

doi:10.3788/gzxb20174604.0411003

# 光电经纬仪多目标实时交会方法

吴静<sup>1,2</sup>, 苏秀琴<sup>1</sup>, 郭敏<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710019)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**为实现实时计算多个目标飞行轨迹,并引导设备跟踪目标,根据目标运动特性和光电经纬仪跟踪测量的固有特性,设计了一种多目标实时交会方法,解决了同名目标点的排序和假目标轨迹剔除问题,最终得到正确的目标轨迹.试验证明,对于跟踪目标  $N \leq 3$ ,通信周期 50 ms 的光电经纬仪测量系统,利用该多目标实时交会算法处理测量数据,可实时、精确、稳定引导测量设备进行跟踪工作.

**关键词:**多目标实时交会;多目标跟踪;异面直线交会;光电经纬仪

中图分类号:TN215

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)04-0411003-7

## Multiple Targets Real-time Intersection of Optic-electronic Theodolite

WU Jing<sup>1,2</sup>, SU Xiu-qin<sup>1</sup>, GUO Min<sup>1</sup>

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710019, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to achieve the real-time calculating about the flight trajectories of the multiple targets and guiding the equipment to track the targets, a real-time multi-target intersection method was proposed. Such method is based on the characteristic of target movement and the inherent characteristic of optic-electronic theodolite tracking measurement. This algorithm can achieve the goals of sorting homologous measurement data and eliminating the false target trajectory, and finally get the true target trajectory. The algorithm is applied to the optic-electronic theodolite measuring system which is under the condition of target  $N \leq 3$  and communication cycle being 50ms. The experiment results show that the method can guide the measuring equipment to track accurately, stably and in real time.

**Key words:** Multi-target real-time intersection; Multi-target track; Non-coplanar line intersection; Optic-electronic theodolite

**OCIS Codes:** 110.6770; 350.4600; 000.2170; 000.4430; 040.7290

## 0 引言

在靶场武器试验中,常常采用光电经纬仪对目标实施跟踪定位.在飞机载弹飞行等试验中,要求光电经纬仪具有同时跟踪多个目标的能力.尤其是在主次目标分离时,需要获取次跟目标的轨迹,引导测量系统中光电经纬仪对次跟目标进行跟踪、或进行实时报靶,因此对多目标的实时交会计算是当前光电靶场领域研究的课题之一.目前已有的实时交会算法仅是对单目标进行计算,而多目标交会算法均为事后交会处理算法<sup>[1-6]</sup>.事后多目标交会方法研究重点主要集中于坐标转换<sup>[7-8]</sup>、交会测量的公式推导<sup>[9]</sup>、系统精度分析<sup>[10-12]</sup>等领域,文献<sup>[1]</sup>采用 Hough 坐标转换法提取炮弹轨迹,对测量站的数量和布站方式都作了严格要求,文献

基金项目:国防 995 工程资助

第一作者:吴静(1985—),女,博士研究生,主要研究方向为经纬仪控制数据处理软件、大气湍流退化图像复原算法. Email:wujing\_xd@163.com

导师(通讯作者):苏秀琴(1965—),女,研究员,博导,主要研究方向为光电经纬仪伺服控制系统、监控、红外及可见光跟踪测量和视频记录等. Email:suxiuqin@opt.ac.cn

收稿日期:2016-10-28;录用日期:2016-12-29

<http://www.photon.ac.cn>

[2]使用最短距离法去剔除假目标,未对测量数据中测量点如何匹配进行分析.文献[5]利用模糊聚类解决目标点之间的关联问题,再利用 Kalman 滤波算法对关联后的测量进行滤波和预测,从而得到多弹道轨迹.文献[10]主要研究了假目标剔除方法,但要求获取 4 个测量站的有效测量数据.本文通过对飞行目标的运动特性和光电经纬仪跟踪测量的固有特性进行研究,设计了一种多目标实时处理算法,解决了多目标实时交会方法中测量数据同源目标点排序和假目标轨迹剔除两个问题.

## 1 光电经纬仪交会测量原理

### 1.1 异面直线交会原理

假设某测量系统使用两台光电经纬仪去观测目标点  $M$ ,且目标点始终在经纬仪视场中.以靶场坐标系( $O$ - $XYZ$ )为准, $OX$ 指向大地正北, $OY$ 指向高程, $OZ$ 按照右手定律确定.在此坐标系内,两个分站的站址坐标分别为  $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 和  $O_2(X_2, Y_2, Z_2)$ .两台经纬仪所测得的同一目标点的方位角和俯仰角分别为  $A_i$ 和  $E_i, i=1, 2, i$ 是站址序号,图 1 给出了异面直线交会原理图.

理论上根据测量站位置和测量方位角  $A$ 与俯仰角  $E$ 唯一确定一条空间射线  $O_1M$ 和  $O_2M$ ,两条

空间射线交会到一点  $M$ ,从而确定观测目标的位置.但实际测量中,受经纬仪结构、目标大小、成像原理、测角准确度、时间同步误差及外界环境因素的影响,两台经纬仪观测同一目标时射线  $O_1M$ 、 $O_2M$ 并不相交于目标上同一点,而是呈现异面关系<sup>[9]</sup>,因此考虑到系统误差的异面直线交会计算更适合实际工程需要.

假设目标点  $M$ 与  $M_1$ 、 $M_2$ 点具有关系: $M_1M/M_1M_2 = \rho, \rho \in [0, 1]$ ,其中  $M_1M_2$ 分别表示异面直线  $O_1M_1$ 、 $O_2M_2$ 的公垂线线段  $M_1M_2$ 的长度, $M_1M$ 表示线段  $M_1M$ 的长度, $\rho$ 为根据各经纬仪不同的测角精度选择的加权系数,对同类型光电经纬仪  $\rho$ 可取 0.5.

异面直线  $O_iM_i$ 的方向向量为  $(\cos A_i, \tan E_i, \sin A_i)$ ,其方程为

$$\frac{x_{m_i} - x_i}{\cos A_i} = \frac{y_{m_i} - y_i}{\tan E_i} = \frac{z_{m_i} - z_i}{\sin A_i} = L_i, \quad i=1, 2 \quad (1)$$

可得点  $M_i$ 的坐标为

$$\begin{cases} x_{m_i} = x_i + L_i \cos A_i \\ y_{m_i} = y_i + L_i \tan E_i \\ z_{m_i} = z_i + L_i \sin A_i \end{cases} \quad i=1, 2 \quad (2)$$

目标点  $M$ 的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} x_{m_1} \\ y_{m_1} \\ z_{m_1} \end{bmatrix} + (1-\rho) \begin{bmatrix} x_{m_2} \\ y_{m_2} \\ z_{m_2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

直线之间的距离  $D$ 为

$$D = [(x_{m_1} - x_{m_2})^2 + (y_{m_1} - y_{m_2})^2 + (z_{m_1} - z_{m_2})^2]^{1/2} \quad (4)$$

其中  $L_i, i=1, 2$ ,可由式(5)获得,即

$$\begin{cases} m_1 = \cos A_1 (x_1 - x_2) + \tan E_1 (y_1 - y_2) + \sin A_1 (z_1 - z_2) \\ m_2 = \cos A_2 (x_2 - x_1) + \tan E_2 (y_2 - y_1) + \sin A_2 (z_2 - z_1) \\ K = (\cos(A_1 - A_2) + \tan E_1 \tan E_2)^2 - \sec^2 E_1 \sec^2 E_2 \\ L_1 = \{m_2 [\cos(A_1 - A_2) + \tan E_1 \tan E_2] + m_1 \sec^2 E_2\} / K \\ L_2 = \{m_1 [\cos(A_1 - A_2) + \tan E_1 \tan E_2] + m_2 \sec^2 E_1\} / K \end{cases} \quad (5)$$

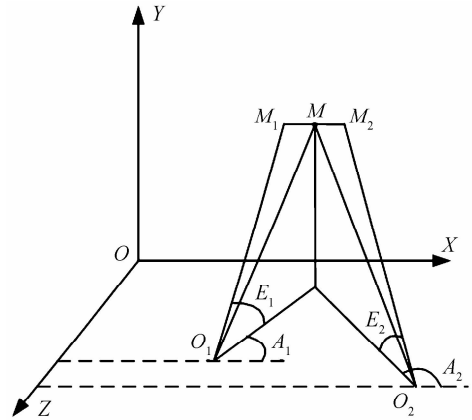


图 1 光电经纬仪异面直线交会原理图

Fig. 1 Diagram of Optic-electronic theodolites non-coplanar line intersection measurement

## 1.2 多目标交会测量原理

假设光电经纬仪观测到 3 个目标  $T_1, T_2, T_3$ , 且目标点始终在经纬仪视场中, 分站  $O_1, O_2$  的测量值为  $A_{i,j}$  和  $E_{i,j}, i=1, 2, j=1, 2, 3, i$  表示站号,  $j$  表示测量目标. 由异面直线交会原理可知两条空间射线可交会出一个目标, 图 2 中测量站  $O_1$  的 3 条射线  $L_1, L_2, L_3$  与测量站  $O_2$  的 3 条射线  $M_1, M_2, M_3$  相交出 9 个目标点, 其中  $L_1$  与  $M_1, M_2, M_3$  分别交于  $T_1, F_1, F_2$ ;  $L_2$  与  $M_1, M_2, M_3$  分别交于  $T_2, F_3, F_4$ ;  $L_3$  与  $M_1, M_2, M_3$  分别交于  $T_3, F_5, F_6$ .  $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$  是假目标. 通过判定异面直线的距离可剔除假目标, 得到真实目标  $T_1, T_2, T_3$  的坐标值.

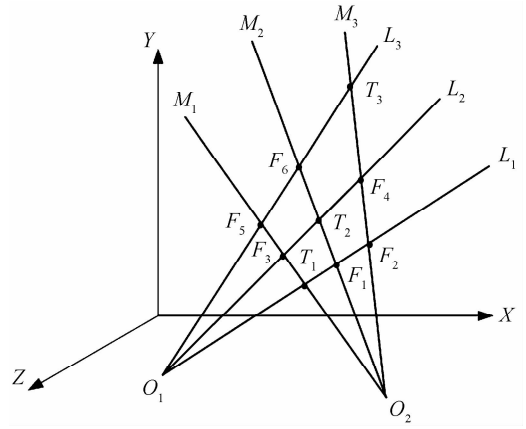


图 2 多目标交会测量示意图

Fig. 2 Diagram of intersection measure for multiple targets

## 2 本文方法

本文的主要工作包括多目标测量数据预处理和假目标剔除两部分. 多目标测量数据预处理指对多目标测量数据的野值剔除和同源目标排序, 并对数据预处理方法进行了仿真; 假目标剔除指测量数据经过预处理后分别进行交会, 得到多组目标轨迹, 通过判定剔除假目标, 得到真实目标的过程.

### 2.1 多目标测量数据预处理

#### 2.1.1 多目标测量数据的野值剔除

由于测量设备存在系统误差及通信传输误码, 在交会前需对测量数据进行野值剔除. 野值剔除常采用外推拟合法<sup>[13-15]</sup>, 以测量方位角为例, 把连续 4 帧正常的观测数据记为  $A_{i,j}(k-4), A_{i,j}(k-3), A_{i,j}(k-2), A_{i,j}(k-1)$ , 因此第  $k$  帧观测数据的估计值  $\hat{A}_{i,j}(k)$  为:  $\hat{A}_{i,j}(k) = A_{i,j}(k-1) + \frac{1}{2}A_{i,j}(k-2) - \frac{1}{2}A_{i,j}(k-4)$ , 观察值  $A_{i,j}(k)$  与估计值  $\hat{A}_{i,j}(k)$  满足  $|A_{i,j}(k) - \hat{A}_{i,j}(k)| < \delta$  时认为  $A_{i,j}(k)$  是正常值, 否则认为是野值, 剔除并用  $\hat{A}_{i,j}(k)$  代替.  $\delta$  值一般选择测量误差均方差的 3 倍.

#### 2.1.2 多目标测量数据同源目标排序

单目标测量时, 单个测站只有一组测量值, 对两测站数据进行时间对齐及有效性判定后即可利用异面直线法得到目标的位置. 而多目标测量时, 设备跟踪运动过程中目标次序未知或相对位置发生变化, 因此需要对每帧测量数据进行同源排序, 确定前后两帧测量数据之间的匹配关系, 保证其数据序列对应同一个目标.

通过对目标运动特性和设备跟踪测量的固有特性的研究发现: 连续运动目标在飞行过程中位置、速度、加速度均是连续平滑变化的. 当光电经纬仪稳定跟踪连续运动目标时, 测量数据的方位角和俯仰角也遵循上述规律.

以一个测量站的测量数据为例进行同源排序, 缓存  $k$  帧测量数据  $(A_j(k), E_j(k)), j=1, 2, 3$  表示目标数, 其中速度阈值  $\varphi$  和加速度阈值  $\gamma$  是通过测量设备的测量误差获得的, 一般选择测量误差的 3 倍. 同源数据排序的具体方法为:

- 1) 缓存 7 帧测量数据应用二阶中心平滑公式和三阶中心平滑公式<sup>[7]</sup> 计算方位  $A_j(k)$  的速度  $v_j(k)$  和加速度  $a_j(k)$ , 编码器  $A_j^o(k)$  的速度  $v_j^o(k)$  和加速度  $a_j^o(k)$ ;
- 2) 对于  $j=1, 2, 3$ , 判定任意两个  $j$  对应的速度是否满足  $|v_j(k) - v_j^o(k)| < \varphi$  且其对应的加速度是否满足  $|a_j(k) - a_j^o(k)| < \gamma$ , 满足可认为此帧数据是同源目标测量数据, 否则对应的  $j$  互换位置;
- 3) 对俯仰角  $E_j(k)$  重复步骤 1)、2) 进行排序.

#### 2.1.3 数据预处理仿真结果

图 3 给出了一组模拟的 3 目标测量数据, 其方位角为  $A_j(k), j=1, 2, 3, k=1, \dots, 21$ , 数据中目标相对位置发生变化, 从图 3(b) 中可以看出, 目标位置发生变换的测量数据曲线交叉, 对应的图 3(c) 和 (d) 中测量角速度和角加速度来回跳变剧烈. 通过算法对数据进行野值剔除和同源目标排序后, 数据曲线趋于平滑, 其速度和加速度曲线均显示平滑, 无剧烈跳变. 图 4 给出了处理后的测量数据、测量角速度和测量角加速度曲线.

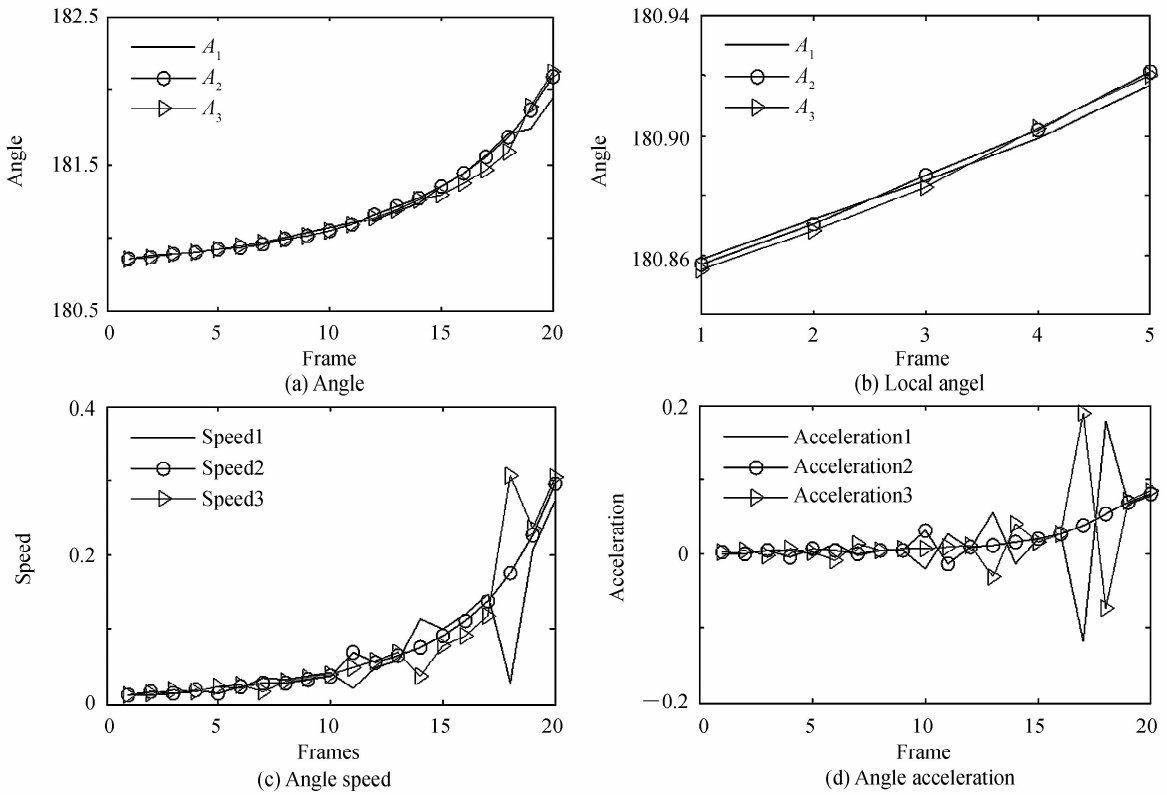


图3 模拟的测量数据

Fig. 3 Simulation of measured data

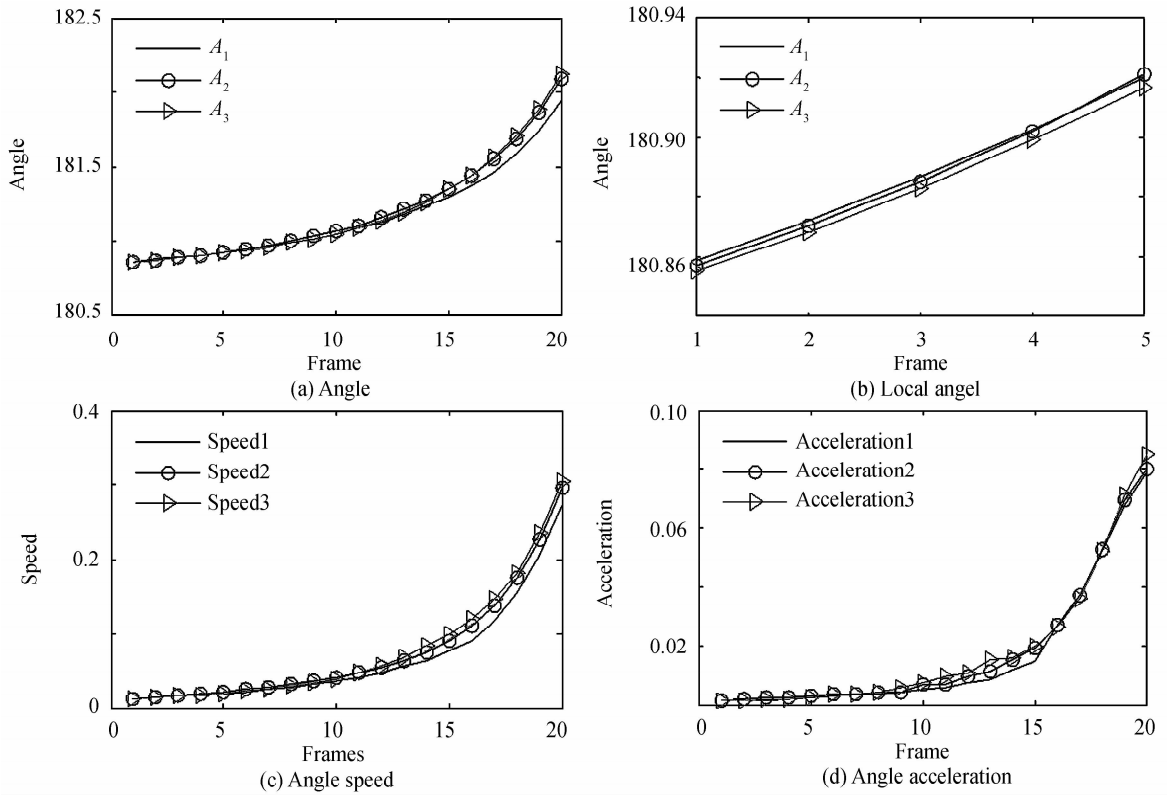


图4 排序后测量数据

Fig. 4 Sorted the measured data

## 2.2 假目标轨迹剔除

假目标轨迹的剔除可依据异面直线的距离来确定。异面直线交会原理认为空间距离最近的两条射线可以正确匹配出一个空间点目标,因此真实目标的异面直线距离最小,而假目标的异面直线距离较大,当目标

点空间分布的间距  $\Delta T$  大于  $M_1M_2$  时,可通过异面直线间的距离判定完成剔除假目标的工作。

### 3 红外经纬仪测量试验验证结果与分析

两站的坐标分别为  $O_1(15\ 000,0,200)$  和  $O_2(32\ 000,10,-160)$ ,初始时目标  $T_1, T_2, T_3$  分别相距 20 m, 14.177 45 m, 14.177 45 m, 红外经纬仪测量设备的实时测量精度为  $20''$ , 通信周期为 50 ms, 测量数据  $(A_{i,j}(k), E_{i,j}(k))$ , 站号  $i=1,2$ , 目标号  $j=1,2,3$ . 对两站测量数据进行多目标交会计算, 具体步骤如下:

- 1) 缓存  $K$  帧测量数据  $(A_{i,j}(k), E_{i,j}(k)), k=1, \dots, K$ , 对数据进行野值剔除;
- 2) 对处理后的数据进行同源测量数据排序, 得到各分站对应同一目标的测量数据  $(A'_{i,j}(k), E'_{i,j}(k))$ ;
- 3) 对测量数据  $(A'_{i,j}(k), E'_{i,j}(k))$  进行时间对齐、数据有效状态判定, 获得同一时刻的有效测量数据;
- 4) 利用异面直线交会法分别计算共交会出 9 条目标轨迹并分为 3 组, 其中  $(A'_{1,1}(k), E'_{1,1}(k))$  与  $(A'_{2,2}(k), E'_{2,2}(k))$  交会出第 1 组共 3 个目标轨迹;  $(A'_{1,2}(k), E'_{1,2}(k))$  与  $(A'_{2,2}(k), E'_{2,2}(k))$  交会出第 2 组共 3 个目标轨迹;  $(A'_{1,3}(k), E'_{1,3}(k))$  与  $(A'_{2,2}(k), E'_{2,2}(k))$  交会出第 3 组共 3 个目标轨迹. 每组包含一个真实目标和两个假目标;
- 5) 对每组异面直线的距离进行排序, 找出最短距离及其对应的  $j$  值, 若对应的  $j$  值各不相同则认为对应的是真实目标; 若有两组的  $j$  值相同, 例如  $j_1=j_2$ , 选择第 1 组中排序第 2 的距离所对应的  $j'_1$ , 判断  $j'_1 + j_2 + j_3 = 6$  是否成立, 成立则计算其距离和记为  $t_1$ , 不成立记  $t_1$  为 0; 选择第 2 组中排序第 2 的距离所对应的  $j'_2$ , 判断  $j_1 + j'_2 + j_3 = 6$  是否成立, 成立则计算其距离和记为  $t_2$ , 不成立记  $t_2$  为 0; 比较  $t_1, t_2$  的大小, 取距离和小且不为 0 的  $j$  所对应的坐标为真实目标. 真实目标的坐标记为  $T_i, i=1,2,3$ ;
- 6) 标记  $T_i$  对应的速度和加速度值, 以及对应的测量角度值, 继续步骤 1)~5).

按照上述步骤进行多目标实时交会计算, 最终得到 3 条目标轨迹. 图 5 给出了具体的实验结果, 其中图 5(a) 为 3 个真实目标的曲线; 图 5(b) 为真实目标的异面直线距离、速度和加速度曲线; 图 5(c) 为假目标的异面直线距离、速度和加速度曲线。

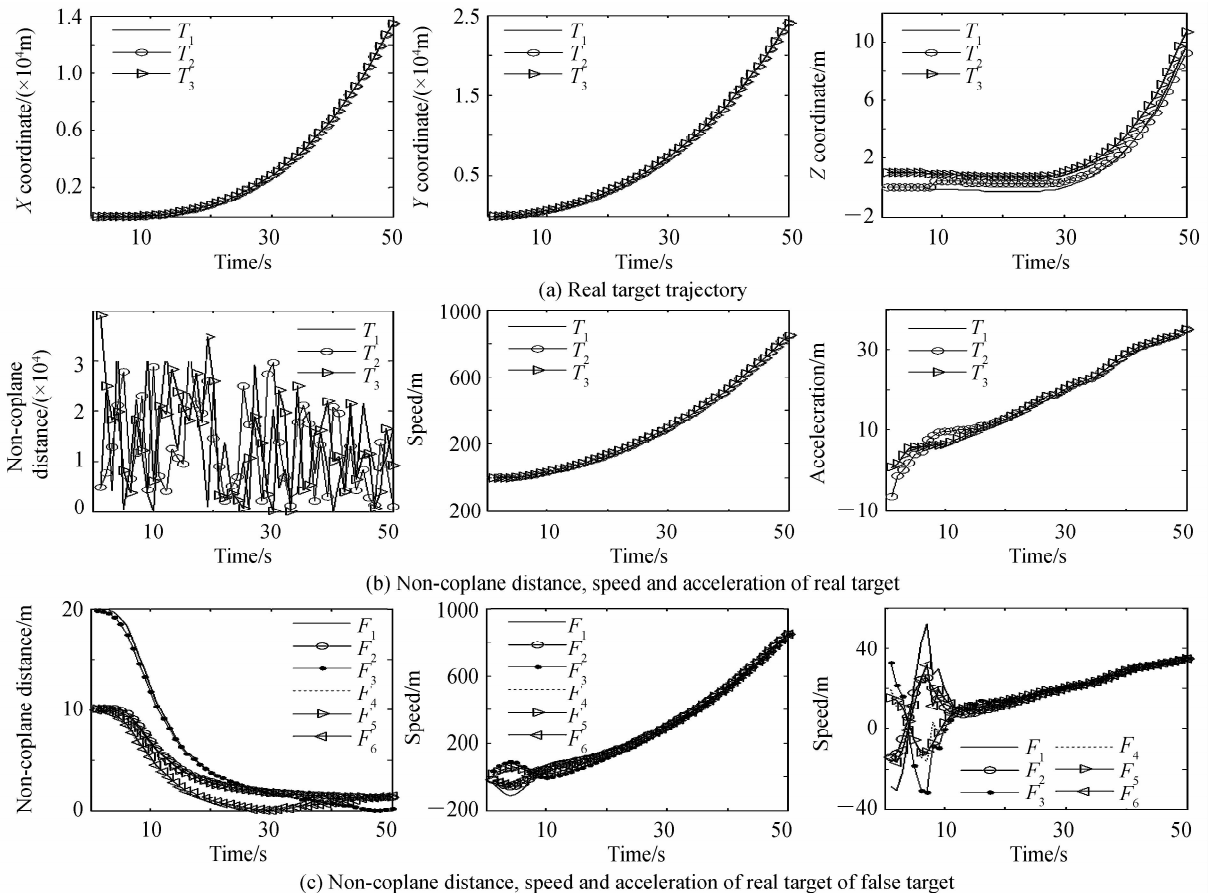


图 5 试验结果  
Fig. 5 Experiment result

由图5可见真实目标的异面直线距离较小,其速度和加速度曲线都很平滑,而假目标的异面直线距离较大,其速度和加速度曲线均有较大幅度的变化,因此可通过本文算法最终得到真实目标的坐标. 实际情况下,区分两个目标可通过式 $|T_1 - T_2| \leq \epsilon$ 确定,其中 $\epsilon$ 为系统测量误差, $T_1$ 、 $T_2$ 分别为两目标的坐标. 当两目标空间距离小于系统测量误差时,受设备精度所限无法区分两目标,可认为两个目标为一个目标,给出任意一个目标的坐标均认为是当前目标. 若需要更精确分辨多个目标,需提高测量设备精度. 本文算法在同源数据排序时需缓存多帧数据,交会的测量数据和当前时刻有时延,在引导设备时需对交会结果进行外推处理.

## 4 结论

本文利用运动目标飞行特性和光电经纬仪跟踪测量的固有特性,设定阈值对多目标连续测量数据进行筛选、排序得到其同源数据,利用异面直线交会法计算多条目标轨迹,并根据异面直线的距离剔除假目标,最终得到多目标的真实飞行轨迹. 本文算法是针对两个测量分站数据进行处理,当有多个分站参与试验时,可先选择具有最佳交会角的两站数据,再通过本文算法进行计算. 目前算法已经应用在某型红外光电经纬仪测量系统中,并在多目标测量试验中准确引导两个测量站去跟踪同一目标. 应用证明该算法具有实时性好、交会结果准确性高等特性,可推广应用.

## 参考文献

- [1] ZHOU Shao-guang, XIONG Ren-sheng, WU Sheng-xiong. Research on the method of measuring of multiple trajectories by intersection[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1997, **26**(3): 213-220.  
周绍光, 熊仁生, 吴圣雄. 交会法测量多弹道方法研究[J]. 测绘学报, 1997, **26**(3): 213-220.
- [2] CHAI Rao-jun, JI Da-shan, MA Cai-wen. Points matching algorithm for sophisticated multi-target intersection of TV theodolite[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(9): 28-40.  
柴饶军, 纪大山, 马彩文. 电视经纬仪复杂多目标交会测量点匹配算法[J]. 光电工程, 2004, **31**(9): 28-40.
- [3] HE Xiao-yong, WU Qin-zhang, GAO Xiao-dong, et al. Trajectory intersection method for missile bullets multiple ballistic of opto-electronic theodolites[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(9): 15-18.  
何小勇, 吴钦章, 高晓东, 等. 光电经纬仪子弹多子弹轨迹交会法[J]. 光电工程, 2006, **33**(9): 15-18.
- [4] ZHANG Ya-hui, ZHANG Qi-xiao, ZHU Wang-fei, et al. Techniques for analyzing data of multi-blasting points tested with viedo theodolite[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, **37**(2): 209-214.  
张亚辉, 张其霄, 朱望飞, 等. 电视经纬仪测试地面多炸点数据处理方法研究[J]. 应用光学, 2016, **37**(2): 209-214.
- [5] SU Li-yun, WU Qin-zhang, GAO Xiao-dong, et al. Opto-electronic theodolite multiple ballistic test base on fuzzy c-means clucstering[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(10): 5-8.  
苏理云, 吴钦章, 高晓东, 等. 基于模糊聚类的光电经纬仪多子弹弹道测量[J]. 光电工程, 2006, **33**(10): 5-8.
- [6] LIU yan-jun, WANG yong-xin, HE Xin, et al. Research of track recognition method for multiple targets[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(8): 1478-1482.  
刘岩俊, 王永新, 何昕, 等. 多目标轨迹分离方法研究[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(8): 1478-1482.
- [7] 刘利生, 吴斌, 吴正荣, 等. 外弹道测量精度分析与评定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [8] WANG Xiao-dong, YE Sheng-hua. Coordinate transform of data leaded real-time in theodolite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(Supplement): 492-494.  
王晓东, 叶声华. 光电经纬仪实时引导数据的坐标转换[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(增刊): 492-494.
- [9] WU Neng-wei, CHEN Tao. Application of non-coplanar intersection method to photoelectric theodolite[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*. 2006, **27**(6): 1233-1235.  
吴能伟, 陈涛. 异面直线法在光电经纬仪中的应用[J]. 仪器仪表学报. 2006, **27**(6): 1233-1235.
- [10] YAN Hai-xia, LIU Yan-jun. Method of coplanar multiple targets intersection and error analysis of measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(8): 15-19.  
闫海霞, 刘岩俊. 共面多目标交会方法及误差分析[J]. 光电工程, 2008, **35**(8): 15-19.
- [11] YAN Hai-xia, LIU Yan-jun, WANG Dong-he. Correction method of dynamic error of opto-electronic theodolite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(9): 3030-3035.  
闫海霞, 刘岩俊, 王东鹤. 光电经纬仪动态误差修正方法[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(9): 3030-3035.
- [12] WU Neng-wei, CHEN Tao. Development of photoelectric thedolite real-time guide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1965-1967.  
吴能伟, 陈涛. 光电经纬仪实时引导的实现[J]. 光子学报, 2007, **36**(10): 1965-1967.
- [13] 张大志. 光电经纬仪实时数据处理[D]. 成都: 电子科技大学, 2005.

- [14] TAO Jia-yuan, WANG Ke-yi, LUO Guo-xiong. Intersection measurement for field tests[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(8): 2369-2375.  
陶家园, 王克逸, 罗国雄. 用于外场试验的交会测量[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(8): 2369-2375.
- [15] GUO Jing-ming, ZHAO Jin-yu, HE Xin, *et al.* Calibration of installation angle for high accuracy shipboard star sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(3): 609-615.  
郭敬明, 赵金宇, 何昕, 等. 船载高精度星敏感器安装角的标定[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(3): 609-615.