

引用格式: HU Linting, LI Peijun, LI Dawei, et al. Tracking Performance Evaluation Method of Photoelectric Theodolite Based on Video Signal Injection[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1212003

胡林亭,李佩军,李大伟,等. 视频信号注入式光电经纬仪跟踪性能评估方法[J].光子学报,2021,50(12):1212003

视频信号注入式光电经纬仪跟踪性能评估方法

胡林亭,李佩军,李大伟,祝民鹏

(中国人民解放军 63850 部队,吉林 白城 137001)

摘 要:针对目前光电经纬仪目标跟踪性能评价方法的局限性,基于传统光信号注入式测试方法的优点,提出了一种改进的视频信号注入式测试方法。首先,根据目标在测试过程中的规划运动轨迹,计算目标与经纬仪光轴之间的空间映射关系,生成相应的目标图像和场景图像,并由目标模拟器投射到光电经纬仪,从而建立目标和场景图像数据库;其次,根据每次测量时刻目标空间位置和与经纬仪光轴之间空间映射关系,调用图像数据库中目标图像和场景图像,并根据目标的相对运动速度对目标图像进行模糊处理,再与场景图像融合注入到经纬仪的视频处理器中,实现经纬仪在无延迟信号注入条件下的跟踪性能测试。实验结果表明,提出的视频信号注入式测试方法能够达到外场评估的测量精度,不仅充分利用了传统光信号注入式测试方法的优点,还有效解决了目标模拟器投射延迟和需随动于经纬仪的难题,为光电经纬仪的跟踪性能评价提供一种新的有效解决途径。

关键词:光电经纬仪;跟踪性能;评估方法;视频信号;注入式

中图分类号:TN247

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215012.1212003

Tracking Performance Evaluation Method of Photoelectric Theodolite Based on Video Signal Injection

HU Linting, LI Peijun, LI Dawei, ZHU Minpeng

(Unit 63850 of PLA, Baicheng, Jilin 137001, China)

Abstract: Aiming at the limitation of the current target tracking performance evaluation method of photoelectric theodolite, an improved video signal injection test method is proposed based on the advantages of traditional optical signal injection test method. Firstly, according to the planned trajectory of the target during the test, the spatial mapping relationship between the target and the optical axis of the theodolite is calculated, and the corresponding target image and background image are generated, which are projected to the photoelectric theodolite by the target simulator, so as to establish the database for target and background image respectively. Secondly, according to the spatial position of the target as well as the spatial mapping relationship between the target and the optical axis of the theodolite at each measurement time, the target image and the background image in the image database are called. The target image is blurred according to the relative motion speed of the target, and then fused with the scene image, and injected into the video processor of the theodolite, so as to realize the tracking performance test of the theodolite with no-delay signal injection. The experimental results show that, the proposed video signal injection test method can achieve the measurement accuracy of outfield evaluation. It not only makes full use of the advantages of traditional optical signal injection test method, but also effectively solves the problems of the target simulator's projection delay and the need to follow the theodolite. It provides a new

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(No.51605465)

第一作者:胡林亭(1964—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为光电探测系统的测试与鉴定。Email: qitiandasheng0002@sina.com

收稿日期:2021-05-08;录用日期:2021-07-30

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

and effective way for tracking performance evaluation of photoelectric theodolite.

Key words: Photoelectric theodolite; Tracking performance; Assessment method; Video signal; Injection

OCIS Codes: 120.4800; 350.4800; 070.2025; 040.1520

0 引言

大口径跟踪式光电经纬仪由于能够同时记录被测目标图像、方位角以及俯仰角,广泛应用于靶场飞行目标轨迹参数测量和目标姿态参数实况记录,为武器性能的鉴定、事故分析等提供有效依据^[1-2]。

随着靶场光学测量技术的快速发展,对光电经纬仪跟踪性能的评价方法逐渐成为了研究热点,目前常用的方法主要分为实验室评估和外场评估两种。外场评估由于费用高、跟踪目标种类较少、环境因素复杂且不受控制等原因,往往无法全面综合考核目标特性和环境特征对光电经纬仪跟踪性能的影响。传统实验室评估包括光学动态靶标法和等效正弦引导检测法^[1],其中光学动态靶标法仅能提供一个近似正弦的运动目标,无法准确获取光电经纬仪跟踪系统的传递函数,因此只能用于理论分析,无法精确量化与修正跟踪误差;而等效正弦检测法由于没有相应的光学目标检测仪器,主要依赖被检设备的计算机来完成检测任务。即两种传统实验室评估方法皆不能有效模拟真实目标的光学特性、运动轨迹及场景特征,进而无法客观地评价光电经纬仪的跟踪性能^[3-5]。近年来国内外有很多学者提出了新的光电经纬仪跟踪性能评价方法,但這些方法在探测精度方面仍有待提高。例如,结合光学动态靶标检测法和等效正弦检测法,形成了一种新的光电经纬仪跟踪性能评价策略^[6],但未对光学动态靶标法中的目标信号进行误差分析,仍未解决传递函数精度低的问题;通过将光学动态目标靶标视为有限项谐波加权和组成的谐波源,并将光电经纬仪跟踪目标靶标的过程等效为一个理想的稳定线性时不变系统,实现了等效正弦法对光电经纬仪跟踪性能的评价^[7],但实际跟踪目标靶标的过程并不是一个理想的线性时不变系统,因而等效过程会引入一定误差;光信号注入式测试方法^[8]由于能够模拟多种不同目标和环境,且具有高性价比,得到了广泛的关注和应用,但由于其中目标模拟器的投射延迟和需要随动于经纬仪等问题,限制了该方法的高精度应用。

针对目前光电经纬仪跟踪性能评价方法的不足,本文提出了一种视频信号注入式测试方法,通过采用先拍摄图像、后跟踪测试的方式避免信号注入延迟,以解决传统光信号注入式测试方法中目标模拟器投射延迟引起的目标轨迹扰动问题和目标模拟器需要随动于经纬仪而带来的大尺寸、高动态性能要求问题。

1 视频信号注入式测试原理

1.1 传统光信号注入式测试原理及难点

光电经纬仪目标跟踪系统在目标轨迹范围内等间隔的离散时间点上进行目标跟踪测量,即根据每一次测量得到的跟踪误差,匹配跟踪模型,并设置跟踪系统的最佳转动速度,之后在下一个离散时间点再次测量对目标的跟踪误差,一直循环到停止目标跟踪^[8-10]。

传统光信号注入式测试方法是在每次经纬仪测量目标时刻(拍摄目标图像时刻),按照目标在跟踪视场中的位置,利用目标模拟器将目标和场景投射到经纬仪的摄像系统,以模拟实际跟踪运动目标时的景象,进而实现对光电经纬仪的性能测试^[11]。即对于经纬仪某一测量时刻 t ,由于已知目标 M 的大地坐标 $(x(t), y(t), z(t))$ 、经纬仪光轴方位角 $A(t)$ 和俯仰角 $E(t)$,可利用坐标系转换公式^[12]和经纬仪跟踪角误差计算公式^[13]求出注入目标在摄像视场中的位置 $(x'(t), y'(t), z'(t))$ 和目标角脱靶量,进而计算出 t 时刻所拍摄的目标姿态;并由 $A(t)$ 和 $E(t)$ 获取测量时刻对应场景,将目标与对应场景融合为一帧目标场景图,再利用目标模拟器投射到经纬仪摄像系统,进而完成一帧图像的注入^[13-14]。图1是一种典型光信号注入式测试系统工作原理示意图。

光信号注入式测试方法能够模拟多种不同目标和不同环境参数,且费用低,但为了使经纬仪获取的注入图像与实际跟踪运动目标的图像一致,目标模拟器投射过程往往要求目标位置精度高,且投射速度快^[9]。从图1可以看出,光信号注入式测试方法中光电经纬仪通过测量目标模拟器所投射的图像进行目标跟踪。然而目标模拟器在投射图像时都有一定的延迟,一般为几十毫秒,需要跟踪系统预测经纬仪摄像时刻的跟踪轴指向,使目标模拟器提前投射目标场景,进而使投射和拍摄同步。目标场景的注入参照点是经纬仪跟踪轴,经纬仪跟踪轴指向的预测误差会使投射目标位置偏离理论轨迹,进而导致经纬仪拍摄的目标轨迹围

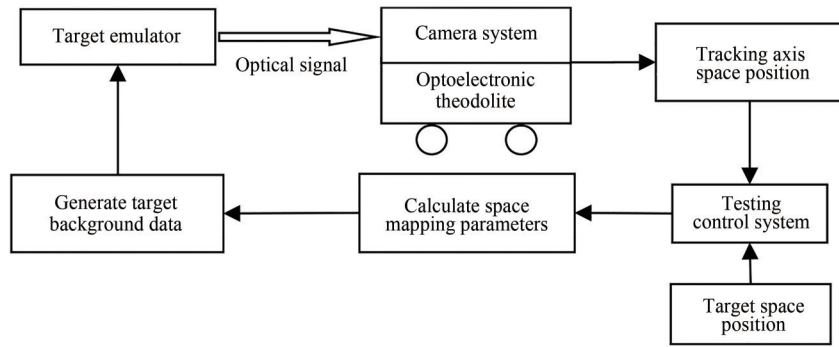


图1 一种典型光信号注入测试工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an optical signal injection based testing

绕规划的目标轨迹做扰动,如图2所示。而目标轨迹的扰动直接影响经纬仪的跟踪性能,极限情况下甚至会引入跟踪系统的发散,丢失目标,进而严重影响对经纬仪跟踪性能的检测精度。因此目标模拟器的投射延迟所引起的目标轨迹偏离是光信号注入式测试方法的一个难点。

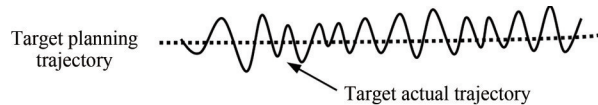


图2 有注入误差的目标轨迹

Fig. 2 Target trajectory with injection error

测试光电经纬仪跟踪性能的过程中,经纬仪摄像系统采集目标模拟器投射的图像后,由经纬仪视频处理器计算目标跟踪误差,并调整跟踪轴的方位角和俯仰角,在下一个离散时间点对应位置再次拍摄目标模拟器投射的图像。即经纬仪跟踪目标的过程是动态过程,在整个跟踪过程中目标模拟器需要随动于经纬仪的摄像系统,进而使目标模拟器光轴与经纬仪摄像系统光轴同轴^[15-16]。这不仅导致整个测量系统体积非常庞大,而且由于光轴偏移误差会引起目标像坐标的偏移,同样也会造成目标轨迹扰动现象。因此,构建大尺寸、高动态调整的目标模拟器是光信号注入式测试方法的另一难点。

1.2 改进的视频信号注入式测试原理及实施

1.2.1 基本思想

为了有效克服光信号注入式测试方法的两大难点,本文提出了一种改进的视频信号注入式测试方法,消除光信号注入延迟问题的同时,避免目标模拟器的高动态性能要求。图3是某型经纬仪跟踪系统中CCD相机、图像处理和伺服系统的工作时序图,可以看出,CCD相机的图像拍摄和图像获取处理之间有规律时间间隔的固定时序。因此,只要在CCD相机的每一帧图像曝光时间范围内能够生成当前帧对应的模拟目标场景图像,就可消除光信号注入延迟。

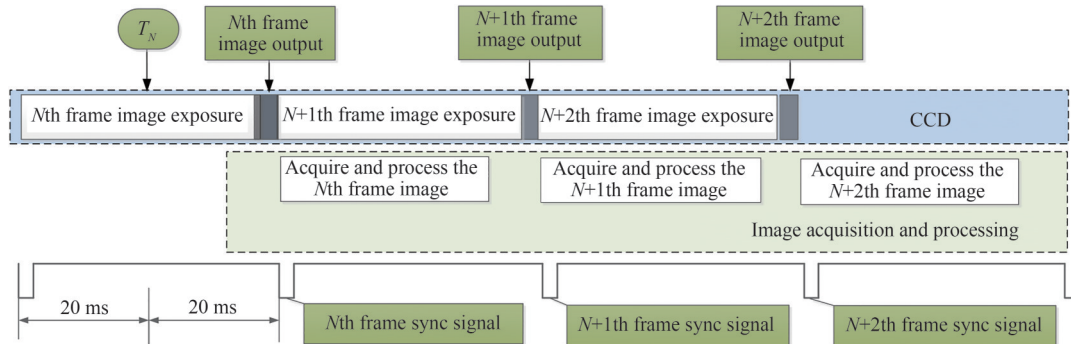


图3 CCD相机、图像处理和伺服系统的工作时序

Fig. 3 Time sequences of CCD camera, image processor and servo system

由于CCD相机根据目标场景的光强和对比度自动控制积分时间,不同帧图像积分时间往往有所差异。同时,考虑到光电经纬仪跟踪误差处理和跟踪系统控制所需的时间,通常以拍摄一帧图像的中间时间点作为拍摄目标时刻,如图3中第 N 帧拍摄时刻为 T_N ,在 T_N 时刻之前20 ms时间内主要进行跟踪误差计算、设置转动速度、转动跟踪轴等,从 T_N 时刻到该帧图像输出为止的20 ms时间内拍摄目标。而传统光信号注入式测试方法中几十毫秒的目标模拟器投射延迟导致曝光时间截止所拍摄的图像并不是期望的当前位置下的目标图像。因此,以 T_N 为第 N 帧图像注入的时间基准点,只要在 T_N 时刻之后20 ms时间内完成第 N 帧目标场景图像的生成,以替代拍摄获取第 N 帧图像信息的过程,并输出到经纬仪的视频处理器,理论上可以实现无延迟的信号注入,如图4所示。图4中图像生成过程代替图像拍摄过程,意味着图像生成之前需储备好在不同空间位置、不同视角下的目标图像以及场景图像,才能够根据目标实际位置和光电经纬仪跟踪轴指向之间的空间映射关系,计算并生成经纬仪本应拍摄到的目标场景图像。而所储备的目标图像和场景图像需通过拍摄获取,这就需要分离图像拍摄过程和图像处理过程。即利用经纬仪的摄像系统先拍摄与跟踪过程相匹配的所有目标场景图像存储到数据库中,再调用数据库中数据生成经纬仪跟踪轴指向的目标场景图像,直接注入到经纬仪的视频处理器,进而让经纬仪进行目标跟踪。这样一来可以解决光信号注入式信号延迟难题,二来可以解决目标模拟器需要随动于经纬仪的难题。

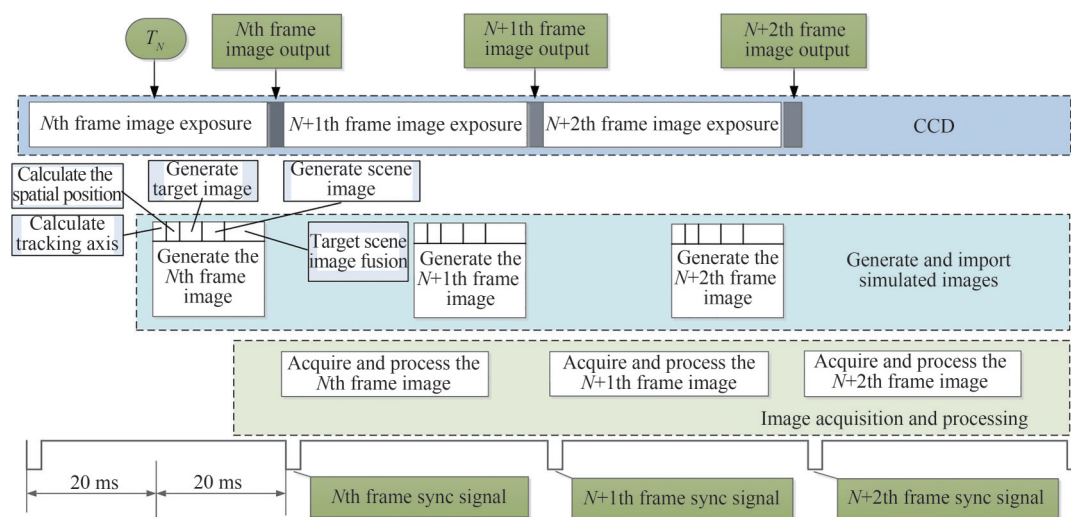


图4 无延迟的光信号注入式测试工作时序
Fig. 4 Time sequences of no-delay optical signal injection

1.2.2 实施步骤

本文方法的实施主要分为建立数据库和测试两个步骤。

1) 建立数据库

根据光信号注入式测试方法的原理可知,整个测试过程可控,即经纬仪摄像系统每次拍摄目标的时刻 t 是确定量,而目标在测试过程中按规划的轨迹运动,因此可计算出每个拍摄时刻 t 所对应的目标空间位置 $(x(t), y(t), z(t))$ 和相应场景图像。而由于目标的运动以及经纬仪的跟踪误差,不同时刻经纬仪对目标的视角不断发生变化。为了提高目标场景图像生成效率,分别拍摄并建立场景图像数据库和目标图像数据库,然后在实施测试过程中根据每个拍摄时刻目标位置和经纬仪跟踪轴指向,从两个数据库中分别提取相应的目标图像和场景图像,并将二者融合生成目标场景图像注入到经纬仪的视频处理器中。图像数据库建立过程为:

① 根据规划的目标运动轨迹,计算生成经纬仪每个拍摄时刻对应的场景 $K(t)$,并用目标模拟器投射出来,同时利用经纬仪摄像系统拍摄并拼接成一个连续的场景图像数据;

② 根据规划的目标运动轨迹,计算无跟踪误差条件下目标空间位置和经纬仪跟踪轴之间空间映射关系,生成每个拍摄时刻无跟踪误差的目标图像 $V(t)$,并用目标模拟器投射出来,同时利用经纬仪摄像系统拍摄并拼接成一个连续的目标图像数据。

图像数据库建立过程中,目标模拟器的光轴与经纬仪跟踪系统光轴应重合,但拍摄过程中经纬仪无需转动,目标模拟器也无需随动于经纬仪。另外,由于测试过程中用无跟踪误差的目标图像代替有跟踪误差的目标图像,实际拍摄到的目标在经纬仪坐标系下的像尺寸有所误差,若 t 时刻经纬仪跟踪方位角误差和俯仰角误差分别为 $A'(t)$ 和 $E'(t)$,则相应的目标像尺寸相对误差可表示为

$$\begin{cases} \Delta x' = 1 - \cos A'(t) \\ \Delta y' = 1 - \cos E'(t) \end{cases} \quad (1)$$

若跟踪视场为 1° 、方位和俯仰最大跟踪误差为 $10'$ 、成像器件像元数为 $1\ 280 \times 2\ 024$ 、目标像元数为 100×100 ,则方位向和俯仰向目标像元数的变化仅约为 10^{-3} ,因此可忽略。

2) 测试

图5是提出的视频信号注入式测试过程工作原理示意图。对比图5与图1可以发现,改进的视频信号注入式测试方法与传统光信号注入式测试方法的主要区别在于目标场景图像的获取。改进的视频信号注入式测试方法中,断开经纬仪摄像系统与视频处理器之间的连接线,并将经纬仪的视频处理器直接连接到测试系统。基于图4所示的经纬仪各模块工作时序,对于每一帧目标图像数据的生成,根据相应时刻目标空间位置以及目标空间位置与经纬仪跟踪轴指向之间的映射关系,从图像数据库中调用相应目标图像和场景图像,若数据库汇总没有完全匹配的图像,则利用相邻网路控制点的图像通过仿射变换等处理生成对应视角下的图像,并根据经纬仪与目标的相对速度对图像进行运动模糊效应处理后,将目标图像和场景图像融合形成当前时刻注入到经纬仪图像采集卡的目标场景图像。生成的每一帧目标场景图像作为视频数据流中一帧数据,基于经纬仪的帧同步信号注入到经纬仪的视频处理器。

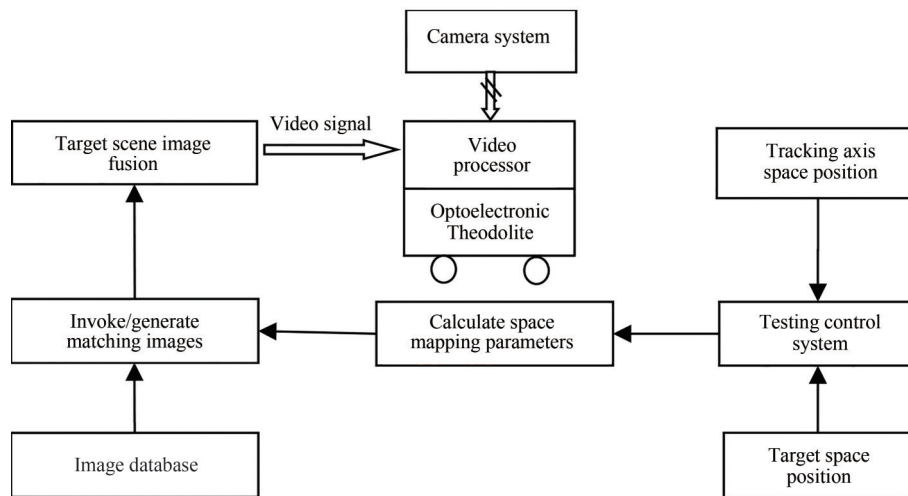


图5 视频信号注入式测试过程工作原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of video signal injection testing process

2 实验验证与分析

为了验证本文提出的视频信号注入式测试方法的可行性和有效性,先后对某型经纬仪进行了外场性能评估和视频信号注入式性能测试,并对比分析了两种方法下的目标跟踪角误差。

2.1 经纬仪外场性能评估实验

针对某型经纬仪搭建了外场实验平台,通过人工引导、自动捕获方式用经纬仪对某飞行目标进行捕获和跟踪,进而评价该经纬仪的目标跟踪性能。为了验证本文方法的普适性,进行了两次目标跟踪,分别对应目标轨迹1和目标轨迹2,测试结果如图6所示。图6显示了整个测试过程中经纬仪光轴和目标的方位角和俯仰角,其中 $A_{1M}(t)$ 和 $A_{2M}(t)$ 分别表示轨迹1和轨迹2中目标相对经纬仪零位状态的方位角, $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$ 分别表示轨迹1和轨迹2中经纬仪光轴的方位角, $E_{1M}(t)$ 和 $E_{2M}(t)$ 分别表示轨迹1和轨迹2中目标相对经纬仪零位状态的俯仰角, $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 分别表示轨迹1和轨迹2中经纬仪光轴的俯仰角。可以看出,对于目标轨迹1和2,目标与经纬仪光轴的起始方位角均相差约 0.3° 、起始俯仰角均相差约 0.4° ,这主要来自于人工引

导误差,而之后经纬仪的跟踪角误差迅速降低,从起始位置起大约1 s后便可跟踪到目标的方位角与俯仰角,方位角跟踪误差小于 0.05° 、俯仰角跟踪误差小于 0.1° ,且超过1 s后跟踪角误差越来越小,趋近于 0° ,并一直保持较高的跟踪精度。实验结果表明,在实际外场实验中此型号光电经纬仪跟踪性能较好。

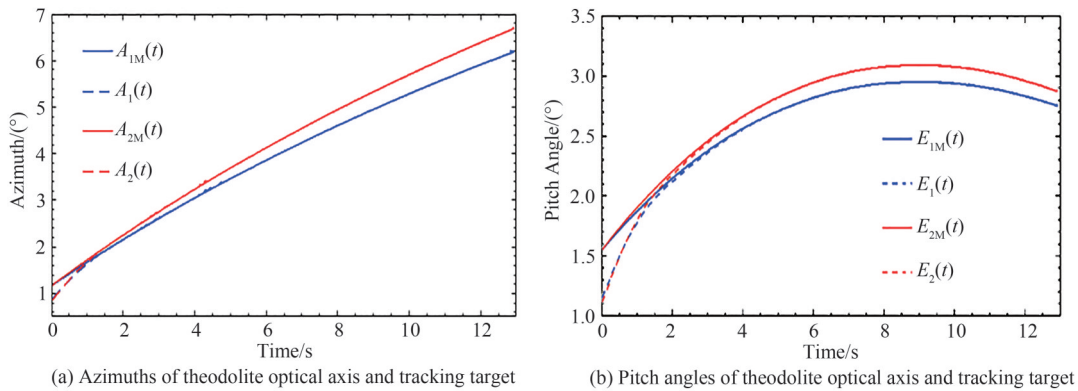


图6 经纬仪光轴指向和目标方向
Fig. 6 Angles of theodolite optical axis and tracking target

2.2 视频信号注入式性能测试实验

进行外场性能评估后,利用提出的视频信号注入式测试方法对同一经纬仪进行了目标跟踪性能测试。首先,通过采用最小二乘法,对2.1节中经纬仪实测目标数据进行了拟合,并将拟合结果作为目标的理论轨迹;其次,提取经纬仪在外场评估中每个拍摄时刻的目标和场景图像,并根据拟合的目标理论轨迹进行适当的仿射变化,作为视频信号注入式测试中目标轨迹相应位置的拍摄图像,进而建立了目标场景图像数据库;然后,通过控制延迟时间注入视频信号,使经纬仪进行目标跟踪。图7是本文视频信号注入式测试和2.1节外场评估的跟踪角误差对比,其中error1对应目标轨迹1,error2对应目标轨迹2。实验结果表明,本文方法和外场评估的跟踪误差基本一致,其中起始捕获误差变化的原因是起始时刻目标出现在经纬仪视场的位置不同,即注入真实场景视频后,经纬仪仍然保持较高的跟踪性能,本文提出的视频信号测试方法可行,可以有效评估光电经纬仪的跟踪性能。

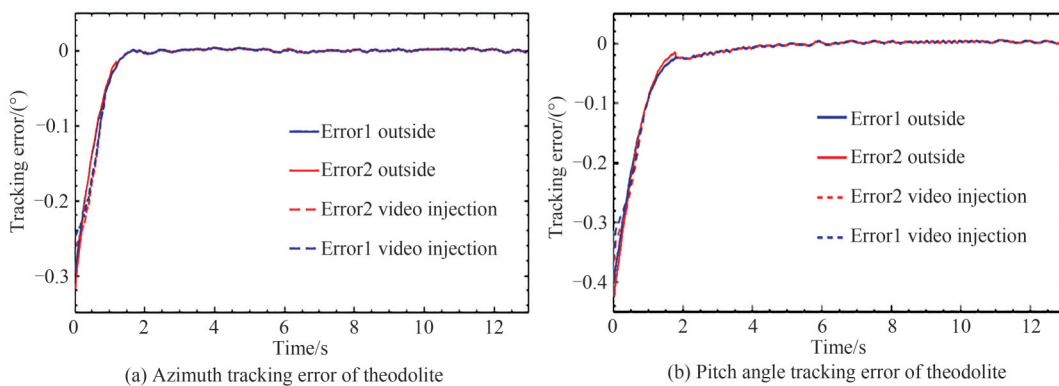


图7 视频信号注入下经纬仪跟踪误差
Fig. 7 Tracking error of theodolite with video signal injection

同时,测试了经纬仪在两组不同延迟下的目标跟踪性能。基于2.1节中拟合得到的目标理论轨迹数据,按照视频信号注入测试原理,向经纬仪视频处理器中注入了延迟分别为40 ms和80 ms的视频信号,以模拟传统光信号注入式测试方法中信号的延迟注入,测试结果如图8所示,其中,error1对应目标轨迹1,error2对应目标轨迹2。图8(a)显示了经纬仪的方位角跟踪误差,可以看出本文视频信号注入式测试结果跟踪角误差收敛速度最快,且延迟时间越长,方位角跟踪误差收敛速度越慢,需要更长的时间来实现高精度跟踪目标;图8(b)显示了经纬仪的俯仰角跟踪误差(仅对于有延迟信号注入),该数据是在实验结束后根据经纬仪真实跟踪位置数据分析得到的结果,可以看出延迟时间越长,注入误差越大。这是因为有延迟的信号注入

已对目标轨迹产生了扰动,导致测试得到的跟踪误差相对实际跟踪误差更严重。有信号延迟时经纬仪跟踪误差模型可以表示为

$$E'_s = E_s + k(t, m) \quad (4)$$

式中, E'_s 为有延迟信号经纬仪跟踪误差, E_s 为经纬仪实际跟踪误差, $k(t, m)$ 为关联系数, 是信号注入延迟时间 t 和目标运动特性 m 的函数, 该系数在光信号注入测试中一般难以准确估算, 因此直接影响经纬仪性能测试的准确性。该实验结果进一步验证了本文视频信号注入式测试方法的有效性。

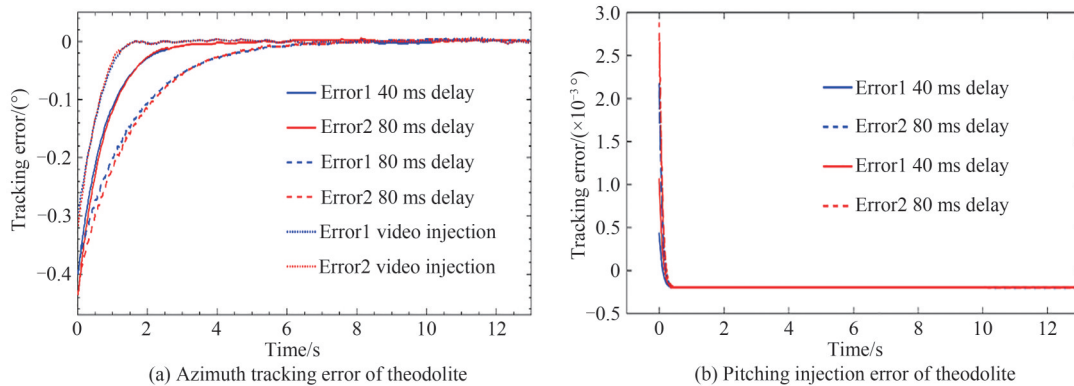


图8 不同延迟下经纬仪跟踪误差和注入误差

Fig. 8 Tracking error and injection error of theodolite with different delays

3 结论

本文基于传统光信号注入式测试原理,利用光电经纬仪图像拍摄和图像采集处理之间的时序差,采用先拍摄后调用的分步实施方案,提出了视频信号注入测试方法,有效避免信号注入延迟。分别采用外场评估实验和本文提出的视频信号注入式测试方法,对某型号光电经纬仪进行性能测试结果表明,两种情况下经纬仪方位角跟踪误差和俯仰角跟踪误差对于不同目标运动轨迹均高度一致,且注入有延迟的视频信号时,跟踪误差明显增大。即提出的视频信号注入式测试方法在实验室条件下能够有效评估经纬仪的目标跟踪性能,其测试精度不亚于外场评估,同时该方法不仅适用于经纬仪电视跟踪性能的检验,也适用于经纬仪红外跟踪性能的检验,对于同类跟踪系统的测试,具有良好的通用性。视频信号注入式测试系统在具体测试系统构建中还会涉及更多影响测试精度的技术环节。因此,下一步的工作主要研究视频图像融合、数据库图像的高效调用与拟合等技术问题,以进一步提高测试精度。

参考文献

- [1] ZHAO Huaixue, TIAN Liude, ZHAO Jianke, et al. Analysis of attitude measurement accuracy and indoor evaluation method of photoelectric theodolite[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0112004.
赵怀学, 田留德, 赵建科, 等. 光电经纬仪姿态测量精度分析及室内评价方法[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0112004.
- [2] FU Bin, WU Tan. Research on the high accuracy measurement of photoelectric theodolite [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2018, 41(10): 236-238.
符宾, 吴坦. 光电经纬仪姿态高精度测量研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(10): 236-238.
- [3] CHAI Min, HU Shaolin, ZHANG Wei. Evaluation of the tracking accuracy of photoelectric theodolites for test ranges[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(5): 403-407.
柴敏, 胡绍林, 张伟. 靶场光电经纬仪跟踪精度评估技术[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(5): 403-407.
- [4] BUFORD J A, JOIYY A C, MOBELY S B. Advancement in HWIL simulation at the U.S. army aviation and missile command[C]. SPIE, 1999, 3697: 23-30.
- [5] LATGER J, CATHALA T, DOUCHIN N, et al. Simulation of active and passive infrared images using the SE-WORKBENCH[C]. SPIE, 2007, 6543: 654302.
- [6] ZHANG Ning, SHEN Xiangheng, YANG Liang, et al. Evaluation of tracking performance of photoelectric theodolite by using harmonic property of dynamic target[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(6): 1286-1294.
张宁, 沈湘衡, 杨亮, 等. 利用动态靶标谐波特性评价光电经纬仪的跟踪性能[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1286-1294.
- [7] ZHANG Ning, SHEN Xiangheng, YANG Liang. Evaluation of tracking performance of photoelectric theodolite using

- equivalent model of tracking error[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 677-684.
- 张宁, 沈湘衡, 杨亮. 应用跟踪误差等效模型评价光电经纬仪跟踪性能[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 677-684.
- [8] WANG Xiwen, CHEN Juan, WANG Qiuping. A simulative method of photoelectrical theodolite for tracking flying target[J]. Computer Simulation, 2009, 26(4): 38-42.
- 王习文, 陈娟, 王秋平. 光电经纬仪跟踪飞行目标的一种仿真方法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(4): 38-42.
- [9] WANG Min, HUANG Chenggong, GUO Zhenghong, et al. Design and consistency analysis of IR imaging seeker closed-loop injection simulation experiment system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3211-3216.
- 王敏, 黄成功, 郭正红, 等. 红外成像导引头闭环注入式仿真试验系统设计及一致性分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3211-3216.
- [10] WANG Xuwei, QIAO Yanfeng, YU Xiaobo, et al. Performance testing system for photo electricity tracker based on video emulation[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2011, 26(5): 646-649.
- 王学伟, 乔彦峰, 于晓波, 等. 基于视频仿真的光电跟踪仪性能测试系统[J]. 液晶与显示, 2011, 26(5): 646-649.
- [11] FAN Bo, WANG Yanjie, SUN Honghai. High speed image inject simulator based on PCIe Bus [J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(3): 1056-1060+1099.
- 樊博, 王延杰, 孙宏海. 基于PCIe的高速图像注入式仿真系统[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(3): 1056-1060+1099.
- [12] 边少峰, 柴洪州, 金际航. 大地坐标系与大地基准[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [13] 何照才. 光电测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [14] YAN Zhiming, CHENG Bo, QIU Yanggang. Method study photoelectric theodolite virtual targets simulation [J]. Computer Simulation, 2013, 30(2): 383-387.
- 闫志明, 程波, 秋扬刚. 一种光电经纬仪虚拟目标仿真方法研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(2): 383-387.
- [15] JIA Wenwu, LIU Peizheng, TANG Zili, et al. Detection method for optical-axis parallelism of photoelectric theodolite in range[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(8): 1670-1677.
- 贾文武, 刘培正, 唐自力, 等. 靶场适用的光电经纬仪光轴平行性检测[J]. 光学精密工程, 2020, 28(8): 1670-1677.
- [16] WANG Xuwei, SHEN Tongsheng, ZHOU Xiaodong. An evaluation system of infrared imaging guiding algorithm based on the signal injection simulation[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(2): 337-339.
- 王学伟, 沈同圣, 周晓东. 基于信号注入仿真的红外成像导引算法评估系统[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 337-339.