

基于声光阵列的炸高测量技术研究

王永, 宋玉贵

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

摘要: 针对炸高测量系统结构复杂、布阵繁琐、低信噪比下的炸高测量精度偏低的问题, 提出一种立体六元声光阵列的炸高测量方法; 详细介绍了该方法的炸高测试原理及结构组成, 应用 Matlab 建立了声光阵列结构的数学模型, 深入分析了该结构的测量原理和最佳测量高度; 仿真验证结果表明: 该方法适用于爆炸高度为 20~60 m 范围内的炸高测量, 测试时应保证爆炸声信号到达传感器的时延估计误差小于 20 μs 、声光信号到达基阵时延估计误差绝对值在 4 ms 范围内; 最终靶场实验结果表明: 在低信噪比的情况下, 采用立体六元声光阵列结合改进的广义二次互相关算法在最佳测量高度范围内的炸高测量精度达到 5%, 可以应用于靶场炸高测量。

关键词: 声光阵列; 炸高测量; 阵元间距; 时延估计; 广义二次互相关

Research on Burst Height Measurement Technology Based on Acousto-optic Array

WANG Yong, SONG Yugui

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Aiming at the problems of complex structure of the explosion height measurement system, cumbersome array layout, and low accuracy of the explosion height measurement under low signal-to-noise ratio, a three-dimensional six-element acousto-optic array method for the explosion height measurement is discussed. The test principle and structure composition of the method are introduced in detail, the mathematical model of the acousto-optic array structure is established by MATLAB, and the measurement principle and key performance of the structure are deeply analyzed. The simulation verification results show that the structure is suitable for the explosion height measurement within the range of 20~60 m. The test should ensure that the time delay estimation error of the explosion sound signal reaching the sensor is less than 20 μs , and the acousto-optic signal arrival time delay estimation error is absolute. The value is in the range of 4 ms; the final range experiment results show that: in the case of low signal-to-noise ratio, the three-dimensional six-element acousto-optic array combined with the improved generalized quadratic cross-correlation algorithm can achieve 5% of the height measurement accuracy within the best measurement height range, which can be applied to the shooting range measurement.

Keywords: acousto-optic array; explosion height measurement; array element spacing; time delay estimation; generalized quadratic cross-correlation

0 引言

炸高测量是现代武器效能评估的重要内容, 如末敏弹、榴弹和空爆弹的炸高, 就是衡量该类武器性能的重要指标之一。国内采用的炸高测量方法主要有 CCD 交汇测量法^[1]、卫星雷达测量法^[2]和大视场电视经纬仪测量法^[3-4], 此类测量方法虽然测试精度较高, 但是测量原理非常复杂, 成本高昂, 只局限于特定的武器系统, 而且测量时受气象和电子干扰的影响较严重。利用测量爆炸声源到传感器的到达时间差^[5-8] (TDOA, time difference of arrival) 来确定炸点的位置, 不仅可以快速确定炸点位置, 而且极大地降低了成本、提高了定位精度, 同时还具有隐蔽性。研

究基于无源被动式探测原理的空中炸点定位算法具有较好的理论意义以及很高的实际应用价值。张晓光^[9]等人提出一种基于四元十字麦克风阵声源定位系统, 该系统的定位坐标偏差在 7% 之内, 应用在炸高测量上无法满足要求。王洋^[10]等人提出的 3 个五元十字阵列的弹丸落点定位满足靶场对弹丸落点的全域定位精度要求, 其结构较复杂, 布局比较繁琐, 导致对测量距离要求比较高, 并且只是在理想环境下进行的仿真实验。

目前, 应用于靶场炸高测量的探测方式主要分为有源主动式定位和无源被动式定位两种^[11-12]; 其中, 有源式主动式定位技术是通过发射高功率的信号波来实现定位, 定位精度较差。而无源被动式定位系统是通过采集目标本

收稿日期: 2021-10-04; 修回日期: 2021-10-27。

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室项目(18JS047)。

作者简介: 王永(1996-), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事靶场光电仪器设计与测试方向的研究。

引用格式: 王永, 宋玉贵. 基于声光阵列的炸高测量技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(12): 138-144.

身发射的声光等信号来实现定位, 不需要跟踪武器弹药的飞行轨迹, 也不受被测目标特性以及电子干扰等影响, 定位精度高。当然, 基于无源被动式定位的声学测量技术也有需要改进的地方。例如, 使用单基阵麦克风阵列无法精确测量炸点高度, 采用多基阵测量炸点高度时, 结构比较复杂, 布阵繁琐费时, 并且需要进行数据融合, 增加了计算量。

针对上述问题, 本文提出一种基于立体六元声光阵列的新型炸高测量系统, 引入改进的广义二次互相关时延估计算法可以在低信噪比下准确获取 TDOA, 并根据列出的数学模型计算声源的高度, 实验结果表明, 该设计可以实现单基阵测量炸高, 并有效提高了时延估计的精度与抗噪性能。

1 立体六元声光阵列定位原理

声源定位系统根据测量目标的不同要求采用不同的定位模型。当声源信号在二维平面上时, 只需确定目标在二维空间上的信息, 当声源信号在三维空间上时, 就需要使用比较复杂的立体定位模型来确定声源的位置^[13]。由数学原理可知, 若要在三维空间里确定一个点, 至少需要 3 个距离差, 4 个观测点。

本文主要研究远场三维空间中的炸高测量, 提出了一种立体六元声光阵列测量结构, 如图 1 所示, 该结构由一个声光组合传感器 (ML) 和 5 个声传感器 (Mic1—Mic5) 组成, 其中, 光传感器位于坐标原点处, 声传感器分别位于坐标轴上, 且距离原点距离为 d 。设待测炸点 S 的坐标为 (x, y, z) , 到声光组合传感器 ML 的距离为 r , 到声传感器 Mic1—Mic5 的距离分别记为 r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 。

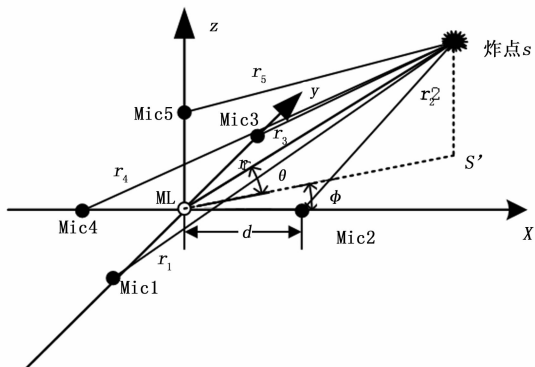


图 1 立体六元声光阵列模型

根据声波到达各个声传感器的时延差可以列出以下方程组:

$$\begin{cases} x^2 + (y+d)^2 + z^2 = r_1^2 \\ (x-d)^2 + y^2 + z^2 = r_2^2 \\ x^2 + (y-d)^2 + z^2 = r_3^2 \\ (x+d)^2 + y^2 + z^2 = r_4^2 \\ x^2 + y^2 + (z-d)^2 = r_5^2 \end{cases} \quad (1)$$

$$r_i - r_1 = \tau_{1i} C, (i = 2, 3, 4, 5) \quad (2)$$

声波在空气中传播时, 声速 C 与环境温度 T 、压强 P 的关系为:

$$C = 331.45 \left[\left(1 + \frac{T}{273.15} \right) \left(1 + \frac{0.32P_w}{P} \right) \right]^{(1/2)} \quad (3)$$

式中, τ_{1i} 表示声源信号到 Mic1 和 Mici 之间的时延差, P_w 为相对湿度与对应温度饱和蒸汽压的乘积。

联立式 (1)、(2) 可得:

$$r_1 = \frac{C}{2} \cdot \frac{\sum_{i=2}^4 (-1)^i \tau_{1i}^2}{\sum_{i=2}^4 (-1)^{i+1} \tau_{1i}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x = \frac{r_1^2 - r_2^2}{4d} \\ y = \frac{r_1^2 - r_3^2}{4d} \\ z = \frac{r_1^2 + r_2^2 - 2r_3^2}{4d} \end{cases} \quad (5)$$

设 $A = \frac{\sum_{i=2}^4 (-1)^i \tau_{1i}^2}{\sum_{i=2}^4 (-1)^{i+1} \tau_{1i}}$, 整理方程可得炸点的方位角

φ 为:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{r_1^2 - r_3^2}{r_1^2 - r_2^2} \right) = \tan^{-1} \left(- \frac{\tau_{13} (A + \tau_{13})}{(\tau_{14} - \tau_{12})(A + \tau_{12} + \tau_{14})} \right) \quad (6)$$

炸点位置的俯仰角 θ 为:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{A(\tau_{14} + \tau_{12} - 2\tau_{15}) + \tau_{14}^2 - \tau_{15}^2 + \tau_{12}^2}{A(\tau_{14} - \tau_{12}) + \tau_{14}^2 - \tau_{12}^2 \sqrt{1 + (\tan\varphi)^2}} \right) \quad (7)$$

炸点到光传感器的距离 r 为:

$$r = V \cdot \frac{C \cdot \Delta t}{V - C} \approx C \cdot \Delta t \quad (8)$$

最终计算的炸点高度 h 为:

$$h = r \cdot \sin\theta + b_0 = C \cdot \Delta t \cdot \sin \left\{ \tan^{-1} \left(- \frac{\tau_{13} (A + \tau_{13})}{(\tau_{14} - \tau_{12})(A + \tau_{12} + \tau_{14})} \right) \right\} + b_0 \quad (9)$$

式中, Δt 为声光信号到达基阵的时延值, V 表示光在空气中传播的速度, b_0 为基阵原点到地面的距离。

2 声光阵列测量炸高误差分析

由第一节的数学模型可知, 炸点位于基阵中心的的俯仰角 θ 与时延估计值 τ_{1i} 有关, 通过测量爆炸火光与爆炸声音到达测量基阵的时延差 Δt 以及空气中的声速 C 便可以算出炸点距离 r 。最终通过公式 (9) 可以算出炸点高度 h 。因此, 影响声光阵列炸高测量精度的主要因素为时延 τ_{1i} 、爆炸声光信号到达基阵的时延估计值 Δt 和空气中的声速 C 。

使用 Matlab 软件^[14]仿真炸点位于阵元中心的俯仰角 θ 受阵元间距 d 以及时延 τ_{1i} 的影响程度。仿真过程中取测试

环境中的声速为 340 m/s, 炸点分布范围为 200 m * 200 m * 100 m; 由于信号采集卡的分辨率固定, 为了保证时延估计的有效性, 阵元间距不宜过小, 但若阵元间距过大, 会对系统的便捷性和可实现性产生一定的影响, 故仿真时选取的阵元间距在 0.6~3 m 范围内, 引入时延估计误差, 采用蒙特卡洛^[15]方式, 进行 300 次重复试验, 最终获得在不同阵元间距下, 时延估计误差导致的炸点俯仰角误差, 结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 在时延估计误差为 0 的情况下, 阵元间距导致的俯仰角误差最大不超过 1.2°, 随着阵元间距的增大, 俯仰角误差逐渐减小, 当阵元间距大于 2 m 时, 阵元间距导致的俯仰角误差下降很慢, 影响非常小; 时延估计误差范围为 (-30 μs, 30 μs) 时导致的俯仰角误差最大为 2.7°, 随着时延估计误差的减小, 导致的俯仰角误差急剧下降, 当时延估计误差范围在 (-20 μs, 20 μs) 时, 导致的俯仰角误差小于 0.7°, 影响较小; 因此使用该基阵测量炸高时, 尽量保证时延估计误差绝对值在 20 μs 范围内。

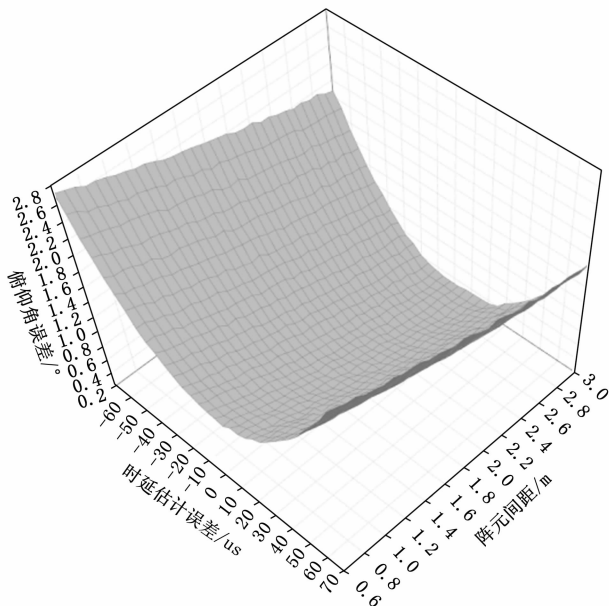


图 2 不同阵元间距下时延估计误差导致的俯仰角误差

采用上述同样的方法进行 150 次仿真试验, 图 3 是炸点的平面位置分别在 (10 m, 10 m)、(50 m, 50 m) 和 (100 m, 100 m) 处的炸点距离相对误差与炸点高度的关系。

由图 3 可知, 炸点平面位置为 (5 m, 5 m)、(50 m, 50 m) 和 (100 m, 100 m) 时, 离地距离较近的区域距离误差较大, 误差波动较大, 随着炸点高度的增加, 距离误差逐渐减小, 在高度为 30 m 时误差最小, 误差波动较稳定; 不同平面位置的炸点在 25~60 m 高度处的距离误差小于 4%, 误差相对较小。

图 4 为炸点位置到测量基阵原点的距离 r 受声速变化及

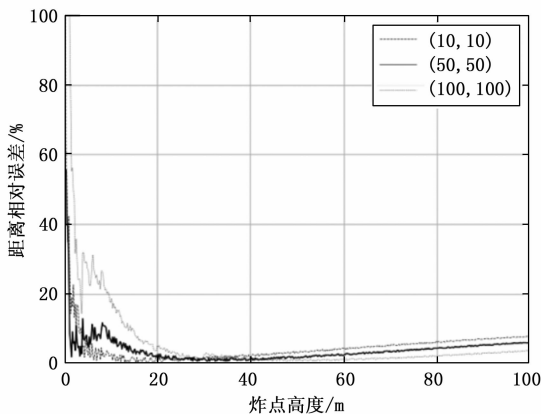


图 3 炸点距离相对误差与目标距离之间的关系

爆炸声光信号到达基阵的时延估计值 Δt 误差的影响图。

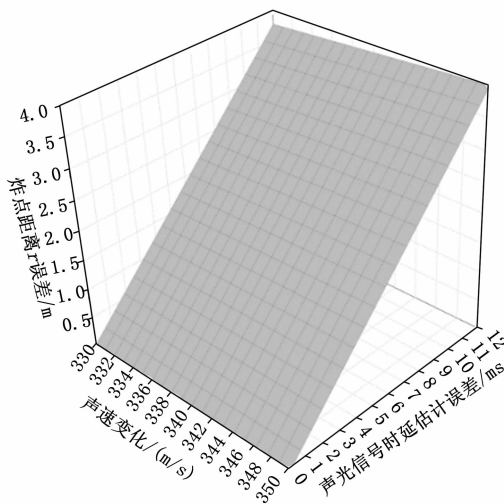


图 4 炸点距离误差与声速变化和声光信号时延估计误差的关系

由图 4 得, 炸点距离误差与声速变化和声光信号时延估计误差呈正比, 声速变化为 20 m/s 时导致得炸点距离误差不大于 0.5 m, 对炸点距离的影响较小; 声光信号时延估计误差为 12 ms 时导致的炸点距离误差范围为 3.8 m 附近, 对炸点距离影响较大。因此测量炸点距离时应该尽可能减小声光信号时延估计误差。

综上所述, 本文所提测试方法适用于高度范围为 25~50 m 的炸高测量, 最佳测量声信号时延估计误差绝对值不高于 20 μs, 声光信号到达基阵时延估计误差不高于 4 ms; 为了确保声光阵列炸高测量的精确度, 阵元间距不应小于 2 m。时延估计精度取决于时延估计算法的性能, 声光信号到达基阵时延估计误差的精度取决于硬件电路 (本文暂不讨论)。

3 时延估计算法

在声信号处理放大电路性能完全一样的情况下, 时延估计算法性能决定了时延估计的准确率。在众多的时延估

算法中, 通过广义互相关算法^[16-19] (GCC, generalized cross correlation) 分析的时延估计原理最简单, 运算量小、易于实现, 实际应用最为广泛。文献 [20] 提出相位变换加权广义互相关算法 (GCC-PHAT) 对于宽带准周期的语音信号, 相关峰尖锐, 时延估计效果最好, 但随着信噪比的下降, 估计性能下降很快。除此之外, 在对两路信号进行广义互相关计算时应用的快速傅里叶变换 (FFT, fast fourier transform) 存在栅栏效应, 降低了频谱的精度, 得到的时延值总是采样间隔的整数倍, 时延估计精度为 $TS/2^{[21]}$, 反应不出精确的信号频谱特性。

采用 MCZT (MCZT, modified chirp z transform) 算法代替 FFT 计算音频信号细化的频谱, 不仅可以提高频谱分辨率, 而且可以降低干扰噪声的影响, 通过计算两信号的自功率谱、互功率谱以及二次互功率谱, 采用相关峰精确插值^[22-24] (FICP, fine interpolation of correlation peak) 对二次互功率谱进行补零来提高频域采样率, 提高时域相关函数的分辨率, 接着对二次互相关函数做归一化运算和指数运算, 使得峰值突出, 易于读取峰值, 经过峰值检测最终得到时延估计值。算法流程如图 5 所示。

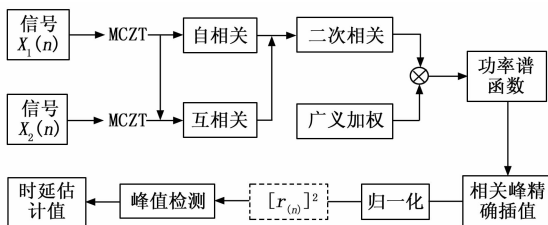


图 5 改进的广义二次互相关算法流程

图 5 中虚框内的公式可表示为:

$$g = [r(\hat{n})]^2 \tag{10}$$

式中, $r(\hat{n})$ 为功率谱函数经过 MCZT 逆变换得到的二次互相关函数的归一化, g 为 $r(\hat{n})$ 做指数运算的结果。

假设两个声传感器接收到的声信号的时域序列分别为 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$, 用 MCZT 变换分别计算两路信号的细化频谱 $X_1(k)$ 和 $X_2(k)$, 接着计算其自功率谱 $R_{11}(k)$ 和互功率谱 $R_{12}(k)$ 。

$$\begin{cases} X_1(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N_1}\right) \\ X_2(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_2(n) \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N_1}\right) \end{cases} \tag{11}$$

式中, $k=0, 1, \dots, N-1$ 。

自功率谱 $R_{11}(k)$ 为:

$$R_{11}(k) = X_1(k) X_1^*(k) \tag{12}$$

互功率谱 $R_{12}(k)$ 为:

$$R_{12}(k) = X_1(k) X_2^*(k) \tag{13}$$

二次相关处理可以进一步减少噪声的影响, 提高信噪比, 其互谱为:

$$R(k) = \varphi_{12}(k) R_{11}(k) R_{12}^*(k) \tag{14}$$

其中: $\varphi_{12}(k)$ 是加权函数, 该算法采用的加权函数为改进的 ECKART 加权函数, 表达式为:

$$\varphi_{12}(k) = \frac{1}{\sqrt{(R_{11}(k) R_{22}(k))}} \tag{15}$$

由于使用 ECKART 加权函数时需要预先知道噪声的自功率谱, 这在实际中很难获得, 因此本文对 ECKART 加权函数进行了改进, 由谱的共轭对称性可得 N_1 点的完整互谱 $R_1(k)$:

$$R_1(k) = \begin{cases} R(k) & k = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0 & k = N, N+1, \dots, N_1-N \\ R^*(N_1-k) & k = N_1-N+1, \dots, N_1-1 \end{cases} \tag{16}$$

为提高时域相关函数分辨率, 对频域互谱 $R_1(k)$ 补零加长, 周期延拓成 N_2 点的序列, 其分辨率提高 N_2/N_1 倍。

$$R_2(k) = \begin{cases} R(k) & k = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0 & k = N, N+1, \dots, N_2-N \\ R^*(N_2-k) & k = N_2-N+1, \dots, N_2-1 \end{cases} \tag{17}$$

式中, N 为初始信号序列长度, N_1 和 N_2 需满足 $N_2 \geq N_1 \geq 2N-1, n=0, 1, \dots, N_2-1$ 。

对 $R_2(k)$ 进行 IMCZT 逆变换得到二次互相关函数 $r(n)$:

$$r(n) = \frac{1}{N_2} \sum_{k=0}^{N_2-1} R_2(k) e^{2\pi jkn/N_2} \tag{18}$$

对二次互相关函数做归一化处理得:

$$\widehat{r(n)} = \frac{r_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(r_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i\right)^2 + \epsilon}} \tag{19}$$

式中, ϵ 是为了避免除数为 0 时所使用的微小正数, 取值为 0.000 001。

4 改进后的算法仿真分析

为了验证改进算法的时延估计性能, 利用 MATLAB 给两段时延估计值为 1 ms 声源信号添加不同信噪比 (SNR = -15 dB, -5 dB, 0 dB) 的随机噪声来进行模拟噪声实验, 分别使用广义二次互相关算法和改进的广义二次互相关算法分别对两路声源信号做互相关求其时延估计值, 通过相关结果的峰值来判断时延估计的精确度, 主峰越凸显, 其时延估计性能越好。图 6 为时延估计值为 1 ms 的两路声源信号。互相关函数结果如图 7~9 所示。

由图 6 可知, 当信噪比为 0 dB 时, 广义二次互相关和改进的广义二次互相关算法计算的相关函数都有明显的主峰, 时延估计的性能基本相同, 都可以精确地估算出时延值; 当信噪比为 -5 dB 时, 广义二次互相关获得的互相关函数图出现多个干扰峰, 主峰不够突出, 改进算法的相关函数图主峰依旧明显; 当信噪比为 -15 dB 时, 广义二次互相关

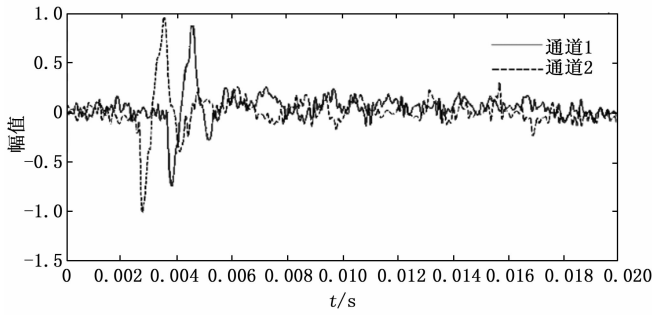


图 6 时延估计值为 1 ms 的两路声源信号

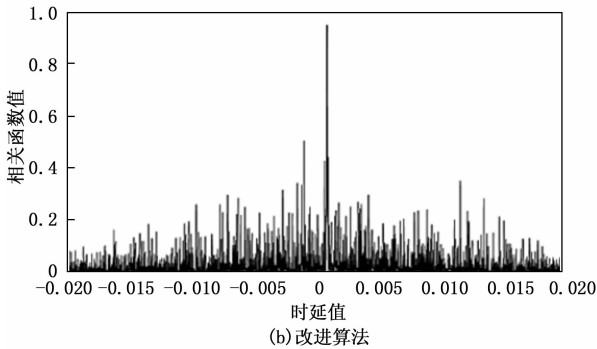
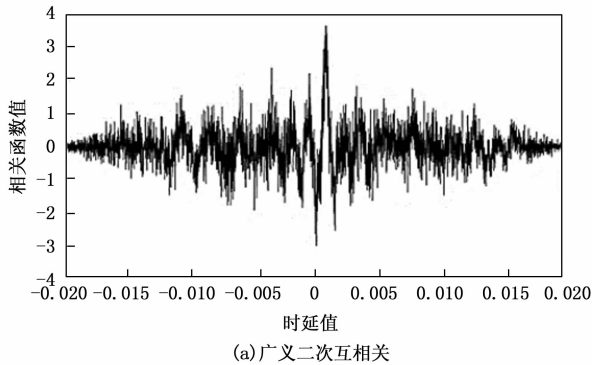


图 7 SNR = -15 dB 时两种算法的时延估计结果

算法的真实峰值已经被淹没，而使用改进的广义二次互相关算法获得的互相关函数仅出现了少许干扰峰，最大干扰峰值不到主峰值的 1/2，主峰依然很明显。两种算法分别不同信噪比下获得的 10 次时延估计均值如表 1 所示。

表 1 不同信噪比下的时延估计值

SNR/dB	不同算法计算的时延估计值/ms			
	广义二次互相关	时延绝对误差/ms	改进算法	时延绝对误差/ms
-15	1.062	0.062	1.027	0.027
-10	0.953	0.047	0.981	0.019
-5	1.031	0.031	1.016	0.016
0	1.018	0.018	1.010	0.010
5	1.013	0.013	1.006	0.006
10	1.010	0.010	1.000	0.000
15	1.000	0.000	1.000	0.000

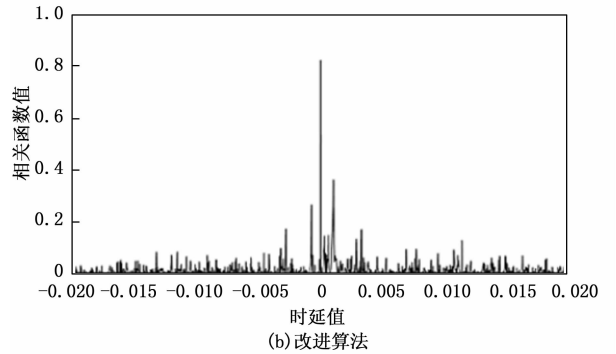
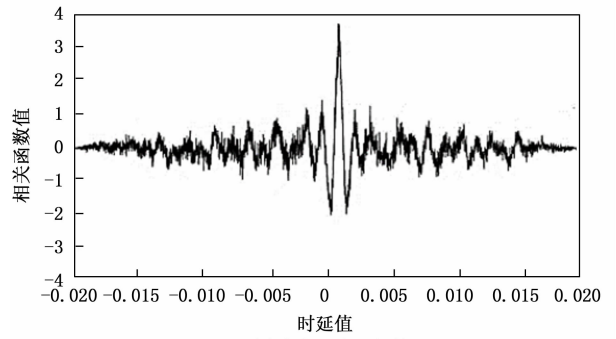


图 8 SNR = -5 dB 时两种算法的时延估计结果

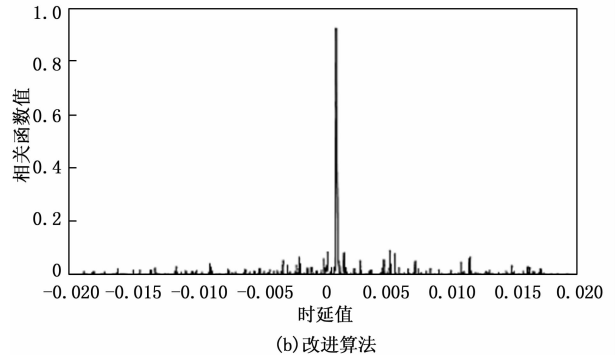
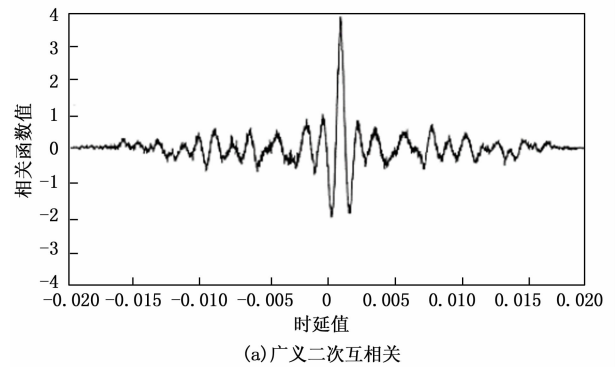


图 9 SNR = 0 dB 时两种算法的时延估计结果

由表 1 可知，相比广义二次互相关算法，改进算法在低信噪比情况下的时延估计性能明显提升，当 SNR 大于 -10 dB 时，时延估计误差小于 20 μ s，该算法可以满足立体六元声光阵列在低信噪比的情况下具有较高的俯仰角测试精度。

为了进一步验证声光阵列结构的实用性以及改进后的广

表 2 声源高度测量实验数据

实验编号	全站仪所测炸高/m	声光阵列所测炸高/m	炸高相对误差/%	全站仪所测测俯仰角/(°)	声光阵列所测俯仰角/(°)	俯仰角相对误差/%	全站仪所测炸点距离/m	声光阵列所测炸点距离/m	炸点距离相对误差/%
1	3.27	3.71	13.456	22.881	22.414	2.041	8.41	9.73	15.696
2	9.16	10.24	11.748	28.560	29.066	1.773	19.16	21.07	9.968
3	15.26	16.25	2.490	27.178	27.842	2.443	33.41	35.00	4.769
4	21.42	20.73	3.221	39.326	38.704	1.582	33.80	33.15	1.923
5	27.51	28.52	4.871	35.520	36.284	2.150	47.35	48.19	1.775
6	33.14	31.53	4.858	41.605	42.415	1.947	49.91	46.75	1.825
7	40.21	40.65	1.094	48.449	47.689	1.568	53.73	54.97	2.303
8	48.08	48.93	1.776	53.961	52.719	2.301	59.62	61.50	3.160
9	54.81	55.78	1.770	46.896	45.903	2.117	75.07	77.63	3.409
10	61.54	61.92	2.237	44.481	43.519	2.162	87.83	91.37	4.027

义互相关算法的有效性, 在空旷的户外对声光阵列以及算法进行炸高测量实验验证, 声光阵列实物如图 10 所示。

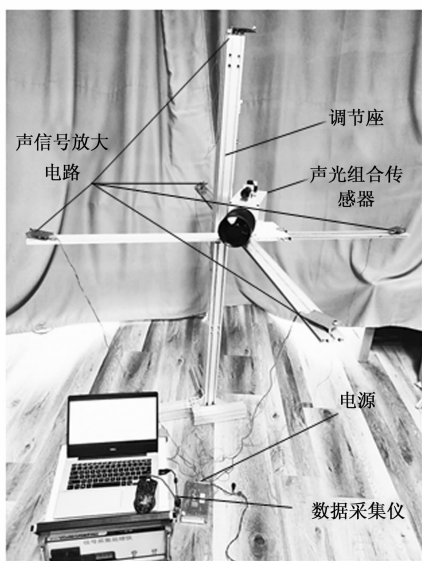


图 10 声光阵列实物图

以全站仪测量值作为炸点高度得真值, 为了避免因全站仪的不确定因素导致的实验结果存在误差, 故选用两套全站仪同时测量炸点高度值取其平均值, 在同一环境下使用声光阵列测量炸点高度, 阵元间距设为 2.2 m, 数据采集卡的采样频率设置为 1 MHz, 采样位数为 16 位, 采样点数设为 1×10^6 个, 选取 10 个不同高度的位置进行炸高测量, 每个位置做 3 次试验取平均值, 最终测量的炸点的俯仰角及高度等数据如表 2 所示。

对表 2 数据进行分析可知, 使用立体六元声光阵列测量炸高范围为 (20 m, 60 m) 的炸点距离误差小于 4%, 与上述仿真结果一致; 同时该基阵测试的声源位置的俯仰角相对误差小于 2.5%、炸高测试误差小于 5%, 实验验证本文所提立体六元声光阵列可以有效的应用于炸高测量中。

5 结束语

本文提出了一种基于声光阵列的炸高测量技术, 该方

法通过测量爆炸声音到达不同传感器的声程差和声光信号到达测量基阵的时延估计值, 实现单基阵测量炸点高度。经仿真分析, 该声光阵列适用于测量高度范围为 20~60 m 内的炸点高度, 测量时应确保阵元间距大于 2 m, 时延估计误差小于 $20 \mu\text{s}$, 声光信号到达基阵时延估计误差绝对值不高于 4 ms。

除此之外, 本文对广义二次互相关算法进行了改进, 通过理论分析与实验验证了改进后的广义二次互相关算法在高信噪比的环境下可以得到精确的时延值, 在低信噪比下, 该算法获得时延估计相对误差小于 3%, 相比改进前时延估计提高了一倍, 最终实现炸高测量偏差在 5% 之内, 具有较高的测试精度, 可以应用于靶场炸高测量中。

参考文献:

- [1] 吕培森. 弹丸近地炸点高度测试技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2012.
- [2] ZAIDI A Z, VIGNUDELLI S, et al. Indus river water level monitoring using satellite radar altimetry [J]. *Advances in Space Research*, 2020 (44): 641-651.
- [3] 吴浩, 张勇, 王伟明, 等. 大间距空间角度测量技术进展及分析 [J]. *激光与红外*, 2018, 48 (2): 234-241.
- [4] 林嘉睿, 郑继贵, 张皓琳, 等. 激光跟踪仪测角误差的现场评价 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33 (2): 463-468.
- [5] LIU ZH X, HU D X, ZHAO Y J, et al. Computationally efficient TDOA, FDOA and differential Doppler rate estimation algorithm for passive emitter localization [J]. *Digital Signal Processing*, 2020, 96 (96): 102598.
- [6] ZHAO K, ZHAO T T, ZHENG Z Q, et al. Optimization of time synchronization and algorithms with TDOA based indoor positioning technique for internet of things [J]. *Sensors*, 2020, 20 (22): 6513-6528.
- [7] 张得虎. 基于麦克风阵列的声源定位算法研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [8] 郭俊峰. 基于麦克风阵列的小型无人机侦测及定位方案设计 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2018.

- [9] 张晓光, 吕海峰, 吕传茂, 等. 四元十字麦克风阵声源定位算法研究 [J]. 中国测试, 2020, 46 (2): 96-102.
- [10] 王洋, 张鸿涛, 纪春佳. 三角形五元十字混合阵列弹丸落点定位方法 [J]. 探测与控制学报, 2020, 42 (4): 92-97.
- [11] 邢天璋, 谢彬彬, 杨康, 等. 一种利用无线信号的被动式多目标定位系统 [J]. 西安电子科技大学学报, 2018, 45 (1): 93-98.
- [12] 王小雪. 基于无线传感器网络的无源被动式目标定位研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- [13] 张晓光, 吕海峰, 吕传茂, 等. 四元十字麦克风阵声源定位算法研究 [J]. 中国测试, 2020, 46 (2): 96-102.
- [14] 张先贺. 多阵列音频信号的同步采集及定位算法研究及实现 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [15] FANG J, SUN Y N. Improved Monte Carlo method to study road reliability [J]. Science Discovery, 2020, 8 (2): 32-36.
- [16] 简泽明, 彭阳, 高泽平, 等. 基于改进二次相关算法的声源定位仿真研究 [J]. 压电与声光, 2021, 43 (2): 244-247, 293.
- [17] 唐浩洋, 陈子为, 黄维. 基于麦克风阵列的 GCC 时延估计 (上接第 130 页)
- 网络模型若要应用到实际场景中, 需要采集更多的数据集来训练网络模型, 并通过模型压缩等方式提高神经网络的实时性。另外, 录取贴合实际应用需求的复杂场景下的雷达回波数据, 通过后续的研究验证神经网络模型对动态变化的强杂波的处理的稳定性。
- 参考文献:**
- [1] MAHAFZA B R, WINTON S C, ELSHERBENI A Z. handbook of radar signal analysis [M]. CRC Press, 2021.
- [2] 马林. 雷达目标识别技术综述 [J]. 现代雷达, 2011, 33 (6): 1-7.
- [3] 王璐璐, 王宏强, 王满喜, 等. 雷达目标检测的最优波形设计综述 [J]. 雷达学报, 2016, 5 (5): 487-498.
- [4] 简涛, 何友, 苏峰, 等. 高距离分辨率雷达目标检测研究现状与进展 [J]. 宇航学报, 2010, 31 (12): 2623-2628.
- [5] 许述文, 白晓惠, 郭子薰, 等. 海杂波背景下雷达目标特征检测方法的现状与展望 [J]. 雷达学报, 2020, 9 (4): 684-714.
- [6] 许道明, 张宏伟. 雷达低慢小目标检测技术综述 [J]. 现代防御技术, 2018, 46 (1): 148-155.
- [7] 汪洋. 毫米波雷达目标检测及恒虚警处理研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [8] 邹成晓, 张海霞, 程玉堃. 雷达恒虚警率检测算法综述 [J]. 雷达与对抗, 2021, 41 (2): 29-35.
- [9] 张迪飞, 张金锁, 姚克明, 等. 基于 SVM 分类的红外舰船目标识别 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45 (1): 179-184.
- [10] 邱锡鹏. 神经网络与深度学习 [J]. 中文信息学报, 2020, 34 (7): 4.
- [11] 张荣, 李伟平, 莫同. 深度学习研究综述 [J]. 信息与算法分析 [J]. 计算机系统应用, 2019, 28 (12): 140-145.
- [12] 尚楚翔, 滕鹏晓, 吕君, 等. 大气次声源定位算法及误差分析 [J]. 声学技术, 2020, 39 (3): 360-365.
- [13] 周鹤峰, 田章福, 曾畅, 等. 基于广义互相关算法的时延估计改进 [C] //2020 中国西部声学学术交流会议论文集, 2020: 450-452.
- [14] 张宇, 严天峰. 基于 SCOT 双加权二次相关的时延估计算法 [J]. 全球定位系统, 2018, 43 (5): 53-57.
- [15] 马少春, 刘庆华, 黄灵鹭. 基于相关峰插值的五元十字阵被动声定位算法 [J]. 探测与控制学报, 2014, 36 (5): 94-98.
- [16] 韩洁, 吴长奇. 相关峰插值的二次相关锐化时延估计方法 [J]. 信号处理, 2014, 30 (10): 1241-1244.
- [17] 王啸臻, 王兆魁, 张育林. 基于相关峰细化时延估计的舱内服务机器人发话人定位研究 [J]. 上海航天, 2018, 35 (5): 10-17.
- [18] 茅惠达, 张玲华. 声源定位中广义互相关时延估计算法的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52 (22): 138-142.
- [19] 控制, 2018, 47 (4): 385-397, 410.
- [20] WANG L, TANG J, LIAO Q. A study on radar target detection based on deep neural networks [J]. IEEE Sensors Letters, 2019, 3 (3): 1-4.
- [21] 陈立福, 武鸿, 崔先亮, 等. 基于 CNN 的 SAR 图像目标和场景分类算法 [J]. 雷达科学与技术, 2018, 16 (6): 627-632.
- [22] 陈欣, 陈明逊. 基于增强数据集卷积神经网络的 SAR 目标识别方法 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2020, 34 (1): 86-93.
- [23] LIU N B, XU Y A, TIAN Y H, et al. Background classification method based on deep learning for intelligent automotive radar target detection [J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 94: 524-535.
- [24] 王鹏, 张君毅, 赵国庆. 基于卷积神经网络的调制识别新方法 [J]. 无线电工程, 2019, 49 (6): 453-457.
- [25] 胡新辰. 基于 LSTM 的语义关系分类研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [26] 龚千健. 基于循环神经网络模型的文本分类 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [27] 杨丽, 吴雨茜, 王俊丽, 等. 循环神经网络研究综述 [J]. 计算机应用, 2018, 38 (s2): 1-6, 26.
- [28] 张有健, 陈晨, 王再见. 深度学习算法的激活函数研究 [J]. 无线电通信技术, 2021, 47 (1): 115-120.
- [29] 徐彬, 陈渤, 刘家麒, 等. 采用双向 LSTM 模型的雷达 HRRP 目标识别 [J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46 (2): 29-34.
- [30] 杨星鑫, 吕泽均. 基于 LSTM 的无人机轨迹识别技术研究 [J]. 现代计算机, 2020 (5): 18-22, 25.