

基于 FK 能量聚束的传感器阵列优化布设方法

莫璧铭, 李 剑, 孔慧华, 辛伟瑶, 贺 铭

(中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室, 太原 030051)

摘要: 针对地下浅层震源远场震动信号拾取的需求, 开展了震动传感器阵列分布式优化布设方法研究; 首先提出了一种基于频率一波数 (F-K) 分析的能量聚束算法, 拾取了远场微弱的震动信号; 其次, 分析了能量聚束效果的评价指标; 最后, 利用 MATLAB 进行了仿真验证, 得出了不同步站方式下模拟震源对应的功率谱, 并对比分析了它们的聚束效果; 经仿真结果表明, 在远程震动信号拾取过程中, 正六边形阵列这种布站方式聚束效果最好。

关键词: 分布式优化阵列; 聚束; 频率一波数谱分析

Optimization Method of Shock Sensor Array Layouts Based on FK Beam Forming

Mo Biming, Li Jian, Kong Huihua, Xin Weiyao, He Ming

(Shanxi Provincial Key Laboratory of Information Detection and Processing, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: According to the requirements for shock signal collected from far field underground, research on distributed optimization method of shock sensor array was carried out. An algorithm of beam forming was first given for the far field small-signal acquisition. And secondly analyzing the evaluation index of beam forming. In the end, the simulation was completed by using MATLAB, and analyzing the beam forming result of different sensor siting. The simulation indicate that the best beam forming result is regular hexagon sensor siting for collecting far field shock signal.

Keywords: distributed optimization array; beam forming; frequency-wave number

0 引言

传感器阵列优化布设是地下浅层震源定位领域中的关键技术, 是实现矿山爆破、微震监测等民用问题的重要手段。在地下浅层微震定位过程中, 由于实测震动数据中的大量地表噪声对目标信号的获取造成极大干扰, 因此如何在地表大噪声背景下通过高密点传感器阵列的优化布设可以对微弱震动信号进行精确提取, 是实现震源定位的一个重要手段^[1]。

在实际工程应用中, 由于微弱的地下浅层微震信号信噪比过低, 通常是受到背景噪声、检波仪器分布等等因素的制约, 于是有两种可用于提高波形信噪比、提取微弱信号的方法: 台阵处理技术和模板匹配滤波技术^[2]。其中, 台阵处理技术在地学领域中发展成熟, 在国内外都得到广泛应用。想要实现在强背景噪声的条件下对微弱的微震信

号进行更加精确的检测和记录, 我们不仅需要灵敏度更高的仪器, 还可利用具备特定几何形状的密集分布式传感器阵列来实现对信号信号聚束能力的增强, 改进波形叠加的效果^[3]。并且利用视到时差的原理, 使传感器阵列记录上的某一震相在此宽频带内可以通过而且不发生明显改变, 其它震相则显著衰减, 从而达到压低噪声、提取信号的目的。而且高密点的分布式传感器阵列中各个传感器具有一样的基站参考时间和仪器响应也波形一致的增强起到了一定的效果。

针对上述问题, 本文采用 F-K 算法对地下浅层震源定位的不同阵列布设情况进行分析, 研究并对比了不同阵列结构在慢度域下的功率谱数据, 给出了不同阵列的优缺点, 在地下震动目标定位领域中具有一定的工程应用价值。

1 基于微弱信号拾取中的 F-K 的聚束原理

1.1 阵列聚束方法比较

在地震事件的台阵数据处理中, 主要有 3 种台阵聚束方法: 频率扫描法, 视速度扫描法, 自适应滤波与最佳加权聚束算法。前两种方法都对采集到的数据进行了相关优化简单加权的处理, 后者则是针对噪声的功率谱来设计自适应滤波的各种参数, 而各个子台的时延则由最佳加权算法来估计。其中, 针对噪声信号主频不一致的信号, 主要采用第一种方法, 它的数据处理耗时相对较短, 有利

收稿日期: 2019-04-24; 修回日期: 2019-05-17。

基金项目: 山西省面上青年资金资助 (201801D221205); 山西省高校创新项目资助 (201802083); “十三五”装备预研兵器工业联合基金项目 (6141B012904)。

作者简介: 莫璧铭 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事地下爆破炸点定位方向研究。

李 剑 (1985-), 男, 博士, 副教授, 主要从事阵列化信号处理方向的研究。

于实时处理，但信号在完成时域到频域的转换时丢失了部分信息，所以会导致波形失真。第二种方法虽然在信号时速度与噪声不一样的地震事件中，其聚束波形虽然保存了各个频率的成分，完成结果的求解并给出相应真相的时速度矢量，但是其处理速度相对较慢。而第三种方法一般来说对所有地震波形都适用，同时它能给出相比前面两者更小的时延误差，有利于地震定位，但由于其算法更加复杂，处理速度更慢。

1.2 基于 F-K 的聚束原理

由于阵列中各子阵的坐标位置不一样，所以当地震波到达阵列时，各个子阵对地震事件拾取的波前时刻也不一致。若信号不经过处理就直接进行波形叠加，则不能达到增强信号的效果。若根据入射波前的慢度与各子阵的坐标对每个子阵的拾取到的波形进行时移，能够使得各子阵的拾取到的有用信号于某个合适的慢度矢量下的波达时间都平移到相同时刻，然后再对其进行叠加，这样信号才能获得最佳的增强效果，波形信噪比最高，这个过程就是聚束。聚束后能量最强时的慢度矢量即对应我们实际观测到的该信号的速度大小和后方方位角。

现以阵列的基站（几何中心）的位置设为坐标原点，则阵列中的任一子阵 i 的位置矢量认为是 r_i 。某事件信号 $f(t)$ 与噪声信号 $n_i(t)$ 的叠加为在子阵 i 上拾取到的波形。在基站的参考位置（即坐标原点）上，该时间序列 $x_{zero}(t)$ 可以表示为：

$$x_{zero}(t) = f(t) + n_i(t) \quad (1)$$

针对同一事件信号 $f(t)$ 的子阵 i ，它拾取的时间序列 $x_{zero}(t)$ 为：

$$x_i(t) = f(t - r_i \cdot u_{hor}) + n_i(t) \quad (2)$$

此处， u_{hor} 表示水平慢度矢量。使各子阵拾取的波形都平移至坐标原点，故平移处理后的波形为：

$$x_i(t) = x(t + r_i \cdot u_{hor}) = f(t) + n_i(t + r_i \cdot u_{hor}) \quad (3)$$

设一个有 N 个子阵组成的阵列，每一子阵都有 n 个分量，那么将所有 M ($M=n \times N$) 道平移至坐标原点的波形进行叠加，并取平均，能够得到：

$$b(t) = 1/M \sum_{I=1}^M x_I(t) = f(t) + \frac{1}{M} \sum_{I=1}^M n_I(t + r_i \cdot u_{hor}) \quad (4)$$

由公式 (4) 可知，若信号 $f(t)$ 在子阵记录上的波形完全一致，而噪声信号 $n_i(t)$ 完全不相关，阵列记录上信号的信噪比通过时移处理后的叠加，能够达到单个阵元信噪比的 \sqrt{M} 倍。增强游泳信号并非单纯增大有用信号本身的振幅，而是以压制噪声信号的方法，突出有用信号，达到增强有用信号的相对振幅、提高波形信噪比的目的。

F-K 分析技术作为台阵数据处理的基本方法之一^[4-5]。通过将阵列中各个子阵记录上的数据信息按照某种方式进行波形聚束，抑制噪声，使处理以后的信噪比大大提高，进而增强地震记录中针对可靠信息和信号提取和检测能力，提高数据观测质量，从存在大量噪声的强干扰背景中拾取

有用的震动信号，从紊乱的强烈干扰背景中突出有用的地震波信号，提高事件定位精度^[6]。

震动传感器阵列的数据信号是由含有不同速度和方位的地震波叠加而成的一个波场。而对阵列记录的信号进行 F-K（频率-波数）分析对比与单个传感器来说，其具有无法替代的优势。F-K 分析做为频率-波数域的一种信号处理办法，它实际上就是在慢度空间内进行的频域聚束，可以区分不同方向地震波场的能量分布，通过可选择方向的速度滤波，将即使频率相同、波速大小相同但是方向不同的地场噪声与地震信号区分开来，且可以得知波的慢度，由此不仅能够提高信噪比，同时有利于震相识别^[7]。经过 F-K 分析在频率域的聚束，来实现能量的汇集，得到功率谱，然后从慢度坐标系中读取最大的那一个能量值，然后就能读取对应的信号的慢度，得出信号的基本信息，从而保证我们的数据准读取。

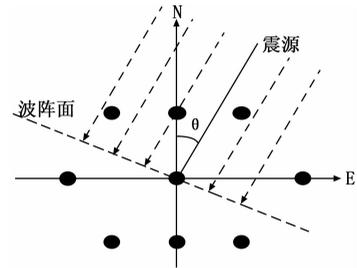


图 1 阵列聚束示意图

2 评价指标

F-K 分析的台阵处理中，假设台阵位于 xy 平面上，一给定波场 $f(x, y, t)$ 可用 Fourier 变换分解为平面波^[8]：

$$f(x, y, t) =$$

$$\frac{1}{(8\pi^3)} \iint_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(k_x, k_y, \omega) \exp(ik_x x + ik_y y - i\omega t) d\omega dk_x dk_y \quad (5)$$

$f(k_x, k_y, \omega)$ 频率-波数谱，表示在 xy 平面上以视速度值 V_a 、沿方位角 θ 的方向传播的平面波振幅和相位，方位角 θ 由下式确定：

$$k_x = (\omega \cdot \cos\theta)/V_a; k_y = (\omega \cdot \sin\theta)/V_a \quad (6)$$

而公式 $\vec{K} = (\omega/V) \vec{n} = \omega \vec{S}/V$ 建立了波数向量 \vec{K} 与角频率 ω 、水平相速度 V 、慢度矢量 \vec{S} 、与波的传播方向相平行的单位向量 \vec{n} 之间的关系。从子阵数据记录上的 $f(x, y, t)$ 估算得的 $f(k_x, k_y, \omega)$ 能够采用简单的波形叠加来说明某个特定的波长信息，因为频率-波数谱包含了与相位和振幅的全部信息。

一个均匀的波从远处传播过来，它的函数表示为 $f(t)$ ，内含有噪声 $n(t)$ ，假设这个波为一个均匀的平面波，此处我们首先对信号先进行时域聚束，再对进行频域计算。由于传感器阵列分布离散性，我们对传感器阵列接收的时

域信号进行均值计算, 均值为 $Y(t)$ 。

$$Y(t) = 1/n \sum_1^n y_n(t) \quad (7)$$

为了达到我们的目的计算出来的均值我们在进行相应的自相关运算, 此处我们定义自相关函数为 $R_Y(\tau)$ 。

$$R_Y(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(t)Y(t-\tau)dt \quad (8)$$

得到自相关函数之后可根据对应公式即求 Fourier 变换, 就能得出我们说需要的功率谱, 从而求得我们所要求的慢度值, 此处我们定义对应功率谱为 $W(\omega)$ 。

$$W(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_Y(\tau) e^{-j\omega\tau} \quad (9)$$

在实际应用中, 由于传感器获得的数据并不是连续的, 故采用最大似然估计计算功率谱, 并对其进行归一化处理。最后生成一个慢度-功率谱域的二维坐标系, 将所有各个点的谱值对应生成在慢度域, 就可以通过软件特殊函数, 求取最大值, 再标记在对应的慢度域, 得出对应的慢度矢量值。

3 阵列形状的布设方法

传感器阵列的布局设计需要根据地区特点以及各种地理环境, 来设计布阵方式^[9]。我们熟知的一些布阵方式, 较适合大多数环境下的地震监测。并且因为应用于震源监测, 传感器阵列能接收到的信号需要越清晰越好, 只有清晰的接收地震信号, 才能保证后期的地震数据处理的准确性^[10]。作为地震数据信号接收的前沿部分, 阵列的布站方式尤为重要^[11]。而不同的阵列的设计, 它们就有各自的优势。

不同的阵列形状都有一个共同的地方, 即在立体空间中, 如果要准确的得到慢度值以及其方向角, 则需要传感器阵列不能只存在一组单一的线阵, 因为在接收信号时, 如果仅有一组单一线阵, 那么它在接收信号的时候, 一旦信号传播与此线阵平行, 那么接收的信号便相当于仅从一点发出^[12]。而信号如果沿着与传感器阵列垂直传送过来, 传感器阵列就只对信号方向有感知, 无法计算信号得传输速度。因此在传感器阵列布阵时, 需要存在相交的两组线阵才能对信号的速度以及方向有感知。其次, 阵列的阵元间距大小与阵列波数响应大小成反比; 并且而阵列中的阵元数目越多, 其响应越大。如图 2~4 所示, 在设置传感器阵列子阵数目相同的情况下, 以下几种传感器阵列布阵方式各有各的特点。

图 1 (a) 是 L 形阵列, 垂直于横轴的设有 5 个子阵元 (不包括两线阵的交点), 而垂直于纵轴的共设有 3 个子阵, 线阵中每个相邻的阵元间距为 5 m, 这种布站方式可以用于监测某一方向的地震事件, 对所监测方向地震波信号具有较好的感知能力。对理论分析和阵列数据处理方面具有较大优势。同时由于远距信号的相关性较好, 针对定向的地面爆破等事件信号的聚束能力更好。图 1 (b) 为 X 形阵列, 以一个子阵作为基站参考点并布置于坐标原点, 并以此为中心不舍两条相交的线阵, 同一线阵上的传感器之间的间

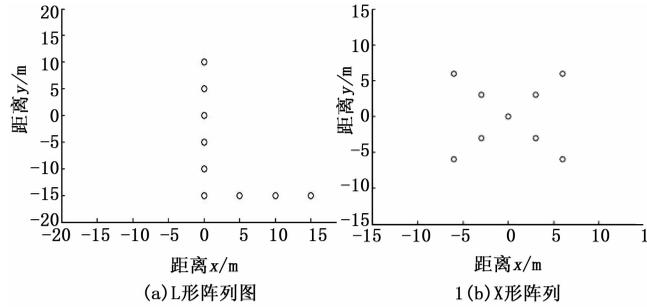


图 2 L 形与 X 形阵列图

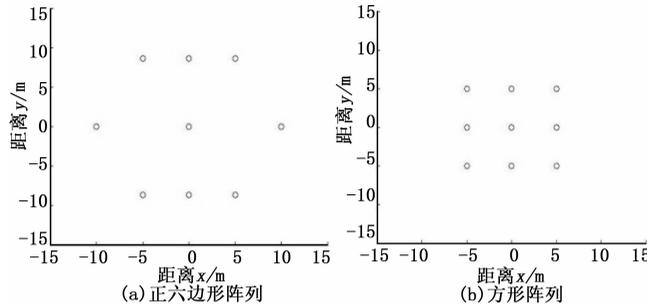


图 3 正六边形与方形阵列图

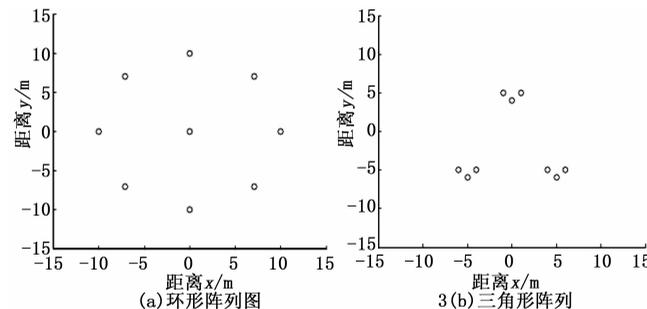


图 4 环形与三角型阵列图

距为 5 m。这两种阵列的布阵方式对于有远距离特定方向的震源定位有较好的效果。图 2 (a) 为正六边形阵列, 以坐标原点作为基站参考点, 左右间隔 10 m 处布置两个子阵 (10, 0)、(-10, 0), 同时在垂直于原点的上下 10 m 布置 6 个子阵, 坐标为 (0, 10)、(5, 10)、(-5, 10)、(0, -10)、(5, -10)、(-5, -10), 这种布站方式有利于增大信噪比。图 2 (b) 为一个矩形 (正方形) 阵列, 其边长为 9 m, 阵元间距同样为 5 m。图 3 (a) 是一个以坐标原点为基站, 距离坐标原点 10 m 的圆环上设置 8 个子阵的环形阵列, 其 9 个点的坐标分别为 (0, 0)、(10, 0)、(0, 10)、(-10, 0)、(0, -10)、(5, 5)、(-5, 5)、(5, -5)、(-5, -5), 环形传感器阵列对于不同方位的信号极都有比较一致的检测能力和分辨信号的能力^[13]。图 3 (b) 是一个高为 10 m 等边三角阵列, 其中每个 3 个顶点又分别由 3 个子阵组成的一簇子阵, 其 3 个顶点的坐标分别为 (5, 0)、(-5, -5)、(5, -5), 此类布阵方式对于震相识别有较大优势, 能将信号数据充分利用并实现精确定位。

4 仿真及验证

对不同方式布站的传感器阵列进行仿真试验，得出结果如图 5~8 所示。

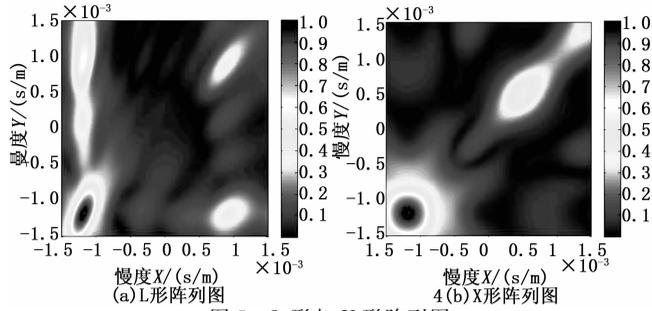


图 5 L 形与 X 形阵列图

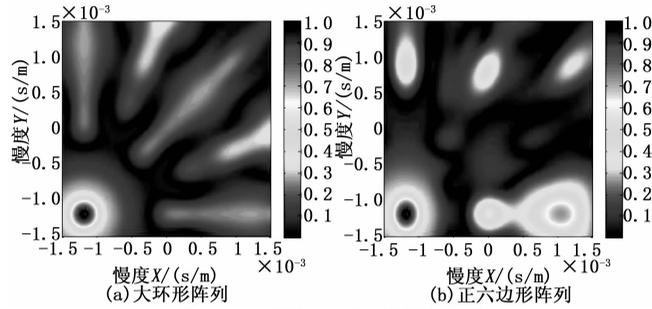


图 6 大环形与正六边形阵列图

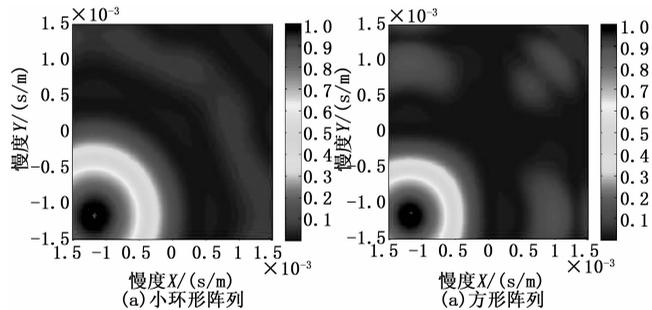


图 7 小环形与方形阵列图

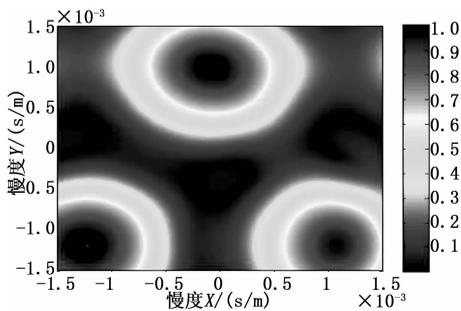


图 8 三角形阵列

L 形和 X 形传感器阵列的 F-K 分析果结图较为清晰，在图中很清楚的可以看到一个红色的光圈。并且在圈中搜索到了一个代表能量谱中最大值的点分别为 0.987 6 和 0.976 0，因此可知 X、L 形的布阵方式能对信号提供更优的数据处理。正六边的聚束方式同样得到了一个较为清晰的最值点 0.978 1，但是在图中隐约看到右边存在一个极值，对结果虽没产生影响，但就说明接收过程存在聚束不

够完整的问题，这与信号波形有关，说明此种布阵受波形影响较大。与此相比，环形阵列的聚束信号处理结果可以很明显的看出有一个很突出的最值 0.988 0 点，而且更容易分辨，此种布阵方式能更好的满足数据接受处理的要求。阵元间距为大环形 1/2 的小环形和方形传感器阵列的收敛效果比大环形差，产生光圈结果范围较大，虽然同样能在里面找到最大值点 0.958 7 和 0.960 1，产生这个结果的主要因素为阵列阵元间距。三角形传感器阵列作为一种较为特殊的布阵方式，这个结果的产生好了几个极值点，因为布阵的方式就是三角密集，即使将基阵的位置改为 3 个点中心时，其结果仍然如图，因此三角阵的布阵方式在远震测定中虽然能有最大结果点 0.953 1，其余极值点对于会对最后的分辨产生有较大的影响。

5 结论

通过不同形状阵列的布置并利用 MATLAB 进行了仿真，对远场震动信号的拾取开展了基于震动传感器阵列布置的能量聚束算法研究。最后得到了在不同传感器阵列布阵方式下的能量聚束效果。经数据分析结果表明，不同形状的阵列决定了不同方位的分辨能力，在此算法基础上正六边形与 L 形传感器阵列针对于远震事件的聚束效果是最好的。

表 1 各个阵列产生能量谱

传感器阵列	能量谱结果图效果	能量极值点数	能量点最值
L 形阵列	有清晰结果，并存在最大值	1	0.987 6
X 形阵列	有清晰结果，并存在最大值	1	0.976 0
大环形阵列	有清晰结果，并存在最大值	1	0.988 0
小环形阵列	有结果，存在最大值， 但能量圈较大	1	0.958 7
矩形阵列	有结果，存在最大值， 但能量圈较大	1	0.960 1
正六边形阵列	有清晰结果，并存在最大值	2	0.978 1
三角形阵列	结果存在，但存在多个较大值点	3	0.953 1

参考文献:

[1] Rost S, Thomas C. Array seismology: methods and application [J]. Reviews of Geophysics, 2002, 40 (3): 2.1 - 2.27.

[2] Forghani A, et al. An automated cross-correlation based event detection technique and its application to a surface passive data set [J]. Geophysical Prospecting, 2013, 61 (4): 778 - 787.

[3] Fan G W, Wallace T. The determination of source parameters for small earthquakes from a single, very broadband seismic station [J]. Geophysical Research Letters, 1991, 18 (8): 1385 - 1388.

[4] 沈旭章, 梅秀苹, 张淑珍, 等. 兰州台阵响应函数及不同方位小地震事件 FK 分析结果 [J]. 西北地震学报, 2010, 32 (1): 59 - 64.