

多站时差与方位交汇定位系统的适用性分析

张旭峰, 李敏剑, 刘晨阳
(63618 部队 库尔勒 841001)

摘要: 为满足提高靶场武器试验任务效益、减轻定岗人员负担、裁减冗余设备的要求, 对多站时差定位系统和方位交汇定位系统两种落点测量设备的原理、适用性、定位精度及影响因子进行比较分析, 提出两种设备各自适用的试验任务类型以及相互替代的可能性, 为参试测控设备配备的决策提供一定参考。

关键词: 多站时差; 交汇定位; 定位精度

中图分类号: V556.4

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2021)02-0013-09

Application scope between multi-sites location system using TDOA measurements and multi-directional position system

ZHANG Xufeng, LI Minjian, LIU Chenyang
(63618 PLA Troops, Kuerle 841001, China)

Abstract: In order to improve efficiency, release the burden of the staff and reduce the equipments' backups, comparative analysis work aimed at principle, adaptability, position precision and its influence factors between multi-sites location system using TDOA(Time Difference of Arrival) and multi-directional position system has been done. The application range field and adaptability of these two position location systems mentioned above has been cleared and defined. And some rules for configuring the test equipments to obey have been proposed.

Key words: Multi-sites location using TDOA; Multi-directional position; Position precision

引 言

在靶场武器试验任务中, 落点测量是试验任务评估工作中的重要环节, 有时甚至是评估任务成败的唯一指标。目前, 在靶场武器试验任务中, 落点测量手段主要包括弹道外推、多站时差定位和方位交汇定位三大类。其中, 方位交汇定位系统类型又可具体分为电子望远镜落点测量系统、图像报靶系统等。测控设备在低仰角情况下受地形、多径等因素影响较大, 弹道外推精度较差。因此, 靶场主要采用多站时差定位和方位交汇定位进行落点测量。

近年来, 随着试验任务的频次不断增高, 测控设备大量增加, 人岗矛盾越来越突出。其中, 落点测量设备因为正常工作所需端站数量多, 布站范围广, 消耗了大量的人力, 急需进行集约化管理。为了提高任务效益、减轻定岗人员负担、裁减冗余设备, 本文从定位原理、定位精度及影响因子等方面对最常用的两种落点测量手段(多站时差定位系统和方位交汇定位系统)进行分析比较, 提出了各自的适用范围。

1 定位原理比较

1.1 多站时差定位系统原理

多站时差定位系统主要分为测量端站和解算终端两部分, 端站接收导弹发出的遥测信号, 并将收到帧同步信号的本地时间信息传送给解算终端。解算终端根据各端站收到同一帧帧同步信号的时间信息以及已知的各站站址解算出导弹轨迹, 并根据遥测信号消失之前的前一帧的数据外推半个帧周期得到导弹落点。

具体解算原理是, 根据帧同步信号到达端站的时间, 以及提前已经测出的各端站坐标, 利用至少 4 个端站解算出导弹轨迹和落点^[1]。端站中, 选取一个站作为主站进行比较, 设主站坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 其余端站坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 导弹坐标为 (x, y, z) , 解算方程组是

$$\begin{cases} r_0^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \\ r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \\ \Delta r_i = r_0 - r_i = c \times \Delta t_{0i} \end{cases} \quad (1)$$

上述方程组中, i 为多站时差测量端站数量, r_i 表示导弹到端站之间的距离, Δt_{0i} 为选取的主站与端站之间的时间差, Δr_i 表示距离差, c 为光速。多站时差定位系统采用最小二乘法解算方程组, 得到落点测量结果^[2]。

1.2 方位交汇定位系统原理

方位交汇定位系统也分为测量端站和解算终端两部分, 端站通过方位交汇瞄准导弹落地(空爆)激起的烟尘中心点, 并将角度信息传送给解算终端。解算终端根据角度信息以及已知的各端站站址两两交汇解算出导弹落点。

方位交汇定位系统采用角度前方交汇法解算落点。在实际应用过程中, 观测点和落点大致处于同一水平面内, 因此, 在计算落点的过程中, 可以忽略观测点与落点之间的高程差。具体过程如图 1 所示, A 、 B 两点为方位交汇的观测点位, P 点为落点。其中 A 、 B 两点的坐标已知。导弹落地后, 从观测点观测到落点烟尘后, 可以分别测得观测点位 A 与落点 P 之间的方位角 α 、观测点位 B 与落点 P 之间的方位角 β 。由图 1 可知, 落点 P 的坐标与观测点位 A 、 B 坐标的关系可表示为

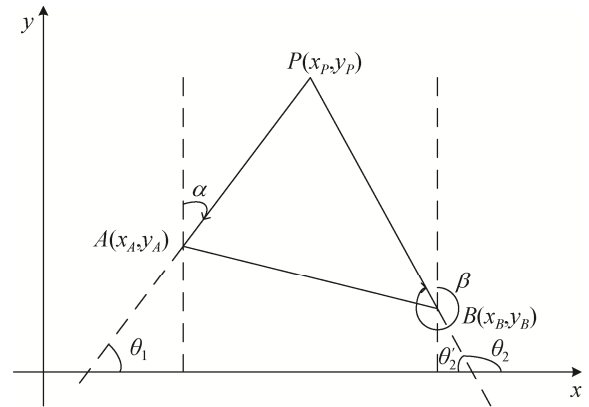


图 1 方位交汇定位原理示意图

Fig. 1 Sketch of multi-directional position system principle

$$\begin{cases} \frac{y_P - y_A}{x_P - x_A} = \tan \theta_1 = \cot \alpha \\ \frac{y_P - y_B}{x_P - x_B} = \tan \theta_2 = \tan(\pi - \theta_2') = -\tan \theta_2' = -\cot(2\pi - \beta) = \cot \beta \end{cases} \quad (2)$$

由方程组(2)中上式可得

$$y_P = (x_P - x_A) \cot \alpha + y_A \quad (3)$$

将 y_P 代入到方程组(2)中的下式, 即可解得

$$x_P = \frac{x_A \cot \alpha - x_B \cot \beta + y_B - y_A}{\cot \alpha - \cot \beta} = \frac{x_A \cos \alpha \sin \beta - x_B \cos \beta \sin \alpha + (y_B - y_A) \sin \alpha \sin \beta}{\cos \alpha \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha} \quad (4)$$

将解得的 x_P 代入到式(3)中, 即可解得

$$\begin{aligned} y_P &= \frac{x_A \cot \alpha \cot \beta - x_B \cot \alpha \cot \beta + y_B \cot \alpha - y_A \cot \beta}{\cot \alpha - \cot \beta} \\ &= \frac{(x_A - x_B) \cos \alpha \cos \beta + y_B \cos \alpha \sin \beta - y_A \sin \alpha \cos \beta}{\cos \alpha \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha} \end{aligned} \quad (5)$$

因此, 落点 P 的坐标可以表示为

$$\begin{cases} x_P = \frac{x_A \cos \alpha \sin \beta - x_B \cos \beta \sin \alpha + (y_B - y_A) \sin \alpha \sin \beta}{\cos \alpha \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha} \\ y_P = \frac{(x_A - x_B) \cos \alpha \cos \beta + y_B \cos \alpha \sin \beta - y_A \sin \alpha \cos \beta}{\cos \alpha \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha} \end{cases} \quad (6)$$

2 定位精度及影响因素比较

2.1 多站时差定位系统精度

理论分析和任务实践表明,多站时差定位系统定位偏差等于单站测距误差 ε 与水平几何精度衰减因子 $HDOP^{[3]}$ 的乘积。

2.1.1 单站测距误差 ε

其中,单站测距误差 ε 包含端站坐标测量误差 ε_R 和端站时间测量误差 ε_T 。

端站坐标测量误差 ε_R 可以利用高精度授时差分系统,多次测量取平均值的办法缩小至 5m 左右。其中,高精度授时差分系统既可以实现系统授时功能,也能够实现端站站址测量的功能。

端站时间测量误差 ε_T 包括:信号传播误差 ε_c 、测量站间授时误差 ε_s 、测量站本地时钟误差 ε_q 、遥测接收机噪声引起的随机误差 ε_d 、多普勒效应误差 ε_f 。

其中,信号传播误差 ε_c 主要由大气延迟、测量站周围物体反射引起的多路径效应等产生,一般认为信号传播误差 ε_c 约为 5 ns;测量站间授时误差 ε_s 利用高精度授时差分系统的单星共视技术,实测可以小于 20 ns。测量站本地时钟误差 ε_q 采用 200 MHz 高准稳时钟时,实测为 5 ns;接收机噪声引起的随机误差 ε_d 在系统码率为 2 Mbps 情况下实测为 27 ns;多普勒效应误差 ε_f 根据工程经验通常认为约为 15 ns。综上所述,时间测量随机误差为

$$\varepsilon_{Tmax} = \sqrt{2\varepsilon_c^2 + \varepsilon_s^2 + 2\varepsilon_q^2 + \varepsilon_d^2 + \varepsilon_f^2} \quad (7)$$

由式(7)计算可得,多站时差定位系统的端站时间测量误差 ε_T ,折算成单站距离误差约为 12m。

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_{Tmax}^2 + \varepsilon_R^2} \quad (8)$$

进一步计算可得多站时差定位系统的单站测距误差 ε 约为 13m。

2.1.2 水平几何精度衰减因子 $HDOP$

影响系统定位精度的另一个重要因素是水平几何精度衰减因子 $HDOP$,系统最终定位误差是系统单站测距误差与 $HDOP$ 值的乘积^[4]。

对方程组(1)中的 $\Delta r_i = r_0 - r_i$,两边对 (x, y, z) 及 (x_i, y_i, z_i) 求微分得到

$$d\Delta r_i = (H_{0x} - H_{ix})dx + (H_{0y} - H_{iy})dy + (H_{0z} - H_{iz})dz + (k_0 - k_i) \quad (9)$$

$$\text{其中, } \begin{cases} H_{ix} = \frac{x - x_i}{r_i} \\ H_{iy} = \frac{y - y_i}{r_i} \\ H_{iz} = \frac{z - z_i}{r_i} \end{cases}, \quad k_i = H_{ix}dx_i + H_{iy}dy_i + H_{iz}dz_i。$$

将上式写成矢量形式为

$$d\Delta R = \mathbf{H} \times d\mathbf{R} + d\mathbf{S} \quad (10)$$

$$\text{其中, } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{x-x_0}{r_0} & \frac{x-x_1}{r_1} & \frac{y-y_0}{r_0} & \frac{y-y_1}{r_1} & \frac{z-z_0}{r_0} & \frac{z-z_1}{r_1} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{x-x_0}{r_0} & \frac{x-x_i}{r_i} & \frac{y-y_0}{r_0} & \frac{y-y_i}{r_i} & \frac{z-z_0}{r_0} & \frac{z-z_i}{r_i} \end{bmatrix}$$

解得定位误差估计值的最小二乘解为

$$d\mathbf{R} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T (d\Delta \mathbf{R} - d\mathbf{S}) = \mathbf{C}(d\Delta \mathbf{R} - d\mathbf{S}) \quad (11)$$

其中, $\mathbf{C} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T = [c_{ij}]_{5 \times 5}$

从 2.1.1 节中可以知道,站址的测量误差可以提前测量出来并固定在一个值以内,这里定义为 $\delta_{\Delta i}$ 。

将 $\delta_{\Delta i}$ 在 x 、 y 、 z 三个方向上分解之后得到: $\delta_{\Delta xi}$ 、 $\delta_{\Delta yi}$ 、 $\delta_{\Delta zi}$ 。

$$\text{令 } [e_{ij}]_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} \delta_{\Delta x1}^2 \eta & \delta_{\Delta x1} \delta_{\Delta x2} \eta & \delta_{\Delta x1} \delta_{\Delta x3} \eta & \delta_{\Delta x1} \delta_{\Delta x4} \eta & \delta_{\Delta x1} \delta_{\Delta x5} \eta \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{\Delta xi} \delta_{\Delta x1} \eta & \delta_{\Delta xi} \delta_{\Delta x2} \eta & \delta_{\Delta xi} \delta_{\Delta x3} \eta & \delta_{\Delta xi} \delta_{\Delta x4} \eta & \delta_{\Delta xi} \delta_{\Delta x5} \eta \end{bmatrix}$$

其中, η 为各站站址误差测量的相关系数, 因此, 定位误差在 x 、 y 、 z 方向上的方差分别为

$$\begin{cases} \delta_x^2 = \sum_{k=1}^5 \sum_{i=1}^5 c_{1k} c_{1i} e_{ki} \\ \delta_y^2 = \sum_{k=1}^5 \sum_{i=1}^5 c_{2k} c_{2i} e_{ki} \\ \delta_z^2 = \sum_{k=1}^5 \sum_{i=1}^5 c_{3k} c_{3i} e_{ki} \end{cases} \quad (12)$$

在实际定位中, 我们只关心弹头落地之后水平面的偏离, 而忽略垂直方向上的偏离 (即弹头总归是要落在地上的), 因此, 最后可得 $HDOP$ 计算方法为

$$HDOP = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} \quad (13)$$

从公式 (10) 可以看出, 导弹相对各站的方位角余弦由各站与导弹的几何位置关系决定, 即与导弹的实际落点和各站布站以及基线长度相关。因此, 空间中某固定点的 $HDOP$ 值取决于测站布站及基线长度, 另一方面在布站确定之后 $HDOP$ 值在水平面和垂直方向上呈不规则分布。

2.2 多站时差定位系统精度案例分析

为了解多站时差定位系统精度的影响因素, 下面以多站时差设备参加某次试验任务的真实情况建立模型, 利用 MATLAB 进行仿真, 分析定位精度 (主要是 $HDOP$) 的变化情况。多站时差定位系统布站图如图 2 所示, 仿真结果如图 3 所示。

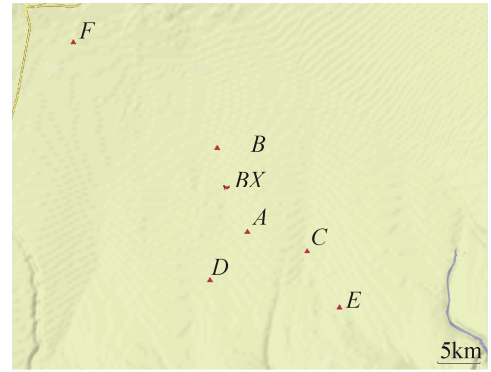


图 2 多站时差设备某任务布站图
Fig. 2 Layout of multi-sites location TDOA system in a certain mission

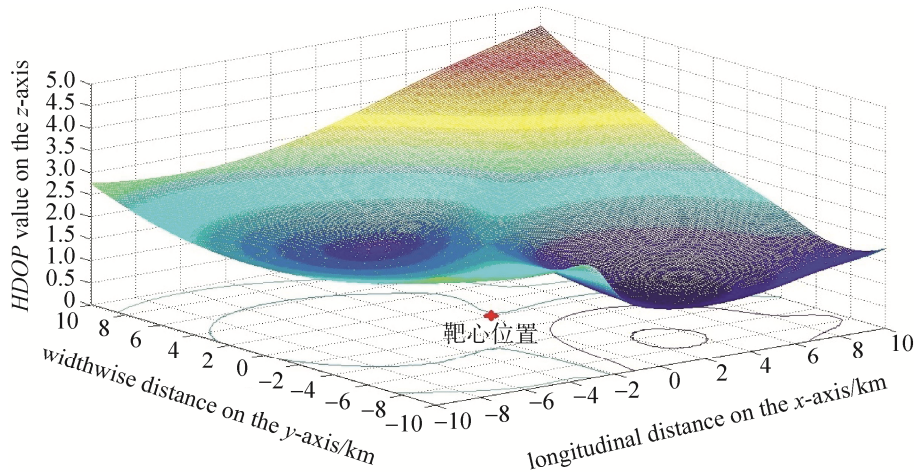


图 3 多站时差某任务布站 $HDOP$ 仿真结果

Fig. 3 $HDOP$ simulation result in a certain mission of multi-sites location TDOA system

从图 2 可以看出, 多站时差设备布置在 F 点主场坪, 其余 5 个端站围绕靶心分别布置在 A 、 B 、 C 、 D 、 E 点。从图 3 可以看出, A 、 B 、 C 、 D 、 E 这 5 点对靶心东南 2 公里附近包围最好, 与该点连线夹角非常匀称, 因此, 该点附近的 $HDOP$ 值也最小 (2 以内); 另外一个次小点在靶心西北 3.5 公里处, 主

场坪 F 点及 A 、 B 、 D 、 E 对该处包围较好, 与该点连线夹角也比较匀称; 靶心东北方向 $HDOP$ 较大, 且随着距离的延长越来越大, 最大值出现在东北方向 14 公里处。这是因为所有端站全部在该点斜下方, 且随着距离变远, B 、 A 、 C 、 E 与该点之间连线的夹角越来越小。

根据该仿真结果, 在靶心纵向 ± 5 km、横向 ± 5 km 范围内, $HDOP$ 值小于 3, 参考上文单站测距误差 ε 约为 13m (1σ) 可得, 若弹头落入该区域, 预计定位误差小于 39m (1σ); 在靶心纵向 5 km ~ 10 km、横向 5 km ~ 10 km 范围内, $HDOP$ 值小于 5, 若弹头落入该区域, 预计定位误差小于 85m (1σ); 其余区域误差介于两者之间。

下面对影响定位精度的因素做简要分析。

2.2.1 基线长度的影响

基线长度即端站与靶心连线的长度。理论上基线长度越长, 误差在整体时差当中占的比例越小, $HDOP$ 值越小。在真实布站基础上将部分端站 (A 、 B 、 C 、 D 点) 沿靶心后移 5 km, 仿真结果如图 4 所示。

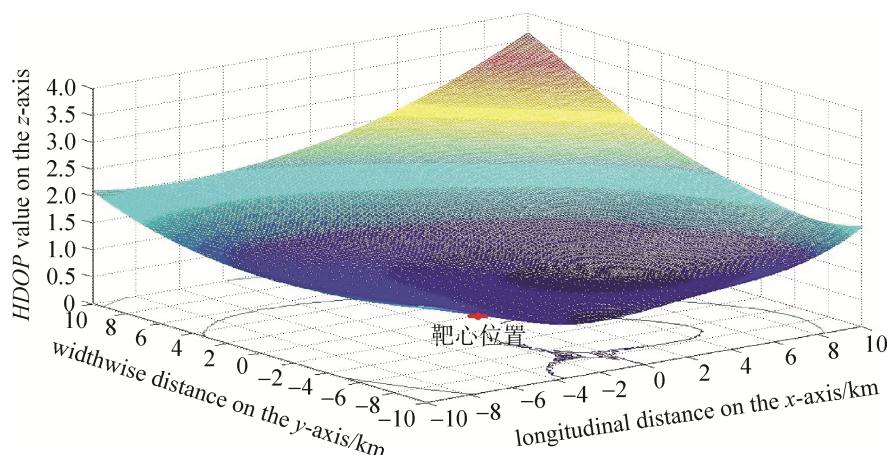


图 4 部分端站后移以后 $HDOP$ 仿真结果

Fig. 4 $HDOP$ simulation result after moving some calculated elements

将图 3 与图 4 相比发现, 与理论分析一致: 延长基线以后, $HDOP$ 值明显变小。因此, 在实际布站时, 在天线的作用距离范围内, 应该尽量延长端站基线, 最好能够达到天线作用距离的一半以上。

2.2.2 距离高度的影响

为验证 $HDOP$ 值在垂直方向上的变化趋势, 选取靶心上面一系列点分别仿真, 结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出, $HDOP$ 值在垂直方向上基本呈现逐渐变小的趋势。这是因为随着高度的升高, 基线变长。实际任务落点测量精度优于信号源校验时落点测量精度, 这也从实践上验证了该理论的准确性, 即基线长度越长, $HDOP$ 值越小。(在实际任务中, 落点测量使用了更多的精度较高的空中点, 而校验过程中信号源始终在靶心附近地面固定点不动)。因此, 在落点解算过程中采用累积多点外推的方法, 比末端单点测量精度更高。

2.2.3 布站数量的影响

布站数量是影响定位精度的重要因素, 去掉 E 点重新布站并仿真, 结果如图 6 所示。

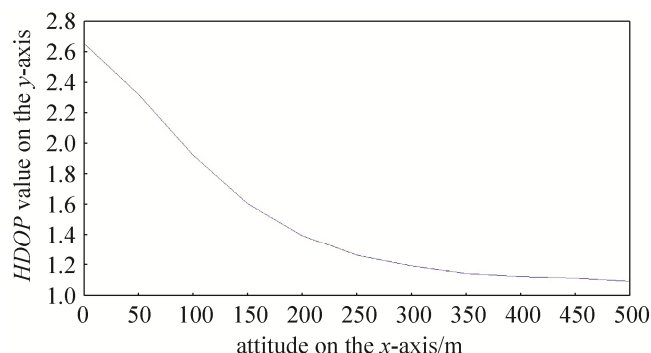


图 5 距离高度对 $HDOP$ 影响示意图

Fig. 5 Influence of height to $HDOP$

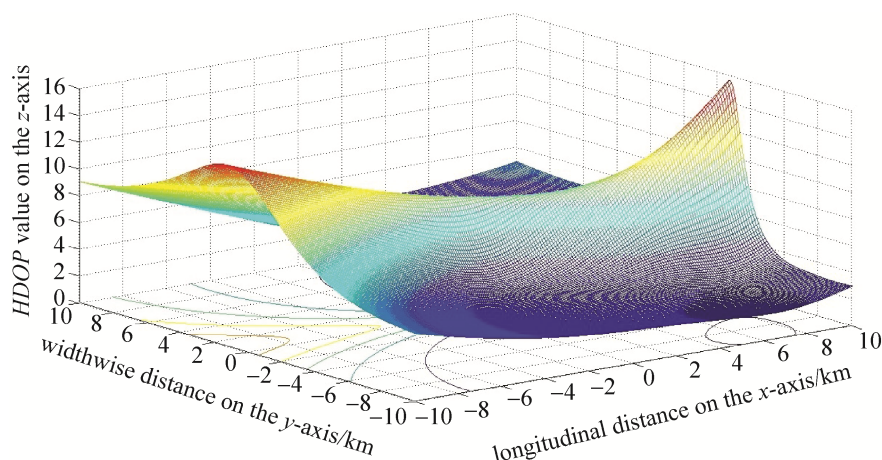


图 6 去掉 E 站以后 HDOP 仿真结果

Fig. 6 HDOP simulation result after a calculated element-E deleted

对比图 6 与图 3 发现, 去掉 E 站以后, 大部分区域 HDOP 值普遍变大, C、E 点连线区域 HDOP 值变小。多站时差定位系统将某个站作为时间基准, 至少还需要 3 个不同方向上的时间矢量差才能解算落点。增加测量站之后, 参与解算的时间矢量差增加, 理论上精度更高。只是容易在特定点方向上形成时间矢量差方向重合的情况, 类似几何交汇中夹角为 180° 时的情况, 此时, HDOP 会急剧变大。

因此, 去掉 E 站以后, 大部分区域 HDOP 值普遍变大, 精度变差; C、E 点连线区域因为时间矢量差不再重合, HDOP 变小。因此, 在实际测量中, 一般情况下增加测量站可以提高测量精度, 但是要尽量避免测量站与靶心连线夹角过小 (小于 15°)。如果不得已出现该情况, 要将该方向上基线相对短的测量站去掉后进行解算。

2.2.4 布站几何形式的影响

从图 3 可以看出, 在靶心的右上方, HDOP 有一个很明显的峰值。这是因为这片区域几乎没有端站, 所有的端站都在它的下方, 我们把 E 点调到这片区域重新布站并仿真, 结果如图 7 所示。

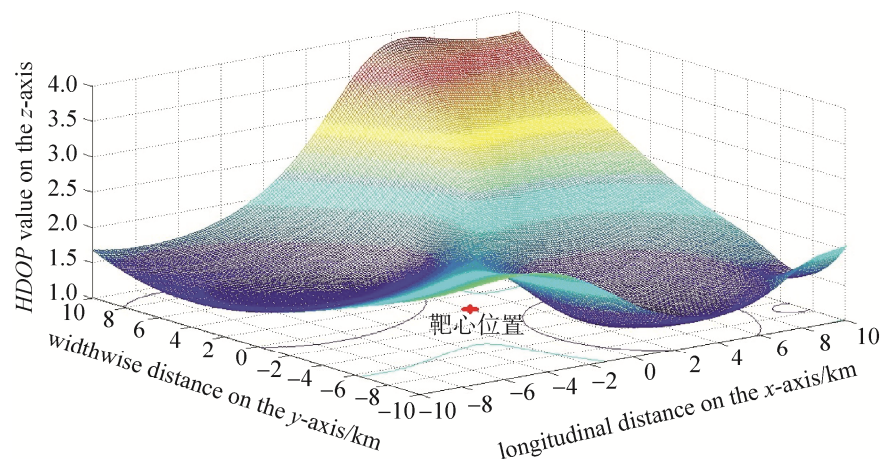


图 7 调整 E 站以后 HDOP 仿真结果

Fig. 7 HDOP simulation result after moving a calculated element -E

对比图 7 与图 3 发现: 靶心右上方因为有了 E 点, HDOP 值明显下降; y 轴为 -10 的区域, 因为 E 点被抽走, 曲面略微上翘。因此, 在实际任务布站当中, 测量站要尽量围绕靶心均匀分布, 照顾到各个方向, 防止出现偏离一侧的情况。

2.3 方位交汇定位系统精度

从方位交汇定位系统原理可知, 方位交汇定位系统误差主要包含观察点站址测量误差和方位交汇角

度测量误差, 其中, 站址测量误差可以进一步折算入角度测量误差中。因此, 下面重点分析方位交汇端站观察角度误差对定位精度的影响。

方位交汇测量落点精度的主要影响因素为 A 、 B 点方位角观测误差, 在图 8 中, B 点向 AP 作垂线, 垂足为 N 。记 $\angle NAB$ 为 α , $\angle NBP$ 为 β , $\angle ABP$ 为 γ , $\angle NPB$ 为 ϕ 。下面分析若 $\angle ABP$ 增加微小量 $d\gamma$ 后, 对 P 点位置的影响有多大。

显然有

$$NP = NB \tan \beta \quad (14)$$

上式两边全微分, 有

$$dNP = \tan \beta dNB + NB \sec^2 \beta d\beta \quad (15)$$

$\angle NAB$ 保持不变时 NB 不会改变, 也就是说 $dNB=0$

$\angle ABP$ 的增加量 $d\gamma$ 与 $d\beta$ 相同, 亦即 $d\gamma=d\beta$

则由式 (15) 可以得到

$$dNP = \frac{NB}{\cos^2 \beta} d\beta = \frac{NB}{\cos \beta} \frac{1}{\cos \beta} d\beta = \frac{BP}{\sin \phi} d\gamma \quad (16)$$

上述公式表明: $\angle ABP$ 增加微小量 $d\gamma$ 后, P 点位置将改变 $\frac{BP}{\sin \phi} d\gamma$ 。

同理: $\angle NAB$ 增加微小量 $d\alpha$ 后, P 点位置将改变 $\frac{AP}{\sin \phi} d\alpha$ 。

因此, P 点的位置误差 m_P 满足下式

$$m_P = \sqrt{\left(\frac{AP}{\sin \phi}\right)^2 m_A^2 + \left(\frac{BP}{\sin \phi}\right)^2 m_B^2} = \frac{\sqrt{AP^2 m_A^2 + BP^2 m_B^2}}{\sin \phi} \quad (17)$$

假定方位交汇的水平角标称精度为 m_α , 则 $m_A^2 = m_B^2 = 2m_\alpha^2$, 代入上式即可得到

$$m_P = m_\alpha \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sin \phi} \cdot \sqrt{AP^2 + BP^2} \quad (18)$$

2.4 方位交汇定位系统精度影响因素

2.4.1 方位交汇水平观测标称精度的影响

从 2.3 节可知, 方位交汇定位系统误差与方位交汇水平观测标称精度 m_α 成正比, 为了减少测量误差, 该值越小越好。该值取决于生产时模具及加工精度, 一经生产便相对固定; 后期使用当中要充分注意爱护, 使之长期处于较小的水平。

2.4.2 夹角的影响

从 2.3 节可知, $\angle NPB$ 接近 90° 时, 测量误差最小, 因此, 在实际使用过程中观察点位应该尽量选择理论落点的相交垂线上。

2.4.3 基线长度的影响

从 2.3 节可知, 在观察点 A 、 B 位置确定之后, 落点 P 与 A 、 B 两点间的距离越小误差越小, 因此, 在实际使用中方位交汇应该尽量靠近靶心布站。

其中, 炮队镜定位系统标称精度 (折算观察点站址测量误差之后) 一般为 0.1° 左右; 观测点位一般布设在离靶心 10 km 左右的范围内, 即 $AP=BP=10$ km; 观察点位与靶心夹角 $\angle NPB$ 在 $10^\circ \sim 90^\circ$ 范围内。因此, 可得炮队镜定位系统测量精度约为 3 m~20 m。

图像定位系统标称精度 (折算观察点站址测量误差之后) 一般为 0.1° 左右; 观测点位一般布设在离靶心 0.5 km~3 km 左右的范围内; 观察点位与靶心夹角 $\angle NPB$ 在 $10^\circ \sim 90^\circ$ 范围内。因此, 可得图像定位

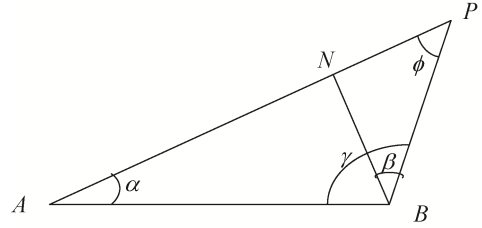


图 8 方位交汇定位精度分析示意图

Fig. 8 Sketch of multi-directional position system's precision analysis

系统测量精度约为 1 m~10 m。

2.4.4 其他因素的影响

方位交汇定位系统还会受其他因素的影响, 比如空气折射率不均会带来角度和距离测量的误差, 大风天气造成的烟尘位移会导致观测点位与真实落点之间方位角的测量误差等。理想状况下, 空气折射率不均匀引起的误差对系统误差的影响可以忽略不计。由于观测点位是人工观测, 导弹落地激起烟尘的时刻, 观测员立即展开了方位角的测量记录, 而且在实验任务中, 落点测量的精度要求一般在米级, 因此, 大风天气导致烟尘位移从而引起的误差也可以忽略不计。

3 两种定位系统优劣性比较

3.1 多站时差定位系统优劣势分析

3.1.1 多站时差定位系统优点分析

① 可以全天候地执行任务

多站时差定位系统使用遥测信号定位, 不受白天黑夜、天气情况、能见度大小等影响。

② 可形成末端时差弹道

多站时差定位系统接收末端遥测信号可以形成末端时差弹道, 尤其在使用扩频遥测时, 因为接收机灵敏度高、天线作用距离远, 该弹道延续时间比较长, 是中心对下引导弹道的重要补充。

③ 覆盖范围大

多站时差定位系统测量端站配备有各种天线, 可以根据端站相对导弹射向方位和距理论靶心远近做灵活调整, 多个端站之中只要有 4 个站收到数据就能够定位, 多站时差设备一般配备有 6~10 个测量端站, 因此, 可以对靶心周围形成一个较大的覆盖范围。

3.1.2 多站时差定位系统缺点

① 严重依赖遥测信号

多站时差定位系统使用遥测信号中帧同步码的时间差进行落点解算。在弹头不安装遥测发射机的型号任务中(俗称光头弹任务), 或在弹头为加速弹的型号任务中, 因弹头再入速度过快, 而产生低空再入全程黑障的现象, 导致多站时差定位设备因为无法接收到遥测信号, 而不能提取各端站的时间差, 该系统无法使用。

② 原理和操作复杂, 测站数量多(一般布置 6 个), 对通信的实时性和带宽要求较高

多站时差定位系统端站结构零散, 使用条件恶劣, 薄弱环节较多; 不同遥测帧格式、不同端站组合、不同外推点数都对最后解算结果影响较大, 要求操作人员必须有较强的实战经验。多站时差设备落点计算软件判定各测量站时间信息为同一帧的依据是不超过 1 ms, 因此, 要求遥测帧频不能小于 1 ms; 两端站之间距离差折算的时间差不能大于 1 ms; 站间通信时延不能大于 1 ms。另外, 主副站之间通信所需带宽是端站数量与遥测帧频、时间信息长度的乘积, 在高码速率条件下, 带宽要求较大。

③ 测站布站方式(即水平几何精度衰减因子 $HDOP$)对定位精度影响极大

多站时差定位系统定位偏差量与 $HDOP$ 值成正比, 事前布站只能尽量确保靶心附近 $HDOP$ 值较小, 当导弹实际落点偏离靶心较远时, 因为布站原因导致 $HDOP$ 值急剧变差, 落点解算精度也较差。

3.2 方位交汇定位系统优劣势分析

3.2.1 方位交汇定位系统优点分析

① 原理简单, 操作简单, 测站数量少(一般布置 2 到 3 个测站)。

② 对通信依赖程度低, 只需上报测站角度一个参数, 通信方式选择余地多。

③ 定位精度相对稳定, 在满足夹角条件下与落点散布范围关系不大。

3.2.2 方位交汇定位系统缺点分析

① 容易受昼夜、天气、能见度等因素影响。

② 对导弹速度有要求, 弹头小、速度慢的任务型号不能激起烟尘。

③ 测站必须有人值守, 危险区较大的任务型号需要掩体等遮挡。

3.3 任务适应性分析

3.3.1 只能使用方位交汇定位系统任务类型

- ① 弹头无遥测信号的试验任务;
- ② 加速弹头因再入速度过大而全程黑障的试验任务;
- ③ 采用 TPC 编码等技术打乱遥测帧格式的型号。

3.3.2 只能使用多站时差定位系统任务类型

- ① 任务窗口在夜晚, 无法看见烟尘的试验任务;
- ② 天气能见度差, 无法看见烟尘的试验任务;
- ③ 再入速度较慢, 无法激起烟尘的试验任务。

3.3.3 重合任务类型

在方位交汇和多站时差定位系统均能参加任务的情况下, 可以依据下列原则选配参试设备:

- ① 危险区较大、预期落点偏差较大时, 多站时差定位系统因为覆盖距离范围大的优势而应该优先考虑;
- ② 危险区较小、预期落点精准时, 方位交汇定位系统因为精度较高的优势而应该优先考虑。

4 结束语

本文将多站时差定位系统和方位交汇定位系统的定位原理、定位精度和精度影响因素进行了分析对比, 建立了多站时差定位系统和方位交汇定位系统的定位误差模型。对多站时差定位系统的历史任务数据和任务真实布站情况进行了仿真计算; 分别分析了单站测距误差、布站基线长度、布站距离高度、布站数量、布站几何形式等因素对多站时差定位系统定位精度的影响。分析了水平角观测标称精度、观测点与落点之间的距离、两个观测点与落点连线之间的夹角等三个因素对方位交汇定位系统定位误差的影响。分析了多站时差定位系统和方位交汇定位系统两者各自的优缺点, 并结合武器试验实际, 提出了多站时差定位系统和方位交汇定位系统各自适用的任务类型。

参考文献

- [1] 刘传保. 时差定位法精度分析[J]. 现代雷达, 1992, 21(2): 16–22.
LIU Chuanbao. The analysis of the time division of arriving[J]. Modern Radar, 1992, 21(2): 16–22.
- [2] 王永诚, 张令坤. 多站时差定位技术研究[J]. 现代雷达, 2003, 25(2): 1–4.
WANG Yongcheng, ZHANG Lingkun. Position location using TDOA measurements in multisites[J]. Modern Radar, 2003, 25(2): 1–4.
- [3] 刘轩, 尹忠科, 王建英. 多形态分区的子系统融合多站时差定位[J]. 现代雷达, 2009, 31(6): 15–19.
LIU Xuan, YIN Zhongke, WANG Jianying. Multi-site TDOA location based on multi-form subsystems fusion[J]. Modern Radar, 2009, 31(6): 15–19.
- [4] 王瀚, 钟丹星, 周一宇. 不规则布站时差定位系统定位精度分析[J]. 现代电子技术, 2007, 246(7): 19–24.
WANG Han, ZHONG Danxing, ZHOU Yiyu. Location precision analysis in the time difference of arrival location system using irregular distribution[J]. Modern Electronics Technique, 2007, 246(7): 19–24.

[作者简介]

- 张旭峰 1986 年生, 本科, 工程师, 主要从事航天测控领域遥测遥控工作。
- 李敏剑 1984 年生, 硕士, 工程师, 主要从事航天测控领域遥测遥控工作。
- 刘晨阳 1986 年生, 本科, 工程师, 主要从事航天测控领域遥测遥控工作。