多角度偏振成像仪杂散光校正方法研究

张苗苗[1,2,3], 孟炳寰[1,3*], 钱鸿鹄[1,2,3], 韩 琳[3], 陈怀军[3], 王 羿[1,3], 洪 津[1,3]

[1]中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

[2]中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

[3]中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 多角度偏振成像仪是一种超广角画幅式的偏振成像传感器,杂散光是影响其辐射偏振测量精度的重要因素之一。为了避免杂散光影响高精度定量参数的反演,需要在实验室对其进行专门的分析、测量和校正。根据多角度偏振成像仪的光学系统特点,将影响仪器的杂光分为局部杂光和全局杂光,重点分析了这两种杂光的成因和表现特性,并以此为基础构建了仪器的杂散光模型,提出了通过分区域照明获取杂光系数矩阵并对待校图像进行分块校正的方法。在未饱和及过饱和两种情况下,通过分矩形区域、分视场二维转动扫描成像的方式,建立了目标区辐射量和其他非目标区杂光量的关系,最终获得 11×11 区域的杂散光系数矩阵。最后根据实测得到的杂散光系数矩阵对图像进行了校正,结果表明,此校正方法可以消除至少 90%的杂散光。

关键词 测量; 多角度偏振成像仪; 杂散光校正; 分区域; 杂散光系数矩阵

中图分类号 TH744 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1112003

Research on Correction Method of Stray Light in Directional Polarization Camera

Zhang Miaomiao[1,2,3], Meng Binghuan[1,3], Qian Honghu[1,2,3], Han Lin[3], Chen Huaijun[3], Wang Yi[1,3], Hong Jin[1,3]

[1]*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui* 230031, *China*;

[2]*University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui* 230026, *China*;

[3]*Key laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui* 230031, *China*

Abstract The directional polarization camera is an ultra-wide-angle polarization imaging sensor, and stray light is one of the important factors that affect the radiation and polarization measurement precision. In order to avoid the influence of stray light on the inversion of high-precision quantitative parameters, special analysis, measurement and correction should be carried out in the laboratory. According to the characteristics of the optical system of the directional polarization camera, the stray light which affects the instrument is divided into local stray light and global stray light. The causes and performance characteristics of these two kinds of stray light are analyzed emphatically. On this basis, the stray light model of the instrument is constructed, and the method of obtaining the stray light coefficient matrix by partition of the illumination for correction the image is proposed. In the cases of unsaturation and supersaturation, by dividing the rectangular area and the two-dimensional rotation scanning imaging of the field of view, the relationship between the amount of radiation in the target area and the amount of scattered light in other non-target areas is established. Finally, the 11×11 regions of the stray light coefficient matrixes are obtained. The image is corrected according to the measured stray light coefficient matrixes. The results show that this correction method can eliminate at least 90% of stray light.

收稿日期: 2017-05-18; **收到修改稿日期**: 2017-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(41405037)

作者简介: 张苗苗(1993—),女,博士研究生,主要从事遥感仪器杂散光校正方面的研究。E-mail: zhm76@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 洪 津(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事光谱/偏振遥感技术、航空/航天遥感器工程技术等方面的研究。E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

* **通信联系人**。E-mail: bhmeng@aiofm.ac.cn

Key words measurement; directional polarization camera; stray light correction; subregion; stray light coefficient matrix

OCIS codes 120.5410; 120.4640; 290.2648

1 引　言

多角度偏振成像仪(DPC)是一种大视场画幅式低畸变成像的偏振传感器,能够获取多角度遥感图像信息,探测精度是重要的技术指标[1]。光学系统的杂散光是指探测器接收到的非成像光线。非成像光线到达探测器表面形成杂散辐射,会降低图像的对比度、清晰度,严重时目标图像会被杂散辐射噪声湮没,导致光学仪器无法正常工作[2-3]。对于多角度偏振成像仪来说,杂散光会造成成像质量下降,最终降低仪器的探测精度。为了抑制杂散光到达像面,一般会采用遮光罩、挡光环等消杂光措施[4-5]。然而,这些措施并不能完全消除杂散光,尤其是对于多角度偏振成像仪这类大视场成像仪视场内的杂散光,因此必须研究合适的杂散光校正方法。

目前杂散光校正方法主要有图像复原法和矩阵法。图像复原是从已知的降质图像恢复出原始图像,是一种反降质的过程,针对不同的降质类型和退化过程国内外学者提出了一系列算法[6-9]。例如,国外 Iwasaki 等[6]采用 Van-Cittert 迭代算法对鬼像予以处理。国内原育凯等[7]针对 FY-2 气象卫星的扫描辐射计杂散光问题,采用逆滤波算法实现校正。矩阵法最早由 Zong 等[10-11]提出,它的基本思想是获取不同视场位置的杂散光扩散函数,从而得到成像系统的杂散光分布矩阵以实现杂散光的校正,该方法已成功应用到多个载荷[12-15]。为了达到更优的杂光校正效果,Laherrere 等[16]针对地球反射比的偏振化和指向性(POLDER)仪器提出了一类和二类杂光的概念,运用反卷积算法校正了一类杂光,并将像面分成若干照明区域获得杂光分布矩阵校正了二类杂光。

本文结合多角度偏振成像仪的工作原理和光路结构特点,介绍了该仪器杂散光的成因,重点分析了局部杂光和全局杂光的特性,建立了仪器的杂散光模型,提出了分区域获取杂光系数矩阵的方法,并通过实验测量了仪器全视场的杂光分布。最后,通过待校图像与杂散光系数矩阵的数值运算实现了图像校正。实验结果表明,此杂散光的校正方法基本上消除了多角度偏振成像仪视场内杂散光的影响。

2 多角度偏振成像仪光学系统特点

多角度偏振成像仪[17]采用大视场光学系统加面阵电荷耦合器件(CCD)探测器,通过滤光检偏组件转动切换光谱波段和偏振检测方向分时获取大气偏振成像信息,光学系统结构图如图 1 所示。光学镜头主要由大口径的负透镜前组和双胶合的正透镜后组构成。前组的主要作用是减小光束与光轴的夹角,尽量消除系统的像散和畸变,为后组的聚焦成像做准备;后组对前组的剩余像散、剩余畸变以及其他像差给予平衡并对光束进行聚焦。前组和后组配合形成反远距结构并构成像方远心光路。仪器沿轨和穿轨方向视场均为 100°,探测器为帧转移型 CCD 探测器,有效成像的像元数为 512×512。

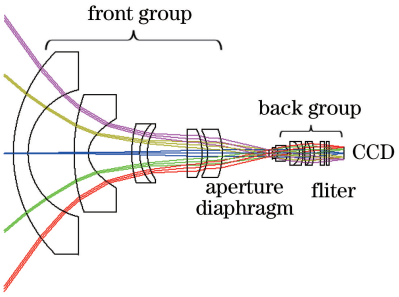

图 1　光学系统结构图

Fig. 1　Structure of optical system

3 多角度偏振成像仪杂散光特性分析

杂散光可分为外杂光、内杂光和成像杂散光。外杂光是光学系统外部的辐射源经过内部结构件多次反

射衍射到达探测器的辐射能量；内杂光是光学系统内辐射源经系统表面的反射、折射或衍射传播而进入探测器的辐射能量；成像杂散光是成像光线经非光路表面散射、或经光路表面的非正常传播而进入探测器的辐射能量[2]。多角度偏振成像仪光学镜头共有 12 片透镜（20 个介质面），杂散光在外遮光罩及内消杂光机构的作用下，由透镜面、滤光片（光谱、偏振、中性衰减）、CCD 之间的多次反射形成，这些杂散光主要为成像杂散光。

通过上述对多角度偏振成像仪光学系统特点和实际杂光成因分析，将杂散光分为局部杂光和全局杂光两种，以便分类测量校正[16]。

3.1　局部杂光

空间成像光学遥感器的目的是获取高质量的清晰图像，而由于光学系统镜面镀膜的非理想性，成像光线会在平板光学元件表面和 CCD 光敏面之间形成反射，最终照射到 CCD 上造成图像的降质或降晰。在成像模型中，点扩散函数描述了一个理想的脉冲信号经过成像系统后所成的图像，把在像面局部区域内由于点扩散引起干扰其他像元的辐射量称为局部杂光，其形成机理如图 2 所示，这里示意了 CCD 与临近平板表面之间反射形成的杂光。实际系统获得的图像可以用真实图像与点扩散函数的卷积来表示，因此可以通过测量或评估不同视场的点扩散函数运用反卷积的方法来实现局部杂光的校正[18]。

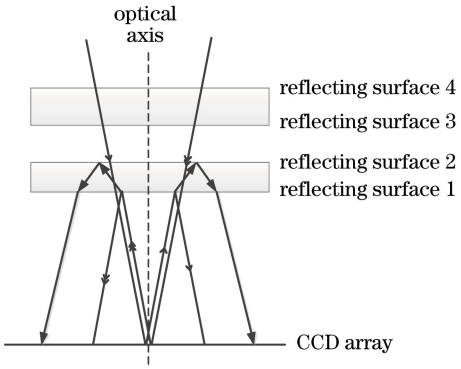

图 2　局部杂光形成原理图

Fig. 2　Schematic of local stray light origin

为了评估多角度偏振成像仪局部杂光的量级大小，使用 LightTools 模拟分析了 CCD 与最近的 4 个表面反射形成的杂光。以 865 nm 为例，根据实测结果设置各表面的参数，CCD 阵列反射率为 18.8%，反射面 1 反射率为 1%，反射面 2 反射率为 2.7%，反射面 3 和反射面 4 反射率均为 2%。图 3 是模拟的结果，图 3(a)展示了二维空间的单像元照度分布；图 3(b)是对数图，可明显地看出目标光源附近较强的扩散半径是 $r=20$像元，在信号值是 10^7 量级时，$\phi 40$ 像元内扩散的单像元杂光的量级是 10，即点扩散的单像元杂光是信号值的 10^{-6}。根据 CCD 的满阱比计算仪器的饱和 DN 值是 9600 DN，假设目标光响应为 9000 DN，点扩散杂光只有 0.009 DN。而多角度偏振成像仪单次成像的噪声是 14 DN，采集 100 幅图像平均后噪声降低到 1.4 DN。即使 100 倍饱和照明的条件下，点扩散杂光只有 0.9 DN，只是仪器的噪声水平。经过上述分析发现，局部杂光较小，量级难以测量，所以无需单独测试，其微弱的残留效应当成全局杂光处理即可。

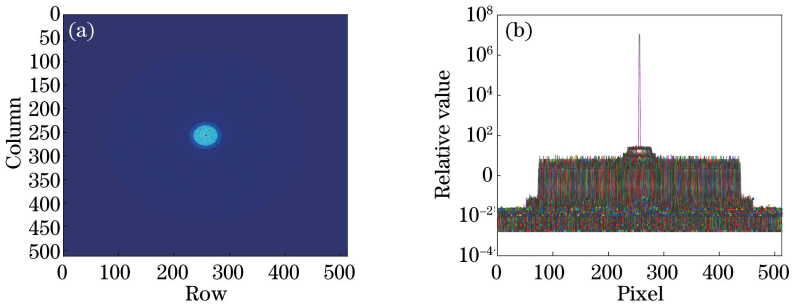

图 3　局部杂光模拟结果。(a)照度图；(b)对数图

Fig. 3　Local stray light simulation results. (a) Illuminance diagram; (b) logarithmic diagram

3.2　全局杂光

全局杂光包含了镜筒的散射和反射、多个镜片和滤光片及 CCD 之间的多次反射及像面聚焦和未聚焦的鬼像，是一种全像面的空间低频杂光。这是大视场多镜片成像系统特有的现象，而且其杂光强度是全局的累加效应，随光源面积的增加而增强。实验室用黑带法测试了全像面照明下的杂光系数，测试结果约为 5%。假设一个像元被照亮 8000 DN 时，探测器其他像元接收的能量是 0.0015 DN，而 100×100 个像元区域被照明时，杂散光将会增加到 15 DN。

对于全局杂光的特点，本研究用实验中采集到的图像来说明。当仪器被积分球光源照明一个小的圆形区域，其他没有被照明的地方应该是全黑的，然而实际情况是有三种不同类型的额外响应，如图 4 所示。第一种是一圈一圈的亮环，它是透镜边缘的散射造成的；第二种是鬼像[18]，是镜头介质表面偶次反射聚焦成像形成的；第三种是遍布整个 CCD 像面的连续低频部分。其杂光分布随着目标源成像在 CCD 的不同位置而不同，如图 4 所示，当光源照亮在 CCD 中心时，其鬼像与目标光重合；当光源在其他视场时，鬼像表现得更为明显。另外，多角度偏振成像仪的辐射测量精度为 5%，此量级的杂光影响仪器的辐射测量精度，所以必须对其进行校正。

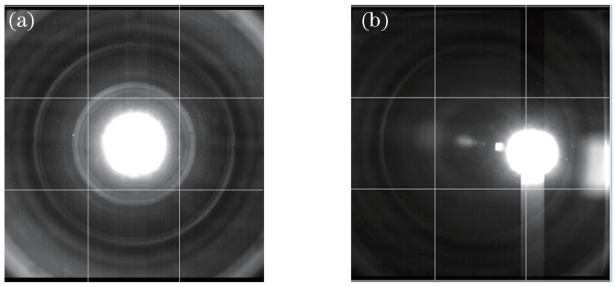

图 4　多角度偏振成像仪全局杂光表现。(a)中心视场；(b) 15°视场

Fig. 4　Global stray lights performance of directional polarization camera. (a) Center field of view; (b) 15° field of view

4　多角度偏振成像仪杂散光校正模型构建

对于多角度偏振成像仪来说，118°大视场成像，不同视场光线照明下目标光对其他像元的影响未知，同一视场不同方位角也可能不是旋转对称的，所以需要全像面分区域测量不同区域照明下的杂光分布。这样分区域直接测量的优点是，在保证测试精度的情况下，其参数较为完整，模型较为精确。为了获得杂光比较强的影响，需要拍摄两幅图像，一幅在仪器的动态范围内，另一幅是过饱和曝光，因为多角度偏振成像仪的线性很好，对同一稳定光源成像可以通过计算短积分时间的图像获得过饱和积分的能量。在全像面均匀响应 8000 DN 条件下，分成 $N\times N$ 区域时每一块的杂光信号约为 $400/N^2$。N 的值太小，则单个区域视场较大，采样稀疏，不能全面反映各个分视场下的杂光分布情况；N 的值太大，则杂光信号太小，不易测量且测试误差大。经过分析，N 的值在 9～13 之间为宜，在综合考虑数据的可靠性、有效性及时间成本的前提下，N 最终选取为 11。分区 11×11 时每一块的杂光信号约为 $400/11^2=3.3$ DN，10 倍饱和曝光下杂光信号为 33 DN。多角度偏振成像仪采集 100 幅图像平均后噪声降低到 1.4 DN，预估杂光测试误差约为$1.4/33\approx5\%$，即理论上可消除 95%的杂光。

根据上述分析，本研究最终采用杂散光系数矩阵来描述多角度偏振成像仪的全局杂散光模型。在某一块区域 D 被有效光照亮时，理想情况下只有该区域有响应，但由于存在杂散光，该光源对全像面其他像元也有影响，称之为杂散光分布 $D_{i,j}$。获得多角度偏振成像仪全像面上 11×11 个区域的响应分布后即可构建杂散光系数矩阵。

如图 5 所示，以面阵 CCD 左上角为坐标原点，将 512×512 像元划分为 11×11 个区域，每个区域由 46×46 个像元组成。光源以某个视场角入射到多角度偏振成像仪中，会成像于像面特定的位置，如图 5 中标红位置所示，则该区域平均响应值为 $\overline{Y}_{m,n}$ ($m=1,2,\cdots,11$; $n=1,2,\cdots,11$)，而其他像元的响应值为 $y_{i,j}$ ($i=1,2,\cdots,512$; $j=1,2,\cdots,512$)，则每一个像元的杂散光系数为

$$d_{i,j}=\frac{y_{i,j}}{\bar{Y}_{m,n}}。\tag{1}$$

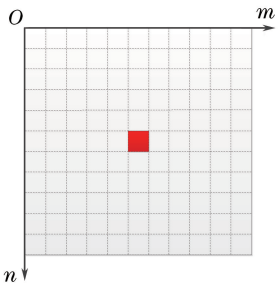

图 5　CCD 分区图

Fig. 5　Partition diagram of CCD

在该区域照明条件下杂散光系数矩阵为

$$\boldsymbol{D}_{m,n}=\begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \cdots & d_{1,j} & \cdots & d_{1,512} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \cdots & d_{2,j} & \cdots & d_{2,512} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{i,1} & d_{i,2} & \cdots & d_{i,j} & \cdots & d_{i,512} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{512,1} & d_{512,2} & \cdots & d_{512,j} & \cdots & d_{512,512} \end{bmatrix},\tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{D}_{m,n}$ 代表某一块区域照明下的杂散光系数矩阵，$\boldsymbol{D}_{m,n}$ 总共有 11×11 个；$d_{i,j}$ 代表每一个像元的杂散光系数，照明区域内的系数设置为零。

根据上述理论，同样把待校图片也划分为 11×11 区域，且各个区域求均值，可表示为

$$\boldsymbol{A}_{\text{means}}=\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,11} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,11} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{11,1} & a_{11,2} & \cdots & a_{11,11} \end{bmatrix},\tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{A}_{\text{means}}$ 代表图像区域均值矩阵；$a_{1,1}$，$a_{1,2}$，…，$a_{11,11}$ 为各个区域平均灰度值。

仪器像面的辐射响应可表示为

$$Y=Y_{\text{IB}}+a_{1,1}\cdot\boldsymbol{D}_{1,1}+a_{1,2}\cdot\boldsymbol{D}_{1,2}+\cdots+a_{11,11}\cdot\boldsymbol{D}_{11,11}=Y_{\text{IB}}+\sum_{m=1,n=1}^{11,11}a_{m,n}\cdot\boldsymbol{D}_{m,n},\tag{4}$$

式中 Y 为仪器像面所有像元的辐射量实际测量值，Y_{IB} 是仪器像面所有像元的辐射量的理想值，$\boldsymbol{D}_{1,1}$，$\boldsymbol{D}_{1,2}$，…，$\boldsymbol{D}_{11,11}$ 为不同区域照明的杂散光系数矩阵，当仪器结构不变的情况下，$\boldsymbol{D}_{m,n}$ 为常量。可通过上式求得 Y_{IB}，实现多角度偏振成像仪的杂散光的校正。

5　多角度偏振成像仪杂散光系数矩阵测量

基于上述理论，要实现杂散光的校正，彻底的解决办法是测量本仪器 11×11 区域的的杂散光系数矩阵。通过分区域照明来表征照明区与其产生的杂光的数学关系，测量系统原理图如图 6 所示。

为满足仪器光谱波段及辐射亮度的要求，实验光源选用大口径的卤灯积分球和发光二极管（LED）积分球[19]，为了实现过饱和照明，443，490 nm 杂光测试选用 LED 积分球，565，670，763，765，865，910 nm 杂光测试选用卤灯积分球。为了降低环境和一次反射光对测量的影响，整个实验的测量都是在两级暗室条件下进行。通过 ZEMAX 软件仿真，发现了多角度偏振成像仪入瞳形状和入瞳直径与视场有关，为了实现像面矩形区域照明，逆向追迹得到不同视场下光阑的形状和尺寸。像面划分为 121 个区域，每一个区域由 46×46 个像元组成，电控二维转台带动多角度偏振成像仪转动，实现分视场测试。对于每一个区域，用积分球照明，通过更换光阑，得到一个覆盖此区域的图像。

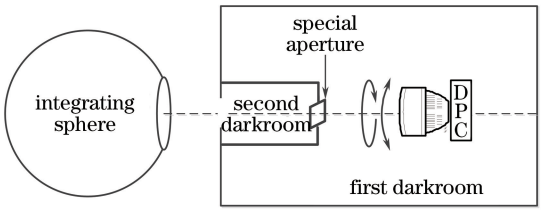

图 6　多角度偏振成像仪杂光系数矩阵测量系统图

Fig. 6　Stray light coefficient matrix measurement system of directional polarization camera

对上述实验采集到的图像，分别采用暗电流校正和帧转移效应校正[20]。根据预处理后的 121 幅图像构建杂散光系数矩阵。提取未饱和图像的信号值来替换过饱和的信号值，替换过后全像面响应归一化处理，每个像元得到一个杂光影响因子，目标光对本区域的影响因子设置为零，得到最终的杂散光系数矩阵。图 7 是某一区域照明下杂散光系数矩阵的测量结果，每一个通道，结果都是 121 个杂散光系数矩阵，每一个矩阵都是 512×512 个元素。

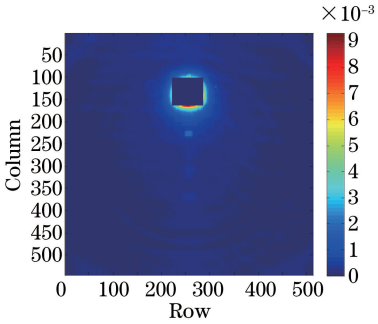

图 7　某一区域的杂光系数矩阵测量结果

Fig. 7　Measurement result of stray light coefficient matrix in a certain region

6　多角度偏振成像仪杂散光校正实验验证

多角度偏振成像仪在暗背景下采集了积分球照亮像面某一块区域的图像，在进行暗电流校正和帧转移校正后，对待校图像进行分块，使用实测得到的 121 个杂散光系数矩阵依次对图像进行了校正。图 8 展示了校正前和校正后的对比效果，为了更好地显示效果，对比度被拉伸，光源响应值为 3800 DN，黑色区域为 0 DN，白色区域大于 10 DN。可以看出大部分杂光(包含亮环、全像面连续的低频杂光)已被校正，但光斑边缘有残留，这是由两方面原因引起，一方面是算法本身是对图像分块内的均匀校正，没有考虑成像形状，存在一定的误差；另一方面是实验采集的照明区域比理论设计的照明区域偏小且位置有偏差，在构建杂散光系数矩阵时，手动扩展了目标光区域，从而导致与目标光区域相邻的区域边缘处杂光未校正。图 8(b)中红色框标示的边缘平均残留是 25 DN，与目标光 3800 DN 相比，残留量为目标光的 0.7%，在可接受的范围内。因此，该方法的关键是精确地获取杂散光系数矩阵，并严格控制实验过程中的测量误差。另外，校正后图像残留的横条纹是

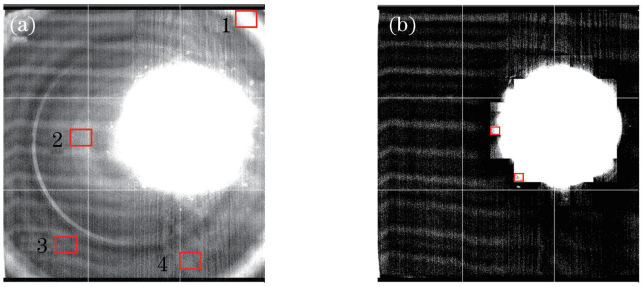

图 8　多角度偏振成像仪杂光校正效果。(a)校正前；(b)校正后

Fig. 8　Effect of stray light correction of directional polarization camera. (a) Before correction; (b) after correction

图案噪声[21]，这是由于CCD本身特性的不均匀性引起的，后续还将研究相关算法进一步消除该噪声。

选取了图8中红框所示的4块区域来表征杂光校正定量化的结果，分别计算此区域校正前和校正后的平均值，结果如表1所示。由表1结果可以看出，所有区域杂散光的影响都衰减了90%以上，与实验前构建模型时理论分析结果基本一致，消除了至少90%的杂光，这说明杂散光校正效果良好。另外校正后的单像元杂光信号值均小于10，这也可以更好地说明此校正方法将杂光信号校正到了仪器的噪声水平。

表1　杂散光校正结果

Table 1　Correction results of stray light

Number	Average value before correction	Average value after correction	Stray light attenuation percentage /%
1	30	1.7	94.33
2	16	0.18	98.88
3	9.2	0.9	90.22
4	11.6	0.72	93.79

7　结　论

介绍了多角度偏振探测仪杂散光的成因和表现特点，重点分析了局部和全局杂散光的特性，建立了仪器杂散光模型，提出了分视场测量杂光分布的方法，并设计相关实验获取了全视场的杂光系数矩阵。最后通过对暗背景积分球图像的校正，发现此校正方法至少可以消除多角度偏振成像仪视场内90%的杂光。

杂散光是影响光学遥感仪器测量精度的重要因素之一，解决杂散光问题的最重要的环节之一就是对其校正。所提出的杂散光校正方法对其他常规广角透射式成像遥感器同样具有一定的适用性。

参　考　文　献

[1] Qian Honghu, Meng Binghuan, YuanYinlin, *et al*. Full field of view polarization effect measurement and error analysis of non-polarized channels of spaceborne directional polarimetric camera[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(10): 100701.
钱鸿鹄, 孟炳寰, 袁银麟, 等. 星载多角度偏振成像仪非偏通道全视场偏振效应测量及误差分析[J]. 物理学报, 2017, 66(10): 100701.

[2] Yuan Yukai. Stray light suppressing measure of optical system[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(1): 6-10.
原育凯. 光学系统杂散光的消除方法[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1): 6-10.

[3] 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.

[4] Li Yan, Liu Jianfeng. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0928002.
李岩, 刘剑峰. 红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0928002.

[5] Zhao Yuchen, Xu Yanjun, Sha Wei, *et al*. Stray light analyze and suppress of the space-borne infrared optical system [J]. Chinese J Laser, 2015, 42(10): 1016001.
赵宇宸, 许艳军, 沙巍, 等. 天基红外成像光学系统杂散光分析与抑制[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1016001.

[6] Iwasaki A, Oyama E. Correction of stray light and filter scratch blurring for ASTER imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(12): 2763-2768.

[7] Yuan Yukai, Li Xinyao, Pei Yuntian. Simulating first order stray light of FY-2 VISSR using templates[J]. Optics and Precision Engineering, 2007,15(1): 45-49.
原育凯, 李欣耀, 裴云天. 基于模板的FY-2一级杂散光模拟[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(1): 45-49.

[8] Yan Ming, Wu Fei, Wang Zhiyong. Removal of SJ-9A optical imagery stray light stripe noise[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014, 35(5): 72-80.
严明, 伍菲, 王智勇. “实践九号”A卫星光学遥感图像杂散光噪声去除[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(5): 72-80.

[9] Hao Jiankun, Huang Wei, Liu Jun. Review of non-blind deconvolution image restoration based on spatially-varying PSF [J]. Chinese Optics, 2016, 9(1): 41-50.

郝建坤，黄玮，刘 军. 空间变化 PSF 非盲去卷积图像复原法综述[J]. 中国光学，2016，9(1)：41-50.

[10] Zong Y Q，Brown S W，Meister G，*et al*. Characterization and correction of stray light in optical instruments[C]. SPIE，2007，6744：67441L.

[11] Zong Y Q，Brown S W，Johnson B C，*et al*. Correction of stray light in spectrographs：implications for remote sensing [C]. SPIE，2005，5882：588201.

[12] Shang Yang，Han Jun. Correction of stray light of imaging spectrometer with grating dispersion[J]. Foreign Electronic Measurement Technology，2012，31(2)：43-46.
尚杨，韩军. 光栅型成像光谱仪杂散光校正技术研究[J]. 国外电子测量技术，2012，31(2)：43-46.

[13] Zhang Junqiang，Wu Qingwen，Yan Changxiang. Measurement and correction of stray light of space-borne high resolution imaging spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering，2011，19(3)：552-560.
张军强，吴清文，颜昌翔. 星载成像光谱仪杂散光测量与修正[J]. 光学 精密工程，2011，19(3)：552-560.

[14] Cui Yi，Wei Jun，Huang Xiaoxian. Image restoration of imaging spectrometer based on line spread function matrix[J]. Infrared Technology，2014，36(2)：115-119.
崔毅，危峻，黄小仙. 基于线扩散函数矩阵的成像光谱仪图像矫正方法[J]. 红外技术，2014，36(2)：115-119.

[15] Zhang Tengfei，Huang Xiaoxian，Wei Jun，*et al*. Research on correction method of stray light in large field push-broom imaging spectrometer[J]. Laser & Infrared，2016，46(11)：1375-1378.
张腾飞，黄小仙，危峻，等. 宽视场推扫式成像光谱仪杂散光校正方法研究[J]. 激光与红外，2016，46(11)：1375-1378.

[16] Laherrere J M，Poutier L，Bret-Dibat T，*et al*. POLDER on-ground stray light analysis，calibration，and correction [C]. SPIE，1997，3221：132-140.

[17] Yang Weifeng，Hong Jin，Qiao Yanli. Optical design of spaceborne directional polarization camera[J]. Acta Optica Sinica，2015，35(8)：0822005.
杨伟锋，洪津，乔延利. 星载多角度偏振成像仪光学系统设计[J]. 光学学报，2015，35(8)：0822005.

[18] Mei Chao，Zhou Sizhong，Zhang Hengjin，*et al*. Method of first-order ghost-image analysis in imaging system based on Code V and Tracepro[J]. Acta Optica Sinica，2013，33(4)：0411003.
梅超，周泗忠，张恒金，等. 基于 Code V 和 Tracepro 的成像光学系统一阶鬼像分析方法[J]. 光学学报，2013，33(4)：0411003.

[19] Yuan Yinlin，Xu Jun，Zhai Wenchao，*et al*. Design and test of a spectrally tunable integrating sphere reference light source with large exit aperture[J]. Acta Optica Sinica，2013，33(7)：0712004.
袁银麟，徐骏，翟文超，等. 大孔径可调光谱积分球参考光源研制和检测[J]. 光学学报，2013，33(7)：0712004.

[20] Powell K，Chana D，Fish D，*et al*. Restoration and frequency analysis of smeared CCD images[J]. Applied Optics，1999，38(8)：1343-1347.

[21] Wang Chuanjin，Ye Binxun. Astronomical visible light detector[M]. Beijing：China Science and Technology Press，2013：145.
王传晋，叶彬浔. 天文可见光探测器[M]. 北京：中国科学技术出版社，2013：145.