

超高分辨率 CCD 的焦平面测光加速方法

吴厚德 许文海

(大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要 为了解决超高分辨率 CCD 成像系统焦平面测光时间过长的问题,提出了一种焦平面测光的加速方法。该方法使用像素合并技术提高像素读取速度,将当前积分时间和系统最小积分时间的比值作为像素合并的行数,使用成像系统的最小积分时间成像,读出合并图像并计算其灰度直方图和灰度均值,为后续自动曝光算法提供依据。该方法在对积分时间和像素读出时间显著压缩的同时不影响图像平均灰度和直方图分布的获取。经实验,该方法可将测光时间缩短到一般情况的 30% 以下,可广泛应用在超高分辨率 CCD 成像系统的焦平面测光过程中,以此来提高自动曝光控制的速度。

关键词 探测器;超高分辨率;CCD;测光;像素合并;自动曝光

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.110401

Acceleration Method for Focal Plane Light Measuring of Ultra-High Resolution CCD

Wu Houde Xu Wenhai

(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

Abstract To solve the problem of long focal-plane-light-measuring time in ultra-high resolution CCD imaging system, an acceleration method is proposed. Pixel binning technology is adopted in this method to speed up the pixel output rate, the ratio of current integration time to minimum integration time is used as binning number of rows. In the light measuring period, the system uses the minimum integration time to expose the CCD, read out binned the pixel charge packets and calculate the average gray level and histogram for the auto exposure control arithmetic to use. This method can significantly reduce both integration time and pixel readout time, and maintain the original average gray level and histogram. The experiment results prove the performance of this method by compressing the light measuring time to 30% below. This method can be widely used in ultra-high resolution CCD light measuring process.

Key words detectors; ultra-high resolution; CCD; light measuring; pixel binning; auto exposure

OCIS codes 040.1490; 040.1520; 100.2550

1 引言

CCD 以其光电灵敏度高、动态范围大、读出噪声低、空间分辨率高等优点广泛应用在海洋探测、航空航天、卫星遥感、天文观测以及测量领域^[1~5]。CCD 成像质量的关键在于积分时间的计算,而计算积分时间的依据来自对焦平面光照的测量。焦平面测光是指成像系统对其焦平面上的图像传感器曝光后,从所成图像中提取测光信息的过程,该过程在自动曝光控制中起着至关重要的作用。根据曝光控制算法的不同,提取的测光信息可以是全局平均灰度、局部平均灰度或者灰度分布直方图等^[6~9]。焦平面测光具有结构简单和测光信息所见即所得的特点,因而是成像系统中常见的测光方式。

在早期的自动曝光算法中,国内外的研究重点主要集中在降低自动曝光过程中使用的帧数^[8,9],进而增

收稿日期: 2012-07-31; **收到修改稿日期**: 2012-08-28; **网络出版日期**: 2012-10-15

基金项目: 国家科技支撑计划(2009BAG18B03)和大连海事大学重大科研培育项目(2012DT006)资助课题。

作者简介: 吴厚德(1982—),男,博士研究生,主要从事可见光成像系统方面的研究。E-mail: shrek@dlmu.edu.cn

导师简介: 许文海(1956—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事水下探测、光电检测与光电信息等方面的研究。

E-mail: whxu@dlmu.edu.cn

加自动曝光的速度。但 CCD 像素数量的提高导致帧间隔明显变大,目前减小帧间隔的方法主要有提高 CCD 工作频率和增加 CCD 输出通道数两种^[10]。但是 CCD 器件工作频率的上限和输出的通道数上限已经由芯片制造商确定,用户不能灵活增加。

针对上述问题,本文提出一种焦平面测光加速方法,并在自主研发的 5×10^7 pixel 成像系统上得到应用。实验表明,该方法能大幅减小测光阶段的积分时间和像素读出时间,并且不影响测光信息的获取,也不需要增加额外的硬件电路或设备,可广泛应用在基于超高分辨率全帧型或行间转移型 CCD 的成像系统中。

2 CCD 成像芯片的像素合并技术简介

像素合并是将 CCD 成像芯片上相邻像素的电荷包在读出前进行合并的过程^[11]。为了叙述方便,假设一个仅有 2×2 个单元的简易面阵 CCD 装置,图 1 为像素合并操作的示意图。

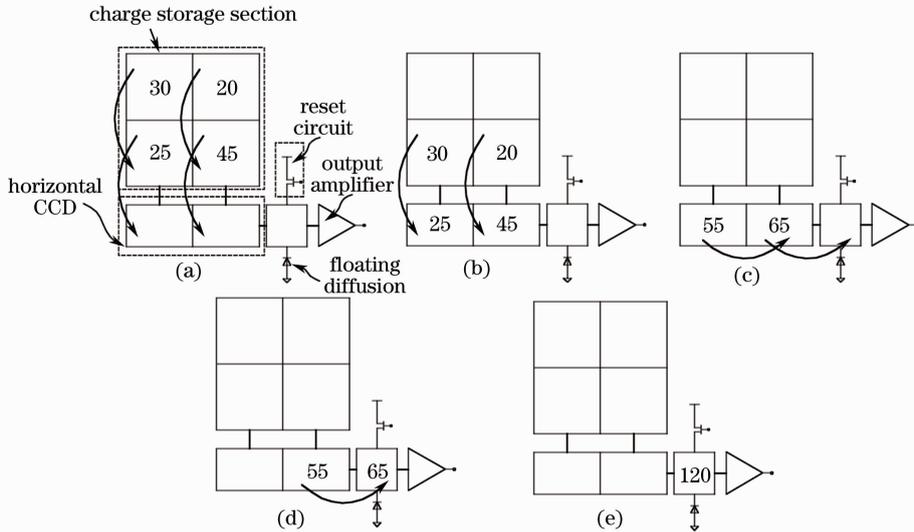


图 1 像素合并原理图

Fig. 1 Principle diagram of pixel binning

像素合并的操作是将 CCD 上积累的光生电荷在水平移位寄存器中进行两次(或多次)纵向转移,实现行合并,如图 1(a)、(b)所示,然后通过多次横向转移而不重置的方法完成光生电荷的列合并,如图 1(c)~(e)所示。图 1(a)中 4 pixel 的光生电荷经过一次 2×2 的像素合并操作之后进行了累加,最后如图 1(e)所示输出了 4 个电荷的总信号。

3 焦平面测光加速方法原理与设计

CCD 图像传感器的焦平面测光时间由积分时间和像素读出时间构成,像素合并对这两个时间均有压缩。下面首先给出像素合并对积分时间和像素读出时间加速的原理说明及计算方法,在此基础上提出焦平面测光加速方法的设计。最后讨论像素合并过程对 CCD 测光信息获取的影响。

3.1 积分时间加速

像素合并的物理上可以理解为若干个相邻的像素组合成一个更大的超像素,在同样的入射光强下该超像素会接收到更多的光,因而会产生更多的光生电荷。但是,超像素上的光生电荷会通过合并的方式最终储存在一个物理像素中,而该像素的势阱深度不变,因此在进行像素合并的同时,要减小积分时间,否则,合并后的像素很可能饱和溢出,损失图像信息^[12]。若正常情况下积分时间为 τ ,在 $m \times n$ 的像素合并下,如果要求合并后的像素具有之前的曝光级别,则积分时间应该减小到 $\tau/(m \times n)$,因此,像素合并对积分时间具有加速作用,而且合并的像素数量越多,积分时间越短。

3.2 像素读出时间加速

CCD 图像传感器的像素读出时间 t_R 由纵向转移时间 t_V 和横向转移时间 t_H 组成,即

$$t_R = t_V + t_H, \quad (1)$$

式中

$$t_V = \frac{N_V}{f_V}, \quad t_H = \frac{N_T}{f_H \times N_{out}}, \quad (2)$$

N_V 和 N_T 分别为 CCD 器件在读出操作过程中实际转移的行数和像素总数, f_V 和 f_H 分别为 CCD 器件的纵向转移时钟频率和横向转移时钟频率, N_{out} 为 CCD 的输出路数。由图 1 可见, 纵向合并将减少 CCD 的读出行数, 而横向合并没有减少 CCD 器件的横向转移时钟的数量, 因此像素合并只能减小横向转移时间 t_H , 而不能减小纵向转移时间 t_V 。以柯达公司的 KAF50100 为例, 图像传感器总像素数为 $8304(H) \times 6220(V) = 51.6 \times 10^6$, 纵向转移时钟频率为 25 kHz, 横向转移时钟频率为 18 MHz, 输出路数为 4 路, 因此在正常操作模式下, 其最短像素读出时间应该为

$$t_R = \frac{6220}{25 \text{ (kHz)}} + \frac{8304 \times 6220}{18 \text{ (MHz)} \times 4} = 966.2 \text{ (ms)}. \quad (3)$$

对于 $m \times n$ 的像素合并, CCD 芯片 n 行像素合并为一行后, 该行中的 m 个像素又进行了合并, 因此, 像素合并操作下的 CCD 读出时间为

$$t_{Racc} = \frac{N_V}{f_V} + \frac{N_T}{f_H \times N_{out} \times n}. \quad (4)$$

当(4)式中 n 取 CCD 总行数 6220 时, t_{Racc} 取最小值, t_{Racc} 与 t_R 的比值为 25.62%, 此为像素读出时间加速效果的理论极限。

3.3 焦平面测光加速方法的设计

由(4)式可知, 合并行数 n 越大, 加速效果越好, 而合并行数的增加必须相应地减小积分时间, 否则合并后的电荷包将可能溢出, 因此增加合并行数 n , 在减小了像素读出时间的同时, 也减小了积分时间。为了保证加速后获得的曝光信息与加速前获得的曝光信息有相同的全局平均灰度和直方图分布形态, 成像系统的最小积分时间 t_{sht_min} 、当前积分时间 t_{int} 和像素合并行列数 m 、 n 之间应满足

$$t_{int} = m \times n \times t_{sht_min}. \quad (5)$$

由于 CCD 的信号读出加速只取决于合并行数 n , 与合并列数 m 的大小无关, 从加速的角度考虑, 可以只进行行合并操作, 因此令 $m = 1$, 此时 $n = \frac{t_{int}}{t_{sht_min}}$, 加速算法可以达到最好效果。测光加速后的帧周期 T_{frm} 为

$$T_{frm} = t_{sht_min} + \frac{N_V}{f_V} + \frac{N_T \times t_{sht_min}}{f_H \times N_{out} \times t_{int}}. \quad (6)$$

可见, 加速测光过程仍然由积分时间和像素读出时间两部分构成, 积分时间被压缩到了成像系统的最小积分时间上, 而像素读出时间则取决于正常测光情况下使用的当前积分时间, 当前积分时间越大, 像素合并的行数就越多, 加速效果越好。图 2 为基于 KAF50100 的测光加速方法效果与当前积分时间关系曲线, 横轴为成像系统的当前积分时间, 纵轴为焦平面测光时间的压缩率。

由图可见, 当积分时间超过 10 ms 时, 测光时间被压缩到了 30% 以下, 并且加速效果趋于平缓。

3.4 加速方法对 CCD 测光信息获取的影响

本加速方法的前提是获得与原测光方法相同的平均灰度信息和直方图信息, 从信息的获得方法来看, 没有不同, 只是信息源发生了变化。加速方法用像素合并后的图像信号来计算平均灰度和灰度直方图, 而像素合并是在提高 CCD 传感器的帧速和探测能力的同时, 降低了图像的有效分辨率^[12]。CCD 中单一像素光生电荷的理论计算公式为^[13]

$$Q_{in} = \frac{\eta S}{h\nu} \int_t E_c dt, \quad (7)$$

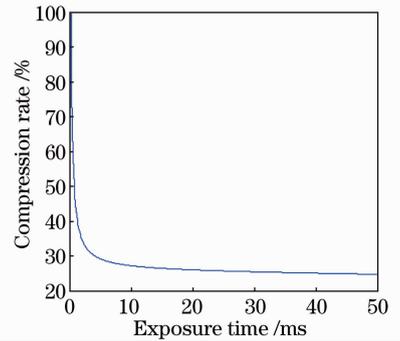


图 2 当前曝光时间与测光时间压缩率关系图
Fig. 2 Compression rate versus current exposure time

式中 Q_m 为像素中的电荷量, η 为光电转换效率, δ 为电子电荷量, h 为普朗克常数, ν 为入射辐射频率, S 为像素面积, t 为积分时间, E_e 为像素接收的辐照度。(7) 式中, 积分时间相对于场景变化速度很小, 所以可以认为 E_e 在积分过程中不变, 因此 Q_m 是积分时间 t 的线性函数。令增益系数 $g = \frac{\eta\delta S}{h\nu}$, 则有

$$Q_m = gE_e t. \quad (8)$$

在正常测光模式下进行一次积分时间为 T 的拍摄, 对应 n 个像素, 其产生的总像素电荷为

$$Q_{\text{ori}} = \sum_{k=1}^n g_k E_{ek} T = nT \sum_{k=1}^n g_k E_{ek}. \quad (9)$$

为了获得相同的测光信息, 在 n 行合并的加速方式下, 积分时间缩短为 T/n , 此时, 像素合并后的总电荷量为

$$Q_{\text{acc}} = \sum_{k=1}^n g_k E_{ek} \frac{T}{n} = T \sum_{k=1}^n g_k E_{ek}. \quad (10)$$

可见, $Q_{\text{ori}} = nQ_{\text{acc}}$, 因此加速前 n 个像素的总电荷数量是加速后电荷数量与合并行数 n 的乘积, 合并得到的电荷数就是正常测光情况下 n 个像素产生的平均电荷数。由于每个像素的暗电荷数量在固定温度下是积分时间的线性函数, 因此对暗电荷的分析可以套用光生电荷的结论。将 n 个像素的分析推广到整个像面, 可得在加速方式下, 平均灰度信息的获取与加速前没有差别。

测光信息中另一个重要的参数是图像的灰度直方图, 该参数反应了图像中所有灰度出现的频率。为了说明像素合并对直方图信息的影响, 对一幅已有图像进行 Matlab 仿真, 对图像分别进行不同行数的合并处理, 计算合并后图片的直方图信息, 仿真结果如图 3 所示。图 3(a) 为无合并情况下的直方图, 图 3(b)~(d) 分别为 8 行、32 行和 128 行合并情况下的直方图分布。可见, 像素合并后的直方图保留了原直方图的基本形态, 但是, 随着合并行数的增加, 图片的像素数量在减少, 这将导致灰度值的离散程度加大, 最终会影响到灰度直方图的准确性, 因此在工程实现中要根据像素个数选择一个行合并的上限。根据图 2, 当曝光时间为 30 ms 时, 测光时间的压缩率早已经降到了 30% 以下并且压缩率的减幅趋缓, 此时像素合并数为 120 行, 因此可以设定像素合并的上限为 128 行。

由以上分析可知, 测光加速方法中像素合并的使用尽管会降低所获得图像的分辨率, 但该问题对平均灰度信息的获取没有影响。随着分辨率的进一步降低, 灰度直方图的离散程度会增大, 但整体分布形态不变, 需要设定一个行合并的上限来约束灰度直方图的离散化程度。

3.5 KAF50100 的像素合并设计

CCD 的像素合并时序必须结合具体的芯片结构来实现。图 4 所示为 CCD 传感器 KAF50100 的芯片结构图, 该图像传感器的平 CCD(HCCD) 有两行, 分别是 HCCD A 和 HCCD B, 每个 HCCD 又分成了左右两部分, 因此该传感器的输出共有 4 路。HCCD A 与 B 通过传输门 XG 连接, 当 XG 打开时, HCCD A 中的电荷可以传输至 HCCD B。HCCD A 和 B 的 ϕ_1 彼此分离, 分别为 H1A 和 H1B 引脚, ϕ_2 彼此相连接为 H2 引脚。H1A 引脚除作为 HCCD A 的 ϕ_1 控制信号外, 还在 4 输出的情况下配合纵向转移控制信号 V1 和 V2 将其上的电荷包纵向转移至 HCCD B 中, 因此在纵向转移过程中, H1A 与 H1B 上的时序彼此不同, 所以该控制信号彼此分开。在 CCD 左右两侧各有 28 个黑像素, 这些黑像素具有感光能力但是完全遮光, 用来计算该行像素所积累的暗电平, 由于像素合并会将各个像素上的暗电平累加到一起, 因此在信号输出采集的过程中使用了 AD9845 的暗电平截断功能, 在模/数(A/D)转换之前将累加的暗电平进行截断。

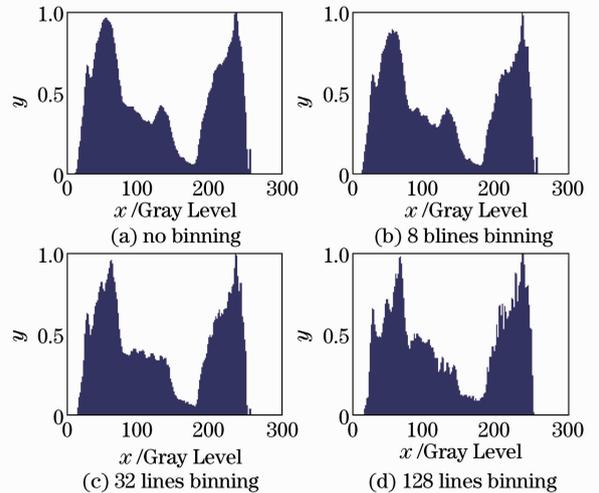


图 3 不同像素合并行数下的直方图

Fig. 3 Histograms in different pixel binning conditions

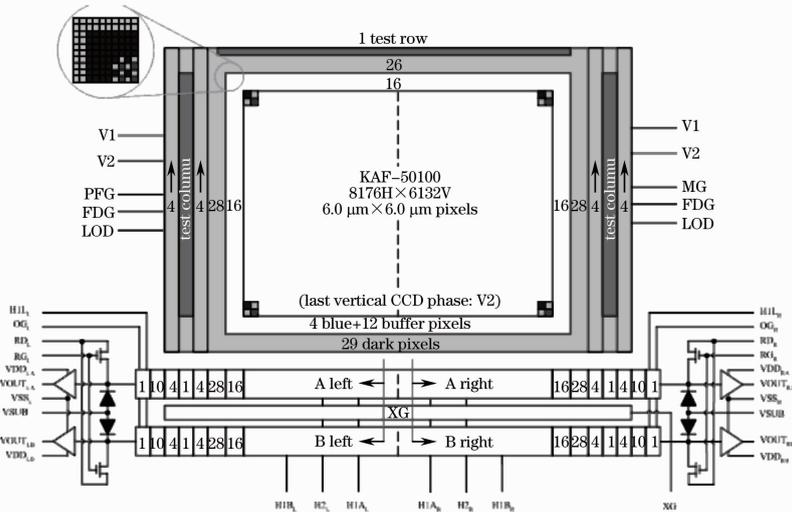


图4 KAF50100 芯片结构框图

Fig. 4 Block diagram of KAF50100

当仅使用 KAF50100 的一个水平转移寄存器(两路输出)时,像素合并过程与正常 CCD 无异,但是为了获得最大的加速效果,使用 KAF50100 的全部 4 个输出,并且像素输出频率为 18 MHz。以 2 行像素合并为例,图 5 给出了针对 KAF50100 的像素合并时序。图 5 中标记有 $t_1 \sim t_5$ 共 5 个时刻,在 $t_1 \sim t_2$ 时间内,CCD 在纵向转移时序 V1 和 V2 的控制下将两行像素信号转移至 H1A 中,完成电荷包的合并,此时 XG 保持打开。在 $t_2 \sim t_3$ 时间内,H1A 电平拉低,其上的势阱深度减小,因此 H1A 中合并的两行电荷将通过 XG 转移至 H1B 中。在 t_3 时刻,XG 关闭,横向转移寄存器 B 中的像素合并过程结束。在 $t_3 \sim t_4$ 时间内,H1A 重新回到高电平,势阱深度再次加深,在纵向转移时序 V1 和 V2 的控制下,又转移两行像素至 H1A,到 t_4 时刻,横向转移寄存器 A 中的像素合并过程结束。在 $t_4 \sim t_5$ 时间内,在横向转移时序 H1A、H1B、H1L 和 H2 的控制下,合并后的像素信号依次输出。至此,像素合并及输出过程结束,可以进行下一次像素合并过程。

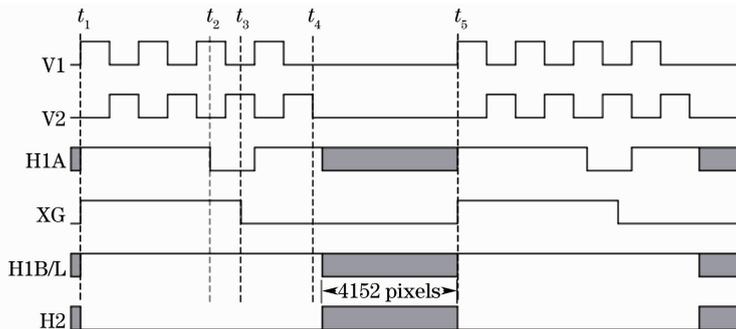


图5 基于 KAF50100 的像素合并时序

Fig. 5 Pixel binning timing based on KAF50100

4 实验平台介绍

文中所述加速方法在 5.0594×10^7 pixel 超高分辨率 CCD 成像系统上得到了应用^[14],该成像系统由本课题组自行研发。实验平台的框图如图 6 所示。实验平台包含 5.0594×10^7 pixel 成像系统和 PC 机,成像系统的图像传感器使用 Kodak 公司生产的 5.0594×10^7 pixel 全帧型 CCD,型号为 KAF50100。成像系统使用幕帘式焦平面机械快门对传感器进行曝光控制,最大快门速度 1/4000 s。传感器的输出信号经电压跟随后被相关双采样(CDS)模块进行相关双采样得到像素电平信号,像素电平经过可变增益放大器(VGA)后,经模数转换单元得到数字信号。图 6 中 CDS 模块、VGA 模块以及 A/D 模块均集成在 CCD 前端信号处理芯片 AD9845B 中,转换后的数字图像信号经现场可编程门阵列(FPGA)内部排序后由低压差分信号(LVDS)驱动器

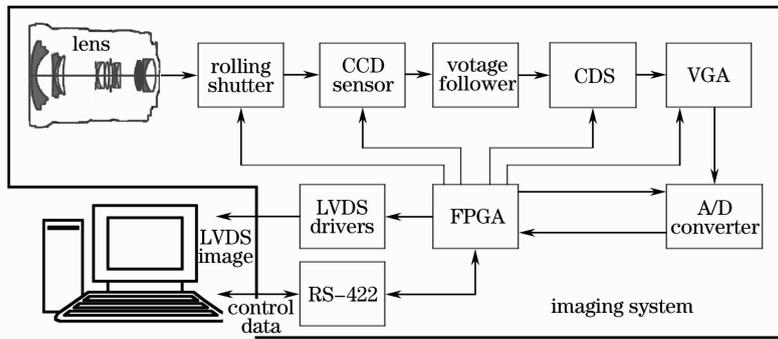


图6 实验平台框图

Fig. 6 Block diagram of experimental platform

发送至 PC 机。PC 使用 PCI1424 采集卡对数字信号进行采集,并通过 RS422 接口与成像系统进行控制命令通信。FPGA 作为成像系统的控制核心,对机械快门、CCD 图像传感器、相关双采样、CDS 模块及 A/D 转换模块进行控制,并负责与 PC 的命令及数据通信。FPGA 芯片采用 Xilinx 公司生产的 Virtex4 系列实现,具体型号为 XC4VLX40I-FF668。硬件描述语言为 VerilogHDL,软件开发环境使用 ISE8.2。成像系统实物图如图 7 所示。



图7 成像系统实物图

Fig. 7 Picture of the imaging system

5 实验及结果分析

将超高分辨率 CCD 成像系统在使用与不使用测光加速方法两种情况下进行对照实验,测量两种情况下系统获得最佳曝光图片所使用的时间,并进行比较,以此作为焦平面测光加速方法的评估依据。该成像系统的最佳曝光时间的判决依据是图像的灰度直方图和全局平均灰度^[15],该判决方法仅考虑平均灰度和直方图灰度分布范围,并不对直方图分布的形态进行分析,因此曝光时间的计算在图片读取后即可立即完成,其所占用的处理时间可以忽略,此时可认为自动曝光控制时间仅由测光时间组成。设置初始曝光时间 10 ms,分别选择室内和室外作为拍摄场景进行实验。在使用加速测光方法的情况下获得的室内外照片如图 8 所示,实验结果见表 1。



图8 实验拍摄照片

Fig. 8 Experimental pictures

表1 加速方法实验结果

Table 1 Experimental results of acceleration method

Experiment condition	Original light measuring time /ms	Original best exposure time /ms	Accelerated light measuring time /ms	Accelerated best exposure time /ms	Compress rate /%
Outdoor	1876	16	523	16	27.9
Indoor	2075	237	519	239	25.0

通过实验发现,在室外景物成像中,加速与非加速测光算法所得最佳曝光时间相同,均为 16 ms;在室内景物成像中,非加速测光下的最佳曝光时间为 237 ms,加速测光算法所得最佳曝光时间为 239 ms,二者相差不足 1%。这是由于加速与非加速测光方式采用了不同的 CCD 信号读取机制,在积分时间、输出暗电流以及读出噪声上均有轻微不同,因此两者在相对弱光下(10 ms 相对于 239 ms 曝光时间来说较弱)计算所得的平均灰度很难完全一致,有不足 1% 的差距,可以满足工程应用需求。而室外情况下最佳曝光时间的基数较小,所以看不到差别。因此,可以认为加速后的测光方法不影响曝光时间的计算。表 1 中,室内场景测光时

间压缩比要大于室外场景。这是由于室内光线较暗,在加速测光方式下,合并的行数增加,积分时间缩短(如图2曲线所示),因此其压缩比提高。可见,在室外景物和室内景物的拍摄中,加速测光算法均将测光时间压缩到了原来的30%以下,可充分体现其加速性能。

6 结 论

针对自行研发的 5.0594×10^7 pixel超高分辨率CCD成像系统焦平面测光时间过长的问题,提出并实现了一种焦平面测光的加速方法。方法以像素合并技术为基础,使用成像系统最小曝光时间和当前曝光时间的比值作为CCD合并行的数量,一方面减小了测光时对CCD的曝光时间,另一方面大量的行合并显著提高了电荷的读出速度,从而缩短了平均灰度和直方图信息的获取时间,进而对测光过程起到了加速的作用。使用像素合并会降低CCD器件的有效分辨率,但是在测光过程中,最终的目的是获得平均灰度和直方图信息,因此其有效分辨率的降低并没有影响到平均灰度的计算和直方图分布的获取。本加速方法很好地规避了像素合并会降低器件有效分辨率这一缺点。室内外拍摄实验表明,该方法可以将自动测光时间缩短到原先的30%以下,且不影响最佳曝光时间的计算,并且其实现不需要新增任何硬件电路或设备,可以广泛应用于全帧型以及行间转移型超高分辨率CCD成像器件的自动曝光控制。

参 考 文 献

- Ruan Rui. Application of CCD technology in the field of hydrographic surveying and charting[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2011, **31**(3): 80~82
阮 锐. CCD技术在海洋测绘领域中的应用[J]. 海洋测绘, 2011, **31**(3): 80~82
- Mo Site. Circuit of 1.4 mega pixels digital video camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(3): 032501
莫思特. 140万像素高清数字摄像机电路设计[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(3): 032501
- Cheng Xuan, Zhao Huijie. Dark-current calculation method of area CCD based on bad pixels detection in the scene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0404002
程 宣, 赵慧洁. 基于场景坏点检测的面阵CCD暗电流估计方法[J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0404002
- Cheng Shubo, Zhang Huige, Wang Zhebin *et al.*. Nonlinearity property testing of the scientific grade optical CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0404001
程书博, 张惠鸽, 王哲斌等. 科学级光学CCD非线性特性测试[J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0404001
- Zhao Xiaoyan, Tang Zhengxin, Yan Haitao *et al.*. Optical multi-channel detection on solar ultra-violet irradiation spectrum [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(11): 110101
赵晓艳, 汤正新, 闫海涛等. 利用CCD光学多道分析器探测太阳紫外辐射光谱[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(11): 110101
- Yang Haitao, Chang Yilin, Wang Jing *et al.*. A new automatic exposure algorithm for video cameras using luminance histogram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 841~847
杨海涛, 常义林, 王 静等. 一种基于亮度直方图的自动曝光控制方法[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 841~847
- Guan Che, Wang Yanjie. Real-time auto light control system of CCD camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(2): 358~366
关 澈, 王延杰. CCD相机实时自动调光系统[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(2): 358~366
- Ge Zhiwei, Yao Suying, Xu Jiangtao *et al.*. A fast automatic exposure control method for CMOS image sensor[J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, **43**(10): 854~859
戈志伟, 姚素英, 徐江涛等. 一种应用于CMOS图像传感器的快速自动曝光控制方法[J]. 天津大学学报, 2010, **43**(10): 854~859
- Jiang Tao, K. D. Kuhnert, Nguyen Duong *et al.*. Multiple templates auto exposure control based on luminance histogram for onboard camera [C]. Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2011, **3**: 237~241
- Liu Guanglin, Yang Shihong, Wu Qinzhang. Design for high resolution CCD camera with high frame rate [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(5): 735~738
刘光林, 杨世洪, 吴钦章. 高分辨率大面阵CCD相机的高帧频设计[J]. 半导体光电, 2007, **28**(5): 735~738
- Jiankang Zhou, Xinhua Chen, Wang Zhou *et al.*. Frame transfer CCD driving platform using flexible integral time and pixel

- binning[C]. *SPIE*, 2009, **7156**: 715637
- 12 B. Akselli, A. Kholmatov, H. Nasibov. The use of CCD pixel binning in PIV measurements[C]. 2009 International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2009. 223~228
- 13 Wang Qingyou. Applied Technology of Image Sensor[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003
王庆有. 图像传感器应用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003
- 14 Xu Wenhai, Wu Houde. Design of ultra-high resolution CCD imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(7): 1603~1610
许文海, 吴厚德. 超高分辨率 CCD 成像系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2012, **20**(7): 1603~1610
- 15 Zhao Fang, Luan Xiaoming, Sun Yue. Gray image-based exposure estimation method [J]. *Applied Science and Technology*, 2009, **36**(8): 32~36
赵 芳, 栾晓明, 孙 越. 基于灰度图像的曝光量估计方法[J]. 应用科技, 2009, **36**(8): 32~36