地球噪声模型的方法, 我们计算了 0.1 ~ 1 Hz、0.5 ~ 1.5 Hz、1 ~ 2 Hz、2 ~ 4 Hz 和 4 ~ 8 Hz 共 5 个频带内的本底噪声相关系数和子台间距之间的关系。

分析结果表明, 对频率 1 Hz 以下的本底噪声, 其相关系数随子台间距的增大而缓慢下降, 在子台间距 3 000 m 范围内, 0.1 ~ 1.0 Hz 和 0.5 ~ 1.5 Hz 频带平均相关系数基本上仍保持在 0.4 或 0.2 以上。随着频率的加大, 噪声相关系数随子台间距增大时的衰减速度明显增加。对 1 ~ 2 Hz 和 2 ~ 4 Hz 的噪声, 当子台间距增加到 500 m 时其平均的相关系数降到了 0.25 以下。而 4 ~ 8 Hz 本底噪声对应的相关距离比 2 ~ 4 Hz 记录的相关距离又有进一步的缩小, 约为 200 m, 平均相关系数也不超过 0.25。图 1 为 2 ~ 4 Hz 范围内的子台间距与噪声相关系数关系图。

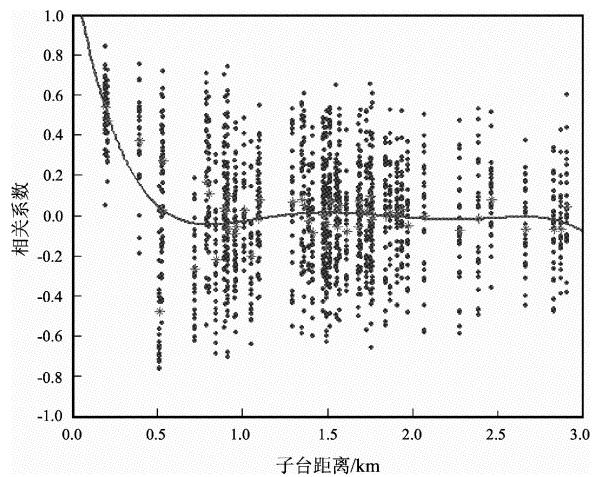


图 1 2 ~ 4 Hz 频带的子台间距与噪声相关系数的关系图

(图中红色的星点代表同一距离上噪声相关系数的平均值, 黑色曲线是对这些平均值的拟合曲线)

Fig. 1 Inter-distance of subsite vs. noise correlation on filter band 2 ~ 4 Hz

(Red-star represents mean-value of noise correlation on relevant distance, Black curve is fitting-curve of these mean-value)

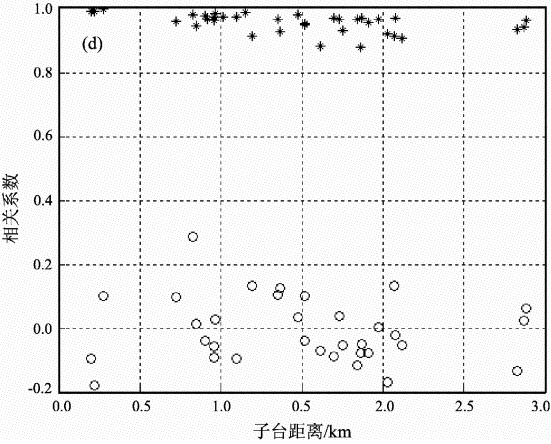
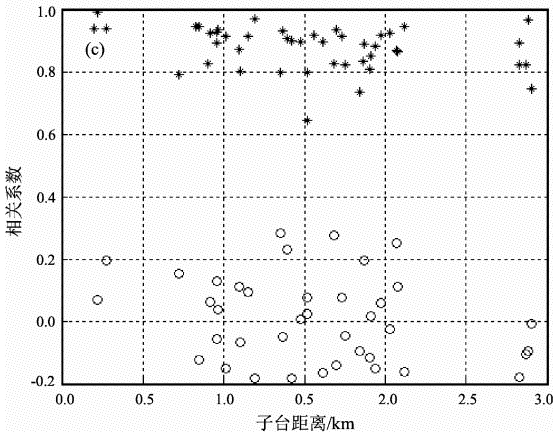
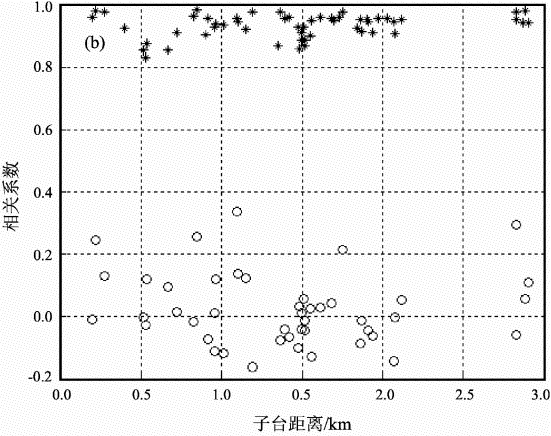
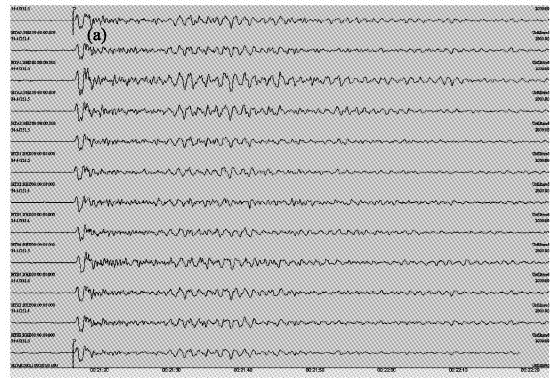
3 信号相关性

国际数据中心审核事件公报 (以下简称 IDC REB) 给出的勘址测量期间全球各地地震事件共 576 个, 勘址的临时台站总共记录到其中的 197 个。此外, 根据新疆地震目录, 这期间新疆范围内共发生区域性地震 144 个, 临时台站记录到其中的 53 个。以下我们对记录到的地震信号进行分析, 并结合一些信噪比较高的信号来说明不同类型的地震震相的检测特征及其信号相关性。

3.1 远震信号

本文将震中距 20° 以上的地震信号看成是远震信号。从谱分析结果看，这些远震 P 波一般在 1 ~ 2 Hz 附近的信噪比最大，不同子台上的信号具有很好的相似性。我们计算了 1 ~ 2 Hz、2 ~ 4 Hz、3 ~ 6 Hz、4 ~ 8 Hz 等频带上的信号相关系数。结果表明，在 1 ~ 2 Hz 的频带上，在勘址台阵所能达到的最大子台间距 3 000 m 的范围内，信号的相关系数基本保持在接近于

1 的水平上，且不会随子台间距增大发生明显变化。当频率升高时，虽然信号的相关系数总体上略有下降，但一般仍保持在 0.9 左右的水平，且不会随子台间距增大有明显变化。由于这些远震信号在 2 Hz 以上的频带内信噪比相对较小，因此，其相关系数的总体下降和离散度的增大可能在很大程度上是由于信噪比的降低所引起的。图 2 给出了勘址台阵记录的一个远震 P 波及其分析结果的例子。



\* 信号相关系数；0 为噪声相关系数

图 2 2006 年 6 月 14 日 00 时 14 分印尼北苏门答腊地震相关分析结果  
(5.56°N, 94.61°E,  $M_b=4.6$ ,  $\Delta=34.4^\circ$ ,  $A_z=151.5$ ,  $SNR=41$ ,  $SNRBF=120$ )

(a) 各子台波形和聚束后的波形（最后一道，下同）；(b) 波 P 震相 1 ~ 2 Hz 相关分析；  
(c) P 波震相 2 ~ 4 Hz 相关分析；(d) P 震相 4 ~ 8 Hz 相关分析

Fig. 2 Correlation result of 00:14 14/06/2006 earthquake in North-Sumatra Indonesia

(a) waveform of all sub-site and beamform (the last channel); (b) correlation of P phase on 1 ~ 2 Hz;  
(C) correlation of P phase on 2 ~ 4 Hz; (d) correlation of P phase on 4 ~ 8 Hz

3.2 区域震和近震

谱分析结果表明，这些地震的 Pn 震相具有很丰富的高频成分。信号相关性方面，1 ~ 2 Hz 的 P 波所对应的相关系数在 0.8 ~ 1 之间，随着频率的增加相关系数有所下降，并且在 3 ~ 6 Hz 和

4 ~ 8 Hz 等中等频率的频带内，相关系数表现出了一定程度的随子台间距增大而有所下降的现象。其中，在 1 500 m 的子台间距范围内，2 ~ 4 Hz 的 Pn 信号的相关系数基本上保持在 0.8 左右。对更高频率的信号，信号相关系数表现出了随子台间

距增大而下降的趋势,当子台间距小于 600 m 时,对 P 波计算得到的信号相关系数基本保持在 0.8 左右。除此以外,我们也计算了 Lg 等区域性 S 波的

相关系数,在大约 3 km 的子台间距范围内,0.1 ~ 1.0 Hz 频带内其相关系数保持在 0.9 左右。图 3 给出了震中距 0° ~ 20° 之间的一个区域地震的例子。

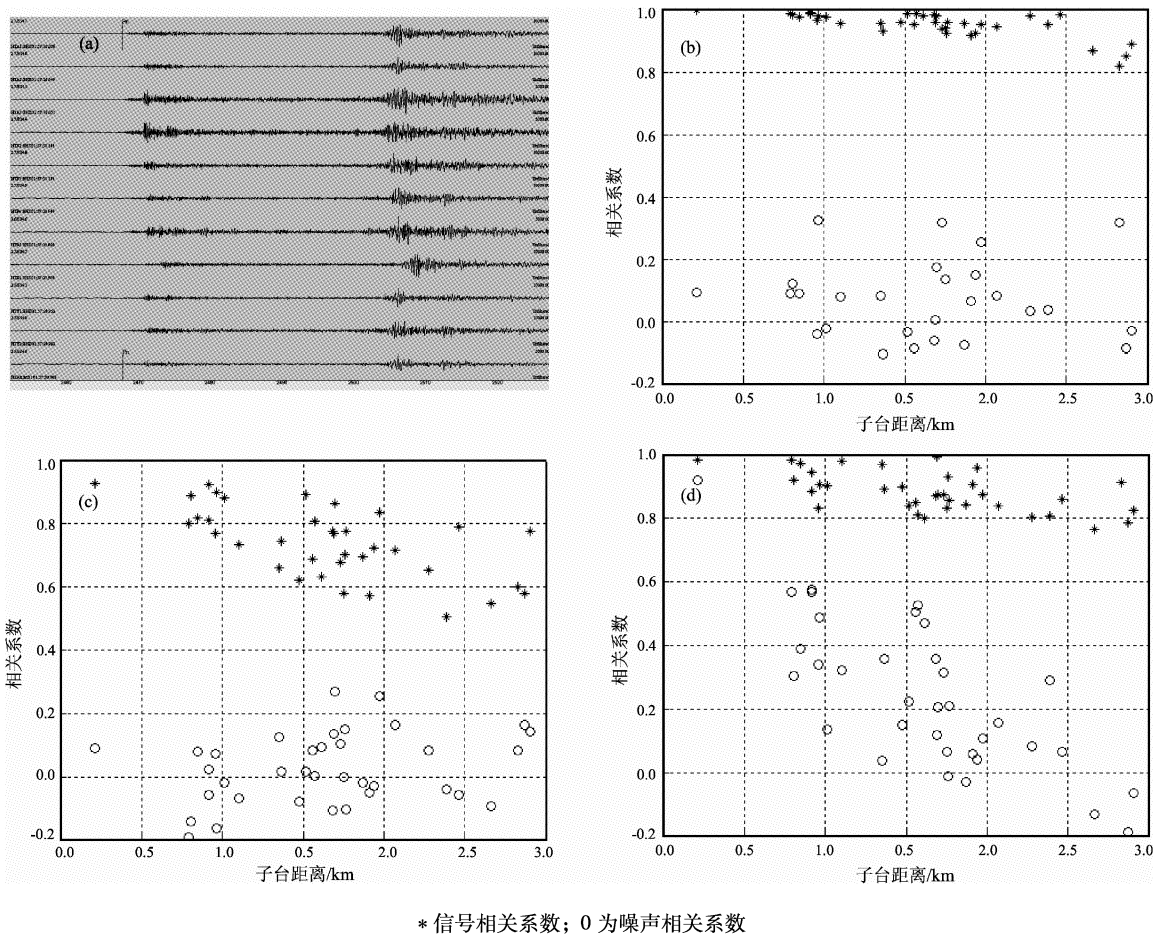


图 3 2006 年 6 月 21 日 02 时 38 分新疆伽师地震相关分析结果  
(39.48°N, 79.60°E,  $M_1=3.6$ ,  $\Delta=2.7^\circ$ ,  $A_z=335$ ,  $SNR=370$ ,  $SNRBF=450$ )  
(a) 各子台波形和聚束后的波形 (最后一道, 下同); (b) Pn 震相 1~2 Hz 相关分析;  
(c) Pn 震相 4~8 Hz 相关分析; (d) Lg 震相 1~2 Hz 相关分析  
Fig. 3 Correlation result of 02:38 21/06/2006 earthquake in Jiashi, Xinjiang  
(a) waveform of all subsite and beamform (the last channel); (b) correlation of Pn phase on 1-2 Hz;  
(c) Correlation of Pn phase on 4-8 Hz; (d) Correlation of Lg phase on 1-2 Hz

## 4 台阵布局设计

### 4.1 台阵布局基本原理

相对于三分量地震台站,台阵要达到的主要目的有两个:(1)采用相干滤波的方法(即聚束法)来提高信号信噪比。对有  $N$  个子台的台阵,假定信号完全相关而噪声完全不相关,则可提高信噪比 $\sqrt{N}$ 倍;(2)准确估算地震信号的方位角和慢度,在提高地震定位精度的同时,也更便于数

据处理分析时的震相识别和关联。  
相干滤波对台阵布局的基本要求是各子台之间的相互距离应大于噪声的相关距离且小于信号的相关距离。只要满足这一要求,则台阵的具体形状对信噪比增益无影响。而准确测定地震信号方位角和慢度则要求台阵的子台布局不能是线形的,而必须具有或相当于有两个相互垂直的臂。因为对一条测线来说,当信号传播方向和测线平行时,信号在各测点之间的相位差对信号的视速度很敏感而对信号传播方向的变化不敏感,反之,

当信号传播方向和测线垂直时，各测点之间的相位差只对方向的变化敏感而无法分辨信号视速度的变化。因此，要同时测定地震信号的方位角和慢度，就不能将台阵设计为扁椭圆或近似为一条测线的形状。

基于上述原理，实际运行的地震台阵的子台布局一般都可以被归纳为同心圆结构（十字形和三角形台阵可看成是这一结构的特殊情况）。

4.2 典型台阵布局

国际上最有代表性的小孔径台阵是挪威的 NORESS 台阵。除中心点外，该台阵分为 4 环，各环的半径基本上遵守以下关系：

$$R = R_{\min} \alpha^n, n = 0, 1, 2, 3, 4$$

(7)

其中内环半径  $R_{\min} = 150\text{ m}$ ， $\alpha = 2.15$ ，而整个台阵的孔径约为  $3\text{ 000 m}$ 。包括中心点在内，每个环上的子台数分别为 1，3，5，7，9。

数据处理时采用不同半径环的组合来检测不同频带的信号。其中，最外面的 D 环被用来检测  $0.5 \sim 1.5\text{ Hz}$  的信号，C、D 两环检测  $1 \sim 4\text{ Hz}$  之间的信号，B、C 两环检测  $4 \sim 8\text{ Hz}$  之间的信号，而 A、B 两环则检测  $8 \sim 16\text{ Hz}$  之间的信号等。

目前在建的一批核爆炸核查国际监测系统 (IMS) 基本地震台站则采用了一种简约化的布局。如兰州台阵的布局内环半径约  $400\text{ m}$ ，外环半径近  $1\text{ 500 m}$ ，包括中心台在内共 9 个子台。

4.3 基于勘址测量结果的台阵布局方案

在对勘选区域进行现场测量的基础上，我们获得了该区域的噪声和信号的相关特性（范广超等，2003）。勘址地区各主要频带的噪声相关系数随子台间距的增大而下降，各个频带内的平均相关系数下降到 0.25 以下的最小距离分别为： $1 \sim 2\text{ Hz}$  约为  $1\text{ 000 m}$ ， $2 \sim 4\text{ Hz}$  约为  $350\text{ m}$ ， $4 \sim 8\text{ Hz}$  约为  $200\text{ m}$ 。以上 3 个频带内相关系数达到最低值的距离分别约为  $1\text{ 500 m}$ 、 $600\text{ m}$  和  $400\text{ m}$ 。

勘址台阵所记录的 P 波信号具有非常好的相关性，在  $1 \sim 4\text{ Hz}$  的频率范围内，无论是远震、区域震还是近震信号，在  $3\text{ 000 m}$  的子台间距范围内，信号相关系数都可以保持在 0.8 以上的水平，并且没有呈现出信号相关系数随子台间距增大而明显下降的趋势。在  $4 \sim 8\text{ Hz}$  的中等频率范围内，远震 P 波在整个  $3\text{ 000 m}$  的子台间距范围内仍可以保持 0.8 左右的相关系数，区域性 P 波信号则在子

台间距  $1\text{ 000 m}$  的范围可以保持 0.8 左右的相关系数。对勘址台阵记录的 S 波来说，在  $0.5 \sim 1.5\text{ Hz}$  或更低频率的频带内，信号的相关系数较高，相关距离可以达到  $2\text{ 000 m}$  以上。

这样，基于台址范围内不同频带噪声和信号相关特性，若和田台阵拟建为 9 个子台的小孔径台阵，考虑到对远震的监测，外环半径应选在  $1\text{ 500 m}$  左右，考虑到对区域地震和近震的监测，内环则应选在  $550 \sim 650\text{ m}$  之间，除中心台外，内、外环分别布设 3 个和 5 个子台，即可以在勘址测量台站基础上，保留  $A_0$ 、 $B_1 \sim B_5$  等 6 个子台，而  $A_1 \sim A_3$  等子台稍向外移，使它们距离中心台的距离达到  $600\text{ m}$  左右。图 4~7 分别为子台布局示意图、该布局下子台间距覆盖范围和台阵响应函数。

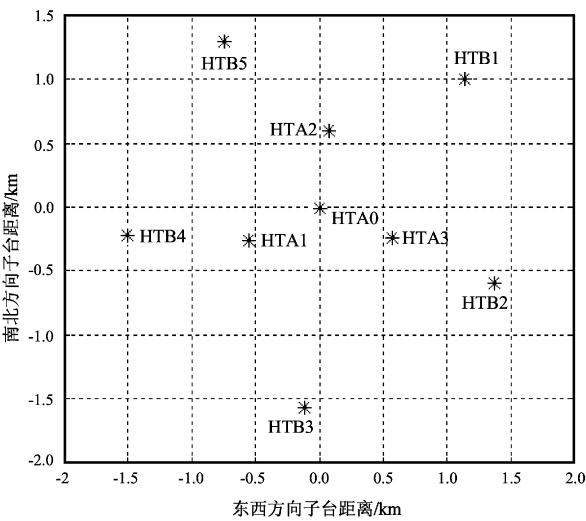


图 4 和田台阵布局方案示意图

Fig. 4 Layout plan of Hotan Array

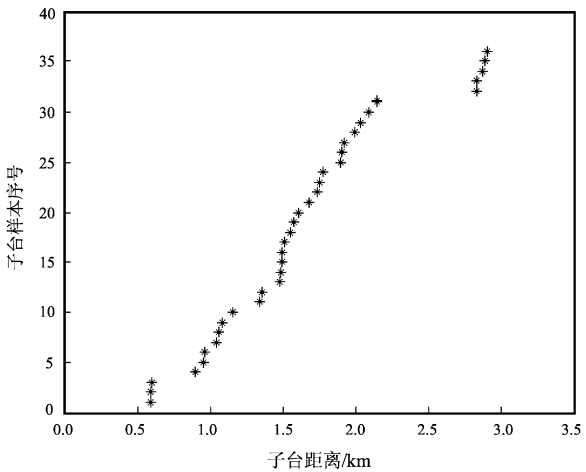


图 5 布局方案下子台间距样本

Fig. 5 Inter-Distance distribution

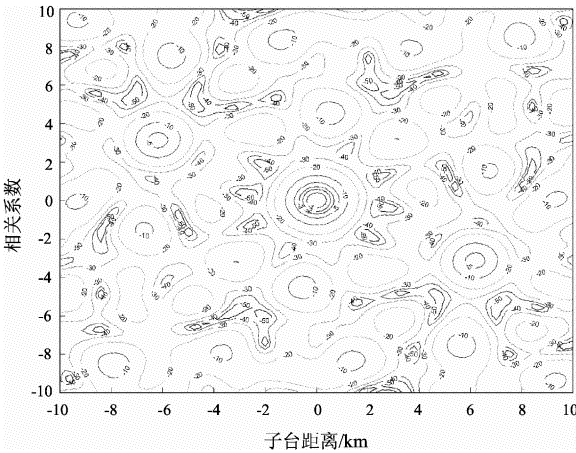


图 6 台阵响应函数 (2 维)

Fig. 6 Response function of HT-Array (2D)

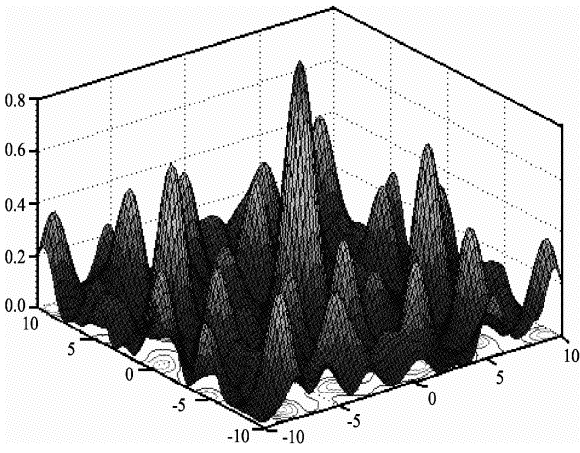


图 7 台阵响应函数 (3 维)

Fig. 7 Response function of HT-Array (3D)

5 结论

通过对和田台阵候选台址现场勘址测量及数据分析,能够给出台阵建设方案的技术依据。其中对台阵勘址数据中噪声和信号相关性分析结果,成为和田台阵子台布局方案设计的主要参考。依据相关性分析结果,台阵采用中心子台和两个同心圆结构布局,内环半径约为 600 m,外环半径约为 1 500 m,子台位置的最终确定需参考上述要求,并进一步考虑参考台址的地质条件。

参考文献:

段天山,等.2009.和田地震台阵勘址测量与数据分析[J].地震地磁观测与研究,30(5):96-100.  
范广超,等.2003.某地震台阵勘址总结报告.西北核技术研究所.  
郑南宁.1991.数字信号处理[M].西安:西安交通大学出版社.  
GSETT-3 Documentation.1995.Conference on Disarmament,GSE/CRP/243.Vol.3 FACILITIES.http://www.iris.edu.  
Peterson J.1993.Observations and Modeling of Seismic Background Noise.U.S.Department of Interior Geological Survey.Open-File Report,93-322.

Correlation Analysis and Layout Design of Hotan Array

DUAN Tian-shan, FAN Guang-chao

(1. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China)

(2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shanxi, China)

Abstract

This paper introduces the correlation result of subsite noise and signal with survey measurement waveform of Hotan seismic array in Xinjiang. The subsite layout is also given based on correlation result.

**Key words:** Hotan-Array Subsite-Layout Correlation-Analysis; layout design