

文章编号 1004-924X(2010)09-2028-08

# 科学级 TDICCD 相机的行频精度

马天波, 郭永飞, 李云飞

(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:**从工程实际出发,以相机侧摆成像为例,系统分析了行频精度对 TDICCD 相机成像质量的影响。首先,推导了相机侧摆时焦平面各像元的像移速度求解公式,建立了侧摆角度与像移大小的一般关系式。在此基础上,采用调制传递函数(MTF)作为评价相机成像质量的指标,分析了像移失配对 MTF 的影响,计算导出了行频精度对成像质量的影响。结果表明,侧摆角度越大,积分级数越高,对行频精度的要求就越高,反之越低。在实际工程应用中(侧摆  $35^\circ$  条件下),积分级数为 64 级和 96 级成像时,行频精度只要分别不低于 0.54% 和 0.36% 就能使  $MTF_{\text{match}} \geq 0.95$ , 满足系统对传递函数的要求。将实验结果与计算分析结果进行对比,验证了分析的正确性,该结论对实际工程应用和设计有指导作用。

**关键词:**科学级 TDICCD; 调制传递函数; 行频; 像移; 成像质量; 侧摆

**中图分类号:** V443.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101809.2028

## Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera

MA Tian-bo, GUO Yong-fei, LI Yun-fei

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

**Abstract:** In view of practical projects, this paper analyzed the influence of the precision of row frequency on the image quality of a TDICCD camera systematically by taking scroll imaging for an example. Firstly, the expression of the image motion of each pixel was deduced when the camera was scroll imaging, and the relationship between scroll angle and image motion velocity was established. Based on this, the Modulation Transfer Function(MTF) was used to evaluate the image quality. The influence of image motion mismatching on the MTF was analyzed in detail, and the dependence of image quality on the precision of row frequency was calculated. The results show that the bigger the scroll angle and the integral number of TDICCD are, the higher the precision of required row frequency is. Contrarily, the precision of row frequency is not required strictly. In engineering application (the scroll angle is  $35^\circ$ ), when the integral numbers of the camera are 64 and 96, the precision of row frequency should be no less than 0.54% and 0.36% respectively for  $MTF_{\text{match}} \geq 0.95$ , which meets the need of the system. Comparing the experimental results with the calculation analysis, it is proved that the analyzed results are correct and can provide the useful references for engineering application and

收稿日期:2010-03-26; 修订日期:2010-04-20.

基金项目:中科院国防创新基金资助项目

designing.

**Key words:** scientific grade TDICCD; Modulation Transfer Function(MTF); row frequency; image motion; image quality; scroll

## 1 引言

TDICCD 器件最突出的特点是能够利用多级光敏元对同一个运动目标进行多次积分,并通过延时积分的方法来增强光能的收集,使得成像系统的重量、体积、信噪比、动态范围等得到有效改善,从而减小功耗,降低成本。因此,国内外高分辨率卫星相机均采用该器件作为相机光学系统的焦平面接收器件<sup>[1-4]</sup>。科学级 CCD 相机与普通 CCD 相机及其它成像仪器相比,具有灵敏度高、量子效率高、线性度好、适用温度宽、动态范围大、输出图像信噪比高和空间分辨率高等优点,因此这种相机已广泛应用于科学探测、天文观测、军事监控、航空航天等领域。

由于对 TDICCD 相机成像质量的要求越来越高,对影响其像质的因素进行全面分析很有必要。影响成像质量的因素很多,主要有卫星姿态角变化<sup>[5]</sup>、地球自转、相机侧摆、前摆或斜视<sup>[6-8]</sup>、卫星平台振动<sup>[9-12]</sup>、环境温度变化等,通过建模的

方法综合考虑所有影响因素非常复杂,甚至无法实现,而且某些因素对成像质量的影响在具体文献中已有较为详细的介绍。本文着重研究在轨摄像期间,由于侧摆致使感光介质在曝光时与被摄物体的影像存在相对运动,发生像移失配导致的成像模糊。提出利用改变 TDICCD 工作行频的方式来对其进行补偿。分析了行频精度对成像质量的影响,并给出了通常应用条件下的行频精度指标,本文的工作对提高科学级 TDICCD 相机成像质量有指导性的意义。

## 2 TDICCD 工作原理

以典型的 IT-EB 型 TDICCD 为例,它是一种面阵结构、线阵输出的新型 CCD<sup>[13]</sup>,基本结构如图 1 所示。光敏区中光敏元呈  $N \times M$  结构排列, $N$  为水平方向像元数(4 096 个有效光敏元); $M$  为垂直方向的像元数(最大为 96 pixel),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,这样能够保证所有像素中的电

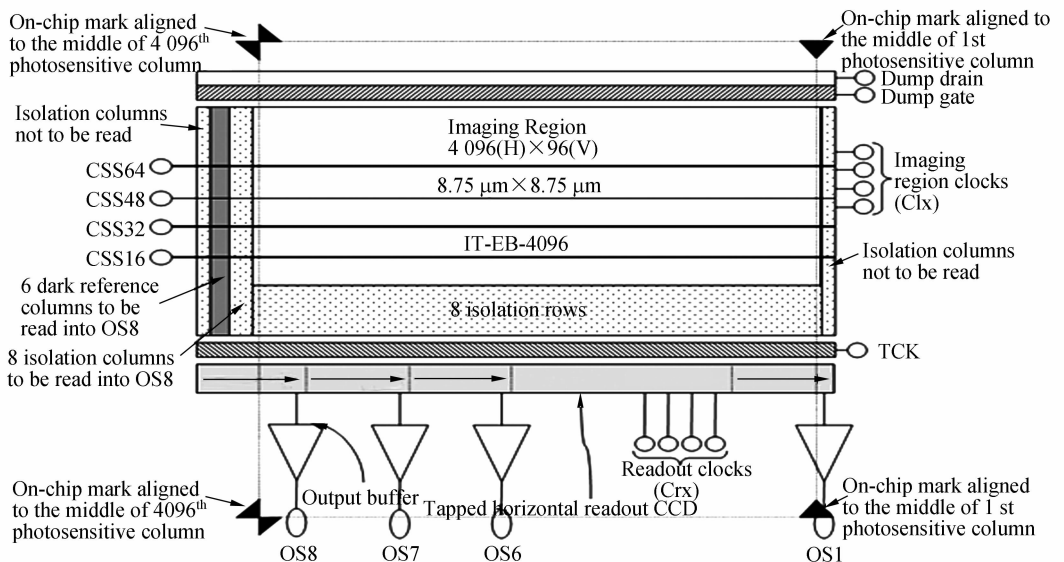


图 1 TDICCD 结构框图

Fig. 1 Framework of TDICCD

荷可顺序读出。当推扫成像时,随着相机的运动,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,由第 1 级经运算放大器传输出去。垂直方向的电荷转移采用串行移位的方式,同时 TDICCD 可以灵活控制级数,共有 16,32,48,64,96 级 5 种工作模式。

TDICCD 的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  $T$ ,即:

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

当 TDICCD 的各级光敏元经过一静止物体时,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 输出的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 侧摆成像的像移计算

侧摆成像的像移计算过程为:在二维地面坐标系中,推导像移计算关系式,利用几何方法求出侧摆成像引起的像移,找出像、物之间的空间几何关系。

首先,假设相机开始曝光时处于图 2 中  $W$  所示的位置,此时,地面上的物点  $A$  的光线投射到焦平面上  $a$  点,曝光持续时间为  $\Delta t$ 。相机不断向前运动,将其地速即星下点速度记为  $v_N$ ,则在曝光时间  $\Delta t$  内,地面  $A$  点的像  $a$  的位置不断发生变化。经过  $\Delta t$  后,相机随飞行器相对地面移过的距离为  $s = v_N \times \Delta t$ ,位于  $O$  点处。这时  $A$  点所成的像在胶片  $a_1$  处,由此可知,由于飞行器的运动,物点  $A$  在胶片所成的像实际不是一个点  $a$ ,而是一条线段  $aa_1$ 。

在星下点正常成像时,由图 2 中的几何关系可以得到像移速度:

$$v_N \times \frac{f}{H}, \quad (2)$$

式中: $f$  为焦距, $H$  为轨道高度, $v_N$  为星下点速度,可由  $v_N = \bar{v} \times \frac{R}{R+H}$  求出,其中  $\bar{v} = \sqrt{\frac{GM}{R+H}}$  为卫星平均速度, $R$  为平均地球半径, $G$  为万有引力

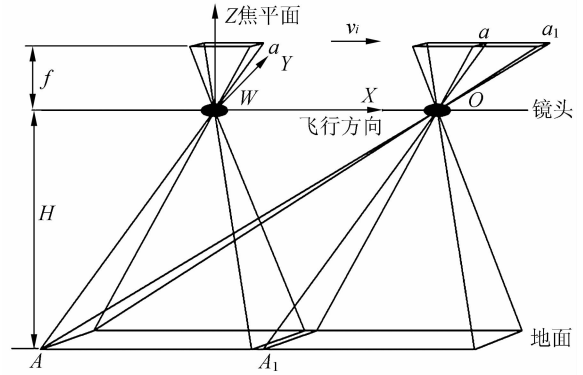


图 2 正常成像几何关系图

Fig. 2 Geometry relation of normal imaging

常数, $M$  为地球质量。

当相机发生侧摆时,以向右侧摆角度  $\varphi$  为例,成像几何关系图如图 3 所示。

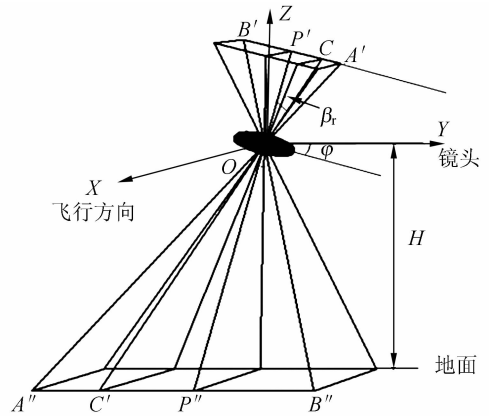


图 3 侧摆成像几何关系图

Fig. 3 Geometry relation of scroll imaging

图 3 中  $A'B'$  为焦平面, $P'$  为焦平面  $A'B'$  的中心, $C$  为焦平面上任意一点。 $C$  点的像移速度满足:

$$v_C = \frac{OC}{OC'} \times v_N = \frac{f/\cos\beta_r}{H/\cos(\varphi-\beta_r)} \times v_N = \frac{f \times v_N}{H} (\cos\varphi + \sin\varphi \tan(\angle COP')), \quad (3)$$

其中  $\beta_r$  为像点的视场角,规定当像点位于  $P'$  右侧时, $\beta_r > 0$ ;当像点位于  $P'$  左侧时, $\beta_r < 0$ , $C$  点视场角为  $\angle COP'$ 。计算像移速度的精确值需要从地面目标到像面进行 7 次坐标变换<sup>[14]</sup>,这里不再说明。

## 4 行频精度对传递函数的影响

### 4.1 像移补偿

电子学像移补偿是通过改变 TDICCD 相机的工作行频来实现像移补偿的方法。TDICCD 利用电荷延时积分的方法通过在像移速度方向上以与像移速度同步的速度转移电荷,从而完成像移的补偿。TDICCD 只在列方向具有像移补偿能力,因此这种像移补偿方法只有在 TDICCD 的积分时间与像移速度匹配,并且 TDICCD 列方向与像移速度方向重合时才能实现。

### 4.2 MTF 影响分析

对任何成像系统来说,调制传递函数(MTF)都是评价成像质量的重要参数<sup>[15-16]</sup>。TDICCD 推扫成像时的传递函数由两部分构成,即沿飞行方向的传递函数  $MTF_{//}$  和垂直于飞行方向的传递函数  $MTF_{\perp}$ 。其中,垂直于飞行方向的传函是由偏流角引起的,误差很小,可以忽略不计。因此,本文主要分析沿飞行方向的  $MTF_{//}$ 。

线性运动下,  $MTF^{[17]}$  为:

$$MTF = \frac{\sin(\pi \cdot s \cdot f_c)}{\pi \cdot s \cdot f_c}, \quad (4)$$

式中,  $f_c$  为空间频率;  $s$  为像移移动量,通常,  $s = v_p \cdot \Delta t$ , 其中,  $v_p$  为像面像移速度,  $\Delta t$  为曝光时间(或积分时间)。

在 CCD 积分时间内,沿飞行方向的传递函数<sup>[18]</sup>可分为不可补偿像移和可补偿像移两部分,即像相对于 CCD 接收器移动引起的传递函数  $MTF_{p-b}$  和 TDI 时间延时积分与像移不匹配引起的传递函数  $MTF_{match}$ 。

#### 4.2.1 不可补偿像移

CCD 在采集光信号过程中,由相机与景物的相对运动而产生的像移是不可补偿的。CCD 线阵推扫成像相当于狭缝扫描成像,为保证扫描方向的地面分辨力,在一行周期内,地面覆盖长度在 CCD 焦平面上所成像的长度至少要等于像元的大小,即积分时间内像相对于 CCD 接收器移动距离刚好等于一个像元宽度  $d$ 。记  $s = d$ , 在奈奎斯特频率  $f_N$  下,取  $f_c = f_N = 1/2d$ , 代入式(4)得:

$$MTF_{p-b} = \frac{\sin(\pi \cdot d \cdot 1/2d)}{\pi \cdot d \cdot 1/2d} = 0.64. \quad (5)$$

#### 4.2.2 可补偿像移

速度失配引起的 MTF 的退化只作用于 TDI 方向。对于推扫成像方式,若电荷 TDI 方向的运动速度  $v$  与物像在像平面上投影的运动速度  $v_p$  不匹配,相机与景物的相对运动会引起图像移动,造成图像模糊,这种由于速度失配引起的像质退化可用 MTF 来衡量。如果电荷包平均速度  $\bar{v}_c$  与  $v_p$  之差为  $\Delta v_p$ , 那么经过  $M$  级 TDI 后,在同步条件对应处的位置电荷包将移动距离为  $s = Mb (\Delta v_p / v_p)$ , 其中  $b$  是像平面方向上采样间距,即  $b = \frac{1}{2f_N}$ 。

由于速度失配退化后的像移调制传递函数为:

$$MTF_{match} = \frac{\sin(\pi \cdot \frac{M}{2f_N} \cdot \frac{\Delta v_p}{v_p} \cdot f_c)}{\pi \cdot \frac{M}{2f_N} \cdot \frac{\Delta v_p}{v_p} \cdot f_c}, \quad (6)$$

式中,  $\Delta v_p / v_p$  为像移失配的相对误差,定义  $f' = \frac{f_c}{2f_N}$  为相对空间频率,  $M$  表示 TDICCD 的积分级数,化简后为:

$$MTF_{match} = \frac{\sin(\pi f' M \Delta v_p / v_p)}{\pi f' M \Delta v_p / v_p}. \quad (7)$$

在奈奎斯特极限处,取  $f_c = f_N$ , 即  $f' = 1/2$ , 式(7)化简得:

$$MTF_{match} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} \cdot M \frac{\Delta v_p}{v_p})}{\frac{\pi}{2} \cdot M \frac{\Delta v_p}{v_p}}. \quad (8)$$

最后得到在奈奎斯特极限处,由于侧摆产生的沿飞行方向上的  $MTF_{//}$  为:

$$MTF_{//} = MTF_{p-b} \times MTF_{match} = 0.64 \times \frac{\sin(\frac{\pi}{2} \cdot M \frac{\Delta v_p}{v_p})}{\frac{\pi}{2} \cdot M \frac{\Delta v_p}{v_p}}, \quad (9)$$

由式(9)可知,积分级数  $M$  和速度失配误差  $\Delta v_p / v_p$  直接影响传递函数,又因  $v \propto 1/t$ ,  $f \propto 1/t$ , 结合式(3)和式(9)可以推导出:

$$MTF_{//} \propto \frac{\Delta v}{v} \propto \frac{\sin \varphi \cdot \sin \beta_r}{\cos(\varphi - \beta_r)}, \quad (10)$$

$$MTF_{//} \propto \frac{\Delta v}{v} \propto \frac{\Delta f}{f}$$

虽然  $MTF_{p-b}$  是不可避免的,但  $MTF_{match}$  可以通过调整 TDI 级数和  $\Delta f / f$ , 将其控制在系统要求

的范围内。因此,对行频进行控制,即对  $\Delta f/f$  提出技术指标从而提高图像质量。

## 5 计算分析与实验结果

为了验证以上的分析,以典型的 IT-EB 型 TDICCD 为例进行理论计算分析和实验验证,相机采用 8 片 CCD 拼接,相机焦距  $f=5$  m,应用条件为轨道高度  $H=500$  km,最大侧摆角度为  $35^\circ$ 。

首先计算侧摆成像时,侧摆角度与 MTF 的关系。图 4 和图 5 是根据式(3)计算出的焦平面远地点和近地点在奈奎斯特频率  $f_N$  下,不同积分级数、不同侧摆角度数的 MTF<sub>match</sub>。由图可知,侧摆角度越大、积分级数越高,MTF 下降越严重。图 6 为侧摆  $35^\circ$  时,不同积分级数下焦平面各像元点对应的 MTF<sub>match</sub>,其中原点坐标表示 8 片 CCD 拼接的焦平面中心点,原点左、右两侧各代表 4 片拼接的 CCD,即  $4\ 096 \times 4 = 16\ 384$  个像元点,可

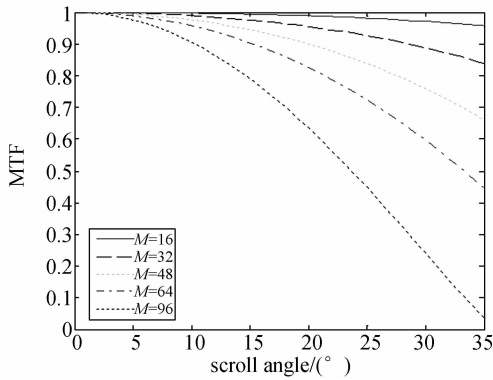


图 4 侧摆成像远地点侧摆角度与 MTF 关系图

Fig. 4 Scroll angle and MTF in scroll imaging apogee

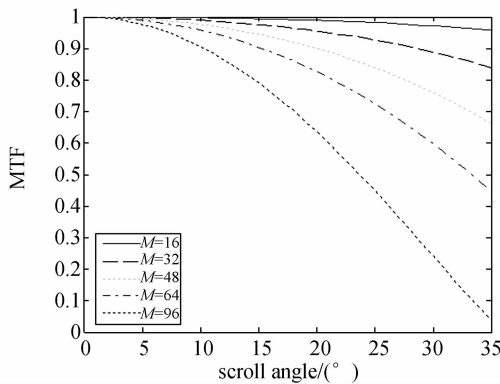


图 5 侧摆成像近地点侧摆角度与 MTF 关系图

Fig. 5 Scroll angle and MTF in scroll imaging perigee

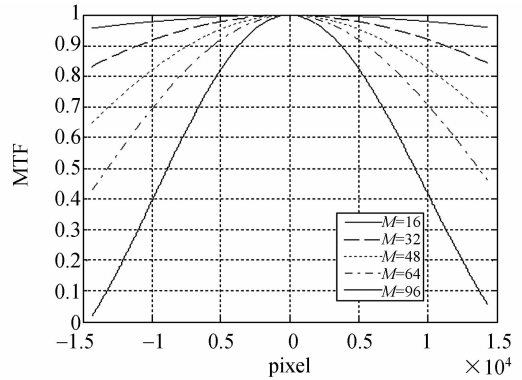


图 6 侧摆  $35^\circ$  时不同像元点的 MTF 关系图

Fig. 6 MTFs of different pixels at scroll angle in  $35^\circ$

以看出侧摆成像时积分级数越大,传递函数越小。边缘处的像元点在积分级数为 64 级和 96 级时,MTF 下降严重,此处像元不能使用。

表 1 给出相机侧摆成像时,满足像移匹配条件的 8 片 CCD 中心点对应的行周期。可以看出,侧摆度数很小时,各片 CCD 中心点行周期很接近;侧摆度数很大时,为了保证成像质量,必须精确调整各片 CCD 工作行周期值。

表 1 CCD 中心点行周期

Tab. 1 Row periods of CCD center points (ms)

CCD 片数	不同侧摆角度下的行周期			
	侧摆 $10^\circ$	侧摆 $15^\circ$	侧摆 $25^\circ$	侧摆 $35^\circ$
1	0.126 4	0.129 2	0.138 4	0.154 0
2	0.126 3	0.128 9	0.137 9	0.153 2
3	0.126 1	0.128 7	0.137 5	0.152 5
4	0.125 9	0.128 5	0.137 0	0.151 7
5	0.125 8	0.128 2	0.136 6	0.151 0
6	0.125 6	0.128 0	0.136 1	0.150 2
7	0.125 5	0.127 7	0.135 7	0.149 5
8	0.125 3	0.127 5	0.135 2	0.148 8

图 7 为在不同积分级数下速度失配误差与 MTF<sub>match</sub> 的关系。图 8 是在不同积分级数下行频精度与 MTF<sub>match</sub> 的关系。从图中可以看出在侧摆  $35^\circ$  条件下,相机工作积分级数为 64 级和 96 级时,行频精度分别不低于 0.54% 和 0.36% 就能够满足  $MTF_{\text{match}} \geq 0.95$ 。

图 9 为实验室条件下,通过调整滚筒的速度和转台的倾斜角度来模拟相机在 500 km 轨道高

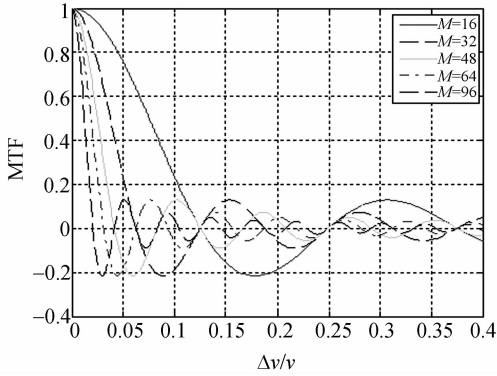
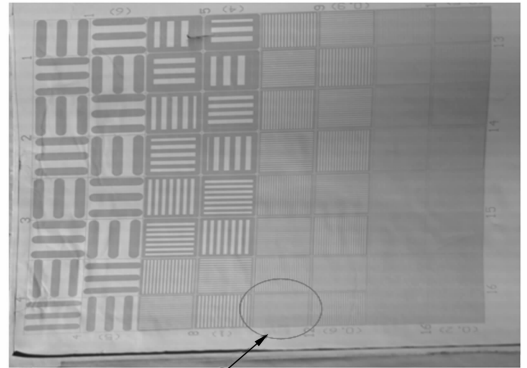


图 7 速度失配误差与 MTF 关系图

Fig. 7 Relation between velocity mismatching error and MTF

响相机成像质量的重要因素。在工程应用中,可根据实际需求参照式(10)对相机的行频进行调整,给出行频精度调整的技术指标。



靶标条纹在奈奎斯特频率下扫描方向上所成图像

图 9 整幅靶标图像

Fig. 9 Whole drone image

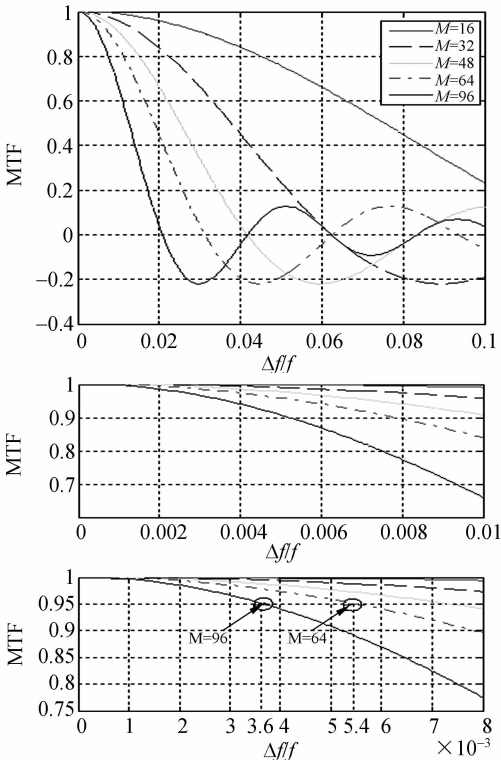
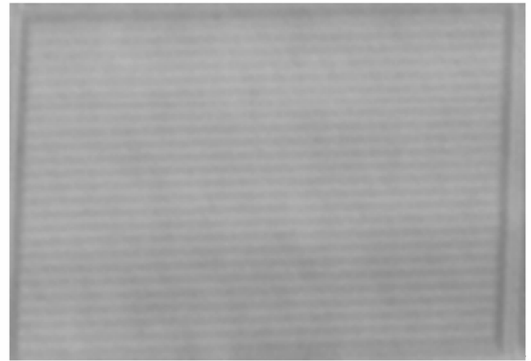


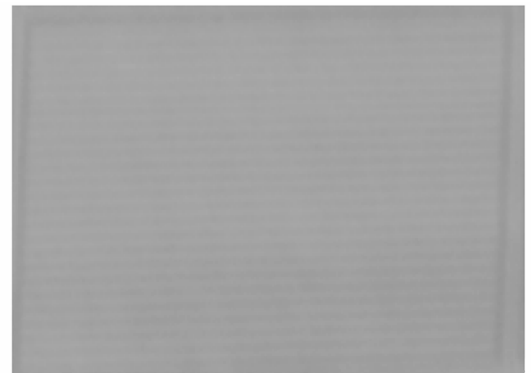
图 8 行频精度与 MTF 的关系图

Fig. 8 Relation between row frequency precision and MTF



(a) 行频精度为 0.2% 所成图像

(a) Image with row frequency precision of 0.2%



(b) 行频精度为 0.8% 所成图像

(b) Image with row frequency precision of 0.8%

度,最大侧摆角度 35°时获取的实验图像该图像为单片 CCD 工作在积分级数 64 级时推扫得到的靶标图像。通过改变 CCD 的工作行频,使相机的行频精度优于 0.54% 和不大于 0.54% 的条件,分别获取图 10(a)和(b)。对图(9)中标记的扫描方向上奈奎斯特频率处所成横条纹图像的清晰度进行对比,可知在侧摆条件下,相机的行频精度是影

图 10 奈奎斯特处细节对比图像(标记处图像放大)

Fig. 10 Detail contrast images at Nyquist frequency (Amplified images for signed points)

## 6 结 论

科学级 TDICCD 相机在侧摆成像过程中,像移速度随侧摆角度的变化而变化,在近地点行周期长,远地点行周期短,侧摆引起的像移会导致图像模糊,传递函数下降。为保证图像质量,调整 CCD 的行频,使其在像移速度方向上以与像移速

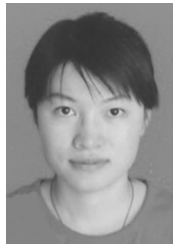
度同步的速度转移电荷,本文分析了行频精度对成像质量的影响。对行频精度提出了设计要求,即在轨道高度 500 km、侧摆角度为  $35^\circ$  的条件下,相机工作积分级数为 64 级和 96 级时,行频精度分别满足不低于 0.54% 和 0.36% 的技术指标就能够满足  $MTF \geq 0.95$ 。实验结果和理论计算分析相符,该结果可以指导实际工程设计。

### 参考文献:

- [1] 佟首峰,李德志,郝志航. 高分辨率 TDI-CCD 遥感相机的特性分析[J]. 光电工程,2001,28(4):64-67.  
TONG SH F, LI D ZH, HAO ZH H. Analysis on the characteristics of TDI-CCD high-resolution camera for remote sensing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, 28(4):64-67. (in Chinese)
- [2] 蒋光伟. TDI-CCD 的空间分辨率特性[J]. 红外, 2001(9):17-21.  
JIANG G W. The characteristic of TDI-CCD spacial resolution[J]. *Infrared*, 2001(9):17-21. (in Chinese)
- [3] DOBSON D A, AGWANI S, WASHKURAK W D, *et al.*. A high-speed, high resolution TDI image sensor for use in airborne reconnaissance application [J]. *SPIE*, 1994, 2272:221-229.
- [4] 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.  
TONG SH F, LIU J G, RUAN J, *et al.*. An analysis for application technique of push-broom TDI-CCD imaging camera[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, 23(1):33-37. (in Chinese)
- [5] 翟林培,刘明,修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学精密工程,2006,14(3):490-494.  
ZHAI L P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):490-494. (in Chinese)
- [6] FAN CH, YI H W, LIANG Y T. Influence analysis of the scroll on the image quality of the satellite camera[J]. *SPIE*, 2009, 7384:73840A-1-73840A-6.
- [7] 樊超,李英才,易红伟. 偏流角对 TDICCD 相机像质的影响分析[J]. 光电工程,2007,34(9):70-73.  
FAN CH, LI Y C, YI H W. Influence analysis of drift angle on image quality of TDICCD camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(9):70-73. (in Chinese)
- [8] 许永森,丁亚林,田海英,等. 斜视状态下航空遥感器像移的计算与补偿[J]. 光学精密工程,2007,15(11):1779-1783.  
XU Y SH, DING Y L, TIAN H Y, *et al.*. Calculation and compensation for image motion of aerial remote sensor in oblique situation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1779-1783. (in Chinese)
- [9] 耿文豹,翟林培,丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. 光学精密工程,2009,17(2):314-320.  
GENG W B, ZHAI L P, DING Y L. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):314-320. (in Chinese)
- [10] 钱义先,程晓薇,高晓东,等. 振动对航空 CCD 相机成像质量影响分析[J]. 光电与控制,2008,15(11):55-58,66.  
QIAN Y X, CHENG X W, GAO X D, *et al.*. Effect of vibration on imaging quality of airborne CCD camera[J]. *Electronics Optics and Control*, 2008, 15(11):55-58,66. (in Chinese)
- [11] 徐鹏,黄长宁,王涌天,等. 卫星振动对成像质量影响的仿真分析[J]. 宇航学报,2003,24(3):259-263.  
XU P, HUANG CH N, WANG Y T, *et al.*. Modulation transfer function in push-broom camera limits resulting from mechanical vibration[J]. *Journal of Astronautics*, 2003, 24(3):259-263. (in Chinese)
- [12] 陈丁跃,周仁魁,李英才. 随机振动对星载 TDICCD

- 影响分析[J]. 光子学报, 2004, 33(10): 1247-1250.
- CHEN D Y, ZHOU R K, LI Y C. Influence analysis of random vibration on TDICCD camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(10): 1247-1250. (in Chinese)
- [13] CHAMBERLAIN S G, WASHKURAK W D. High speed, low noise, fine Resolution TDICCD Imagers[J]. *SPIE*, 1990, 1242: 252-262.
- [14] 王家骥, 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.
- WANG J Q, YU P, YAN CH X, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1585-1589. (in Chinese)
- [15] 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.
- HU Y L, TAN N ZH. Study on scroll MTF of TDICCD camera[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2003, 24(1): 33-37. (in Chinese)
- [16] 郭悦, 刘晓鹏, 杨桦. CCD 的调制传递函数(MTF)分析[J]. 航天返回与遥感, 2004, 25(3): 25-28.
- GUO Y, LIU X P, YANG H. MTF analysis for CCD[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2004, 25(3): 25-28. (in Chinese)
- [17] BOREMAN. *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems*[M]. SPIE, 2001.
- [18] 韩昌元. 信息光学基础理论及其应用[M]. 长春: 长春出版社, 1989.
- HAN CH Y. *Fundamental theory and application of information optics*[M]. Changchun: Changchun Press, 1989. (in Chinese)

#### 作者简介:



马天波(1984—),女,吉林长春人,研究实习员,2006年、2008年于吉林大学分别获得学士、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: matb0319@yahoo.com.cn



李云飞(1971—),男,吉林榆树人,副研究员,博士,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电成像中的计算机应用技术方面的研究。E-mail: liyf@ciomp.ac.cn



郭永飞(1961—),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,主要从事光电技术应用,嵌入式系统开发等方面的研究。E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn