

基于动态加权的光电经纬仪航迹测量

郝宁波^{1,2}, 邵明省³

(1. 武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 黄淮学院国际学院, 河南 驻马店 463000;

3. 鹤壁职业技术学院, 河南 鹤壁 458030)

摘要:针对光电经纬仪测量误差因素,提出加权因子的异面交会方法。首先建立光电经纬仪异面交会测量模拟,对异面误差问题采用加权因子控制设计,引入测量误差的人为因素作为模型参数隐含在模型中,运用最优化方法求解上述约束方程,解得经纬仪的模型参数,从而从原理上消除人为因素带来的误差,提高测量模型的精度,最后建立空间目标模型并进行仿真计算,得到了航迹测量优化后的坐标。仿真结果表明误差小于交会误差,测得数据较真实的反应飞行航迹,提高对被测目标的定位精度。

关键词:光电经纬仪;异面交会;加权;航迹

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Based on weighted factor of the photoelectric theodolite track measurement

HAO Ning-bo^{1,2}, SHAO Ming-sheng³

(1. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. School of International College, Huanghuai University, Zhumadian 463000, China;

3. Hebi Occupation Technology College, Hebi 458030, China)

Abstract: Theodolite measurement error factors, presents a weighted factor in nonplanar intersection method. First of all, will personally set up different measurement theodolite simulation, then the existence of different surface error control design problem using the weighted factors, introduction of the human factor as a measurement error model parameters implicit in the model, using optimization method for solving the constraint equations, solve for theodolite model parameters, thus theoretically eliminating the error caused by human factors, to improve the measurement accuracy of the model, and finally to establish a spatial object model and simulated, are the coordinates of the optimized trajectory measurement, The simulation result indicated the error is smaller than the junction to meet the error, obtains the data real response flight track, enhances to is measured the goal the pointing accuracy.

Key words: photoelectric theodolite; intersection measurement; weighted; track

1 引言

利用光电经纬仪测量空中飞行目标的轨迹是国内广泛使用的一种方法,当不同经纬仪获得目标的不同部位,即一台获得目标的中部而另一台没有获得此部位,由于没有完全对应的图像点而失效^[1]。

后来出现最短距离法和方向余弦法,虽然此方法在数据处理速度上有所提高,但是对外部条件变

化和噪声的大小都比较敏感,导致定位精度在实验过程中变化较大^[2]。用仿射不变矩提取目标的特征量,需要建立飞机的姿态库,操作比较复杂^[3]。

本文利用异面交会,再对测量方向进行加权因

作者简介:郝宁波(1977-),男,博士研究生,讲师,研究方向为图像处理,模式识别,信号测量。E-mail: hnb1303383@163.com

收稿日期:2010-06-10; **修订日期:**2010-07-23

子优化,调整因外界变化而引起距离的测量变化,动态计算权值,经加权平均后,通过描述目标运动的仿真模型,将虚拟目标的运动误差与经纬仪的理论误差对比,并对目标运动轨迹、姿态进行探讨,提高了跟踪的精度。

2 动态加权航迹测量

2.1 经纬仪异面交会测量

两个光电经纬仪观测同一目标^[4],如图1所示, O_1M_1, O_2M_2 分别是两台光电经纬仪的光轴,取其公垂线 M_1M_2 ,并在公垂线 M_1M_2 按照统计规律取定 $M(X, Y, Z)$ 作为目标真实位置的估计。

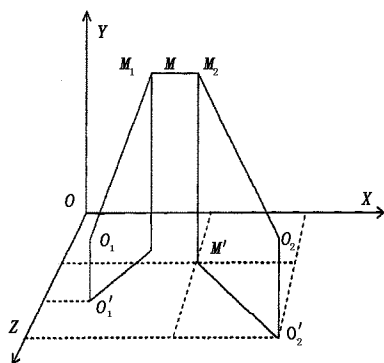


图1 经纬仪异面交会测量方法示意图

设光电经纬仪 $O_1(x_1, y_1, z_1), O_2(x_2, y_2, z_2)$,测量目标 M 的方位角、高低角分别为 $(\alpha_1, \lambda_1), (\alpha_2, \lambda_2)$,所以 O_1M_1, O_2M_2 的方向向量分别为:

$$L_1 = (\cos\alpha_1, \tan\lambda_1, \sin\alpha_1), L_2 = (\cos\alpha_2, \tan\lambda_2, \sin\alpha_2)$$

空间两异面直线 O_1M_1, O_2M_2 的方程分别为:

$$\frac{x_{m1} - x_{01}}{\cos\alpha_1} = \frac{y_{m1} - y_{01}}{\tan\lambda_1} = \frac{z_{m1} - z_{01}}{\sin\alpha_1} = l_1$$

$$\frac{x_{m2} - x_{02}}{\cos\alpha_2} = \frac{y_{m2} - y_{02}}{\tan\lambda_2} = \frac{z_{m2} - z_{02}}{\sin\alpha_2} = l_2$$

求得解为:

$$\begin{cases} x_{m1} = x_{01} + l_1 \cos\alpha_1 \\ y_{m1} = y_{01} + l_1 \tan\lambda_1 \\ z_{m1} = z_{01} + l_1 \sin\alpha_1 \end{cases}, \begin{cases} x_{m2} = x_{02} + l_2 \cos\alpha_2 \\ y_{m2} = y_{02} + l_2 \tan\lambda_2 \\ z_{m2} = z_{02} + l_2 \sin\alpha_2 \end{cases}$$

由于 $M_1M_2 \perp O_1M_1$ 和 $M_1M_2 \perp O_2M_2$,解出 M_1, M_2 两点的坐标值后,确定了目标 $M = (x, y, z)$ 在 M_1M_2 的连线上。

异面交会算法,虽然克服常规交会方法中由于目标大小引起的空间直线不相交的弊端,但是由于测量点与目标航迹之间的关系动态变化,测量出的航迹参数精度也在变动,并且随着距离的增加,精度

越来越差。另外,大气折射误差、指向误差和设备系统误差等影响很难做到每组交会数据都是在主光轴相交的情况下产生,因此存在异面误差,需要对目标跟踪进行优化。

2.2 确定动态加权因子

异面交会测量误差的来源一方面是测角元素的误差;另一方面是测量站坐标值的误差。通过协方差确定权值,减少误差^[5]。设目标估计值为 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$,任意两台交会测量值为 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) ,其方差为 σ_{xij} ,三个方向加权因子分别为 $w_{xij}, w_{yij}, w_{zij}$,总方差为:

$$\sigma_x^2 = E[(x - \hat{x})^2] = E\left[\sum_{\substack{i \neq j \\ i \geq 1, j \leq k}} w_{xij}^2 (x - x_{ij})^2 + 2 \sum_{\substack{i \neq j \\ i \geq 1, j \leq k}} w_{xij} w_{xji} (x - x_{ij})(x - x_{ji})\right]$$

根据多元函数求极值理论,当总均方误差 $D_x = \sigma_{x_{\min}}^2 = 1 / \sum_{\substack{i \neq j \\ i \geq 1, j \leq k}} \sigma_{xij}^{-2}$ 最小时,可得出加权因子为:

$$w_x = 1 / (\sigma_{xij}^2 \sum_{\substack{i \neq j \\ i \geq 1, j \leq k}} \sigma_{xij}^{-2})$$

权值分配为:

$$\sigma_x^2 = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{x_i}^2}, \sigma_y^2 = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}, \sigma_z^2 = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{z_i}^2}$$

求目标 $\hat{x}$ 方向的值为: $\hat{x} = \sum_{\substack{i \neq j \\ i \geq 1, j \leq k}} w_x x_{ij}, w_x =$

$\sum_{\substack{i \neq j \\ i \geq 1, j \leq k}} w_{xij} = 1$,同理求 $\hat{y}, \hat{z}$ 形式也一样。这样得出测量点如下:

$$\begin{cases} \hat{x} = \frac{\sigma_{x_2}}{\sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}} x_1 + \frac{\sigma_{x_1}}{\sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}} x_2 \\ \hat{y} = \frac{\sigma_{y_2}}{\sqrt{\sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2}} y_1 + \frac{\sigma_{y_1}}{\sqrt{\sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2}} y_2 \\ \hat{z} = \frac{\sigma_{z_2}}{\sqrt{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2}} z_1 + \frac{\sigma_{z_1}}{\sqrt{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2}} z_2 \end{cases}$$

式中, $\sigma_{x_i}, \sigma_{y_i}, \sigma_{z_i}$ 为各方向的平均定位精度。进行坐标变换后^[6],可求俯仰角和偏航角:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{m}{\sqrt{l^2 + w_x^2}}\right), \theta = -\arctan\left(\frac{l}{w_x}\right)$$

其中, m 为 M_1M_2 的距离, l 为 l_1l_2 的距离。

通过加权因子的设置,这样减少实际基准面的倾角与水平面之间的差值。

2.3 仿真模型

目标仿真系统根据目标运动特性和轨迹参数^[7],

首先计算目标在系统采样时刻点的位置 (x_i, y_i, z_i) :

$$x_i = 1000 \cos(45^\circ) i^2$$

$$y_i = 1000 \sin(45^\circ) i + \frac{9.8}{2} i^2, i = 0, 0.04, 0.08,$$

0.12, \dots

$$z_i = 0$$

对于每个时刻的目标空间位置 $^{[8]}(x_i, y_i, z_i)$,解出目标在测量设备局部坐标中的局部坐标 (R_i, A_i, E_i) :

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2}$$

$$A_i = \arctan(z_i - z_s) / (x_i - x_s)$$

$$E_i = \arctan(y_i - y_s) / R_i$$

若经纬仪角度编码器实时采集的仪器指向为 (A_{0i}, E_{0i}) ,求得时刻 i 目标相对经纬仪主光轴的角度偏移量 $^{[9]}(D_{Ai}, D_{Ei})$:

$$D_{Ai} = A_i - A_{0i}, D_{Ei} = E_i - E_{0i}$$

这样就可以确定目标在探测器靶面内成像的中心像素坐标 $^{[10]}$ 。

根据贝塞尔公式计算经纬仪的动态测角精度 $^{[11]}$,以方位角均方根误差仰角均方根误差表示:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A'_2 - A_{i0})^2}{n-1}}, \sigma_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E'_2 - E_{i0})^2}{n-1}}$$

式中, σ_A 为经纬仪方位动态测角精度; σ_E 为经纬仪俯仰动态测角精度; n 为一个周期的数据总数; A_{i0} 为靶标在点处的方位指向值; E_{i0} 为靶标在点处的俯仰指向值; A'_2 为经纬仪在点处测量的方位角; E'_2 为经纬仪在点处测量的俯仰角。

目标函数为:

$$f(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, r_x, r_y, r_z, k) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{(\Delta \nu)^2}{\sqrt{2+k^2}} + \frac{(\Delta h)^2}{\sqrt{2+k^2}} + \frac{(\Delta d)^2}{\sqrt{2+k^2}} \right)$$

式中, i 为测量点序列; k 为距离分量的权系数与角

度分量的权系数之比,水平角和俯仰角的权系数相同; $\Delta \nu, \Delta h, \Delta d$ 为坐标转换前后的水平角、俯仰角和距离的差值 $^{[12]}$ 。

3 实验仿真

仿真条件:角度测量最小读数 $1''$,测角精度 $2''$,望远镜数据参数物镜孔径 40 mm ,放大倍率 $40\times$,视场角 $1^\circ 20'$,最短视距 1.3 m ,视距乘常数 100 ,倾斜传感器自动垂直补偿,补偿范围 $\pm 3'$,后期数据处理采用 Matlab 软件编程实现。目标距离测试点的初始距离为 72 km ,初始高度为 1.55 km 。目标以 426 m/s 的初始速度做匀速直线飞行, 30 s 后进行转弯,航向改变 90° ,沿新航向飞行 30 s 后再做转弯机动,同时目标开始俯冲,将高度降到 0.79 km 后平飞 30 s ,进行航向调整,在新航向上继续飞行大约 30 s 后再进行最后一次转弯机动,最后目标做匀速直线飞行直至航程终止。

经纬仪对方位角和俯仰角进行模拟,以正态分布仿真实际误差分布,统计被测目标的空间位置及其误差,最后对模拟测量结果进行数据融合,确定目标的最终空间位置及其误差,图2为模拟空间目标飞行被击中的瞬间,图3是某时间段内模拟测量的数据,实线为导弹跟踪轨迹,虚线为目标轨迹,从仿真结果看导弹跟踪曲线几乎没有偏离目标,初始精度相差很小,几乎重合,随着距离的增加,精度的差别越来越明显。

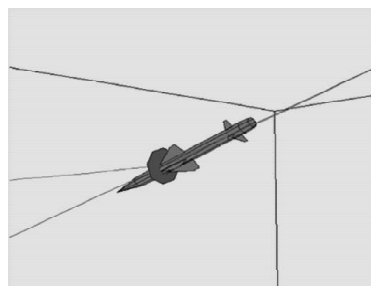
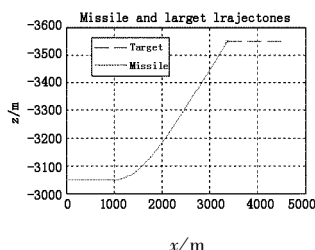
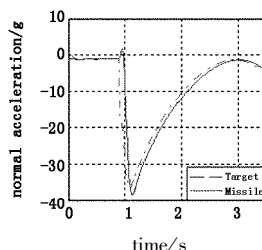


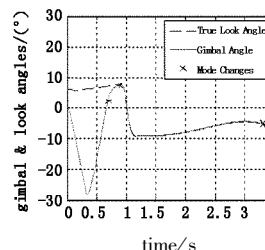
图2 目标被击中



(a) 导弹跟踪击中目标



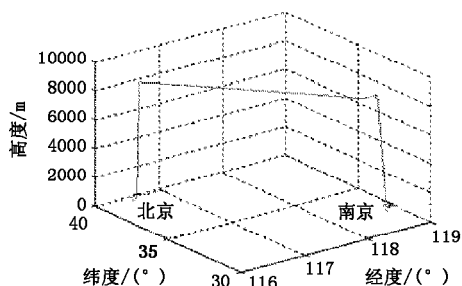
(b) 跟踪航迹



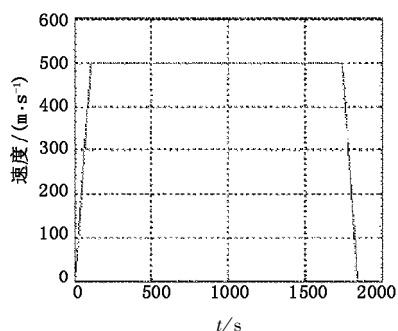
(c) 从真实的角度观测导弹方向角

图3 跟踪效果

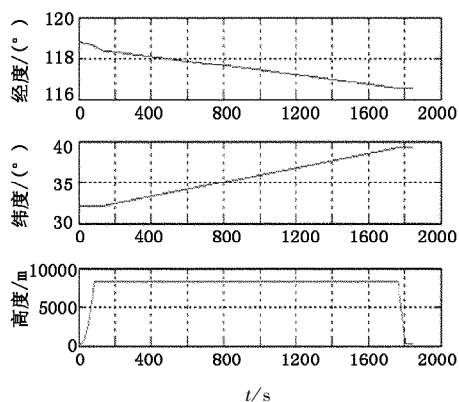
假设飞行航迹仿真如图4所示,利用最优加权因子充分利用模拟测量信息,消除非人为所造成的误差,融合误差小于任两台的交会误差,测得数据较真实的反应了飞行航迹。



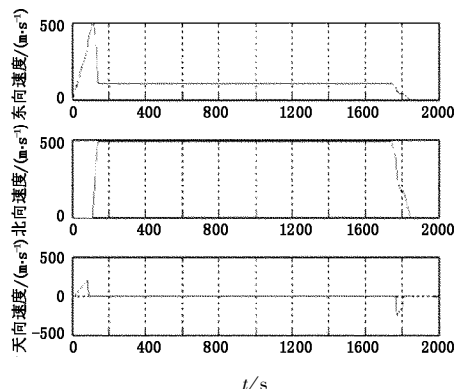
(a) 空间航迹(南京→北京)



(b) 速度测量



(c) 飞行经、纬、高度测量

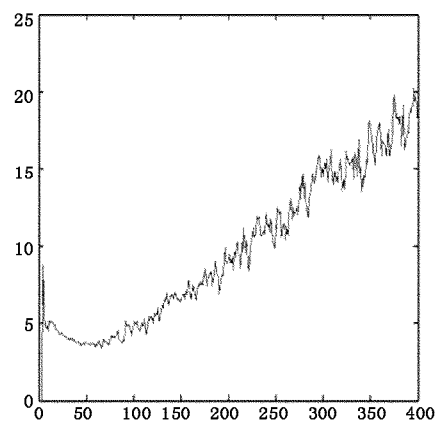


(d) 东、北、天速度测量

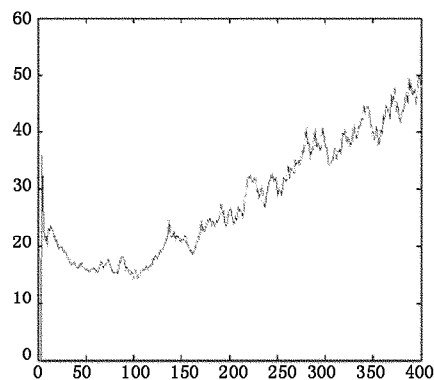
图4 航迹测量仿真

图5是纵坐标是模拟测量值的均方差曲线,最

优加权因子根据误差传播规律,实时计算两个定位结果的误差协方差,根据协方差大小的比较确定权值,协方差较大的定位精度较差,取较低权值;协方差较小的定位精度较高,赋予较大的权值,这样提高了跟踪的精度,从计算和模拟测量误差曲线看出,模拟测量结果较符合数据计算结果。



(a) 计算误差曲线



(b) 模拟测量误差曲线

图5 计算和模拟测量误差

4 总 结

本文采用异面交会对空间目标跟踪模拟测量,加权因子解决了每组交会数据的异面误差,实时调整加权因子,能够提高对空中目标的辨识精度,辨识空中目标及其运动轨迹是非常有效的方法,对提高经纬仪综合测量能力具有重要意义。

参考文献:

- [1] Guo Jin Hu. Single theodolite three-dimensional profile measurement and treatment methods [J]. Electro-Optic Technology Application, 2009, 24(4): 51-53. (in Chinese)
郭金虎. 单台经纬仪三维姿态测量及处理方法[J]. 光电技术应用, 2009, 24(4): 51-53.
- [2] Zhao Xin, Wang Shi-feng, Tong Shou-feng, et al. New

- method on zero position calibration of shipborne radar [J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35 (2): 169 - 171, 176. (in Chinese)
- 赵馨,王世峰,佟首峰,等. 舰载雷达零位标校新法[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(2): 169 - 171, 176.
- [3] Du Jun Feng. Error budget design for photoelectric theodolite [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27 (6): 506 - 509. (in Chinese)
- 杜俊峰. 光电经纬仪测量精度指标的确定[J]. 应用光学, 2006, 27(6): 506 - 509.
- [4] Wang Fa Dong. Study on photoelectric theodolite real time guide [M]. Chang Chun: Chang Chun University of Science And Technology, 2005: 26 - 40. (in Chinese)
- 王法栋. 光电经纬仪实时引导的研究[M]. 长春: 长春理工大学, 2005: 10 - 20.
- [5] Zhang Chun Fu, Tang Wen Yan, Li Hui Peng, et al. Application of dynamic weighting in HVD coordinate integrated algorithm [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(9): 1419 - 1421. (in Chinese)
- 张春富,唐文彦,李慧鹏,等. 动态加权在激光跟踪仪球坐标整合中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(9): 1419 - 1421.
- [6] Zhao Zhi Chao, Liu Yi, Xiao Shun Ping. Dynamic weighted fusion algorithm and its accuracy analysis for multi-radar localization [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(5): 35 - 36, 58. (in Chinese)
- 赵志超,刘义,肖顺平. 多雷达定位的动态加权融合算法及其精度分析[J]. 电光与控制, 2010, 17(5): 35 - 36, 58.
- [7] Xie Qin Lan, Chen Hong. Design of target identification and tracking system based on multi-CPU [J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17(8): 1525 - 1527. (in Chinese)
- 谢勤岚,陈红. 基于多CPU的目标识别与跟踪系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(8): 1525 - 1527.
- [8] Li Hui, Shen Xiang Heng. New shafting error simulating method of photoelectric theodolite [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 334 - 337. (in Chinese)
- 李慧,沈湘衡. 光电经纬仪轴系误差仿真计算的新方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 334 - 337.
- [9] Jiang Wei Wei, Gao Yun Guo, Feng Dong Yan, et al. New shafting error simulating method of photoelectric theodolite [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(12): 1638 - 1641. (in Chinese)
- 姜伟伟,高云国,冯栋彦,等. 车载光电经纬仪基准平面测角误差修正[J]. 红外与激光工程, 2009, 30(12): 1638 - 1641.
- [10] Jiang Nan, Li Shan. Computer networked on photoelectric theodolite testing system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(z3): 1817 - 1819. (in Chinese)
- 江南,李珊. 光电经纬仪测量系统的网络化分析[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(z3): 1817 - 1819.
- [11] Zhu Wei, Zhao Li Rong, Liu Yu Han, et al. Extraction method for missile bullet multiple targets of photo-electronic theodolites [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2140 - 2144. (in Chinese)
- 朱玮,赵立荣,柳玉晗,等. 光电经纬仪子母弹多目标提取方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2140 - 2144.