

# 全景环带成像系统的杂散光分析及抑制

鲁天雄 白 剑 黄 治 汪凯巍

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 全景环带透镜(PAL)在有强光的实际运用中经常会出现像杂散光较强和信噪比降低的情况,对产生的杂散光的分析及抑制非常重要。分析了 PAL 光学系统中杂散光的主要来源,并提出了一种针对透射面反射产生的杂散光的抑制方法。利用 ASAP 软件进行仿真,分析了基于该方法设计的 PAL 光学系统的杂散光情况,结果表明,对比普通的同光学参数的 PAL 系统,在  $50^\circ\sim 85^\circ$  半视场时由透射面反射引起的杂散光减少了约 85%,其他视场时杂散光未增多。设计了杂散光对比实验,实验结果验证了仿真结果,表明提出的杂散光抑制方法可以有效抑制 PAL 光学系统中的杂散光。

**关键词** 成像系统;杂散光分析及抑制;光线追迹;全景环带透镜

中图分类号 TN202 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0511003

## Stray Light Analysis and Suppression of Panoramic Annular Lens

Lu Tianxiong Bai Jian Huang Zhi Wang Kaiwei

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** When there is a highlight source in the field of a panoramic annular lens (PAL), the image will be covered by stray light like mist, so it is important to suppress stray light in a PAL system. The main sources of stray light in PAL are analyzed. As to the stray light caused by incomplete transmission of refractive surfaces, a suppression method is proposed, based on which a new PAL system is designed. In order to verify the feasibility of this method, a comparison of stray light performance is conducted between an ordinary PAL system and the new PAL system. The result indicates that in half field angle of  $50^\circ\sim 85^\circ$ , the stray light caused by incomplete transmission of refractive surfaces is reduced by 85% in the new PAL system, while the stray light doesn't increase in other fields of view.

**Key words** imaging systems; stray light analysis and suppression; ray trace; panoramic annular lens

**OCIS codes** 110.4280; 220.2740; 120.48201

## 1 引 言

全景成像技术凭借  $360^\circ$  全方位视野和宽阔的视场<sup>[1]</sup>,被广泛应用于安防、机器人视觉、导航以及军事领域,主要包括拼接成像<sup>[2,3]</sup>、鱼眼成像<sup>[4]</sup>和折反射成像<sup>[5,6]</sup>等几种方式。全景环带透镜(PAL)光学系统是一种典型的折反成像式全景系统,体积紧凑,制作工艺与普通全折射光学系统类似,且设计灵活,但由于 PAL 系统类似于卡塞格林系统,结构中存在两个反射面,光路复杂,在有强光的实际运用中

经常会出现像杂散光较强和信噪比降低的情况,大大降低了系统的使用可靠性。因此,对 PAL 系统杂散光的分析及抑制在其应用过程中非常重要。

目前,针对 PAL 光学系统进行杂散光分析的文献比较少。Martynov 等<sup>[7]</sup>提到了 PAL 系统产生杂散光的两种光路结构:一种是光线不经过反射镜直接进入系统光阑;另一种是光线经过折射与反射后,不经第二个反射面,而是反射到第一折射面上,光线一部分能量离开 PAL,另一部分在 PAL 内部经多

收稿日期: 2012-12-03; 收到修改稿日期: 2012-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(60877008)资助课题。

作者简介: 鲁天雄(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: ltxgui@126.com

导师简介: 白 剑(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事二元光学、微光学、光电检测和全景成像等方面的研究。

E-mail: bai@zju.edu.cn

次反射后进入光阑。但并未对如何抑制这两类杂散光进行详细分析。另外一篇有关 PAL 杂散光分析的文献是 Tateyama 等<sup>[8]</sup>申请的发明专利,其中详细列举了 3 种 PAL 可能产生杂散光的光路结构:分别为在 PAL 中反射 4 次、5 次和 8 次后进入后续光学系统的杂散光。该专利中主要采取对光路的无效表面磨砂、打孔或开槽的方式阻挡杂散光。这种加工方式难度较大,只适用于制造精度要求不高的小型塑料压膜 PAL,对于玻璃材料的 PAL 并不适用。本文分析了 PAL 系统可能产生杂散光的光路,提出一种抑制杂散光的方法,并通过在 ASAP 软件中仿真来验证该方法的有效性。

## 2 PAL 光学系统杂散光分析

PAL 光学系统的结构如图 1 所示,该系统由 PAL、转像透镜和像面三部分组成。PAL 部分由 4 个“关键表面”构成<sup>[9]</sup>,即图 1 中的 1,2,3,4 四个表面,其中 1 为环形透射面,2 和 3 代表的是反射面,4 为透射面。成像光线通过透射面 1 折射进入系统,先后经过 2 和 3 的反射后,再通过透射面 4 折射和转像透镜到达像面。

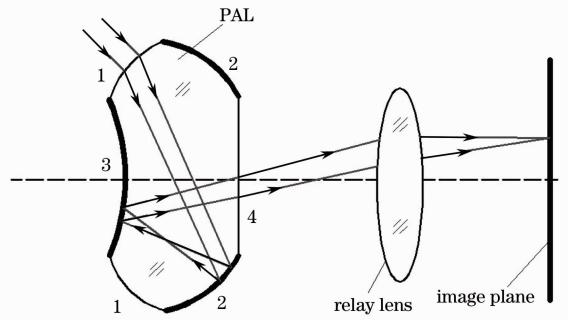


图 1 PAL 光学系统结构简图及成像光路  
Fig. 1 Simplified draft and optical path of PAL optical system

该光学系统杂散光可以分为以下几类:直射通过 PAL 或多次反射进入光阑的杂散光;因透射表面反射而产生的杂散光;因表面散射而产生的杂散光;因衍射产生的杂散光;转像透镜产生的杂散光。

### 2.1 直射通过 PAL 或多次反射进入光阑的杂散光

如图 2 所示,入射光线不经反射面直接到达像面,或者经反射面多次反射后到达像面形成“鬼像”<sup>[10]</sup>。这两种光路与光线分裂或散射现象无关,在孔径光阑设置正确的光学系统中一般都不会出现此类光路。

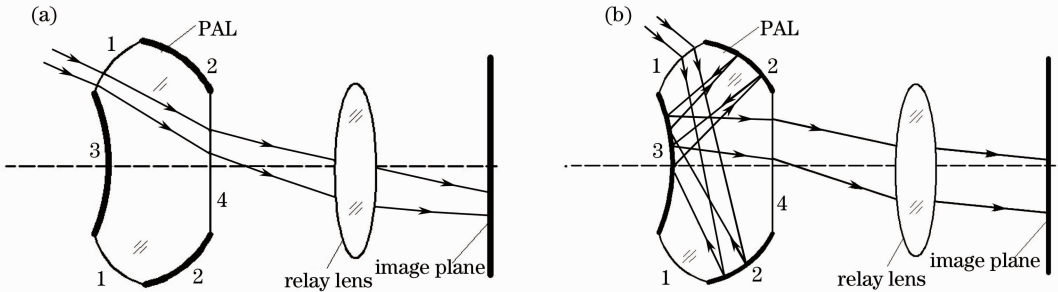


图 2 (a)直射通过 PAL 和(b)多次反射进入光阑的杂散光光路

Fig. 2 Optical path of stray light getting into the aperture (a) without any reflective surfaces and (b) after multi-reflection

### 2.2 透射表面不完全透射产生的杂散光

图 3 所示的两种光路中的杂散光都是由透射表面的不完全透射引起的。第一种情况[图 3(a)]是

光线先后经透射面 1 折射和反射面 2 反射后未到达反射面 3,而是到达透射面 1。由于透射面 1 并非完全透射面,光线在此分为两部分,一部分从透射面 1

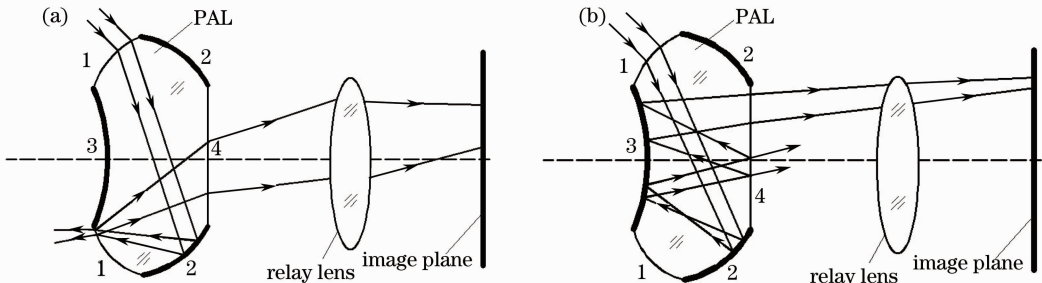


图 3 透射表面不完全透射引起的杂散光光路

Fig. 3 Optical path of stray light caused by incomplete transmission of transmission surfaces

透射出去,另一部分经反射进入后续系统,最终在像面上形成杂散光斑。另一种情况[图 3(b)]是光线先后经透射面 1 折射、反射面 2 和反射面 3 反射后到达透射面 4,由于透射面 4 并非完全透射,光线在此分为两部分,一部分折射出 PAL 形成正常成像光路,另一小部分再次反射到反射面 3,然后从透射面 4 穿出后到达像面。这两种杂散光路是 PAL 产生杂散光可能性最大的路径,虽然通过镀膜可以使得透射面的透射率达到 99% 以上,但如果这两种路径下的入射光能量很强,依然会对成像产生很大的影响。

### 2.3 表面散射产生的杂散光

表面散射产生的杂散光光路如图 4 所示。由于制作工艺缺陷,入射到反射面的光线不能被 100%

反射,部分光束能量会在此处散射后形成杂散光[图 4(a)]。除了反射面之外,透射面也会发生散射而引起杂散光[图 4(b)]。这种散射一般来说发生的可能性相对较低,并且散射光线产生后还要通过透射面 4 和转像透镜的进一步折射,最终能通过光阑并到达像面的光束能量是很低的。

### 2.4 衍射产生的杂散光

一般光学系统由于光阑边缘会发生衍射而产生一定量的杂散光。PAL 光学系统中也存在这种杂散光:在反射面 2 与透射面 4 交界处[图 5(a)]或者反射面 3 与透射面 1 的交界处[图 5(b)]会发生衍射现象而形成衍射杂散光,如图 5 所示。这种杂散光能量较低,对成像的影响不大。

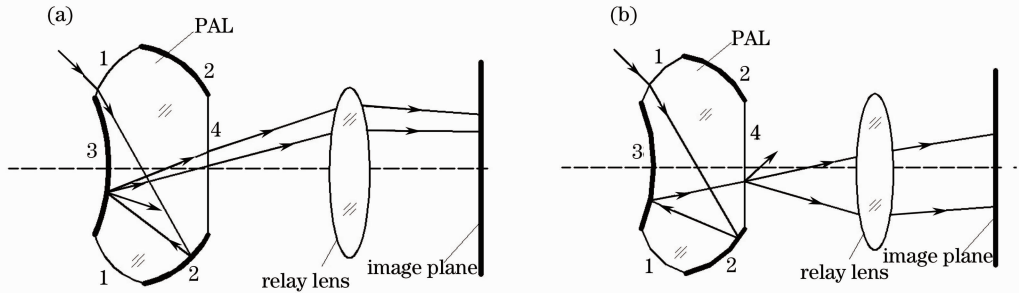


图 4 表面散射产生的杂散光光路

Fig. 4 Optical path of stray light caused by surface scattering

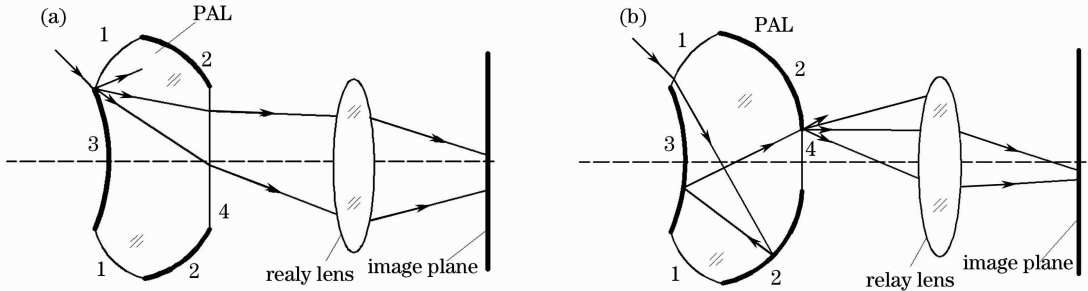


图 5 衍射产生的杂散光光路

Fig. 5 Optical path of stray light caused by diffraction

### 2.5 转像透镜产生的杂散光

由于 PAL 系统的光阑位于转像透镜之前,可以将 PAL 部分的杂散光与转像透镜产生的杂散光分开考虑。转像透镜可能产生的杂散光与普通折射光学系统的完全相同,主要是由镜片间的反射与镜筒壁表面的散射引起。

## 3 PAL 光学系统杂散光抑制

除透射面反射引起的杂散光之外,PAL 光学系统中其他杂散光的抑制方法与一般折反系统类似,主要是通过设计遮光罩等来抑制杂散光。对于直射

通过 PAL 或多次反射进入光阑的杂散光的抑制方法为在透射面 4 或靠近透射面 4 的位置设置孔径光阑;散射引发的杂散光从光学设计的角度无法完全消除,只能在加工工艺上加以控制;衍射产生的杂散光可以采用添加 Lyot 光阑,通过二次衍射的方式进行控制<sup>[11]</sup>;转像透镜产生的杂散光主要采用设置挡光结构或镜筒壁涂黑等方法来实现抑制。

透射面反射引起的杂散光光路比较复杂,引起这类杂散光的入射能量通常来源于成像视场内部,而且从 PAL 中出射后其光路会同正常成像光路混杂在一起,因此无法通过挡光结构来抑制此类杂散

光。虽然通过镀膜可以把透射面的反射率控制在1%以内,但当视场内有强光源存在时,这类杂散光依旧会较为严重。而由透射面4的反射引起的杂散光斑主要分布在系统的“盲区”<sup>[12]</sup>,对成像的影响并不大,抑制透射面反射引起的杂散光,应主要针对透射面1。

对因透射面1不完全透射产生的杂散光的分析,如图6所示。图中1和4是透射面,用细线表示;2和3是反射面,用粗线表示;5是吸收面,用虚线表示。透射面4为系统的孔径光阑,从 $P_{0,m}$ 点以最低视场角 $\theta_m$ 发出上光线,到达孔径光阑下部边缘,它与各个表面的交点分别为 $P_{1,m} \sim P_{4,m}$ 。另一侧从 $P_{0,M}$ 点以最高视场角 $\theta_M$ 发出下光线,其到达孔径光阑上部边缘,它与各个表面的交点分别为 $P_{1,M} \sim P_{4,M}$ , $n$ 为透射面1在点 $P_{1,m}$ 处的法线,光线 $P_{1,m}P_{2,m}$ 关于 $n$ 的对称光线与后续面的交点为 $P'_{2,m}$ 。若点 $P'_{2,m}$ 比点 $P_{2,m}$ 在Y轴的位置要高,则PAL中可能会存在着这样一种光路:从下方某点 $P_{0,b}$ 以视场角 $\theta_b$ 发出上光线与各面交点分别为 $P_{1,b} \sim P_{4,b}$ ,此时从上方某点 $P_{0,a}$ 以某视场角 $\theta_a$ 发出的下光线在到达反射面2后,其反射路径正好与 $P_{1,b}P'_{1,b}$ 重合( $P_{1,b}P'_{1,b}$ 是 $P_{1,b}P_{2,b}$ 关于点 $P_{1,b}$ 处法线 $n$ 的对称光线),于是该光线会沿着的路径 $P_{1,b}P'_{1,b}$ 反射到透射面1上,这时由于表面1并非是完全透射面,这部分光线会分成两部分:一部分折射出物方;另一部分能量会“伪装”成为以视场角 $\theta_b$ 进入PAL的成像光线 $P_{1,b}P_{2,b}$ ,并通过PAL系统最终成像在像面上,如图7所示。

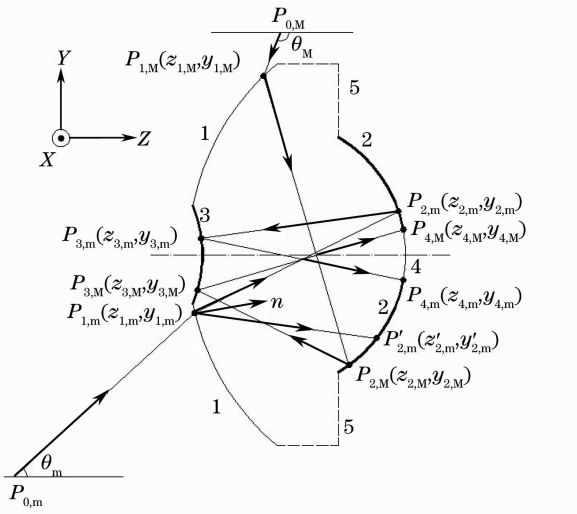


图6 透射面1不完全透射产生的杂散光分析  
Fig. 6 Analyze of stray light caused by incomplete transmission of critical surface 1

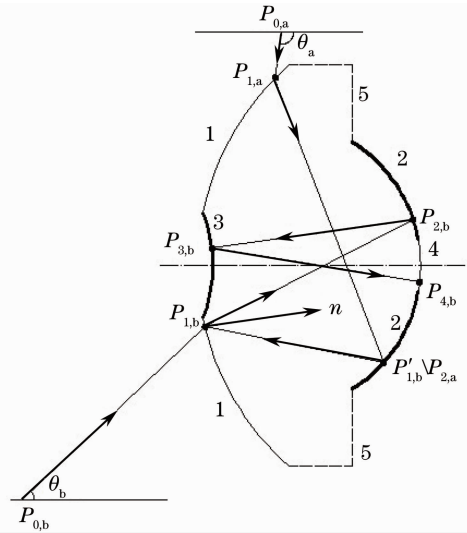


图7 不完全透射引起的杂散光的一种可能光路  
Fig. 7 Possible stray light path caused by incomplete transmission

但如果点 $P'_{2,m}$ 的在Y轴的位置比点 $P_{2,m}$ 要低,这意味着从最高视场发出的下光线也无法通过路径 $P'_{2,m}P_{1,m}$ 反射到透射面1,而其他成像视场内发出的下光线与第2面交点的位置会比点 $P_{2,m}$ 的位置要高,其他上光线对应的 $P'$ 点在Y轴位置会比点 $P'_{2,m}$ 的位置更低,故成像视场内的任何光线都不会出现类似于 $P'_{2,m}P_{1,m}$ 的路径而形成杂散光。因此,只要满足点 $P'_{2,m}$ 的位置比点 $P_{2,m}$ 的位置要低,则可以避免由透射面1不完全透射而引起的杂散光光路。

#### 4 PAL 光学系统杂散光仿真及实验

为了验证上文中提到的消杂散光方案的可行性,先将两个PAL光学系统在ASAP软件中进行仿真对比,它们具有相同的视场、焦距和入瞳大小,如图8所示。其中,图8(a)中的系统采用了本文提到的消杂散光方法,后文中用A指代;图8(b)中的系统在设计时未考虑这种消杂散光方案,用B指代。这两个系统的PAL部分均采用三胶合设计,其优势如下:1)普通PAL无消色差能力,采用胶合设计由于入射光要三次通过每一个胶合透镜,因此当其通过光阑时,实际相当于经过了9组胶合透镜,大大增强PAL自身的消色差能力,减轻了转像透镜的复杂程度<sup>[13]</sup>;2)由于单块大体积PAL制造难度大,且厚度足够的材料较少,分成三块分别制造与普通透镜制造过程相同,大大降低了制造难度;3)增加PAL的厚度,可以有效降低杂散光进入光阑的概率。

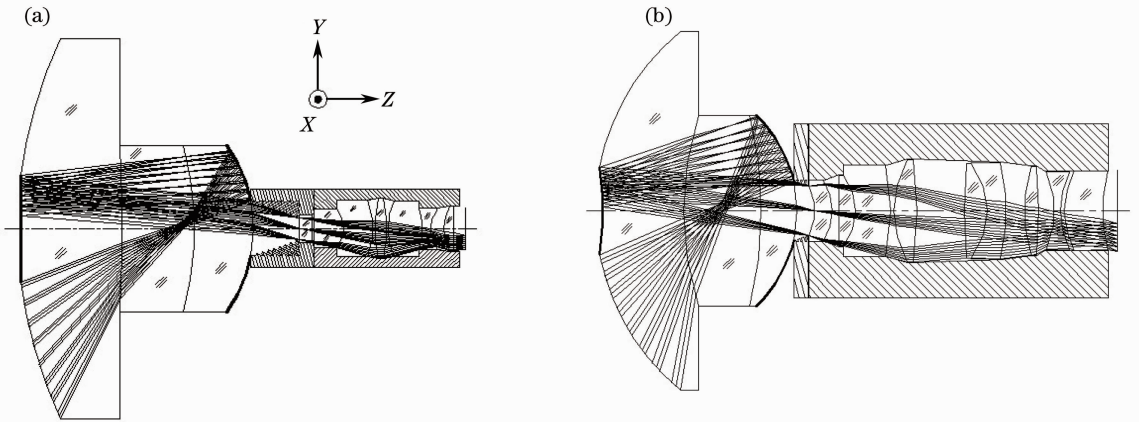


图 8 用于仿真对比的两个同光学参数 PAL 光学系统

Fig. 8 Two PAL systems with the same optical parameters for simulation comparison

在 ASAP 软件中分别建立两个系统的模型,定义第 1 面与第 10 面(这里的第 1 面和第 10 面是前文中提到的关键表面 1 和 4)的透射率为 0.98,反射率为 0.02,其余表面均认为是理想面;限制光线最多能够分裂的次数为 4。定义光线能覆盖到整个 PAL 的光源,光源发出平行于 Y-Z 平面的平行光,每条光线能量一致,与 Z 轴夹角为  $\theta$ 。对各个角度的平行光分别进行光线追迹,记录各个角度下像面能量的分布情况。考虑到  $30^\circ \sim 100^\circ$ (入射光与 Z 轴夹角)是系统的成像半视场角,这里将  $\theta$  分为  $0^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 100^\circ$  和大于  $100^\circ$  的三种情况分别考虑。 $\theta$  为  $30^\circ \sim 100^\circ$  时像面上杂散光的情况,如图 9 所示。

图 9 中横坐标代表光源发出的光线与 Z 轴的夹角  $\theta$ (即半视场角),纵坐标代表各个角度下像面上杂散光能量与像面总能量的百分比  $P$ 。曲线  $a$  代表的运用了消杂散光方法而设计的 PAL 光学系统(A 系统),而曲线  $b$  代表的系统(B 系统)未对透射面不完全反射引起的杂散光进行抑制。从图中可以看出,当  $\theta$  为  $30^\circ \sim 50^\circ$  和  $85^\circ \sim 100^\circ$  时,两个系统杂散光的比例基本接近;而当  $\theta$  处于  $50^\circ \sim 85^\circ$  之间时,

杂散光曲线  $b$  会出现一个明显的高峰, $a$  曲线依旧保持平稳,在这个区间内  $b$  曲线的  $P$  值与  $a$  曲线  $P$  值之比约为 7:1,这意味着经过消杂散光设计后,系统中由透射面反射引起的杂散光减少了约 85%。为了探知两条曲线差值形成的原因,需要详细分析两个系统中各个视场角时的杂散光路径情况。系统 B 在  $\theta$  分别为  $40^\circ$  和  $75^\circ$  时杂散光光线路径分布的情况,分别如表 1 和表 2 所示。

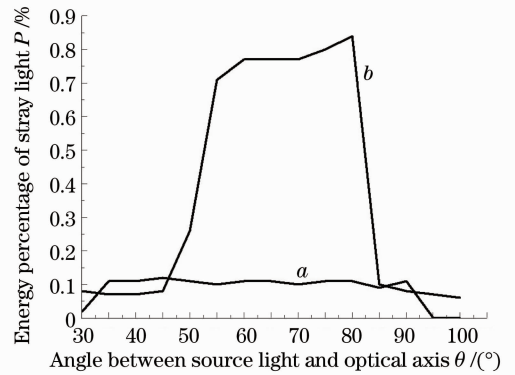


图 9 半视场角  $\theta$  为  $30^\circ \sim 100^\circ$  时两个系统杂散光曲线  
Fig. 9 Stray light curves of the two systems in half field angle of  $30^\circ \sim 100^\circ$

表 1 B 系统在半视场角  $\theta$  为  $40^\circ$  时的路径分布

Table 1 Stray light paths of system B with half field angle of  $40^\circ$

Path	Energy percentage / %	Times of rays split	Surfaces of rays split (in chronological order)
1	0.073	1	10th
2	0.001	2	1st, 10th
3	$\ll 0.001$	2	10th, 10th
4	$\ll 0.001$	3	1st, 1st, 10th
5	$\ll 0.001$	4	1st, 1st, 10th, 1st
6	$\ll 0.001$	4	1st, 1st, 1st, 1st

表 2 B 系统在半视场角  $\theta$  为  $75^\circ$  时的路径分布

Table 2 Stray light paths of system B with half field angle of  $75^\circ$

Path	Energy percentage /%	Times of rays split	Surfaces of rays split (in chronological order)
1	0.098	1	10th
2	0.696	1	1st
3	$\ll 0.001$	2	1st, 1st
4	0.001	2	10th, 10th
5	0.001	2	10th, 1st
6	$\ll 0.001$	3	1st, 1st, 10th
7	$\ll 0.001$	3	1st, 1st, 1st

从表中可以看出,  $\theta$  为  $40^\circ$  时系统中的杂散光主要是由于第 10 面的不完全透射引起的, 虽然第 1 面的不完全透射也会引起杂散光, 但它们只占很小的成分; 而当  $\theta$  为  $75^\circ$  时, 由于 Path 3 的存在, 由第 1 面的不完全透射引起的杂散光成为最主要的杂散光来源, 这部分杂散光能量所占百分比达到了近 0.7%, 它造成了曲线 *b* 的高峰。画出  $\theta$  为  $75^\circ$  时的 Path 2 的光路, 如图 10 所示, 可以看到, 此路径正是前文中详细分析的消除方法的杂散光路径, 这类杂散光是高视场时 PAL 系统中主要的杂散光。

系统 A 在  $\theta$  为  $75^\circ$  时的杂散光路径情况如表 3 所示, 从表中可以看出, 系统中并不存在图 10 中的杂散光路径, 杂散光全部是由第 10 面的不完全透射引起的, 第 1 面的不完全透射并不会引起杂散光。进一步观察 A 系统在其他视场角下的光线路径情况, 也并没有发现由第 1 面的不完全引起的杂散

光。由此可见, 提到的消杂散光方法确实能消除 PAL 系统中由第 1 面不完全透射引起的杂散光, 而正是由于系统中不存在这类杂散光, 杂散光曲线才不会在大视场时急剧上升。

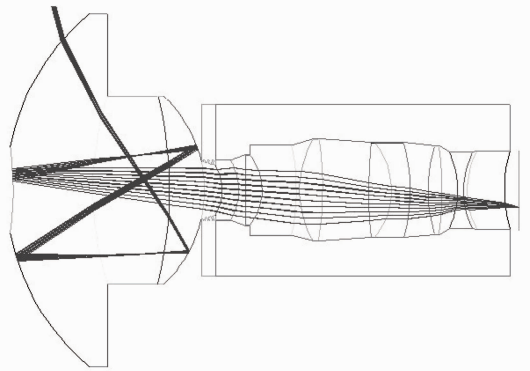


图 10 半视场角  $\theta$  为  $75^\circ$  时 B 系统 Path 2 光路图  
Fig. 10 Path 2 of system B at the half field angle of  $75^\circ$

表 3 A 系统在半视场角  $\theta$  为  $75^\circ$  时路径分布

Table 3 Stray light paths of system A at half field angle of  $75^\circ$

Path	Energy percentage /%	Times of rays split	Surfaces of rays split (in chronological order)
1	0.111	1	10th
2	$\ll 0.001$	2	10th, 10th
3	$\ll 0.001$	3	10th, 10th, 10th

进一步分析可以发现, 两个系统像面上有一部分杂散光能量是分布在盲区的, 这部分杂散光对成像没有有影响。若不考虑盲区里的杂散光能量(即认为探测器是环形), 仿真结果表明, A 系统在  $\theta$  为  $30^\circ \sim 100^\circ$  时将完全不会存在透射面反射引起的杂散光, 其杂散光始终为 0; B 系统杂散光曲线如图 11 所示。

从图中可以看到, 不考虑盲区内的杂散光后, 当  $\theta$  为  $50^\circ \sim 85^\circ$  时, B 系统的杂散光曲线依旧会出现一个明显的高峰, 此区域内杂散光能量比重约占像面总能量的 0.7%; 而  $\theta$  为其他角度时, 系统中也会存在少量杂散光。  $\theta$  为  $75^\circ$  时 B 系统的杂散光路径情况如表 4 所示, 可以看出, 主要的杂散光依旧是由第

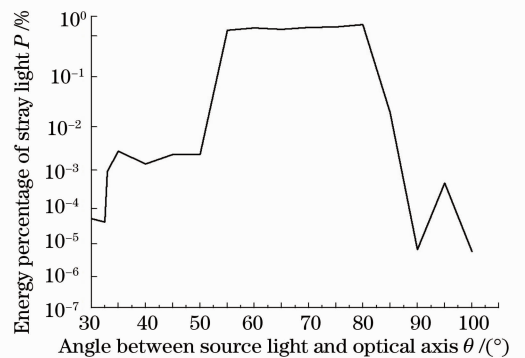


图 11 不考虑盲区中杂散光时 B 系统杂散光曲线  
Fig. 11 Stray light curve of system B when ignoring stray light energy in blind zone

1 面的反射引起,透射面 10 的反射基本不会引起杂散光。

在  $\theta$  为  $0^\circ\sim 30^\circ$  以及  $100^\circ$  以上时,所有能到达像面的能量均被认为是杂散光能量。仿真结果中,当

表 4 不考虑盲区内存散光时 B 系统在半视场角  $\theta$  为  $75^\circ$  时路径分布

Table 4 Stray light paths of system B in half field angle of  $75^\circ$  when ignoring stray light energy in blind zone

Path	Energy percentage /%	Times of rays split	Surfaces of rays split (in chronological order)
1	0.706	1	1st
2	$\ll 0.001$	2	1st, 1st
3	$\ll 0.001$	3	1st, 1st, 10th
4	$\ll 0.001$	3	1st, 1st, 1st

为验证上述仿真结果,这里将两个系统进行实验对比。两系统实物图如图 12 所示,其光学参数分别与 ASAP 软件中建立的 A,B 系统的光学参数一致,图 12(a)对应 A 系统,图 12(b)对应 B 系统。两个系统整体结构一致,系统中上方部分是 PAL 和转像透镜,下方的部分是 CCD 相机。图 13 展示了由两系统拍摄的图像,图 13(a)是由 A 系统拍摄,图 13(b)由 B 系统拍摄,两张图像中央的盲区均已被置黑。

实验方案如下:将 A,B 两系统置于全黑的环境中,在视场内放置一个较强的平行光光源,光源可以随意移动和旋转来改变其位置和角度,观察像面上的光斑分布情况。若系统中不存在透射面反射引起的杂散光,则像面上除了光源像之外,其他位置上不

$\theta$  靠近  $30^\circ(29^\circ\sim 30^\circ)$  时两个系统中存在着杂散光能量,这是由于元件尺寸上留有余量而造成的; $\theta$  为较低角度( $0^\circ\sim 29^\circ$ )以及  $100^\circ$  以上时,两个系统中都不会存在透射面反射引起的杂散光。

会出现明显的光斑;若系统中存在由第 1 面不完全透射引起的杂散光,那么像面上除了光源的像之外,另一侧视场的像面上还会存在明显的杂散光光斑。实验中发现,光源在某些特定的位置和角度下,B 系统像面上存在着光源像之外的光斑,光斑形状与光源像相似,分布在与光源像异侧的视场像面中,如图 14 所示;而 A 系统中,无论光源的位置和角度如何变化,系统中都不会出现其他明显的光斑,其像面上能量分布始终是类似于如图 15 所示的情形。实验结果表明,A 系统中已不存在透射面反射引起的杂散光,杂散光确实得到了有效的抑制,而 B 系统中透射面反射引起的杂散光是十分明显的。由此可以得出结论:由第 1 面不完全透射引起的杂散光是 PAL 中最主要的杂散光,提到的消杂散光设计方案



图 12 A,B 两个系统的实物图

Fig. 12 Samples of systems A and B

能完全消除这类杂散光,基于该方法设计的 PAL 系统能很好地抑制较大视场角时的杂散光,而其他视

场角时的杂散光也并不会变多。

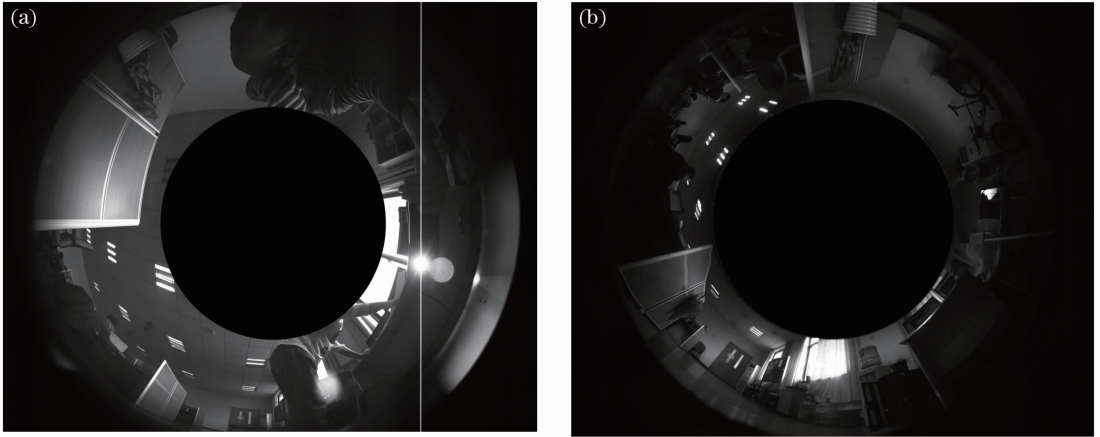


图 13 A, B 两个系统所拍摄的图像

Fig. 13 Images captured by systems A and B

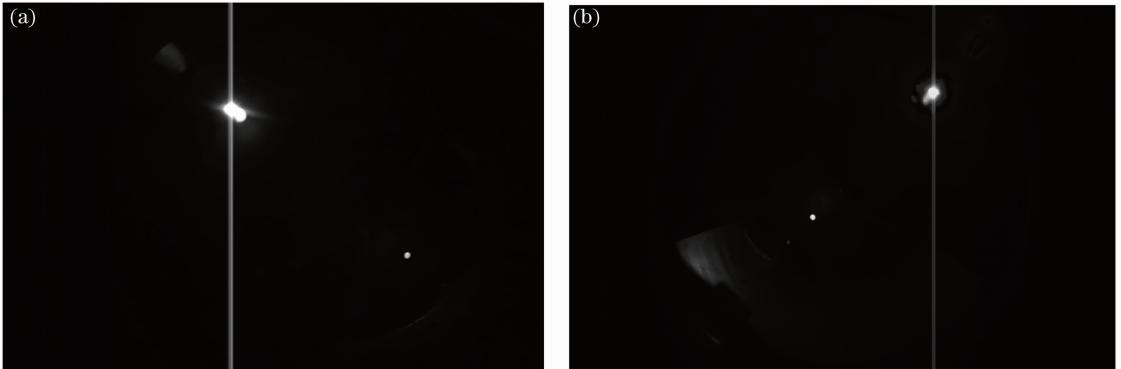


图 14 实验中 B 系统像面上的杂散光光斑

Fig. 14 Stray light spot in image plane of system B



图 15 实验中 A 系统像面上的能量分布

Fig. 15 Energy distribution in image plane of system A

## 5 结 论

分析了 PAL 系统中杂散光的主要来源,针对透射表面反射引起的杂散光,提出了一种从设计上对其进行抑制的方法,将两个实例在 ASAP 软件中仿

真并进行实验对照,结果由第 1 面不完全反射引起的杂散光会对普通 PAL 系统产生较大影响,而基于提出的消杂散光方法设计的 PAL 系统中不存在此类杂散光,它能有效消除大视场角的杂散光,其他视场的杂散光也并不会变多。由此说明,提出的消杂散光设计方案能有效提高 PAL 中的杂散光抑制水平。

## 参 考 文 献

- 1 Xiao Xiao, Yang Guoguang, Bai Jian. Panoramic-annular-lens distortion correction based on spherical perspective projection constraint[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 675~682  
肖 潇, 杨国光, 白 剑. 基于球面透视投影约束的全景环形透镜畸变校正[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 675~682
- 2 Wu Xianxiang, Guo Baolong, Wang Juan. Cylindrical panoramic image automatic mosaic algorithm based on phase correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1824~1829  
吴宪祥, 郭宝龙, 王 娟. 基于相位相关的柱面全景图像自动拼接算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1824~1829
- 3 Wang Huifeng, Liu Shangqian, Wang Dabao *et al.*. Panoramic image mosaic method for rotary scanning serial image[J]. *Acta*



- Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1211~1217  
 王会峰, 刘上乾, 汪大宝等. 旋转扫描序列图像的全景图拼接方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1211~1217
- 4 Shaoxing Hu, Yuyong Feng. Calibration of panorama based on linear CCD and fisheye lens [C]. Proceedings of the 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing, 2009, (1-9): 786~790
- 5 Zeng Jiyong, Su Xianyu. Catadioptric omnidirectional system with undistorted imaging for horizontal scene [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 636~640  
 曾吉勇, 苏显渝. 水平场景无畸变的折反射全景成像系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 636~640
- 6 Chen Lidong, Wang Wei, Zhang Maojun *et al.*. Design analysis of a complementary double mirror catadioptric omnidirectional imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3487~3494  
 陈立栋, 王伟, 张茂军等. 双反射面互补结构的折反射全向成像系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3487~3494
- 7 V. N. Martynov, T. I. Jakushenkova, M. V. Urusova. New constructions of panoramic annular lens design principle and output characteristics analysis [C]. *SPIE*, 2008, **7100**: 71000
- 8 Tateyama Doi. Panoramic Imaging Lens [P]. US Patent: US 6646818 B2, 2003
- 9 Li Ting, Yang Jianfeng, Ruan Ping *et al.*. Stray light analysis of the lunar-based optical telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(S1): 137~142  
 李婷, 杨剑锋, 阮萍等. 月基光学天文望远镜(LOT)的杂散光分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(S1): 137~142
- 10 Cen Zhaofeng, Li Xiaotong, Zhu Qihua. Stray light analysis for optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(3): 300~304  
 岑兆丰, 李晓彤, 朱启华. 光学系统杂散光分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(3): 300~304
- 11 B. R. Johnson. Analysis of diffraction reduction by use of a Lyot stop [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(8): 1376~1384
- 12 Zhu Fangming, Yang Guoguang, Yao Weiyong *et al.*. Linearization of annular image of panoramic annular lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(9): 1111~1114  
 朱方明, 杨国光, 姚炜勇等. 全景环形透镜形像的线性化研究[J]. *光子学报*, 2001, **30**(9): 1111~1114
- 13 S. Niu, J. Bai, X. Y. Hou *et al.*. Design of a panoramic annular lens with a long focal length [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(32): 7850~7857

栏目编辑: 张 腾