光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022052704

基于帧转移 CCD 的超高动态循环曝光控制技术研究

王　颖，周建勇*

（中电科技集团重庆声光电有限公司，重庆 400060）

摘　要： 提出了一种可大幅度提升高光谱成像探测动态范围的基于帧转移电荷耦合器件（CCD）的曝光控制技术。该技术采用先积分后读出的工作模式，结合 CCD 快速电荷倾倒时序控制方法，能够有效清除空闲时段的无效电荷，实现超短积分时间和长积分时间曝光周期的快速切换；针对同一被探测目标，在规定时间范围内通过多档积分周期之间的快速切换，实现多档曝光周期的不间断循环曝光，从而使该技术的光谱探测动态范围相较传统技术提升 2 个数量级以上。设计了循环曝光档数和曝光时间可动态设置方式，时序仿真与测试结果表明，该方式能够有效提升高光谱成像技术在复杂光环境下的适应性。

关键词： 高光谱；帧转移 CCD；循环曝光；高动态

中图分类号： TN386.5　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0597－05

Ultra-high Dynamic Cyclic Exposure Control Technique Based on Frame Transfer CCD

WANG Ying，ZHOU Jianyong

（Chongqing Acoustics-Optics-Electonics Co.，Ltd. of China Electronics Technology Group Corporation，Chongqing 400060，CHN）

Abstract： An exposure control technique based on frame transfer CCD is proposed to greatly improve the dynamic range in hyperspectral image detection. It adopts a new working mode of integrating first and then reading out，combined with the fast charge dumping timing control method of charge-coupled devices (CCD)，which can effectively remove the invalid charge in the idle period and realize fast switching between the ultra-short integration time and the long integration time exposure period. For the same detected target，the uninterruptable cycle exposure of multiple exposure cycles can be realized by fast switching between multiple integral cycles within a specified time range，so that the spectrum detection range index of this technique can be improved by more than 2 orders of magnitude compared with that of the traditional technology. At the same time，the dynamic setting mode of cyclic exposure file number and exposure time is designed. The timing simulation analysis and test verifies that the proposed design can effectively improves the adaptability of hyperspectral imaging technology in complex light environment.

Key words： hyperspectral；frame transfer CCD；cyclic exposure；high dynamic

0　引言

高光谱成像技术是一种基于多窄波段的影像数据技术，它是成像技术和光谱技术的结合，在环境监测、地质填图、矿物勘测、水资源遥感以及实验室分析等领域得到了广泛应用[1-5]。电荷耦合器件（CCD）是紫外、可见光、近红外高光谱成像探测常用的光电探测器件，可获取 300～1 100 nm 范围的空间维和光谱维信息[6-7]。为了得到更高的光谱分辨率，需要采用分光形式把同一物体发出的复合光分光成为不同的窄带光，形成多光谱图像信息，以提升

收稿日期：2022－05－27.

* 通信作者：周建勇　E-mail：zhoujianyong@189.cn

对目标的区分能力[8-10]。被探测物体经过光谱分光后，光波能量也相应衰减，导致成像探测信噪比降低。另外，用于光谱探测的 CCD 器件在不同波长下的光谱响应能力也不同，这会导致在同一光波环境下，有的窄带光谱能量很弱，有的窄带光谱能量很强。而传统的高光谱成像技术均采用单一曝光模式探测，能探测到的光谱信息范围窄，不能同时兼顾对能量弱和能量强的光谱信息的探测。特别是在复杂环境背景光或强背景光条件下，现有高光谱成像技术很难实现对微弱目标的高分辨率光谱信息探测。

为此，本文提出了一种基于帧转移 CCD 的曝光控制技术，在高光谱成像探测应用中能大幅度提升动态范围。该技术采用了一种新的读出工作模式和快速电荷倾倒方法，能快速切换多档曝光周期的循环曝光，可有效提升高光谱成像技术的关键技术指标和在复杂光环境下的适应能力。

1 原理分析

1.1 基于帧转移 CCD 的高光谱成像系统原理

本文采用了 E2V 公司生产的一款 1 024×1 024 元帧转移 CCD 器件来设计高光谱成像系统，行方向对应光谱维，列方向对应空间维。光谱维有效行数为 961，共分为 70 个谱段，空间维有效列数为 508，如图 1 所示。

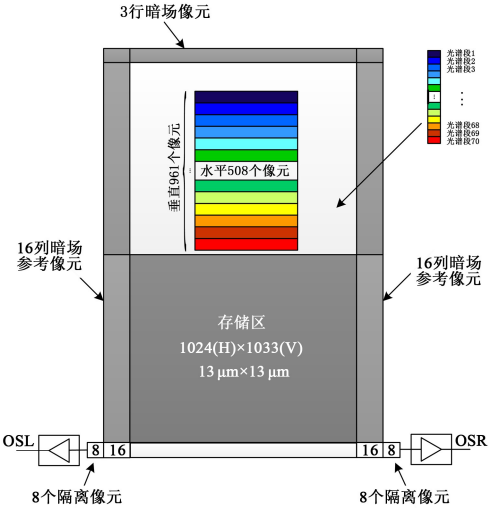

图 1 CCD 器件光谱维示意图

高光谱成像系统采用光学系统分光的形式，被测目标经过光学聚焦后，再经过分光系统，CCD 的每一行对应被测目标平面的一个方向一维光谱信息，如图 2 所示。随着高光谱成像系统的推扫运动，可以得到被测目标的二维光谱信息[11]。

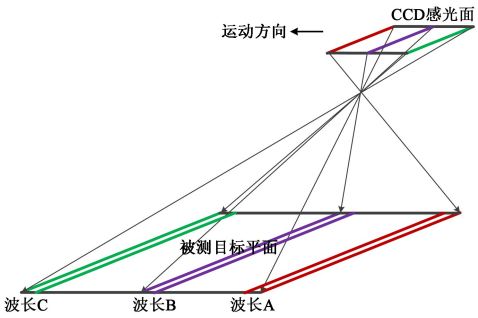

图 2 目标光谱信息采集原理图

1.2 帧转移 CCD 先积分后读出和边积分边读出控制原理

CCD 驱动模块主要生成 CCD 驱动控制信号。当 CCD 成像工作时，其驱动过程主要包括以下几个阶段：积分过程、快态转移过程、慢态读出过程和无效积分清除过程[12]。帧转移 CCD 器件的工作模式可以分为两种：先积分后读出(ITR)与边积分边读出(IWR)。其中 ITR 模式为 CCD 先进行当前帧的积分过程，再完成当前帧图像信号的转移与读出，因此该模式包括 4 个过程：积分过程、快态转移过程、慢态读出过程和无效积分清除过程。IWR 模式为在 CCD 进行当前帧积分过程的同时，完成前一帧图像信号的转移与读出，因此该模式包括 3 个过程：积分过程、快态转移过程和慢态读出过程。该模块采样状态机实现不同模式下的 CCD 驱动，其状态跳转如图 3 所示，共包括 4 个状态：S_FST1(无效积分清除状态)、S_INT(积分状态)、S_FST2(快态转移状态)和 S_READ(慢态读出状态)。

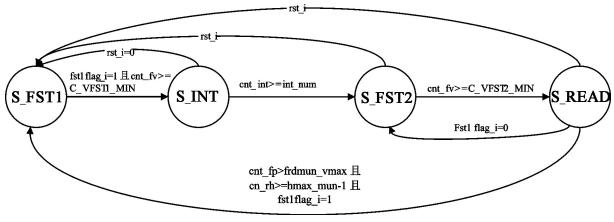

图 3 CCD 工作状态跳转图

当 CCD 工作在 ITR 模式时，状态机从 S_FST1 开始，遍历 4 个状态，先清除上一帧的无效积分(S_FST1)，进行当前帧积分(S_INT)，然后进行快态转移(S_FST2)，根据不同 binning 模式读出 CCD 图像数据(S_READ)，读出完成后再进入下一个 S_FST1，以此循环。当 CCD 工作在 IWR 模式时，状态机直接从 S_INT 跳转至 S_FST2，完成快态转移

(S_FST2)后，根据不同 binning 模式读出图像数据(S_READ)，读出完成后再进入下一个 S_INT，以此循环。

1.3　循环曝光控制原理

积分时间控制模块的功能是根据循环积分参数判断一个积分周期内各阶段的工作模式并计算各积分周期的有效积分时间和最小慢态读出时间。

根据 CCD 驱动工作原理，图像帧周期 T 由积分时间 T_0、快态转移时间 T_1、有效行慢态读出时间 T_2 和无效积分信号清除时间 T_3 共同决定。CCD 循环积分参数包括循环积分周期 t_p、积分档数 n、积分时间 $t_1 \sim t_n$、垂直合并行数以及 CCD 输出通道数。循环积分控制原理如图 4 所示，假设当前循环积分档数为 2，则 CCD 在一个循环积分周期内分别连续进行两次积分，并输出 2 帧图像，若 $t_1+t_2<T_t$，则 T_t 内其余时间空闲，若 $t_1+t_2 \geqslant T_t$，则连续进行循环积分，T_t 为循环积分周期，t_1，t_2 分别为一个循环积分周期内的两个图像帧周期。

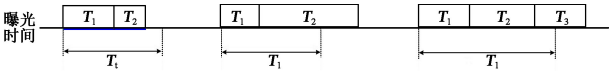

图 4　循环积分控制示意图

2　设计与验证

2.1　CCD 循环曝光控制时序设计

在一个循环积分周期内，该模块用于实现 CCD 长短积分时间的循环交替控制。其中，第 1 帧图像必须采用先积分后读出模式。第 2～n 帧图像输出时，有两种情况：(1)当积分时间小于读出时间时，由于在转移的过程中，光敏区像元仍在进行积分，产生了无效积分信号，需要在下一帧积分时间控制信号到达前完成无效积分信号清除；(2)当积分时间大于读出时间时，慢态转移过程中光敏区像元仍在进行积分，该积分信号作为下一帧图像的有效积分，不需要在下一帧积分时间控制信号到达前完成无效积分信号清除。同时，当 $T_1<T_2$ 时，CCD 工作在先积分后读出模式，帧周期 $T=T_0+T_1+T_2+T_3$，时序关系如图 5 所示；当 $T_0 \geqslant T_2$ 时，CCD 工作在边积分边读出模式，$T_3=0$，帧周期 $T=T_1+T_0$，时序关系如图 6 所示。

当循环积分档数为 1 时，CCD 无效积分清除标志信号(该信号用于标志 CCD 工作模式)置 1，图像积分时间为“积分时间 t_1”。若循环积分周期小于 ITR 模式的最小帧周期，则 CCD 图像慢态转移时间(T_{frd})为最小慢态转移时间(该时间由 CCD 水平读出速率、垂直合并行数、CCD 输出通道数与有效读出行数共同决定)，反之则 $T_{frd}=T_p-T_1-T_3-t_1$。当循环积分档数为 2 时，第一个积分周期内 CCD 无效积分清除标志信号置 1，图像积分时间为“积分时间 t_1”。若积分时间 t_2 小于最小慢态转移时间，则第一帧图像的 CCD 图像慢态转移时间(T_{frd})为最小慢态转移时间，反之则 $T_{frd}=t_2$。第二个积分周期内若积分时间 t_2 小于等于最小慢态转移时间，则第二个积分周期的 CCD 无效积分清除标志信号置 1，且若剩余时间($t_1=t_p-T_3-t_1-T_1-T_{frd}$)加上 f_{pmin} 小于 t_p，则第二帧图像的 T_{frd} 为最小慢态转移时间，反之第二帧图像的 $T_{frd}=t_1-T_1-$



图 5　存在无效信号清除状态的 CCD 时序图

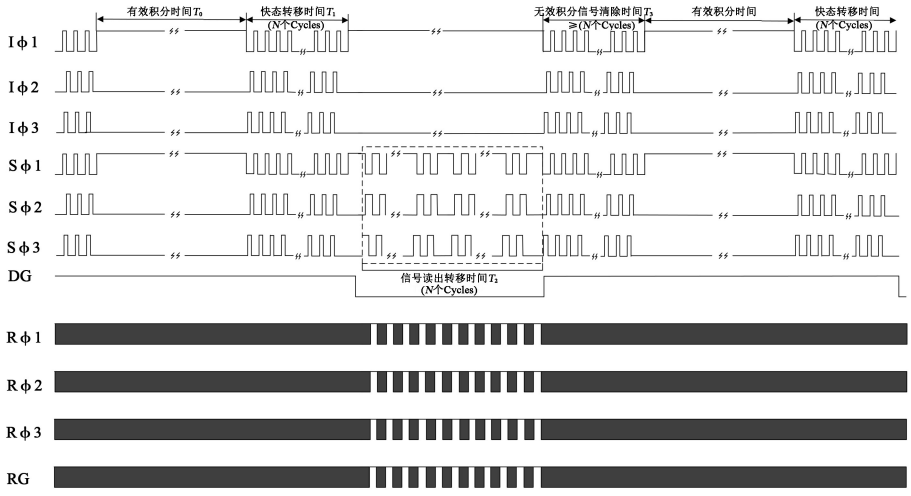

图 6 不存在无效信号清除状态的 CCD 时序图

T_3-t_1。第二个积分周期内若积分时间 t_2 大于最小慢态转移时间,则第二个积分周期的 CCD 无效积分清除标志信号置 0,且若剩余时间($t_1=t_p-T_3-t_1-T_1-T_{frd}$)加上 f_{pmin} 小于 t_p,则第二帧图像的 T_{frd} 为最小慢态转移时间,反之第二帧图像的$T_{frd}=t_1-T_3$。循环积分档数为 n 的处理方法以此类推。

2.2 帧转移 CCD 循环曝光设计结果与测试验证

以帧转移器件 CCD47-20 为硬件平台进行该控制方法的具体设计实现。CCD 光敏区像元总数为 1 024×1 024,存储区为 1 024×1 033,单通道与双通道输出可选,其结构如图 7 所示。

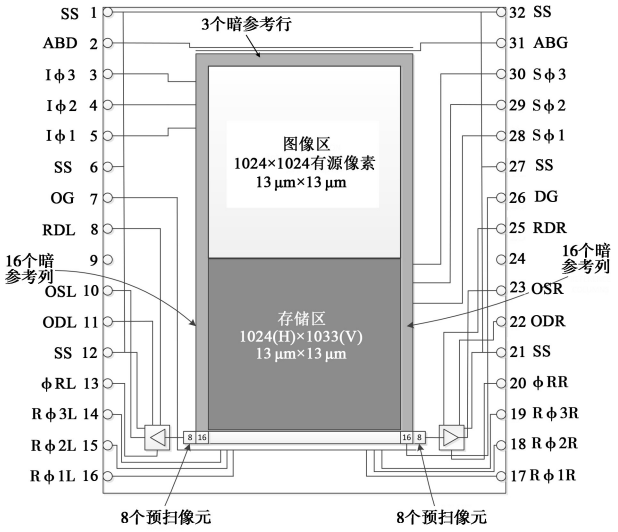

图 7 CCD47-20 结构示意图

CCD 水平读出时钟速率设计为 2 MHz。水平方向,当 CCD 采用双通道输出时,每行进行 545 次水平读出,当 CCD 采用单通道输出时,每行进行 1 044 次水平读出;垂直方向,CCD 分为非合并输出与合并输出,非合并输出时,有效读出行数为 961 行,合并输出时,有效输出行数为 480 行。T_1,T_2,T_3 最小值如表 1 所示。

表 1 不同模式下 T_1,T_2 与 T_3 最小值 单位:ms

序号	双通道合并	双通道非合并	单通道合并	单通道非合并
T_1	2.066	2.066	2.066	2.066
T_2	145.31	290.60	290.60	580.16
T_3	2.066	2.066	2.066	2.066

若当前循环曝光参数值分别为:循环曝光周期 $t_p=1\,000$ ms,积分档数 $n=2$,积分时间 $t_1=5$ ms,$t_2=1\,000$ ms,垂直合并行数为 2,CCD 输出通道数为 2。当 CCD 输出第一帧图像时,其工作在 ITR 模式,CCD 驱动过程遍历 4 个状态:S_FST1→S_INT→S_FST2→S_READ,其中 $T_0=5$ ms,$T_1=2.066$ ms,$T_3=2.066$ ms,$T_2=992.934$ ms。CCD 输出第二帧图像,其工作在 IWR 模式,第二帧图像的积分过程在第一帧图像快态转移与慢态转移时完成,因此该幅图像的 $T_2=T_1$(第一帧图像)+T_2(第二帧图像),$T_1=2.066$ ms,$T_2=145.31$ ms,$T_3=0$ ms。经测试验证,正常成像状态下最长积分时间与最短积分时间跨度达到 200 倍以上。

3 结论

本文结合帧转移 CCD 的结构特点以及高光谱成像中复杂光环境下的应用需求,提出了基于帧转移 CCD 的先积分后读出的新工作模式、多种积分周期不间断循环曝光的方法以及循环曝光档数和曝光时间可动态设置等新技术,弥补了传统边积分边读

出模式下不能同时兼顾短时间曝光和长时间曝光的问题，有效提升了复杂光环境下 CCD 用于高光谱成像的响应动态范围，相较传统曝光方式提升 2 个数量级以上，增强了高光谱成像技术的环境适应能力。

参考文献：

[1] 郑玉权，禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览[J]. 遥感学报，2002，6(1)：75-80.
Zheng Yuquan，Yu Bingxi. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers[J]. National Remote Sensing Bulletin，2002，6(1)：75-80.

[2] Green R O，Eastwood M L，Sartureet C M. Imaging spectroscopy and the airborne visible infrared imaging spectrometer AVIRIS[J]. Remote Sens. Environ.，1998，65(3)：227-248.

[3] 张　达，郑玉权. 高光谱遥感的发展与应用[J]. 光学与光电技术，2013，11(3)：67-72.
Zhang Da，Zheng Yuquan. Hyperspectral remote sensing and its development and application review[J]. Optics & Optoelectronic Technology，2013，11(3)：67-72.

[4] 禹秉熙. 高分辨率成像光谱仪 C-HRIS 研究[J]. 光机电信息，2000，17(4)：1-5.
Yu Bingxi. Research on hyperspectral resolution imaging spectrometry C-HRIS[J]. Optical，Mechanical and Electrical Information，2000，17(4)：1-5.

[5] 王跃明，刘银年. 高帧频面阵 CCD 探测器应用技术研究[J]. 红外与毫米波学报，2006，25(1)：50-55.
Wang Yueming，Liu Yinnian. Applications of high frame rate CCD detectors technology[J]. J. of Infrared and Millimeter Waves，2006，25(1)：50-55.

[6] Robberto M，Stiavelli M，Baggettet S. Selection of the infrared detectors for wide field camera 3 on the hubble space telescope[J]. Proc. SPIE，2004，5167：167-174.

[7] Barducci A，Castagnoli F，Castellinietal G. Developing a new hyperspectral imaging interferometer for earth observation[J]. Proc. SPIE，2012，51(11)：111706.

[8] 朱院院，高教波，高泽东，等. 基于多区间映射评价优选的光谱数据融合显示算法[J]. 应用光学，2015，36(5)：728-734.
Zhu Yuanyuan，Gao Jiaobo，Gao Zedong，et al. Fusion and vision algorithm of spectral data based on mapping-evaluating-optimizing methods within multi-section[J]. J. of Appl. Opt.，2015，36(5)：728-734.

[9] 杨　洪，李　金，白雪平，等. 一种具有开窗功能的行间转移 CCD 图像传感器[J]. 半导体光电，2021，42(1)：25-29.
Yang Hong，Li Jin，Bai Xueping，et al. An interline CCD image sensor with open window ability[J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(1)：25-29.

[10] 郭　利，周建勇，何　达，等. CCD 图像传感器电极间漏电流自动化测试系统设计[J]. 半导体光电，2020，41(2)：287-290.
Guo Li，Zhou Jianyong，He Da，et al. Design of automated test system for leakage current between electrodes of CCD image sensor[J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(2)：287-290.

[11] 马　骏，肖喜中，郎均慰，等. 航空推扫高光谱成像仪 CCD 探测器选型研究[J]. 光学学报，2014，34(10)：1011001.
Ma Jun，Xiao Xizhong，Lang Junwei，et al. Study on selection of CCD detector of space-borne hyper-spectral imager[J]. Acta Optica Sinica，2014，34(10)：1011001.

[12] 杨　阳，刘学斌. 大孔径静态干涉成像光谱仪曝光时间控制技术[J]. 光子学报，2015，44(11)：123004.
Yang Yang，Liu Xuebin. Exposure time control of large aperture static imaging spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica，2015，44(11)：1123004.

作者简介：

王　颖(1970—)，男，重庆市人，工程硕士，高级工程师，主要研究方向为电路与系统/光学仪器；

周建勇(1981—)，男，硕士，研究员级高级工程师，主要研究方向为图像传感器及成像组件。