

文章编号:1007-1180(2010)10-0032-07

# 侧摆成像下多片 TDICCD 拼接相机分段 异速研究

郭永飞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 针对多片 TDICCD 拼接相机, 为提高其在侧摆成像时的成像质量, 减少系统设计难度, 提出了不同成像加载参数时的行频调整模式。推导出相机侧摆时拼接 TDICCD 各像元的行频求解公式, 建立侧摆角度与行频的关系式。以调制传递函数 (MTF) 作为评价相机成像质量的指标, 详细分析在侧摆成像时对不同积分级数的分段异速调整方式。结果表明, 侧摆成像时为满足系统对传递函数下降不超过 5% 的要求, 侧摆角度越大, 积分级数越高, 行频调整越复杂, 反之越简单。在积分级数不超过 64 级、侧摆角度不超过  $40^\circ$  时, 工作方式可以简化为按照相邻两片 TDICCD 同一行频工作, 该结论对实际工程应用和设计具有指导作用。

**关键词:** TDICCD; 侧摆; 行频; 调制传递函数; 拼接相机; 分段异速

**中图分类号:** V443.5; V474.2

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI 20102710.0032

## Research on Subsection Image Motion Mismatching for Multi-TDICCD Mosaic Camera of Scroll Imaging

GUO Yong-fei

*(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

**Abstract:** In order to improve the image quality of the multi-TDICCD mosaic camera at scroll imaging and reduce the design difficulty, the adjusting pattern of row frequency is proposed according to different loading parameters. The expression of the row frequency of every pixel is deduced when the mosaic TDICCD is scroll imaging. Relationship between scroll angle and row frequency is established. On the basis of this, MTF is used to evaluate the image quality in this paper. The adjusting pattern of subsection motion mismatching due to number of stages at scroll imaging working mode is analyzed in detail. The results show that, in order to fulfill the descending of MTF less than

5% which meeting the need of the system, the bigger the scroll angle and the integral number of the TDICCD are, the more complex the adjusting pattern of row frequency is. Contrarily, the easier the adjusting pattern of row frequency is. When the integral number of the camera is not more than 64, the scroll angle is not more than  $40^\circ$ , the working pattern can be simplified to every two pieces TDICCD work at the same row frequency. The conclusion will be useful to engineering application and designing reference.

**Keywords:** TDICCD; scroll; row frequency; MTF; mosaic camera; subsection motion mismatch

## 1 引言

随着光学技术和电子技术的飞速发展, 遥感相机也向着更高分辨率和更大覆盖宽度的方向发展。考虑 TDICCD 器件的制造工艺以及性价比, 受材料和制造工艺水平的限制, 目前现有的 TDICCD 成像器件难以同时满足大视场和高分辨率的综合指标要求。现在的遥感相机采用多片 TDICCD 拼接的方式<sup>[1-2]</sup>, 以满足高分辨率和大视场角的要求。同时, 相机对地观测时, 为了进一步扩大观测范围, 通常采用侧摆成像的方式, 在这种工作模式下, 感光介质在曝光时与被摄物体的影像将存在相对运动, 发生像移失配, 从而导致 TDICCD 相机传递函数下降, 图像变模糊<sup>[3]</sup>。

本文在介绍 TDICCD 的工作原理的基础上, 主要分析了由于相机侧摆带来的行频不一致的问题, 针对拼接相机提出在保证传递函数下降不超过 5% 的分段异速解决方案, 灵活的分段异速方案不仅能够减轻相机控制器在计算侧摆成像时像移速度的计算<sup>[4-6]</sup>压力, 而且能减轻图像处理单元多行频带来的数据整合问题, 对于提高相机侧摆成像图像质量有指导性的意义。

## 2 TDICCD 工作原理

以典型的 IT 型 TDICCD 为例, 它是一种面阵结构、线阵输出的新型 CCD<sup>[7]</sup>, 基本结构如图 1 所示。光敏区中的光敏元为  $N \times M$  排列结构,  $N$  为水平方向像元数 (设有效光敏元为 6 144 个),  $M$  为垂直方向的像元数 (设最大为 96 个像素), 即对应为积分级数。

在水平方向和垂直方向都通过移位寄存器驱动控制, 从而能够保证所有像素中的电荷顺序地读出。当 TDICCD 相机成像时, 相机随卫星运动, 对地面同一静止目标多次曝光成像, TDICCD 从第 96 级至第 1 级依次感光, 电荷从第 96 级至第 1 级自上而下逐级累积。当最后一级积分周期结束时, 将经过多重延时积分积累起来的电荷包转移到 CCD 水平读出寄存器上, 并从第 1 级经运算放大器传输出去。

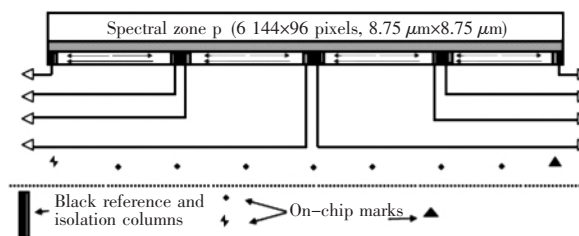


图1 TDICCD框图

对于 TDICCD 来说, 输出信号等效电荷数  $N_E$  正比于积分级数  $M$ 、输入光照度  $H$ 、光敏元面积  $A$  和积分时间  $T$ , 满足:

$$N_E \propto MHAT \quad (1)$$

当 TDICCD 的各级光敏元经过同一静止物体时, 分别对其进行曝光 (相当于积分时间延长), 要想获得清晰的图像, 需确保 CCD 输出信号为同一目标的累加信号电荷, 即保持 TDI 方向像元间的电荷转移速度必须与焦平面上图像的运动同步。

## 3 侧摆成像对 MTF 的影响

对于 TDICCD 器件, 要求在相机成像时, 保持 TDICCD 电荷转移速度的方向与物像在像平面上投影的运动速度同步, 否则由于速度失配将会引起像移,

导致 MTF 衰减,造成图像模糊。可以用下列方程<sup>[8]</sup>描述:

$$\text{MTF}_{\text{TDI}}(f_x) = \frac{\sin(\pi s f_x)}{\pi s f_x} \quad (2)$$

式中  $f_x$  为空间频率,  $s$  为像移移动量。通常,  $s = V_p \Delta t$ , 其中  $V_p$  为像面像移速度,  $\Delta t$  为曝光时间 (即积分时间)。如果电荷包转移速度  $V$  与  $V_p$  之差为  $\Delta V_p$ , 那么经过积分级数  $M$  级 TDI 后, 电荷包将从在同步条件对应处的位置移动了  $s = Mb (\Delta V_p / V_p)^{[9]}$ , 其中  $b$  是像平面方向上的采样间距, 即  $b = \frac{1}{2f_N}$ ,  $f_N$  为奈奎斯特频率。

由于速度失配退化后的像移调制传递函数即为:

$$\text{MTF}_{\text{TDI}}(f_x) = \frac{\sin\left(\pi \frac{M}{2f_N} \frac{\Delta V_p}{V_p} f_x\right)}{\pi \frac{M}{2f_N} \frac{\Delta V_p}{V_p} f_x} \quad (3)$$

式中  $\Delta V_p / V_p$  为像移失配的相对误差, 定义  $f' = \frac{f_x}{2f_N}$  为相对空间频率, 在奈奎斯特极限处, 取  $f_x = f_N$ , 即  $f' = 1/2$ , 化简式 (3), 即为:

$$\text{MTF}_{\text{TDI}}(f_N) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} M \frac{\Delta V_p}{V_p}\right)}{\frac{\pi}{2} M \frac{\Delta V_p}{V_p}} \quad (4)$$

当相机侧摆后, 以向右侧摆  $\varphi$  为例, 成像几何关系如图 2 所示。

图 2 中  $A'B'$  为焦平面,  $P'$  为焦平面  $A'B'$  的中心,  $C$  为侧摆成像时目标点  $C'$  在焦平面上的像点。C 点的

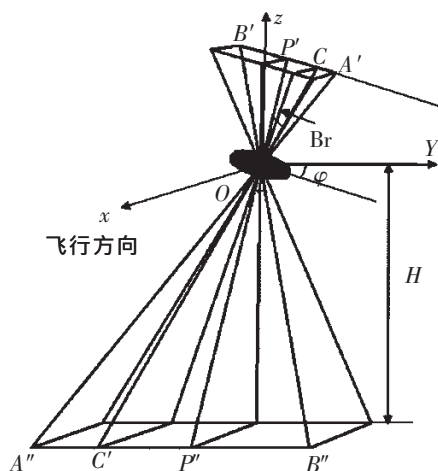


图 2 侧摆成像几何关系图

像移速度<sup>[10]</sup>满足:

$$V_{c\text{像}} = \frac{OC}{OC'} \times V_N = \frac{f/\cos\beta_x}{H/\cos(\varphi-\beta_x)} \times V_N = \frac{f \times V_N}{H} [\cos\varphi + \sin\varphi \tan(\angle COP')] \quad (5)$$

式 (5) 中  $\beta_x$  为像点的 1/2 视场角,  $f$  为焦距,  $H$  为轨道高度,  $V_N$  为星下点速度。其中  $V_N = \sqrt{\frac{GM}{R+H}} \times \frac{R}{R+H}$ ,  $R$  为平均地球半径,  $G$  为万有引力常数,  $M$  为地球质量。在图 2 中规定: 当像点位于  $P'$  右侧时  $\beta_x > 0$ , 当像点位于  $P'$  左侧时  $\beta_x < 0$ ,  $C$  点视场角即  $\angle COP'$ 。像移速度的精确计算需要进行从地面目标坐标系到像面坐标系的七次变换<sup>[11]</sup>, 这些计算通过相机控制器来完成。

$T_{\text{RF}} = V_p / \text{ccdpixel}$ , 其中  $\text{ccdpixel}$  表示像元尺寸,  $T_{\text{RF}}$  表示行频, 结合式 (4) 和式 (5), 即建立了侧摆角度与行频之间的关系模型。

#### 4 分段异速方案分析

侧摆成像时, 主要对以下 (a) 10 片 CCD 分别按各自的行频、(b) 相邻两片 CCD 按同一行频、(c) 相邻 5 片 CCD 按同一行频和 (d) 10 片 CCD 按同一行频这 4 种分段异速模式进行分析, 如图 3 所示, 其中虚线表示按照此处像元行频工作。

图 4 给出了积分级数最大情况为 96 级时, 侧摆角度  $0^\circ \sim 45^\circ$  范围内的各像元的 MTF, 其中横坐标 pixel 表示 10 片 CCD 拼接的焦平面中心点, 原点左、右两侧各代表 5 片拼接的 CCD, 各 6 144×5=30 720 个像元点 (下同)。可以看出, 侧摆角度越大, 传递函数下降越严重。不难发现, 如果 10 片 CCD 按各自行频工作, 即第 (a) 种异速模式工作, 均能使传递函数下降不超过 5%, 满足系统要求, 这也是多数相机在解决侧摆成像时所采取的方案。但是, 该方案给相机控制器带来很大的计算压力, 同时也增加了 TDICCD 控制电路的复杂程度<sup>[12]</sup>。再分析第 (b) 种异速模式, 提取 10 片 CCD 边缘像元如表 1 所示, 进行分析得出侧摆成像时如果侧摆角度不超过  $30^\circ$ , 可以

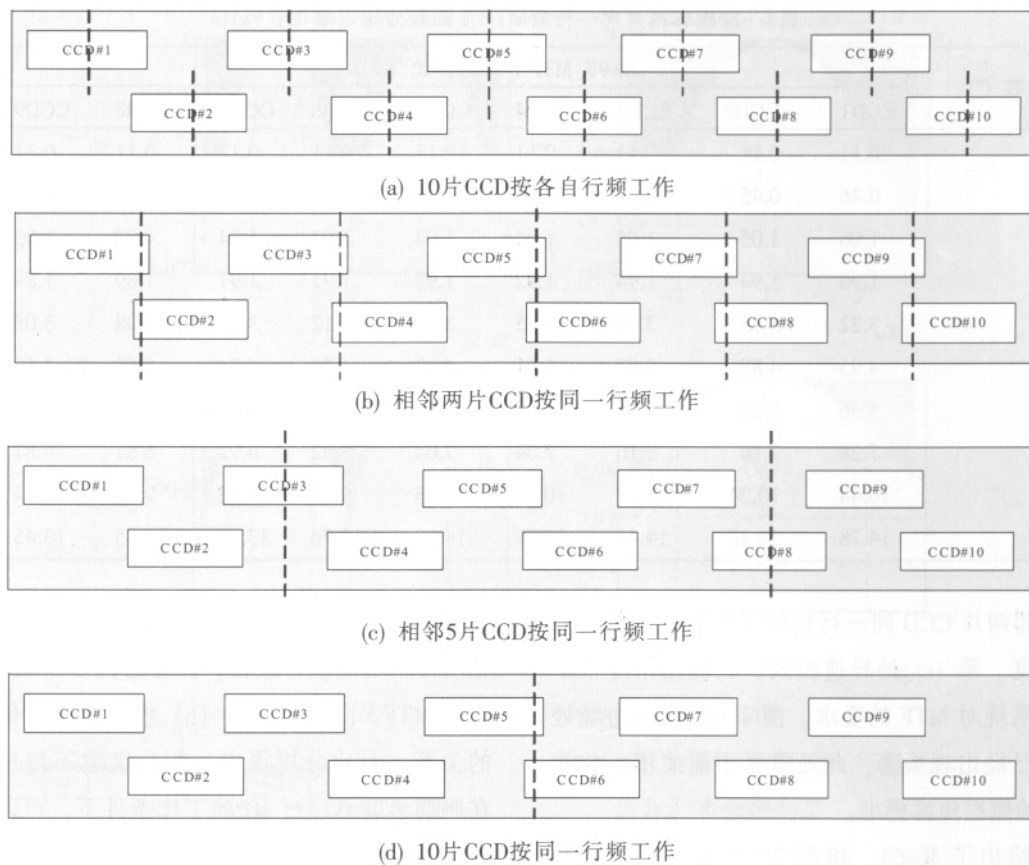


图3 分段异速模型

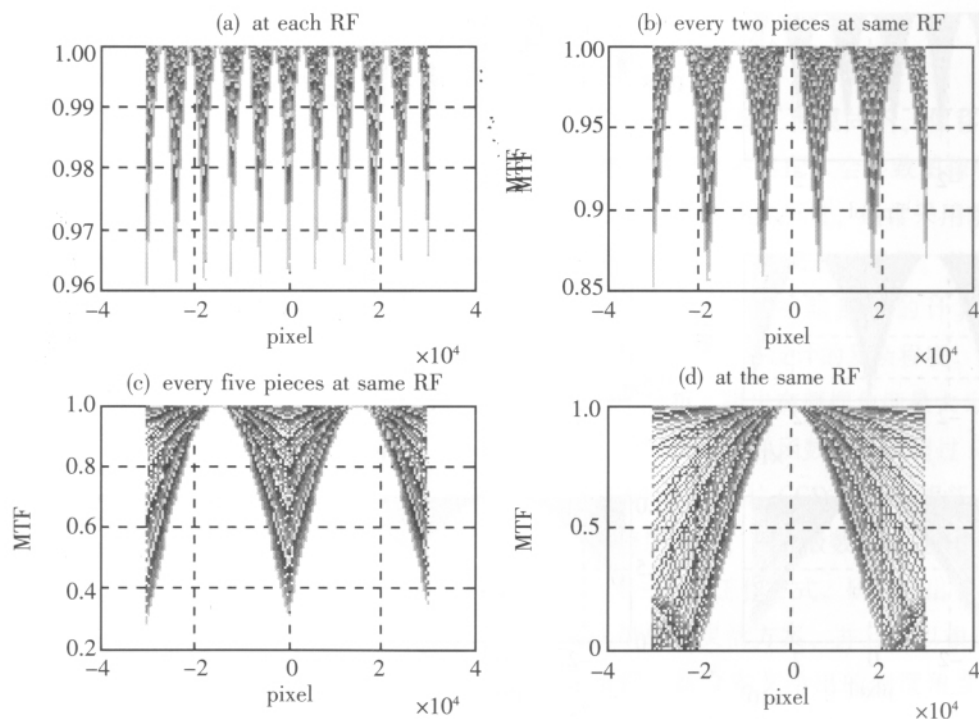


图4  $M=96$ 级下4种分段异速下的MTF (其中RF表示行频)

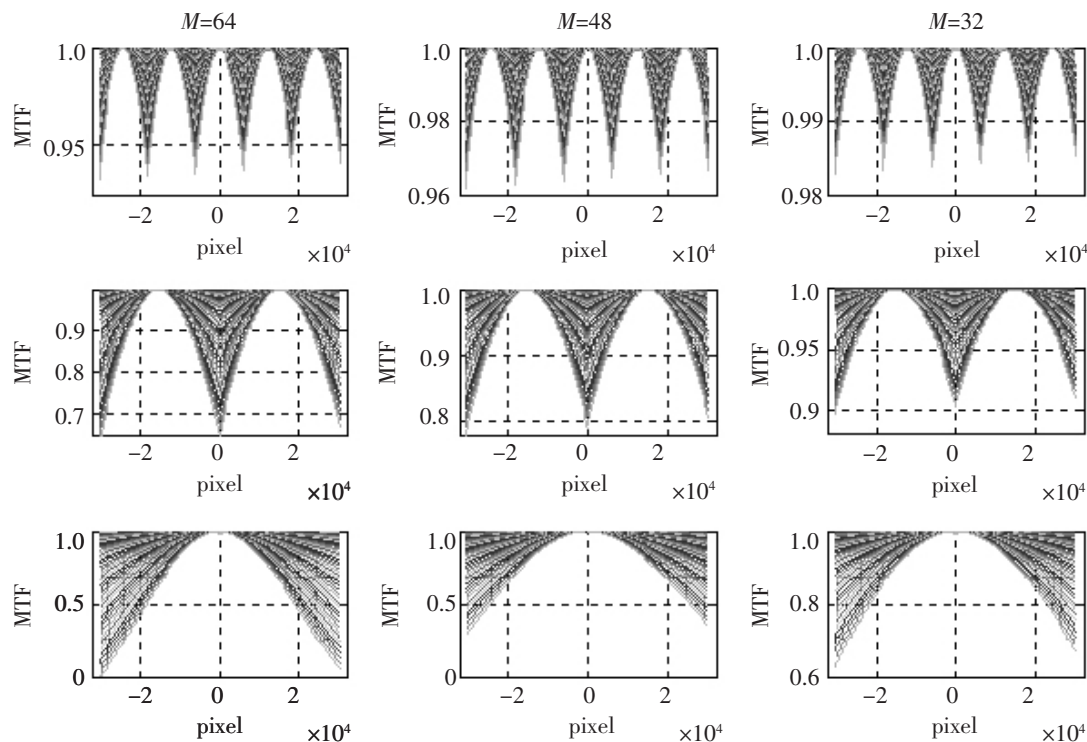
表1 按相邻两片同一行频MTF下降百分比 (单位: %)

侧摆度数 (°)	M=96, MTF下降百分比 (%)									
	CCD1	CCD2	CCD3	CCD4	CCD5	CCD6	CCD7	CCD8	CCD9	CCD10
5	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
10	0.46	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
15	1.06	1.05	1.05	1.04	1.04	1.04	1.04	1.03	1.03	1.02
20	1.96	1.94	1.94	1.92	1.92	1.91	1.91	1.89	1.89	1.87
25	3.22	3.19	3.19	3.15	3.15	3.12	3.11	3.08	3.08	3.05
30	4.95	4.88	4.88	4.81	4.81	4.75	4.74	4.68	4.68	4.62
31	5.36	5.28	5.28	5.21	5.21	5.13	5.13	5.06	5.06	4.99
35	7.28	7.16	7.16	7.04	7.04	6.92	6.92	6.81	6.81	6.70
40	10.44	10.24	10.23	10.03	10.03	9.83	9.83	9.64	9.64	9.45
45	14.78	14.43	14.43	14.09	14.09	13.76	13.76	13.45	13.45	13.14

采用按相邻两片 CCD 同一行频的工作方式,降低系统设计难度。第 (c) 种异速模式,在侧摆角度很小时能满足系统对 MTF 的要求。图 4 (d) 所示边缘处的像元点已经出现振荡,此处像元不能使用,此模式能适应的侧摆角度更小。

图 5 给出了  $M=64$ 、48 和 32 三种情况的 (b)、

(c) 和 (d) 3 种分段异速方式下的 MTF,也是相机典型工作所处的积分级数。图 6 给出了  $M=16$  和 8 情况下的 MTF。图 7 给出在 (b) 模式下侧摆角度和 MTF 的关系。对比分析得出,积分级数不超过 64 级时,在侧摆角度不超过  $40^\circ$  的工作条件下,可以采用按相邻两片 CCD 同一行频的工作方式;积分级数不超过

图5  $M=64$ 、48和32后3种分段异速下的MTF



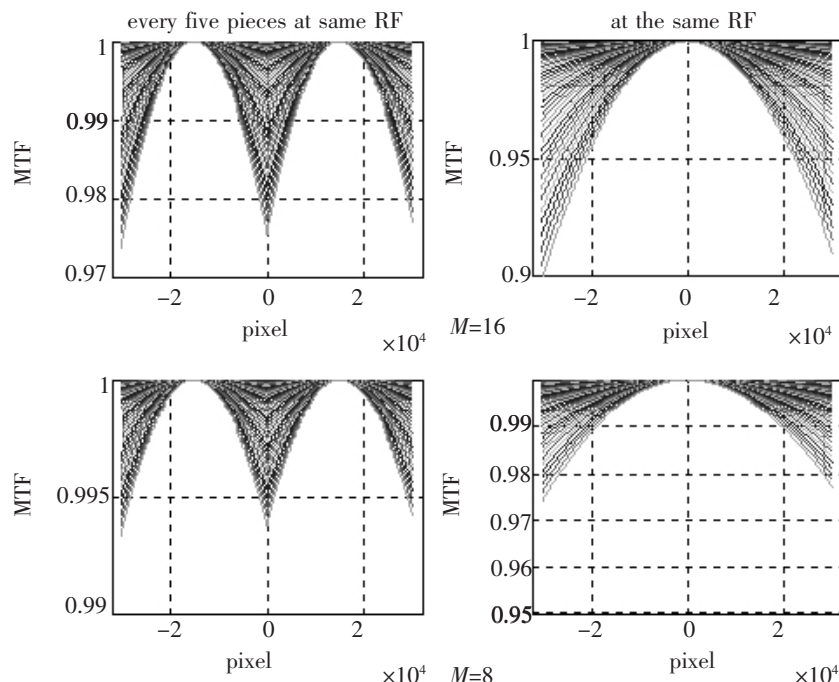


图6  $M=16$ 和8后两种分段异速下的MTF

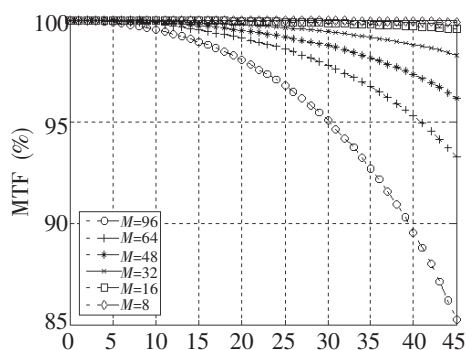


图7 (b)模式下边缘像元处的MTF的相对值

表2 分段异速侧摆角度 (单位:  $^{\circ}$ )

积分级数 $M$	满足分段方案的侧摆角度范围 ( $^{\circ}$ )			
	各自行频	相邻2片 一个行频	相邻5片 一个行频	同一行频
96	1~40	1~30	1~13	1~6
64	1~40	1~40	1~19	1~10
48	1~40	1~40	1~25	1~13
32	1~40	1~40	1~34	1~19
16	1~40	1~40	1~40	1~34
8	1~40	1~40	1~40	1~40

16 可以按相邻 5 片同一行频工作方式；只有积分级

数为 8 时才能按 10 片同一行频工作。

结合上述分析结果，总结出表 2 所示的 4 种分段模式异速侧摆角度范围，能够为工程设计提供参考依据。

## 5 结 论

在侧摆成像工作模式下，像移速度与 TDICCD 电荷转移速度不匹配，会导致图像模糊，传递函数下降；为保证成像质量，通常采用多片 CCD 按各自行频工作的单一方式进行调整。然而，此传统解决措施会增加相机控制器带的计算压力，并加重 TDICCD 控制电路设计的复杂程度。文本对分段异速进行了分析，得出在侧摆角度最大为  $40^{\circ}$  的成像条件下，同时保证传递函数下降不超过 5%，积分级数不超过 64 级，10 片 CCD 可以按相邻 2 片同一行频的分段速度工作；积分级数不超过 16 级，可以按相邻 5 片同一行频工作方式。研究给出了不同于一般常规解决措施的灵活方案，并且可以根据实际系统的工作条件，结合本文给出的侧摆角度范围进行调整，对实际工程设计有很好的指导意义。

## 参考文献

- [1] 史磊, 金光, 安源, 等. 一种遥感相机的 CCD 交错拼接方法研究[J]. 红外, 2009, 30(1): 12-15.
- [2] 杨立保, 李艳红, 王晶, 等. 多镜头成像拼接方法在经纬仪系统中的应用[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(5): 1048-1053.
- [3] 胡永力, 谭南征. TDICCD 相机侧摆 MTF 的研究[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(1): 33-37.
- [4] 许永森, 丁亚林, 田海英, 等. 推扫式航空遥感器像移补偿精度的分析 [J]. 光学 精密工程, 2009, 17(2): 453-459.
- [5] 李仕, 张葆, 孙辉. 航空成像像移补偿的并行计算[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(1): 225-230.
- [6] 闫得杰, 韩诚山, 李伟雄. 飞行器侧摆和前后摆及控制误差的优化设计[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(9): 2224-2229.
- [7] Chamberlain S G, Washkurak W D. High speed, low noise, fine resolution TDICCD imagers[J]. *SPIE*, 1990, 1242: 252-262.
- [8] Boreman. *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems*[M]. SPIE, 2001.
- [9] 佟首峰, 刘金国, 阮锦, 等. 推帚式 TDI-CCD 相机应用分析[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(1): 33-37.
- [10] 马天波, 郭永飞, 李云飞. 科学级 TDICCD 相机的行频精度技术指标 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(9): 2028-2035.
- [11] 王家骐, 于平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.
- [12] 曲洪丰, 王晓东, 吕宝林, 等. TDI-CCD 相机成像电路设计[J]. 光机电信息, 2010, 27(9): 59-63.

作者简介: 郭永飞(1961-), 男, 吉林长春人, 硕士, 研究员, 1990年于中科院长春光机所获得硕士学位, 主要从事图像处理及光电成像中的计算机应用技术方面的研究。E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn.