

文章编号 1004-924X(2006)02-0291-06

推扫型 TDI CCD 光学遥感器动态成像研究

赵贵军^{1,2}, 陈长征^{1,2}, 万志¹, 关英俊^{1,2}, 李宪圣², 任建岳¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对基于推扫技术的 TDI CCD 空间光学遥感器动态成像试验, 研制了一套检测系统。在系统中, 设计了模拟卫星推扫的双支承 U 型结构精密转台。搭载遥感器, 以角速度 $0.555^\circ/\text{s}$ 在 $\pm 5^\circ$ 的范围内转动时, 转台稳速控制精度达到 0.3% 。设计了一种奈奎斯特频率靶标, 在每组矩形垂直靶条间加入公差为 a/n 的等差级数间隔靶条, 解决了遥感器推扫时 CCD 像元与垂直靶条像匹配不确定性问题, 使配准简化, 提高了测量结果的准确性。试验结果表明: 遥感器获得了垂直、水平及 45° 方向的 0 视场, ± 0.86 视场奈奎斯特频率靶条像, 验证了采用推扫技术的 TDI CCD 遥感器所具有的高品质。

关键词:应用光学; 光学遥感器; TDI CCD; 推扫技术; 位错靶标; 像质评价

中图分类号: TP73 **文献标识码:** A

Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor

ZHAO Gui-jun^{1,2}, CHEN Chang-zheng^{1,2}, WAN Zhi, GUAN Ying-jun^{1,2}, LI Xian-sheng, REN Jian-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: For the dynamic imaging test of push-broom TDI CCD (Time Delay Integration Charge Coupled Devices) space optical remote sensor, a kind of special test system was designed. A precise rotary platform with dual bearing and a U type frame was designed to simulate the satellite push-broom in the system. Within $\pm 5^\circ$ range it could be turned at the angle rate of $0.555^\circ/\text{s}$ with rotary precision of 0.3% with the remote sensor being carried. A drone at Nequist Frquency was designed in which bar target in a/n tolerance of arithmetical progression was added between each group rectangle vertical bar in the drone. When the remote sensor worked under push-broom mode, the problem of the matching uncertainty between the target image and the CCD pixel be solved, which could simplify the registration and improve the measuring accuracy. The results prove that the drone image can be obtained at the Nequist Frquency in the field of view of 0 and ± 0.86 in the vertical, horizontal and 45° directions. TDI CCD remote sensor is provided with high imaging quality based on push-broom technique.

Key words: applied optics; optical remote sensor; TDI CCD; push-broom technology; alternate location target; image quality evaluation

收稿日期: 2005-11-22; 修订日期: 2006-12-18.

基金项目: 863 重大专项 (No. 863-2-5-1-13B)

1 引言

近年国际空间对地观测光学遥感器发展趋势已证明,基于推扫技术的 TDI CCD 光学遥感器最具大视场、高分辨力的成像潜力,是未来对地观测光学遥感器发展的方向^[1-3]。

为验证基于推扫技术的光学遥感器的高品质,在实验室条件下,需要对研制的遥感器的动态像质进行综合评价。对于 TDI CCD 光学遥感器,由于遥感器要实现大视场,CCD 焦平面通常采用多片 CCD 拼接技术,现有技术已使 CCD 焦平面长度达到 300 mm 以上。在试验室环境下模拟遥感器推扫成像时,为验证遥感器的成像质量,具有说服力的方法是获得奈奎斯特频率靶条像,但用常规的方法来实现 CCD 像元与目标靶条匹配将非常困难。本文研究了一种新的试验方案,把具有一定错关系的奈奎斯特频率靶标放置在室外建筑物的合适位置,用专门设计的双支撑结构 U 型精密转台来控制光学遥感器,实现了遥感器的推扫成像和 CCD 像元与奈奎斯特频率目标靶条匹配,获得了理想的室外靶标像。

2 TDI CCD 推扫动态成像基本理论

由于 TDI CCD 探测器在成像时是以不同的像元对被摄景物的同一点进行多次重复曝光,并对这些曝光的能量进行光电转换和积累,因此,在其成像过程中,电荷的转移速率和方向必须与影像的对应像点的移动速率和方向完全相同,否则就会产生像移^[4]。速度失配引起的调制传递函数的退化仅仅作用于 TDI 方向。虽然 TDI CCD 级数可以用于提高信噪比,但级数越多,对运动速度的同步要求越高^[5],采用 96 级积分时,同步精度控制在 1% 以内^[6]。针对推扫型 TDI CCD 光学遥感器,经过计算,本文的研制方案要求同步精度达到 0.3%。

星载遥感器在空间轨道处进行成像时的卫星星下点速率 V 为^[7]:

$$V = \frac{R_e \sqrt{GM_e}}{(R_e + H)^{3/2}}, \quad (1)$$

式中, R_e —地球半径; G —万有引力常数; M_e —地球质量; H —卫星预定轨道高度。

地面景物成像在遥感器焦面处的像移速率 v' 由下式计算:

$$v' = f \times (V/H), \quad (2)$$

式中, f' —遥感器光学系统的焦距, V/H —星载遥感器成像的速高比。

遥感器成像时的 CCD 积分时间 T 为:

$$T_{\text{INT}} = d / v', \quad (3)$$

式中, d —CCD 像元尺寸。

速率失配误差造成的 MTF 衰减用下面方程表示^[8]:

$$\text{MTF}_{\text{TDI}}(f_x) = \frac{\sin(\pi N d_{\text{error}} f_x)}{N \sin(\pi d_{\text{error}} f_x)} = \frac{\sin c(N d_{\text{error}} f_x)}{\sin c(d_{\text{error}} f_x)}, \quad (4)$$

式中, f_x —空间频率, N —TDI 级数, d_{error} —相邻二次曝光误差。

位置误差与 d_{error} 与速率误差 ΔV 的关系是:

$$d_{\text{error}} = |\Delta V| T_{\text{INT}}, \quad (5)$$

式中, T_{INT} —TDI CCD 积分时间

3 室外动态成像检测系统设计

模拟推扫型 TDI CCD 光学遥感器室外成像与该遥感器形成推扫的转台、大气、分辨力靶板及安置分辨力靶板的建筑物等有关。室外成像的系统组成如图 1 所示:

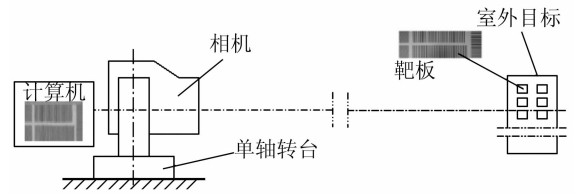


图 1 动态成像示意图

Fig. 1 Dynamic imaging sketch

- 室外成像实验室
- 模拟遥感器
- 形成推扫的转台
- 分辨力靶板
- 安置分辨力靶板的建筑物

3.1 分辨力靶板设计

用于模拟遥感器室外成像演示验证的分辨力靶板的黑白靶条,必须满足一定条件,才能成像。

- TDI CCD 物方像素宽度与黑白靶条的宽度相同

- TDI CCD 列的方向与推扫方向平行
- TDI CCD 的像元行或列与横或竖的黑白靶条像重合
- 黑白靶条对比度不小于 10

3.1.1 奈奎斯特频率靶板的设计方案

奈奎斯特频率是 TDI CCD 光学遥感器成像的最高空间频率,分辨出代表奈奎斯特频率的靶条,就能较好地评价遥感器的成像质量。

确定黑白靶条宽度 A 与模拟遥感器焦距 f' , 像元尺寸 a 与靶板之间的距离 l 有关,即

$$A = \frac{a}{f'l}, \quad (6)$$

其中模拟遥感器焦距与像元尺寸已知,而距离 l 未知,需准确测量距离 l 。为此,专门对作为主目标楼安装靶板的位置,从室外成像实验室对其进行激光测距,测得 $l=2\,784\text{ m}$ 。已知 TDI CCD 像元尺寸为 $a=13\ \mu\text{m}$,焦距 $f'=1\text{ m}$ 。代入上式计算,黑、白靶条宽度为:

$$A = \frac{13 \times 10^{-6}}{1} \times 2.784 \times 10^3 = 0.036\text{ m} = 36\text{ mm}, \quad (7)$$

模拟遥感器为推扫型 96 级 TDI CCD 光学遥感器,为使模拟遥感器在转台形成一次推扫可获得竖向黑白靶条像,必须解决竖向靶条与 TDI CCD 物方像不重合的问题。

如果奈奎斯特频率靶标线条像与像元间位错为 $s(s \leq d/2, d$ 为 CCD 像元尺寸),可将一块竖向靶标的图案分为 n 组,每组含 4 对奈奎斯特频率的明暗线条,各组间设定公差为 a/n (a 为相邻黑白靶条中心间距)的等差级数间隔,将各组排成一线,则在 TDI CCD 线阵方向不加任何调整的条件下,也可以找到两组图案,使其位错量小于 $a/(2n)$,可得到靶标的最小位错 MTF 为^[9]:

静态测试时:

$$\text{MTF}_m = 1 - \frac{2a}{2na} = 1 - \frac{1}{n} \quad (\text{当 } s = \frac{a}{n}), \quad (8)$$

动态测试时:

$$\text{MTF}_m = \frac{2}{a} \left(\frac{a}{2} - \frac{a}{2n} \right) = 1 - \frac{1}{n} \quad (\text{当 } s = \frac{a}{2} - \frac{a}{2n}), \quad (9)$$

在分辨靶板方案实际设计时,将竖条纹分成 20 组,每组 4 黑 4 白条纹,各组错开 $1/20$ 靶条宽

度,则静态、动态测试的最小位错 $\text{MTF}_m = 0.95$ 。

黑白靶条宽度为 36 mm,则每个竖靶条组错位 3.6 mm,在实验中,竖靶条部分定位精度不低于 0.2 mm。在分辨力靶板左侧加一排横奈奎斯特频率靶条,在左侧各加一组 $+45^\circ$ 和 -45° 奈奎斯特频率斜靶条,设计的分辨力靶板方案如图 2 所示。

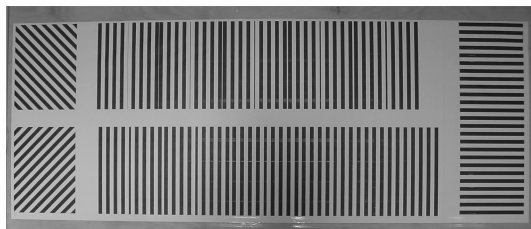


图 2 奈奎斯特频率位错靶标

Fig. 2 Alternate location bar target at the Nequist Frequency

3.1.2 黑白靶条调制度测试

取一小块靶样条,在试验室中用 Lamda9(紫外/可见/近红外)分光光度计分别测出亮条和暗条在可见光波段的积分反射比 ρ_{bright} 和 ρ_{dark} ,则得到样条的调制度:

$$M = \frac{\rho_{\text{bright}} - \rho_{\text{dark}}}{\rho_{\text{bright}} + \rho_{\text{dark}}} = \frac{84.17\% - 6.71\%}{84.17\% + 6.71\%} = 0.85, \quad (10)$$

对比度:

$$\gamma = \frac{\rho_{\text{bright}}}{\rho_{\text{dark}}} = \frac{84.17\%}{6.71\%} = 12.5, \quad (11)$$

3.2 转台的技术及使用方案

模拟遥感器在室外成像需采用形成推扫的转台。形成推扫的转台转速高低与均匀性如何,直接影响模拟遥感器的室外成像。

其主要要求是:

转台模拟卫星推扫的速度,由式(1)计算得到卫星星下点角速度为: $0.555^\circ/\text{s}$;

转台速度均匀,所形成推扫的速度应与 TDI CCD 成像电路速度匹配。

3.2.1 转台机械系统方案

转台俯仰转动。安装在转轴上的模拟遥感器将对轴系产生在含轴的线平台面的重力矩,为消除此影响,必须采用双支承完成。在双支承方式中选取一端主支承,另一端辅助支承的机械系统方案。方案如图 3 所示。

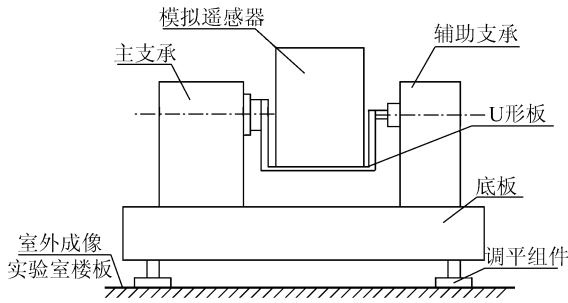


图 3 精密转台机械系统示意图

Fig. 3 Sketch on mechanical system of exactitude revolving platform

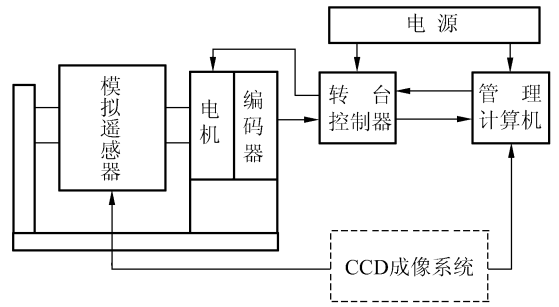


图 4 精密转台控制系统示意图

Fig. 4 Sketch on control system of the exactitude revolving platform

在主支承端,采用插入端方式定位,约束 5 个自由度,不约束绕轴心线转动的自由度,因此端定位精度高,刚度大,驱动与角位移测量精度高,可作为驱动与测量端,安装电机与编码器。经测试,主支承水平轴空载情况下晃动量均方根值为 $0.19''$,峰值为 $0.6''$,径向跳动量 $1.67 \mu\text{m}$,轴向窜动量 $1 \mu\text{m}$;加遥感器负载以后,晃动量均方根值为 $0.47''$,峰值为 $1.69''$,径向跳动量 $2.25 \mu\text{m}$,轴向窜动量 $1 \mu\text{m}$ 。

在辅助支承端,对在含轴心线平面内重力矩起支承作用,其它自由度不约束,或约束力较小,不对转台精度构成影响。在转台的主支承与辅助支承用高刚度底板联接,形成承受能力强的转台整体。在转台底板下安装 3 个调平组件,用于转台的水平调整,便于与分辨力黑白靶条对齐。主支承与辅助支承间轴系用 U 型板联接,U 型板上安放模拟遥感器。

3.2.2 转台控制管理方案

转台的控制管理由电源、转台控制器、电机、编码器与管理计算机组成,如图 4 所示。

转台控制器由 PMAC 卡、PMAC 卡控制软件、驱动器、驱动器控制软件构成;光电编码器电子学输出信号经过了 200 倍细分;精密电机,选用合适的转动惯量、转矩、转速及电流、电压的特性参数;电机接受管理计算机的指令,按规定速度转动,驱动转台。转台编码器输出转轴位置信号,反馈给转台控制器,由转台控制器检测二者之差,确定转台电机快转或慢转,然后达到指标要求的稳速精度。

3.2.3 转台的使用方案

模拟遥感器室外成像前,首先调好 TDI CCD 列方向与竖靶条的平行,然后装配调试转台,使其模拟卫星推扫的速度在 $\pm 5^\circ$ 的范围来回转动,其角速度为 $0.555^\circ/\text{s}$,转台控制精度为 0.3% 。

管理计算机输送给转台控制器的速度指令与给样机 CCD 成像系统的行频指令一致。当转台速度均匀性达到一定精度时,转台承载的模拟遥感器可与其 TDI CCD 行频速度匹配转动,最后可得到在 TDI CCD 列方向清晰的图像。

在转台研制时,已采用必要的措施保证 TDI CCD 的行方向与转轴轴心线平行。在转台形成推扫成像前,要调 3 个调平组件,使 TDI CCD 的列与分辨力靶条的像平行。

4 成 像

室外成像的实验条件汇总如下:

物距:2.784 km(ND-3 000 激光测距机, $\sigma = (5 + 3 \times 10^{-6})\text{mm}$)

遥感器焦距:1 m

TDI CCD 像元尺寸:13 μm

靶条宽度:36 mm

靶条对比度:12.5:1

转台速度:0.555 $^\circ/\text{s}$

转台精度:0.3%

在动态成像试验中,遥感器 0 视场与 ± 0.86 视场的 TDI CCD 组均获得成像较清晰的分辨力靶板图像,图 5 所示为 $+0.86$ 视场靶条像。靶条像宽度对应单个 TDI CCD 像元像如图 6 所示。

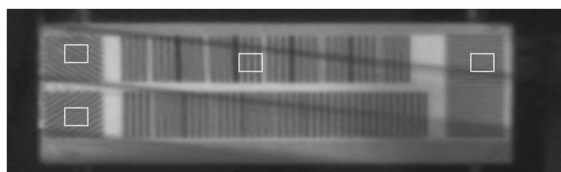


图 5 动态靶条像

Fig. 5 Dynamic bar target image



图 6d 横靶条对应 CCD 像元像

Fig. 6d Horizontal bar target corresponding to CCD pixel image



图 6a 右斜 45 度靶条对应 CCD 像元像

Fig. 6a Right tilted 45 degree bar target corresponding to CCD pixel image



图 6b 左斜 45 度靶条对应 CCD 像元像

Fig. 6b Left tilted 45 degree bar target corresponding to CCD pixel image



图 6c 竖靶条对应 CCD 像元像

Fig. 6c Vertical bar target corresponding to CCD pixel image

图 6 动态靶标像

Fig. 6 Dynamic bar target image

5 结 论

在外场动态成像实验中,在专门设计的精密转台上,模拟遥感器焦深内的景物成像清晰,0 视场与±0.86 视场的 TDI CCD 组均获得了分辨力靶板图像。以+0.86 视场获得的分辨力靶板图像为例,20 组竖靶条像中,每组为 4 黑 4 白靶条像,从第 1 组到第 20 组黑白靶条像的单组平均调制度分别为,0.06,0.09,0.04,0.10,0.18,0.14,0.09,0.10,0.11,0.08,0.12,0.06,0.08,0.12,0.11,0.13,0.11,0.08,0.06。

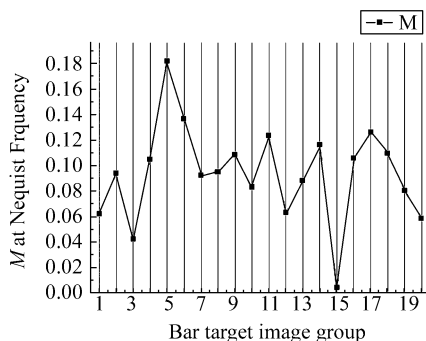


图 7 调制度曲线图

Fig. 7 Modulation graph

由调制度强弱特性对比可以看出,排序第 5、6、9、11、14、16、17、18 组的黑白靶条像对比度较高,目视靶条像清晰;第 3、10、12、15 组的黑白靶条像对比度较低,目视黑白靶条像分辨不清晰。

调制度最高的靶条像为第 5 靶条组,其 4 个黑靶条像的灰度平均值为 94,4 个白靶条像的灰

度平均值为 145, 则其调制度 M' 为 0.18。用分光光度计测出的原始靶条的调制度 M 为 0.85, 则可计算出 TDI CCD 光学遥感器的调制传递函数为 0.21, 此时黑白靶条与单个 TDI CCD 像元像形成的位错量最小。

调制度最低的靶条像为第 15 靶条组, 其 4 个黑靶条像的灰度平均值为 107, 4 个白靶条像的灰度平均值为 108, 其调制度 M' 为 0。用分光光度计测出的原始靶条的调制度 M 为 0.85, 则可计算出 TDI CCD 光学遥感器的调制传递函数为 0, 此时黑白靶条与单个 TDI CCD 像元像形成的位错量最大。

由 20 组靶条像的调制度强弱特性分布趋势, 可以验证采用 U 型精密转台具有一定位错关系

的奈奎斯特频率靶标的可行性。

在试验过程中, 模拟遥感器经常于 9 月中旬 16 时以后工作。在遥感器与目标靶间是城市复杂的大气条件。晴天时, 其工作条件相当于遥感器在 700 km 轨道上太阳高角为 9.2° 的工作环境, 此时 TDI CCD 工作级数选择为 48 级或 96 级, 成像获得的数据与遥感器理论分析的太阳高角 10° 、TDI CCD 96 级的信噪比分析数据基本一致, 验证了遥感器信噪比分析的正确性。此遥感器还在 9 月中旬 17 时以后的多云天气以及阴天薄雾中工作, 仍可获得像质较好的图像, 也充分验证了推扫型 TDI CCD 光学遥感器具有很高的辐射探测能力。

参考文献:

- [1] BICKNELL W E, DIGENIS C J, FORMAN S E. EO-1 Advanced land imager[J]. *SPIE*, 1999, 3750:80-88.
- [2] BRET-DIBAT T, ALBOUYS V, BERTHON J. Tests of a high resolution three mirrors anastigmatic telescope[J]. *SPIE*, 1999, 3870:126-137.
- [3] SHIMODA H. Japanese earth observation programs[J]. *SPIE*, 1999, 3870:37-48.
- [4] 佟首峰, 刘全国, 阮锦, 等. 推帚式 TDI-CCD 相机应用分析[J]. *光电工程*, 2001, 23 (1) :31-33.
TONG SH F, LIU J G, RUAN J, et al. An analysis for application technique of push-broom TDI-CCD imaging camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, 23 (1) :31-33. (in Chinese)
- [5] 陶家生. 基于模拟实验及计算机仿真的 CCD 航天相机影像分辨率的研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2003.9:26-39.
TAO J SH. *The study of imaging quality and resolution of CCD space camera base on model experiment and computer emulation*[D]. Ph. D thesis, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003:(9)26-39. (in Chinese)
- [6] 吴宏圣, 潘凝. TDI CCD 全景式航空相机的像移补偿误差分析[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(6):545-549.
WU H SH, PAN N. Image motion compensation error analysis for TDI CCD panoramic aerial camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(6):545-549. (in Chinese)
- [7] 杨秉新. TDI CCD 在航天遥感器中的应用[J]. *航天返回与遥感*, 1997, 18(3):15-18.
YANG B X. Application of TDI CCD in space image sensor[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 1997, 18 (3):15-18. (in Chinese)
- [8] HOST G C. *CCD Arrays cameras and displays*[M]. SPIE Optical Engineering Press, 1998:280-283.
- [9] 郝云彩. 线阵 CCD 相机试验室像质测试的配准方法研究[J]. *航天返回与遥感*, 1999, 9, 20(3):27-30.
HAO Y C. Research on the registration for image quality test in laboratory of the linear array CCD camera[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 1999, 9, 20(3):27-30. (in Chinese)

作者简介: 赵贵军(1968—), 男, 吉林扶余人, 现为中科院长春光学精密机械与物理研究所空间部在读博士研究生, 主要研究方向为空间光学遥感器综合像质评价及辐射定标。Email:Zhaogj999@126.com