

文章编号: 2096-1618(2019)06-0582-05

人影炮弹炸点声测定位研究

刘文博, 文 斌, 陆士金
(成都信息工程大学, 四川 成都 610225)

摘要:人影炮弹在高空爆炸时会产生爆炸声波,通过对人影炮弹爆炸特性的分析,讨论了由分布式声传感器远距离检测声波的可行性,提出了被动声测定位方法在远距离的情况下,通过分布式五元阵列定位方法对人影炮弹高空爆炸点进行定位分析,经过理论分析和实验仿真证明了该方法可以对高空炸点进行有效的定位。

关键词:声源定位;人影炮弹;分布式五元阵

中图分类号:TN912.16

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2019.06.004

0 引言

人工影响天气是预防和减轻灾害、保障人民生命财产安全、促进生态治理、合理开发利用气候资源的重要科技手段。高炮系统是当前人工影响天气中使用最广泛的装置,其主要用于将人影炮弹发射到高空中的降雨云层和冰雹云中,以达到增雨、防雹的目的^[1]。中国是人影作业大国,在人影作业频次、点位以及时长等方面均居于世界首位,但是作业效果却缺乏有效的评估。然而在当前的人影作业中,人影炮弹定位主要依靠地面高炮系统中的方位角和俯仰角检测装置,通过几何模型推导而出,由于炮弹在高空会发生空中漂移,导致所测的爆炸点与实际爆炸点之间存在的偏差无法确知,测得的往往不是真正意义上的炸点,这样就会导致哑弹数量无法统计,并且找回难度大,存在很大的安全威胁^[2-3]。为了减少不必要的损失和有效地评估人影作业效果,有必要确定实际作业时所发射炮弹的高空爆炸点。炮弹爆炸时会产生强烈的声音信号,在不同距离检测这些信号的变化,表现在信号上是频域和时域幅值组成的不同,因此可以通过声测技术对炮弹爆炸点进行定位^[4]。使用声测技术时不需要对炮弹本身进行改造,也不需要向外辐射信号,只要声传感器能检测到爆炸声信号,然后通过一系列的数据处理分析和计算就可以完成炮弹爆炸点定位。同时,声测设备具有运输简单、布站灵活、不易受环境影响等特点,能够适应多种条件下的测试任务需要^[5]。通过地面声传感器阵列对高空中人影炮弹爆炸声波进行探测,然后进行降噪、滤波处理,并基于 TDOA 原理,即可以估计出炮弹在高空中的实际爆炸点。

1 人影炮弹爆炸波声强分析

中国于 20 世纪 70 年代后期开始使用三七高炮进行人工增雨防雹作业,经过 30 多年的发展,形成了以三七高炮为主的地面作业体系。三七高炮作业现场具有噪声大、震动强两个极为显著的特点。它的最大射击高度为 6700 m,最大射程为 8500 m。由于人影炮弹炸点的高度一般在 4500 ~ 6500 m,而远距离声测定位背景噪声会很强,声源目标发出的声波经过远距离传输衰减后,声传感器要在有背景信号干扰的情况下对声波进行有效的检测^[6]。

1.1 人影炮弹爆炸过程的分析

中国目前的人工影响天气作业中,1965 式高射机关炮是最主要使用的高炮系统。炮弹全长为 382.72 ~ 385.85 mm,炮弹质量为 1.406 kg,弹丸质量为 0.732 kg,弹丸内装有高能黑铝炸药,分上下两个药柱(两药柱中间装有 1 g 压装碘化银),用来使弹丸爆炸,炮弹燃烧室内中心温度一般可达 3000 ℃,炮弹燃烧室内燃气压一般在 7 ~ 30 MPa^[7]。

1.2 声波传播距离处的声压级判定

声压是声音信号在传播过程中与大气压相互作用时产生的特有压力,用符号 P 表示,单位是帕(Pa)^[8]。由于个体对声音强弱辨别的差异,使声压值不能很好地表示声音的强弱变化,但是它的对数与声音强弱成正比,因此为更好地表示,通常用声压的对数——声压级 L_p 表示声音信号的大小,单位是分贝(dB),定义为

$$L_p = 20 \lg \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (1)$$

式中: P ——爆炸时产生的超压; P_0 ——基准声压($P_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa)。

4500 ~ 6500 m 高处的大气压约为 0.07 ~ 0.11 MPa,在此忽略不计,将7 MPa代入(1)式得出炸点处声压级 L_p 为230.88 dB。声波在传输过程中,由于会受到传播距离以及自身声波频率属性的影响,声波会发生衰减,包括距离衰减和吸收衰减。其中吸收衰减除了会受到大气特性影响所引起的衰减外,还包含其他环境因素引起的衰减。图 1 为炮弹爆炸声波在不同高度处的吸收衰减变化图。

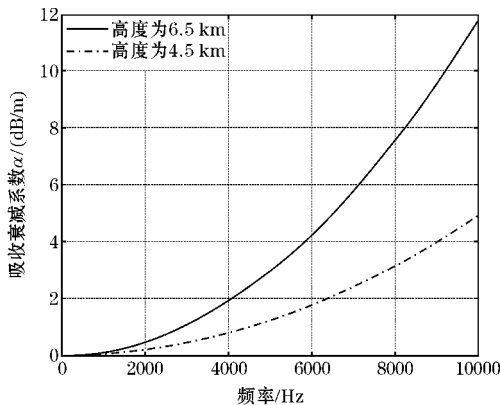


图 1 不同高度处声波的衰减变化

炮弹爆炸过程中,爆炸物在爆炸的瞬间产生高压,形成冲击波,爆炸波在向外传播的过程中,最初是以冲击波的形式传播。随着传播距离的增大,冲击波迅速衰减,当冲击波的速度接近于声速时,爆炸冲击波便以爆炸声波的形式传播,冲击波转化为声波的界限一般为170 dB左右。

冲击波在空气传播中的衰减公式为

$$L_1 = L_p - 20 \lg \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \quad (2)$$

声波在空气传播中的衰减公式为

$$L_2 = L_p - 24 \lg \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \quad (3)$$

式中:

- r_1 ——测点到声源的距离;
- r_2 ——测点到声源的初始距离;
- L_p ——炸点处的声压级;
- L_1 ——冲击波处的声压级;
- L_2 ——到达声波处的声压级。

首先计算声压级到达170 dB处的距离 r_1 ,根据三七炮弹的口径以及所携带的黑铝炸药质量,假设弹丸壳体中的燃气体压力达到7 MPa时, $r_2 = 0.044$ m,此时 $L_1 = 170$ dB,代入式(2)得 $r_1 = 15.05$ m,计算声波到达6.5 km处的声压级,此时 $r_1 = 6.5$ km, $r_2 = 15.05$ m,代入式(3)得 $L_2 = 117.29$ dB,经测得人影炮弹在距离6.5 km处的爆炸声波经过衰减后不低于115 dB,因此声传感器可以检测到该声波信号^[9]。

2 声测定位方法研究

声学测量定位是利用声学传感器装置来获取目标声源的声音信号,对其进行加工处理,然后计算出声音信号到达不同传感器的时间差,并通过时延估算法估计目标位置。因此,声学传感器阵列的布局方式对于基于时延估算法的声测定位技术是非常重要的。目前常被采用的声传感器阵列有:线阵、面阵、立体阵等。其中线阵至多测量二维参量故其不适于三维目标定位。立体阵定位效果最好,但是原理较复杂,成本较高。面阵可以定位由阵列平面界定的半空间中的目标声源,也可以定位存在于整个空间中的目标声源,同时平面阵构成十分简单,而且具有分维特性,因而成为目前被广泛采用的阵型结构^[10]。由于是对空中目标进行定位,且声测定位装置要在地面铺设,基于要求,采用平面阵便可以实现。

对存在于三维空间中的目标声源进行定位时,至少需要获得4个时延估计,因此为了实现目标定位,需要至少4个声学传感器来对其实现定位。近年来由于平面十字阵具有良好的声音定位特性,因此成了目前较为常见的声音定位算法之一^[11]。考虑到人影炮弹发射地点会在野外随机选择,这样对阵列布局的要求就高一些,对于地理环境的限制,标准的十字阵阵列布阵就会有很大困难。如果改变十字阵中阵元间的角度,使其不再是固定的90°夹角,这样布阵就相对容易一些。同时结合平面五元十字阵的特点,提出一种分布式五元阵列定位方法特别来针对人影炮弹定位,在不增加硬件成本的情况下,对其进行音源三维定位。

分布式五元阵定位原理如图2所示, O 点是中心阵元,坐标(0,0,0),4条边线上的阵元坐标分别为: $N_1(L, 0, 0)$ 、 $N_2(-L, 0, 0)$ 、 $N_3(0, -L, 0)$ 、 $N_4(0, L, 0)$,目标声源 $Q(x, y, z)$,以球坐标参数表示为 $(R \sin \theta \cos \varphi, R \sin \theta \sin \varphi, R \cos \theta)$,其中, R 为目标距离, $\theta (0 \leq \theta \leq 90^\circ)$ 为目标俯仰角, $\varphi (0 \leq \varphi \leq 360^\circ)$ 为目标方位角, β 为传感器阵列夹角 $(0 \leq \theta \leq 90^\circ)$ 。目标 Q 到各个传感器距离分别为 R, R_1, R_2, R_3, R_4 。假设目标声源为点声源,声波就可以被看作球面波向外辐射信号。由声传感器阵列排布和目标的几何位置关系并通过斜坐标系可得方程组。

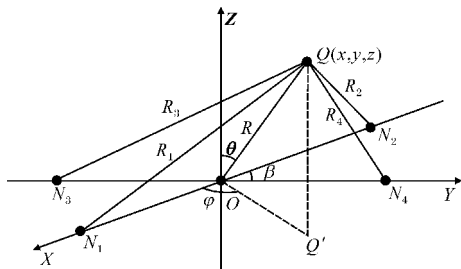


图 2 分布式五元阵定位原理图

$$\begin{cases} R^2 = x^2 + y^2 + z^2 \\ R_1^2 = (x - L\sin\beta)^2 + (y - L\sin\beta)^2 + z^2 \\ R_2^2 = (x + L\sin\beta)^2 + (y + L\sin\beta)^2 + z^2 \\ R_3^2 = (x - L\sin\beta)^2 + (y + L\sin\beta)^2 + z^2 \\ R_4^2 = (x + L\sin\beta)^2 + (y - L\sin\beta)^2 + z^2 \end{cases} \quad (4)$$

由 TDOA 原理得

$$\begin{cases} R = ct \\ R_1 = R + c\tau_{10} \\ R_2 = R + c\tau_{20} \\ R_3 = R + c\tau_{30} \\ R_4 = R + c\tau_{40} \end{cases} \quad (5)$$

其中 t 是从目标声源到中心阵元间的传播时间, $\tau_{10}, \tau_{20}, \tau_{30}, \tau_{40}$ 分别是目标声源到达 N_1, N_2, N_3, N_4 与到达 O 处的传播时延^[12], c 为声波传播速度。将式(4)、(5)用球坐标参数表示,得

$$\begin{cases} (c\tau_{10})^2 = (L\sin\beta)^2 + 2Rct_{10} - 2RL\sin\beta\sin\theta\cos\varphi \\ (c\tau_{20})^2 = (L\sin\beta)^2 + 2Rct_{20} + 2RL\sin\beta\sin\theta\cos\varphi \\ (c\tau_{30})^2 = (L\sin\beta)^2 + 2Rct_{30} + 2RL\sin\beta\sin\theta\cos\varphi \\ (c\tau_{40})^2 = (L\sin\beta)^2 + 2Rct_{40} - 2RL\sin\beta\sin\theta\cos\varphi \end{cases} \quad (6)$$

求解方程组得目标方位角为

$$\varphi = \arctan \frac{(\tau_{40} - \tau_{30}) [2R - c(\tau_{40} - \tau_{30})]}{(\tau_{10} - \tau_{20}) [2R - c(\tau_{10} - \tau_{20})]} \quad (7)$$

考虑到目标位于远场, R 远大于 ct_{10} , 则有

$$\varphi \approx \arctan \frac{(\tau_{40} - \tau_{30})}{(\tau_{10} - \tau_{20})} \quad (8)$$

目标俯仰角为

$$\theta \approx \arcsin \frac{c\sqrt{(\tau_{10} - \tau_{20})^2 + (\tau_{40} - \tau_{30})^2}}{L\sin\beta} \quad (9)$$

目标距离为

$$R = \frac{c^2 \sum_{i=1}^4 \tau_{i0} - 4L^2 \sin^2\beta}{2c \sum_{i=1}^4 \tau_{i0}} \quad (10)$$

3 定位算法误差分析

由上述式子可知,当采用分布式阵列进行目标定位时,时延估计的精度对于目标定位的精度具有非常大的影响,而时延估计精度则会受到声学传感器间距、声波速度和目标距离的影响。以下是分别是对侧向和测距精度的误差分析^[13-14]。

3.1 方位角误差分析

设 δ 为时延估计 τ_{i0} 的标准差,根据误差传播理论,由标准差公式对目标方位角进行误差估计:

$$\delta_\varphi = \delta \sqrt{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial\tau_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\tau_{20}}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\tau_{30}}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\tau_{40}}\right)^2} \quad (11)$$

对式(8)求偏导数得

$$\begin{cases} \frac{\partial\varphi}{\partial\tau_{10}} = -\frac{\partial\varphi}{\partial\tau_{20}} = \frac{\tau_{40} - \tau_{30}}{(1 + \tan^2\varphi)(\tau_{10} - \tau_{20})^2} \\ \frac{\partial\varphi}{\partial\tau_{40}} = -\frac{\partial\varphi}{\partial\tau_{30}} = \frac{1}{(1 + \tan^2\varphi)(\tau_{10} - \tau_{20})} \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)可得:

$$\delta_\varphi = \delta \frac{\sqrt{2(\tau_{10} - \tau_{20})^2 + 2(\tau_{40} - \tau_{30})^2}}{(1 + \tan^2\varphi)(\tau_{10} - \tau_{20})^4} \quad (13)$$

再由式(8)、(9)可得

$$\begin{cases} (\tau_{10} - \tau_{20})^2 + (\tau_{10} - \tau_{20})^2 = \frac{L^2 \sin^2\beta \sin^2\theta}{c^2} \\ (\tau_{10} - \tau_{20})^2 = \frac{L^2 \sin^2\beta \sin^2\theta}{c^2 (1 + \tan^2\varphi)} \end{cases} \quad (14)$$

则方位角估计精度可表示为

$$\delta_\varphi = \delta \frac{\sqrt{2}c}{L\sin\beta\sin\theta} \quad (15)$$

由上可知,目标方位角的估计精度会受到时延估计误差,声音阵列间距和俯仰角大小的影响。设声速 $c = 343$ m/s,时延误差 δ 为 $5 \mu\text{s}$,夹角 β 为 45° ,俯仰角分别为 $45^\circ, 65^\circ$ 和 85° ,那么方位角估计的标准偏差与声阵尺寸的变化关系如图3所示,由图3可知,随着声阵尺寸的增大,方位角估计的标准偏差会逐渐变小,当声音阵列尺寸变化到 5 m 左右时,对方位角的误差影响逐渐趋于平缓。

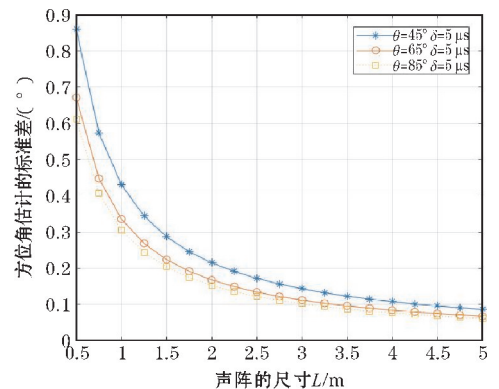


图3 方位角估计的标准偏差与声阵间距之间的关系图

将声音阵列的间距固定为 1 m,则方位角估计的标准偏差与延估计精度的曲线关系如图4所示。从图4可知,延估计精度误差的增加对方位角估计的标准偏差会产生很大的影响。

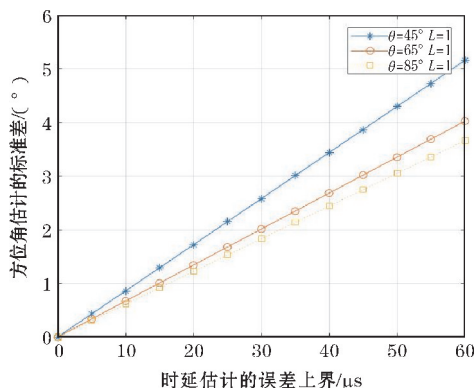


图4 方位角估计的标准偏差与延估计精度之间的关系图

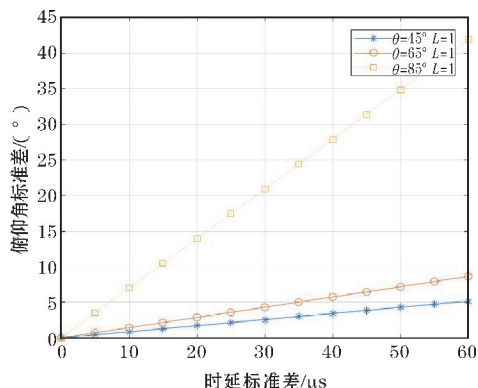


图6 俯仰角估计的标准偏差与时延估计精度之间的关系图

3.2 俯仰角误差分析

同理根据误差传播理论,由标准差公式对目标俯仰角进行误差估计:

$$\delta_{\theta} = \delta \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau_{20}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau_{30}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau_{40}}\right)^2} \quad (16)$$

对式(9)求偏导数可得

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial \tau_{10}} = -\frac{\partial \theta}{\partial \tau_{20}} \approx \frac{2c^2(\tau_{10} - \tau_{20})}{L^2 \sin 2\beta \sin 2\theta} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau_{40}} = -\frac{\partial \theta}{\partial \tau_{30}} \approx \frac{2c^2(\tau_{40} - \tau_{30})}{L^2 \sin 2\beta \sin 2\theta} \end{cases} \quad (17)$$

同理得

$$\delta_{\varphi} = \delta \frac{2\sqrt{2}c}{L \sin \beta \sin \theta} \quad (18)$$

由上可以看出,目标俯仰角的估计精度会受到时延估计,声阵间距以及声速的影响。同样设声速 $c = 343 \text{ m/s}$,时延误差 δ 为 $5 \text{ } \mu\text{s}$,夹角 β 为 45° ,俯仰角分别为 45° 、 65° 和 85° ,那么俯仰角估计的标准差随声阵尺寸变化的关系如图 5 所示,若要提高目标俯仰角的估计精度,可以适当通过增加声音阵列的间距。当声阵尺寸变化到 5 m 时,对方位角的误差影响不大。

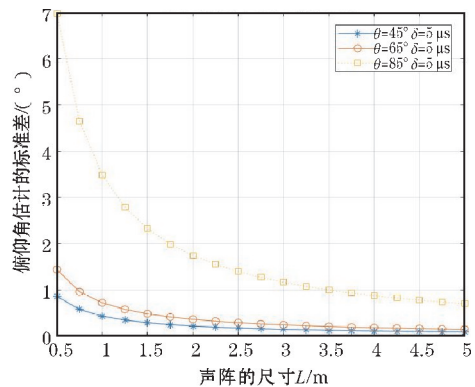


图5 俯仰角估计的标准偏差与声音阵列间距之间的关系图

设声音阵列的间距固定为 1 m ,则俯仰角估计的标准偏差与时延估计精度的曲线关系如图 6 所示。从图 6 可知,俯仰角的标准偏差受时延估计精度的影响不大。

3.3 测距误差分析

根据标准差公式估算目标距离误差:

$$\delta_R = \delta \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial \tau_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \tau_{20}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \tau_{30}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \tau_{40}}\right)^2} \quad (19)$$

引入:

$$\sum_{i=1}^4 \tau_{i0} \approx \frac{L^2 \sin^2 \beta}{2Rc} (\sin^2 \theta - 4) \quad (20)$$

根据式(10),两边分别求偏导数得

$$\frac{\partial R}{\partial \tau_{i0}} = \frac{2c^2 \tau_{i0} \sum_{j=1}^4 \tau_{j0} - (c^2 \sum_{j=1}^4 \tau_{j0}^2 - 4L^2 \sin^2 \beta)}{2c \left(\sum_{j=1}^4 \tau_{j0}\right)^2} \quad (21)$$

将式(20)代入式(21)得

$$\frac{\partial R}{\partial \tau_{i0}} \approx \frac{2Rc(c\tau_{i0} - R)}{\sum_{j=1}^4 \tau_{j0}} \quad (22)$$

将式(22)代入式(19)得

$$\delta_R \approx \delta \frac{4Rc \sqrt{L^2 \sin^2 \beta + R^2}}{L^2 \sin^2 \beta (4 - \sin^2 \theta)} \quad (23)$$

由上可以看出,测距精度不受目标的方位角大小影响,而会受到目标距离,声音阵列间距和俯仰角大小的影响。同样设声速 $c = 343 \text{ m/s}$,夹角为 45° ,俯仰角为 45° 和 85° ,声音阵列间距固定为 3 m ,那么测距精度与目标距离的曲线关系如图 7 所示。

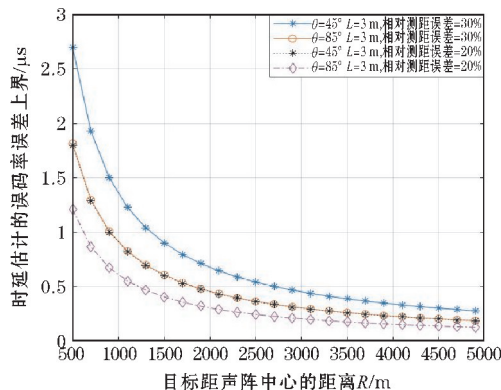


图7 测距精度与目标距离之间的关系图

从图7看出,时延估计的误差上界不超过3 μs ,并且会随着目标距离的增加有所下降,但是俯仰角大小对时延估计精度的影响较小。

4 结束语

分析了人影炮弹的爆炸特性,在确定了采用被动声测技术后,提出一种适于对人影炮弹高空炸点进行定位的分布式五元阵列定位方法,并对该方法进行了理论分析和仿真研究。结果表明该方法的定位特性可以满足对人影炮弹爆炸点定位的要求,当声阵间距选取在大于5 m的情况下,该方法有更好的测量效果。该方法的实现可以对人影炮弹爆炸点进行有效的定位,对人影作业有极大的促进作用,同时对低空目标的定位、轨迹追踪和识别等有重要的参考价值和工程应用前景^[15]。

参考文献:

- [1] 郭学良. 我国人工影响天气的科技现状与发展问题[A]. 第26届中国气象学会年会人工影响天气与大气物理学分会场论文集,2009.
- [2] 马鑫鑫,李昊,丁建芳,等. 人影高炮作业落区的一种判定方法[J]. 内蒙古气象,2011(4):57-59.
- [3] 黎祖贤,刘红武,廖俊,等. 基于外弹道计算的人影高炮作业安全评估方法[J]. 气象科技,2016,44(1):152-156.
- [4] 林志斌,徐柏龄. 基于传声器阵列的声源定位[J]. 电声技术,2004(5):19-23.
- [5] 刘真旭. 基于麦克风阵列的实时声源定位[J]. 计算机应用与软件,2010,27(6):43-45.
- [6] 张明,樊昌元,张东明,等. 人工影响天气“三七”高炮作业数据采集系统[J]. 成都信息工程学院学报,2015,30(3):259-263.
- [7] 王秉义. 枪炮噪声与爆炸声的特性和防治[M]. 北京:国防出版社,2001:23-25.
- [8] 陈小平. 声音与人耳听觉[M]. 北京:中国广播电视出版社,2006.
- [9] 腾鹏晓. 近地大气中多声源的声探测定位技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2004:1-24.
- [10] 陈华伟,赵军渭,郭业才. 五元十字阵被动声定位算法及性能研究[J]. 探测与控制学报,2003(4):12-14.
- [11] LiJing,ZhaoYongjun,LiDonghai. Accurate single-observer passive coherent location estimation based on TDOA and DOA[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2014,27(4):913-923.
- [12] 雷鸣,陈绍钦,雷志勇. 近地炸点声定位算法研究[J]. 计算机测量与控制,2012,20(3):734-736.
- [13] 雷文英,陈伯孝,杨明磊,等. 基于 TOA 和 TDOA 的三维无源目标定位方法[J]. 系统工程与电子技术,2014,36(5):816-823.
- [14] Li Ping, Shi Jusheng. Accuracy analysis of Passive acoustic location system In air[J]. Elementary Electroacoustic,2007,31(5):42-45.
- [15] 张小友. 火箭和高炮在人影作业上的差异初探[A]. 湖北省气象学会,2008年湖北省气象学会学术年会学术论文详细文摘汇集[C]. 湖北省气象学会,2008.

Research on the Determination of the Sound of the Shadow of the Projectile

LIU Wenbo, WEN Bin, LU Shijin

(Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: When the shadow shell explodes in the high altitude, it will produce explosive sound waves. Through the analysis of the explosion characteristics of shadow shell, the feasibility of detecting the sound wave by the distributed acoustic sensor in the distant range is discussed. The passive acoustic measurement method in the long distance is proposed. The distributed five-element array positioning method is used to locate and analyze the high-altitude explosion point of the shadow shell. After theoretical analysis and experimental simulation, it approves that the method can effectively locate the high-altitude explosion point.

Keywords: sound source positioning; shadow shell; distributed five-element array