

文章编号 1674-2915(2012)06-0583-07

三线阵测绘相机光学系统的杂光分析与计算

田铁印*, 王红, 冯晟杰

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:针对光学系统的杂光导致三线阵测绘相机成像质量下降的问题,根据光学系统的设计结果,对相机入口处的杂光能量、像面杂光辐照度、杂光系数等进行了分析与计算,提出了合理的杂光抑制措施。利用 Thermal Desktop 软件和 Light-Tools 软件,对三线阵立体测绘相机各光学系统进行分析与模拟计算,得到其杂光系数均小于 5%。最后进行了光学实验,并利用面源法测试了杂光系数。检测结果验证了杂光分析与研究方法的正确性以及杂光抑制措施的可行性。

关键词:三线阵测绘相机;光学设计;成像质量;杂光分析

中图分类号:V248.3 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120506.0583

Analysis and calculation on stray light of three line array mapping camera

TIAN Tie-yin*, WANG Hong, FENG Sheng-jie

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: tiantieyin@ciomp.ac.cn

Abstract: As the imaging quality of a three line array mapping camera can be reduced by stray light from different optical systems, the effect of the stray light is analyzed according to the result of optical design and a suppression method is put forward to reduce stray light based on the analysis and calculation of the stray light energy, the stray light irradiance on an image plane and the stray light coefficients at the entrance of camera. The stray light models of a three line array mapping camera are built and analyzed by using the software Light-Tools, and the obtained stray light coefficient of each system is less than 5%. Finally, a practical experiment to test the stray light coefficient is performed by the surface source method and the tested result proves the correctness of the stray light analyzing and the feasibility of the stray light suppression methods.

Key words: three line array mapping camera; optical design; imaging quality; stray light analysis

收稿日期:2012-09-21;修订日期:2012-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

1 引言

三线阵立体测绘相机可以实现对地目标的立体测绘,并且具有体积小、重量轻和功耗小等优点,是空间对地测绘测量应用的主要遥感器。空间遥感器的任务是在视场外有极强光源(如太阳)条件下探测极微弱的信号,而杂光成为影响三线阵立体测绘 CCD 相机成像质量的重要因素,所以,分析光学系统的杂光,采取有效的杂光抑制措施是保证三线阵立体测绘相机成像质量的重要环节。杂光是指光学系统成像光线之外,扩散于像面上的其他非成像光线,包括来自系统外部的辐射源(如阳光、地气光)和内部辐射源(如光学元件、结构件等)及散射表面的非成像光^[1]。其危害是:(1)降低像面的对比度和调制传递函数;(2)减少整个像面的层次,清晰度变差;(3)严重时会在像面处形成杂光斑点。因此,杂光是影响相机灵敏度的重要因素,有必要对太阳光直接或经过一次或多次反射进入遥感器光学系统入口(遮光罩)产生的杂光能量水平及其光学系统的杂光系数进行分析和计算,采取相应的防杂光措施,以保证相机达到预定的灵敏度。

本文首先根据测绘相机的光学设计结果,分析与计算太阳光反照在星体上时,在测绘相机光学系统入口处产生的杂光能量,然后利用 Light-Tools 软件对光学系统的杂光进行模拟分析与计算,最终通过光学实验和检测验证了分析方法的准确性和可行性。

2 光学设计

三线阵 CCD 相机由具有一定交会角的前视、正视和后视 3 个线阵 CCD 相机构成,3 台相机连续扫描地面并产生 3 幅相互交迭的图像,基于 3 个 CCD 的成像角度不同来实现立体测绘成像。垂直对地成像的相机称为正视相机,向前倾斜成像的相机为前视相机,而向后倾斜成像的相机称为后视相机^[2]。

2.1 设计参数

三线阵立体测绘相机光学系统参数如表 1 所

示。

表 1 光学系统参数

Tab. 1 Parameters of optical system

光学系统参数	正视相机	前、后视相机
焦距/mm	649.88	717.19
相对口径	1/5	1/5
视场 $2\omega/(\circ)$	6.9	6.2
CCD 像元尺寸/ μm	7	7
波段/ μm	0.5~0.7	0.5~0.7

2.2 设计结果

光学设计采用 3 片对称型与匹兹瓦型结合的结构形式,这种结构不仅具备匹兹瓦型相对口径大和对称型畸变小的优点,还能够设计为像方远心光路,大大提高了测绘精度。

正视相机与前、后视相机光学系统结构如图 1、图 2 所示。

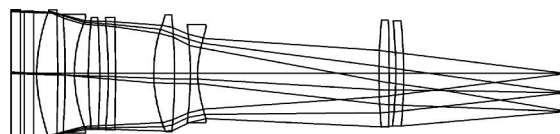


图 1 正视相机光学系统结构图

Fig. 1 Configuration diagram of optical system for straight-sight camera

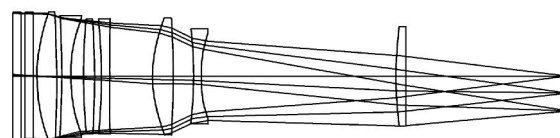


图 2 前、后视相机光学系统结构图

Fig. 2 Configuration diagram of optical system for forward-sight and backward-sight cameras

表 2 光学系统传递函数

Tab. 2 MTFs of optical system

视场	MTF	
	正视相机	前、后视相机
0	0.630	0.612
0.5	0.627	0.612
0.7	0.621	0.610
1	0.618	0.609

光学系统 Nquist 频率下的设计传递函数如表 2 所示,点列图和畸变曲线如图 3、图 4 所示。

3 光学系统入口处杂光环境分析

卫星轨道高度是 500 km,在杂光环境分析中,主要考虑太阳和地气引起的杂光贡献。轨道取 2009 年 5 月 15 日 13:30 轨道,太阳常数取 $1\ 412\ \text{W}/\text{m}^2$,当天太阳赤纬为 $N18.9^\circ$,太阳赤经为 52.5° 。轨道细分为 18 等分,以降交点为零位置,每 20 纬度为一位置计算,取三线阵 CCD 相机入光口处热流最大的位置。在该时刻位置,入光口无阳光直射能量。取地球反射系数为 0.35。

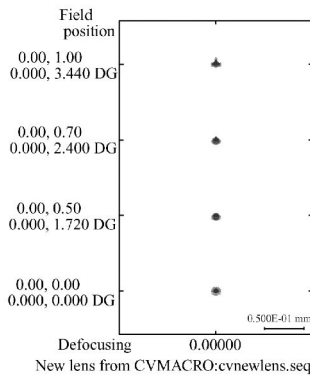


图 3 正视光学系统点列图

Fig. 3 Spot diagram of straight-sight camera

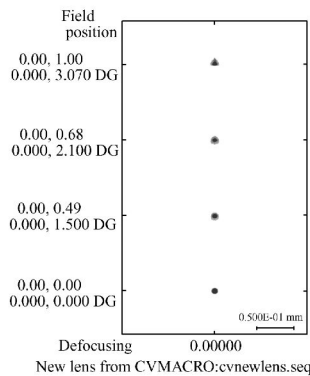


图 4 前、后视光学系统点列图

Fig. 4 Spot diagram of forward-sight and backward-sight cameras

3.1 入口处太阳光反照能量计算

利用 Thermal Desktop 软件进行计算分析,得到在第 17 位置入光口阳光反照能量的最大值,根据可见光及有效谱段所占的百分比,得到在光学系统入口处的光通量,如表 3 所示,图 5 为第 17 计算位置示意图。

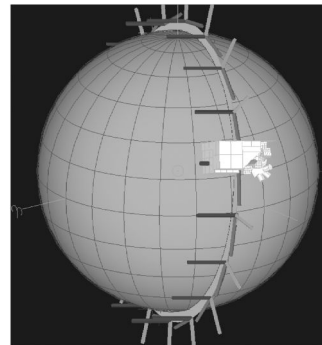


图 5 第 17 计算位置示意图

Fig. 5 Diagram of the 17th calculated location

表 3 光学系统入口处阳光反照能量分析结果

Tab. 2 Analysis results of sun albedo energies at the entrances of cameras

相机	位置序号	阳光反照 最大值/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	可见光/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	有效谱段/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	光学系统入口 的光通量/W
正视	17	371	160	83.2	1.156
前视	17	351	151	78.6	1.316
后视	17	233	100	52.0	0.871

在第 17 位置,太阳高角的计算公式为:

$$\sin\theta = \sin\alpha \cdot \sin\beta + \cos\alpha \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega, \quad (1)$$

式中: θ 为太阳高角, α 为星下点纬度, β 为太阳赤纬, ω 为地方时角。表 4 为根据公式计算得到的当地当时的太阳高角。

表4 当地当时太阳高角

Tab.4 Sun elevation angles at local time

地方时角	位置序号	太阳赤纬	星下点纬度	太阳高角
22.5°	17	N18.9°	N20°	68.8°

3.2 星体反射太阳光在相机像面产生能量的计算

由于星体上有效载荷多,相机对地观测时,太阳光照射到星体或星上载荷发生折射或散射,从而在各相机光学系统入口产生杂光,同样利用 Thermal Desktop 软件计算分析,星体外表面吸收率为 64%,反射率为 36%,表 5 为在各相机光学系统入口处的杂光能量。

表5 各相机光学系统入口处的杂光能量

Tab.5 Stray light energies at the entrances of cameras

相机	星体间反射太阳光在光学系统入口处的能流密度/(W·m ⁻²)	光学系统入口处杂光能量/W	光学系统入口处有效视场内光能量/W	杂光在入口处所占比例/%
正视	1.1	0.015	1.156	1.3
前视	0.1	0.002	1.316	0.2
后视	4.9	0.082	0.871	9.4

由于后视相机杂光能量比例略大,考虑在相机入口处覆以黑色渗碳膜,其外表面吸收率为

80%,反射率为 20%,处理后的杂光在相机入口处的能量及所占比例如表 6 所示。

表6 处理后的杂光在相机入口处的能量及所占比例

Tab.6 Energies and percentages of the stray light after treatment at the entrances of cameras

相机	光学系统入口的杂光能量/W	光学系统入口处有效视场内光能量/W	杂光在入口处所占比例/%
正视	0.015	1.141	1.3
前视	0.002	1.314	0.2
后视	0.046	0.835	5.5

通过分析计算,认为在后视相机光学系统入口处覆以黑色渗碳膜后,杂光在入口处能量明显减小。相机的入口辐射亮度与在焦面 CCD 上产生的辐照度之间的关系为:

$$E_{ip} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot L_p \cdot \tau_o, \quad (2)$$

式中: L_p 为相机入瞳处的辐射亮度; τ_o 为包括镜头和滤光片在内的光学系统透过率; D/f 为光学系统相对孔径。

计算得到星体反射产生的杂光能量在各相机光学系统像面的辐照度如表 7 所示。

表7 杂光能量在各相机像面的辐照度

Tab.7 Stray light irradiances at the image planes of cameras

相机	杂光在入口处的辐亮度/(W·m ⁻² ·sr ⁻¹)	相对孔径	透过率	杂光在像面处的辐照度/(W·m ⁻²)
正视	0.344	1/5	0.746	0.008
前视	0.038	1/5	0.766	0.001
后视	0.875	1/5	0.781	0.021

上面的计算结果是在不考虑光学系统的杂光抑制手段时得到的,当采取相应的消杂光措施后,

这部分杂光在像面的辐照度将显著降低。

4 光学系统杂光计算

光学系统成像时,能够到达像面的非成像光线就是杂光,这些光线不参与直接成像,会在像面形成鬼像,严重影响成像质量。

4.1 杂光模拟分析

杂光形成的主要因素有:由光学元件的反射与散射造成的杂光;机械镜筒的反射与散射造成的杂光;以及相机内部各受光面的反射、散射等造成的杂光。

根据三线阵立体测绘相机光学系统设计结果,利用 Light-Tools 分析软件,建立光学系统的二

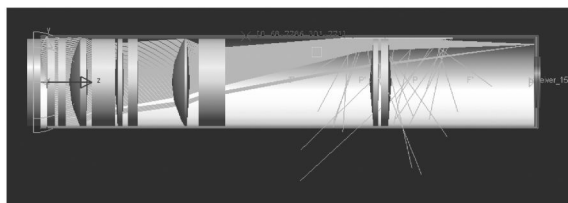


图6 光学系统杂光影响模拟图

Fig.6 Stray light influence simulation diagram of optical system for straight-sight camera

维结构模型。在模型建立时,考虑镜筒内表面的反射。

图6模拟了正视相机中,除一次杂光外其他来自视场外的光束经镜筒壁的反射,形成二次或高次杂光最终到达探测器的情景。所以,对光学系统采取合适的杂光抑制措施是必要的。

4.2 抑制杂光的措施和设计

为了减少杂光,将其控制在允许的范围内,采取的抑制措施有^[3]:

- (1) 透镜表面镀高透率的减反膜。
- (2) 设计外遮光罩,挡住视场之外的光线,使其不能直接进入光学系统,从而大大减少光学系统的杂光;在遮光罩内表面加工遮光环,进行染黑处理;涂消光漆,减小由于遮光罩内表面反射进入光学系统的杂光。
- (3) 在镜筒内设置遮光环,进行染黑处理,并涂消光漆,处理之后,镜筒内壁的反射率大大降低,减少了镜筒内壁反射引入的杂光。
- (4) 内壁涂层吸收。

利用 Light-Tools 分析软件进行设计,得到相机消除杂光的计算结果如表8所示。图7为正视相机抑制杂光模拟图,图8为前、后视相机抑制杂光模拟图。

表8 相机消除杂光的计算结果

Tab.8 Stray light elimination results of each camera

	长度/mm	遮光罩		镜筒间遮光环总数	消杂光漆	
		内径/mm	遮光环数		材料	吸收系数/%
正视相机	110	148	8	22	ERB-2B	93
前、后视相机	135	164	8	22		

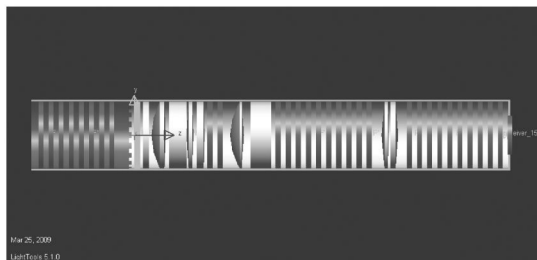


图7 正视相机光学系统杂光抑制模拟图

Fig.7 Simulated diagram of stray light suppression of optical system for straight-sight camera

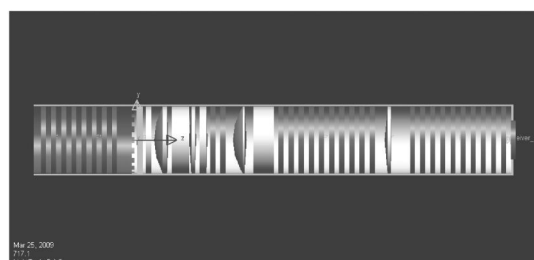


图8 前、后视相机光学系统杂光抑制模拟图

Fig.8 Simulated diagram of stray light suppression of optical system for forward-sight and backward-sight cameras

4.3 杂光系数的计算

杂光在像面处是近于均匀分布的,相机中杂光的存在不仅减少了参与成像光的能量,更主要的是使整个像面产生了一个近似均匀的附加照度,降低了光学系统的成像质量。杂光系数是反映光学系统成像质量的重要指标。

实际成像光学系统中,成像光线在像面上的有效扩散范围是有限的。由一均匀的大面光源在像面上造成的杂光光强分布,像面上的杂光照度为 E_C ,大面积均匀光源在像面上所成的总照度为 $E_0 + E_C$,则杂光系数的定义式为:

$$\eta = \frac{E_C}{E_C + E_0} \quad (3)$$

单面减反膜透过率为 99.3%,透镜边缘吸收率为 99%,涂消光漆后镜筒内表面的吸收率为 93%,利用 Light-Tools 软件,计算得到正视相机和前、后视相机光学系统的杂光系数均 <5%,正

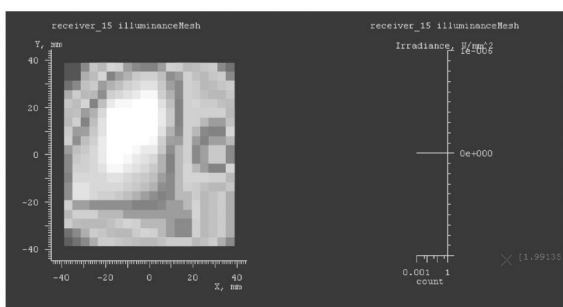


图9 正视相机光学系统杂光在像面上的能量分布

Fig. 9 Stray light energy distribution at image surface of optical system for straight-sight camera



图10 前、后视相机光学系统杂光在像面上的能量分布

Fig. 10 Stray light energy distribution at image surface of optical system for forward-sight and backward-sight cameras

视相机杂光在像面上的能量分布如图9所示,前、后视相机杂光在像面的能量分布如图10所示。

5 实测结果

利用面源法测量杂光系数,其测量装置主要由黑体目标、光度积分球、准直物镜、光电接收器等组成^[4-5],如图11所示。

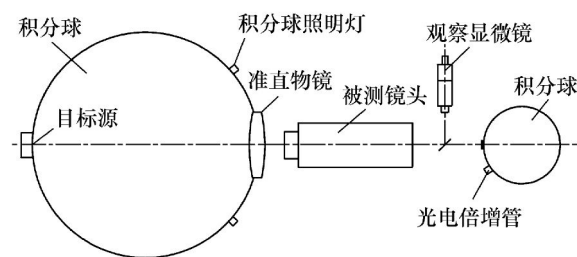


图11 杂光系数测试装置

Fig. 11 Testing equipment for stray light coefficient

对正视和前、后视相机分别进行杂光测试,测试结果如表9所示。

表9 各相机杂光系数实测结果
Tab. 9 Tested results of stray light coefficients of cameras

相机	杂光系数/%
正视	6.0
前视	4.1
后视	5.2

正视和后视相机的杂光测试结果略大于5%,分析原因在于:

(1) 镜筒内壁的消杂光漆的吸收系数没有达到要求;

(2) 装调、修研时对镜筒漆面造成划痕,使得高次杂光没有得到有效抑制;

(3) 测量仪器自身具有一定的测量误差。

6 结论

根据三线阵立体测绘 CCD 相机的光学设计结果,利用 Thermal Desktop 软件计算分析了测绘相机杂光在相机入口处的能量及杂光能量在各相

机像面的辐照度;利用 Light-Tools 软件对正视相机和前、后视相机光学系统的镜筒反射与透镜表面反射等产生的杂光影响进行了模拟分析,计算得到了相应的杂光系数^[6-7]。通过杂光检测实验,

得到正视、前视和后视相机杂光系数均 < 6% 的实验结果,证明了模拟分析方法的正确性以及提出的杂光抑制措施的可行性。

参考文献:

- [1] 唐勇,卢欣,郝云彩.星传感器杂光抑制分析[J].控制工程,2003(5):26-31.
TANG Y,LU X,HAO Y C. Stray light restrain analyzing of the star sensor[J]. *Con. Eng.*,2003(5):26-31. (in Chinese)
- [2] 田铁印,王红,谷凤安.三线阵立体测绘相机光学系统设计[J].光学精密工程,2009,17(11):2692-2697.
TIAN T Y,WANG H,GU F A. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2009,17(11):2692-2697. (in Chinese)
- [3] 郭帮辉,孙强,王志.300~1100 nm多波段成像光学系统设计及杂光分析[J].中国光学与应用光学,2010,3(5):474-479.
GUO B H,SUN Q,WANG ZH. Design of 300-1100 nm multiband optical imaging system and its stray light analysis[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*,2010,3(5):474-479. (in Chinese)
- [4] 曹智睿,荀显超,袁理.测试条件对杂光系数测试结果的影响[J].中国光学与应用光学,2010,3(4):369-373.
CAO ZH R,XUN X CH,YUAN L. Effect of measuring conditions on measuring results of stray light coefficients[J]. *Chinese J. Opti. Appl. Opt.*,2010,3(4):369-373. (in Chinese)
- [5] 杨志文.光学测量[M].北京:北京理工大学出版社,1995:248-253.
YANG ZH W. *Optical Measure*[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,1995:248-253. (in Chinese)
- [6] 马冬梅,张晓辉,韩昌元.大口径、长焦距光学系统杂光系数、渐晕系数、像面照度均匀性等参数的测试[J].应用光学,1998,19(5):44-47.
MA D M,ZHANG X H,HAN CH Y. Test of stray light coefficient, vignetting coefficient and image surface illumination uniformity of optical system with large aperture[J]. *Appl. Opt.*,1998,19(5):44-47. (in Chinese)
- [7] 高万荣,薛鸣球,苗兴华,等.长焦距光学系统杂光系数测量的新方法及其理论分析[J].光学学报,1996,16(11):1626-1630.
GAO W R,XUE M Q,MIAO X H,*et al.*. A new method for measuring the veiling glare index of long focal optical system and analysis[J]. *Acta Optica Sinica*,1996,16(11):1626-1630. (in Chinese)
- [8] 耿安兵.光学系统的鬼像分析及快速计算方法[J].舰船光学,2004,40(4):34-36.
GENG A B. Analysis and calculation for the ghost in optical system[J]. *Ship Optical*,2004,40(4):34-36. (in Chinese)
- [9] FISCHER R E. *Optical System Design*[M]. New York:McGraw-HILL,Inc,2000:315-352.
- [10] SMITH W J. *Modern Optical Engineering: The Design of the Optical System*[M]. 2nd ed. New York:McGraw-HILL,Inc, 1990.

作者简介:田铁印(1967—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光学传感器与大型光电经纬仪等方面的研究。

E-mail:tiantieyin@ciomp.ac.cn

王红(1968—),女,吉林长春人,博士,研究员,主要从事光学传感器与大型光电经纬仪等方面的研究。

E-mail:wanghong@ciomp.ac.cn