

文章编号 1004-924X(2012)05-1022-09

三线阵立体测绘相机时间系统优化与实时检测

武星星*, 刘金国

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高三线阵立体测绘相机的时间同步精度, 对相机时间系统工作原理进行了分析, 建立了三线阵立体测绘相机的相机时间同步误差模型, 并根据该模型采取缩短行同步计数器查询周期等多项措施对相机时间系统进行优化。针对相机时间同步误差在摄影过程中会随相机控制器工作时序变化这一现象, 提出了一种实时检测相机时间同步精度的方法, 用于实时检测并全程记录摄影过程中相机时间同步误差的动态变化, 解决了常规仪器由于存储深度不足而无法长期检测这一难题。利用该方法检测了优化后的三线阵立体测绘相机时间系统的时间同步精度, 结果表明, 摄影过程中三线阵立体测绘相机的时间同步误差 $\leq 74.8 \mu\text{s}$, 相机时间同步误差绝对值 $\leq 11.2 \mu\text{s}$ 的概率不低于0.95, 满足技术指标要求。

关键词: 三线阵空间相机; 立体测绘; 时间系统; 时间同步精度

中图分类号: V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122005.1022

Optimization and real-time measurement of time system in three-line stereo mapping camera

WU Xing-xing*, LIU Jin-guo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: starglare@126.com

Abstract: To improve the time synchronization precision of a three-line stereo mapping camera, a time synchronization error model for the three-line stereo mapping camera was set up based on the analysis of working principle of the time system in the camera. Then, several methods such as reduction of row synchronization counter polling period were adopted to optimize the time system. As the time synchronization errors may change with the working time sequence of the camera controller, a real-time time synchronization precision measuring method for the three-line stereo mapping camera was put forward to measure and record the dynamic changes of time synchronization errors in real-time during photographing process globally. With the method, the difficult problem that custom instruments could not be used for long time measurement of time synchronization errors because of their finite memory depths was solved. This method was used to measure time synchronization precision of the time system for the optimized three-line stereo mapping camera. Experimental results indicate that time synchronization errors of the camera are no more than $74.8 \mu\text{s}$ during photographing process and the probability of ab-

收稿日期: 2011-12-13; 修订日期: 2011-12-22.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA121803); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61108066)

solute value of time synchronization errors no more than $11.2 \mu\text{s}$ is more than 0.95, which meets the demand of qualification.

Key words: three-line space camera; stereo mapping; time system; time synchronization precision

1 引言

空间立体测绘相机通过获取的立体影像和姿态、轨道位置等其他信息,测制地球和其他星球表面的数字地图、数字高程图和数字正射影像图,实现三维地理环境的收集与更新,提供现势性良好的地形和影像数据信息,在军事、救灾减灾、城市规划、资源普查等领域发挥重要作用^[1-2]。传输型三线阵立体测绘相机能够从摄取影像出发重构外方位元素,降低了对卫星姿态稳定度的要求,并能够弥补胶片型测绘相机摄影时云影造成的漏洞,满足测绘的现实性和长期性要求,是目前空间立体测绘相机的发展方向^[3]。

影响三线阵立体测绘相机测绘精度的因素包括卫星轨道定位精度、姿态测量和确定精度、相机时间同步精度和内方位元素标定精度等^[4]。由于卫星在飞行中位置和姿态不断变化,如果不能建立高精度的时间系统,即使轨道定位精度和姿态测量精度很高,也会因为影像和位置、姿态等外方位元素不对应而导致测绘精度的降低,因此保证相机时间同步精度是实现测绘精度的关键和基础。以某三线阵立体测绘相机为例,为了保证测绘精度,设定的要求相机时间同步精度在 $200 \mu\text{s}$ 以内。

空间相机控制器除了建立高精度的时间系统外,同时要完成复杂的像移速度计算、偏流角调整、与数管计算机通讯、控制成像单元和调焦等多项任务^[5-7]。数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)采用了哈佛结构、超标量流水线、专用硬件运算部件等技术,可以实现低功耗下的高速实时信号处理,是理想的空间相机控制器,已得到成功应用^[8-9],因此三线阵立体测绘相机以 DSP 为相机控制器平台。本文在对三线阵立体测绘相机时间系统工作原理进行分析的基础上,建立相机时间同步误差模型,并根据该模型对相机时间系统进行优化,提高三线阵立体测绘相机的时间同步精度。

相机时间同步误差会在摄影过程中随相机控制器工作时序变化,示波器等常规仪器由于存储深度不足而无法长期检测。如何实时检测三线阵立体测绘相机的时间同步精度,真实反映三线阵立体测绘相机在工作过程中时间同步误差的变化,是判断相机时间同步精度是否满足要求的前提和依据。为此本文提出一种相机时间同步精度实时检测方法,实时检测并全程记录摄影过程中相机时间同步误差的动态变化。最后用该方法对优化后的三线阵立体测绘相机时间系统的时间同步精度进行检测。

2 三线阵立体测绘相机时间系统工作原理

图 1 为三线阵立体测绘相机时间系统的工作原理。时间同步技术历经短波无线授时、LORAN-C 长波导航授时和星基导航授时 3 个阶段,目前基于 GPS 的星基导航授时占据主流^[10]。测绘卫星上通常配备 GPS 接收机来进行精确的轨道定位,因此星上时间采用 GPS 授时结合地面上注数据的方式进行修正。

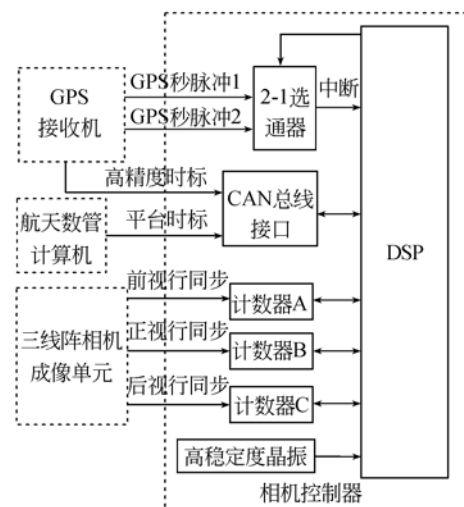


图 1 三线阵立体测绘相机时间系统工作原理

Fig. 1 Working principle of time system for three-lines stereo mapping camera

GPS 接收机在接收 GPS 卫星信号后,获得 GPS 系统时间,处理后发送 GPS 秒脉冲和高精度时标给三线阵立体测绘相机的相机控制器 DSP 和其他需要较高时间同步性的单元。高精度时标长 4 字节,为与 GPS 秒脉冲一一对应的当前 GPS 秒值。GPS 秒脉冲采用热备份的方式,在有一路秒脉冲出现故障时自动切换到另一路;航天数管计算机通过 CAN 总线发送平台时标给 DSP,平台时标由航天数管计算机基于内部时钟产生,通过地面上注数据的方式进行修正。在 GPS 接收机故障等情况下,无法使用高精度时标对时,则使用平台时标对时。

DSP 外接高稳定度晶振作为工作时钟,并为内部定时器提供时钟源。所用 DSP 型号为 TMS320VC33,内部包含 2 个 32 位通用定时器,使用其中一个作为微秒定时器,以内部时钟即 DSP 工作主频的一半为计数时钟源,定时周期为 3 s。

三线阵立体测绘相机时间系统分为守时、对时和用时 3 个部分。秒计数器和微秒计数器分别代表相机控制器时间系统当前秒值和微秒值。当正常接收到 GPS 秒脉冲时进行 GPS 守时,在 GPS 秒脉冲中断服务程序中,将微秒计数器清零,秒计数器加 1。当两路秒脉冲均失效时进行自守时,即发生微秒定时器中断时,微秒计数器自动清零,将秒计数器加 3。

对时过程为,当接收到高精度时标时,首先判断是否与 GPS 秒脉冲匹配(即成对出现),如果与 GPS 秒脉冲匹配,连续 3 次接收高精度时标,根据 3 次时标的两两差值是否为 1 来判断高精度时标是否正确,如果正确,采用第三次接收到高精度时标刷新秒计数器,完成高精度时标对时。当接收到平台时标后,如果没有进行过高精度时标对时,将采用平台时标的秒值刷新秒计数器,将平台时标的毫秒值转化后刷新微秒计数器,进行平台时标对时。

三线阵立体测绘相机的用时为每秒采集图像对时信息的过程。图像对时信息包含图像行号和该行图像曝光起始时刻的时间。DSP 分别通过计数器 A、B、C 对成像单元返回的前视相机行同步、正视相机行同步和后视相机行同步信号进行计数产生行号。在相机摄影过程中收到 GPS 秒脉冲或图像对时指令后,不断查询行同步计数器,

当行同步计数器值发生变化,说明行同步信号的上升沿到来,读取秒计数器值和微秒计数器值,和变化后的行号存入图像对时信息中。图像对时信息作为图像辅助数据的一种和图像一起下载到地面接收站,供后续处理生成数字高程图时使用。

3 相机时间同步误差模型与系统优化

三线阵立体测绘相机获取目标的高程和平面位置是通过对其某一摄影时刻获取的影像、卫星姿态、轨道位置等外方位元素和标定好的主点、主距、相机光轴夹角等内方位元素经过图像匹配、空中三角计算、光束法平差等处理得到的^[1]。因此三线阵立体测绘相机的时间同步精度体现在图像对时信息中每一行图像的时间戳与该行图像曝光起始时刻主站时间的差值。

由于在守时、对时和用时过程中都会引入相机时间同步误差,三线阵立体测绘相机的时间同步误差 t_s 可以由公式(1)表示。

$$t_s = t_k + t_a + t_u, \quad (1)$$

其中 t_k 为守时过程引入的误差, t_a 为对时过程引入的误差, t_u 为用时过程引入的误差。由于平台时标是在 GPS 接收机故障时作为降级备份使用的,因此本文主要对 GPS 秒脉冲和高精度时标正常时的相机时间同步误差进行分析。

守时过程引入的误差 t_k 是由 GPS 秒脉冲传输延迟导致的误差、响应 GPS 秒脉冲中断导致的误差、关中断引入的误差和 DSP 晶振引入的误差组成。用时过程引入的误差 t_u 由行同步计数器查询周期引入的误差和中断服务引入的误差组成。当使用平台时标时,对时过程引入的误差 t_a 由平台时标的转发延迟引起,当使用高精度时标且高精度时标正确时, t_a 为 0。下面将对各项误差的产生机理、特点进行探讨。

3.1 GPS 秒脉冲传输延迟和响应 GPS 秒脉冲中断导致的误差

如图 2 所示,由于 DSP 收到的秒脉冲滞后于 GPS 接收机产生的秒脉冲 t_{sd} ,而 DSP 从接收到 GPS 秒脉冲到在中断服务程序中完成对微秒定时器清零,又需要经过 t_{rd} 的时间,期间完成相关寄存器入栈、微秒定时器清零等操作。从而使 DSP 的系统时间比 GPS 时间少($t_{sd} + t_{rd}$),即产生

了负偏差。

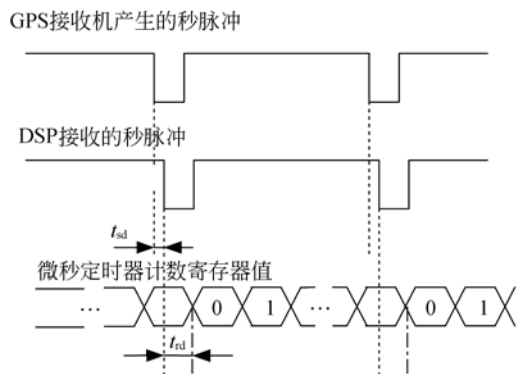


图 2 GPS 秒脉冲传输延迟和响应秒脉冲中断引起的误差

Fig. 2 Errors caused by GPS second pulse transmission delay and responding second pulse interrupt

3.2 关中断引入的误差

为了提高像移计算精度和图像定时信息采集精度,程序在运行中有短暂的关中断的操作。如图 3 所示,在关中断的过程中 GPS 秒脉冲到来,从 GPS 秒脉冲到来到关中断结束间隔的时间为 t_{ci} ,则关中断导致 DSP 延迟响应 GPS 秒脉冲中断 t_{ci} ,从而造成该秒内系统时间比基准时间少 t_{ci} ,进一步导致该秒内产生的图像定时信息具有负偏差。关中断只影响该秒内的时间同步误差,下一秒不受影响。

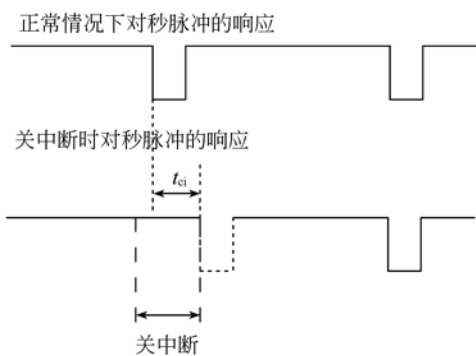


图 3 关中断引入的误差

Fig. 3 Errors caused by disabling interrupts

3.3 DSP 晶振引入的误差

当采用 GPS 守时,在 1 s 内微秒值是通过 DSP 外接的高稳定度晶振计数得到的,因此该晶振的频差会导致微秒值误差。使 DSP 的系统时

间产生 t_{cr} 的误差,进一步导致图像定时信息具有 t_{cr} 的误差。假设 DSP 外接晶振的频差为 δ ,从上次 GPS 秒脉冲到来微秒计数器值被清零到本次图像定时信息采集的间隔时间为 T_c ($T_c \leq 1$ s),则 t_{cr} 可以由公式(2)来表示^[12]。

$$t_{cr} = \delta \cdot T_c, \quad (2)$$

由于每次 GPS 秒脉冲到来时,微秒计数器值被清零,因此该误差只在 1 s 内累积,可正可负,具有随机性。

3.4 行同步计数器查询周期引入的误差

由于 DSP 以查询方式判断行同步计数器值的变化,如图 4 所示,行同步信号的上升沿在时间 A 到来,在时间 B 才查询到行同步计数器的变化,时间 A 和时间 B 间隔为 t_{sc} ,则查询周期引入的误差为 t_{sc} ,其最小为零,最大为查询周期,是具有随机性的正偏差。

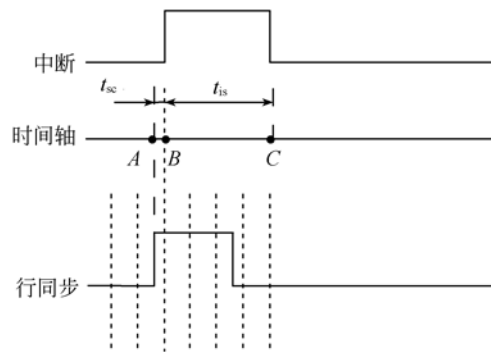


图 4 行同步计数器查询周期引入的误差

Fig. 4 Errors caused by row synchronization counter polling period

3.5 中断服务引入的误差

在 DSP 查询到行同步计数器变化后,当有中断到来,如图 4 所示,导致待组合的当前时间延后,组合时的时间为 C,由中断服务引入的误差为 t_{is} ,它与与中断服务时间相同的正偏差。中断服务只影响本次采集的图像定时信息的时间同步误差。

根据以上分析, t_k 和 t_u 可以分别用公式(3)和公式(4)表示。

$$t_k = t_{cr} - t_{sd} - t_{rd} - t_{ci}, \quad (3)$$

$$t_u = t_{sc} + t_{is}, \quad (4)$$

由于 t_a 为 0,将公式(3)和公式(4)代入公式(1),可得相机时间同步误差为

$$t_s = t_{cr} - t_{sd} - t_{rd} - t_{ci} + t_{sc} + t_{is}, \quad (5)$$

其中 t_{cr} 为 DSP 晶振频差引入的误差, t_{sd} 为 DSP 收到的秒脉冲滞后 GPS 接收机产生的秒脉冲的时间, t_{rd} 为从 DSP 收到秒脉冲到微秒定时器被清零间隔的时间, t_{ci} 为从 GPS 秒脉冲到来到关中断结束间隔的时间, t_{sc} 为从行同步信号到来到 DSP 查询到行同步计数器变化间隔的时间, t_{is} 为从 DSP 查询到行同步计数器变化到打断图像对时信息采集过程的中断服务程序执行结束间隔的时间。

从公式(5)可以看出, 相机时间同步误差 t_s 是 t_{cr} 、 t_{sd} 、 t_{rd} 、 t_{ci} 、 t_{sc} 和 t_{is} 综合作用的结果。其中除了 t_{sd} 和 t_{rd} 大小基本固定以外, t_{ci} 、 t_{sc} 与 t_{is} 随相机控制器工作时序而变化, t_{cr} 具有随机性。因此要对相机时间系统进行优化, 减小 t_s , 需要采取措施分别减小 t_{cr} 、 t_{sd} 、 t_{rd} 、 t_{ci} 、 t_{sc} 和 t_{is} 。

由于对每个 GPS 秒脉冲传输线的延迟基本恒定, 而每次响应 GPS 秒脉冲中断 DSP 所进行的操作是相同的, 因而 t_{sd} 和 t_{rd} 在每秒都是基本相同的, 从而可以在生成图像对时信息时用补偿的方法来消除掉。根据公式(2), DSP 外接晶振频差引入的误差 t_{cr} 随晶振频差 δ 的减小而减小, 所以在相机时间系统优化过程中采用高品质的温补晶振, 减小 DSP 外接晶振的频差 δ 来减小 t_{cr} 。

从图 3 可以看出, t_{ci} 和关中断的时间长短有关, 根据相机控制器工作时序的不同, t_{ci} 最小值为 0, 最大值为关中断的时间。减少关中断的时间还可以减小 DSP 因关中断而延迟响应 GPS 秒脉冲中断的概率。与此类似, 行同步计数器查询周期引入的误差 t_{sc} 也随相机控制器工作时序变化, 最小为 0, 最大为查询周期。因而在相机时间系统优化过程中对程序结构和代码进行了优化, 以减少关中断的时间, 缩短行同步计数器查询周期, 从而减小 t_{ci} 和 t_{sc} 。

从图 4 可知, t_{is} 即为打断图像对时信息采集过程的中断服务程序的执行时间。为了减小组合行号和当前时间形成图像对时信息过程中被中断打断的概率, 在 DSP 查询到行同步计数器变化后, 先关中断, 在生成图像对时信息后再开中断。由于可能发生中断嵌套, 在系统优化时尽量减少各中断服务程序的执行时间, 以减小 t_{is} 。

通过上述一系列措施对相机时间系统进行优化, 使三线阵立体测绘相机的时间同步精度得到有效提高。

4 相机时间同步精度的实时检测

由公式(5)建立的三线阵立体测绘相机的相机时间同步误差模型可知, 相机时间同步误差 t_s 是 t_{cr} 、 t_{sd} 、 t_{rd} 、 t_{ci} 、 t_{sc} 和 t_{is} 综合作用的结果。其中 t_{ci} 、 t_{sc} 与 t_{is} 随相机控制器工作时序的变化而变化, 从而导致相机时间同步误差 t_s 在摄影过程中随相机控制器工作时序变化。

由于三线阵立体测绘相机在工作中可以连续摄影几十分钟甚至几个小时, 常规仪器如示波器、逻辑分析仪等由于存储深度的限制无法以高的采样频率长期检测。而且由于相机时间同步精度最终体现在采集的图像对时信息上, 通过常规仪器也难以实现相机正常工作过程中时间同步精度的实时检测。

为此本文提出一种相机时间同步精度实时检测方法, 实时检测并全程记录摄影过程中相机时间同步误差的动态变化。图 5 为该方法的实现原理, 成像单元返回的行同步脉冲信号与 GPS 仿真系统发出的 GPS 秒脉冲信号通过一分二转接盒转接后, 同时送给相机控制器和相机时间测试仪, 高精度时标和平台时标只送给相机控制器。

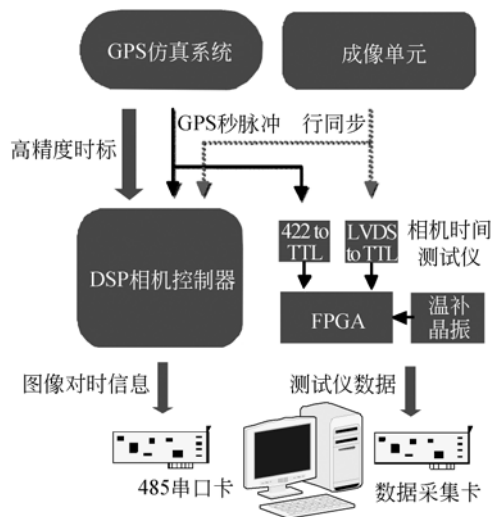


图 5 相机时间同步精度实时检测原理

Fig. 5 Real-time measurement principle of time synchronization precision for camera

相机时间测试仪使用 FPGA 作为核心组件, 以纯硬件时序电路的方式检测行同步信号和

GPS 秒脉冲信号的边沿来产生时间戳,采用低频率的温补晶振作为时钟源,利用 FPGA 内部的延迟锁相环(Delay-Locked Loop, DLL)和全局时钟网络保证各时钟信号的同步。

图 6 为相机时间测试仪在 ModelSim 中的时序仿真结果。相机时间测试仪生成的时间戳数据由上位计算机通过数据卡采集后存储在硬盘中。由于相机时间测试仪输出的行号、秒值和微秒值都为 32 位,而采集卡位宽 32 位,因此需要分 3 次输出,依次输出行号、秒值和微秒值。图 6 中 1、0、127 分别为输出的行号、秒值和微秒值,对应每一个输出数据要产生与之一一对应的输出时钟。



图 6 相机时间测试仪时序仿真结果

Fig. 6 Timing simulation results of camera time tester

由于相机时间测试仪以纯硬件时序电路的方式来产生时间戳,而且只完成产生时间戳这单个任务。相机时间测试仪和主站的时间同步误差不受响应 GPS 秒脉冲中断导致的误差、行同步计数器查询周期引入的误差、中断服务引入的误差、关中断引入的误差等的影响,在摄影过程中基本不变。和同时要完成像移计算等复杂任务的相机控制器相比,具有高得多的时间同步精度和稳定性^[13-14]。用信号发生器、示波器和逻辑分析仪等对相机时间测试仪进行标定,其测量精度 $\leq \pm 1 \mu\text{s}$,测量分辨率为 $0.1 \mu\text{s}$ 。

而对于相机控制器,仅中断服务引入的相机时间同步误差 t_{is} 就可达几十微秒。因此对比相同行号下图像辅助数据中相机控制器产生的时间戳和相机时间测试仪产生的时间戳的差值,可以反映出三线阵立体测绘相机时间同步误差的动态变化。

由于相机控制器产生的图像对时信息作为图像辅助数据的一种通过 485 总线发送给成像单元,上位计算机使用 485 串口卡作为一个节点挂在 485 总线上,作为总线监视器接收并存储相机控制器发送的图像对时信息,在相机摄影过程中上位计算机不断读取总线监视器存储的图像对时

信息和从数据采集卡采集到的相机时间测试仪数据,经过解析和计算后实时显示并记录随着行号的增加相机时间同步误差的动态变化曲线。

由于相机时间测试仪数据和图像对时信息都存储在硬盘中,可以实现相机时间同步精度的长期连续检测。以空余空间 200 G 的硬盘为例,可以在保持测量精度不变的情况下连续测量上千小时,解决常规仪器如示波器、逻辑分析仪等由于存储深度的限制无法以高的采样频率长期检测这一难题,实现摄影过程中相机时间同步误差动态变化的实时检测和全程记录。

在检测过程中需要注意的是,由于相机时间测试仪只接收 GPS 秒脉冲,不接收高精度时标和平台时标,为此设置手动复位功能,在进行相机时间同步精度检测时,首先对相机时间测试仪复位,使其内部的秒计数器和行同步计数器清零,再控制 GPS 仿真设备发送秒脉冲和秒值从 1 开始累加的高精度时标和平台时标,从而使相机时间测试仪数据和图像对时信息的秒值相同。此方法的一个优点是,由于相机控制器和相机时间测试仪使用相同的秒脉冲,即使所用的 GPS 仿真设备发出的秒脉冲的周期不够准确,也不会对测试结果有影响,给地面测试带来了很大的方便。

5 实验结果

利用本文提出的相机时间同步精度实时检测方法对优化后的某三线阵立体测绘相机时间系统的时间同步精度进行检测,在实验中相机按在轨单次开机的最长工作时间连续摄影。

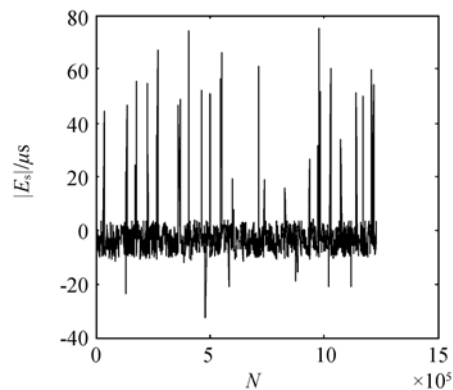


图 7 正视相机时间同步误差变化曲线

Fig. 7 Time synchronization error curve of nadir-view camera

图 7 为正视相机时间同步误差 E_s 随行号 N 的变化曲线。从图 7 可以看出,摄影期间正视相机的时间同步误差大部分集中在 $\pm 10 \mu\text{s}$ 以内,由于受中断服务的影响,也有个别时刻达到几十微秒,摄影期间正视相机时间同步误差最大值 E_s^{\max} 为 $74.8 \mu\text{s}$ 。

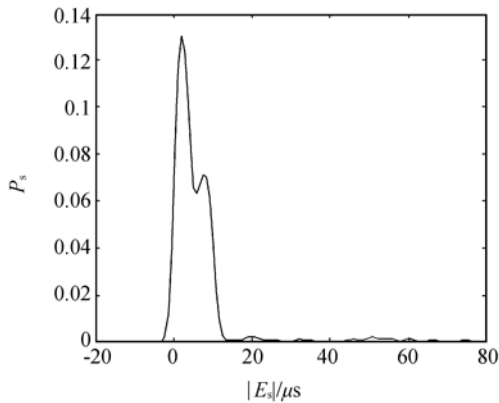


图 8 正视相机时间同步误差概率密度曲线

Fig. 8 Probability density curve of time synchronization error for nadir-view camera

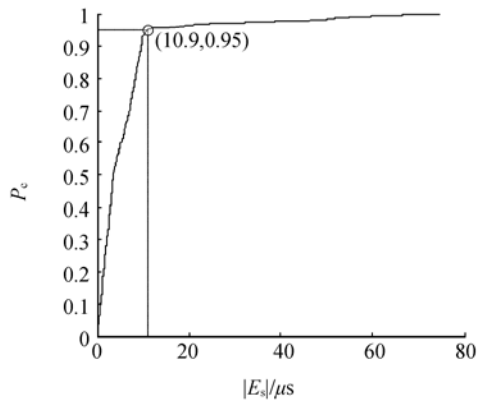


图 9 正视相机时间同步误差累积概率曲线

Fig. 9 Accumulative probability curve of time synchronization error for nadir-view camera

图 8 为正视相机时间同步误差概率密度曲线,图 9 为正视相机时间同步误差累积概率曲线,从图 8 和图 9 中可以看出,正视相机时间同步误差绝对值 $|E_s| \leq 10.9 \mu\text{s}$ 的概率为 0.95,即大多数情况下相机时间同步误差都远小于 E_s^{\max} 。从图 7 和图 8 可以看出,实验结果和前面对相机的时间同步误差模型的分析是一致的,说明本文提出的相机时间同步精度实时检测方法是有效的。

表 1 前视、正视和后视相机时间同步误差

Tab. 1 Time synchronization errors of forward-view camera, nadir-view camera and backward-view camera

相机	E_s^{\max}	$ E_s (P_c=0.95)$
前视相机	66.5	10.5
正视相机	74.8	10.9
后视相机	72.5	11.2

表 1 为前视、正视和后视相机时间同步误差测试结果,前视相机摄影期间时间同步误差最大值 E_s^{\max} 为 $66.5 \mu\text{s}$,前视相机 $|E_s| \leq 10.5 \mu\text{s}$ 的概率为 0.95。后视相机 E_s^{\max} 为 $66.5 \mu\text{s}$,后视相机的 $|E_s| \leq 11.2 \mu\text{s}$ 的概率为 0.95。

为了保证测绘精度,设定的技术指标要求该三线阵立体测绘相机的时间同步精度在 $200 \mu\text{s}$ 以内,而根据实验结果,经过系统优化后三线阵立体测绘相机摄影期间时间同步误差最大值 $t_s = 74.8 \mu\text{s}$,时间同步误差绝对值 $|t_s| \leq 11.2 \mu\text{s}$ 的概率不低于 0.95,满足技术指标要求。

6 结 论

保证相机时间同步精度是实现三线阵立体测绘相机测绘精度的关键和基础。本文在对三线阵立体测绘相机时间系统工作原理进行分析的基础上,建立了相机时间同步误差模型,并根据该模型对相机时间系统进行优化,以提高三线阵立体测绘相机的时间同步精度。针对相机时间同步误差在摄影过程中随相机控制器工作时序变化这一现象,提出了一种相机时间同步精度的实时检测方法,实时检测并全程记录在摄影过程中相机时间同步误差的动态变化,解决了常规仪器如示波器、逻辑分析仪等由于存贮深度的限制无法以高的采样频率长期检测这一难题。实验结果表明,经过系统优化后三线阵立体测绘相机在摄影过程中时间同步误差 $t_s \leq 74.8 \mu\text{s}$,相机时间同步误差绝对值 $|t_s| \leq 11.2 \mu\text{s}$ 的概率不低于 0.95,满足技术指标要求。

参考文献:

- [1] 吴国栋. 一种三线阵测绘相机 CCD 像面的装调方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2395-2398.
WU G D. Alignment method of CCD image plane for three-line array mapping camera[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(11): 2395-2398. (in Chinese)
- [2] 田铁印, 王红, 谷凤安, 等. 三线阵立体测绘相机光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2692-2698.
TIAN T Y, WANG H, GU F A, *et al.*. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2692-2698. (in Chinese)
- [3] 王任享. 我国无地面控制点卫星摄影测量综述[J]. 海洋测绘, 2008, 28(5): 1-8.
WANG R X. Mapping satellite without control point in china[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2008, 28(5): 1-8. (in Chinese)
- [4] 胡莘, 曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测绘精度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(5): 695-699.
HU X, CAO X B. Analysis on precision of stereo mapping microsatellite using three-line array CCD images[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40(5): 695-699. (in Chinese)
- [5] 王家骐, 于平, 颜昌祥, 等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.
WANG J Q, YU P, YAN CH X, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1585-1589. (in Chinese)
- [6] 于涛, 徐抒岩, 韩诚山, 等. 空间相机偏流角的间歇式实时调整[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1908-1914.
YU T, XU SH Y, HAN CH SH, *et al.*. Batch type real time adjustment for drift angle of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1908-1914. (in Chinese)
- [7] 王智, 张立平, 李朝辉, 等. 传输型立体测绘相机的调焦机构设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1051-1056.
WANG ZH, ZHANG L P, LI ZH H, *et al.*. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1051-1056. (in Chinese)
- [8] 孔德柱, 刘金国, 吕世良, 等. 空间相机像移速度计算方法及 DSP 实现[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1935-1941.
KONG D ZH, LIU J G, LV SH L, *et al.*. Calculation method for image motion speed of space camera and DSP-based implementation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1935-1941. (in Chinese)
- [9] 武星星, 刘金国, 孔德柱, 等. 基于混合编程的空间相机控制器的自检方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1635-1641.
WU X X, LIU J G, KONG D ZH, *et al.*. Self-testing method of space camera controller based on mixed language programming [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1635-1641. (in Chinese)
- [10] 赵军祥, 李建辉, 常青, 等. GPS 授时校频方法研究与试验结果[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(8): 762-766.
ZHAO J X, LI J H, CHANG Q, *et al.*. Study on GPS timing and frequency calibration method and the test results[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(8): 762-766. (in Chinese)
- [11] TAKEO T, MASANOBU S, JUNICHI T. Validation of precise digital surface model generated by PRISM onboard ALOS[J]. *SPIE*, 2009, 7474: 74740H1-12.
- [12] 陈重, 李浩. 晶阵稳定度对 IEEE1588 的影响研究[J]. 通信技术, 2011, 44(2): 67-69.
CHEN CH, LI H. The influence of crystal stability on time synchronization accuracy of IEEE1588 [J]. *Communications Technology*, 2011, 44(2): 67-69. (in Chinese)
- [13] 黄文君, 遇彬. 基于 FPGA 的精确时钟同步方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(10): 1697-1742.
HUANG W J, YU B. Method for Precise time synchronization based on FPGA [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2007, 41(10): 1697-1742. (in Chinese)
- [14] 穆欣, 胡君, 宋启昌, 等. 空间相机集成测试系统的时钟同步[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1436-1443.
MU X, HU J, SONG Q CH, *et al.*. Time synchronization of integrated testing system of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1436-1443. (in Chinese)

作者简介:



武星星(1980—),男,河南洛阳人,博士,副研究员,2001年、2004年、2007年于吉林大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事空间遥感成像技术、智能控制等方面的研究。E-mail: star-glare@126.com



刘金国(1968—),男,吉林蛟河人,研究员,主要从事空间遥感与图像处理方面的研究。E-mail: liujg@ciomp.ac.cn

● 下期预告

化学镀 Ni-P 光纤布拉格光栅的均匀轴向拉力响应

饶春芳^{1,2*}, 张 华¹, 冯 艳¹, 肖丽丽¹, 叶志清²

- (1. 南昌大学 机电工程学院机器人与焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031;
2. 江西师范大学 物理与通信电子学院光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022)

研究了化学镀 Ni-P 涂敷后光纤布拉格光栅(ENFBG)的均匀轴向拉力响应特性。利用其轴对称特性,分析了光栅的应力及应变状态。采用有限元方法对光栅应变进行数值分析,并通过实验对数值分析结果进行验证。数值分析表明:处于纤芯处的光栅被均匀拉伸;剪应变远小于正应变,可忽略;正应变与轴向拉力成正比;ENFBG 中心波长的变化正比于均匀轴向拉力变化;但由于化学镀层与光纤力学特性的差异,镀层对 FBG 轴向均匀拉力响应起去敏作用。当化学镀层厚度为 $7.25 \mu\text{m}$ 时,ENFBG 的均匀轴向拉力实测灵敏度为 12.45 pm/MPa , 相关系数为 0.9996 , 理论计算值为 12.744 pm/MPa ;且随着镀层厚度的增加,灵敏度呈下降的趋势。镀层在为 FBG 提供良好保护的同时,ENFBG 中心波长对于轴向拉力保持线性响应,ENFBG 是性能良好的轴向拉力传感器。