

引用格式: 于国栋, 王春阳, 张月. 陆地靶场声定位系统布站图形优化方法[J]. 声学技术, 2021, 40(2): 275-281. [YU Guodong, WANG Chunyang, ZHANG Yue. Optimization method for sensor layout pattern of acoustic positioning system in shooting range[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(2): 275-281.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.02.020

陆地靶场声定位系统布站图形优化方法

于国栋, 王春阳, 张月

(63850 部队, 吉林白城 137001)

摘要: 提出了一种度量布站阵形结构优劣的方法。介绍了声源定位原理及解算模型, 并给出了布站阵形结构优劣的度量计算公式, 最后, 通过计算仿真数据和试验数据验证所提方法的有效性和可行性。结果表明: 图形结构的优劣程度受布站阵形和探测器数量两方面影响, 文中的方法可以准确度量布站阵形结构的优劣, 可为布站方案设计提供理论依据。

关键词: 声定位设备; 布站阵形; 探测器数量

中图分类号: TP391.42

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-02-0275-07

Optimization method for sensor layout pattern of acoustic positioning system in shooting range

YU Guodong, WANG Chunyang, ZHANG Yue

(63850 Troops of PLA, Baicheng 137001, Jilin, China)

Abstract: A novel approach to measuring the performance of the sensor layout in shooting range is proposed in the paper. The principle of sound source positioning and its solution model are recommended. The formulas of measuring the performance of the sensor layout are given. Finally, the effectiveness and feasibility of the method are verified by simulation and experiment. The results show that the performance of the sensor layout is influenced by sensor layout and the number of sensors. The method given in this paper can accurately measure the performance of the sensor layout and provide a theoretical foundation for the layout design of the equipment.

Key words: acoustic positioning equipment; sensor layout pattern; number of detectors

0 引言

陆地靶场试验中, 精确的测试结果对于武器装备的评定起着至关重要的作用。随着测试系统数量的增加和复杂性的提高, 合理使用测试设备显得格外重要。

目前, 利用声定位技术测量落点坐标的相关设备已在陆地靶场验收, 并取得较好的效果。决定设备能否发挥其最大效能, 主要取决于两个方面: 高效的数据处理方法^[1]和高质量的布站阵形结构^[2]。自设备投入使用以来, 经过不断研究探索, 已总结出很多有价值的成果^[3-6]。但查阅国内外文献后发现, 目前针对声学设备布站阵形结构的研究成果较少,

大多数基于光学设备和定位导航设备, 只有文献[2]中有关于声定位设备布站阵形结构对定位精度影响的论述, 但并未总结出度量布站阵形结构优劣程度的方法。

陆地靶场的声定位设备需要在弹丸落区周围布设一些探测器, 来接收弹丸落地时产生的声信号。对信号进行处理, 提取出爆炸信号到传感器间的时延差作为观测值, 进行解算可以得到弹丸的落点坐标。根据声学设备的特性及使用方式, 优化其布站阵形结构通常需要从两个方面进行考虑: 探测器阵列的布站阵形和探测器的数量。合理的布站阵形可有效提高设备的测试精度及可靠性; 除布站阵形外, 探测器数量也会对测试结果产生一定的影响, 使用过多的探测器, 并不会明显提高测试精度, 反而降低了系统的使用效率。

为能有效提高陆地靶场声定位系统的测试精度和使用效率, 本文提出了一种布站阵形结构优劣的度量方法, 并通过计算仿真数据和试验数据, 验证了该方法的有效性和可行性。

收稿日期: 2019-06-30; 修回日期: 2019-12-23

基金项目: 军队试验技术研究项目。

作者简介: 于国栋(1982-), 男, 辽宁大连人, 硕士, 研究方向为弹道终点坐标测试技术。

通信作者: 于国栋, E-mail: daya9527@126.com

1 原 理

1.1 声源定位原理及算法

声源三维坐标为 (x, y, z) ，需要布设 3 个以上探测器才能得到声源的位置，设探测器数量为 n 。如图 1 所示，各探测器位置分别为 (x_1, y_1, z_1) ， (x_2, y_2, z_2) ， \dots ， (x_n, y_n, z_n) ， t_1, t_2, \dots, t_n 为探测器接收到声源信号的时刻。以 t_1 为基准，其他时刻与 t_1 的差为 $\Delta t_{12}, \Delta t_{13}, \dots, \Delta t_{1n}$ ，声速为 c 。

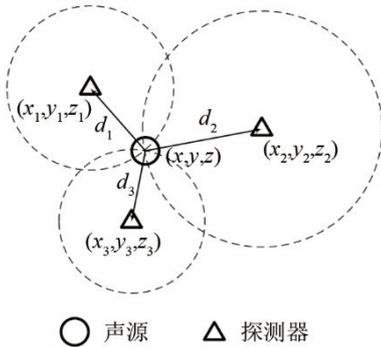


图 1 声定位原理示意图

Fig.1 Principle diagram of sound positioning

根据探测器与声源的几何关系，可构造如下误差函数：

$$f_i(x, y, z) = d_i - d_1 - c \times \Delta t_{i1} \quad (1)$$

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (2)$$

由式(1)可以看出，声源坐标 (x, y, z) 与时延差 Δt_{i1} 呈非线性关系，需进行线性化处理，对式(1)在初值 (x_0, y_0, z_0) 处进行泰勒级数展开，省略二次以上高阶项，建立误差方程：

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\hat{\mathbf{X}} - \mathbf{L} \quad (3)$$

式中， \mathbf{V} 是误差改正数； $\hat{\mathbf{X}}(\delta x, \delta y, \delta z)$ 为声源坐标估值的改正数； $\mathbf{L} = [l_{12} \ l_{13} \ \dots \ l_{1n}]^T$ 为观测值向量，其中：

$$l_{i1} = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - c \times \Delta t_{i1} \quad (4)$$

系数矩阵为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_i}{\partial x} & \frac{\partial f_i}{\partial y} & \frac{\partial f_i}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial x} = (x_0 - x_i) \times \frac{1}{d_i} - (x_0 - x_i) \times \frac{1}{d_1} \quad (6)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial y} = (y_0 - y_i) \times \frac{1}{d_i} - (y_0 - y_i) \times \frac{1}{d_1} \quad (7)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial z} = (z_0 - z_i) \times \frac{1}{d_i} - (z_0 - z_i) \times \frac{1}{d_1} \quad (8)$$

d_i 由初值 (x_0, y_0, z_0) 代入式(2)得出。

根据最小二乘原理，可列出法方程：

$$\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (9)$$

当矩阵 \mathbf{B} 为列满秩矩阵时，解方程(9)可得唯一解：

$$\hat{\mathbf{X}} = (\delta x, \delta y, \delta z) = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (10)$$

其中， \mathbf{P} 为观测值权阵。

将式(10)中的 $\hat{\mathbf{X}}$ 与初值相加，得到声源坐标：

$$\begin{cases} x = x_0 + \delta x \\ y = y_0 + \delta y \\ z = z_0 + \delta z \end{cases} \quad (11)$$

如果 $\hat{\mathbf{X}}$ 值较大，令 (x, y, z) 为初值，重复上述计算过程，直到 $\delta x, \delta y, \delta z$ 均小于 1×10^{-3} m 为止。

由于陆地靶场试验场地较平坦，弹丸落点的高程与探测器阵列的高程差异较小。因此，文章中对布站阵形的分析均是基于二维平面，无高程元素，但计算方法相类似，不另做分析。

1.2 布站阵形结构优劣的度量方法

$\mathbf{b}_i = (b_{i1} \ \dots \ b_{im})^T$ 为式(5)中矩阵 \mathbf{B} 的第 i 个观测向量，记 $\mathbf{M} = (\mathbf{b}_1 \ \dots \ \mathbf{b}_m)$ ， $\mathbf{M} = \mathbf{B}^T$ ， \mathbf{B} 为观测矩阵(同公式(5)中的矩阵 \mathbf{B})。当 $i=1$ 时， $U_1 = \sqrt{\mathbf{b}_1^T \mathbf{b}_1} = \|\mathbf{b}_1\|$ ，可以看出，当观测向量为二维时， U_1 为观测向量的模，当 $i=2$ 时， $U_2 = \sqrt{(\mathbf{b}_1^T \mathbf{b}_1)(\mathbf{b}_2^T \mathbf{b}_2) - (\mathbf{b}_1^T \mathbf{b}_2)^2} = \sqrt{\|\mathbf{b}_1\|^2 \|\mathbf{b}_2\|^2 \sin^2(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2)} = S$ ， U_2 为两个观测向量构成的平行四边形面积。依次类推：当 $m \leq n$ ，且 $i=m$ 时：

$$U_m^2 = \det(\mathbf{M}_{m-1}^T \mathbf{M}_{m-1}) \left\| (\mathbf{I} - \mathbf{M}_{m-1} (\mathbf{M}_{m-1}^T \mathbf{M}_{m-1})^{-1} \mathbf{M}_{m-1}^T) \mathbf{b}_m \right\|^2 = \det \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{m-1}^T \mathbf{M}_{m-1} & \mathbf{M}_{m-1}^T \mathbf{b}_m \\ 0 & \mathbf{b}_m^T [\mathbf{I} - \mathbf{M}_{m-1} (\mathbf{M}_{m-1}^T \mathbf{M}_{m-1})^{-1} \mathbf{M}_{m-1}^T] \mathbf{b}_m \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{m-1}^T \mathbf{M}_{m-1} & \mathbf{M}_{m-1}^T \mathbf{b}_m \\ \mathbf{b}_m^T \mathbf{M}_{m-1} & \mathbf{b}_m^T \mathbf{b}_m \end{bmatrix} = \det([\mathbf{M}_{m-1} \ \mathbf{b}_m]^T [\mathbf{M}_{m-1} \ \mathbf{b}_m]) = \det(\mathbf{M}_m^T \mathbf{M}_m) \quad (12)$$

由式(12)得：

$$U_m = \sqrt{\det(\mathbf{M}_m^T \mathbf{M}_m)} = \sqrt{\det(\mathbf{B}^T \mathbf{B})} \quad (13)$$

可见， U_m 是 m 个观测向量构成的 m 维超平行多面体的体积，其值大小在某种程度上可反映探测器布站阵形的优劣： U_m 值越大，布站阵形越好^[7-8]。

由矩阵理论可知：

$$\det(\mathbf{B}^T \mathbf{B}) = \prod_{i=1}^n \lambda_i \quad (14)$$

式中， λ_i 为矩阵 $(\mathbf{B}^T \mathbf{B})$ 的特征值。当 λ_i 中有一个或

者几个接近于 0 时，则 $U_i (i=1, 2, m)$ 接近 0。

虽然 U_i 可以直接反映布站阵形结构的几何特性，但不能确定阵形结构的优劣。主要原因为：一是 U_i 的大小与向量模有关；二是 U 没有相对性。另一方面，对于观测矩阵 $B \in R^{m \times n}$ ，一般 $m > n$ ，仅考虑 $m = n$ 是不全面的。

对于观测矩阵 $B \in R^{m \times n}$ ，当 $m = n$ 时，观测矩阵 B 的行向量为 $b_i = [b_{i1} \dots b_{in}]$ 。令 $b_1 = b_2 = \dots = b_n = b_0$ ，则：

$$U_0 = \|b_0\|^n \tag{15}$$

此时，所有向量的模一样， U_0 为超平行多面体的最大体积，与理想结构下的超平行多面体体积相比，可作为衡量阵形结构优劣的依据^[9]。因此，设向量组中范数最大的观测向量为 b_1 ，则：

$$E = \frac{\|b_1\|^n}{\sqrt{\det(B^T B)}} = \frac{\|b_1\|^n}{|B|} \tag{16}$$

式中， $\|b_1\|^n$ 为式(15)中的 U_0 ，代表所有观测向量构成的多维超平行多面体体积可能出现的最大值，而 $\sqrt{\det(B^T B)}$ 为 U_m ，代表所有观测向量构成的多维超平行多面体的体积， E 可用来衡量阵形结构的优劣。

当 $m > n$ 时，为了计算方便， B 分解成 $B = QG$ ， Q 是正交列满秩矩阵， G 为行满秩矩阵。矩阵 G 的行向量为 $g_i = [g_{i1} \dots g_{in}]^T$ ，设 g_1 为范数最大的行向量，则：

$$E = \frac{\|g_1\|^n}{\sqrt{\det(B^T B)}} \tag{17}$$

可以看出， E 的范围为 $1 \leq E \leq \infty$ 。显然， U_m 越接近 U_0 ，即 E 越小，阵形结构越好，相反， E 越大阵形结构越差。当 E 大于一定界限(界限值根据具体情况决定)，说明探测器组成的阵形结构非常差，严重影响设备的测试精度，使得设备的测试结果变得不可靠。

2 仿真与分析

优化布站方案通常从探测器组成的布站阵形和布设探测器的数量两个方面来考虑。

适合陆地靶场应用的布站阵形，优选有 L 型、U 字型、|| 型、口字型、田字型五种，如图 2 所示。

2.1 布站阵形对观测结构的影响

为比较上述五种布站阵形，模拟了一组数据，在 $0 < x < 2000 \text{ m}$ ， $0 < y < 2000 \text{ m}$ 范围内，以网格进行划分，间隔 10 m，网格交叉点处作为弹丸落点。五种图形中探测器的位置如下：

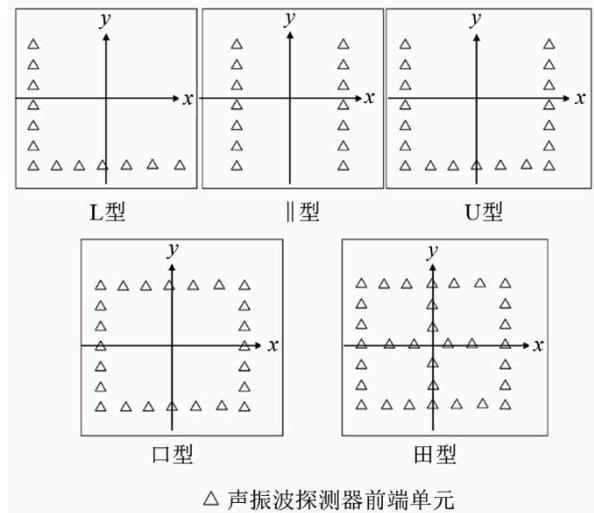


图 2 五种布站阵形示意图
Fig.2 Diagram of the five sensor layout patterns

- (1) L 型：范围为： $300 \text{ m} < x < 1700 \text{ m}$ ， $300 \text{ m} < y < 1700 \text{ m}$ ，间隔 100 m，共 29 个探测器。
- (2) || 型：范围为： $300 \text{ m} < x < 1700 \text{ m}$ ， $300 \text{ m} < y < 1700 \text{ m}$ ，间隔 100 m，共 30 个探测器。
- (3) U 型：范围为： $300 \text{ m} < x < 1700 \text{ m}$ ， $300 \text{ m} < y < 1700 \text{ m}$ ，间隔 200 m，共 22 个探测器。
- (4) 口型：范围为： $300 \text{ m} < x < 1700 \text{ m}$ ， $300 \text{ m} < y < 1700 \text{ m}$ ，间隔 200 m，共 28 个探测器。
- (5) 田型：范围为： $300 \text{ m} < x < 1700 \text{ m}$ ， $300 \text{ m} < y < 1700 \text{ m}$ ，间隔 200 m，共 40 个探测器。

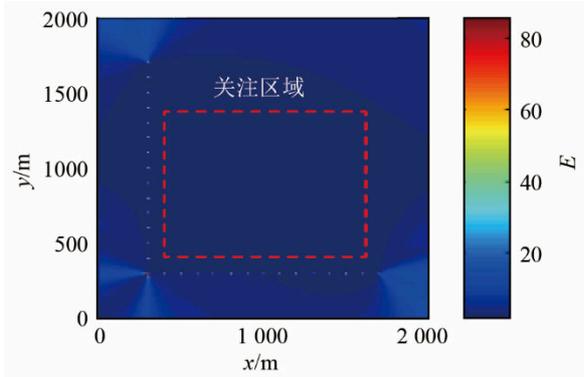
对网格交叉点处的仿真落点进行计算，得到所有落点的 E 。再统计所有落点的 E 的平均值和均方差，结果如图 3 和表 1 所示。

从图 3 和表 1 可以看出，五种布站阵形的 E 值平均值无明显差异，说明五种布站阵形对测试结果的影响无差别。但是，从 E 的均方差来看，田字型最优，L 型最差，剩余三个图形差异不明显。出现这种情况的原因为：L 型在控制区域的左上角、左下角及右下角结构较差，影响了其 E 的均方差；而田字型在 x 和 y 方向均有一定数量的探测器，并且这些探测器分布均匀，因此，即便有个别区域结构较差，也不会对 E 的均方差产生太大的影响。

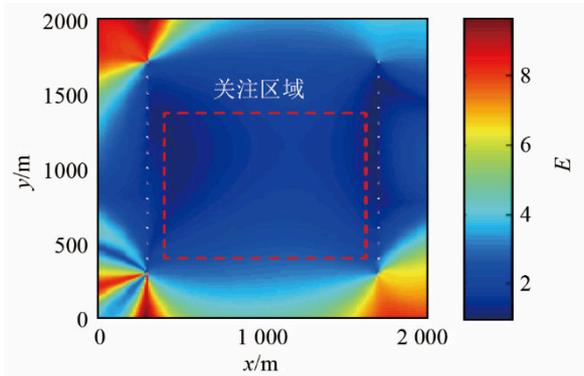
陆地靶场试验时，不需要对全部理论落区进行控制，往往存在一个关注区域，大多数弹丸会落入该区域，只有少数异常弹会出现在该区域之外，因此，通常我们更关心关注区域处的测试精度。仿真试验中，将 $400 \text{ m} < x < 1400 \text{ m}$ ， $400 \text{ m} < y < 1400 \text{ m}$ 区域设定为关注区域。对关注区域内的落点进行计算，并统计 E 的平均值和均方差，结果表 2 所示。

从表 2 可以看出，L 型最优，|| 型最差，剩余三种无明显差异。出现这种情况的原因是：|| 型在 x

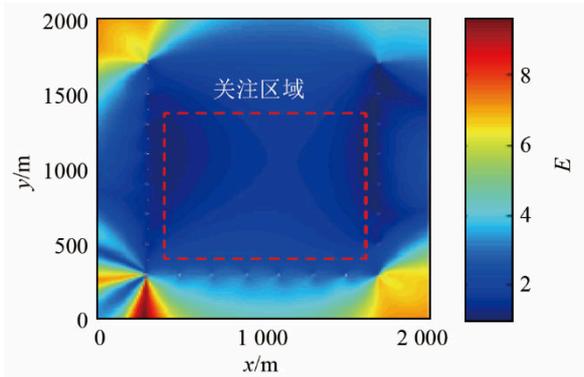
方向上布设的探测器过少, 因此在该方向上的结构较差, 而其他四种图形在 x 和 y 方向上均布设一定数量的探测器, 因此, 结构相对较好。从 E 的均方



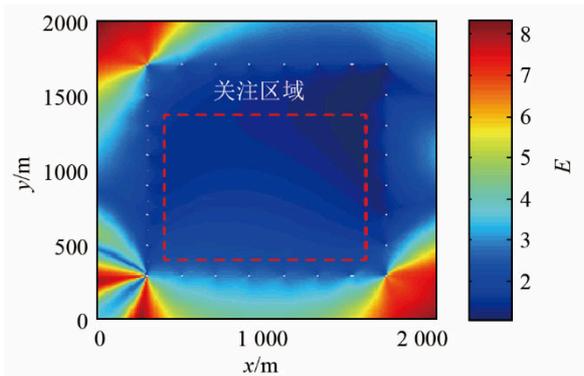
(a) L 型



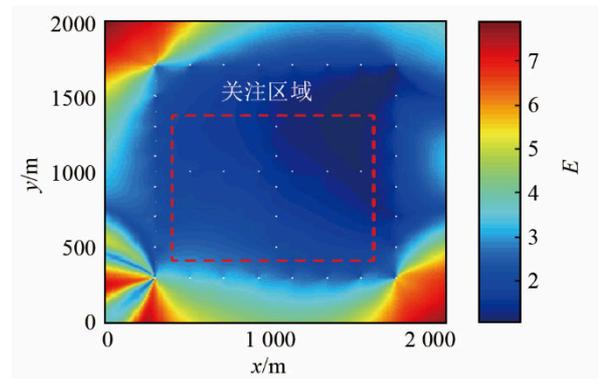
(b) ||型



(c) U 型



(d) 口型



(e) 田型

图 3 五种布站阵形的仿真结果

Fig.3 Simulation results of five sensor layout patterns

表 1 五种布站阵形的仿真结果(整个区域)

Table 1 Simulation results of five sensor layout patterns (whole region)

布站阵形	E 的平均值	E 的均方差	布站阵形	E 的平均值	E 的均方差
L	2.784	1.521	口	2.674	0.501
	2.937	0.666	田	2.733	0.363
U	2.664	0.544			

表 2 五种布站阵形的仿真结果(关注区域)

Table 2 Simulation results of five sensor layout patterns (region of interest)

布站阵形	E 的平均值	E 的均方差	布站阵形	E 的平均值	E 的均方差
L	1.260	0.041	口	1.450	0.008
	1.783	0.025	田	1.513	0.048
U	1.659	0.005			

差来看, U 字型 and 口字型结构变化较平稳, 田字型结构变化较剧烈, 出现这种情况的原因是, 田字型中间添加的十字型影响了结构的连续性。

通过上述分析, 可以总结出如下结论:

(1) 布站阵形的选择, 需要根据试验的具体情况决定。

(2) 布站方案倾向于考虑整个落区的观测结构, 尽量避免使用 L 型布站, 推荐采用 U 字型、口字型、田字型; 当倾向于考虑关注区域的观测结构时, L 型结构最好, ||型最差, 因此, 尽量避免使用 ||型布站。

(3) 当落区环境较差, 不易于布设过于复杂的图形时, 可选择 U 字型或口字型。

2.2 探测器数量对观测结构的影响

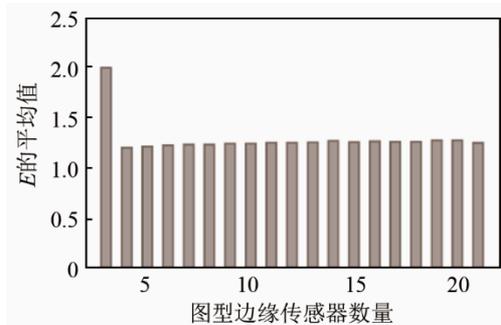
模拟一组数据, 在 $0 < x < 2000 \text{ m}$, $0 < y < 2000 \text{ m}$ 范围内, 以网格进行划分, 间隔 10 m , 网格交叉点处作为弹丸落点, 其中, $400 \text{ m} < x < 1400 \text{ m}$, $400 \text{ m} < y < 1400 \text{ m}$ 被设定为关注区域。采用 L 型布站, 在每条边上逐步增加探测

器数量，设每条边探测器数量为 k 。分别计算整个区域和关注区域中的落点，结果如图 4 所示。

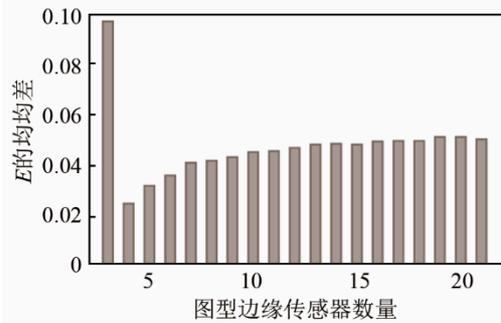
不难看出，当 $k=2$ 时， E 的平均值和均方差均较大，即此时的结构最差。当 $k=3$ 时， E 的平均值和均方差明显降低，随着探测器数量的增加，图形结构变化趋于平缓。对于整个区域， E 的均方差逐

渐减小，直到 $k=15$ 时，趋于平缓；对于关注区域， E 的均方差在 $k=2$ 时最大，然后迅速减小，随着探测器数量的增加， E 的均方差逐渐增大，直到 $k=18$ 时，趋于平缓。

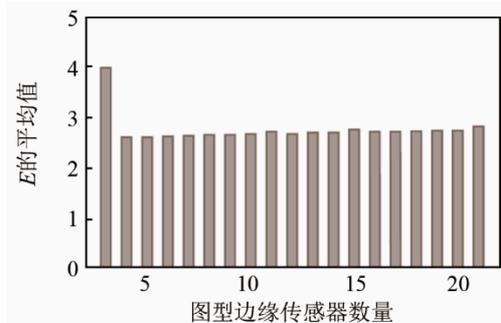
采用口字型布站，用同样的方式进行计算，得出的结果如图 5 所示。



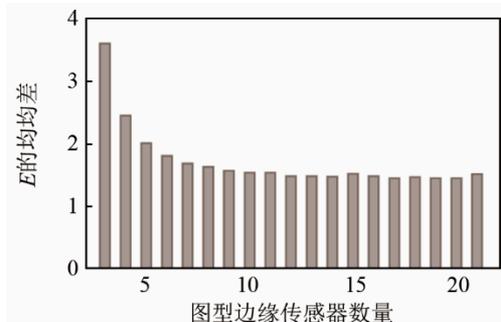
(a) 关注区域 E 的平均值



(b) 关注区域 E 的均方差

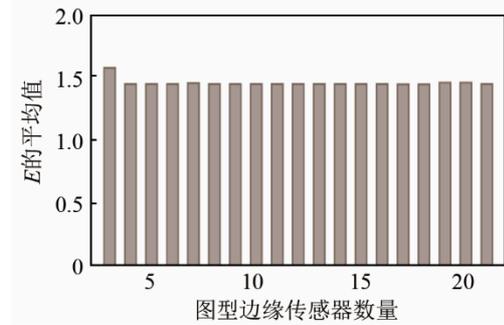


(c) 整个区域 E 的平均值

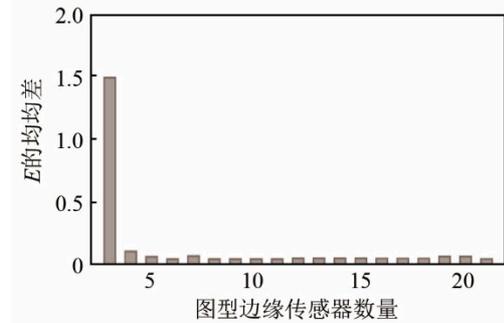


(d) 整个区域 E 的均方差

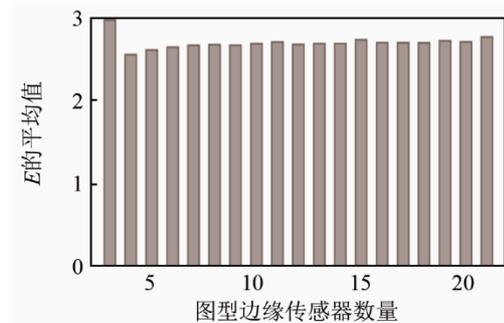
图 4 L 型布站阵形受探测器数量的影响
Fig.4 The influence of the number of sensors on the "L" type sensor layout pattern



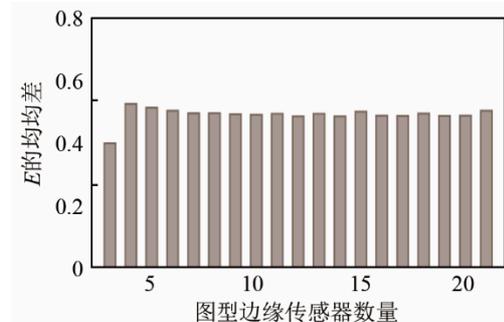
(a) 关注区域 E 的平均值



(b) 关注区域 E 的均方差



(c) 整个区域 E 的平均值



(d) 整个区域 E 的均方差

图 5 口字型布站阵形受探测器数量的影响
Fig.5 The influence of the number of sensors on the "口" type sensor layout pattern

可以看出,对于整个区域,当 $k=2$ 时, E 的平均值最大,而均方差最小。当 $k=3$ 时, E 的平均值稍有下降,随着探测器数量的增加,图形结构变化趋于平缓;当 $k=3$ 时, E 的均方差相对于 $k=2$ 时有所提高,随着探测器数量的增加, E 的均方差略有下降,直到 $k=8$ 时,趋于平缓。对于关注区域,当 $k=2$ 时, E 的平均值和均方差最大,当 $k=3$ 时, E 的平均值略有降低,随着探测器数量的增加,趋于平缓,而 E 的均方差在 $k=2$ 时最大,当 $k=3$ 时, E 的均方差迅速降低,随着探测器数量的增加,趋于平缓。

通过上述分析,可以总结出如下结论:

(1) 探测器的布站数量,需要根据试验的具体情况决定。

(2) 不同的布站阵形,探测器数量对观测结构的影响是不同的。

(3) 当L字型布站时,每条边应布设至少3个探测器,当布设超过10个以后,再增加探测器数量,对测试结果不再产生影响。

(4) 当口字型布站时,每条边应布设至少3个探测器,当布设超过5个以后,再增加探测器数量,对测试结果不再产生影响。

3 试验算例与分析

3.1 布设图形对定位精度影响

为了进一步验证本文方法的有效性,设计了一个模拟试验的场景,采用爆竹代替弹丸产生声源,探测器选型一致,可假设时延估计精度一致。试验当天天气晴朗,空气湿度较低,无风,在一块相对平坦的场地,分别以L型、U字型、||型、口字型、田字型五种方式布设探测器阵列,间隔为100m,在每个阵列内部均匀放置15个爆竹,在外部均匀放置10个爆竹,用北斗定位设备精确测量其位置坐标,定位精度为2cm。依次点燃爆竹,采集声波数据,并采用1.1小节的计算方法对爆竹位置进行定位解算,将解算结果与北斗设备的测量结果进行对比,结果如表3所示。

表3中均方根误差采用贝塞尔公式进行计算,其计算公式为

$$\begin{cases} M_x = \sqrt{\frac{(\Delta x \Delta x)}{n-1}} \\ M_y = \sqrt{\frac{(\Delta y \Delta y)}{n-1}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: M_x , M_y 分别为 x , y 方向上的均方根误差, Δx , Δy 为解算结果与北斗测量结果在 x , y 方向上

表3 布设图形对定位精度影响
Table 3 The effect of the sensor layout pattern on positioning accuracy

布站图形	M_x/m		M_y/m	
	阵列内部	阵列外部	阵列内部	阵列外部
L型	1.31	7.12	1.18	5.15
U型	2.18	3.28	2.58	3.28
型	3.12	3.07	2.78	3.20
口型	1.53	2.77	1.56	2.66
田型	1.43	1.90	1.31	1.7

的坐标差, n 为声源个数。

从表3可以得出,当声源位于阵列内部时(即位于关注区域内),L型的误差较小,||型及U字型的误差较大;当声源位于阵列外部时,L型的误差较大,其他四种方式相差较小。这与2.1小节的分析结果一致。

3.2 探测器数量对定位精度影响

文章选用L字型布站方式进行验证,图形的每条边探测器数量 k 分别为2、3、5、8、10,试验方法和步骤与3.1小节一致,结果如表4所示。

表4 探测器数量对落点坐标精度的影响
Table 4 The effect of the number of sensors on positioning accuracy

探测器数量	M_x/m		M_y/m	
	阵列内部	阵列外部	阵列内部	阵列外部
2	3.03	8.20	2.73	10.01
3	1.33	2.18	1.21	1.70
5	1.16	2.25	1.21	2.11
8	1.05	2.03	1.40	2.21
10	1.21	1.91	1.33	1.85

从表4可以得出,当声源位于阵列内部时(即位于关注区域内), $k=2$,误差较大,随着探测数量的增加,定位精度明显提高;当声源位于阵列外部时, $k=2$,误差达到10m,当 $k=3$ 时,精度明显提高,在此基础上进一步增加探测器数量,则精度无明显提高,这与2.2小节的分析结果一致。

4 结论

本文提出了一种度量布站阵形结构优劣的方法。该方法基于观测向量组空间几何特性分析理论,从探测器组成的布站阵形和布设探测器的数量两个方面来度量布站方案的优劣,可为设备布站方案设计提供理论依据,能有效提高设备的测试精度和使用效率。

参 考 文 献

- [1] 于国栋, 宋永志, 王春阳, 等. 两种不同的声源定位算法研究[J]. 声学技术, 2016, **35**(5): 467-471.
YU Guodong, SONG Yongzhi, WANG Chunyang, et al. Research on two different sound source localization algorithms[J]. Technical Acoustics, 2016, **35**(5): 467-471.
- [2] 陈连, 于国栋, 宋永志, 等. 声源定位算法的精度分析[J]. 测绘科学, 2016, **41**(5): 21-25.
CHEN Lian, YU Guodong, SONG Yongzhi, et al. Precision analysis based on acoustic positioning algorithm[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, **41**(5): 21-25.
- [3] 张亚辉, 王玉龙, 刘皓挺, 等. 一种基于终点弹道气动噪声及落地声分析的未爆弹探测技术[J]. 兵工学报, 2015, **36**(8): 1525-1532.
ZHANG Yahui, WANG Yulong, LIU Haoting, et al. UXO detection based on terminal ballistics acoustic signal analysis of aerodynamic noise and landing sound[J]. Acta Armamentarii, 2015, **36**(8): 1525-1532.
- [4] 于国栋, 宋永志, 王世赞. 稳健估计下的声源定位最小二乘算法[J]. 应用声学, 2017, **36**(1): 26-31.
YU Guodong, SONG Yongzhi, WANG Shizhan. Least squares algorithm for sound source localization based on robust estimation[J]. Applied Acoustics, 2017, **36**(1): 26-31.
- [5] 于国栋, 吴玉宏, 宋永志. 模拟退火遗传算法在多声源定位中的应用[J]. 应用声学, 2017, **36**(2): 116-121.
YU Guodong, WU Yuhong, SONG Yongzhi. Genetic simulated annealing algorithm and its application in the multi-sound source localization[J]. Applied Acoustics, 2017, **36**(2): 116-121.
- [6] 于平, 吴波, 谢胜. 多冲击声源定位算法[J]. 声学技术, 2012, **31**(6): 619-623.
YU Ping, WU Bo, XIE Sheng. Positioning algorithm for multi-impact sound sources[J]. Technical Acoustics, 2012, **31**(6): 619-623.
- [7] 冯遵德, 卢秀山, 郭英. 测距空间交会测量模式中交会图形优劣的诊断[J]. 测绘通报, 2004(12): 24-26.
FENG Zunde, LU Xiushan, GUO Ying. Diagnosis of figure advantage in space intersecting model of distance measurement[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2004(12): 24-26.
- [8] 颜世建. 关于条件数的一个定理[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2004, **27**(4): 25-27.
YAN Shijian. A theorem for condition number[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2004, **27**(4): 25-27.
- [9] 卢秀山, 宁津生, 冯遵德, 等. 观测有效性的度量方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, **28**(2): 144-148.
LU Xiushan, NING Jinsheng, FENG Zunde, et al. Measure method to the effectiveness of observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, **28**(2): 144-148.