光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021110402

多通道TDICCD卫星遥感相机图像噪声分析与处理

姜　健*，邹吉炜，陈茂胜，颜　龙，魏一鸣，房晓伟

（长光卫星技术有限公司，长春 130000）

摘　要： 为了解决多路时间延迟积分电荷耦合器件（TDICCD）拼接遥感相机成像的噪声问题，提高载荷焦面电箱的成像信噪比和成像质量，通过分析噪声现象，发现多路TDICCD成像噪声的主要原因有两个：一是多通道TDICCD未能实现同时刻开启成像，使得成像电路电源出现高频纹波噪声且多通道噪声相混叠，这样对各通道CCD模拟信号造成干扰；二是电路中的DC-DC电源开关噪声扰动影响了CCD有效视频信号的采集。从工程研制实际出发，采取CCD通道之间共用统一的系统时钟，相同系统复位等措施对多TDICCD成像电路系统进行改进，抑制通道间成像串扰的发生，通过对主要干扰源DC-DC电源进行滤波处理与TDICCD端多点接地等方式，抑制电源噪声对TDICCD成像的干扰。对改进后的多通道TDICCD成像电路系统进行成像和信噪比测试。实验结果表明，采取的措施有效地去除了TDICCD成像噪声，相机信噪比提高了2 dB，且外场成像质量高，可满足实际工程的需求。

关键词： TDICCD；共复位；信噪比；噪声抑制

中图分类号： TP391.41　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0389－06

Analysis and Suppression of Imaging Noise of Multi-TDICCD Remote Sensing Camera

JIANG Jian, ZOU Jiwei, CHEN Maosheng, YAN Long, WEI Yiming, FANG Xiaowei

(Chang Guang Satellite Technology Co. Ltd., Changchun 130000, CHN)

Abstract: In order to solve the problem of imaging noise of multi-channel time delay integrated charge coupled device (TDICCD) splicing remote sensing camera, and improve the signal-to-noise ratio (SNR) and imaging quality, two main reasons for the noise of multi-TDICCD imaging were analyzed. First, the unsynchronized operation of the CCD causes the ground plane high-frequency disturbance of the power supply of the TDICCD imaging circuit, which affects the acquisition of the effective video signal of the adjacent channel CCD. Secondly, the switching noise disturbance of DC-DC power supply in the circuit affects the acquisition of CCD effective video signal. Based on the practice of engineering development, the multi-TDICCD imaging circuit system is improved by taking measures such as sharing a unified system clock and the same system reset between CCD channels to suppress the imaging crosstalk between channels. The interference of power supply noise on multi CCD imaging is suppressed by filtering the main interference source of DC-DC power supply and multi-point grounding of TDICCD port. The imaging and signal-to-noise ratio of the improved multi-channel TDICCD imaging circuit system were tested. The results show that the measures remove the imaging noise effectively and significantly improve the SNR by 2 dB, and the excellent field imaging quality can meet the requirements of practical engineering.

Key words: TDICCD; common reset; SNR; noise suppression

收稿日期：2021－11－04.

*通信作者：姜　健　**E-mail:** jiang-18288@163.com

0 引言

时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)是通过多像元对同一目标进行延时积分累加电荷进行成像的图像传感器。TDICCD 多采用线阵输出模式,由于其使用多像元对同一目标成像并进行电荷累加,增加了电荷量,所以与常规 CCD 相比它具有更高的响应度,更宽的动态范围。TDICCD 能够在低光照的情况下实现较高信噪比的信号输出,可以极大限度地降低由于光照条件差带来的低信噪比影响。在卫星对地遥感成像领域,多利用 TDICCD 作为焦面电箱的成像传感器,以缩减相机相对孔径,实现卫星遥感载荷的轻量化。TDICCD 问世后,在工业、遥感成像与微光夜视等多领域均实现了对传统 CCD 的替代。

在航天遥感成像需求日益强烈的背景下,遥感卫星成像覆盖宽度成为衡量其性能的关键性参数。单片 TDICCD 由于生产工艺的限制无法做到增加横向像元数量来满足幅宽要求,目前普遍采用的方法为采用多通道 TDICCD 通过光学或机械拼接的方式组成焦面电箱,以拓展横向像元数量,满足大幅宽需求。当前,国际上的商业遥感卫星多采用这一技术,如 Worldview 系列、QuickBird-2 以及 GeoEyes 系列遥感卫星。

多通道 TDICCD 焦面电箱(后统称为焦面电箱)的电路噪声干扰是影响遥感相机成像质量的关键因素之一,该电路噪声干扰主要分为两种:第一种干扰来源于焦面电箱成像时 TDICCD 各通道之间的干扰,该干扰耦合到 TDICCD 输出的模拟信号上,使得输出的图像出现一定像元宽度的竖向干扰条纹;第二种干扰是焦面电箱的 DC-DC 电源模块开关噪声,该噪声叠加到 CCD 输出模拟信号上,使得图像上出现一定周期的细斜纹干扰。在焦面电箱电路设计时,需对以上两种干扰进行有效抑制,以降低噪声干扰,获得更高信噪比的图像,实现遥感相机的高质量成像。本文对多通道 TDICCD 遥感相机的成像噪声进行现象解析,探究噪声产生的根本原因,并针对不同噪声采取相应的抑制措施来消除这两种干扰对成像的影响,通过对多套焦面电箱进行成像测试,验证所提措施的有效性与通用性。

1 成像噪声分析

1.1 成像噪声现象

多通道 TDICCD 焦面电箱是由多路模拟电路与数字电路组成的复杂系统,系统框图如图 1 所示,其中包含六部分:电源模块、FPGA 模块、接口模块、驱动模块、视频处理模块以及 TDICCD。电源模块为各 TDICCD 通道共用模块,其余五部分各通道间均相互独立。在遥感相机对地成像时,焦面电箱内各通道的 FPGA 控制器输出相应时序的控制信号,信号通过驱动电路进行电平转换得到特定电平与时序的驱动信号,驱动信号驱动 TDICCD 完成光电转换并输出有效的模拟电信号。射随电路对模拟信号进行驱动能力增强并进行初步滤波。TDICCD 专用 CCD 视频处理器内部对模拟信号进行相关双采样、扣除暗电流噪声与模数转换处理,滤除模拟信号中的噪声干扰与 TDICCD 暗电流噪声并输出图像数字信号。FPGA 控制器对图像数据进行整理、组帧,通过高速数据传输器将图像数据发送给成像处理箱存储图像。

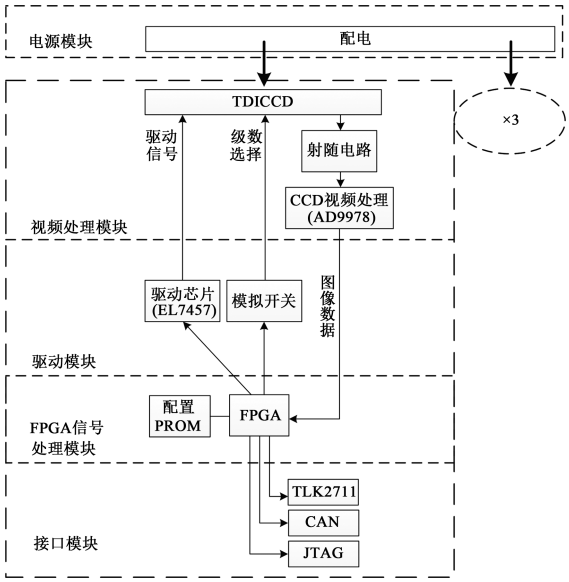


图 1 多通道 TDICCD 焦面电箱成像系统电路框图

本设计采用的多谱段 TDICCD 包含全色 P 谱段和多光谱 B 谱段(B 谱段包含 B1,B2,B3,B4 谱段,本文统称为 B 谱段),焦面电箱成像过程中同步输出 P 谱段与 B 谱段图像。工程研制中发现,在均匀光条件下,P 谱段和 B 谱段图像均存在两种干扰条纹,第一种干扰是一定像元宽度的竖向条带状噪声干扰,如图 2 所示。在单通道 TDICCD 上电成像时无该干扰,说明该干扰是多通道 TDICCD 同时成像时通道间串扰导致的。第二种干扰是在图像上存在一定周期的细斜纹,如图 3 所示。斜纹周期在 300～600 kHz 范围内,该频率与 DC-DC 电源模块

开关频率相关，初步确认该干扰由 DC-DC 电源开关噪声导致。分析焦面电箱成像噪声干扰现象与产生条件，能有效指导解决图像噪声干扰问题。

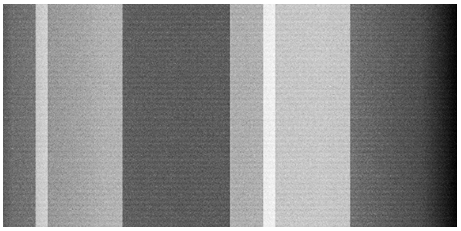


图 2　一定像元宽度的竖向条带噪声图像

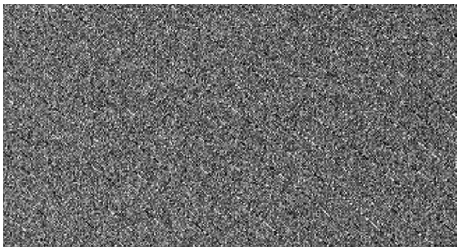
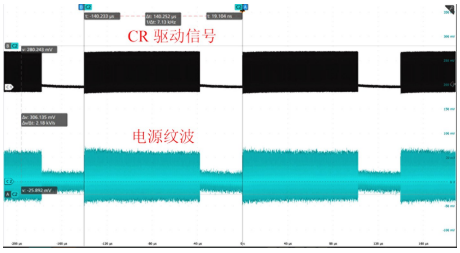


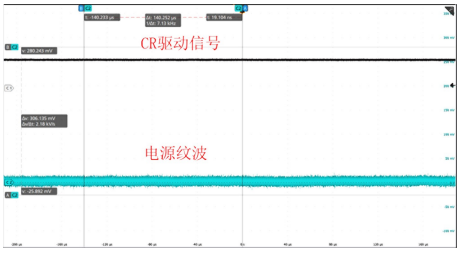
图 3　一定周期的细斜纹图像

1.2　成像串扰分析

第一种干扰噪声在 P 谱段与 B 谱段图像中现象一致，下面仅针对 P 谱段进行测试分析。焦面电箱单通道 TDICCD 上电成像时，单通道驱动电路持续输出驱动信号，电源模块需要提供较高的驱动功率，功率提高使得电源电压纹波增大。通过示波器检测，纹波提高时刻、周期、占空比与驱动信号完全相同，如图 4(a)所示，黑色曲线是 CR 驱动波形，蓝色曲线是电源纹波。焦面电箱停止拍照时，驱动信号停止输出，驱动功率导致的电源周期性高频纹波也停止，如图 4(b)所示。导致高频纹波产生的原因有两个：一是 TDICCD 的 CR 像素转移驱动信号在进行高频开关，使得电流高速变化(di/dt)，电路的回流路径会出现明显的交流压降，CR 驱动信号频率的提升，会使得交流压降增加；二是 CR 驱动信号的电压变化幅度大、频率高，且驱动负载是容性负载，所以驱动信号的开关时刻会出现瞬时的较大电流波动。因此，TDICCD 的驱动信号开关频率高、信号幅度大使得电压纹波增大。电源纹波扰动增大与 CR 驱动信号同步出现，这是单通道 TDICCD 上电时电源扰动情况。当多通道 TDICCD 同时上电且没有驱动同步功能的情况下，任意两个通道的 CR 驱动信号起始时刻不同，如图 5(a)所示。同时测试电源的纹波，电源高频纹波波形与 CR 信号并不是同相位同占空比，高频噪声不同，时间段强度也不相同，如图 5(b)所示。电源纹波的差异导致了图像上出现一定像元宽度的竖条带，如图 2 所示，所以通道间驱动信号不同步导致的间断性电源纹波加剧使得图像出现竖条纹。

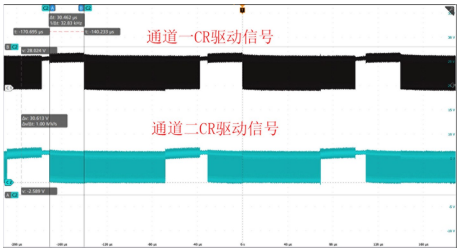


(a)　TDICCD 上电时

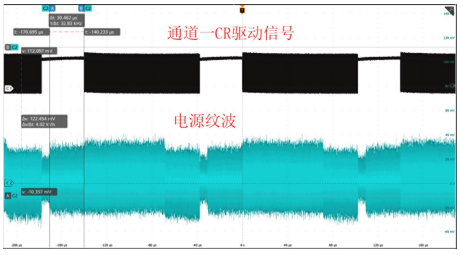


(b)　TDICCD 下电时

图 4　单通道 TDICCD 成像驱动信号与电源纹波



(a)　不同通道 CR 驱动信号



(b)　通道一 CR 驱动信号与电源纹波

图 5　多通道 TDICCD 成像驱动信号与电源纹波

第二种干扰现象在 P 谱段与 B 谱段图像中均存在，结合 P 谱段与 B 谱段图像串扰现象对串扰进行分析。B 谱图像中周期性细斜间距为 24 个像元，单个像元的时间为 128 ns，得出斜纹频率为 320 kHz，该频率与电源系统中某一 DC-DC 电源的开关频率相匹配。P 谱图像中周期性细斜纹间距为 25 个像元，单个像元的时间为 64 ns，得出斜纹频率为 625 kHz。图 6 所示为某一开关电源纹波图像，电源开关频率为 301 kHz，与 B 谱图像斜纹频率相

匹配。对比发现，300～600 kHz 范围内的斜纹频率可以与电源系统的 3 个 DC-DC 电源的开关频率相匹配。

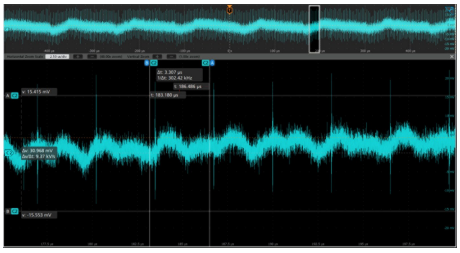


图 6 开关电源纹波图像

2 成像串扰抑制

第一种干扰噪声产生的原因是通道间驱动信号不同步，导致了间断性电源纹波加剧，使得图像出现竖条纹。为消除通道间成像串扰，有两种解决方案：一是完全切断各通道间的电源、地与信号连接，每个 TDICCD 通道需要完全独立（包括电源模块），但是在严格控制卫星载荷体积、质量与成本的前提下，该方案不合适；二是使通道间信号同步，消除 CR 驱动期间由于电源纹波差异导致的图像串扰。

多通道 TDICCD 焦面电箱驱动同步电路系统框图如图 7 所示。通道间采用统一的单端晶振作为时钟源实现时钟源同步，时钟信号通过时钟分配器连接到各通道的 FPGA 控制器，以实现各 CCD 同源工作。复位同步的信号使用多通道 TDICCD 的 FPGA 控制器中两个 FPGA 程序加载完成 DONE 信号作为信号源。两个信号分别通过各自的延时电路，两个延时电路通过调整阻容值，实现延时差异，延时后的两个复位信号连接到各通道 FPGA 控制器的复位引脚，两个复位信号在 FPGA 内部进行或

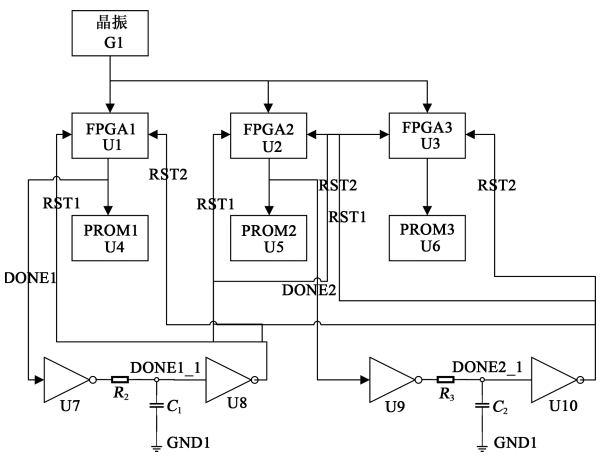
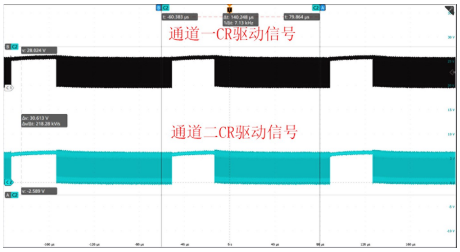
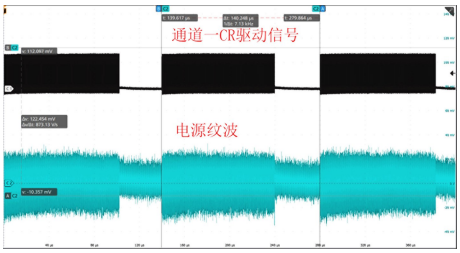


图 7 共时钟与共复位电路系统框图



（a） 不同通道 CR 驱动信号波形



（b） 通道一 CR 驱动信号波形与电源纹波

图 8 CR 驱动信号与电源纹波波形

运算后完成复位同步功能且进行复位备份。各 FPGA 内部运行逻辑完全相同，复位同步后各通道间驱动信号即实现同步输出。图 8(a)所示（黑色曲线是通道一的 CR 波形，蓝色曲线是通道二的 CR 波形）为改进后的驱动信号相位关系，图 8(b)所示（黑色曲线是 CR 波形，蓝色曲线是电源高频纹波）为改进后的 CR 驱动信号与电源纹波相位关系，实现了驱动信号同步与电源扰动均匀输出，消除了电源纹波强度差异导致的图像竖条带噪声干扰。

第二种干扰噪声是焦面电箱 DC-DC 电源开关噪声，通过比较斜纹频率确定干扰源涉及三个电源模块。电源模块后端接入 π 型滤波器，设计 π 型滤波器的带宽为 300 kHz 左右，频谱曲线如图 9 所示，对 300 kHz 以上的开关噪声进行抑制。加入 π 型滤波后电源的纹波如图 10 所示，开关噪声基本得到了抑制，图像斜纹噪声减轻，所以输出端开关噪声带来的差模干扰已经消除。测试开关电源的输入侧可以检测到较大的开关噪声，如图 11 所示，残余的斜纹噪声是由于一次侧电源开关噪声耦合到 TDICCD 成像的模拟地上带来的干扰。各通道 TDICCD 端

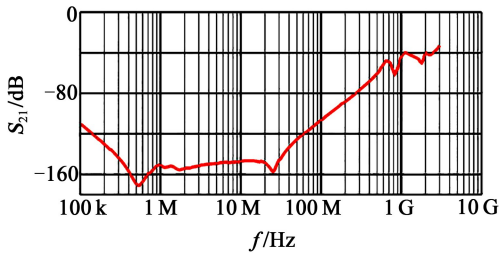


图 9 π 型滤波频谱相应曲线

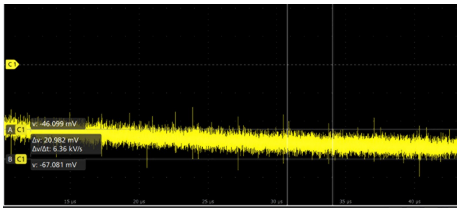


图 10　加入 π 型滤波后电源纹波

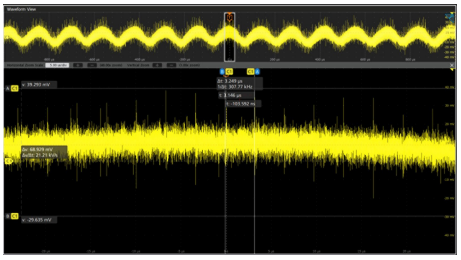


图 11　开关电源输入侧电源开关噪声

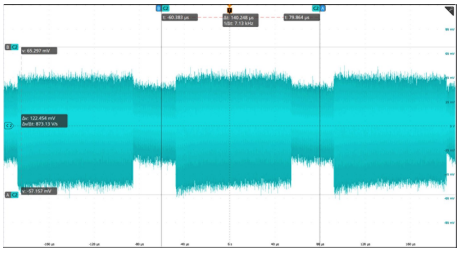


图 12　CCD 端模拟地噪声

电路板采用多点共地的方式，连接 TDICCD 端电路板的模拟地与焦面电箱屏蔽壳地。模拟地的干扰通过屏蔽壳地进行泄放。图 12 所示为模拟地噪声，电源开关噪声消除，图像斜纹噪声也消除。

3　实验结果

通过对多台多通道 TDICCD 焦面电箱进行辐射定标测试来验证两种干扰的抑制措施的有效性。

依据串扰的严重程度分步实施噪声抑制，并进行前后效果对比。实施第一种噪声抑制措施，在特定亮度的积分球光照下，对焦面电箱进行辐射定标试验。焦面电箱输出图像如图 13 所示，可以看出，图像竖向干扰条纹完全消除。

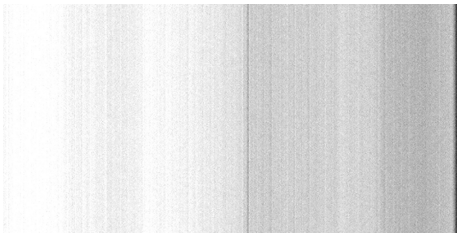


图 13　采用同步复位与共时钟成像效果

实施第二种噪声抑制措施，在暗场条件下对焦面电箱进行成像标定实验。如图 14 所示为采集图像的局部放大部分，可见细斜纹噪声已被抑制。如图 15 所示为噪声抑制前后某一列像元的灰度值曲线，暗场下噪声峰峰值由 60DN 值减小到 20DN 值以内，噪声得到了明显抑制。

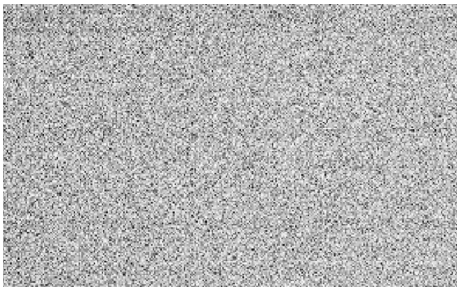


图 14　抑制电源干扰噪声后暗场成像图

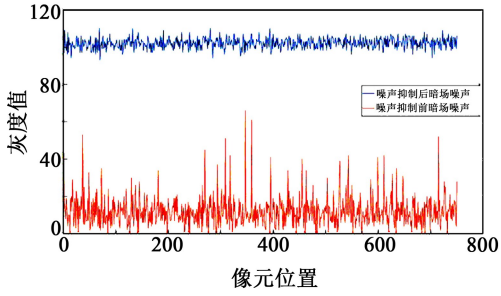


图 15　抑制电源干扰噪声前后图像噪声对比图

为验证噪声抑制措施的有效性和通用性，对三台焦面电箱改进前后的信噪比进行计算与统计。对比 P 谱与 B 谱的信噪比，如表 1 所示，可以看出，噪声抑制后信噪比得到了提升，三台焦面电箱一致性较好，证明该方案具有较好的普适性。

表 1　噪声抑制前后信噪比对比

参数	P 谱/dB	B1 谱/dB	B2 谱/dB	B3 谱/dB	B4 谱/dB
焦面电箱 1 改进前	39.30	43.04	45.81	43.94	46.07
焦面电箱 1 改后	41.25	45.34	47.56	45.97	48.25
焦面电箱 2 改前	39.63	43.44	45.71	43.78	46.14
焦面电箱 2 改后	41.34	45.54	47.81	45.87	48.23
焦面电箱 3 改前	39.43	43.23	45.62	43.65	46.12
焦面电箱 3 改后	41.56	45.56	47.47	45.98	48.32

4　结论

本文针对卫星遥感相机多通道 TDICCD 焦面电箱成像的噪声干扰问题，解析了各噪声干扰产生的机理。第一种干扰是多通道 TDICCD 同时成像驱动异步输出导致成像期间电源纹波不均匀，使图像产生竖向串扰条带；第二种干扰是电路中 DC-DC 电源开关噪声扰动耦合到 CCD 模拟视频信号上，使得图像出现一定周期的细斜纹噪声。针对干扰产生的本质，本文提出了两种抑制手段，一是各 TDICCD

通道间采用同一时钟源与复位信号,以保证通道间驱动同步,消除电源纹波差异;二是通过π型滤波与多点接地的方案抑制电源噪声。对多台多通道TDICCD焦面电箱进行辐射定标试验测试,试验结果表明,本文对噪声分析正确,抑制手段有效,焦面电箱成像信噪比明显提升。在同等实验条件下,P谱图像和B谱图像串扰抑制后信噪比均提高了2 dB,成像画面均匀,无串扰竖条带与斜纹噪声,成像质量得到极大提升。

参考文献:

[1] 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 Guixiang, Jin Guang, Zheng Liangliang, et al. Design of high-speed and multi-channel CCD image data processing and transmission system[J]. Chinese J. of Liquid Crystals and Display, 2011, 26(3): 397-403.

[2] 曲宏松,张 叶,金 光. 基于数字域TDI算法改进面阵CMOS图像传感器功能[J]. 光学精密工程,2010,18(8):1896-1903.
Qu Hongsong, Zhang Ye, Jin Guang. Improvement of performance for CMOS area image sensors by TDI algorithm in digital domain[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1896-1903.

[3] 陶淑苹,金 光,曲宏松,等. 实现空间高分辨成像的数字域时间延迟积分CMOS相机设计及分析[J]. 光学学报,2012,32(4):93-101.
Tao Shuping, Jin Guang, Qu Hongsong, et al. Design and analysis of CMOS camera based on time delay and integration in digital domain to realize spatial high-resolution imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 93-101.

[4] 任焕焕,阮 萍,何建伟,等. TDI-CCD空间立体相机辐射定标研究[J]. 光学学报,2010,30(12):3476-3480.
Ren Huanhuan, Ruan Ping, He Jianwei, et al. Study of the radiation calibration of TDI-CCD spatial stereo camera[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3476-3480.

[5] 邢 辉. 时间延迟积分CCD线阵方向的调整方法[J]. 光学学报,2013,33(9):172-177.
Xing Hui. Method of adjusting the line array direction of the time delay integration CCD[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 172-177.

[6] 鲍海明. 视频信号预处理电路设计缺陷分析[C]// 全国信息获取与处理学术会议,2011.
Bao Haiming. Design-defect analyse on pretreat circuit of video signal[C]// National Conf. on Information Acquisition and Processing, 2011.

[7] 石俊霞,郭永飞,司国良,等. 航天高速TDICCD相机视频信号采样技术[J]. 光电工程,2011,38(9):13-18.
Shi Junxia, Guo Yongfei, Si Guoliang, et al. Sampling technology on video signal of spaceborne high speed TDICCD camera[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(9): 13-18.

[8] 曲洪丰,王晓东,徐抒岩,等. 多TDI CCD拼接遥感相机异速成像抗干扰设计[J]. 红外与激光工程,2013,42(4):1026-1032.
Qu Hongfeng, Wang Xiaodong, Xu Shuyan, et al. Anti-jamming design for multi-velocity imaging mode of multiple TDI CCDs mosaic remote camera[J]. Infrared and Laser Engin., 2013, 42(4): 1026-1032.

[9] 张贵祥,郑亮亮,贺小军,等. 多TDICCD拼接遥感相机成像串扰分析与抑制[J]. 光学学报,2014,34(7):85-92.
Zhang Guixiang, Zheng Liangliang, He Xiaojun, et al. Imaging crosstalk analyzing and suppressing for multi-TDICCD mosaic remote sensing camera[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 85-92.

作者简介:

姜 健(1991—),男,吉林省辉南县人,硕士,助理工程师,主要从事TDICCD焦面电箱硬件的相关研究。