

文章编号: 2096-1618(2019)04-0346-06

人影高炮弹丸高空爆炸点定位方法

王勤¹, 刘文博¹, 文斌², 贺南²

(1. 成都市气象局, 四川 成都 611130; 2. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225)

摘要:为了评估人影作业效果, 追溯高炮弹丸哑弹和提前爆炸的数量, 提出了一种基于声达时间差(TDOA)原理的分布式亚音采集装置声源定位方法。通过 Matlab 对该方法进行仿真, 实验结果表明了该方法的可行性, 该方法的实现对人影作业有极大的促进作用, 提高了工作效率, 缩短了搜排周期, 并保障了人身安全。

关键词:声源定位; 人影高炮弹丸; 双直角阵

中图分类号: TN912.16

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2019.04.004

0 引言

高炮系统是中国各地广泛使用的人工影响天气作业装置, 其主要用途是在出现冰雹天气威胁时大量发射高爆炸弹轰击雹云, 消除或减弱冰雹灾害; 在干旱或雾霾天气时择机发射碘化银增加降水。然而哑弹降落居民点并砸穿居民房屋的情况时有发生, 为了减少不必要的损失, 有必要知道实际作业时发射的高炮弹丸的高空爆炸点^[1]。声定位技术是通过声学传感器接收声信号, 并传递给相应电子装置对接收到的信号进行转换处理确定声源位置, 优点是不受视线和能见度的限制、隐蔽性好、成本低、不易受干扰。近年来越来越得到各国的重视, 并被广泛应用于军事领域^[2]。最早的声测技术起源于在战争中通过火炮发出的声音来判断火炮的位置, 随着声测定位技术的不断发展, 在第二次世界大战中, 有 75% 的战场火炮侦察任务依靠声测手段完成, 随着现代科技的发展, 声测定位也越来越受到各国的重视, 应用领域也越来越广泛。然而目前人工影响天气作业点普遍缺少炮击点的定位或火控装置, 哑弹定位依靠人工徒步携带装置探测, 工作效率低, 人身安全难以保障^[3]。同时, 由于落点探测定位手段单一, 致使搜排周期长、数据使用实效性差。针对这一问题, 研究了可应用于人工影响天气作业的爆破点定位、哑弹弹着点定位、弹片溅落区定位、火箭运行监控的追踪定位方法。首先对比分析了目前广泛应用的几种亚音采集装置阵列, 结合了人影高炮弹丸的高空爆炸声音特点, 并综合考虑算法复杂度及成本问题,

最终选取了双直角阵对声目标定位方法^[4]。利用建立的声级感应阵列, 基于 TDOA 原理, 假定声源位置和感应器在同一水平面, 通过一系列的几何计算准确地定位每发声源位置, 在结合高射炮基座位置、身管长度和方向基准, 进而精准地计算出发射仰角、方位角。

1 亚音采集装置阵列

亚音采集装置阵列通常用来对现场声音进行拾取, 并将接收到的音频信号送入数字信号处理器(DSP)进行运算处理, 再通过预设的算法程序保留并加强所需声音的音频信号, 并消除其余的背景噪音^[5]。亚音采集装置阵列一般包括两只以上的亚音采集装置, 也可叫作阵列式传声。通常, 传统亚音采集装置对录取的声音与背景噪音没有主动分辨能力, 所以需要尽可能地提高录音信号的信噪比。方法一般将亚音采集装置尽量靠近声源或提高声源的声压级^[6]。但在实际情况中由于受录音条件的限制造成声源与亚音采集装置距离较远或者声源声压级较低时, 则会使所录制音频信号的信噪比迅速降低, 无法达到现场录音质量的要求。

在应用阵列式亚音采集装置过程中, 需要关注的问题有: 收音范围是否足够宽; 收音距离是否足够远; 收音的效果是否足够清晰。其中收音范围可以通过更换亚音采集装置的个数以及亚音采集装置的摆放位置来调整; 而收音的距离和清晰度等可以通过调整亚音采集装置的灵敏度来配合^[7]。

1.1 几种亚音采集装置阵列的对比分析

目前被广泛应用的亚音采集装置阵列有: 直线阵、

圆阵、双直角三角形阵、四方阵等。其中直线阵至多能确定二维参量故不能用于空中目标的三维定位^[8]。圆阵虽然具有较好的测距型,但随着阵元数增加,系统的复杂度也增加。四方阵只能实现对阵列所在平面为界的半个空间进行定位,不适用于远距离定位。立体五元阵,成本较高,当目标与平面阵的夹角较小时,估计的精度下降,不利于实际的工程应用^[9]。结合四方阵和双直角三角形阵特点,提出四元阵列双直三角形接相结合的方法进行高空人影炮弹爆炸亚音源定位工程修正方法,实现高空远距离音源三维定位,且不增加四方阵定位系统的硬件成本。

1.2 人影高炮弹丸高空爆炸声特性

目前,中国人工影响天气地面防雷增雨作业以65型双管37 mm高射炮为主要装备,作业现场具有噪声大、震动强两个极为显著的特点。炮身長2739 mm,身管长2315 mm,后座长150~180 mm,理论最大射程为8500 m,最大射高为6700 m。高低射界为 $-10^{\circ} \sim 85^{\circ}$,方向射界为 360° ^[10]。平均炮口速度不低于866 m/s,连发射击射速320~360发/min(双管)。弹丸长度为19 cm,弹丸质量为0.56 kg,弹丸(不含炸药)由药筒、药筒装药、底火等部分组成。高射炮发射时,仰角和方位角可以任意、快速调节^[11]。火炮由手动操作,高低和方向瞄准有两种速度。火炮装有机同同步击发装置,可使两管炮发射循环周期的时差避免累积,达到基本同步。

已有实验表明防雷增雨炮弹发射产生的前导噪声、每次发声级突升及其增幅,可以成为高射炮发射区别自然环境及人为强噪声的明显指标^[12]。前导噪声作为高射炮弹药被击发的显著标识,可作为高射炮安全监控的重要内容,对有效预防重大安全事故及应急处置能够起到重要辅助作用。根据高射炮机械作用原理,发射时前导噪声实际来自高射炮膛内发射用弹的底火击发过程,而前导噪声之后每发声级峰值则对应为发射用弹飞出炮口的瞬时过程。

2 四元传感双直角三角形声源定位算法分析

四方阵指在地面同一平面上4个音源采集传感器进行定位。但人影作业大多数时候会在野外随机选择位置发射,由于地理环境条件的限制,要将4个亚音采

集传感器构成在地面同一平面上的方阵会有很大的困难。但在野外由三点构成一个平面就很容易,为此采用四元传感形成双直角三角形阵的声源定位算法。传统的双直角三角形定位原理是两个三角平面间夹角 180° ,而在实际的工作环境中绝大多数都小于 180° ,为此要对传统算法进行工程修正才能进行应用。下面对双直角三角形音源定位原理进行介绍。

2.1 四元传感同一平面双直角三角形阵定位原理

2.1.1 定向原理

传统双直三角形定位原理如图1所示。其中 S_i 为亚音采集装置($i=1,2,3,4$),一个直角三角形由 S_1, S_2, S_4 组成,另一个由 S_1, S_3, S_4 组成。在参考坐标系 $o-xyz$ 中的直角三角形 S_1, S_2, S_4 中,虚拟一个亚音采集装置为 S'_3 ,由 S_1, S_2, S'_3, S_4 组成一个四方阵,在参考坐标系 $o'-x'y'z'$ 中的直角三角形 S_1, S_3, S_4 中,虚拟一个亚音采集装置为 S'_2 ,由 S_1, S'_2, S_3, S_4 组成一个正四方阵,其中 $oo'=L$ 。这两个四元阵平面夹角为 180° 。 P_1 和 P_2 分别为两个参考坐标系中声源的相对位置,记作 $P_1(r_1, \theta_1, \varphi_1)$ 和 $P_2(r_2, \theta_2, \varphi_2)$, r_i 表示声源与圆点的距离, θ_i 表示探测声源的俯仰角, φ_i 表示探测声源的方位角(其中 $i=1,2$)。俯仰角由 r_i 和 oz (或 $o'z'$)轴的夹角来确定,方位角由 r_i 在 oxy (或 $o'x'y'$)平面上的投影与 ox (或 $o'x'$)轴的夹角来确定^[13]。

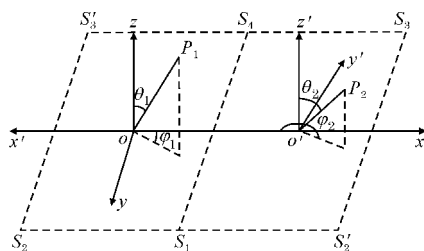


图1 四元传感同一平面双直角三角形阵的声源及亚音采集装置分布图

设直角三角形的每条直角边长均为 L ,在 $o-xyz$ 坐标系即正四方阵 $S_1S_2S'_3S_4$ 中,有4个亚音采集装置的直角坐标为: $S_1(\frac{L}{2}, \frac{L}{2}, 0)$ 、 $S_2(-\frac{L}{2}, \frac{L}{2}, 0)$ 、 $S'_3(-\frac{L}{2}, -\frac{L}{2}, 0)$ 、 $S_4(\frac{L}{2}, -\frac{L}{2}, 0)$,假设 $P_1(x, y, z)$ 为点声源以球面波形式传播,设 τ_{1i} 表示声源信号到达亚音采集装置 S_i 相对于 S_1 所产生的时延, d_{1i} 表示声源到亚音采集装置 S_i 与到 S_1 的距离差,(其中 $i=2, 3, 4$), c 为声速。有:

$$\begin{cases} d_{12} = P_1 S_2 - P_1 S_1 = \tau_{12} c \\ d_{13} = P_1 S'_3 - P_1 S_1 = \tau_{13} c \\ d_{14} = P_1 S_4 - P_1 S_1 = \tau_{14} c \end{cases} \quad (1)$$

假设 $P_1 S_1 = a$, 则有方程组:

$$\begin{cases} (d_{12} + a)^2 = \left(x + \frac{L}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{L}{2}\right)^2 + z^2 \\ (d_{13} + a)^2 = \left(x + \frac{L}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{L}{2}\right)^2 + z^2 \\ (d_{14} + a)^2 = \left(x - \frac{L}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{L}{2}\right)^2 + z^2 \\ a^2 = \left(x - \frac{L}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{L}{2}\right)^2 + z^2 \\ r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 \end{cases} \quad (2)$$

解方程组得

$$\begin{cases} x = \frac{2ad_{12} + d_{12}^2}{2L} \\ y = \frac{2ad_{14} + d_{14}^2}{2L} \\ z = \frac{a}{L} \sqrt{L^2 - d_{14}^2 - d_{12}^2} \\ a = \frac{d_{13}^2 - d_{14}^2 - d_{12}^2}{2(d_{12} - d_{13} + d_{14})} \end{cases} \quad (3)$$

又因为 $a \gg d_{12}, d_{13}, d_{14}$ 则可简化为

$$\begin{cases} x \approx \frac{ad_{12}}{L} \\ y \approx \frac{ad_{14}}{L} \\ a = \frac{d_{13}^2 - d_{14}^2 - d_{12}^2}{2(d_{12} - d_{13} + d_{14})} \\ z = \frac{a}{L} \sqrt{L^2 - d_{14}^2 - d_{12}^2} \end{cases} \quad (4)$$

将 P_1 转换为球坐标系, 得到

$$\begin{cases} x = r_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1, & 0^\circ < \theta_1 \leq 90^\circ \\ y = r_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1, & 0^\circ < \varphi_1 \leq 360^\circ \\ z = r_1 \cos \theta_1 \end{cases} \quad (5)$$

则得到

$$\begin{cases} \tan \varphi_1 = \frac{y}{x} \\ \sin \theta_1 = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r_1} \end{cases} \quad (6)$$

将(4)式和(1)式代入(6)式可得

$$\begin{cases} \tan \varphi_1 \approx \frac{d_{14}}{d_{12}} = \frac{\tau_{14} c}{\tau_{12} c} = \frac{\tau_{14}}{\tau_{12}} \\ \sin \theta_1 \approx \frac{\sqrt{d_{12}^2 + d_{14}^2}}{L} = \frac{c}{L} \sqrt{\tau_{12}^2 + \tau_{14}^2} \end{cases} \quad (7)$$

可以看出采用正方形定向时, 亚音采集装置 S_1 分别与亚音采集装置 S_2, S_4 接收声信号的时间差有关, 与亚音采集装置 S'_3 的时间差无关, 也就是说 S'_3 亚音采集装置接收到的信号对定向不起作用, 只对测距起作用, 而用单个正正方形阵对测距的误差很大。因此只用 3 个亚音采集装置 S_1, S_2, S_4 就可以完成对目标方位的测定, 即测定 θ_1, φ_1 。

同理 S_1, S_3, S_4 组成另一个直角三角形, 直角边长为 L , 虚拟一个亚音采集装置 S'_2 由 S_1, S'_2, S_3, S_4 组成一个正正方形阵, 参照坐标系 $o'-x'y'z'$ 可确定 θ_2, φ_2 , 即有

$$\begin{cases} \tan \varphi_2 \approx \frac{d'_{14}}{d'_{34}} \\ \sin \theta_2 \approx \frac{c}{L} \sqrt{d'^2_{14} + d'^2_{34}} \end{cases} \quad (8)$$

其中 d'_{14} 为表示声源到亚音采集装置 S_1 与到 S_4 的距离差, d'_{34} 表示声源到亚音采集装置 S_3 与到 S_4 的距离差。

综合上述结论, S_1 和 S_4 亚音采集装置接收到的信号可在 2 个直角三角形阵中共享, 再由计算机采用互相关函数的方法计算出时延 $\tau_{12}, \tau_{14}, \tau_{41}, \tau_{43}$, 由此可以根据以上公式对声源进行定向。

2.1.2 测距原理

测距时, 由于 2 个直角三角形得出的 2 条方位线一般为空间异面直线关系, 求出的 S'_3 和 P_2 不为同一点, 则可通过求出 2 条异面直线即 OP_1 和 $O'P_2$ 的最短距离, 也称公垂线, 它的中点就相当于声源所在位置。若两条方位线刚好相交, 则 P_1 和 P_2 为同一点, 交点则为声源 P 所在的位置。

设 OP_1 的参数方程如下:

$$\begin{cases} x = b_1 t_1, & b_1 = \sin \theta_1 \cos \varphi_1 \\ y = c_1 t_1, & c_1 = \sin \theta_1 \sin \varphi_1 \\ z = d_1 t_1, & d_1 = \cos \theta_1 \end{cases} \quad (9)$$

又由于 $OO' = L$, 则 $O'P_2$ 的参数方程可表示为

$$\begin{cases} x = L + b_2 t_2, & b_2 = \sin \theta_2 \cos(\varphi_2 - \pi) \\ y = -c_2 t_2, & c_2 = \sin \theta_2 \sin(\varphi_2 - \pi) \\ z = d_2 t_2, & d_2 = \cos \theta_2 \end{cases} \quad (10)$$

则 $P_1 P_2$ 之间的距离 w 为:

$$w^2 = (L + b_2 t_2 - b_1 t_1)^2 + (-c_2 t_2 - c_1 t_1)^2 + (d_2 t_2 - d_1 t_1)^2 \quad (11)$$

对式(11)求偏导:

$$\frac{\partial w^2}{\partial t_1} = 2[(b_1^2 + c_1^2 + d_1^2)t_1 - (b_1b_2 - c_1c_2 + d_1d_2)t_2 - b_1L] = 2[t_1 - (b_1b_2 - c_1c_2 + d_1d_2)t_2 - b_1L] \quad (12)$$

$$\frac{\partial w^2}{\partial t_2} = 2[(b_2^2 + c_2^2 + d_2^2)t_2 - (b_1b_2 - c_1c_2 + d_1d_2)t_1 - b_2L] = 2[t_2 - (b_1b_2 - c_1c_2 + d_1d_2)t_1 - b_2L] \quad (13)$$

若要使 w 最小,则需令 $\frac{\partial w^2}{\partial t_1} = 0, \frac{\partial w^2}{\partial t_2} = 0$ 。又两直线的夹角余弦为

$$\cos\alpha = \frac{b_1b_2 - c_1c_2 + d_1d_2}{\sqrt{b_1^2 + c_1^2 + d_1^2} \sqrt{b_2^2 + c_2^2 + d_2^2}} = b_1b_2 - c_1c_2 + d_1d_2 \quad (14)$$

$$\text{则有} \begin{cases} t_1 - \cos\alpha t_2 = b_1L \\ t_2 - \cos\alpha t_1 = -b_2L \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{得出} \begin{cases} t_1 = \frac{L(b_1 - b_2\cos\alpha)}{1 - \cos^2\alpha} \\ t_2 = \frac{L(b_1\cos\alpha - b_2)}{1 - \cos^2\alpha} \end{cases} \quad (16)$$

故可得声源 P 的坐标为

$$\begin{cases} x = \frac{(L + b_2t_2 + b_1t_1)}{2} \\ y = \frac{(c_1t_1 - c_2t_2)}{2} \\ y = \frac{(d_2t_2 + d_1t_1)}{2} \end{cases} \quad (17)$$

则目标的距离 r 为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{(b_1^2 - b_2^2)^2 + (c_1b_1 + c_2b_2)^2 + (d_1b_1 + d_2b_2)^2}}{1 - (b_1b_2 - c_1c_2 + d_1d_2)^2} \quad (18)$$

2.2 四元传感同一平面下双直角三角形定位原理系统性误差分析

在实际工作中由于外界因素的干扰,比如时延误差、亚音采集装置位置的误差、有效声速误差等,估计结果跟实际爆炸点有偏差。从上述方位角的估计公式可看出方位角只与 τ 有关,而俯仰角要受 L, c 和 τ 三者的共同影响。由于各时延误差的统计特征相同,故各亚音采集装置的位置误差统计特性也相同,在直角三角形 $S_1S_2S_4$ 中,方位角的误差为

$$\sigma_{\varphi_1}^2 \approx \sigma_{\varphi_1\tau}^2 = \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial d_{12}}\right)^2 \sigma_{d_{12}}^2 + \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial d_{14}}\right)^2 \sigma_{d_{14}}^2 = \frac{c^2}{L^2 \sin^2\theta_1} \sigma_{\tau}^2 \quad (19)$$

而俯仰角的误差为时延误差,亚音采集装置摆放

位置的误差以及声信号传播起伏误差三者之和,即 $\sigma_{\theta_1}^2 = \sigma_{\theta_1\tau}^2 + \sigma_{\theta_1L}^2 + \sigma_{\theta_1c}^2$ 。当俯仰角的误差由于时延误差所引起的时候,则

$$\sigma_{\theta_1\tau}^2 = \left(\frac{\partial\theta_1}{\partial d_{12}}\right)^2 \sigma_{d_{12}}^2 + \left(\frac{\partial\theta_1}{\partial d_{14}}\right)^2 \sigma_{d_{14}}^2 = \frac{c^2}{L^2 \cos^2\theta_1} \sigma_{\tau}^2 \quad (20)$$

当俯仰角误差是由亚音采集装置摆放位置的误差引起时,只有俯仰角受到影响,则有

$$\sigma_{\theta_1L} = \frac{\partial\theta_1}{\partial L} \sigma_L = -\frac{\tan\theta_1}{L} \sigma_L \quad (21)$$

当俯仰角误差是声信号传播起伏的误差所引起时,有

$$\sigma_{\theta_1c} = \frac{\partial\theta_1}{\partial c} \sigma_c = -\frac{\tan\theta_1}{c} \sigma_c \quad (22)$$

俯仰角的误差为

$$\sigma_{\theta_1}^2 = \sigma_{\theta_1\tau}^2 + \sigma_{\theta_1L}^2 + \sigma_{\theta_1c}^2 = \frac{c^2}{L^2 \cos^2\theta_1} \sigma_{\tau}^2 + \frac{\tan^2\theta_1}{L^2} \sigma_L^2 + \frac{\tan^2\theta_1}{c^2} \sigma_c^2 \quad (23)$$

同理在另一个三角形中,方位角的误差为

$$\sigma_{\varphi_2}^2 = \frac{c^2}{L^2 \sin^2\theta_2} \sigma_{\tau}^2 \quad (24)$$

俯仰角的误差为

$$\sigma_{\theta_2}^2 = \frac{c^2}{L^2 \cos^2\theta_2} \sigma_{\tau}^2 + \frac{\tan^2\theta_2}{L^2} \sigma_L^2 + \frac{\tan^2\theta_2}{c^2} \sigma_c^2 \quad (25)$$

同理可得,距离的误差为

$$\sigma_r^2 = \left(\frac{\partial r}{\partial L}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial \varphi_1}\right)^2 \sigma_{\varphi_1}^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial \varphi_2}\right)^2 \sigma_{\varphi_2}^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial \theta_1}\right)^2 \sigma_{\theta_1}^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial \theta_2}\right)^2 \sigma_{\theta_2}^2 \quad (26)$$

2.3 双直角三角形定位夹角修正方法

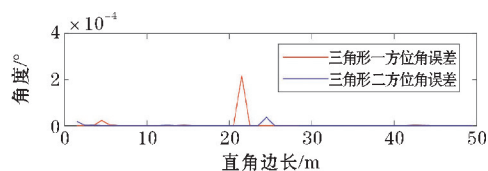
首先记录在同一高度上双直角三角形定位算法测量的数据,其次计算在同一高度上的误差修正数据,将2个平面夹角以 1° 步进进行测量共可获得180组夹角测量数据,以相同的方法计算在不同高度处的数据,分别将这两组数据通过 Matlab 拟合分析获取一组离散值,据此可得出以下工程修正公式

$$P = P_0 \cdot [1 + f(\theta, h)] \quad (27)$$

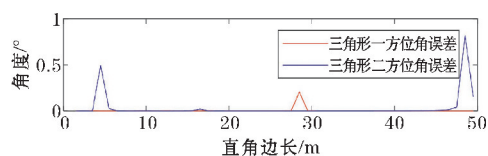
其中 P 为修正后的数据, P_0 为初始数据, $f(\theta, h)$ 为工程修正因子,此修正因子是通过将不同高度和不同夹角处的测量数据与实际数据拟合分析得到的,可作为实际工程参考校正。

3 仿真结果

通过 Matlab 对该定位方法进行仿真,在方阵中,声速取为343 m/s。结合介绍的37 mm口径高炮的相关参数,假定声源实际位置相关参数为爆炸点距离原点长度为5000 m,俯仰角为45°,方位角为30°。在假设时延误差为 $\sigma_\tau = 5 \mu\text{s}$, $\sigma_L = 0.25 \text{ m}$, $\sigma_c = 3 \text{ m/s}$ 时,在 L 的变化范围为1.5 ~ 50 m,俯仰角误差和方位角误差的变化曲线如图2所示。结合实际条件限制,即由于人影高炮是通过炮车移动,炮车上安有托架以便控制方向,故对于双直角三角阵的直角边选取则要考虑炮车车身及托架的长度,最适合的 L 长度应取在10 ~ 15 m。



(a) 方位角误差



(b) 俯仰角误差

图2 双直角三角阵直角边长对方位角和俯仰角的影响图

图3为时延误差对方位角误差的影响,结合介绍的37 mm口径高炮的相关参数,实际的俯仰角分别取10°,30°,45°,60°,80°,时延误差变化范围为0 ~ 100 μs 。由图3可见,当俯仰角大于10°时,由于时延误差引起的方位角误差均控制在0.005°以内,可见该定位方法满足人影高炮弹爆炸点定位的需求。

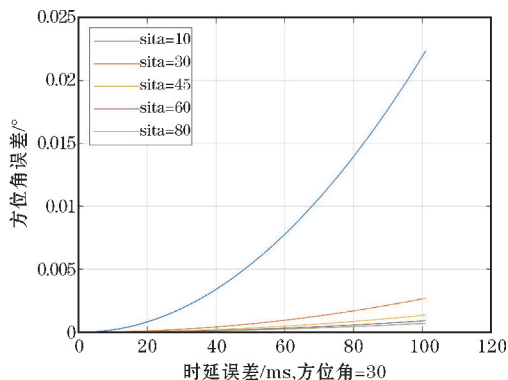


图3 时延误差对方位角误差的影响图

图4为时延误差对俯仰角误差的影响,结合介绍的37 mm口径高炮的相关参数,实际的俯仰角分别取10°,30°,45°,60°,80°,时延误差变化范围为0 ~ 100 μs 。由图可见当俯仰角大于10°时,由于时延误差引起的俯仰误差均控制在0.02°以内,可见该定位方法满足人影高炮弹爆炸点定位的需求。

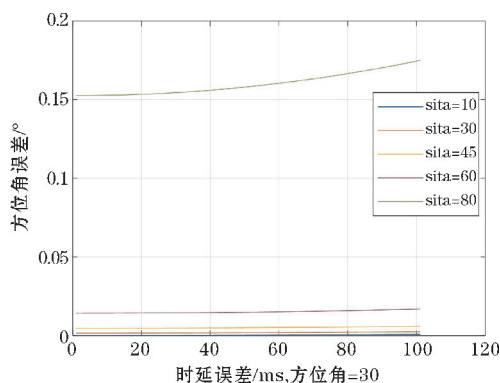


图4 时延误差对俯仰角误差的影响图

4 结束语

提出了一种基于声达时间差(TDOA)原理的双直角三角形分布式亚音采集装置阵列声源定位方法。该方法可以应用于人工影响天气高射炮作业中对爆炸点进行声源定位。仿真结果表明该方法的定位范围,满足人影火箭高炮弹丸爆炸点的要求,其方位角和俯仰角的定位误差均小于0.05°以内。结合仿真结果与实际环境,双直角阵中的直角边适合取10 ~ 15 m,考虑到炮车的可移动性,亚音采集装置支架可做成伸缩式,以便于实际应用。双直角阵对声定位方法解决了在不增加成本及算法复杂度的情况下,对人影高炮弹丸高空爆炸点较精确的定位,为人影作业提供便利,保障了人影作业的安全性。

参考文献:

- [1] 马鑫鑫,王山海,刘谦. 基于声级采集仪的人影作业信息自动采集系统[J]. 电子测量技术, 2017,40(10):216-220.
- [2] 毕力格,佟小林,李汉超. 人影地面作业安全射界分析系统的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2017,40(6):1-14.
- [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] 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.
- [5] Li Jing, Zhao Yongjun, Li Donghai. Accurate single-observer passivecoherent location estimation based on TDOA and DOA[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2014,27(4):913-923.
- [6] 雷文英,陈伯孝,杨明磊,朱伟. 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.
- [7] Congfeng Liu, Jie Yang, Fengshuai Wang. Joint TDOA and AOA location algorithm[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24(2):183-188.
- [8] 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.
- [9] 南志刚,张建国. 人影“三七”高炮常见故障及其排除方法[J]. 内蒙古气象,2010(6):52-53.
- [10] 晏军,喻箭,魏旭辉,等. 人影作业用 37 高炮年度审验技术检测标准[J]. 沙漠与绿洲气象,2009,3(S1):220-221.
- [11] 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,2008:1.
- [12] 李定才,袁献国,郑宏伟,等. 高炮、火箭人影催化作业云层高度的确定[J]. 气象与环境科学,2008(S1):74-76.
- [13] 顾晓辉,王晓鸥. 用双直角三角形阵对声目标定位的研究[J]. 声学技术,2003,22(1):44-47.

Location Method of High-altitude Explosion Point of Silhouette Projectile

WANG Qin¹, LIU Wenbo¹, WEN Bin², HE Nan²

(1. Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 610075, China; 2. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of the shadow work, and trace the number of anti-aircraft projectile duds and early explosions, a sound source localization method based on the principle of the time difference of sound (TDOA) is proposed. The method is simulated by Matlab. The experimental results show the feasibility of the method. The implementation of this method greatly promotes the shadow operation, improves the work efficiency, shortens the search cycle, and guarantees personal safety.

Keywords: sound source positioning; silhouette projectile; double right angle array