

LMCCD 立体测绘成像设计

余 达, 刘金国, 周怀得, 龙科慧, 徐 东, 陈佳豫, 孔德柱

(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: 受现今轨道和姿态测量以及姿态控制精度的限制, 与传统三线阵立体测绘相比, 采用线面阵 CCD 阵列(LMCCD)测绘体制可提高全球无地面控制点立体测绘精度。详细介绍了 LMCCD 立体测绘体制下的传感器配置、时间延迟积分(TDI)工作方式及狭小空间线路板连接和 LMCCD 同步控制方法。经测试该相机能有效削减测轨、测姿误差, 满足无地面控制点 1:50 000 比例尺地图应用要求, 性能还可进一步改进提高。

关键词: 线面阵 CCD 阵列; 立体测绘相机; 无地面控制点; 时间延迟积分

中图分类号: TN386.5; P231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3393-04

Design of LMCCD stereo mapping imaging

Yu Da, Liu Jinguo, Zhou Huaide, Long Kehui,
Xu Dong, Chen Jiayu, Kong Dezhu

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

Abstract: Traditional three line array stereoscopic mapping is constrained by orbit determination precision, attitude determination and control precision. Compared with it, the line-matrix CCD array (LMCCD) camera structure can improve the global stereo mapping precision without ground control points (GCPs). The related subject in detail, which included sensor configuration of stereo mapping of LMCCD, TDI working mode, PCB connecting method in narrow space, time scale generation and LMCCD synchronous control was described. The tests indicate that the LMCCD mapping camera can effectively reduced orbit and attitude measurement error. It meets the requirements of 1:50 000 scale maps without GCPs, and the performance can be improved in future application.

Key words: LMCCD array; stereo mapping camera; without ground control points; TDI

收稿日期: 2015-03-13; 修订日期: 2015-04-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2008AA042410); 国家科技重大专项(2009ZX04014-093); 国家自然科学基金(61405191)

作者简介: 余达(1980-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事空间光学成像方面的研究。Email: ciompuyuda@163.com

0 引言

线阵面阵 CCD(LMCCD, Line-Matrix Array CCD) 立体测绘成像由国内学者提出并已成功应用, 实现了国内传输型立体测绘卫星零的突破, 可以向境内外用户提供三维几何定位中误差优于 15 m, 其中高程中误差为 5.8 m 的星测地面控制点, 供测制全球 1:50 000 比例尺地图、地球科学研究及遥感等应用, 在测绘领域发挥着至关重要的作用^[1]。王智等^[2]从像面结构、拼接、调焦、光学镜头和内方位元素角度对 LMCCD 相机进行了介绍。文中针对未来更高比例尺的测绘应用, 介绍行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作方式、狭小空间下线路板多排连接器的连接方法和线面阵 CCD 同步控制方法, 探讨多种摄像工作方式下多传感器同步、测试中出现的异常现象及原因和测绘精度改进方法。

1 LMCCD 无地面控制点立体测绘成像传感器配置

如图 1 所示, LMCCD 相机的原理是在三线阵 CCD 相机的基础上, 在正视线阵 CCD 的四角增加四片小面阵构成线阵面阵混合配置的相机。小面阵 CCD 可通过筛选测试提高各面阵 CCD 传感器间的一致性^[3], 其作用是获取联接点真像平面坐标, 使用 EFP 法时可以使诸多三角锁模型得到很好的整合, 从而显著地提高精度^[4]。

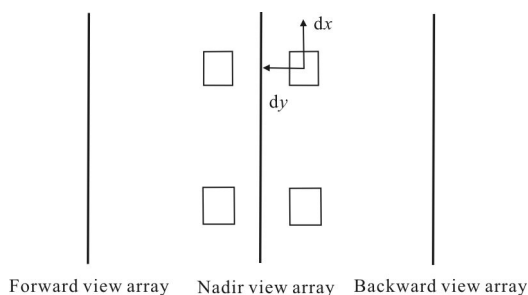


图 1 LMCCD 相机线阵面阵探测器配置

Fig.1 Placement of CCD sensors in LMCCD camera

2 LMCCD 立体成像实施

2.1 面阵 CCD 的 TDI 工作方式及线路板连接

传感器是光学遥感系统的重要组成部分^[5], 为保证 LMCCD 配置中面阵 CCD 接收足够的光能量, 采

用电子学控制方法, 在航天产品中首次实现了行间转移面阵 CCD 的 TDI 成像工作方式。如图 2 所示, 行间转移面阵 CCD 的 TDI 原理是每次把存储区内的感生电荷转移一行后再与下次感光区的电荷叠加^[6-7], 在时序控制上增加了 TDI 阶段, 然后将信号转移出来^[8]。

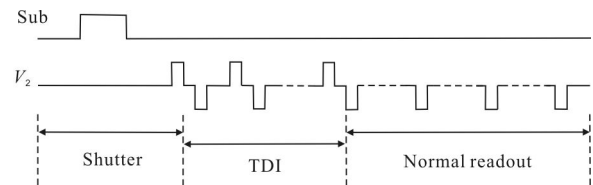


图 2 TDI 工作方式时序图

Fig.2 Sequence of TDI working mode

为实现与长筒状的光机结构匹配, 成像电路部分采用多层尺寸与光学镜筒口径相当的线路板叠层结构, 将所有的连接器都使用单排两芯和五芯连接器拼接组成。为保证航天应用的稳定可靠性, 提出了如图 3 所示使用耐高温的标准间距的插针工装和保护帽工装分别进行连接器上方和下方的二维位置限定, 使用直角工装对连接器的整体垂直度进行限定, 焊接时用先焊接单个管脚, 经试装调整好后再全部焊接的安装方法, 克服插装连接器二维拼接安装位置偏移的问题。

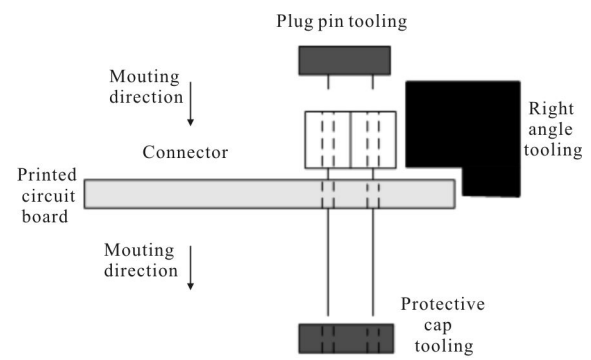


图 3 各工装和连接器的位置关系侧视图

Fig.3 Side view of position relationship between connectors

2.2 时间同步系统

2.2.1 传感器摄像时的时标产生

立体测绘卫星在推扫成像过程中, 由于三线阵图像传感器对同一地物的拍摄是在不同的时刻完成的, 且仅每行图像满足中心投影规律, 故需要精确记录每行图像拍摄时刻和对应的姿态信息。使用 GPS 接收机作为基准时钟源, 同时通过总线广播对应秒脉冲的 GPS 整秒时间, 测绘相机可由此精确计算出三线阵传感器每一行和面阵图像传感器每一帧的成

像时刻,并在输出图像数据的辅助数据里标出^[9]。

2.2.2 传感器间的同步

在 LMCCD 测绘体制中,面阵 CCD 用于摄取空中三角锁之间的联接点像平面坐标。按 EFP 法平差规定,每一短基线按十等分选定 EFP 时刻(定向时刻)。在推扫摄影过程中,三线阵 CCD 连续推扫成像,面阵只有在定向时刻成像。

卫星的平均速度为:

$$V_g = \sqrt{\frac{GM}{R+H}} \quad (1)$$

式中: G 为万有引力常数; M 为地球质量; R 为平均地球半径; H 为飞行器平均离地高度; V_N 为星下点的平均速度(地速)

$$V_N = V_g \frac{R}{R+H} \quad (2)$$

设三线阵采用相同的行周期, 正视相机的主距为 f , 则三线阵的行周期为:

$$t_{line,H} = \frac{b \times H \times (R+H)}{f \times R \times V_g} \quad (3)$$

式中: b 为线阵图像传感器的像元尺寸; 面阵图像传感器的行周期为:

$$t_{area,H} = \frac{c \times H \times (R+H)}{f \times R \times V_g} \quad (4)$$

式中: c 为面阵图像传感器的像元尺寸; 根据定向时刻摄像的原则, 面阵图像传感器的最佳帧周期为:

$$t_{area_frame_opt} = \frac{a \times H \times (R+H)}{10 \times R \times V_g} \quad (5)$$

式中: a 为三线阵相机的交会角。为实现线阵和面阵 CCD 的同步控制, 要求在轨的面阵的帧周期为线阵的整数倍, 而 $f \tan a / (10b)$ 的值通常不为整数, 若此时选取面阵的帧周期为线阵的固定整数倍, 会存在连续推扫成像过程中, 随着偏差的累计面阵的摄像时间偏离定向时刻过多而无法提取定向时刻线阵图像在面阵图像上的同名点的风险。

设定在定向时刻需要的面阵图像分辨率为 $m \times m$, 每次连续摄像的时间为 t_{hianxu} , 实际使用的面阵图像传感器分辨率为 $p \times q$, 其中 q 为沿推扫方向的分辨率。

(1) 当 LMCCD 相机采用间歇摄像工作方式, $n \leq$

$$\frac{f \tan a}{10b} < n + 0.5, \left(\frac{f \tan a}{10b} - n \right) \times \frac{t_{\text{hianxu}}}{n t_{line,H}} \times \frac{b}{c} < (q - m) / 2 - 1$$

时, 则面阵 CCD 的帧周期设置为 $n t_{line,H}$ 固定不变;

(2) 当 LMCCD 相机采用间歇摄像工作方式, $n +$

$$0.5 \leq \frac{f \tan a}{10b} < n + 1, \left(n + 1 - \frac{f \tan a}{10b} \right) \times \frac{t_{\text{hianxu}}}{(n + 1) t_{line,H}} \times \frac{b}{c} <$$

$$\frac{q - m}{2} - 1 \text{ 时, 面阵 CCD 的帧周期设置为 } (n + 1) t_{line,H} \text{ 固定不变;}$$

(3) 当面阵 CCD 处于非间歇摄像工作方式或者

$$\text{LMCCD 相机采用间歇摄像工作方式, } n \leq \frac{f \tan a}{10b} < n +$$

$$0.5, \left(\frac{f \tan a}{10b} - n \right) \times \frac{t_{\text{hianxu}}}{n t_{line,H}} \times \frac{b}{c} \geq \frac{q - m}{2} - 1 \text{ 或 } n + 0.5 \leq$$

$$\frac{f \tan a}{10b} < n + 1, \left(n + 1 - \frac{f \tan a}{10b} \right) \times \frac{t_{\text{hianxu}}}{(n + 1) t_{line,H}} \times \frac{b}{c} \geq \frac{q - m}{2} - 1,$$

则设选择的面阵帧周期为 $t_{area_frame,i}$, 其取值为 $n t_{line,H}$ 或 $(n + 1) t_{line,H}$, 对于不同的 i , 选取的原则是累计偏差

$$\left| \sum_i t_{area_frame,i} \times \frac{b}{c t_{line,H}} - (i + 1) \frac{f \tan a}{10c} \right| < \frac{q - m}{2} - 1 \quad (6)$$

3 测试

为对 LMCCD 相机的成像性能特别是 TDI 工作方式下的性能进行检测, 使用积分球进行了辐射定标试验, 图 4 和图 5 为三片线阵和四片面阵在单积分级数下的增益和响应度对应曲线。

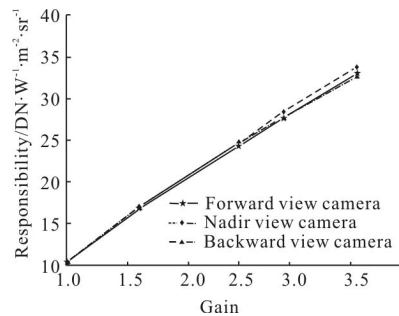


图 4 线阵 CCD 的增益与响应度的对应关系图

Fig. 4 Relationship between line CCD gain and responsibility

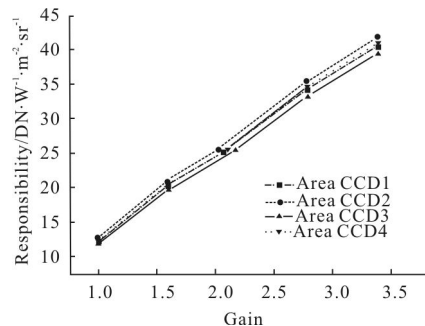


图 5 面阵 CCD 的增益与响应度的对应关系图

Fig. 5 Relationship between area CCD gain and responsibility

测试得到的面阵 CCD 的 TDI 工作方式下的灰度值和积分级数的对应关系如表 1 所示, 不同积分级数下的灰度值满足等比递增的规律, 但不满足灰度值为一级的级数倍关系。经分析, 由于 LMCCD 测绘体制工作特点和为降低面阵 CCD 信号转移对线阵 CCD 成像质量的影响, 面阵 CCD 电荷信号在存储区滞留时间极长, 导致了较严重的 smear 现象。

表 1 不同积分级数下的灰度值

Tab.1 DN in different intergration numbers

Integration number	1	2	3	4	5	6	7
DN	52.95	58.29	64	69.67	75.8	81	86.4

4 结论

在轨道和姿态测量以及姿态控制精度不高的情况下, 采用线面阵 CCD 阵列(LMCCD)立体测绘相机结构是实现全球无地面控制点的立体测绘有效方式。为进一步提高测绘精度, 可把各相机的时序产生和外部的时标产生模块集成到同一芯片中, 减少获取时标信息的延时和延时的不确定性; 为了满足在积分时间更短的测绘应用, 行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作方式输出信号需进行特殊的时序设计或者图像处理, 降低 smear 的影响。

参考文献:

- [1] Wang Guoliang, Liu Jinguo, Long Kehui, et al. Influence of image motion on image quality of off-axis TMA aerospace mapping camera[J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(3): 806–813. (in Chinese)
王国良, 刘金国, 龙科慧, 等. 离轴三反航天测绘相机像移对成像质量的影响[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 806–813.
- [2] Wang Zhi, Qiao Ke, Zhang Liping. Implementaion of LMCCD camera for stereo mapping satellite using three-line array CCDs[J]. *OME Information*, 2010, 27(11): 110–114. (in Chinese)
王智, 乔克, 张立平. 三线阵立体测绘卫星 LMCCD 相机的实现[J]. *光机电信息*, 2010, 27(11): 110–114.
- [3] Li Xiansheng, Wan Zhi, Liu Zexun, et al. Method of CCD test and screening for space camera with wide field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2245–2250. (in Chinese)
李宪圣, 万志, 刘则洵, 等. 大视场空间相机 CCD 性能测试及筛选方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2245–2250.
- [4] Wang Renxiang, Wang Jianrong, Wang Xinyi, et al. The satellite photogrammetric performance of LMCCD camera[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2004, 29 (4): 10–12. (in Chinese)
王任享, 王建荣, 王新义, 等. LMCCD 相机卫星摄影测量的特性[J]. *测绘科学*, 2004, 29(4): 10–12.
- [5] Liu Xiao, Yi Weining, Qiao Yanli, et al. Satellite borne optical remote sensor imaging simulation based on low-altitude remote sensing system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 217–225. (in Chinese)
刘晓, 易维宁, 乔延利, 等. 基于低空遥感系统的星载光学遥感器成像仿真[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 217–225.
- [6] Yu Da, Guo Yongfei, Zhou Huaide, et al. Design of high speed camera system with area-CCD KAI-0340DM [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2791–2799. (in Chinese)
余达, 郭永飞, 周怀得, 等. 面阵 CCD KAI-0340DM 高速相机的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2791–2799.
- [7] Yu Da, Zhou Huaide, Li Guangze, et al. TDI three-line pattern Based on Area-CCD KAI-1010 [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(11): 2980–2984. (in Chinese)
余达, 周怀得, 李广泽, 等. 基于面阵 CCD 芯片 KAI-1010M 的 TDI 三线阵工作方式 [J]. *光子学报*, 2009, 38(11): 2980–2984.
- [8] Li Yapeng, He Bin, Fu Tianjiao. Design of imaging system of interline area CCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2602–2606. (in Chinese)
李亚鹏, 何斌, 付天骄. 行间转移型面阵 CCD 成像系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2602–2606.
- [9] Zhu Hong, Liu Weijia, Zhang Aibing. Overview and development trend of optical remote sensing stereo mapping techniques[J]. *Modern Radar*, 2014, 36(6): 6–12. (in Chinese)
朱红, 刘维佳, 张爱兵. 光学遥感立体测绘技术综述及发展趋势[J]. *现代雷达*, 2014, 36(6): 6–12.