

高分辨率大面阵 CCD 相机高帧频设计及其非均匀性的校正

任 航

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘 要: 目前采用高分辨率全帧面阵 CCD FTF5066M 作图像传感器的航拍相机帧频一般不超过 1 fps, 为了满足高帧频应用, 文中首先介绍了全帧型面阵 CCDFTF5066M 的基本驱动电路, 并对其进行了改进, 利用 CCD 4 个输出放大器进行同时输出, 使最高帧频达到了 3.4 fps, 介绍了 4 路输出时 CCD 驱动时序、前端处理电路、直流偏置电路、接口电路等的设计, 改进后的驱动电路能满足多种航拍相机的应用要求。然后对全帧型面阵 CCDFTF5066M 的非均匀性进行了分析, 并建立了一种响应非均匀性检测系统。利用该系统分别对面阵 CCD5066M 的 4 个象限之间的非均匀性和每个像元之间的非均匀性进行了检测。在 CCD 响应度为线性的基础上, 提出了两点校正算法并对非均匀性进行校正。通过校正 4 个象限响应灵敏度的标准偏差降低到原来的 1/13。通过对鉴别率板的重新拍摄, 可以看出面阵 CCD 的非均匀性得到了明显的改善。

关键词: 全帧型面阵 CCDFTF5066M; 高频帧; 驱动时序; 非均匀性校正; 两点校正法

中图分类号: TN141.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1491-07

High-resolution large area CCD camera frame rate design and its non-uniformity correction

Ren Hang

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Using high-resolution full frame area array CCD FTF5066M as aerial image sensor of the camera, its frame rate is generally not more than 1 fps, which can not meet the high frame rate applications. Firstly, the full frame area array CCDFTF5066M drive circuit was introduced in this paper, and it was also been improved. Using CCD four output amplifiers to output at the same time, the highest frame rate reached 3.4 fps. Secondly, the timing of the CCD driver, front-end processing circuit, DC bias circuit, interface circuit of the four outputs were designed. The improved driver circuit could meet the application requirements of various aerial camera. Then the full frame area array CCDFTF5066M non-uniformity was analyzed, and a non-uniform response detection system was established. Using this system, the array CCD5066M's non-uniformity between the four quadrants and each pixel was tested separately. On the basis of CCD linear responsivity, two correction algorithm was proposed to correct the non-uniformity. At last, by correcting, the four quadrants's standard deviation of response sensitivity was

收稿日期: 2012-10-08; 修订日期: 2012-11-04

作者简介: 任航(1982-), 男, 博士, 主要从事 CCD 驱动电路设计、图像处理及采集方面的研究。Email: renhang10@163.com

reduced to the original's 1/13. Through the re-shooting of the identify rate board, it can seen that the array CCD's non-uniformity has been improved obviously.

Key words: full frame surface array CCDFTF5066M; high-frequency frame; drive timing; non-uniformity correction; two correction method

0 引 言

大面阵CCD 在航空摄影、数字影楼、医疗生化、国防军工等要求高分辨率、高图像质量的场合有着广泛的应用需求。文中选用加拿大 DALSA 公司生产的一款具有 3 300 万像素的全帧型 CCD 芯片 FTF5066M 作为图像传感器, FTF5066M 是一款具有垂直抗晕结构的 3 300 万像素的高分辨率大面阵全帧型 CCD 图像传感器,具有面阵大(36 mm×48 mm)、分辨率高(4 992×6 668)、填充因子高(100%)、动态范围大(>72 dB)、像元输出速度快(最大 27 MHz)、电荷转移效率高(0.999 999)等优点,非常适合作为科学级相机的图像传感器^[1]。

目前基于 FTF5066M 的数字相机大多采用单通道输出,帧频不超过 1 fps,不能满足某些高帧频的应用需求。通常提高帧频可以采取两种方法:提高 CCD 像素时钟或将 CCD 信号分多个通道同时输出。前者受器件极限参数的限制,效果不明显,因此大多数面阵 CCD 采用多输出通道的结构。文中针对 FTF5066M 的结构特点,提出了一种对其基本驱动电路进行改进的方法,充分利用它的 4 个输出放大器进行同时输出,从而达到最大的读出速率,克服了目前基于 FTF5066M 的相机帧频率低的缺点。

对于所有 CCD 相机,由于 CCD 制作工艺的差别、电路参数不同和光学系统设计等原因,引出了 CCD 相机的非均匀性问题。特别在微光拍照情况下,要求拍摄图像质量很高时,非均匀性将严重影响面阵 CCD 的成像质量,所以非均匀性必须降低到更低的范围内。文中分析了全帧型面阵 CCD 响应非均匀性产生的原因,并建立了一种响应非均匀性检测系统,利用该系统分别对面阵 CCDFTF5066M 的 4 个象限之间的非均匀性进行了检测,在面阵 CCD 响应度为线性的基础上,提出了两点校正算法并对非均匀性进行了校正。最后,对校正算法的性能进行分析,给出了校正前后响应非均匀性的对比。

1 FTF5066M 基本驱动电路

为了驱动 FTF5066M 正常工作并充分发挥其性能,CCD 驱动电路系统的设计是其关键问题。由于该 CCD 的周边配套芯片比较成熟,因此选择 DALSA 官方推荐的驱动芯片组进行设计,可以大大降低电路复杂度,使系统具有结构简单、可靠性高、性能优秀等优点。

图 1 给出了相机电路系统的基本电路框图,系统由时序脉冲发生器(SAA8103)、垂直驱动器(TDA9991)、

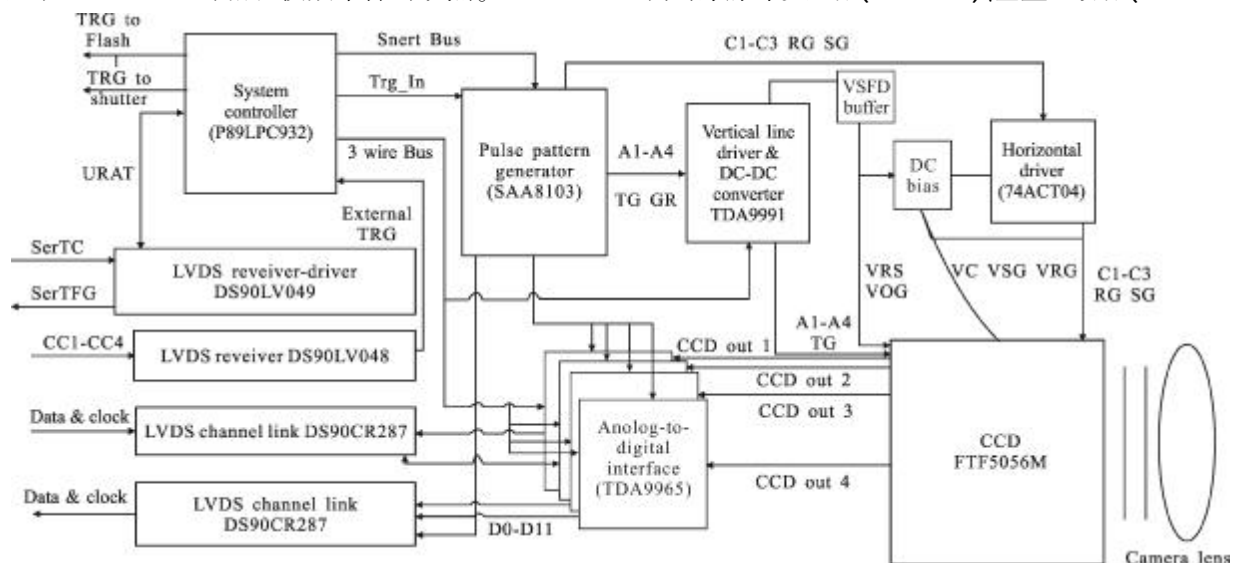


图 1 FTF5066M 基本驱动电路系统结构图

Fig.1 Structure of FTF5066M drive circuit system

水平驱动器(74ACT04)、直流偏置电路、前端信号处理器(TDA9965)、系统控制器(P89LPC932)以及Camera Link 接口电路(DS90CR287、DS90LV048/049)组成^[2]。

但在该电路系统中,CCD 采用单路输出,当使用 25 MHz 的像素输出频率时,最高帧频率只能接近 1 fps,不能满足某些场合的速度要求。此次研制任务中要求帧频率达到 3.4 fps,因此需要对所设计的电路系统进行改进。下一节将研究提高全帧型大面阵 CCD 帧频率的方法,并讨论提高 FTF5066M 帧频率的工程实现。

2 FTF5066M 的高帧频设计

FTF5066M 具有四象限对称结构^[1],4 个角各有一个输出放大器,每个象限的电荷转移方向可以独立控制,因此输出通道的数量和具体使用哪个或哪些输出放大器进行输出都可以灵活选择。要达到 3.4 fps 的帧频率,必须采用 4 路输出,且积分时间不能大于 40 ms,4 路输出时,需要对 FTF5066M 的驱动电路系统进行改进。

2.1 驱动时序的设计

当 FTF5066M 采用 4 路输出时,垂直行转移期间,CCD 图像区电荷同时向顶部和底部的水平输出寄存器转移,水平像素转移期间,两个水平输出寄存器的电荷同时向各自左右两边的输出放大器转移。所需的驱动时序如图 2 所示^[3]。

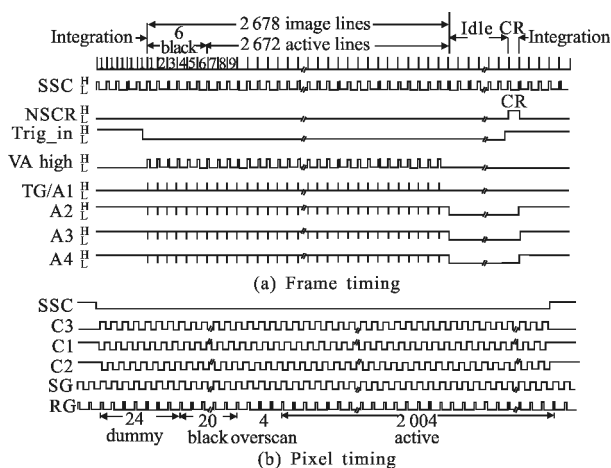


图 2 FT5066M 4 路输出时的转移驱动时序图

Fig.2 Timing diagram of FT5066M four outputs transfer drive

为了实现图2 所示的转移方式,需要在 CCD 各象限的垂直、水平转移时钟输入端接入合适相位的

驱动时钟,表 1 给出了各象限驱动时钟的接法,其中 A1~A4 及 C1~C3 的波形如图 2 所示。

表 1 4 路输出时各象限各时钟信号输入端信号表
Tab.1 Input signal table of each quadrant of the four output clock signal

	A1item	A2item	A3item	A4item	C1item	C2item	C3item
W _{quadrant}	A1	A2	A3	A4	C1	C2	C3
X _{quadrant}	A1	A2	A3	A4	C2	C1	C3
Y _{quadrant}	A1	A4	A3	A2	C2	C1	C3
Z _{quadrant}	A1	A4	A3	A2	C1	C2	C3

可见电荷转移方向的改变是通过对 A2 和 A4 及 C1 和 C2 的互换实现的。为了产生 4 路输出时的驱动时序,只需对 SAA8103 的相关寄存器进行重新配置,改变行转移和像素转移的次数以及图像行、场同步信号的波形,其他配置与单端输出时相同。

2.2 垂直驱动电路的改进

当采用 4 路输出时,需要 4 个高频三极管 BFR92 构成射随器对 CCD 的 4 路模拟信号进行输出。这 4 个三极管都由 TDA9991 提供的 20 V 电压 VSFD 供电,同时 CCD 片上的 4 个输出放大器也由 VSFD 供电,此外各种直流偏置电压也从 VSFD 分压得到,这就要求 VSFD 具有足够的电压驱动能力。

为了提高 VSFD 的电流驱动能力,设计了缓冲电路对 VSFD 进行缓冲。如图 3 所示,使用集成运放和功率三极管构成电压跟随器对 VSFD 进行放大,运放和三极管由 TDA9991 的 DC-DC 模块输出的 30 V 电压供电。

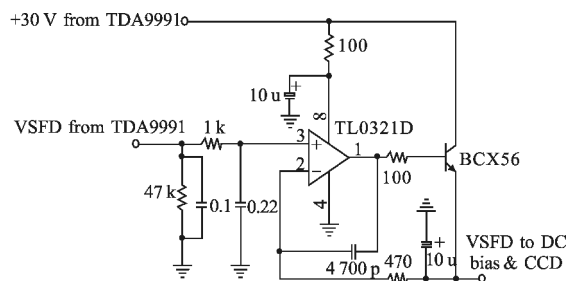


图 3 VSFD 缓冲电路

Fig.3 VSFD buffer circuit

该电路不仅能有效提高 VSFD 的电流驱动能力,而且能确保 CCD 的安全,因为电路输出端电压

始终跟随输入端变化,并不会改变原先的上电和去电顺序。

2.3 前端信号处理电路的改进

4 路输出时需要 4 片 TDA9965 构成并行通道对 CCD 输出的视频信号进行前端处理。4 片 TDA9965 并联,所需的时序信号由 SAA8103 产生,经过两级 74ACT04 转换为 4 路分配到各片。为了保持各路传输特性的一致性,进行 PCB 设计时应使各 TDA9965 输入端和 CCD 输出端之间的视频信号传输距离大致相同,时序信号到各 TDA9965 的传输延迟一致,同时各通道选用同一批次的元件。为了对每个通道的增益、带宽、箝位电平参数进行独立控制,4 片 TDA9965 通过 4 个独立的 3-Wire 总线接口接收配置数据。虽然系统控制器只设计了两个 3-Wire 总线接口,但时序发生器 SAA8103 本身具有 3 个 3-Wire 接口,因此刚好够用。TDA9991 和 2 片

TDA9965 的配置数据由系统控制器传送给 SAA8103 进行转发,另外 2 片 TDA9965 的配置数据由系统控制器直接发送^[4]。

2.4 输出接口电路的改进

CCD 采用 4 路输出时共产生 4×12 bit 的并行图像数据,Base 模式的 Camera-Link 接口已不能满足数据传输的要求,设计中采用 Medium 模式,只需在系统中增加一片 Channel Link 芯片 DS90CR287 即可,其时钟及同步信号输入端与系统原有的 DS90CR287 并联,同样要注意使二者的走线长度大致相等。

2.5 改进后的电路框图

经过上述改进后,所设计的大面阵 CCD 驱动电路系统能支持 CCD 从 4 个输出放大器同时输出信号电荷,其系统电路结构图如图 4 所示。

在该电路系统中,当使用 25 MHz 的像素时钟

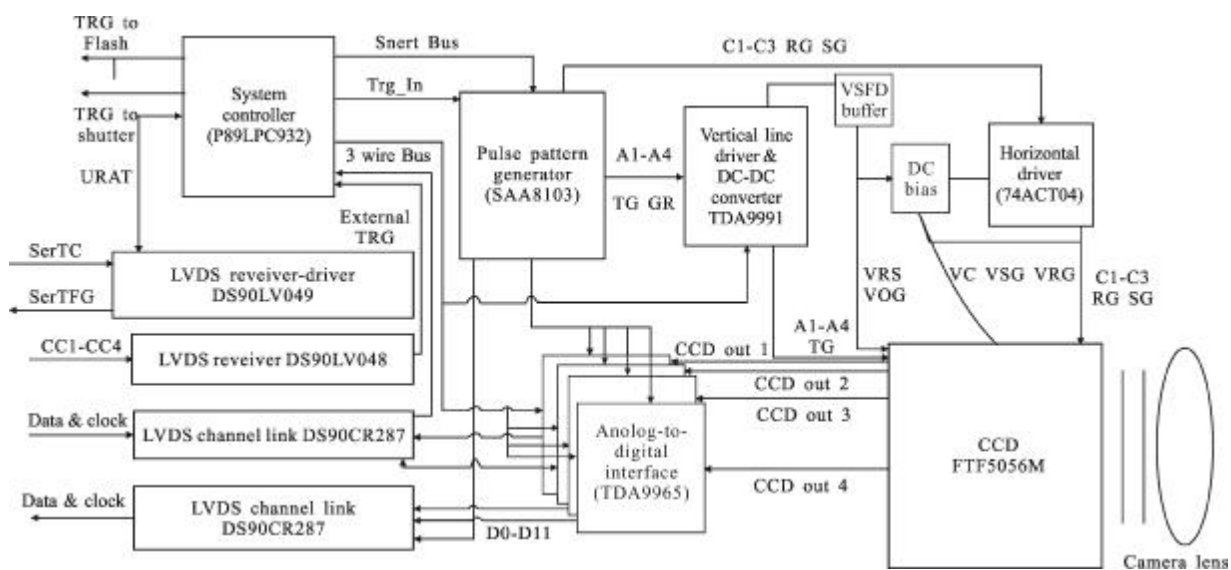


图 4 高帧频 FTF5066M 驱动电路系统结构图

Fig.4 Structure diagram of high frame rate FTF5066M drive circuit system

时,FTF5066M 转移输出一帧电荷所需的时间约为 293.1 ms,因此最高帧频率可达 3.4 fps,比单路输出时提高 2.5 倍,完全达到了设计目标。对实际电路系统进行了拍摄实验,获得了清晰的图像,每路输出图像的信噪比与单路输出时持平。但将每路图像在拼接成一幅完整图像后能明显地观察到图像由 4 块小图拼接而成,拼接处灰度的跳变比较明显,即出现了“接缝噪声”,如图 5 所示,该系统中全帧型面阵

CCDFTF5066M 采用 4 个象限同时输出,由于各象限驱动器件的驱动能力存在差异^[5],各象限输出的信号所采用的视频信号处理器件的参数并不完全相同,以及 CCD 视频信号的传输路径存在差异等,这些因素使 4 个象限的传输特性不可能完全一致,导致各象限输出图像之间存在响应非均匀性。为了把 4 个象限的图像校正为一致,必须对这些差别进行量化,这将在下一节进行详细介绍。

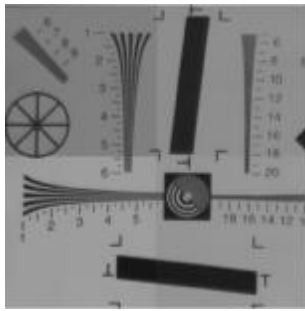


图 5 面阵 CCDFTF5066M 4 个象限输出图像的拼接图

Fig.5 Joining together of the 4 quadrant export images of area CCDFTF5066M

3 面阵 CCDFTF5066M 响应非均匀性的检测与校正

3.1 面阵 CCDFTF5066M 响应非均匀性检测系统

面阵 CCDFTF5066M 响应非均匀性检测系统是由积分球(Integrating sphere)、硅探测器(Silicon detector)、面阵 CCD(Array CCD)、CCD 图像采集(CCD image acquisition)、高速图像采集卡 (High-speed image acquisition card)和上位机(PC)几个部分组成,其结构框图如图 6 所示。

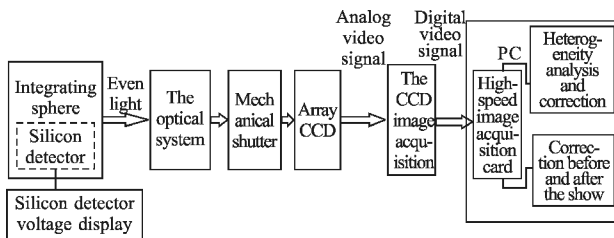


图 6 非均匀性检测系统的结构框图

Fig.6 Structural block diagram of non-uniformity detecting system

积分球由球体、照明灯组和硅探测器组成,它模拟在不同太阳天顶角和地物反射率的情况下,地面辐射照度和天空后向散射形成的总辐射照度。在积分球光源出口处输出为均匀光,通过调节积分球内灯的个数来控制出口处输出光源辐射照度的大小,用标定过的辐射照度计测积分球出光口处辐射照度,并与积分球内设置的硅探测器相比较,确定积分球内监控用的硅探测器输出电压与辐射照度之间的关系。在非均匀性检测过程中,可以用积分球内设置的硅探测器输出电压计算积分球光源出口处的辐射照度,检测时将面阵 CCD 及其后续处理电路放置在积分球出口处,使面阵 CCD 感光面

正对积分球出口。由于文中采用的全帧型面阵 CCD,所以在面阵 CCDFTF5066M 前端要加上机械快门,机械快门的曝光时间通过 CCD 的响应灵敏度来计算^[6],文中后面的实验均是在曝光时间为 1.4 ms 的条件下进行的。面阵 CCD 输出的模拟视频信号经过 CCD 图像采集部分转换为数字视频信号,数字视频信号通过高速图像采集卡传送到 PC 机上,由 PC 机测试软件完成非均匀性检测与校正,并对校正算法的性能进行分析。

3.2 面阵 CCDFTF5066M 4 个象限间的非均匀性检测与校正

非均匀性检测首先进行面阵 CCD 的标定,标定就是在积分球出口处输出多个不同等级辐射照度的均匀光,拍摄并存储多幅图像,测量面阵 CCD 的响应线性度,然后根据面阵 CCD 的响应线性度选择非均匀性校正方法。面阵 CCD 响应度可以由灵敏度和暗电流信号进行表征,可简单地表示为^[7]:

$$\overline{X(\varphi_k)} = A \cdot \varphi_k + \overline{C}, k=1 \dots m$$

式中: A 表示面阵 CCD 的灵敏度; φ_k 表示积分球出口处辐射照度; k 表示选取标定点的个数,这里选取 m 个标定; $\overline{X(\varphi_k)}$ 表示在辐射照度为 φ_k 时面阵 CCD 所有像元输出信号的平均值; \overline{C} 表示面阵 CCD 所有像元暗电流信号的平均值^[8]。

实验标定是在机械快门的曝光时间为 1.4 ms、视频信号处理的增益为 9 dB、偏置为 0 的条件下进行的,选取了 8 个标定,分别对面阵 CCDFTF5066M 的 4 个象限进行标定,标定结果如表 2 所示。

表 2 面阵 CCDFTF5066M 4 个象限的标定结果

Tab.2 Calibration result of the 4 quadrant of area CCDFTF5066M

Radiation intensity of illumination /W · m ⁻²	Image gray scale value/DN			
	UL	UL	LL	LR
0	2.47	4.314 59	1.238 75	1.36
0.079	7.457 57	9.457 22	5.803 75	6.6
0.290 8	19.65738	21.883 5	19.926 25	20.125
0.598 7	35.966 67	38.796 12	41.527 5	40.55
1.300 8	76.009 52	78.910 68	83.79	81.925
2.589 8	147.909 52	150.708 79	165.065	160.325
3.487 2	195.095 24	199.681 76	221.938 75	212.45
3.861 9	213.704 86	218.742 72	244.371 25	234.165

对标定结果进行拟合,得到的响应度曲线如图 7 所示。从图中可以看出,4 个象限的响应线性度都很好,线性拟合的可信度达到了 0.999 4,这说明面阵 CCDFTF5066M 的驱动电路工作正常。其中,纵坐标为图像灰度值,由于采集的数字图像表示为 8 位,所以图像灰度等级为 0~255,横坐标为辐射照度(W/m²)。

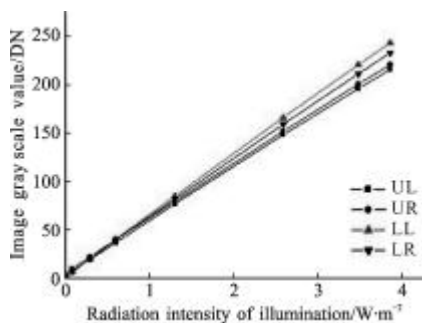


图 7 面阵 CCDFTF5066M 4 个象限的响应度曲线

Fig.7 Response curves of the 4 quadrant of area CCDFTF5066M

面阵 CCDFTF4052M 4 个象限的响应度曲线拟合公式为^[2,8,9]:

$$UL: \overline{X(\varphi_k)} = 54.263 \cdot \varphi_k + 2.367, k=1, 2, \dots, 8;$$

$$UR: \overline{X(\varphi_k)} = 54.056 \cdot \varphi_k + 6.765, k=1, 2, \dots, 8;$$

$$LL: \overline{X(\varphi_k)} = 63.674 \cdot \varphi_k + 2.563, k=1, 2, \dots, 8;$$

$$LR: \overline{X(\varphi_k)} = 61.004 \cdot \varphi_k + 3.479, k=1, 2, \dots, 8.$$

通过公式统计,4 个象限灵敏度的标准偏差达到了 3.653 5。显然,这样的标准偏差已经影响了 4 个象限响应度的一致性,文中采用的校正方法是将 UL、LL 和 LR 三个象限的响应度曲线向 UR 象限的曲线进行旋转和平移。UL、LL 和 LR 3 个象限需要更改的增益和偏置的理论计算值和实际值见表 3。

表 3 UL、LL 和 LR 象限增益和偏置的理论值和实际值

Tab.3 Theoretical value and actual value of UL, LL and LR quadrant gain and offset

Quadrant	Gain/dB		Bias/DN	
	Theoretical value	Actual value	Theoretical value	Actual value
UL	9.213	9.234	1.979	2
LL	7.983	8	3.079	3
LR	8.45	8.5	3.05	3

根据实际值校正后,分别对 UL、LL 和 LR 3 个象限再次标定,标定结果如表 4 所示。

表 4 校正后面阵 CCDFTF5066M 4 个象限的标定结果

Tab.4 Calibration result of the 4 quadrant of area CCDFTF5066M after correcting

Radiation intensity of illumination /W·m ⁻²	Image gray scale value/DN			
	UL	UL	LL	LR
0	4.435 2	4.114 55	3.216 75	4.293 26
0.067	9.636 54	9.449 35	8.364 03	9.225 7
0.287 6	22.034 06	21.843 6	20.769 5	20.976
0.586 9	40.097 5	40.096 23	39.922 17	40.234 5
1.298 1	80.024 72	80.010 57	79.262 47	80.342 5
2.499 8	153.050 02	152.007 21	152.014 83	152.016
3.5071 3	201.034 5	201.021 45	200.533 57	203.667 4
3.732 4	222.031 05	221.242 34	220.007 81	223.068 4

面阵 CCDFTF4052M 的响应度曲线拟合如图 8 所示。

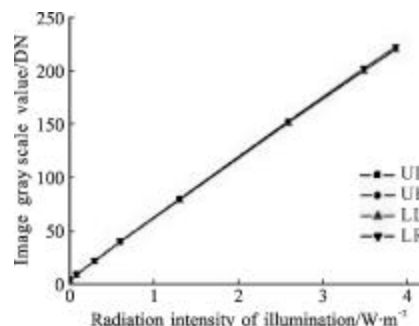


图 8 校正后面阵 CCD FT5066M4 个象限的响应度曲线

Fig.8 Response curves of the 4 quadrant of area CCDFTF5066M after correcting

对标定结果进行拟合,校正后面阵 CCDFTF4052M 4 个象限的响应度曲线拟合公式为:

$$UL: \overline{X(\varphi_k)} = 57.157 \cdot \varphi_k + 4.26, k=1, 2, \dots, 8;$$

$$UR: \overline{X(\varphi_k)} = 54.165 \cdot \varphi_k + 4.605, k=1, 2, \dots, 8;$$

$$LL: \overline{X(\varphi_k)} = 55.126 \cdot \varphi_k + 3.245, k=1, 2, \dots, 8;$$

$$LR: \overline{X(\varphi_k)} = 55.245 \cdot \varphi_k + 4.226, k=1, 2, \dots, 8.$$

通过公式统计,校正后 4 个象限灵敏度的标准偏差减小到 0.279 6,标准偏差降低到原来的 1/13 左右。同时,校正后对图 5 采集的分辨率标板图像进行

了重新拍摄,如图 9 所示,从图中可以看出,4 个象限的响应非均匀性得到了很好的改善。

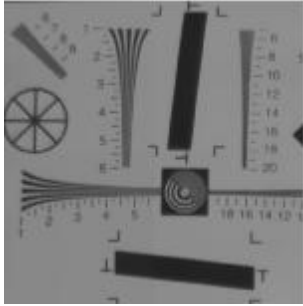


图 9 校正后 4 个象限输出图像的拼接图

Fig.9 Joining together of the 4 quadrant export images after correcting

4 结 论

文中首先给出了面阵 CCDFTF5066M 的基本驱动电路,研究了提高全帧型面阵 CCD 帧频率的一般方法,分析了各种方法的优缺点;采用 4 路并行输出技术将 FT5066M 的最高帧频率提高到了 3.4 fps,达到了设计要求,针对 4 路输出时系统中的垂直驱动器电流驱动能力不够的问题,设计了专用缓冲电路来提升电流驱动能力,在保证 CCD 安全上电和去电顺序的同时满足了驱动要求。对全帧型面阵 CCDFTF5066M 的非均匀性进行了分析,并建立了一种响应非均匀性检测系统。利用该系统分别对面阵 CCDFTF5066M 的 4 个象限之间的非均匀性和每个像元之间的非均匀性进行了检测,在 CCD 响应度为线性的基础上,提出了两点校正算法并对非均匀性进行了校正。通过校正 4 个象限响应灵敏度的标准偏差降低到原来的 1/13,面阵 CCDFTF5066M 的非均匀性得到了明显的改善。

参考文献:

- [1] FTF5066M 33M Full-Frame CCD Image Sensor Data Sheet. Canada: DALSA, 2008.
- [2] Li Guoning. Research on the image collection and compression technology based on the large area CCD [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [3] Liu Guanglin. Research on driver circuit and analog-front-end key technology based on high frame CCD[D]. Chengdu: Institute of Photoelectric Technology, Chinese Academy of Sciences, 2008: 2-138. (in Chinese)
- [4] Liu Guanglin, Yang Shihong, Wu Qinzhang. Design for high resolution CCD camera with high frame rate[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(5): 735-738. (in Chinese)
- [5] Liu Guanglin, Yang Shihong, Wu Qinzhang, et al. Design of high resolution camera system based on full frame CCDs[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2007, 24(3): 320-324. (in Chinese)
- [6] Liu Zexun, Quan Xianrong, Ren Jianwei, et al. Calibration of CCD camera's output non-uniformity linear corrected coefficient[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2211-2215. (in Chinese)
- [7] Milton A F, Barone F R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance[J]. Optical Engineering, 1985, 24(5): 855-862.
- [8] Liu Yanyan, Li Guoning, Zhang Yu, et al. Detection and record system of real time for static transfer function of the big visual field TDI CCD camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2515-2521. (in Chinese)
- [8] Zhang Yu, Wang Wenhua, Li Guoning, et al. Real time correction method of smear phenomenon based on interline transfer area CCD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1952-1958. (in Chinese)