

引用格式: YE Chen, LUO Donggen, LI Yixin, et al. Research on the Extraction Method of Test Light Source Variation Based on Directional Polarimetric Camera Data[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(12): 1212003

叶晨, 骆冬根, 李怡心, 等. 基于多角度偏振成像仪数据的测试光源变化提取方法研究[J]. 光子学报, 2022, 51(12): 1212003

基于多角度偏振成像仪数据的测试光源变化提取方法研究

叶晨^{1,2,3}, 骆冬根^{1,3}, 李怡心⁴, 姚萍萍^{1,3}, 王羿^{1,3}, 向光峰^{1,2,3}, 李扬^{1,2,3},
李双^{1,3}, 洪津^{1,3}

(1 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 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, 合肥 230031)

(4 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要:以卤钨灯积分球光源作为辐射源、用宽谱段陷阱探测器同步监测的传统稳定性参数测试方法存在光谱带宽不匹配、数据对齐困难等问题,导致测量准确性不能保证。因此提出用多角度偏振成像仪自身的图像数据替代陷阱探测器监测数据的方案,对多角度偏振成像仪 12 个通道数据分别进行小波分解,提取出各波段的光源能量变化用于稳定性测量数据校正,有效去除光源稳定性影响,提升仪器稳定度参数测量准确性。用该方案扣除光源波动后,载荷的非稳定性参数结果从 0.153% 减小至 0.031%。提取出的同一波段三检偏方向光源辐射能量变化趋势高度一致,对多帧图像法信噪比计算结果提升更明显,有力证明方案的有效性。该方案可用于各类成像型遥感仪器的稳定性参数测试。

关键词:多角度偏振成像仪;光电性能测试;小波分解;稳定性;陷阱探测器;信噪比

中图分类号: TP751

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225112.1212003

0 引言

中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的星载偏振传感器多角度偏振成像仪(Directional Polarimetric Camera, DPC)具有低畸变、大视场、画幅式成像的特性,使其可获得地气系统的多角度、多光谱、偏振辐射信息^[1-4],将获得的偏振信息和大气特性反演模型相结合,可得到大气气溶胶和云的分布状况及相关应用参数^[5-6]。DPC 载荷在出厂前,需要在实验室对 DPC 响应做稳定性能测试^[7-8],实验要求光源的辐射能尽可能稳定。辐射源通常采用卤钨灯积分球,周小丽等研制的近红外光源在稳定后 10 min 以内光强波动约 0.1%^[9];袁银麟等研制的大孔径可调光谱积分球光源 2 h 内的全谱段不稳定性约为 0.2%^[10];D'AMATO D 阐明了同一卤钨灯,其不同波段的相对光谱辐射率不同,且不稳定性也不一致^[11]。光源使用年限增加导致其性能衰变,结合环境温湿度变化和操作性规范性差异等因素影响,光源非稳定性^[12]参数会进一步变大。因此有必要对光源进行能量监测,以降低多角度偏振成像仪的测量误差,校正稳定性测量参数^[13]。本文通过对多角度偏振成像仪 12 个通道的灰度值序列进行小波分解,提取出各通道的光源能量变化量并在数据处理中进行校正,以有效提升载荷稳定性参数测量精度。

基金项目:高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(No.30-Y20A19-9007-15/17),王宽诚教育基金“先进偏振遥感技术与应用国际团队”(No.GJTD-2018-15)

第一作者:叶晨(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为偏振光学遥感成像载荷仿真与分析。Email: chye@mail.ustc.edu.cn

导师(通讯作者):骆冬根(1979—),男,副研究员,博士,主要研究方向为遥感仪器光电系统设计与研究。Email: dgluo@aiofm.ac.cn

收稿日期:2022-04-08; **录用日期:**2022-06-08

<http://www.photon.ac.cn>

1 基本原理

1.1 多角度偏振成像仪和陷阱探测器观测成像模型

搭载在某型号卫星上的DPC在一个探测周期内可获取3个非偏波段(763 nm、765 nm、910 nm)和3个偏振波段(490 nm、670 nm、865 nm)共12个通道的图像,每个偏振波段设置 0° 、 60° 、 120° 三个检偏方向。剩余一个本底通道用于测量DPC的暗电流数据,以消除由于探测器自身、电路盒温度等因素造成的影响。

根据DPC探测原理,其图像数字量(Digital Number, DN)可表示为

$$DN_{DPC} = G_{DPC} \cdot \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_s(\lambda) \cdot \frac{A_{\text{pixel}}}{F^2(1 + M_{\text{optic}})^2} \cdot T_{\text{atm}}(\lambda) - T_{\text{optic-DPC}}(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot t_{\text{int}} \cdot d\lambda + N_{\text{dark}} + N_{\text{noise1}} \right) \quad (1)$$

式中, DN_{DPC} 为像元的DN值, G_{DPC} 为DPC的电子增益系数, λ_1 、 λ_2 为DPC探测波段的上下限, $L_s(\lambda)$ 为积分球光源的光谱辐亮度, A_{pixel} 为像元面积, F 为等效光圈数, M_{optic} 为光学系统放大倍率, $T_{\text{atm}}(\lambda)$ 为环境光谱透过率, $T_{\text{optic-DPC}}(\lambda)$ 为DPC光学系统的光谱透过率, $\eta(\lambda)$ 为探测器量子效率, t_{int} 为积分时间, N_{dark} 为暗电流电子数总和, N_{noise1} 为DPC各种噪声的总和。因此从式(1)可以看到主要影响DPC长期稳定性的是其中4个参数:受积分球辐亮度稳定性影响的 $L_s(\lambda)$ 、受环境影响的 $T_{\text{atm}}(\lambda)$ 、受探测器温度影响的暗电流 N_{dark} 和探测器的其它噪声 N_{noise1} 。

陷阱探测器的探测原理可描述为

$$DN_{\text{TRAP}} = s \cdot \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} L(\lambda) \cdot M_{\text{TRAP}} \cdot A_{\text{TRAP}} \cdot T_{\text{atm}}(\lambda) \cdot d\lambda + N_{\text{offset}} + N_{\text{noise2}} \quad (2)$$

式中, s 为陷阱探测器灵敏度, λ_3 、 λ_4 为其探测带宽上下限, 对于同一款陷阱探测器来说, λ_3 、 λ_4 是固定值, M_{TRAP} 、 A_{TRAP} 分别为陷阱探测器光学系统参数、探测器面积, N_{offset} 、 N_{noise2} 分别为陷阱探测器的固定偏置、噪声总和。因此陷阱探测器可直接测量获得光源的稳定性。

1.2 载荷非稳定性评价

载荷的一项重要指标是像元响应不确定性,即载荷非稳定性(Instability, NS),其计算公式为

$$NS = \frac{1}{y} \frac{\sum_{i=1}^k (y(i) - \bar{y})}{k-1} \times 100\% \quad (3)$$

式中, k 为载荷在稳定性实验期间响应的总次数, $y(i)$ 为载荷第 i 次响应时的输出信号, \bar{y} 为全时间段内输出信号的算术平均值。

1.3 小波分解原理

小波分解可由粗到精地对信号进行多尺度分解,所以能够很好地提取出信号中的各层低频成分^[14-16],待分解信号通过低通滤波器得到低频系数 A , 通过高通滤波器得到高频系数 D , 如图1所示, 信号经第一层小波分解后得到 A_1 和 D_1 , 然后再将第一层的低频系数 A_1 作为第二层的输入, 又得到一组低频系数 A_2 和高频系数 D_2 。以此类推分解, 直到满足想要的频率要求。

待分解的原始信号可看做0级低频系数 $a^0 = (f_0, f_1, \dots, f_n)$, 那么

$$a^m = G a^{m-1} \quad (4)$$

$$d^m = H a^{m-1} \quad (5)$$

式中, G 为低通滤波器矩阵, H 为高通滤波器矩阵, a^m 、 d^m 分别为当前分解 m 层时的低频系数、高频系数, 因此

$$a^{m-1} = G^* a^m + H^* d^m \quad (6)$$

式中, G^* 、 H^* 为 G 、 H 的共轭矩阵。

小波基函数为

$$\begin{cases} W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi_{a,b}(t) dt \\ \varphi_{a,b}(t) = \left| \frac{1}{\sqrt{a}} \right| \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\varphi(t)$ 为基小波或母小波函数, 经过尺度因子 a 和平移因子 b 变换后的 $\varphi_{a,b}(t)$ 统称小波。

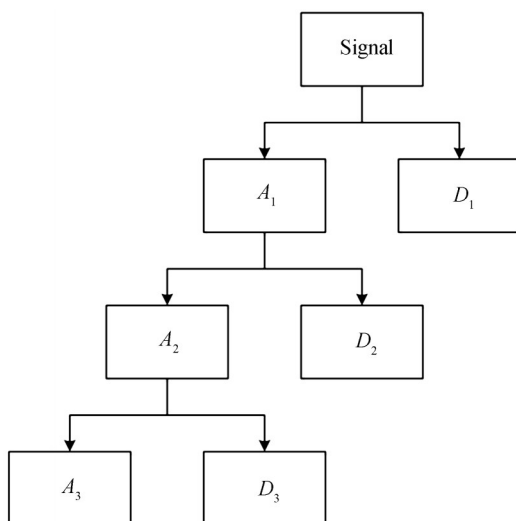


图1 信号小波分解过程

Fig.1 Signal wavelet decomposition process

对于离散信号, 有

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k) \quad k \in Z \quad (8)$$

2 各观测波段光源变化量提取

2.1 实验数据的获取

以搭载在某型号卫星上的多角度偏振仪 DPC 稳定性测试实验为例。其稳定性实验测试现场示意图如图 2 所示, 将陷阱探测器和 DPC 平行放置于积分球的出光口, 控制柜控制积分球的点灯数和电流, 采用直径为 2.5 m 的卤钨灯 IS2500-1000 型积分球, 工作波段是 350~2 500 nm, 标称全谱非稳定性为 0.2%/h, 所采用的 SI19008 型陷阱探测器的辐射不确定度低于 0.65%。先将 DPC 和陷阱探测器分别正对积分球辐射源, 打开积分球光源及 DPC 进行预热至稳定状态, 设置好相应的仪器参数, 各自记录响应值, 根据陷阱探测器监测的光源稳定段所对应的 DPC 成像情况, 经数据处理判断 DPC 响应是否稳定。

DPC 的同一通道在 6 595 s 里采了 1 024 次, 采样频率为 0.155 Hz, 陷阱探测器监测频率是 2 Hz, 由 Nyquist 采样定律知: DPC 各通道的 DN 帧序列能检测到的最高频率是 0.077 5 Hz, 陷阱探测器能识别光源变

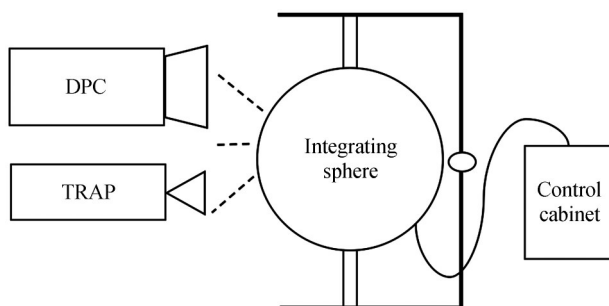


图2 DPC 稳定性实验示意图

Fig.2 Schematic diagram of DPC stability experiment

化最高的频率是 1 Hz。

在稳定性实验中,重点关注的是卤钨灯积分球的低频辐射变化信号^[17],而陷阱探测器在监测时引入的噪声及仪器测量误差主要是相对高频噪声,因此利用小波分解可以从含有高频噪声的曲线中提取出低频的光源缓变信号。同时,在 DPC 的 CCD 记录数字量灰度值 DN 值过程中,CCD 的光电响应的噪声较光源能量变化属于高频成分,陷阱探测器的监测灵敏度变化等噪声较光源本身的能量变化也属于高频成分,因此光源能量的低频变化曲线是暗藏在 DN 值帧序列和陷阱探测器监测曲线中的。又由于陷阱探测器的采样频率比 CCD 同一通道的采样频率高,因此陷阱探测器中蕴含的光源变化信息更多,但是稳定性实验只要求光源能量稳定在一定范围内,因此理论上可从 DN 值帧序列中提取出光源变化趋势。

在稳定性实验中,积分球辐射源在 DPC 的 CCD 上所成的某一帧图像如图 3 所示,由于观测位置和条件均保持不变,因此每帧的被辐射区域位置是固定的,其内接正方形尺寸约是 160 pixels×160 pixels。考虑用多像元平均法提高数据信噪比,因此本次选取的像元监测区域为中央区域 140 pixels×140 pixels。DPC 采用的是帧转移型面阵 CCD,因此图像的预处理包括扣除当前帧及前后各 3 帧本底平均和帧转移效应校正。

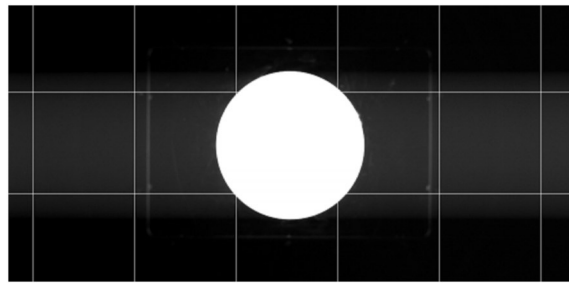


图3 DPC 某一通道接收到的一帧图像

Fig. 3 A frame of image received by one channel of DPC

2.2 光源变化曲线的提取

基于像元的光子信号和转换过程中产生的噪声变换特性,本次小波基选取的是 db2 小波,分解层数为 8,从陷阱探测器监测曲线中提取出光源的低频变化趋势 $A_1 \sim A_8$,也从各通道的 DN 值帧曲线中提取出 $A_1 \sim A_8$,将两者之间的低频曲线做 Pearson 相关,取 Pearson 相关系数最大所对应的低频曲线,认为是各通道的光能量变化趋势,提取光源变化曲线流程如图 4 所示。Pearson 相关系数是用来反映两变量之间相似程度的统计量,衡量两者之间的线性关联性,其对两组数据的异常值较为敏感,即数据的异常点会导致两组数据间的 Pearson 相关系数降低。

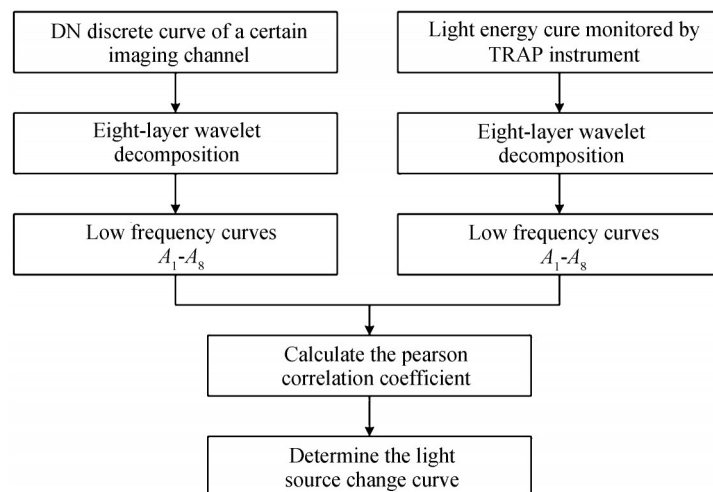


图4 提取光源变化曲线流程

Fig.4 Process of extracting light source change curve

依次对12个通道的DN值帧曲线做8层小波分解,将每个通道每层的低频曲线 A_n 和陷阱探测器的 A_n 计算Pearson相关系数。以670 nm(P1)通道为例,此通道的DN值帧曲线的 $A_1\sim A_8$ 和对应陷阱探测器的 $A_1\sim A_8$ 之间的Pearson相关系数如图5所示,DPC的670(P1)、670(P2)、670(P3)之间的Pearson相关系数如图6所示。

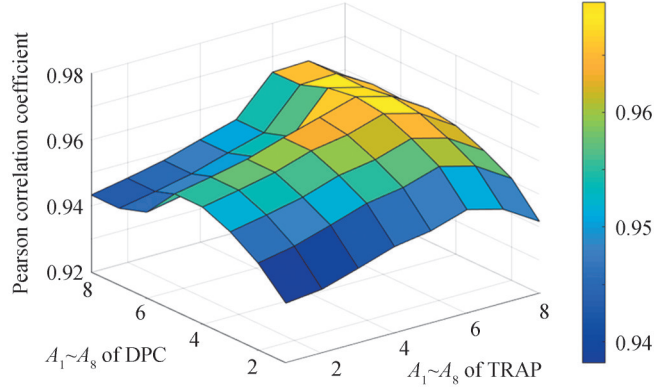


图5 670 nm (P1)通道的DN值帧序列的 $A_1\sim A_8$ 和陷阱探测器的 $A_1\sim A_8$ 的相关系数
Fig. 5 Correlation coefficient between $A_1\sim A_8$ of trap detector and $A_1\sim A_8$ of DPC 670 nm (P1)

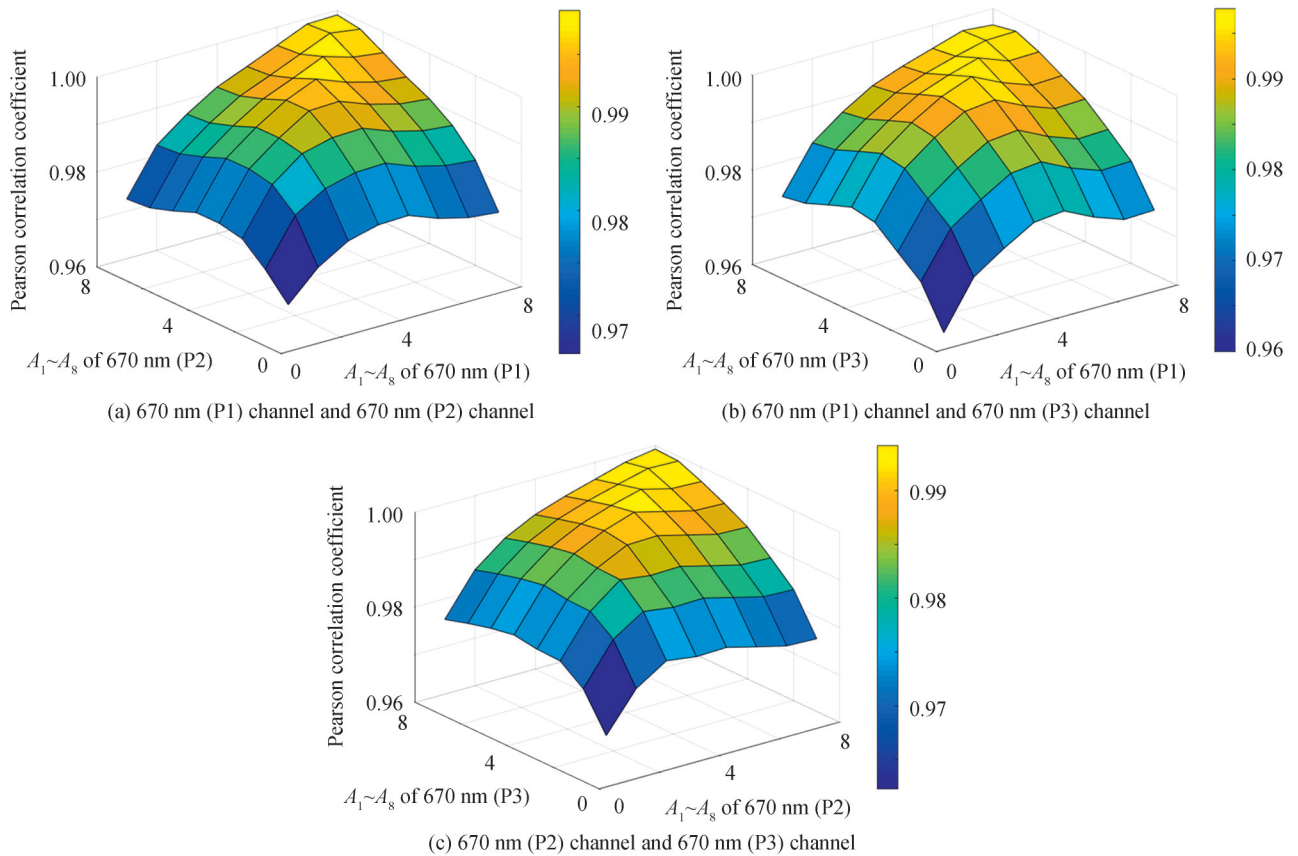


图6 670 nm (P1)、670 nm (P2)、670 nm (P3)的DN值帧序列的 $A_1\sim A_8$ 之间的Pearson相关系数
Fig. 6 Pearson correlation coefficient between $A_1\sim A_8$ of DN value frame sequence of 670 nm (P1)、670 nm (P2)、670 nm (P3) channel

由图5可看出,对于670 nm(P1)而言,在陷阱探测器的 $A_1\sim A_8$ 曲线中,Pearson相关系数最大值均是在DN值帧序列的 A_5 处取得,且均在0.95以上,说明670 nm(P1)和光源的670 nm波段辐射能的变化极度相关。由图6可看出670 nm的三个偏振通道的DN值帧序列在相同的小波分解层数下(即对角线方向),其Pearson相关系数取得最大值,且在 A_5 时的两两之间的Pearson相关系数接近0.998,说明三个偏振通道的

DN值帧序列变化趋势一致,是由光源670 nm波段的辐射能变化造成的。因此对670 nm波段而言,其对应的DN值帧序列的 A_5 最能体现光源此波段的变化趋势。同理计算得到其余8个成像通道的光源变化曲线是各自通道DN值帧序列的 A_4 或 A_5 ,说明在整个稳定性观测实验期间,光源的光辐射能主要以低于0.004 8 Hz的频率缓慢变化。因此,每个通道的DN值帧序列小波分解的 A_4 或 A_5 即为实验期间光源变化量。

以测量的初始时刻的光能量为基准,各通道光源能量变化趋势和变化量分别如图7和表1所示。光源各波段的能量稳定性不一致,其中490 nm、910 nm和865 nm波段变化超过0.5%,因此有必要对DPC的观测数据进行去光源变化处理,以提高稳定性参数的真实性和有效性。

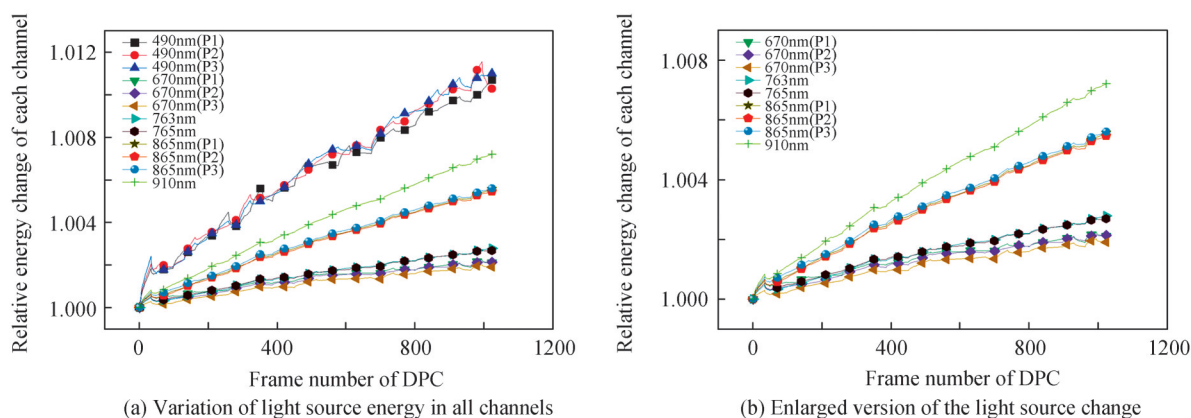


图7 各通道的光源能量变化

Fig.7 Variation of light source energy in all channels

表1 各波段的光能量变化

Table 1 Variation of light energy in each wavelength band

Band/nm	Light energy increase ratio
490	1.065%
910	0.721%
865	0.554%
763	0.278%
765	0.268%
670	0.205%

利用所提取的各波段光源能量变化情况进行稳定性校正,得到利用陷阱探测器监测方法和小波分解方法前后的稳定性参数计算结果如表2所示,可以看到两种方法获得的稳定性参数计算结果均有一定程度的提升,而小波分解方法获得的稳定性参数的提升更为明显,较好地去除了光源自身的波动、环境光谱透过率不稳定性、DPC自身温度变化导致的暗电流不稳定性,计算出的不稳定性更接近DPC实际工作时的不稳定性。

表2 两种校正方法的非稳定性参数计算结果对比

Table 2 Comparison of calculation results of the instability parameter by two correction methods

Band/nm	Before correction	After TRAP correction	After wavelet decomposition correction
490	0.29%	0.27%	0.089%
910	0.20%	0.17%	0.006 5%
865	0.15%	0.12%	0.009 1%
763	0.074%	0.049%	0.008 49%
765	0.071%	0.047%	0.009 55%
670	0.056%	0.056%	0.015 40%

3 基于小波分解方法提取稳定性参数的验证

3.1 实验室信噪比计算方法

1) 多帧图像数据信噪比计算法

CCD同一通道接收到了 k 帧图像,在被辐照区域内选取计算区域 $m \times n$,对于计算区域内的某一个像元 (i, j) ,在 k 帧图像中,该像素点对应 k 个DN值,求其平均值 $\mu_{(i,j)}$ 及标准差 $\text{std}_{(i,j)}$,定义该像元的信噪比为

$$\text{SNR}_{(i,j)} = \mu_{(i,j)} / \text{std}_{(i,j)} \quad (9)$$

以此类推,可求得计算区域内其它像元的信噪比。将 $m \times n$ 个像元的信噪比 $\text{SNR}_{(i,j)}$ 取平均,作为CCD此通道接收到的图像的信噪比SNR,即

$$\text{SNR} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \text{SNR}_{(i,j)} \quad (10)$$

2) 相邻两帧信噪比计算法

欧洲机器视觉协会制定的图像传感器与相机性能测试标准EMVA Standard 1288^[18]中提出用相邻两帧计算信噪比,取CCD相邻两帧图像 A 、 B ,假设噪声源静止且具有均匀性,则在被辐照区域内选取计算区域 $m \times n$,定义平均灰度值即信号为

$$s = \frac{1}{2mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_A(i,j) + y_B(i,j)) \quad (11)$$

式中, $y_A(i,j)$ 表示图像 A 中坐标 (i,j) 处的像元灰度值, $y_B(i,j)$ 表示图像 B 中坐标 (i,j) 处的像元灰度值。

两图像 A 、 B 相减,得到新图像 C ,其 $m \times n$ 个像元灰度值的标准差记为 std_C ,则原图像 A 或 B 的噪声大小视为

$$d = \frac{\text{std}_C}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

则信噪比定义为

$$\text{SNR} = \frac{s}{d} \quad (13)$$

3.2 陷阱探测器修正光源计算信噪比

在稳定性实验中,常用陷阱探测器监测光源变化曲线来对DPC所成的图像进行去光源变化,将当前图像的建立时间与所对应的光源曲线的点对应起来,然后再去光源变化,即可计算信噪比。设某一通道的第1帧、第2帧、...、第 k 帧图像建立时对应的陷阱探测器监测的光辐射能依次为 Q_1 、 Q_2 、...、 Q_k ,将其光能量归一化处理,则此通道第 i 帧的光能量修正系数为

$$c_i = Q_i / Q_k \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

第 i 帧图像修正后的 $\text{DN}_{\text{TRAP_corrected},i}$ 值为

$$\text{DN}_{\text{TRAP_corrected},i} = \text{DN}_i / c_i \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

将每帧图像根据陷阱探测器的光能量进行DN值修正后,计算出的信噪比记为陷阱探测器修正后信噪比。

3.3 基于小波分解法修正光源计算信噪比

为证明提出的用小波分解法提取光源的有效性,用基于小波分解法提取出12个成像通道各自的光源变化曲线,依据光源变化修正图像DN值,得到修正后的帧序列信噪比以及信噪比提升比例分别见图8和9,具体提升的信噪比数值比较见表3。由图8可看出,小波分解法修正光源后计算出的信噪比接近相邻两帧信噪比,证明提取光源方法的正确性。

陷阱探测器去光源修正后较未修正前信噪比平均提升了0.72%,而小波分解法修正后信噪比平均提升了2.52%。在865 nm和910 nm波段,小波分解去光源法将信噪比分别提升了4.34%和12.9%,远高于陷阱探测器监测数据修正的结果,反映了实验期间光源在865 nm波段和910 nm波段能量波动较大,也说明用宽谱的陷阱探测器监测数据来修正865 nm和910 nm波段的变化存在局限。在490 nm波段,小波分解法将信噪比提升了0.54%,但陷阱探测器修正法仅将信噪比提升了0.09%,主要是因为490 nm波段的光源能量较

低,获取的图像DN值低。虽然光源在490 nm波段的变化最大,但信噪比提升并没有910 nm波段显著。两种方法在670 nm波段信噪比提升幅度小则是因为此波段的光源变化小于0.205%。

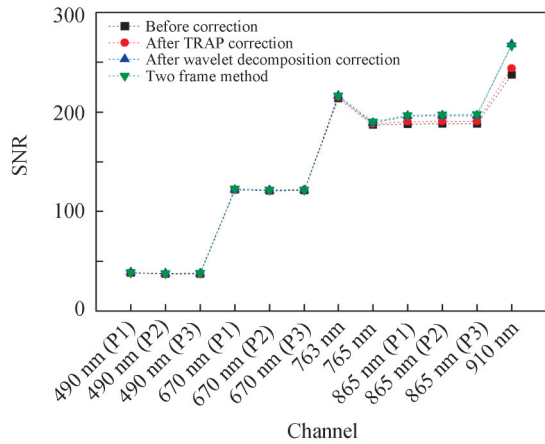


图8 不同的方法计算的信噪比
Fig.8 SNR calculated by different methods

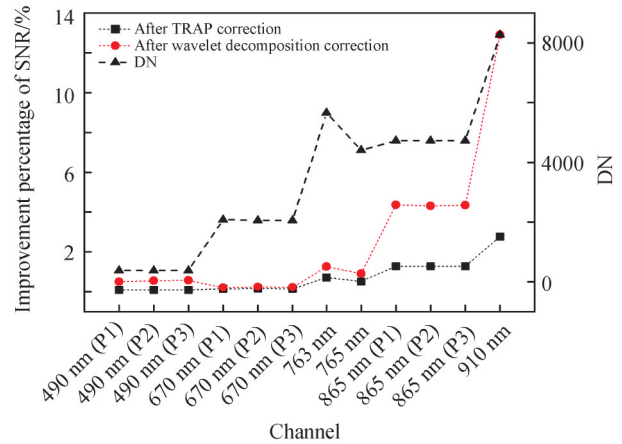


图9 陷阱探测器去光源变化法和小波分解法去光源变化法提升的信噪比
Fig.9 The improved SNR of the trap detector de-illumination variation method and the wavelet decomposition de-illumination variation method

表3 陷阱探测器去光源变化法和小波分解法去光源变化法提升的信噪比数值比较

Table 3 Numerical comparison of the improved SNR between trap detector de-illumination variation method and wavelet decomposition de-illumination variation method

Channel	After TRAP correction	After wavelet decomposition correction
490 nm (P1)	0.09%	0.51%
490 nm (P2)	0.09%	0.55%
490 nm (P3)	0.09%	0.57%
670 nm (P1)	0.14%	0.20%
670 nm (P2)	0.16%	0.23%
670 nm (P3)	0.15%	0.22%
763 nm	0.71%	1.26%
765 nm	0.52%	0.90%
865 nm (P1)	1.28%	4.35%
865 nm (P2)	1.28%	4.31%
865 nm (P3)	1.28%	4.34%
910 nm	2.76%	12.90%
Mean	0.72%	2.52%

4 结论

积分球光源不同光谱波段的变化趋势不同,且与光源的使用年限、环境控制、操作规范等因素有一定的相关性,但总的来说,大口径积分球光源的变化趋势较缓慢。本文提出用小波分解法从DPC各成像通道的DN值帧曲线中提取出光源各波段的能量变化趋势,进而扣除光源变化趋势,使稳定性测试的结果更为客观和真实。光源变化校正的效果优于传统陷阱探测器监测数据校正,DPC的信噪比较未扣除光源波动前平均提升了2.52%,非稳定性降低到0.031%,验证了此方法提取光源变化量的有效性。

参考文献

- [1] YANG Weifeng, HONG Jin, QIAO Yanli. Optical design of spaceborne directional polarization camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8):0822005.
杨伟峰,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.
- [2] LI Z Q, HOU W Z, HONG J, et al. Directional polarimetric camera(DPC): monitoring aerosol spectral optical properties overland from satellite observation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2018, 218:21-37.
- [3] TU Bihai, HONG Jin, YAO Pingping, et al. Polarization detection performance of directional polarimetric camera[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7):0712003.
涂碧海,洪津,姚萍萍,等.多角度偏振成像仪偏振探测性能与检测[J].光学学报,2020,40(7):0712003.
- [4] XIANG Guangfeng, HUANG Chan, MENG Binghuan, et al. In-flight image registration and performance evaluation for directional polarimetric camera[J]. Acta Photonica Sinica, 49(8):0812001.
向光峰,黄禅,孟炳寰,等.多角度偏振成像仪在轨图像配准及性能评估[J].光子学报,2020,49(8):0812001.
- [5] TU Bihai, YAO Pingping, MENG Binghuan, et al. Research on non-uniformity correction of detector for directional polarimetric camera, 2020, 49(9):0911002.
涂碧海,姚萍萍,孟炳寰,等.多角度偏振成像仪探测器非均匀性校正研究[J].光子学报,2020,49(9):0911002.
- [6] HERMAN M, DEUZE J L, MARCHAND A, et al. Aerosol remote sensing from POLDER/ADEOS over the ocean: improved retrieval using a nonspherical particle model[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110:D10S02.
- [7] ZHOU Yue, YAN Feng, ZHANG Mingchao. Development of measurement instrument for photoelectric parameters of CCD[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10):3451-3456.
周跃,闫丰,章明朝.CCD光电参数测试系统的研制[J].红外与激光工程,2014,43(10):3451-3456.
- [8] LI Dongjing, YU Ping, QI Xinda. The design of spaceborne calibration integrating sphere system [J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(1):57-62.
李东景,于平,齐心达.星上定标积分球系统的设计[J].光电子技术,2011,31(1):57-62.
- [9] ZHOU Xiaoli, LIU Muqing. Stability control of near infrared light sources[J]. Lamps & Lighting, 2004(4):4-5+8.
周小丽,刘木清.近红外光源的稳定性控制[J].光源与照明,2004(4):4-5+8.
- [10] 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.
- [11] D'AMATO D. Spectral radiance and temporal stability of a uniform radiance source integrating sphere with enhanced blue performance[C]. SPIE, 1998:2-8.
- [12] WANG Jiejun, CHEN Zhi, HU Yadong, et al. Design of energy monitoring system based on quasi monochromatic lighting source system [J]. Instrumentation Customer, 2021, 28(6): 14-18.
汪杰君,陈志,胡亚东,等.基于准单色照明光源系统的能量监测系统设计[J].仪器仪表用户,2021,28(6):14-18.
- [13] ZHENG Xiaobing, WU Haoyu, ZHANG Junping, et al. High-precision optical radiation calibration and standard transfer method[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(12):1341-1344.
郑小兵,吴浩宇,章骏平,等.高精度光辐射定标和标准传递方法[J].科学通报,2000,45(12):1341-1344.
- [14] SLESAREV D. Defect identification based on wavelet decomposition for MFL non-destructive inspection of steel plates [J]. Insight, 2021, 63(3):146-150.
- [15] SUN Weifeng, HE Junhua. A new image de-noising method based on multiwavelet transform [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(11):2360-2364.
孙伟峰,何俊华.基于多小波变换的图像去噪新方法[J].光子学报,2008,37(11):2360-2364.
- [16] ZHANG J H, ZHU Q, SONG L. A wavelet-based self-adaptive hierarchical thresholding algorithm and its application in image denoising[J]. Traitement Du Signal, 2019, 36(6):539-547.
- [17] TU Bihai, HONG Jin, YAO Pingping, et al. Temperature-correction method for directional polarimetric camera [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10):312-320.
涂碧海,洪津,姚萍萍,等.多角度偏振成像仪温度校正方法[J].中国激光,2019,46(10):312-320.
- [18] European Machine Vision Association. EMVA Standard 1288, Standard for characterization of image sensors and cameras[S].

Research on the Extraction Method of Test Light Source Variation Based on Directional Polarimetric Camera Data

YE Chen^{1,2,3}, LUO Donggen^{1,3}, LI Yixin⁴, YAO Pingping^{1,3}, WANG Yi^{1,3},

XIANG Guangfeng^{1,2,3}, LI Yang^{1,2,3}, LI Shuang^{1,3}, HONG Jin^{1,3}

(1 *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(2 *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(3 *Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(4 *School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*)

Abstract: During the process of developing directional polarimetric camera, its stability is an important performance parameter, which represents the normal working state of the imaging remote sensing instruments when it is in orbit. Therefore, it is extremely important to accurately measure the stability parameters of the imaging remote sensing instruments, which can provide instructive information for developing imaging remote sensing instruments. At present, the traditional halogen tungsten lamp integrating sphere light source is usually adopted as a radiation source. At the same time, a wide-spectrum trap detector is used to synchronously monitor the light energy stability of the light source, and the obtained monitoring data is used for stability parameter processing correction. In order to monitor the stability of the integrating sphere radiation in different wavelength bands better and solve the problems of spectral bandwidth mismatch as well as data acquisition time alignment difficulty, which cannot ensure measurement accuracy, the method is proposed in this paper. It works by using data of directional polarimetric camera data instead of trap detector data, 12 channels of directional polarimetric camera data wavelet decomposition, respectively, to extract the variation of each band energy. Then normalize the fluctuation of each band energy. It can be inferred that the change of the digital number caused by the fluctuation of the traditional halogen tungsten lamp integrating sphere light source. Therefore, through measurement data correction, the influence of light source instability can be deducted and effectively improve the stability parameter measuring accuracy. After deducting the light source fluctuation according to the above method, the instability parameter of the directional polarimetric camera has reduced from 0.153% to 0.031%. The corrected value shows the actual instability of the directional polarimetric camera more realistically. The detected light source energy variation trend of the same band with three detection directions is highly consistent, and the signal-to-noise ratio of the multi-frame image method is improved more significantly, which strongly proves the effectiveness of the proposed method. Compared with the signal-to-noise ratio before being corrected, the corrected signal-to-noise ratio has increased by 2.52% on average by the wavelet decomposition de-illumination method, while only increased by 0.72% on average by the trap detector de-illumination. In the 865 nm and 910 nm bands, the wavelet decomposition de-illumination method improves the signal-to-noise ratio by 4.34% and 12.9%. It is worth noting that the signal-to-noise ratio increase in the correction by wavelet decomposition de-illumination method is much larger than that of the other method. It also shows that there are limitations in correcting fluctuation in the 865 nm and 910 nm bands with broad-spectrum trap detector monitoring data. In the 490 nm band, the wavelet decomposition de-illumination method increased by 0.54%, but the other correction method only increased by 0.09%, mainly because the light source energy in the 490 nm band is very low, so the digital number of directional polarimetric camera acquired is the lowest. Therefore, although the light source has the largest change in the 490 nm band, the improvement of the signal-to-noise ratio is not as significant as that in the 910 nm band. The reason for the small signal-to-noise ratio improvement by the two correction methods in 670 nm band is that the variation of the light source in this band is less than 0.205%. Therefore, it is reasonable that the improvement effect is not obvious. The proposed method can be used to test the stability parameters of various imaging remote sensing instruments.

Key words: Directional polarimetric camera; Optical-electrical properties testing; Wavelet decomposition; Stability; Trap detector; Signal-to-noise ratio

OCIS Codes: 120.4640; 040.1880; 040.1520; 110.4280