

文章编号 1004-924X(2013)05-1304-08

# 光电经纬仪 CCD 曝光中心测量系统的设计

李满良<sup>1,2,3</sup>, 吴钦章<sup>1\*</sup>

- (1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院大学, 北京 100039;
3. 中国人民解放军 63610 部队, 新疆 库尔勒 841001)

**摘要:** 根据高精度靶场测角要求, 设计了一套以 IRIG-B 码终端为时间基准, 基于数字信号处理器 (DSP) 和现场可编程门阵列 (FPGA) 的 CCD 曝光中心测量系统。首先给出了 CCD 曝光中心的测量原理及硬件组成, 利用共源的两台 IRIG-B 码终端控制发光二极管和 CCD 探测器, 通过调整 B 码终端输出信号时延控制发光二极管, 得到了 1 Hz 脉冲前后沿和曝光脉冲前后沿对齐的 2 个关键时刻。针对人工图像判读精度低的问题, 提出了利用图像重心的提取算法和改进的 Krisch 边缘算法, 自动计算得到 CCD 曝光中心, 其精度优于  $17 \mu\text{s}$ 。在外场对多套光电经纬仪 CCD 曝光中心进行了测量, 并将测量结果应用到外场校飞数据处理中, 结果表明, 在飞机过航捷时光电经纬仪的测角误差平均减少了 55%。该系统稳定、可靠, 在靶场测量中有着广泛的应用前景。

**关键词:** 光电经纬仪; CCD 曝光中心; IRIG-B 码终端; 数字信号处理; 现场可编程门阵列; 边缘提取

**中图分类号:** V556.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1304

## CCD exposure center measuring system for photoelectric theodolite

LI Man-liang<sup>1,2,3</sup>, WU Qin-zhang<sup>1\*</sup>

- (1. *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*
- 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
- 3. Unit 63610 of the PLA, Kuerle 841001, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: wuqinzhang@ioe.ac.cn*

**Abstract:** According to the demands of a photoelectric theodolite for angle measurement accuracy, a CCD exposure center measurement system by taking the IRIG-B code terminal as time reference was designed based on a Digital Signal Processor (DSP) and a Field Programmable Gate Array (FPGA). The measuring principle and hardware components of the CCD exposure center were given. Then two sets of IRIG-B terminals with a total source code were used to control a light emitting diode and a CCD detector. By adjusting the B code terminal output signal time delay to control the light-emitting diode, two key moments along with the front and back edges for 1 Hz pulses and the exposure pulses were obtained, respectively. Aiming at the low accuracy of artificial image interpretation, an image edge extraction algorithm based on the image centre and an improved Krisch algorithm were proposed, and

收稿日期: 2013-01-30; 修订日期: 2013-02-25.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. G107309)

the CCD exposure center with a precision better than  $17 \mu\text{s}$  was automatically calculated. Finally, several sets of CCD exposure centers for photoelectric theodolites were measured in the field, and the measurement results were applied to the outfield calibration flight data processing. Obtained results show that the angle measuring error of photoelectric theodolite is reduced by 55% on average in the Czech Airlines time, and the system is stable, reliable and has a wider application prospect.

**Key words:** photoelectric theodolite; CCD exposure center; IRIG-B time code terminal; Digital Signal processing(DSP); Field Programm Gate Array(FPGA); edge extraction

## 1 引言

光电经纬仪作为靶场主要测量设备,具有测角精度高和观察目标直观的特点,被广泛应用于航空、航天和试验靶场中<sup>[1-3]</sup>。随着科技的进步,光电经纬仪的光电传感器由原来的胶片式相机变为现在的数字 CCD 相机,这种方式的改变在带来极大便利性的同时,也存在一定的弊端,主要体现在经纬仪的编码器位置信息和目标图像信息难以同时获取,从而无法得到 CCD 曝光中心时刻的编码器值。CCD 曝光中心时刻代表从曝光开始到进行一半曝光时间的时刻,利用偏差的编码器值进行目标角度合成将影响光电经纬仪的测角精度<sup>[4-6]</sup>,特别是在目标角速度变化快时表现的尤为显著。为了降低由此造成的测角误差,首先就需要精确测量 CCD 曝光中心的时刻。

近年来,靶场测量精度的要求越来越高,对现有靶场光电经纬仪 CCD 曝光中心准确度的要求也越来越高<sup>[7-9]</sup>,因此本文设计了基于 IRIG-B 码终端、数字信号处理器(DSP)和现场可编程门阵列(FPGA)的 CCD 曝光中心测量系统。该系统利用共源的两台 B 码终端分别控制目标信号和 CCD 曝光时序,然后通过 DSP 和 FPGA 进行图像采集和延时量控制,在 DSP 内部实现对目标成像的顺序规律和清晰度的判断,得到 1 Hz 脉冲前后沿和曝光脉冲前后沿分别对齐的 2 个关键时刻,测得 CCD 曝光时长和曝光中心位置。这 2 个关键时刻的精确对齐十分困难,本文提出了利用图像重心提取算法得到连续 3 幅图像的目标位置,对成像顺序规律进行判断;提出改进的 Krisch 边缘检测算法,对目标成像的清晰度进行判断,从而提高了关键时刻对齐的精度。在外场对多套光电经纬仪 CCD 曝光中心进行了测量,将测量结果应用到外场校飞数据处理中,显著提高

了飞机过航捷时光电经纬仪的测角精度,满足高精度光电测量的要求。

## 2 弹道拟合原理

单台光电经纬仪可以通过曝光时刻编码器和实时脱靶量拟合得到目标角度信息,近似拟合公式如式(1)所示:

$$\begin{cases} A = A_0 + \frac{x}{f \cos E_0} \\ E = E_0 + \frac{y}{f} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $A$ 、 $E$  代表目标合成后空间角度; $A_0$ 、 $E_0$  代表方位、俯仰编码器值,单位为 rad; $x$ 、 $y$  代表方位、俯仰脱靶量,单位为 mm; $f$  代表光学系统焦距,单位为 mm。

## 3 系统硬件组成及原理

CCD 曝光中心测量系统硬件组成如图 1 所示。

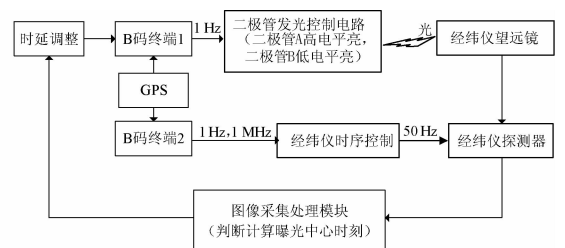


图 1 CCD 曝光中心测量硬件框图

Fig. 1 Block diagram of CCD exposure center measuring system

图 1 中 B 码终端 1 和 B 码终端 2 采用同型号设备,均以 GPS 信号为源,B 码终端 2 输出信号控制经纬仪时序,B 码终端 1 输出脉宽为 30 ms 的 1 Hz 标准信号控制发光二极管 A 和 B(高电

平 A 灯亮,低电平 B 灯亮),产生同步光脉冲作为经纬仪的目标信号。通过调整 B 码终端 1 的 1 Hz 信号(秒脉冲)的时延值,使发光二极管光信号出现在 CCD 不同拍摄时刻,形成 B 码终端 1 输出的秒脉冲信号前沿、后沿分别与 CCD 曝光脉冲的前沿、后沿 2 个关键对齐时刻。图像采集处理模块控制时延调整模块,同时记录经纬输出的数字图像,对二极管 A、B 的成像顺序规律和清晰度进行判断,在满足一定条件下,得到上述 2 个关键的对齐时刻。B 码终端 1 和 CCD 的工作时序如图 2 所示。

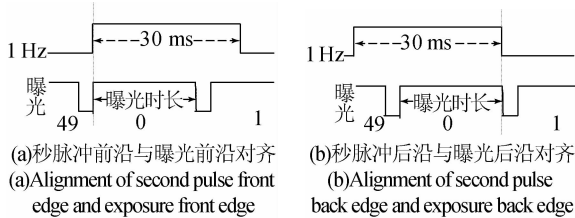


图 2 秒脉冲前后沿与 CCD 曝光前后沿对准时序

Fig. 2 Time sequences of second pulse and exposure pulse

通过调整 B 码终端 1 的时延值  $\tau$ ,并定义图 2 中 2 个时刻的延时值分别为: $\tau_1$ 、 $\tau_2$ (带符号,正为滞后,负为超前),使时序满足图中的 2 个关键对齐时刻,则有第 0 帧的曝光起始时刻为  $\tau_0$ ,曝光结束时刻为  $\tau_1 + 30$  ms,则曝光时间长度  $t$  为:

$$t = \tau_1 + 30 - \tau_0. \quad (2)$$

则第 0 帧的曝光心位于  $\tau_0 + t/2$ ,也就是说每帧的实际曝光中心比采集编码器的时刻延后  $\tau_0 + t/2$ ,以延后 50 Hz 上升沿的值作为曝光中心位置,记为  $\Delta t$ ,则有:

$$\Delta t = \tau_0 + t/2 = \frac{30 + \tau_1 + \tau_0}{2}. \quad (3)$$

## 4 图像采集处理模块

由式(1)~(2)看出,只要 2 个关键时刻对齐准确,CCD 曝光中心的测量就是精确的,本文设计的 CCD 曝光中心测量系统的图像采集处理模块就是通过改变控制 B 码终端 1 的延时量,同时实时采集 CCD 输出的数字图像,然后根据图像成像顺序规律和成像清晰度,得到精确的时序对齐时刻。根据图 2 的时序,首先调整 B 码终端 1 的

延时量使连续 3 幅图像满足表 1 的成像顺序规律。

表 1 成像顺序规律

Tab. 1 Imaging sequence rules

对齐方式	帧序号	二极管 A 成像	二极管 B 成像
前沿对齐	49	×	○
	0	○(最清晰)	×
	1	○(最清晰)	○
后沿对齐	49	○(最清晰)	○
	0	○(最清晰)	×
	1	×	○

注:第 49 帧是指前 1 s 的最后一帧,成像用“○”表示,不成像用“×”表示。

要精确地进行时序对齐,在满足表 1 成像规律的前提下满足:

- (1)在前沿对齐方式时:要满足第 0 帧 A 像最清晰,同时满足第 1 帧 A 像也最清晰;
- (2)在后沿对齐方式时,首先要满足第 0 帧 A 像最清晰,同时满足第 49 帧 A 像也最清晰。

满足上述 2 个条件,即可认为图 2 的时序对齐是准确的。因此对二极管 A 和 B 的成像顺序规律及清晰度判断算法,是决定 CCD 曝光中心测量精度的关键因素。

图像采集处理模块调整 B 码终端 1 的延时量,同时连续采集存储三幅数字图像。应用图像的目标重心提取算法得到图像中二极管 A 和 B 的成像规律,判断是否满足表 1 所示;然后应用基于改进 Krisch 边缘算法的图像清晰度评价算法,判断图像是否满足上述清晰的要求。图像采集处理是本系统的重点,接下来介绍该模块的硬件组成与软件算法。

### 4.1 硬件组成

图像采集处理模块采用 TI 公司的 TMS320C6455 为核心处理器,其硬件组成如图 3 所示。FPGA 作为整个模块的逻辑核心单元,将光电经纬仪输出的标准 CameraLink 接口数字图像存入外部存储器,同时送至 D/A 转换模块输出模拟视频;提供外部存储器数据准备好的中断信

号,通过 EDMA 方式为 DSP 提供实时图像数据;控制外部通信模块与系统中其它模块进行通信,主要是用于控制延时控制模块调整 B 码终端 1 的延时量。DSP 作为核心软件算法实现单元,完成图像顺序逻辑和计算目标清晰度,进行目标清晰度判断;计算得到 CCD 曝光中心时刻并输出。

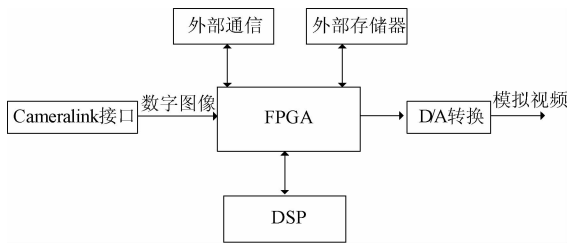


图 3 图像采集处理模块硬件原理框图

Fig. 3 Block diagram of hardware model of image collection

### 4.2 软件算法

图像采集处理模块软件算法流程如图 4 所示。

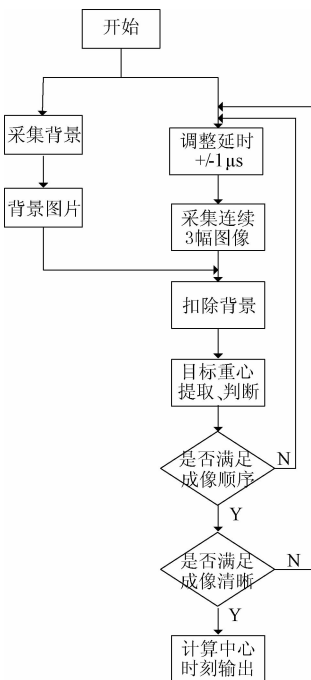


图 4 图像采集处理模块软件处理流程图

Fig. 4 Block diagram of software model of image collection

首先按  $1 \mu s$  的步进设定 B 码终端 1 的延时

值,然后对采集的图像进行判断:

条件 1:判断成像规律(连续 3 幅)是否满足表 1 中成像顺序的要求;

条件 2:在满足条件 1 的前提,先判断成像清晰度是否满足要求。

如果图像同时满足条件 1 和 2,则保证了时序对齐精确。接下来介绍图像成像顺序规律判断算法和图像清晰度判断算法。

#### 4.2.1 成像顺序判断算法

在进行测量前,首先固定经纬仪和二极管 A 和 B,调焦使二极管 A 和 B 能清晰成像,采集一幅背景图像  $b(x, y)$ ,然后用实时采集图像  $f(x, y)$  减去背景图像  $b(x, y)$ 。

$$S(x, y) = f(x, y) - b(x, y). \quad (4)$$

得到去除背景的图像  $S(x, y)$ ,对  $S(x, y)$  进行二值化处理,得到二值图像  $B(x, y)$ , (高于阈值的像素为 1,低于阈值的像素为 0)进行目标提取和重心判断,按预设的 A、B 位置与提取的重心进行比较,连续判断 3 幅图像,得到 A、B 的成像顺序规律。重心提取算法如式(5)所示。

$$x = \frac{\sum_{j=1}^M j \sum_{k=1}^N B(j, k)}{\sum_{k=1}^M j \sum_{j=1}^N B(j, k)}, y = \frac{\sum_{k=1}^M j \sum_{j=1}^N B(j, k)}{\sum_{k=1}^M j \sum_{j=1}^N B(j, k)}, \quad (5)$$

其中: $M$ 、 $N$  为图像的宽和高, $X$ 、 $Y$  即为目标重心的位置。

#### 4.2.2 改进的 Krisch 边缘算法

在满足成像规律的前提下,按  $1 \mu s$  的间隔调整 B 码时统终端 1 的延时量,得到在某成像顺序规律下的所有图像数据,然后对图像的清晰度进行判断,符合 4.2 中条件 2 的延时值即满足时刻对齐的条件。对图像的清晰度判断,本文采用基于改进 Krisch 边缘算法的图像清晰度评价算法,该算法能够检测图像各个方向的边缘,对本文中的小目标边缘有很好的提取效果,同时又不丢失任何细节信息。其算法主要思想是采用 8 个 Krisch 卷积核,每 2 个之间的夹角为  $45^\circ$ ,8 个卷积核和如图 5 所示。

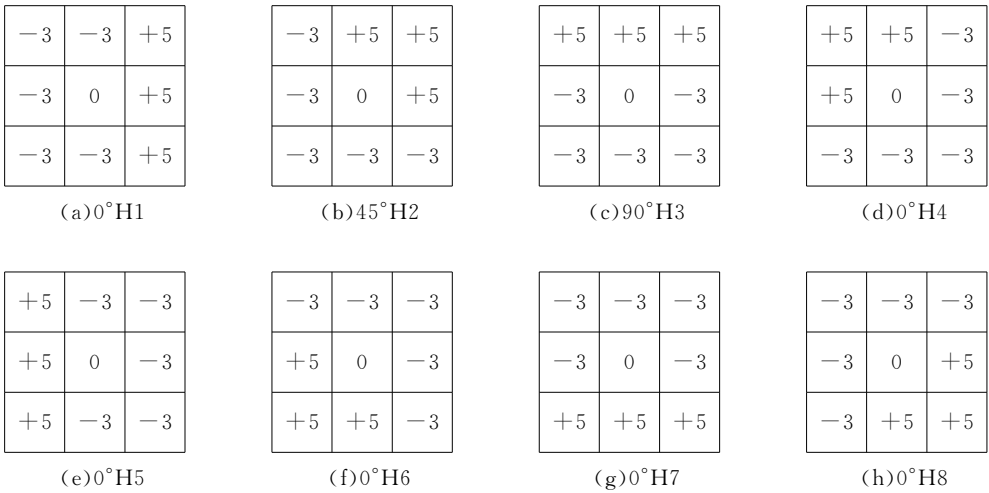


图 5 边缘提取算子图

Fig. 5 Diagram of operator on edge detection

应用这 8 个掩模对图像进行卷积运算,得到每个掩模对某个特定方向的边缘最大响应,公式如下所示:

$$\begin{aligned} H_1 &= S(x,y) * S_1, H_2 = S(x,y) * S_2 \\ H_3 &= S(x,y) * S_3, H_4 = S(x,y) * S_4 \\ H_5 &= S(x,y) * S_5, H_6 = S(x,y) * S_6 \\ H_7 &= S(x,y) * S_7, H_8 = S(x,y) * S_8 \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $S(x,y)$ 为采集的图像与背景图像相减后的图像的灰度值,则图像中每个像素的梯度值可以表示为:

$$G(x,y) = \sqrt{\sum_{i=1}^8 H_i^2} \quad (7)$$

以边缘梯度值的能量来表示图像的清晰度,其函数如式(8)所示。

$$E = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |G(x,y)|^2, \quad (8)$$

其中: $M,N$ 为图像宽和高, $E$ 值越大的图像,说明目标的清晰度越好。式(8)中是对对梯度值求平方和,这样虽然灵敏度,但算法计算量大,且随机波动对算法的稳定性有很大的影响。尤其是在目标图像不清晰时,随机波动可能产生局部的极值,从而影响图像清晰度的判断。因此本文采用式(9):

$$E = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |G(x,y)| \quad (9)$$

为了让背景信息和随机波动引起的局部极值不参加运算,加入一个阈值,阈值选取如式(10)。

$$T_n = \frac{\eta}{M \times N} \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} |S(x,y) - u_m|^2, \quad (10)$$

其中: $M,N$ 是图像行列大小, $u_m$ 图像的平均灰度, $\eta$ 为梯度阈值系数。算法首先计算一幅图像的平均灰度值 $u_m$ ,计算得到 $T_n$ ,然后与该像素点的梯度值 $G(x,y)$ 做比较,如果 $G(x,y) < T_n$ ,则将 $G(x,y)$ 清零。阈值函数中的 $\eta$ 选取非常重要,太大会将真实目标去除,太少随机噪声影响大,根据实验结果,针对本文系统的应用,选取 0.6 最为合适。

## 5 CCD 曝光中心测量实验及精度分析

### 5.1 CCD 曝光中心测量实验

为了验证设计的 CCD 曝光中心测量系统的功能和指标,对 XXX 经纬仪进行了 CCD 曝光中心的测量实验。在距离经纬仪约 3 km 外的标校塔顶端放置 B 码终端 1 和发光二极管控制电路,调整发光二极管控制电路板的方向和经纬仪光学系统焦距,使发光二极管 A、B 均能在 CCD 上规则清晰成像。然后按如下步骤进行实验:

- (1) 采集一幅背景图像;
- (2) 启动图像采集模块的自动曝光中心计算;
- (3) 输出 CCD 曝光中心值。

实验得到的实时图像如图 6 和图 7 所示,结果如表 2 所示。

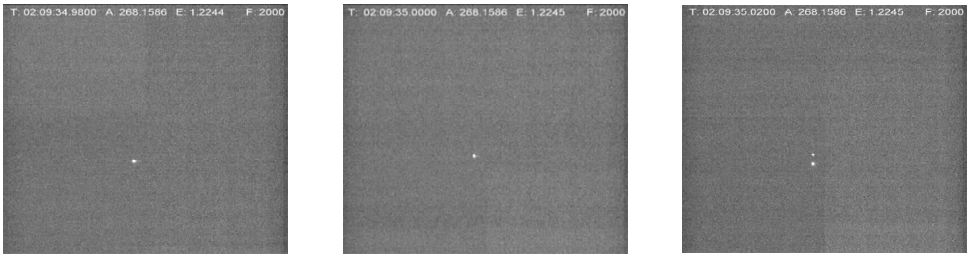


图 6 秒脉冲前沿与曝光前沿对齐时成像情况

Fig. 6 Images in alignment of second pulse front edge and exposure front edge

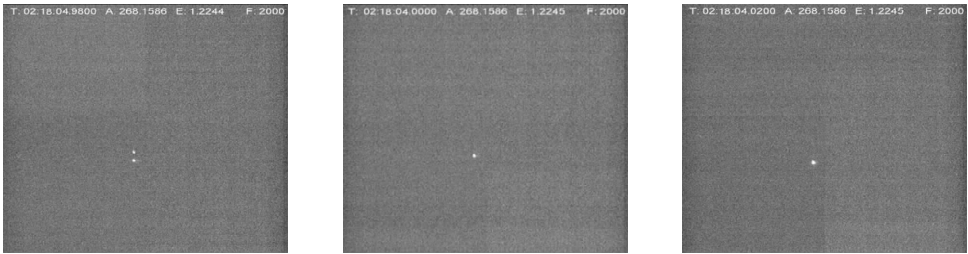


图 7 秒脉冲后沿与曝光后沿对齐时成像情况

Fig. 7 Images in alignment of second pulse back edge and exposure back edge

表 2 曝光中心测量结果

Tab. 2 Results of exposure center measurement

理论曝光时间/ms	实际曝光时间/ms	曝光前沿时刻	曝光中心时刻	曝光中心位置/ms(延后)
3	2.93	02:09:34.00109	02:09:34.00256	2.56
5	4.96	02:32:31.00104	02:32:31.00352	3.52
10	10.05	03:12:04.00097	03:12:04.00595	5.95
17.7	17.79	03:49:34.00085	03:49:34.00975	9.75

从表 2 可以看出, CCD 设置的曝光时间与实际测得的曝光时间吻合度较好, 最大误差为 90  $\mu\text{s}$ ; CCD 曝光脉冲上升沿迟后 50 Hz 脉冲前沿约 1 ms, 且随着曝光时间的缩短有逐渐后延的趋势。

### 5.2 精度分析

影响 CCD 曝光中心测量精度的因素主要包括: 两套 B 码终端 1 Hz 信号的同步精度和发光二极管和 CCD 探测器响应延时。

#### 5.2.1 两套 B 码终端 1 Hz 信号同步精度

两套 B 码终端的同步精度是测量方法的精度基准, 在实验过程中通过实际测量的方法测量同步精度。首先保证两套 B 码终端在 GPS 授时条件下工作正常, 然后采用高精度数字示波器测量, 测量结果为 1 Hz 信号的同步误差小于 110 ns。

#### 5.2.2 发光二极管和 CCD 探测器的响应时间

发光二极管从加正向电压到正常发光, 存在时延, 由选用发光二极管的参数说明中可知, 响应时间不大于 1  $\mu\text{s}$ ; 同时 CCD 探测器从光脉冲到达到产生正常可分辨的图像也存在时延, 但很难直接进行测量, 且是影响测量精度的主要因素。为此设计了相应的测量办法, 图 8 为测量时序调整图, 首先将秒脉冲前沿与曝光前沿对齐后, 将 CCD 探测器的曝光时间设为 16  $\mu\text{s}$  (1M60 相机可设的最短曝光时间) 时在第 0 帧二极管 A 成像正常; 然后将秒脉冲再超前进行调整, 当调整量达到 16  $\mu\text{s}$  时, 发现在第 0 帧图像中二极管 B 成像, 但二极管 A 不成像, 而在调整过程中二极管 A 和 B 均不成像。因此可以认定 CCD 探测器响应时间为 16  $\mu\text{s}$ 。

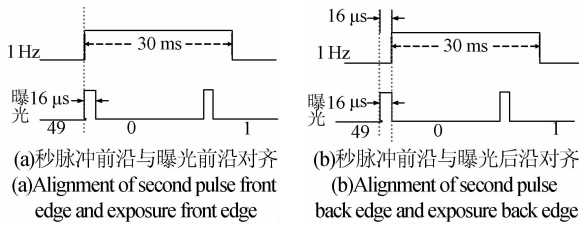
图 8 16  $\mu\text{s}$  曝光时秒脉冲前沿与曝光前后沿对准时序

Fig. 8 Time sequence diagram of second pulse and exposure pulse in 16  $\mu\text{s}$  exposure time

综合各误差源的分析,曝光中心测量精度优于 17  $\mu\text{s}$ 。

## 6 外场校飞验证

为了检验曝光中心测量结果的正确性,采用某次校飞中飞机过航捷段的测量数据进行验证。由于 GPS 天线安装在飞机的前端,目标位置判读时以飞机前端作为判读点,数据处理段落选用飞机某个进入段落。将差分 GPS 数据经坐标转换成测站的方位和俯仰值作为基准数据,再利用判读软件对记录的飞机图像进行判读,得到相应的方位和俯仰值作为测量数据,将基准数据与测量数据直接求差作为一组比对结果,见图 9(a);然后利用测量的 CCD 探测器曝光中心位置对判读结果的 T、A 和 E 进行时间对准后再与脱靶量合成得到目标位置,再求差作为另一组比对结果,见图 9(b)。从图 9

可以看出,利用曝光中心进行修正后的测量误差减少约 55%,表明 CCD 曝光中心测量系统的测量结果正确有效。

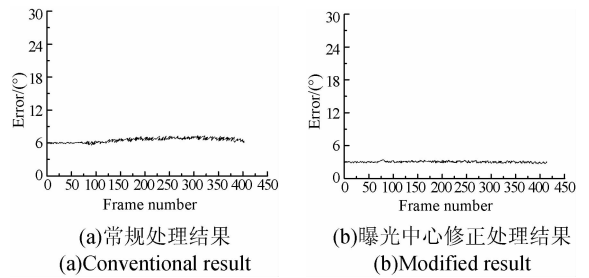


图 9 过航捷时经纬仪测角误差

Fig. 9 Results of measuring error

## 7 结 论

本文根据高精度靶场测角的需要,设计了一套 CCD 曝光中心测量系统。以 B 码终端作为时间基准,以 DSP 和 FPGA 作为核心处理器,提出了利用图像重心提取算法和基于 Krisch 边缘算法,对发光二极管的成像规律和清晰度进行判断,全自动得到两个关键的对齐时刻,并计算得到 CCD 的曝光中心。在外场对多套设备的 CCD 曝光中心进行了测量,测量精度优于 17  $\mu\text{s}$ ;同时将曝光中心测量结果应用于外场校飞中,实验结果表明,该系统显著提高了飞机过航捷时光电经纬仪的测角精度,具有很大的实际应用价值。

## 参考文献:

[1] 王宗友,付承毓,王芳. 基于数据配准提高光电经纬仪的测量精度 [J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(6):586-590.  
WANG Z Y, FU C M, WANG F. Measurement accuracy of photoelectric theodolite based on data alignment [J]. *Chinese Optics and Applied Optics*, 2010, 3(6):586-590. (in Chinese)

[2] 薛向尧,高云国,韩光宇,等. 水平式经纬仪指向误差的统一补偿技术 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1524-1530.  
XUE X Y, GAO Y G, HAN G Y, et al.. Total correction method of pointing error for level mounting theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19

(7): 1524-1530. (in Chinese)

[3] 李春芳. 振动及曝光时间对全息照相实验的影响 [J]. 实验科学与技术, 2012, 10(2):18-20.  
LI CH F. Impact of vibrations and exposure time on the hologram experiment [J]. *Experiment Science and Technology*, 2012, 10(2):18-20. (in Chinese)

[4] 韩雪冰,张景旭,赵金宇,等. 水平式光电望远镜目标定位误差的预测 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1595-1604.  
HAN X B, ZHANG J X, ZHAO J Y, et al.. Forecast for orientation errors of alt-alt photoelectric telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1595-1604. (in Chinese)

[5] 张传胜. 基于 FPGA/SOPG 架构的面阵 CCD 图像采集系统的设计 [J]. 液晶与显示, 2011, 26(5): 636-639.

- ZHANG CH SH. Design of image acquisition system based on array CCD with FPGA/SOPC architecture [J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(5): 636-639. (in Chinese)
- [6] 张贵祥, 金光, 郑亮亮, 等. 高速多通道 CCD 图像数据处理与传输系统设计 [J]. *液晶与显示*, 2011, 26(3): 397-403.
- ZHANG G X, JIN G, ZHENG L L, *et al.*. Design of high-speed and multi-channel CCD image data processing and transmission system [J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 397-403. (in Chinese)
- [6] 杨利红, 李新城, 李国宁, 等. 基于图像采集卡的图像显示与处理软件开发 [J]. *液晶与显示*, 2010, 25(6): 909-913.
- YANG L H, LI X E, LI G N, *et al.*. Development of image displaying and processing software based on image grabbing card [J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(6): 909-913. (in Chinese)
- [7] 陈伦海, 黄君凯, 杨帆, 等. 基于 FPGA 的实时边缘检测系统 [J]. *液晶与显示*, 2011, 26(2): 200-204.
- CHEN L H, HUANG J K, YANG F, *et al.*. Real-time edge detection system based on FPGA [J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(2): 200-204. (in Chinese)
- [8] LI Y, QIAO Y F, SU W X, LIU Z X. Double-theodolite measurement system used in the image calibration of space photographic instrument [J]. *Optoelectronics Letters*, 2005, 1(3): 213-216.
- [9] 陈非, 敬忠良. 空基多平台多传感器时间空间数据配准与目标跟踪 [J]. *控制与决策*, 2001, 16(B11): 808-811, 821.
- CHENG F, JING Z L. Time and spatial registration and target tracking for multiple airborne mobile platforms and sensors [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(B11): 808-811, 821. (in Chinese)
- [10] 邴志光, 束坤, 顾燕飞. IRIG-B 码在时间同步系统中的应用 [J]. *现代电子技术*, 2012, 35(7): 16-18.
- BIN Z G, SHU K, GU Y F. Application of IRIG-B code in time synchronization system [J]. *Modern Electronic Technique*, 2012, 35(7): 16-18. (in Chinese)

#### 作者简介:



李满良(1970-),男,湖南双峰人,博士研究生,高级工程师,1992年于国防科技大学获得学士学位,2006年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事靶场光学测量总体及红外特性测量方面的研究。E-mail: lml50927@sina.com

#### 导师简介:



吴钦章(1955-),男,山东新泰人,研究员,博士生导师,主要从事光电测量系统信息处理及计算机控制管理技术的研究。E-mail: wuqinzhang@ioe.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)