

文章编号:1004-4213(2011)03-0424-4

透射式光学系统杂光系数计算方法

廖志波,焦文春,伏瑞敏

(北京空间机电研究所,北京 100190)

摘 要:在相机研制中,杂光系数是评价杂散光的主要指标.为了快速、便捷、准确地计算杂光系数,本文通过分析透射式光学系统的杂散光路,根据能量传输原理,推导了无中心遮拦无渐晕的透射式光学系统的杂光系数的理论计算方法,并编制了相关的程序.仿真结果表明:该方法简单易行,能够快速给出杂光系数的初步评价,将杂散光抑制设计及分析提前,为后续设计提供参考.

关键词: 传感器;杂光系数;遮光罩;透射式光学系统

中图分类号: V44

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114003.0424

0 引言

杂散光是到达像面的非成像光束,它会影响像面的对比度,降低信噪比.杂光系数是评价杂散光的主要指标,是相机研制中需要控制的重要参量之一.一般来说,要获得较好的成像质量,相机杂光系数要求在 5% 以下.除了利用面源法(积分球法)进行实际测试的方法,通过软件仿真来计算杂光系数是更为通用的手段^[1-4].在结构设计完成以后,利用专业的光学仿真软件建立光机模型,进行大量的光线追迹,进而分析计算以获得杂光系数.这种方法有较高的计算精度,但需要反复修正模型,周期较长.

本文分析了透射式系统杂散光的主要来源,定义了一级杂散光路和二级杂散光路的传递路径,利用能量传输原理,推导了一种杂光系数的理论计算方法,并编制了相关程序,最后利用仿真模型进行了验证.

1 基本原理

光学系统中像面接收到的杂散能量与杂散光源辐射出的能量遵循能量传输方程^[5]

$$d\Phi_c = \text{BRDF}(\phi_i, \theta_i; \phi_c, \theta_c) d\Phi_s(\phi_i, \theta_i) \text{GCF}_{sc} \pi \quad (1)$$

式中, $d\Phi_c$ 是探测器接收到的能量微元, $d\Phi_s$ 是杂散光源辐射出的能量微元, BRDF 是双向反射分布函数, GCF_{sc} 是探测器与杂散光源间的几何构成因子,即杂散光的传播路径.因此,通过分析确定光学系统中各级杂散光的传播路径,就能计算出像面的杂散光能量.

一般来说,定义从物空间发出的光线经过非成像表面反射一次到达像面的光路为“一级杂散光”;

经过非成像表面反射两次到达像面的光路为“二级杂散光”.对透射式光学系统来说,杂散光主要来源于镜筒内壁的反射,在一定的杂光系数范围内,其主要构成即为“一级杂散光”和“二级杂散光”^[5-7].

2 杂光系数计算方法

利用 LightTools 之类的仿真软件计算的杂光系数与面源法检测的杂光系数定义略有不同.一般来说,软件计算的杂光系数定义为以均匀面光源入射到达像面的杂散光光能量和总光能量的比值.假设像面的总能量为 i_0 ,杂散光能量为 i' ,成像光束的能量为 i ,则可以得出杂散光系数公式为

$$\text{VGI} = \frac{i'}{i_0} \times 100\% = \frac{i'}{i+i'} \times 100\% \quad (2)$$

与 LightTools 等软件通过大量的光线追迹来计算并统计到达像面的杂散光和成像光线能量不同,本文不计算单条光线,而以“能量包”传输的方式来获得 i 和 i' .首先可以确定成像光束的能量.如图 1 所示,光学系统像方视场角为 w' 处的像面照度可表示为

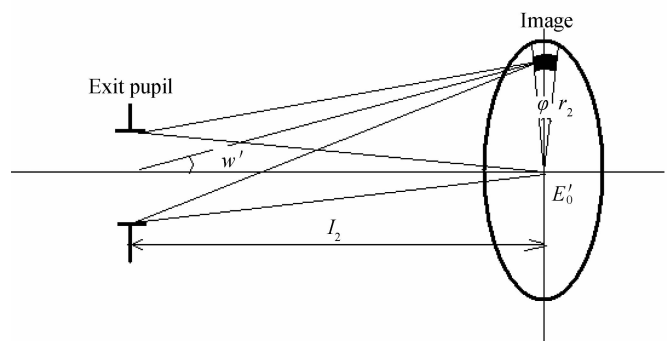


图 1 像面上照度关系

Fig. 1 Illumination on the off-field angle

第一作者:廖志波(1981—),男,工程师,硕士,主要研究方向为光学系统设计,Email:bitliaozeb@126.com

收稿日期:2010-08-13;修回日期:2010-11-06

$$E'(\omega') = E_0 \cdot \cos^4 \omega' \quad (3)$$

式中 E_0 为像面中心的辐照度 $E_0 = (\pi\tau L)/(4F^2)$, F 为光学系统 F 数, τ 为透过率. 所以像面上像方视场角为 ω' 的一处微小面元 ds 的接收光能量为

$$d\phi'_{\text{signal}} = E_0 \cos^4 \omega' \cdot ds \quad (4)$$

式中 r_2 为该面元对应半径, l_2 为出瞳距离. 此时有: $ds = r_2 dr_2 \times d\phi$; $r_2 = l_2 \tan \omega'$, $dr_2 = l_2 \cdot \sec^2 \omega' d\omega'$; 代入可得

$$d\phi'_{\text{signal}} = E_0 \cos^4 \omega' \cdot (l_2 \tan \omega') \cdot (l_2 \sec^2 \omega' d\omega') \cdot d\phi \quad (5)$$

$$d\phi'_{\text{signal}} = E_0 l_2^2 \sin \omega' \cdot \cos \omega' \cdot d\omega' \cdot d\phi \quad (6)$$

假设光学系统焦距为 f' , 物方最大半视场角为 ω , 则此时像方最大视场角为 ω_0 可表示为

$$\omega_0 = \arctan (f' \tan (\omega) / l_2) \quad (7)$$

则此时像面上接收的光能量为

$$\phi'_{\text{signal}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\omega_0} E_0 l_2^2 \sin \omega' \cdot \cos \omega' d\omega' \cdot d\phi \quad (8)$$

则进入光学系统第一表面时的成像光束总能量为: $\phi_{\text{signal}} = \phi'_{\text{signal}} / \tau$.

进入光学系统第一表面的能量如图 2, 亮度为 L 的均匀扩展光源上每一小面元 ds 进入光学系统的入射光能可表示为

$$d\phi_{\text{incident}} = L \cdot ds \cdot \frac{S_1 \cdot \cos \theta}{(l_1 / \cos \theta)^2} \quad (9)$$

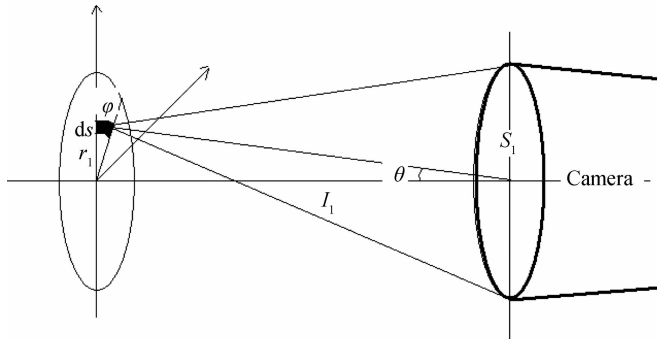


图 2 光源进入第一面的能量

Fig. 2 Flux incident on the surface

式中 S_1 为光学系统入口面积, r_1 为该面元对应半径, θ 为该面元与光学系统入口中心的连线与系统光轴的夹角, l_1 为该面元与光学系统入口的距离. 此时有 $ds = r_1 dr_1 \cdot d\phi$; $r_1 = l_1 \tan \theta$, $dr_1 = l_1 \sec^2 \theta d\theta$. 代入可得

$$d\phi_{\text{incident}} = L \cdot (l_1 \tan \theta) \cdot (l_1 \sec^2 \theta d\theta) \cdot d\phi \cdot \frac{S_1 \cdot \cos \theta}{(l_1 / \cos \theta)^2} \quad (10)$$

$$d\phi_{\text{incident}} = L \cdot S_1 \cdot \sin \theta d\theta \cdot d\phi \quad (11)$$

假设黑斑对光学系统入口中心的角半径为 ω_0 , 则此时进入光学系统的入射光能为

$$\phi_{\text{incident}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\omega_0} L \cdot S_1 \cdot \sin \theta d\theta \cdot d\phi \quad (12)$$

进入光学系统的光线不一定都能到达像面, 但通过入瞳的杂散光线最有可能在像面形成恶劣的影响.

从图 3 看出, 入瞳距离第一光学表面越远, 可能成为一级杂散光的能量越少. 根据图 3 中所示几何关系, 通过入瞳的光能量为

$$\phi_{\text{ape}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\omega_1} L \cdot S_{\text{ent}} \cdot \sin \theta d\theta \cdot d\phi \quad (13)$$

$$\omega_1 = \arctan (\sqrt{S_1 / \pi} / (l_{\text{baffle}} + l_{\text{ent}})) \quad (14)$$

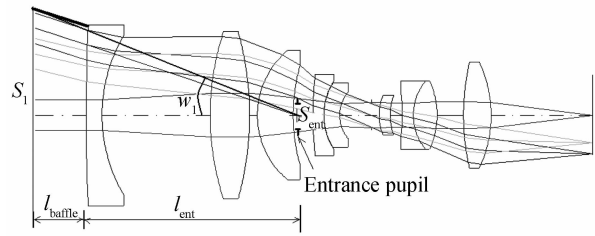


图 3 入射到入瞳的能量

Fig. 3 Flux incident on the entrance pupil

式中 S_{ent} 为入瞳面积, l_{baffle} 为遮光罩长度, l_{ent} 为入瞳距第一光学表面的距离.

由于入瞳是孔径光阑在物空间的像, 因此, 通过入瞳的所有光线必能通过孔径光阑. 同时根据一级杂散光的定义可知^[8], 在不存在渐晕或者不存在中心遮拦的情况下, 只有通过孔径光阑的光线才有可能成为一次杂散光. 则可能产生的一级杂散光 $d\phi_{1-\text{stray}}$ 可以表示为

$$d\phi_{1-\text{stray}} = (d\phi_{\text{ape}} - d\phi_{\text{signal}}) \cdot \text{BRDF}(\alpha) \cdot K(\alpha) \quad (15)$$

式中 $d\phi_{\text{ape}}$ 为通过入瞳的能量单元, $\text{BRDF}(\alpha)$ 为传递路径表面的双向反射函数, $K(\alpha)$ 是光线的传递路径, 等于光线可能传输的立体角.

$$K(\alpha) = \frac{dS \cos(\alpha)}{R^2(\alpha)} \quad (16)$$

式中, S 表示像面面积, $R(\alpha)$ 表示传输距离.

进入光学系统的入射光能中除了信号能量外, 其余光或被吸收或成为杂散光线到达像面, 通过整个通光口径的入射光线都有可能产生二级杂光. 因为只有通过孔径光阑的光线才有可能成为一级杂散光, 而二级杂散光的有且只有在结构内壁发生两次反射, 所以二级杂散光也必须通过孔径光阑. 产生有两条路径: 在孔径光阑前后的镜筒内壁均发生一次反射进入到像面, 如图 4(a); 在孔径光阑后的镜筒内壁发生两次反射进入到像面, 如图 4(b). 三级及以上的像面杂散光与一级、二级杂散光相比, 基本可以忽略.

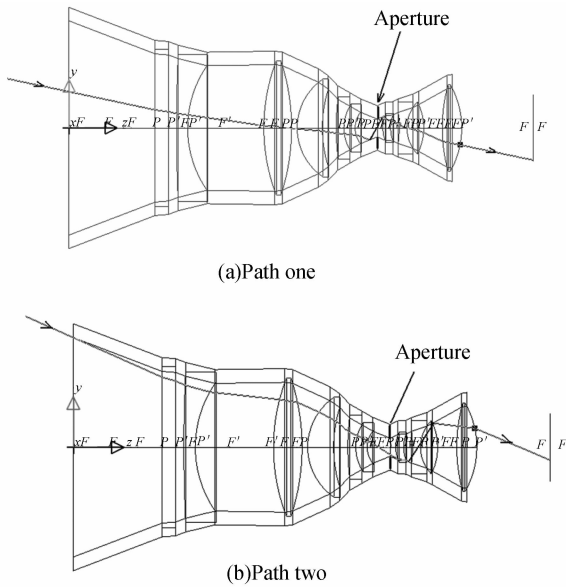


图 4 两条二级杂散光光路
Fig. 4 Two kinds of second-order stray light paths

由图 4,其产生的二级杂散光 $d\phi'_{2-stray1}$ 为

$$d\phi'_{2-stray1} \approx (d\phi_{incident} - d\phi_{ape}) \cdot BRDF(\alpha) \cdot BRDF(\beta) \cdot K(\alpha) \cdot K(\beta) \quad (17)$$

如图 5,其产生的二级杂散光 $d\phi'_{2-stray2}$ 为

$$d\phi'_{2-stray2} \approx (d\phi_{ape} - d\phi_{signal}) \cdot BRDF(\alpha) \cdot BRDF(\beta) \cdot K(\alpha) \cdot K(\beta) \quad (18)$$

则杂光系数可表示为

$$VGI = \frac{\phi'_{stray}}{\phi_{signal} + \phi_{stray}} \approx \frac{\phi'_{1-stray} + \phi'_{2-stray}}{\phi_{signal} + \phi_{1-stray} + \phi_{2-stray}} \quad (19)$$

3 仿真验证

根据本文推导的公式,利用 CodeV 的宏语言编制了相关的程序,程序可以自动读取光学系统的参量信息,根据外遮光罩长度、桶壁厚度、构成形式等设置自动建立简单的光机结构模型,并计算杂光系数.

首先利用 LightTools 仿真软件分析计算了图 5 包含简单结构的光学系统,光学系统的参量见表 1. 假设结构表面为理想的朗伯表面^[9],其反射率为 10%,追迹 200 万条光线,获得其杂光系数与外遮光罩的长度的关系如图 6,并与根据本文编制的程序计算的结果进行了比较.其中横坐标表示外遮光罩长度,纵坐标表示杂光系数.

表 1 光学系统的技术参量

Table 1 Specification of optical system

Characteristic	Value
$F\#$ ($F\# = f/D$)	2
Field of view(diagonal)	$\pm 7^\circ$
Entrance pupil diameter	50 mm
Wavelength	632.8 nm

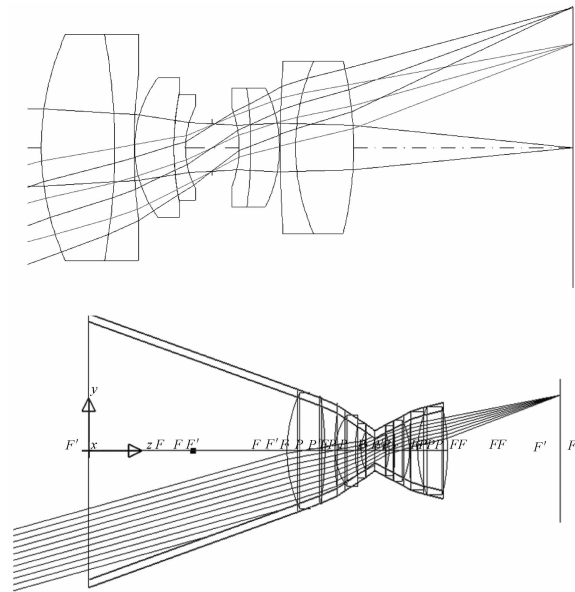


图 5 包含简单结构的光学系统
Fig. 5 Optical system

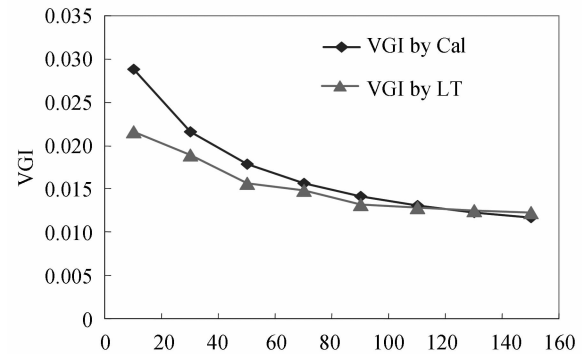


图 6 LightTools 仿真分析的 VGI 和数学计算的 VGI
Fig. 6 VGI calculated by LightTools and Programme

从图 6 可以看出,与利用 LightTools 采用仿真分析方法计算的结果比较,利用程序计算的杂光系数在遮光罩长度较短时有些许差别,但随遮光罩长度变化的趋势基本相同,这是因为利用公式计算微面源进入遮光罩入口的能量方程随着长度的增加而更加准确,在遮光罩长度较短时计算的总入射能量略小于真实能量.由于 LightTools 需要追迹大量光线,包含建模的复杂过程,而程序能直接计算杂光系数,因此,这种方法简单快捷,能够快速给出杂光的初步评价,指导杂散光抑制结构的设计.

程序还能够分析各级杂光的分布情形,图 7 给出了分析结果.

从图 7 可以看出, I 级杂散光随外遮光罩的延长明显减小, II 级杂散光略有减少.随着外遮光罩的增加,当 I 级杂光降到一定量级以下后, II 级杂光占的比重越来越大,是杂光系数的主要影响因素.此时,从公式可以看出,降低镜筒内壁的 BRDF 将成为消减杂散光的主要手段.

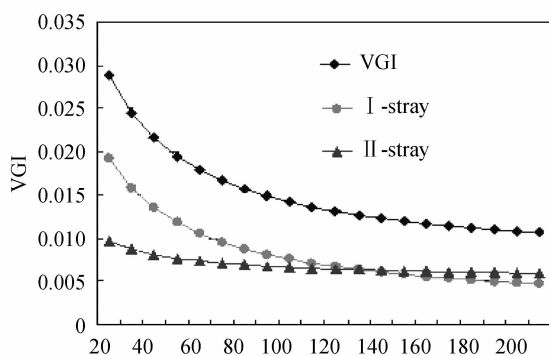


图7 杂光系数和外遮光罩长度的关系

Fig.7 Veiling glare index fall with the baffle increase

4 结论

本文针对无中心遮拦无渐晕的透射式光学系统提出的杂光系数计数方法简单易行,能够快速给出杂光的初步评价,将杂散光抑制步骤提前,指导后续设计.同时,分析表明,随着外遮光罩的增加,杂光系数会明显减小,但当I级杂光降到一定量级以下后,镜筒内壁的BRDF特性将成为影响的主要因素.

参考文献

[1] PETERSON G L. Stray light calculation methods with optical ray trace software[C]. *SPIE*, 1999, **3780**: 132-137.

- [2] ZHANG Jun-qiang, WU Qing-wen, YAN Chang-xiang. Stray light measurement of space-borne high resolution imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica sinica*, 2010, **39**(7): 1319-1323.
张军强,吴清文,颜昌翔.星载成像光谱仪杂散光测量[J].光子学报,2010,**39**(7):1319-1323.
- [3] ZOLLERS M W, TAMKIN J M, GREGORY G G. Efficient design process for the evaluation and control of flare in opto-mechanical systems[C]. *SPIE*, 2009, **7428**: 742806.
- [4] LIU Bin-qi, ZHAO Xi-lin, HAN Yan-zhong, et al. Research of real-time measuring system for veiling glare index of optical system[C]. *SPIE*, 2002, **4927**: 531-537.
- [5] PERRIN J C. Analysis of stray light in most complex situations [C]. *SPIE*, 2007, **7794**: 66670J.
- [6] LIAO Zhi-bo, FU Rui-min, ZONG Xiao-ying. Optimal designing of baffle of star sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(4): 987-990.
廖志波,伏瑞敏,宗肖颖.星传感器遮光罩优化设计[J].中国激光,2010,**37**(4): 987-990.
- [7] DITTMAN M G, DONLEY E, GROCHOCKI F. Deterministic sequential stray light analysis[C]. *SPIE*, 2010, **7794**: 77940T.
- [8] BREAUULT R P. Control of Stray Light//HandBook of Optics Volumn II[M]. USA: McGraw-Hill Inc, 2010.
- [9] DU Bao-lin, LI Lin, HUANG Yi-fan. Analysis and study on coating suppressing stray-light of space remote sensor[J]. *Acta Photonica sinica*, 2008, **37**(Sup2): 220-222.
杜保林,李林,黄一帆,等.空间遥感器消杂散光涂料的分析与研究[J].光子学报,2008,**37**(Sup2):220-222.

Veiling Glare Index Calculation for Refract Optical System

LIAO Zhi-bo, JIAO Wen-chun, FU Rui-min

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China)

Abstract: In the camera design, veiling glare index is a main criterion to evaluate the stay light. In order to quickly, easily and accurately calculate the veiling glare index, the stray light paths were detailed analyzed. The formula of fast-calculating the veiling glare index was deduced and programmed. It was indicated that the proposed method is an easy way to estimate the veiling glare index and it will betterment the following design.

Key words: Remote sensing; Veiling glare index; Baffle; Refract optical system