光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024071803

航天 TDICCD 相机谱间串扰分析与处理

曹金彦，贺小军*，陈茂胜，张　雷，钟　兴，于树海，白　芸，邹吉炜
（长光卫星技术股份有限公司，长春 130000）

摘　要： 为提高航天 TDICCD 遥感相机的信噪比和成像质量，针对 TDICCD 遥感相机成像谱段间相互串扰进行了深入研究。在高密 TDICCD 成像电路设计过程中，由于 PCB 电路板空间有限且布局布线密集，引发谱段间信号串扰。各谱段工作频率不同时，图像会出现明显的串扰条纹。文章首先根据信号处理流程介绍成像系统组成，阐述两类串扰现象；然后，分析串扰产生原因及边界条件，提出成像串扰抑制的方案；最后，对改进后的 TDICCD 成像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 成像谱间串扰条纹，相机信噪比得到了显著的提高，在相机辐亮度为 133.729 W/(m^2×Sr)的条件下，信噪比提高了 6.92 dB，达到 47.83 dB，满足工程需求。

关键词： 谱间串扰；信号隔离；串扰抑制；信噪比；成像系统
中图分类号： TN386.5　**文章编号：** 1001－5868(2024)06－0953－07

Spectral Crosstalk Analysis and Processing for Aerospace TDICCD Camera

CAO Jinyan, HE Xiaojun, CHEN Maosheng, ZHANG Lei,
ZHONG Xing, YU Shuhai, BAI Yun, ZOU Jiwei
(Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130000, CHN)

Abstract: To improve the signal-to-noise ratio and imaging quality of aerospace TDICCD remote sensing cameras, in-depth research was conducted on the crosstalk between the imaging spectral bands of TDICCD remote sensing cameras. In the design process of high-density TDICCD imaging circuits, owing to the limited space, dense layout, and wiring of PCB circuit boards, the isolation between signals is unsatisfactory, thus resulting in crosstalk between the spectral bands of the signals. This type of crosstalk significantly affects the acquisition of effective signals in various spectral bands. Under different operating frequencies of each spectral band, crosstalk stripes are generated in the image. This article first introduces the composition of an imaging system based on signal processing and describes two types of crosstalk phenomena. Subsequently, the causes of crosstalk and its boundary conditions are analyzed, and a solution for suppressing imaging crosstalk is provided. Finally, imaging and signal-to-noise ratio testing are conducted on an improved TDICCD imaging system. The experimental results show that the measures adopted effectively removed the crosstalk stripe between the TDICCD imaging spectral bands as well as significantly improved the camera signal-to-noise ratio. Under a camera radiance of 133.729 W/(m^2×Sr), the camera signal-to-noise ratio increased by 6.92 dB to 47.83 dB, thus satisfying the demands of practical engineering.

收稿日期：2024－07－18.
*通信作者：贺小军

Key words: spectral crosstalk; signal isolation; crosstalk suppression; signal to noise ratio; imaging system

0 引言

时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)是一种具有面阵结构、线阵输出的新型 CCD 图像传感器，其利用多行线阵感光阵列重复对同一目标进行多次曝光感应信号累加，从而在不影响像元输出速率和地面分辨率的情况下提高探测灵敏度和成像信噪比。空间对地遥感成像应用中利用 TDICCD 这一优点，采用相机孔径小的光学系统以实现较高的分辨率，从而实现空间遥感相机系统的高分辨率、轻小型化[1]。因此，在某些高图像质量的应用场景，TDICCD 仍然是首选探测器，并得到了广泛的应用。

随着空间对地遥感成像技术的发展，多光谱成像已经成为高性能空间遥感相机的基本要求，而大视场宽覆盖已经成为高性能空间遥感相机的重要技术指标要求。对于商业航天而言，在保证成像质量的同时，重量轻、体积小、成本低是卫星研制的关键技术指标。因此，在成像系统中，有限的焦面结构设计空间导致电路布局布线密集，进而使得 TDICCD 输出的模拟信号间隔离度变差。在全色和多光谱输出信号频率不同的情况下，二者之间存在的谱间串扰导致图像中存在串扰条纹。这种现象在调试阶段才会被发现，此时 PCB 已经加工完成，难以修改，重新设计又会增加产品的成本，使产品不能按期完成。在结构有限、工程进度紧张且不改变硬件结构设计的前提下，如何通过 FPGA 逻辑层面规避或减小串扰是亟待解决的问题。

针对工程实践中遇到的 TDICCD 遥感相机存在的谱间串扰问题，本文深入分析了 TDICCD 谱间串扰现象产生的根源，提出了相应的措施以抑制 CCD 谱间串扰，并通过实验验证了该措施的有效性。这种规避串扰的方式不会增加电路的设计和加工成本，既降低了硬件设计难度，又消除了图像中存在的串扰条纹，从而提高了图像的信噪比。

1 TDICCD 相机串扰分析

1.1 谱间串扰现象

图 1 为 TDICCD 成像系统图。它主要由光学镜头、CCD 传感器、时序发生器、驱动器、预放器、视频处理器等组成。光学镜头：将景物投影到 CCD 上；CCD 传感器：将投影图像转换为电压图像；时序发生器：产生 CCD 工作所需的时序脉冲；驱动器：放大时序脉冲功率，驱动大电容负载；预放器：阻抗匹配和放大以驱动传输线；视频处理器：降低噪声、减少频率混淆、执行 AD 转换(包括滤波器、CDS、后置放大器和 ADC)。

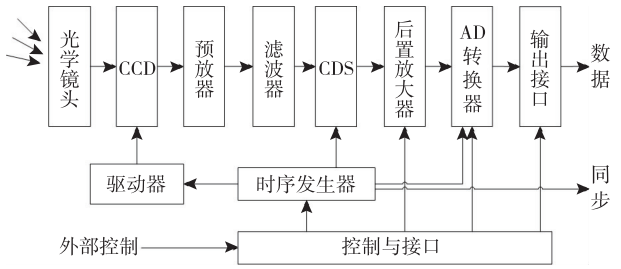


图 1 TDICCD 成像系统图

时序发生器是 CCD 工作的基础。设计前需要确定时序脉冲的数量，时间特性(即时序特性、脉冲宽度、上升沿下降沿的时间特性、时序间相位)，时序脉冲的电压特性，即每个脉冲的高低电平，时序脉冲的负载特性，即每个脉冲的电容负载。

TDICCD 焦面驱动拓扑结构如图 2 所示：通过 FPGA 控制器向时序发生器输出 TDICCD 工作所需要的垂直转移、水平转移、复位、级数等驱动控制信号，通过时序发生器将所有工作时序输出给驱动芯片，再通过钳位电路控制驱动电平值，最后向 CCD 输出满足需求的各个驱动时序信号。

系统中使用的芯片共有五个谱段，为了实现高行频，其全色和四个多光谱的驱动工作频率都较高，因此相邻信号线的串扰也比较严重，为了提高系统的电磁兼容性和信号完整性，在硬件设计之初，设计高速 PCB 电路时需要注意以下几个方面的处理：1)将驱动信号做等长处理，以便控制驱动信号间的相位；2)阻抗匹配，避免较大的电容和电感；3)加大平行线之间的间隔，并加入地线屏蔽，减少对周围信号的干扰。

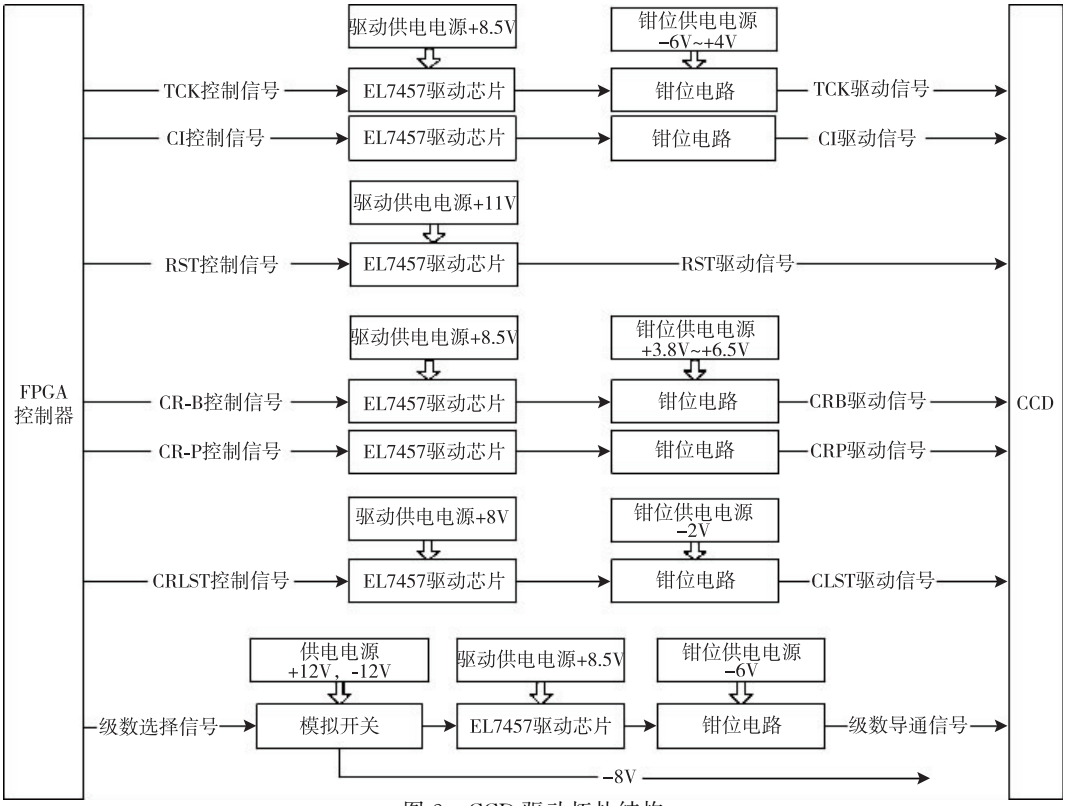


图 2　CCD 驱动拓扑结构

但是在实际工程研制焦面辐射定标实验测试阶段发现，全色谱段存在两种串扰条纹。第一种串扰是在全色图像中存在规律的竖向明暗条纹，如图 3 所示。针对该现象做了相关测试分析，在一定光强范围的均匀光条件下，当相机有且只有全色谱段上电成像时，采集到的图像十分均匀，未见异常条纹，当相机多光谱同时上电成像时，采集的全色图像出现周期规则条纹如图 3 所示，反之，在多光谱图像中未发现规则的条纹，这说明多光谱对全色谱段成像形成了串扰。第二种串扰是全色谱段在靠近图像边缘存在规律的 4-1 横纹，如图 4 所示。同样，针对该现象做了相关测试分析，当只有全色上电成像时，图像中无该串扰条纹，说明该串扰条纹同样是多光谱对全色谱段成像形成的串扰。针对以上两种串扰条纹，分别改变积分球亮度等级以及积分级数增益等参数后发现，这种暗（亮）线会随着光强以及工况的变化而变化，并且在后期图像处理中无法进行消除。为此，对产生这两种串扰的所有可能性进行了逐一排查，最终发现是相机的各谱段输出模拟信号频率不同，多光谱信号较强，且使用频率较全色低，对全色输出模拟信号产生了干扰。因此，针对 TDICCD 多谱段成像串扰产生的机理进行分析，并为工程优化提供指导性意见[2]。

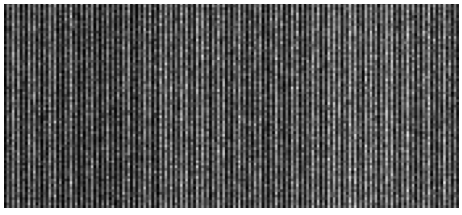


图 3　明暗竖向条纹串扰图像

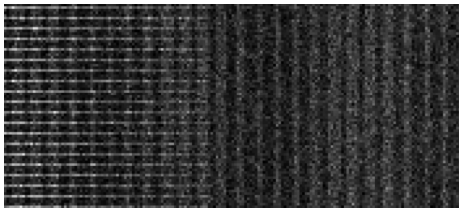


图 4　4-1 规则横向条纹串扰图像

1.2　谱间串扰产生原因

由于 TDICCD 内部构造设计的原因，CCD 内各个转移驱动电极之间的间隔很小。根据电磁干扰的相关理论，当 CCD 是由多个谱段构成时，且在电路比较密集的情况下，不同谱段间驱动信号就会存在相互串扰，导致光生电荷在转移时受到影响。在各谱段驱动频率相同的情况下，这种串扰不会引起图像产生明显的串扰条纹，当驱动频率不同时，图像即

产生串扰条纹。在实际工程应用中,全色谱段和多光谱垂直驱动频率为 4∶1,输出的水平模拟信号频率为 2∶1。垂直转移驱动信号的相互干扰反映在图像上,全色谱图像存在规律的 4-1 横向条纹;水平模拟信号的相互干扰反映在图像上,全色谱图像存在规律的明暗竖向条纹。

把多光谱垂直转移驱动信号看成是噪声源,而全色垂直转移驱动信号作为敏感端。通常,解决串扰问题需要从以下三个方面进行分析:降低噪声源的噪声、对敏感端进行屏蔽以及对串扰路径进行优化隔离[3]。由于 CCD 内部电路结构以及对信号能量要求等原因,前两种方法在实际工程中很难实现。因此,需要采取对串扰路径进行优化隔离的方法来减少噪声。由于在测试阶段,硬件已经完成设计与投产,在硬件层面更改电路也很难避免不会引起新的串扰,另外,根据试验测试,全色图像串扰的频率和位置与多光谱驱动信号的频率以及位置完全相关。所以,减小图像的串扰可以通过 FPGA 调整全色和多光谱输出驱动信号之间的相位关系来达到优化信号隔离的目的。

1.3 串扰因素边界条件分析

为设计合适的全色和多光谱驱动信号之间的相位关系,需要对其边界条件进行分析:

首先,从工作模式的选择角度分析。在 CCD 的成像过程中,根据不同的工作方式,CCD 的垂直转移驱动时序可分为突发转移模式和连续转移模式。在连续转移模式中,CCD 的垂直转移工作时序与水平转移工作时序就会有重叠,即垂直转移的上升/下降沿就会落在 CCD 的水平转移时序内。这种垂直转移驱动信号的上升/下降沿突变,对于正常的水平转移驱动信号会产生串扰[4]。在信号波形上的现象就是水平转移信号上有毛刺,从而导致图像上出现暗(亮)线。而且这种暗(亮)线会随着 CCD 的积分时间变化而变化,在后期图像处理中无法进行消除。因此,在本设计中采用的是突发转移模式,并且垂直转移时序和水平转移时序之间应保持至少 1 μs 的时间间隔,同时全色和多光谱垂直转移信号之间避开起始上升沿同步。

其次,从实际应用以及 CCD 工作原理角度分析。根据实际应用中全色和多光谱的行转移时间对应关系,每四行全色转移电荷完成,对应一行多光谱转移完成,选用多光谱 2×2 Binning 的模式。

为尽可能减少行转移时间,在水平转移时序频率确定的情况下,需要尽可能的减小垂直转移时间,同时缩短中间的保持时间。但是,在电荷转移的末期主要依据电子热能的热扩散和相邻电势差产生的边缘场漂移来驱动[5]。这种转移需要一定的时间,若驱动信号的上升沿和下降沿过短,会导致转移效率下降,因此垂直转移时间不能过短。

当全色和多光谱同时进行垂直转移时,实际的信号可以看成是两个不同频率信号的叠加。由于多光谱的行频是全色的 1/4,因此每相隔 4 行,多光谱的垂直转移时序都会作为噪声源,对全色干扰很大,在图像上就形成以 4 行为周期的横向条纹[6]。

另外,当多光谱采用 2×2 Binning 的工作模式时,全色和多光谱输出的水平模拟信号频率为 2∶1 的关系。当全色和多光谱同时输出水平模拟信号时,实际的信号同样可以看成是两个不同频率信号的叠加。对于多光谱而言,全色对其每个像元的干扰程度一致,不会导致多光谱像元间响应存在差异,因此,在多光谱图像中不会存在明显的串扰条纹;而对于全色谱段而言,全色谱段每间隔一个像元受到多光谱像元信号的干扰,使之信号变强,而未受到干扰的像元信号相对较弱,因此导致全色图像像元间响应存在差异,图像中即存在规律的明暗条纹。

综合以上分析,在工程应用中,要设计合适的驱动信号相位关系以规避图像串扰问题。本文提出了一种通过调整各谱段垂直转移信号间相位关系以及水平信号间相位关系来规避谱间串扰的方法,通过实验验证了该方法的有效性。

2 成像系统谱间串扰抑制

2.1 驱动时序产生和逻辑控制

为使 TDICCD 完成正常的扫描成像工作,即电荷的积分、转移和读出等,施加在 TDICCD 各个引脚上的时钟脉冲应保持严格的时间和相位关系。TDICCD 的时序控制比普通线阵 CCD 的时序要复杂些,不仅包括水平移位驱动时钟、复位时钟、行转移时钟,而且还提供 TDI 方向的移位驱动时钟和级数控制信号,这些信号都由时序发生器产生,经过时序驱动后供 TDICCD 工作;驱动时序分别包括全色和多光谱的水平转移信号、垂直转移信号,多光谱 Binning 使能信号 CR_Lst 以及复位信号[7]。在实际应用中,为了匹配全色和多光谱数据率,将全色和多光谱的水平转移时序设置为相同频率,多光谱模拟域 Binning 使能信号 CR_Lst 频率设置为全色水

平时钟频率的一半，以确保输出的水平模拟信号全色为多光谱频率的 2 倍；将全色垂直转移时序的频率设置为多光谱的 4 倍，其中全色的垂直转移时序频率与行频一致。驱动时序如图 5 所示。

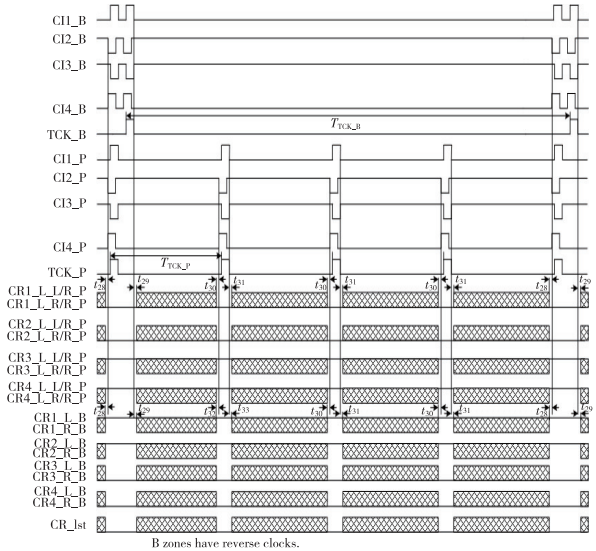


图 5　P 谱段和 B 谱段时序图

2.2　成像串扰抑制

多光谱和全色输出的水平模拟信号频率关系为 1∶2，当输出水平模拟信号时，多光谱在竖向上对全色每隔 1 列像元产生一个竖向干扰，全色图像呈现明暗竖向条纹，而全色水平模拟信号对多光谱图像的每一列水平模拟信号干扰程度相同，因此多光谱图像不存在明显的干扰条纹。

为抑制多光谱输出水平模拟信号对全色信号的干扰，尽量优化全色和多光谱水平模拟输出信号之间的隔离度。通过调整全色和多光谱水平转移信号起始跳变沿之间的相位 t_{pb}，如图 6 所示。确保多光谱最终输出的模拟信号采样时刻不在全色采样时刻，以避免多光谱信号对全色信号采集能量的影响。最后输出的驱动信号如图 6 所示。

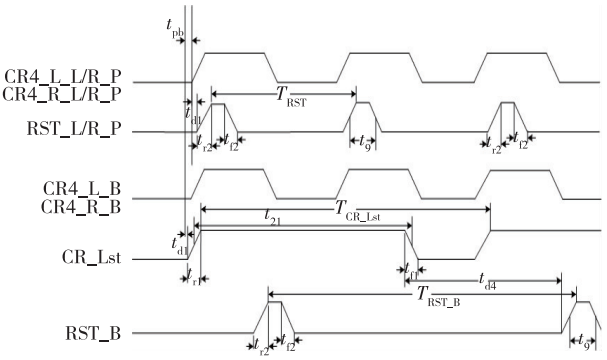


图 6　水平转移时序相位关系图

多光谱和全色输出的垂直转移信号频率关系为 1∶4，在垂直信号转移过程中，多光谱在行向上对全色每隔 4 行产生一个行向干扰，全色图像呈现 4 行为一周期的横纹，而全色垂直转移信号对多光谱图像的每一行垂直转移信号干扰程度相同，因此多光谱图像不存在明显的亮暗差异。

为抑制多光谱信号在垂直方向上对全色信号的干扰，尽量优化全色和多光谱垂直转移信号之间的隔离度。通过调整全色和多光谱垂直转移信号起始跳变沿之间的相位，如图 7 所示，即调整 CI_B 的起始跳变沿与 CI_P 起始跳变沿时间差 t_1，以减弱两信号之间的相互干扰。在满足垂直转移和水平转移时间间隔的前提下，可以微秒级的步长调整全色和多光谱垂直转移信号之间的相位，直到最后的串扰值最低，最后输出的驱动信号如图 7 所示。

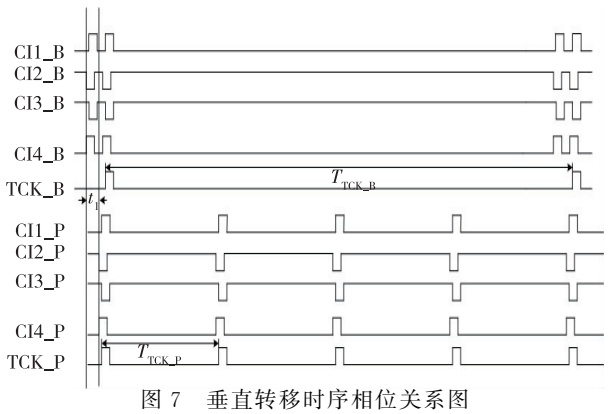


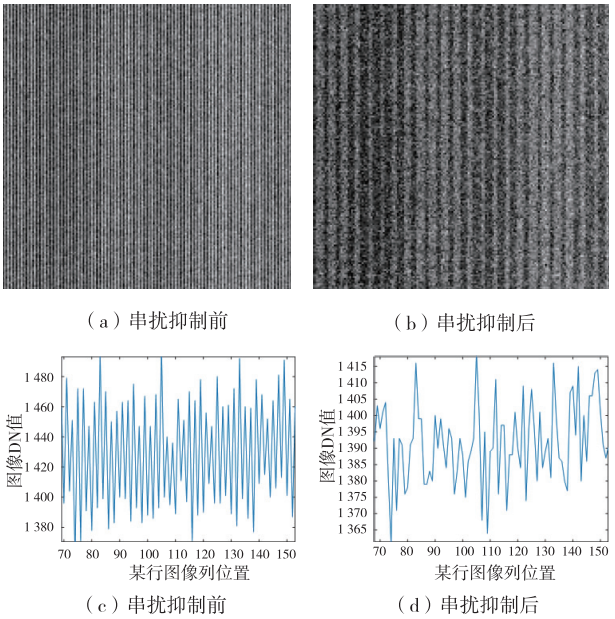
图 7　垂直转移时序相位关系图

3　实验结果与分析

为验证所采取的成像串扰抑制措施的有效性，利用积分球均匀光源对某 TDICCD 遥感相机成像串扰抑制前后分别进行成像标定实验。在某一均匀光辐亮度下，对相机成像水平输出信号串扰抑制前后进行成像标定实验，所采集到的均匀光全色图像如图 8 所示。在相机的 TDICCD 全色和多光谱水平输出信号相位未调整前，全色图像竖向明暗条纹明显，如图 8(a)所示，而成像串扰抑制后图像竖向明暗条纹消失，如图 8(b)所示，图像灰度值列间标准差噪声仅有 7.25。图 9 为在某一均匀光辐亮度下，对相机成像垂直驱动信号串扰抑制前后进行成像标定实验所采集到的均匀光全色图像。在相机的 TDICCD 全色和多光谱垂直转移时序相位未调整前，全色图像横向条纹明显，如图 9(a)所示，而成像串扰抑制后图像横向条纹消失，如图 9(b)所示，图

像灰度值标准差噪声仅有 6.85。对于去除串扰的图像仍残留的固定竖向规则 7-1 条纹，是因 TDICCD 制造工艺所产生的固定噪声，该固定噪声不随时间、空间、工况以及辐亮度的变化而变化，其属性表现为线性，可通过相对辐射校正的方式去除[8]，校正效果图如图 10 所示。为了对该设计进一步测试验证，对焦面进行外场成像实验，如图 11 所示，两种串扰条纹均得到有效抑制。

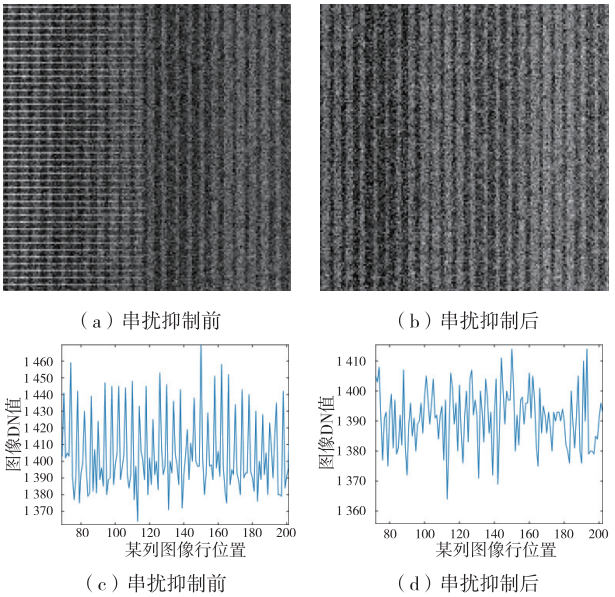
为进一步验证相机信噪比(SNR)在串扰抑制后有所改善，对相机信噪比进行进一步测试，整个实验在暗室内进行。用积分球光源充满相机的入瞳和视



(a) 串扰抑制前　(b) 串扰抑制后

(c) 串扰抑制前　(d) 串扰抑制后

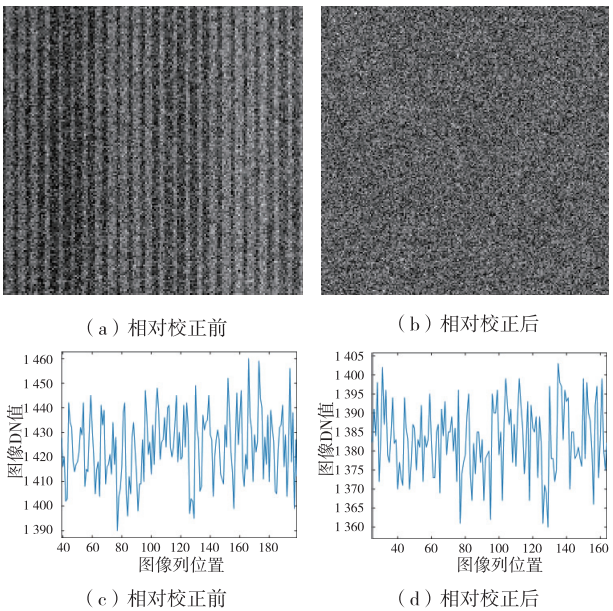
图 8　水平串扰抑制试验



(a) 串扰抑制前　(b) 串扰抑制后

(c) 串扰抑制前　(d) 串扰抑制后

图 9　垂直串扰抑制试验



(a) 相对校正前　(b) 相对校正后

(c) 相对校正前　(d) 相对校正后

图 10　相对校正前后对比图



图 11　外场成像图

场，从低到高调整积分球输出的辐亮度，相机在一定行频和积分级数下分别采集相应辐亮度的图像，然后通过灰度统计计算出相机信噪比。具体计算方法是：$SNR=20\lg(u/s)$，这里 u 为灰度图像均值，s 为灰度图像标准差。计算结果如表 1、表 2 所示，通过表 1 中数据结果对比可知，水平信号串扰抑制前后相机信噪比得到了显著的提高。在辐亮度为 133.729，工况积分级数为 48 级，2 倍增益下，信噪比达到了 46.26 dB，在同等实验条件下，比串扰抑制前的信噪比提高了 5.35 dB；通过表 2 中数据结果对比可知，垂直信号串扰抑制前后相机信噪比同样

表 1　水平信号串扰抑制前后对比

等效辐亮度 $W/(m^2\times Sr)$	串扰抑制前			串扰抑制后		
	均值	标准差	信噪比/dB	均值	标准差	信噪比/dB
133.73	2 582.24	23.25	40.91	2 502.12	12.17	46.26
91.58	1 804.13	20.62	38.84	1 739.65	10.63	44.28
53.88	1 038.23	17.65	35.39	992.89	7.25	42.73
37.67	793.67	17.30	33.23	705.26	8.08	38.82
20.97	502.89	15.07	30.47	489.54	7.68	36.09
12.37	247.92	8.62	29.18	222.18	4.76	33.38

表 2　垂直信号串扰抑制前后对比

等效辐亮度 $W/(m^2\times Sr)$	串扰抑制前			串扰抑制后		
	均值	标准差	信噪比/dB	均值	标准差	信噪比/dB
133.73	2 502.12	12.17	46.26	2 489.22	10.11	47.83
91.58	1 739.65	10.63	44.28	1 730.19	9.40	45.30
53.88	992.89	7.25	42.73	984.46	6.85	43.15
37.67	705.26	8.08	38.82	681.97	7.63	39.02
20.97	489.54	7.68	36.09	462.38	6.00	37.73
12.37	222.18	4.76	33.38	200.57	3.35	35.54

有所提高。在辐亮度为 133.729，工况积分级数为 48 级，2 倍增益下，信噪比达到了 47.83 dB，在同等实验条件下，比串扰抑制前的信噪比提高了 1.57 dB。因此从定量化分析，该串扰抑制方案使图像信噪比有明显提高。

4　结论

针对 TDICCD 遥感相机 CCD 内存在谱间串扰的问题，分析了串扰产生的原因。CCD 全色谱和多光谱之间存在谱间串扰根本原因：在高密电路中，CCD 的多输出模拟信号的谱段间隔离度很难达到要求，当全色和多光谱的输出模拟信号频率不同时，造成高频信号扰动的加性叠加，从而影响有效模拟信号电平的采集。从工程实际出发，要做到硬件上完全隔离是不现实的，因此从控制驱动信号的相位角度出发，调整两个谱段间的时序信号相位，优化隔离串扰信号，对谱间串扰进行抑制，从而消除全色图像中存在的串扰条纹。利用积分球均匀光源对某 TDICCD 遥感相机串扰抑制前后进行成像实验和信噪比测试。实验结果表明，所提出的措施能有效抑制 CCD 谱间串扰的发生，相机信噪比得到了显著提高，在同等实验条件下，成像串扰抑制后相机信噪比提高了 6.92 dB，达到 47.83 dB，且图像上无明显串扰条纹，具有较高的成像质量。

参考文献：

[1] 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)：711003.
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)：711003.

[2] 姜　健，邹吉炜，陈茂胜，等. 多通道 TDICCD 卫星遥感相机图像噪声分析与处理[J]. 半导体光电，2022，43(2)：389-394.
Jiang Jian，Zou Jiwei，Chen Maosheng，et al. Analysis and suppression of imaging noise of multi-TDICCD remote sensing camera[J]. Semiconductor Optoelectronics，2022，43(2)：389-394.

[3] 亓凤杰. 激光干扰行间转移 CCD 串扰现象研究[J]. 半导体光电，2014，35(1)：23-25.
Qi Fengjie. Study on cross-talk of laser jamming on interline transfer CCD[J]. Semiconductor Optoelectronics，2014，35(1)：23-25.

[4] 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.
Zhang Guixiang，Jin Guang，Zheng Liangliang，et al. Design of high-speed and multi-channel CCD image data processing and transmission system[J]. Chinese Joumal of Liquid Crystals and Display，2011，26(3)：397.

[5] 申才立，梁　楠，李　鑫，等. CCD 连续转移下图像串扰问题的研究[J]. 航天返回与遥感，2019，40(5)：50-57.
Shen Caili，Liang Nan，Li Xin，et al. Research on image crosstalk in CCD sequential transfer mode[J]. Space Return and Remote Sensing，2019，40(5)：50-57.

[6] 李　强，樊　奔，陈　希. 一种基于多线阵集成 TDICCD 的低轨成像驱动方法[J]. 航天返回与遥感，2016，37(1)：32-40.
Li Qiang，Fan Ben，Chen Xi. Driving method of low earth orbit imaging based on multi-linear TDICCD[J]. Space Return and Remote Sensing，2016，37(1)：32-40.

[7] 刘　燕，高　伟，陈楚君，等. 基于 FPGA 的 TDI-CCD 时序电路设计[J]. 现代电子技术，2010，33(4)：180-182.
Liu Yan，Gao Wei，Chen Chujun，et al. Design of TDI-CCD driving circuit based on FPGA[J]. Modern Electronic Technology，2010，33(4)：180-182.

[8] 岳俊华，李　岩，武学颖，等. 多 TDI-CCD 拼接相机成像非均匀性的校正[J]. 光学精密工程，2009，17(12)：3084-3088.
Yue Junhua，Li Yan，Wu Xueying，et al. Correction of imaging non-uniformity for multi-TDICCD mosaic camera[J]. Optics and Precision Engineering，2009，17(12)：3084-3088.

作者简介：

曹金彦(1986—)，女，吉林长春人，硕士，高级工程师，主要从事航天相机焦面传感器方面的研究；

贺小军(1983—)，男，四川省广安市人，博士，研究员，主要从事光学卫星总体设计、光电成像技术的研究。