

单镜头两视角同轨立体成像、TDI CCD 自推扫和速高比补偿

——嫦娥二号 CCD 相机技术

赵葆常 汶德胜 杨建峰 高 伟 常凌颖 薛 彬 宋宗玺

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要 介绍了嫦娥二号卫星有效载荷 CCD 立体相机中单镜头两视角同轨立体成像、时间延迟积分(TDI)CCD 自推扫和速高比补偿的综合技术方案。它在国际上首次采用两线阵 TDI CCD 自推扫实现对月面的高分辨率同轨立体成像。TDI CCD 在自推扫成像中必须保持图像在 TDI CCD 焦平面上的运动速度与电子潜像运动速度同步,为此采用了地面行频注入与激光高度计辅助行频计算两种速高比补偿技术,同时通过光机电总体优化设计,精心制作与装配,使相机发射前整机(光、机、电和 TDI CCD)全视场调制传递函数(MTF)检测值均在 0.4 以上,从而大大放宽了在轨速高比补偿的精度要求。由于多方面技术措施的综合应用,TDI CCD 立体相机不但在 100 km 圆轨上获得了地元分辨率为 7 m 的全月面清晰影像图——迄今为止国际上最高地元分辨率的全月清晰图像,同时在 15 km×100 km 椭圆轨道近月弧段获得了虹湾地区分辨率约为 1.3 m 的清晰局域同轨立体图像,使我国在对月高分辨率成像中进入国际先进水平。

关键词 嫦娥二号卫星; 同轨立体成像; 速高比补偿; 在轨图像

中图分类号 TH761.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900115

Two Bore-Sight Stereo Mapping with Single Lens, TDI CCD Pushing Model Imaging and Compensations of the Speed-to-Height Rate

——Chang'e-2 CCD Camera

Zhao Baochang Wen Desheng Yang Jianfeng Gao Wei Chang Lingying
Xue Bin Song Zongxi

(Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract The synthetic technical option of two bore-sight stereo mapping with single lens, the time delayed and integration (TDI) CCD pushing model imaging and the compensations technique of the speed-to-height rate of Chang'e-2 satellite TDI CCD stereo camera is proposed. It is the first time to employ two TDI CCD as imaging sensors and obtain clear image with high spatial resolution. In order to keep the synchronism between the optical image motion speed on the focal plane array (FPA) and the electronic latent image motion speed during pushing imaging with TDI CCD camera, two speed-to-height rates compensation methods are used: line frequency injection from the ground station and laser altimeter aided line frequency calculation. The camera's mean modulation transfer function is bigger than 0.4 which is tested before the launch. Because of the optimal design, careful fabrication and precise installation, accuracy requirement of on-orbit speed-to-height rate compensation is relaxed. Because technical measures are synthetically used in TDI CCD camera, clear stereo images of the global lunar surface with resolution of 7 m, the highest spatial resolution global images, and the clear images of Sinus Iridum with about 1.3 m resolution on the near-moon-arc of the 15 km×100 km ellipsoid orbit are both obtained. The capability of obtaining high spatial resolution stereo imaging of lunar surface is achieved.

Key words Change-2 satellite; stereo imaging on the same orbit; compensation of the speed-to-height rate; image on orbit

OCIS codes 110.6880; 220.3620; 220.4830

收稿日期: 2011-07-27; **收到修改稿日期**: 2011-08-01

作者简介: 赵葆常(1939—),男,研究员,博士生导师,探月工程光学系统主任设计师,探月工程专家组成员。是我国最早从事高速摄影技术研究及高速摄影仪研制的科技人员之一,参加了间歇式、棱镜补偿式和转镜式高速摄影测量仪的研制,近 10 年间主要从事月球光学遥感探测。正式发表论文 170 余篇,获国家及省部级奖励 12 项,参与两本专著编写,授权发明专利 8 项。E-mail: bczhao@opt.ac.cn

1 引 言

嫦娥一号卫星 CCD 立体相机于 2007 年已经获取了全月面清晰的立体图像。但是它的地元分辨率为 $120\text{ m}^{[1,2]}$ 。日本与印度于 2007 年和 2008 年发射的探月卫星所搭载的立体相机虽然没有获取全月面图像,但地元分辨率都约为 $10\text{ m}^{[3,4]}$ 。美国于 2009 年发射了一颗月球探测轨道器(LRO),所搭载的窄视场相机地元分辨率达到 $0.5\sim 1.5\text{ m}$ (依据轨道高度而变),但它是一台平面相机,无同轨立体成像功能^[5]。与国际同类相机相比,嫦娥一号卫星 CCD 立体相机在地元分辨率这一指标上算不上先进。

从实际应用角度来分析,嫦娥一号卫星 CCD 立体相机所获取的图像中,只能发现月球较大尺度(百米量级)的月坑和环形山系,以月坑为例,直径为 360 m 的月坑,在嫦娥一号的影像中表现为一点一环,所有尺度小于它的细节都无法发现,这样的分辨率对月球科学家研究月球的精细地形地貌与地质学构造而言显然是不够的。同时我国的嫦娥三号卫星任务中将把着陆器与月球车降落在月球表面以实现就位探测。月球科学家已初步选定月球的虹湾地区为着陆区,为使其降得平稳,落得安全,要求嫦娥二号卫星 CCD 立体相机除完成 100 km 圆轨全月成像任务外,还要在 $15\text{ km}\times 100\text{ km}$ 椭圆轨道近月弧段获得虹湾地区地元分辨率优于 1.5 m 的详查立体图像,这

表 1 嫦娥二号 CCD 立体相机设计参数与任务要求对比表

Table 1 Design parameter and requirement of Chang'e-2 CCD stereo camera

	Design Parameter		Requirement	
	100 km	15 km×100 km	100 km	15 km×100 km
	circular orbit	ellipsoid orbit	circular orbit	ellipsoid orbit
Resolution of object surface /m	7	1.05	<10	<1.5
Imaging width of lunar surface /km	43	6.45	≥43	>6

根据任务要求与图像传感器参数,光学系统参数为^[6]:焦距 $f'=144.3\text{ mm}$ (对应 100 km 圆轨地元分辨率 7 m , $15\text{ km}\times 100\text{ km}$ 椭圆轨道近月弧段地元分辨率 1.05 m);相对孔径为 $F/9$;全视场角为 42° (对应 100 km 圆轨月表成像宽度 43 km 、基高比 0.45 及 $15\text{ km}\times 100\text{ km}$ 椭圆轨道近月弧段月表成像宽度 6.45 km);波长 λ 范围为 $450\sim 520\text{ nm}$;量化等级为 8 bit ;前视角为 8° ,后视角为 17.2° ;基高比不小于 0.45 (前视与后视间)。本方案的设计指标均满足、甚至优于任务要求。

光学系统为六组七片型、非远心,如图 1 所示,由此产生视场边缘像面照度的下降通过 TDI CCD 12 个输出通道的电子学增益调整得到改善,其白光

就是在时间和经费都十分紧张的情况下要为嫦娥二号卫星重新研制一台新的 CCD 立体相机的原因。

2 嫦娥二号卫星 CCD 立体相机总体简介^[6,7]

2.1 任务要求

科学目标是在 100 km 圆轨上具有获取地元分辨率优于 10 m 的全月面立体成像的功能,为达到一次覆盖就能获取全月面立体影像的能力,要求月面成像幅宽大于等于 43 km 。工程目标是在 $15\text{ km}\times 100\text{ km}$ 椭圆轨道近月弧段上具有获取地元分辨率优于 1.5 m 的局域立体成像能力,月面成像宽度大于 6 km 。

虹湾地区位于月球雨海的西北角,为一呈半圆状的盆地,中心位于北纬 44.1° ,月表为低反照的月海,反照率约为 0.05 ,要求当卫星轨道面与太阳光照射方向间的交角 $\beta=45^\circ$ 时,实施照相,照相时间不超过一个半地球日。

2.2 设计指标与结果

选用时间延迟积分(TDI CCD)作为图像传感器,像元数为 6144 ,像元尺寸为 $10.1\ \mu\text{m}\times 10.1\ \mu\text{m}$,共有 96 级,可分为 $16,32,48,64$ 和 96 级 5 档输出,每块 TDI CCD 有 12 个通道,每个通道含 512 pixel ,共 6144 pixel 。

嫦娥二号 CCD 立体相机设计参数与任务要求对比如表 1 所示,同时要求基高比大于 0.45 。

调制传递函数(MTF)如图 2 所示。

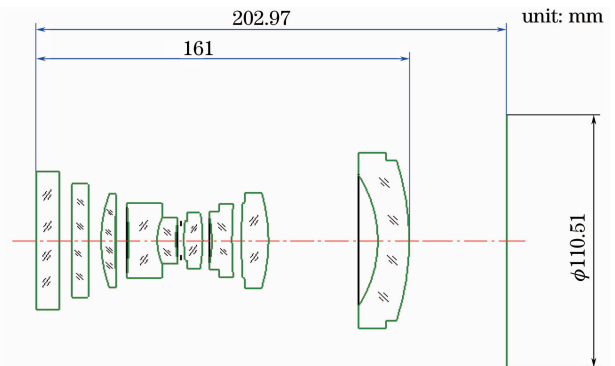


图 1 嫦娥二号卫星 CCD 立体相机光学系统图

Fig. 1 Structure diagram of Chang'e-2 lunar satellite CCD stereo camera optical system

表 2 所示的设计结果表明,前视角为 $8^{\circ}\sim 14.4^{\circ}$,全视场平均 MTF 为 0.68,后视角为 $17.2^{\circ}\sim 21^{\circ}$,全视场 MTF 为 0.66,均接近衍射极限 MTF 值 0.7。

图 3 所示的相机总重量小于 10 kg,总功耗约为 63 W。

表 2 CCD 立体相机前、后视 MTF 值
Table 2 MTF of fore sight and back sight

Field of view		MTF	Meridian	Sagittal	Mean
Fore sight $+8^{\circ}$	8°		0.6401	0.6744	meridian mean: 0.674
	10°		0.6787	0.7098	
	12°		0.6906	0.6969	mean of two directions: 0.679
	14.4°		0.6847	0.6579	
Back sight -17.2°	17.2°		0.6689	0.6479	meridian mean: 0.656
	18.2°		0.6613	0.6706	
	19.2°		0.6526	0.6924	mean of two directions: 0.663
	21°		0.6412	0.6675	

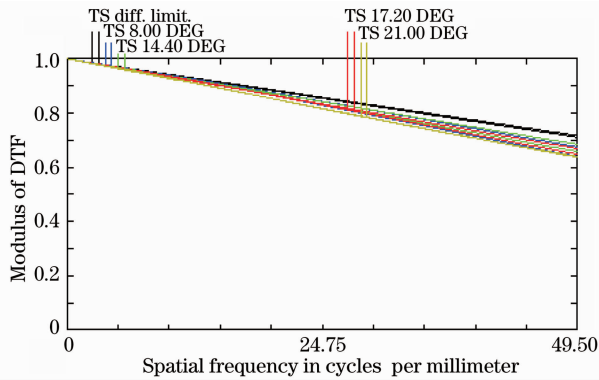


图 2 CCD 立体相机白光 MTF 曲线
Fig. 2 MTF of optical system

的地元分辨率大幅度提高,导致数据量激增,而卫星传输速率有限,造成工程实施困难,嫦娥一号与嫦娥二号 CCD 立体相机的摄影频率为

$$\nu = v_e / d_{GSD}, \quad (1)$$

式中 v_e 为卫星的地面速度,对嫦娥一号与二号,它们分别为 1.427 及 1.556 km/s(100 km 圆轨); d_{GSD} 为地元分辨率,对嫦娥一号与二号分别为 120 及 7 m(100 km 圆轨)和 1.05 km(15 km \times 100 km 椭圆轨道近月弧段),因此嫦娥一号 CCD 立体相机的帧频约为 12 Hz,而嫦娥二号为 222 Hz。而 CCD 立体相机的数据率为

$$Q_s = IN\nu b, \quad (2)$$

式中 I 为视角数,即线阵的个数,均为 3; N 为每个视角(每行 CCD)上的像元数; ν 为帧(行)频; b 为量化等级,则对嫦娥一号 CCD 立体相机 $Q_s = 0.144$ Mb/s,而嫦娥二号激增为 32.74 Mb/s,即嫦娥二号比嫦娥一号在单位时间内产生的数据量增加 227 倍,在数据压缩率为 8 倍及最大传输速率 12 M 的条件下,仍无法满足要求,为此减少一个视角,变成两视角立体成像模式,数据速率变为 21.83 Mb/s,仍比嫦娥一号增加 151 倍。

3.2 两视角立体成像论证

为了平衡基高比与正射图像质量间的矛盾,嫦娥二号 CCD 立体相机选取了前视 8° 、后视 17.2° 的方案,前视 8° 照顾了正射图像的要求,这时基高比正好为 0.45。图 4 为嫦娥一号与嫦娥二号 CCD 立体相机焦平面配置图。

嫦娥一号为三线阵,前、后视与正视间夹角为 $\pm 16.7^{\circ}$,基高比为 0.6。嫦娥二号为二线阵,前、后视间夹角为 25.2° ,基高比为 0.45。为实现二视角



图 3 CCD 立体相机外形照片
Fig. 3 Picture of CCD stereo camera

3 两视角立体成像

3.1 采用两视角立体成像的原因

在通常的 CCD 立体测绘相机中,多采用三线阵(三视角)立体成像模式,这样既可以做到大的基高比,又可以获得清晰的正射图像。正射图像的探测器(又称为星下点,它的光轴指向月心)总是位于光学系统视场的中心部分,所以它容易获得好的图像质量,而前、后视分布在正视视轴的两侧,常取对称分布配置。在嫦娥二号卫星中,由于 CCD 立体相机

立体重构^[8],根据立体测绘中共线方程:

$$\begin{aligned} x_t &= -f \frac{a_{1t}(X_j - X_s) + b_{1t}(Y_j - Y_s) + c_{1t}(Z_j - Z_s)}{a_{3t}(X_j - X_s) + b_{3t}(Y_j - Y_s) + c_{3t}(Z_j - Z_s)}, \\ y_t &= -f \frac{a_{2t}(X_j - X_s) + b_{2t}(Y_j - Y_s) + c_{2t}(Z_j - Z_s)}{a_{3t}(X_j - X_s) + b_{3t}(Y_j - Y_s) + c_{3t}(Z_j - Z_s)}, \end{aligned} \quad (3)$$

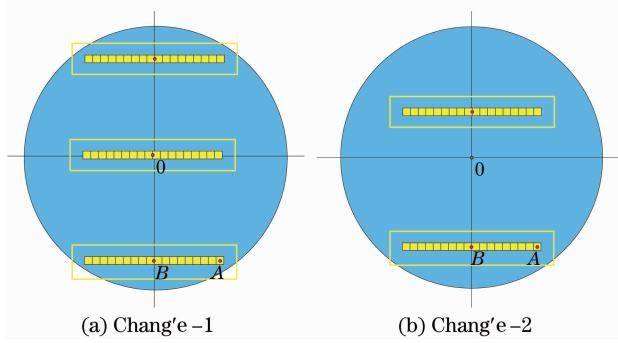


图 4 CCD 立体相机焦平面配置图

Fig. 4 Schematic diagram of focal plane of CCD stereo camera

式中 f 为 CCD 立体相机的主距,由相机研制方给出; X_j, Y_j 和 Z_j 为月面上某一点 j 在月心坐标系中的坐标位置,与拍摄时间 t 无关,也是要求解的未知数; X_s, Y_s 和 Z_s 为在同一月心坐标系中在时刻 t (前视与后视有不同的 t 值)的摄站(卫星)坐标位置,它由精密测轨得到; $a_{1t}, a_{2t}, a_{3t}, b_{1t}, b_{2t}, b_{3t}$ 及 c_{1t}, c_{2t}, c_{3t} 是与 X_s, Y_s 和 Z_s 的时刻 t 相对应的摄站(卫星)三个轴的角元素 $\varphi_{it}, \omega_{it}$ 和 k_{it} 所构成的 9 个方向余弦,由卫星姿态的精密测量得到,而 x_t 和 y_t 为在时刻 t 相应的目标点 j 的像点坐标位置,由图像处理得到。为了把(3)式表示为未知量 X_j, Y_j 的函数,(3)式可改写为

$$\begin{aligned} X_j &= \left(\frac{a_{1t}x_t + a_{2t}y_t - a_{3t}f}{c_{1t}x_t + c_{2t}y_t - c_{3t}f} \right) (Z_j - Z_s) + X_s, \\ Y_j &= \left(\frac{b_{1t}x_t + b_{2t}y_t - b_{3t}f}{c_{1t}x_t + c_{2t}y_t - c_{3t}f} \right) (Z_j - Z_s) + Y_s. \end{aligned} \quad (4)$$

嫦娥二号在卫星 100 km 圆轨时,前、后视视轴与月面交点的距离约为 45 km,卫星前视对 j 点的成像时刻与后视对同一 j 点的成像时刻间相差约 29 s,把前视 8° 及后视 17.2° 对 j 点成像时像点坐标位置 x_t 和 y_t ,以及卫星坐标位置 X_s, Y_s 和 Z_s 及 9 个同样与时间相关的方向余弦值代入(4)式,即可写出 4 个联立方程,用最小二乘法求解月面物点 j 的坐标位置 X_j, Y_j 和 Z_j 。

在立体重构中,同名点的配准是十分重要的,即前视的像点 x_f, y_f 与后视的像点 x_b, y_b 应该是对应于月面的同一物点 j ,它会严重影响所求 Z_j 值的

确定度,在处理上开始用卫星测量参数作为初配准,在此基础上用图像处理进行精密配准。但即便这样,前、后视在同名点配准中还是会残留一定的误差 σ_ρ , l 为月面反照率,高程精度 Z_j 的不确定值为

$$\Delta Z_j = \sqrt{2} \frac{d_{\text{GSD}} \sigma_\rho H}{B}, \quad (5)$$

式中 B 为基线长度, H 为高度, B/H 为基高比,对应嫦娥一号与二号分别为 0.6 及 0.45 (与轨道高度无关),设 σ_ρ 为 1,由(5)式可见, ΔZ_j 的值与 d_{GSD} 成正比,而与基高比 B/H 成反比,亦即当 d_{GSD} 相同时,基高比 B/H 较大时 ΔZ_j 就较小,这就是在 CCD 立体相机设计中,要把基高比作为一项重要指标的原因。以嫦娥二号 100 km 圆轨为例,前、后视视轴与月面交点在飞行方向上的距离为 45 km,卫星高度为 100 km,基高比为 0.45,而嫦娥一号为 0.6。从像方看,基高比为前视视角 ω_f 与后视视角 ω_b 正切值之和:

$$B/H = \tan \omega_f + \tan \omega_b. \quad (6)$$

在嫦娥一号中, $|\omega_f| = |\omega_b| = 16.7^\circ$,而在嫦娥二号中 $\omega_f = 8^\circ$,而 $\omega_b = 17.2^\circ$,同样可以得到基高比分别为 0.6 及 0.45。因此嫦娥一号与嫦娥二号 CCD 立体相机所能达到的 Z_j 之不确定度分别为 282.84 和 3.1 m (15 km \times 100 km 椭圆轨道近月弧段), 22 m (100 km 圆轨)。

当采用单镜头立体成像时,与平面相机相比,光学系统的视场角会大幅增加,以嫦娥二号 CCD 立体相机为例,若不要求立体成像功能,则对月面成像宽度为 43 km,轨道高度为 100 km,相机视场角为 24° ,而要求基高比为 0.45 的立体成像功能后相机视场角迅速扩大到 42° ,这给光学设计带来一定困难。

4 TDI CCD 自推扫与速高比补偿

4.1 选择 TDI CCD 的理由

根据设计指标, CCD 立体相机在 15 km \times 100 km 椭圆轨道近月弧段上的地元分辨率约为 1 m,因为采用自推扫模式成像,所以它最大的曝光时间为

$$t_{\text{max}} = d_{\text{GSD}} / v_e, \quad (7)$$

(7)式为(1)式的倒数,对虹湾地区 1 m 的地元分辨

率成像时 $t_{\max} \leq 0.6 \text{ ms}$, 而且虹湾地区属低反照的月海 ($\rho=0.05$), 位于北纬 44.1° , 照相时的光照条件也并不理想, 卫星轨道面与太阳光照射方向间夹角约为 45° , 所以太阳高度角约为 30° (相当于入射角 60°)。按月球光度模型计算^[9], 即便光学系统相对孔径增大到 $F/4$, 工作波段扩大到 $500 \sim 800 \text{ nm}$ (这时光学系统已十分复杂, 尺寸与重量都很大), 采用线阵 CCD 仍无法达到最低信号强度要求 (设定为 40 DN , DN 为输出数字量单位)。日本学者的论证与本课题组的结论一致, 认为在 100 km 圆轨上, 要达到 10 m 的地元分辨率的全月立体成像, 这时允许的曝光时间为 6.4 ms , 但采用线阵 CCD 仍达不到设计要求, 只能限制在月球南北纬 60° 间区域, 这是因为要实现同轨立体成像, 在两个视角上的图像都要达到要求的最低信号强度, 而根据月球光度模型, 两者不能兼顾。印度学者的论证也同样说明问题, 他们认为在极区, 地元分辨率会下降到 160 m , 这时允许的曝光时间为 100 ms 。而美国的 LRO 除采用灵敏度很高的线阵 CCD 及很高的量化等级外, 相机只有一根视轴, 从而避开两条视轴间信号强度上的矛盾, 在两次覆盖时采用不同的卫星姿态实现异轨立体成像。同时美国的相机没有全月覆盖的要求, 而嫦娥二号还要求在 100 km 圆轨上实现全月立体成像, 从而又对相机增加一个约束条件, 即在 100 km 圆轨, 7 m 地元分辨率 (曝光时间为 4.6 ms) 时对赤道附近具有最高反照率的月面 ($\rho=0.25$) 在相机调到 16 级, 1 倍电子学增益时, 相机的输出不能产生饱和, 它与 15 km 对虹湾地区的成像信号强度相差 70 倍, 所以嫦娥二号 CCD 立体相机是一台具有高探测灵敏度 (由对虹湾的低反照高分辨率成像所致) 和大动态范围 (由 100 km , 赤道附近高反照区 7 m 地元分辨率成像不饱和要求所致) 的相机。据此认为采用 96 级 TDI CCD 是科学合理的选择, 而且由预估表明它可以满足动态成像范围的要求^[7]: 对 100 km , 赤道附近, 具有最高反照率的目标辐亮度, CCD 立体相机前视中心像元的输出调整到 250 DN , 而对虹湾地区的成像仍保持在 40 DN 的输出 (因为总噪声约为 1 DN , 所以信噪比约为 40), 则 96 级, 2 倍电子学增益与 16 级, 1 倍电子学增益之比为 12 倍, 而 $250 \text{ DN}/40 \text{ DN}=6.25$ 倍, 两者共可以产生 75 倍的动态范围, 说明它可以满足任务要求。且已被在轨图像的灰度值所证实。

4.2 TDI CCD 工作模式

图 5 所示的 TDI CCD 的成像模式同线阵 CCD

相机, 依靠卫星相对于月球的相对运动, 以自推扫模式成像, 它允许的最大曝光时间由 (7) 式确定。

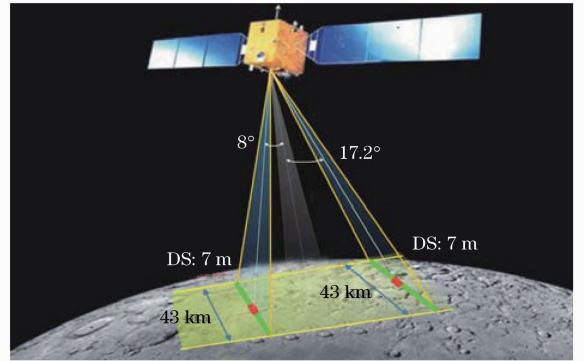


图 5 嫦娥二号卫星 CCD 立体相机在轨成像模式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of Chang'e-2 lunar satellite CCD stereo camera

4.3 速高比补偿

采用 96 级的 TDI CCD 相当于有 96 台线阵 CCD 相机以时间序列依次对月面的同一条带成像, 然后把 96 张图像的信号强度累加, 以虹湾地区成像为例, 因为一条线阵 CCD 的曝光时间仅为 0.6 ms , 96 级线阵 CCD 的连续成像叠加相当于一台线阵 CCD 的曝光时间放大 96 倍, 即 57.6 ms , 因此采用 TDI CCD 后, 即使单线阵 CCD 曝光时间很短, 目标很暗, 仍然可以得到合适的曝光量。

但是要把 96 台线阵 CCD 相机获得的图像叠加, 而又使叠加合成后的图像仍然保持与单台线阵 CCD 几乎同样的清晰度就必须满足如下条件: 目标光学图像在 TDI CCD 焦平面上的运动速度与 TDI CCD 电子学潜像的运动速度同步, 事实上由于卫星在轨运动的轨道高度与速度都在随机变化, 而且月面的地形有高有低, 它们都使得目标光学图像在 TDI CCD 焦平面上的运动速度不断发生变化, 这时如果根据图像的运动速度变化同步改变电子学潜像的运动速度, 就可以使两者重新获得同步, 这样的技术称为速高比补偿技术。为事先预知目标像的运动速度之变化, 嫦娥二号卫星 CCD 立体相机采取了地面行频注入和激光高度计辅助行频计算两种技术措施。

4.3.1 地面行频注入

其原理是根据地面测控系统对现今卫星的实际轨道参数 (称为轨道根数) 进行精密测量, 根据测量数据, 由地面计算机计算今后任一时刻卫星的高度与速度, 这实际上是一种轨道外推技术。同时根据月球的地形地貌高程电子数据 (高程电子地图), 查出在任一时刻卫星星下点的高程平均值。两者都以月球归化半径 1738 km 的标准球面作为基准, 这样

就可以计算出目标像的运动速度。同时要求在 t 时刻电子潜像的运动速率与目标像的运动速度相等,由此计算出 t 时刻的 TDI CCD 电子学行频。预报时间可以为 24 和 48 h,甚至 72 h,把预报时间段内的行频数据打包,通过地面指令提前注入星上相机,CCD 相机到时按上传指令实时调整行频值,从而达到同步。但事实上会引入多方面的误差,主要有:精密测轨误差、外推误差和月球高程均值残差。月球高程平均残差是因为 CCD 立体相机成像时都有一定的成像宽度,在 100 km 圆轨时为 43 km,在 43 km 的长度方向上地形会有起伏,而行频变更也有一个时间间隔,在该时间间隔内,卫星会飞过一段距离,因此若使由两者决定的一个长方形区域内的高程以单一的均值来代表,当然它将引入误差。外推误差与外推时间间隔相关,外推时间越长,误差越大。

为了减小长管期间地面人员的工作量,方案初期曾考虑,计算工作在星上闭环完成,把电子高程地图也存在星上计算机存储器内,但经论证后,认为星上硬件很难支撑如此大的电子地图存储量,而改为由地面计算,打包上传的方案,这样地面人员每天都需投入一定的值守时间。嫦娥二号卫星 CCD 立体相机的速高比补偿就是采用该模式完成的,而且在轨图像表明效果理想。

4.3.2 激光高度计辅助行频计算

由于嫦娥二号卫星中有一台激光高度计,它以每秒 1~5 个脉冲实时测量卫星到星下点间的距离,而地速值仍由卫星精密测定轨得到,并通过数据指令注入打包上传到星上相机。因为在速高比补偿中,地速值影响较小,所以它的上传数据量很小,星上计算机根据激光高度计的数据与由地面提前上传的地速数据实时计算行频,实现速高比补偿。该方案的优点是激光高度计与 CCD 立体相机在星上闭环,激光高度计数据直传相机而不经地面,从而使地面人员工作量大大减小,同时激光高度计的测高精度可优于 10 m,但由于星上没有电子地图,所以没有把月面起伏的影响考虑在内。这种方案对虹湾地区成像可以达到很好的补偿效果,因为虹湾地区是一个大平原,月面起伏很小,而且它的成像宽度仅为 6 km 左右。

与采用 TDI CCD 的地球卫星相比,月球卫星有诸多不利因素,主要有:1) 月球卫星轨道高度低,轨道起伏大,以嫦娥二号卫星为例,在 100 km 圆规时,轨道起伏 ± 15 km,百分值为 $\pm 15\%$,在 $15 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 椭圆轨道上,标称轨道为 15 km,轨道起伏 ± 5 km,轨道起伏百分值为 $\pm 33\%$,而地球卫星轨

道都很高,多数在 500 km 以上,所以轨道起伏的百分误差都很小,而速高比误差与轨道起伏的百分值相关;2) 月球地形地貌起伏比地球大,月球现有的电子高程图精度比地球低,地球表面最高峰与最低谷相差不到 10 km,而月球达 20 km (± 10 km),地球有精度达米级的高程图,而月球高程图精度低约 2 个数量级;3) 地球卫星的测轨可借助全球定位系统(GPS),卫星位置不确定度达到米级,而月球卫星没有这个条件。

因此,月球卫星达不到地球卫星的速高比补偿效果,地球卫星速高比补偿残差一般小于 1%,而月球卫星大很多倍,速高比补偿不完全,留有一定的残差,它的主要危害是降低沿飞行方向上的 MTF,为此优化设计了光机电总体以保证 MTF。

5 光机电总体优化设计

月球卫星即使采用速高比补偿技术,其预期的补偿残差也会比地球卫星大,它将降低沿飞行方向相机的 MTF,为此优化设计了相机,使相机发射前检测 MTF 全视场达到 0.42。按保守的判断标准 MTF 达到 0.2 就可以满足工程需求,将它提高一倍以上,从而为在轨速高比补偿的残差预留很大的设计裕度。

因为月球表面在可见光波段内没有对波长的选择性反射特性,而项目又要求优化相机设计,所以根据 TDI CCD 的对比传递函数(CTF),MTF 为 CTF 的 $\pi/4$ 倍,对波长的关系曲线,把工作波长范围向短波方向移动,取为 450~520 nm,这时 TDI CCD 的 MTF 均值可达 0.7 左右,而当波长长于 520 nm 时,TDI CCD 的 MTF 值快速下降,TDI CCD 相机的 CTF 随波长 λ 变化的曲线如图 6 所示。同时短波还有利于光学系统衍射 MTF 的提高,两者的综合因素加上

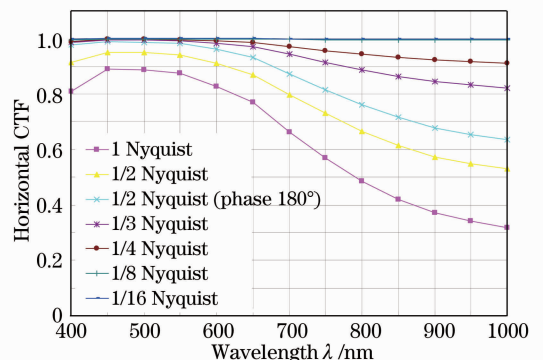


图 6 TDI CCD 的 CTF 随波长 λ 变化的曲线

Fig. 6 Horizontal CTF value of TDI CCD versus λ

精心制作与装配使发射前检测整机(光、机、电和 CCD 器件)的 MTF 值在全视场内,两个方向上都达到 0.42 (光学系统的设计 MTF 如表 2 所示)。

6 CCD 立体相机获取的代表性原生图像

由于在国际上对月高分辨率同轨立体成像中,首次采用了 TDI CCD 技术,并且解决了由此引发的诸多技术难点,嫦娥二号卫星 CCD 立体相机圆满完成了工程目标与科学目标。

所谓原生图像是指没有经过边缘增强、噪声滤波、对比提升等图像数据处理的在轨直传图像,它们较客观地反映了相机的内在品质,所谓“代表性”是指成像难度大(如虹湾地区)、地形地貌较为丰富、人眼视觉效果较好。

6.1 在 15 km × 100 km 椭圆轨道近月弧段获取的图像

由于卫星在 15 km × 100 km 椭圆轨道上生存时间较短,相机实际只能有一个半地球日的拍照时间,所以只获取 16 轨图像,而且每轨的开机时间仅为 1 min 左右,所以每轨仅获取月表尺寸宽约 6.5 km,长约 100 km 的条带形图像,而且虹湾地区多为平原,地形地貌起伏小,影响视觉效果。但从获取的图像来看,它仍非常清晰。

根据设计指标,在 15 km × 100 km 椭圆轨道近月弧段上的轨道高度为 15 km,这时它的地元分辨率为 1.05 m,但实际照相时卫星距月面的距离为 18.7 km,它的地元分辨率约为 1.3 m。图 7 为 CCD 立体相机获取的虹湾地区首幅图像,图 8 为用

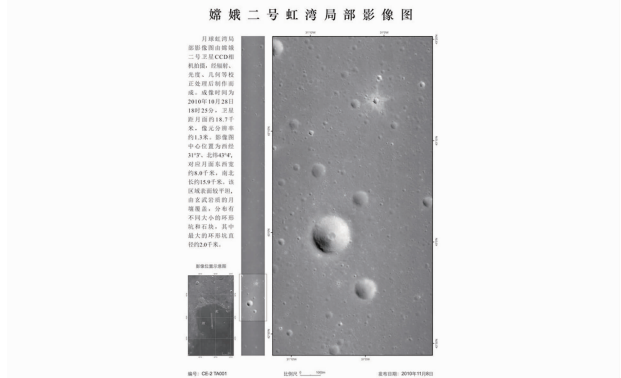


图 7 嫦娥二号卫星 CCD 立体相机获取虹湾地区的首幅月面影像

Fig.7 Part image of lunar Sinus Liridum obtained by Chang'e-2 lunar satellite CCD stereo camera on 15 km × 100 km elliptical orbit

相机前视、后视合成的拉普拉斯 A 月坑的三维立体图像。

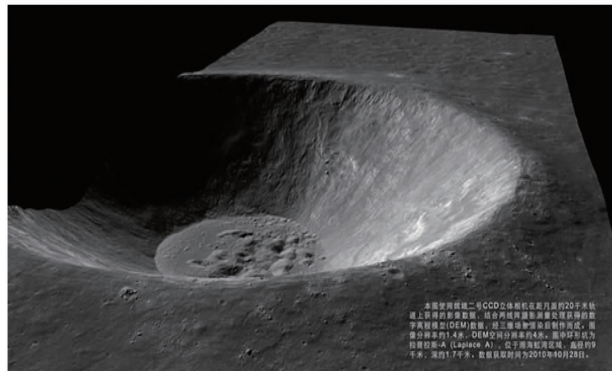


图 8 在 15 km × 100 km 椭圆轨道得到的拉普拉斯-A 的三维景观图

Fig.8 Laplace-A 3D image on 15 km × 100 km elliptical orbit

6.2 在 100 km 圆轨上获取的图像

相对于虹湾地区,在 100 km 圆轨时,即便是对极区,它的图像信号强度也比虹湾地区高 3 倍左右。在虹湾地区,CCD 立体相机采用了 96 级,2 倍电子学增益,但在 100 km 圆轨,在赤道附近一般用 16 级,1 倍电子学增益,而最大信号强度已超过 200 DN,到极区时,也只用 64 级,1 倍电子学增益,这时图像的灰度已达 40 DN 以上,与虹湾地区大致持平。因此对 100 km 圆轨成像时对速高比补偿的要求可以更低。这也与理论估算相符。图 9 为在 100 km 圆轨上获取的极区原生图像。

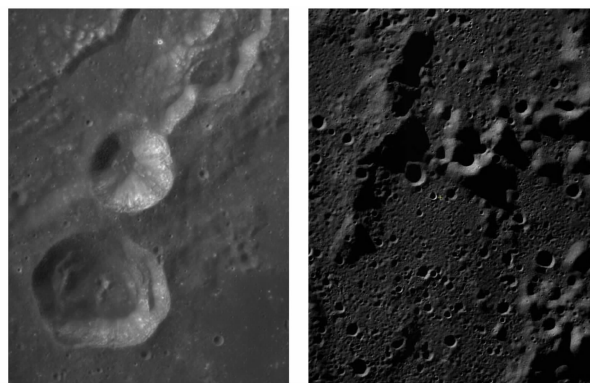


图 9 100 km 圆轨极区原生图像

Fig.9 Original polar region image on 100 km circular orbit

7 总结

嫦娥二号卫星 CCD 立体相机采用了单镜头,两视角同轨立体摄影方案,在国际上首次采用 TDI CCD

自推扫成像模式,同时采取了两种速高比补偿技术,应用光机电最优化设计,为速高比补偿提供较为宽松的允差。这些环环相扣的技术措施,形成了由诸多技术集成的综合创新,在轨获取了虹湾地区分辨率约为1.3 m的局域立体图像与100 km圆轨上7 m的地元分辨率的全月面立体影像,为国内外月球科学家提供了有价值的科学图像数据。

致谢 感谢中国科学院探月工程总体部等各级领导和兄弟单位的科技人员的努力与贡献。

参 考 文 献

- Zhao Baochang, Yang Jianfeng, He Yinghong *et al.*. Lunar exploration optics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 461~467
赵葆常,杨建峰,贺应红等. 探月光学[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 461~467
- Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Wen Desheng *et al.*. Design and on-orbit measurement of Chang'e-1 satellite CCD stereo camera[J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, **18**(1): 30~36
赵葆常,杨建峰,汶德胜等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机的设计与在轨运行[J]. 航天器工程, 2009, **18**(1): 30~36
- T. Matsunaga, M Ohtake, Y. Hirahara *et al.*. Development of a visible and near infrared spectrometer for Selenological and Engineering Explorer(SELENE)[C]. *SPIE*, 2001, **4151**: 32~39
- A. S. K. Kumar, A. R. Chowohury. Terrain mapping camera for chandrayaan-1[J]. *J. Earth Syst. Sci.*, 2005, **114**(6): 717~720
- M. Robinson, S. Brylow, M. Tschimmel *et al.*. Lunar reconnaissance orbiter camera (LROC) instrument overview[J]. *Space Sci. Rev.*, 2010, **150**(1): 81~124
- Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Wen Desheng *et al.*. Chang'e-2 lunar orbiter CCD stereo camera design and validation[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, **20**(1): 2~14
赵葆常,杨建峰,汶德胜等. 嫦娥二号卫星 CCD 立体相机设计与验证[J]. 航天器工程, 2011, **20**(1): 2~14
- Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Wen Desheng *et al.*. Overall scheme and on-orbit images of Chang'e-2 lunar satellite CCD stereo camera[J]. *Science in China, E: Technological Sciences*, 2011, **54**(9): 2237~2242
- Li Deren, Zheng Zhaobao. Numerical Photogrammetry[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1992
李德仁,郑肇葆. 解析摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1992
- K. H. John, J. B. Bonnie, H. Dathryn. Multispectral photometry of the moon and absolute calibration of the Clementine UV/vis camera[J]. *Icarus*, 1999, **141**(2): 205~225