

# 紫外波段高光谱太阳参考光谱时变模型研究

裴国超<sup>1,2</sup>, 李元<sup>3,4\*</sup>, 白廷柱<sup>1,2</sup>

1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081
2. 教育部光电成像技术与系统重点实验室, 北京 100081
3. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081
4. 中国遥感卫星辐射测量和定标重点实验室, 北京 100081

**摘要** 太阳参考光谱是星上辐射定标和波长定标的基准。太阳活动周期内, 太阳辐照度光谱幅值存在周期性波动, 紫外波段光谱幅值变化达10%以上, 相对于3%的星上绝对定标需求, 太阳的时变特性不可忽略。针对不同分辨率和采样率的太阳参考光谱, 首先研究了插值间隔和卷积间隔对计算MgII参数的数值影响, 通过分析比较后选择合适的插值、卷积间隔, 并基于Climate和SORCE的MgII参数时间序列完成太阳周期性变化建模。然后选择2003年8月21日至2012年4月15日期间80组数据, 每组包含2个不同日期的不同波长的辐照度光谱幅值和MgII值, 针对该80组数据使用一阶拟合取代比值方法计算得到转换因子, 将不同日期的太阳参考光谱幅值修正到同一日期并与实际观测真值比较; 结果表明了一阶拟合与比值方法相比有着更高的反演精度及预测精度。最后, 基于一阶拟合转换因子和MgII参数时间序列对现有光谱进行时间和格式归一化, 通过分波段剔除偏离较大光谱数据的方法构建了2008年6月25日, 分辨率为1 nm、采样率为0.1 nm的太阳参考光谱。原有的12条光谱经过剔除后, 留下全波段均位于中位的光谱6条, 所构建的光谱同筛选出的6条光谱平均值相比, 绝对误差在0.982%以内。所构建的光谱可以通过MgII参数时间序列和转换因子计算得到任意日期下的光谱。针对该参考光谱利用KNMI高光谱进行分辨率和采样率提升, 最终基于我国计划发射的风云三号紫外高光谱臭氧探测仪(OMS)在轨观测和星上定标需求, 构建得到了波长范围250~500 nm, 分辨率0.1 nm, 采样率0.01 nm的太阳参考光谱。

**关键词** 太阳参考光谱; 紫外波段; 太阳周期变化; MgII参数; 星上定标; 光谱定标

**中图分类号:** P182.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)08-2332-07

## 引言

大气臭氧总量与吸收性气溶胶变化一直是气候变化、大气质量监测领域重点研究对象之一。目前各国发射了很多在轨紫外高光谱探测器, 主要用于大气臭氧总量、吸收性气溶胶等痕量气体监测。最早的紫外通道探测器是Nimbus-7卫星搭载的SBUV/TOMS, 第一次将臭氧监测由试验推向实用阶段<sup>[1]</sup>。近年来发射的紫外通道探测器逐步朝高光谱、高空间分辨率方向发展, 2017年10月, ESA发射太阳同步轨道卫星Sentinel-5P, 搭载TROPOMI探测器观测270~2385 nm波段太阳光谱, 光谱分辨率0.25~0.55 nm, 空间分辨率7 km; 我国CMA计划于2021年发射FY-3F太阳同步轨道

卫星, 搭载OMS(Ozone Monitoring Suite)探测器观测250~500 nm波段光谱, 光谱分辨率0.5 nm, 空间分辨率15 km×25 km。

上述探测器观测的太阳光谱会出现幅值波动, 一方面是载荷自身观测不确定度、星上参考板衰减与发射前基础数据测量误差等因素引起; 另一方面是太阳的周期性变化导致。在一个太阳周期内不同波段的幅值变化程度不同, 靠近可见光和红外波段变化缓和, 紫外波段变化剧烈, 幅值变化达10%以上, 相较于3%的星上定标精度而言, 这种波动是不可忽视的。同时太阳参考光谱在紫外通道星上定标技术中起关键作用, 是星上辐射定标与波长定标的基准, 探测器发射后都需要一条根据自身光谱与定标指标计算相应的太阳参考光谱。

收稿日期: 2019-07-19, 修订日期: 2019-12-05

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFB0504601), 国家自然科学基金面上项目(41271373)资助

作者简介: 裴国超, 1995年生, 北京理工大学光电学院硕士研究生 e-mail: 1273891817@qq.com

\* 通讯联系人 e-mail: liyuan@cma.gov.cn

2009 年, Thomas 等基于此前在轨载荷观测数据构建了三条太阳参考光谱 WHI, 反映了 2008 年 3 月末到 4 月初这段时间光谱幅值水平<sup>[2]</sup>; 2010 年 Chance 等基于 KPNO2010 和 AFGL 光谱, 用带宽为 0.04 nm 的高斯函数卷积得到 SAO2010 光谱<sup>[3]</sup>; 2015 年韩国 Mina Kang 等对 SAO2010 太阳参考光谱进行更新, 将 WHI 和 Atlas 光谱和 SAO2010 光谱进行结合, 以满足 GEMS 的分辨率、采样率和绝对幅值精度等要求<sup>[4]</sup>。

由于太阳活动水平存在 11 年大周期与 27 天小周期的变化<sup>[5]</sup>, 已有光谱反映的都是某一段时期内的太阳光谱, 因此构建基于太阳活动规律, 可预报的高光谱高精度太阳参考光谱就显得极为重要。为了给我国即将发射的 OMS 探测器提供高精度的在轨观测和星上定标基准, 基于各条太阳参考光

谱, 根据 MgII(Magnesium II)参数随时间的变化规律、提出了用一阶拟合法取代比值方法构建出任意日期太阳参考光谱的算法, 并进行精度验证。

### 1 太阳活动水平建模

紫外波段内的太阳活动水平可以用 MgII 参数来描述<sup>[6]</sup>, 其计算公式如式(1)

$$MgII = 2 \times Irr_c / (Irr_{w1} + Irr_{w2}) \quad (1)$$

其中  $Irr_{w1}$  和  $Irr_{w2}$  分别为 280 nm 附近的 2 个双峰的辐照度值,  $Irr_c$  为波谷位置的辐照度值, 本文中太阳参考光谱共计 12 条基本信息如表 1。

表 1 太阳参考光谱基本参数信息

Table 1 Basic parameter information of solar reference spectrum

载荷/光谱	波长范围/nm	分辨率/nm	采样率/nm	观测时间
OMI	270~550	0.45~0.65	0.15~0.32	2008.04.15—2017.08.02
UARS	119.5~419.5	0.2~0.25	1	1991.10.03—2001.7.20
ClimateSSI	115.5~749.5	—	1	1882.01.01—2016.12.31
CompositeSSI	120.5~399.5	1	1	1978.11.08—2005.08.01
JPSOMPSPS	248~310	1	0.42	2017.06.04
KNMI	202.0~599.99	0.025	0.01	2008.06
Sbuv2	170~400	—	0.15	1985.03.14 等 8 次
SSBUV	200~406	1.1	0.15~0.2	1989.10.20 等 8 次
SAO2010	200~1 000	0.04	0.01	1992.03.29
SCIAMACHY	234~2 383	0.24~1.1	0.2~1.3	2003.02.27
SORCESSI	0~2 400	7, 1, 0.25~0.33	0.25~0.35	2003.03.01—2017.06.17
WHI	0.1~2 400	0.1(UV), 1.5~30(VIS, IR)	0.1	2008.04(三次)

对于表 1 中含有 280 nm 波长的太阳参考光谱采用式(1)计算 MgII 参数, 此外以 1950 年 1 月 1 日为横坐标上的起始天数 1, 结果如图 1 所示。

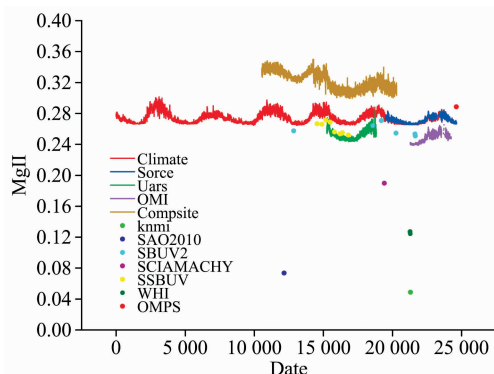


图 1 太阳光谱 MgII 随太阳活动周期性变化图  
Fig. 1 The variation of MgII index with solar cycle of each solar spectrum

图 1 中部分高分辨率、高采样率光谱同低分辨率、低采样率光谱相比, MgII 数值偏低。因此需要对各条光谱进行插值、卷积预处理, 将光谱格式统一后再计算 MgII, 并用

276.6~276.8, 282.2~283.4 和 279.7~280.3 nm<sup>[7]</sup> 内的辐照度积分平均值代表  $Irr_{w1}$ ,  $Irr_{w2}$  和  $Irr_c$ 。

表 1 中 12 条光谱的采样率可分为 1, 0.35, 0.15 和 0.01 nm 四种级别, 针对这四种采样率光谱的代表 Climate, OMI, SSBUV, KNMI, 研究插值间隔、卷积间隔对计算 MgII 的影响, 结果如图 2 所示, 其中卷积公式如式(2)

$$I_{Newref}(\lambda) = \frac{\int I_{ref}(\lambda) F_{conv}(\lambda) d\lambda}{\int F_{conv}(\lambda) d\lambda}$$

$$F_{conv}(\lambda) = \frac{2.3505}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_0)^2}{0.362}} \quad (2)$$

式中,  $\lambda_0$  是卷积时高斯函数对应中心波长的位置,  $\lambda$  是波长,  $I_{ref}(\lambda)$  是原太阳参考光谱,  $I_{Newref}(\lambda)$  是卷积后参考光谱,  $F_{conv}(\lambda)$  是卷积函数。

图 2 表明插值间隔对 Climate, OMI, SSBUV 和 KNMI 光谱计算 MgII 分别带来 1.37%, 0.24%, 0.053% 和 0.043% 的差异, 卷积间隔的影响均约为 0.024%。且图 2 中 4 幅子图的竖线左侧的 MgII 数值较右侧稳定。设插值前采样间隔为  $I_1$ , 插值后为  $I_2$ , 不同采样率的光谱计算 MgII 参数时按式(3)进行预处理

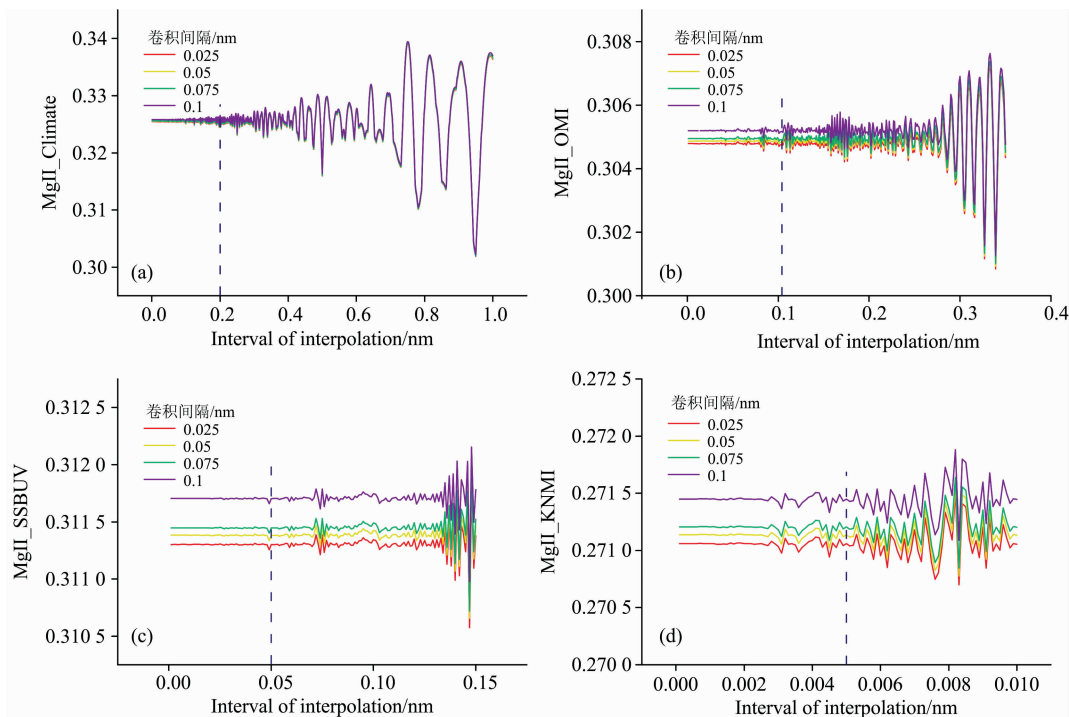


图 2 插值、卷积间隔对计算 MgII 的影响

Fig. 2 Influence of interval of convolution and interpolation on MgII index

$$I_2 = \begin{cases} \frac{1}{5} I_1 & I_1 \geq 1 \\ \frac{1}{3} I_1 & 1 > I_1 > 0.1 \\ \frac{1}{2} I_1 & I_1 \leq 0.1 \end{cases} \quad (3)$$

再用高斯函数按 0.1 nm 的卷积间隔卷积，得到各条光谱的 MgII 时间序列如图 3 所示。

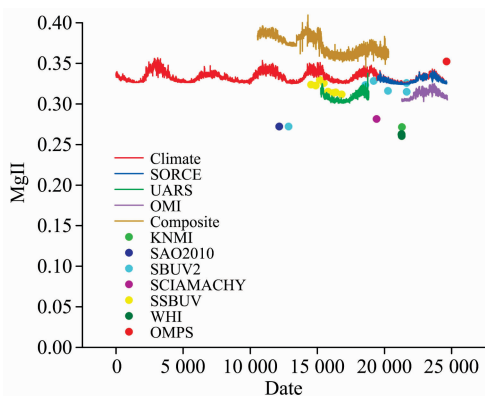


图 3 预处理后的太阳光谱 MgII 随太阳活动周期性变化图

Fig. 3 The variation of MgII index with solar cycle of each solar spectrum after pretreatment

图 3 与图 1 相比，光谱幅值方差从 0.007 8 降低到了 0.001 2。说明光谱经过插值、卷积预处理后，用积分平均值计算 MgII 对不同格式光谱都表现出了很好的适应性。

由于 Climate 和 SORCE 光谱记录的光谱数据时间上跨

度最长且连续，因此在其基础上，将其 MgII 时间序列曲线减去固定数值，使曲线位于 Climate, SORCE, OMI 和 UARS 这四条 MgII 曲线的平均幅值水平，即完成基于 MgII 参数的太阳活动水平时间序列曲线的构建。

## 2 时变模型转换因子

各条光谱在每个波段的幅值都存在 MgII 曲线类似的周期变化，如图 4 所示。基于表 1 中光谱构建太阳光谱基线光谱，需利用 MgII 曲线进行光谱幅值时间校正<sup>[6]</sup>，校正公式

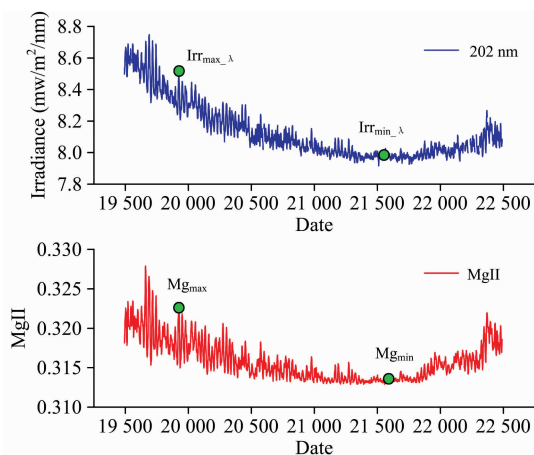


图 4 SORCE 光谱 2003. 5. 14—2011. 7. 3 期间 MgII 幅值和 202 nm 处辐照度

Fig. 4 MgII and Irradiance at 202 nm observed by SORCE during 2003. 5. 14 to 2011. 7. 3

如式(4)

$$\begin{aligned} \Delta F(\lambda, t) &= F_s(\lambda) \Delta Mg(t) \\ \Delta F(\lambda, t) &= Irr_{\max, \lambda} / Irr_{\min, \lambda} \\ \Delta Mg(t) &= Mg_{\max} / Mg_{\min} \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $F_s(\lambda)$  是一个和时间间隔  $t$  无关的转换因子。

根据式(4)计算, 为避免载荷观测、数据记录产生的异常点带来的影响, 需对各波段光谱和 MgII 时间曲线进行 5 d 平滑<sup>[6]</sup>。基于 Climate 和 SORCE 光谱选择 2008 年 11 月 2 日的辐照度和 MgII 参数作为  $Irr_{\min, \lambda}$  和  $Mg_{\min}$ , 然后从 2003 年 8 月 21 日至 2012 年 4 月 15 日, 以 40 d 为时间间隔, 选 80 个时间点的辐照度和 MgII 参数值作为  $Irr_{\max, \lambda}$  和  $Mg_{\max}$ 。结合式(4), 将得到的 80 组  $(\Delta Mg(t), \Delta F(\lambda, t))$  作图 5。

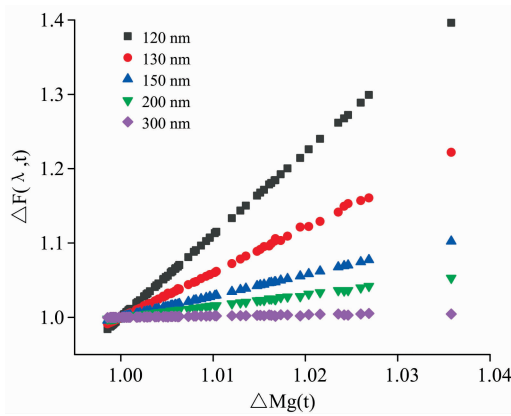


图 5 Climate 光谱不同波长下  $\Delta F(\lambda, t)$  和  $\Delta Mg(t)$  关系图  
Fig. 5 Relation between  $\Delta F(\lambda, t)$  and  $\Delta Mg(t)$  of Climate spectrum at different wavelengths

图 5 表明,  $\Delta F(\lambda, t)$  和  $\Delta Mg(t)$  之间存在很好的线性关系, 若直接用式(4)比值方法定义  $F_s(\lambda)$ , 会引入误差。因此式(4)进行如式(5)改进

$$\begin{aligned} \Delta F(\lambda, t) &= k(\lambda) \Delta Mg(t) + b(\lambda) \\ \Delta F(\lambda, t) &= Irr_{\max, \lambda} / Irr_{\min, \lambda} \\ \Delta Mg(t) &= Mg_{\max} / Mg_{\min} \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $k(\lambda)$  和  $b(\lambda)$  分别代表和波长相关的一阶拟合系数和截距, 如图 6 所示。

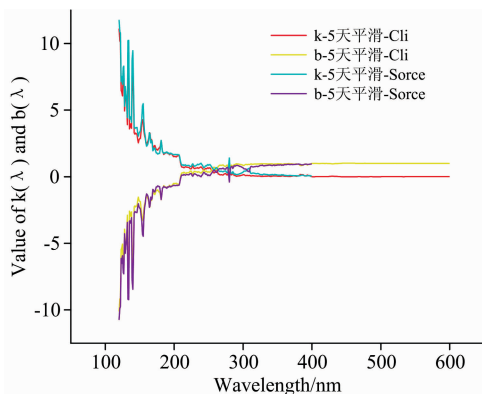


图 6 不同光谱下的一阶拟合转换因子  $k(\lambda)$  和  $b(\lambda)$   
Fig. 6  $k(\lambda)$  and  $b(\lambda)$  are conversion factors calculated by first order fitting at 2 spectra

在图 6 中, 不同光谱之间的一阶拟合转换因子近似, 因此基于 Climate 和 SORCE 光谱在 5 d 平滑基础上得到的转换因子进行平均得到最终的转换因子。

针对得到的一阶拟合转换因子和比值转换因子, 结合 MgII 曲线, 选择 Climate 和 SORCE 光谱在 2003 年 8 月 21 日至 2012 年 4 月 15 日期间 MgII 最小值对应日期的光谱、MgII 作为  $Irr_{\min, \lambda}$  和  $Mg_{\min}$ , 随机选择 200 个日期的 MgII 作为  $Mg_{\max, i}$ , 这是因为两种转换因子皆根据上述时间段内的数据得到, 用式(5)和式(4)反推得到理论值  $Irr_{\max, \lambda, i}$  与真值进行对比验证试验分析误差, 其中误差计算公式如式(6)

$$Error_{i, \lambda} = \left| \frac{Irr_{\max, i, \lambda} - Irr_{true}}{Irr_{\max, i, \lambda}} \right| \quad (6)$$

整个过程重复 30 次, 得到 30 次实验下的平均误差如图 7(a)。

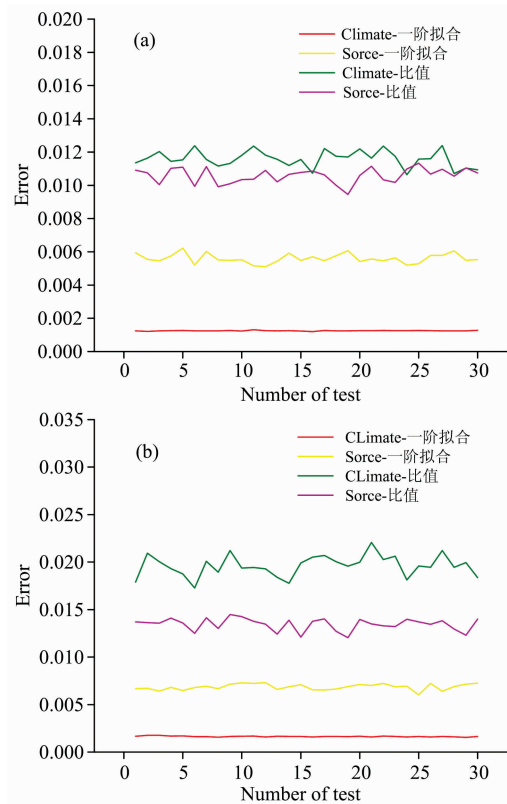


图 7 检验一阶拟合和比值计算和真值误差图  
(a): 一段时间; (b): 整个观测时间

Fig. 7 Errors of calculated by first order fitting and ratio to true value

(a): A period of time;  
(b): Over the entire observation period

图 7(a) 表明一阶拟合和比值方法相比, 在该时间段内将 Climate 光谱误差从 1.167% 降低到了 0.125%, SORCE 光谱把误差从 1.057% 降低到了 0.558%。整个观测时间段 30 次实验下误差如图 7(b), Climate 光谱误差从 1.941% 降低到了 0.164%, SORCE 光谱把误差从 1.427% 降低到了 0.677%, 表明了一阶拟合与比值方法相比有着更高的反演精度及预测精度。

### 3 构建太阳参考光谱基线光谱

对于表 1 中光谱利用 MgII 时间序列曲线和转换因子结合式(5)进行光谱时间归一化,将不同日期的光谱的辐照度水平统一到同一天。由于计算 MgII 参数时进行插值、卷积处理,因此也需对光谱进行同样预处理。选择的归一化日期是 2008 年 6 月 25 日,该日太阳活动处于周期的最小值水平,且前后 15 d 内 MgII 参数变化不超过 0.21%,太阳活动稳定。

对于各条光谱,若含有 2008 年 6 月 25 日的光谱数据,按式(3)进行插值,再进行卷积。若没有该日的光谱数据,利用线性拟合转换因子进行光谱时间归一化,结果如图 8 所示。

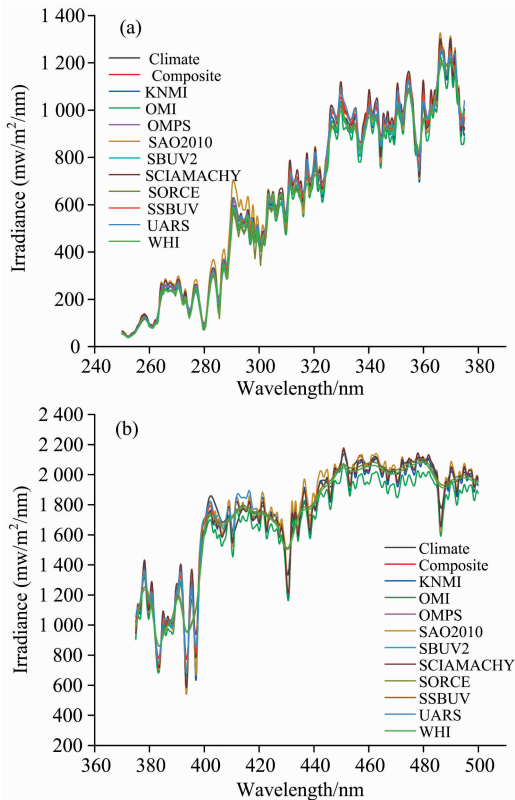


图 8 2008 年 6 月 25 日 250~500 nm 波段太阳参考光谱  
Fig. 8 Solar reference spectrum at 250~500 nm on 2008. 6. 25

对图 8 以 10 nm 为间隔,分段筛除明显偏移的光谱后得到图 9,并求平均得到基线光谱。

各条光谱中全波段内没有经过筛除的光谱有 6 条,其中 SBUV2, SSBUV<sup>[8]</sup> 和 Composite<sup>[9]</sup> 光谱是 SBUV 系列探测器于卫星或航天飞机上观测所得,KNMI 光谱是通过将低和高分辨率光谱分段组合而成<sup>[10]</sup>,Climate 光谱是 SIM 探测器观测所得,OMPS 光谱是 SNPP 卫星搭载 OMPS-nadir 探测单元所得<sup>[11]</sup>,这三条光谱来源对应的探测器不隶属于 SBUV 系列探测器,排除了 6 条光谱由于同系列探测器观测才导致的光谱聚合。且 6 条光谱在 250~500 nm 波段内没有明显的

偏移,根据常用的计量评价方法,6 条光谱一定程度上反应了该波段内在该日的辐照度真值水平,其辐照度平均值和基线光谱的比值如图 10。

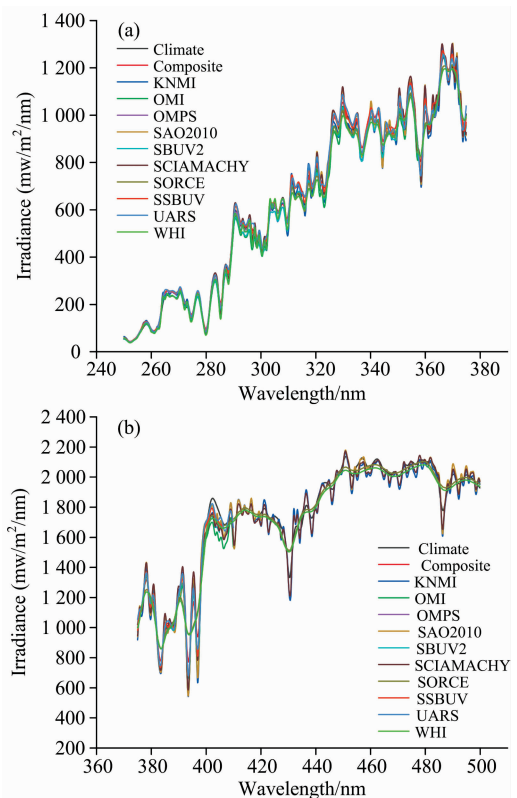


图 9 2008 年 6 月 25 日修正后辐照度光谱图  
Fig. 9 Calibrated solar reference spectrum at 250~500 nm on 2008. 6. 25

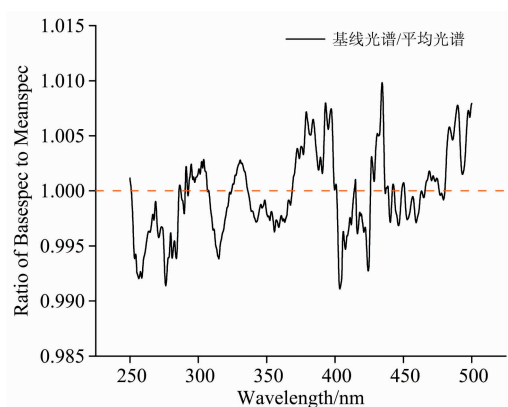


图 10 基线光谱与聚拢的参考光谱平均辐照度比值图  
Fig. 10 Ratio of base-spectrum and mean-spectrum of gathered reference spectrum

图 9 与图 8 相比,经过分段筛除后,光谱的全波段相对标准差从 2.814%降低到了 2.139%,表明修正后光谱更聚拢;图 10 表明,经过分段筛除处理后,基线光谱同未修正的 6 条光谱平均值相比,幅值变化仍在 0.982%以内。

虽然基线光谱有着很好的幅值精度,但分辨率 1 nm,采

样率 0.1 nm, 不能满足 OMS 探测器分辨率 0.5 nm, 波长定标精度 0.01 nm 的设计要求。考虑到包含 2008 年 6 月 25 日的各条光谱中 KNMI 光谱分辨率最高, 可以用 KNMI 的光谱提升基线光谱的分辨率和采样率, 算法如下:

(1) 将分辨率为 0.025 nm, 采样率为 0.01 nm 的 KNMI 光谱分别用带宽 1 nm 的高斯函数以 0.1 nm 的卷积间隔及用带宽 0.1 nm 的高斯函数以 0.01nm 的卷积间隔进行卷积:

$$\text{Irr\_knmi}_{0.025} \xrightarrow{\Delta\lambda=1\text{ nm}} \text{Irr\_knmi}_1, \text{Irr\_knmi}_{0.025} \xrightarrow{\Delta\lambda=0.1\text{ nm}} \text{Irr\_knmi}_{0.1}$$

(2) 将  $\text{Irr\_knmi}_1$  光谱与基线光谱  $\text{Irr\_base}_1$  做比值得到 0.1 nm 采样率的分数光谱:  $\text{Irr\_knmi}_1/\text{Irr\_base}_1 = R_{\text{lowamp}}$ 。

(3) 将 0.1 nm 采样率的分数光谱  $R_{\text{lowamp}}$  进行线性插值, 得到 0.01 nm 采样率的分数光谱  $R_{\text{hisamp}}$ :  $\text{Regrid}(R_{\text{lowamp}}) = R_{\text{hisamp}}$ 。

(4) 将  $\text{Irr\_knmi}_{0.1}$  光谱除以  $R_{\text{hisamp}}$ , 得到高分辨率高采样率高幅值精度的基线光谱  $\text{Irr\_base}_{0.1}$ :  $\text{Irr\_knmi}_{0.1}/R_{\text{hisamp}} = \text{Irr\_base}_{0.1}$ 。

最终得到基于 OMS 探测器光谱与定标指标计算的太阳参考光谱  $\text{Irr\_base}_{0.1}$  如图 11 所示。

## 4 结 论

太阳参考光谱是星上定标领域辐射定标和波长定标的基准。基于多条太阳参考光谱, 构建了 MgII 时间序列曲线来衡量太阳活动周期变化; 然后优化了根据 MgII 变化值计算

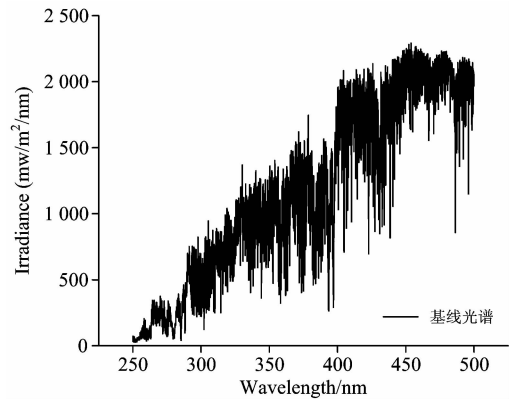


图 11 250~500 nm 波段基线光谱

Fig. 11 Base-spectrum at 250~500 nm

辐照度变化值的转换因子, 将反演的辐照度平均误差从 1.684% 降低到 0.421%; 再根据现有光谱数据集构建了 2008 年 6 月 25 日的基线光谱, 精度达 0.982%; 最后利用 KNMI 光谱对基线光谱进行分辨率采样率升级, 得到波长范围为 250~500 nm, 分辨率为 0.1 nm, 采样率为 0.01 nm 的太阳参考光谱。得到的 MgII 时间序列曲线、一阶转换因子和基线太阳参考光谱不仅对我国风云三号紫外高光谱臭氧探测仪 (OMS) 在轨观测和星上定标具有指导意义, 而且可以为其他国家探测器计算对应太阳参考光谱提供算法参考。

**致谢:** 所用太阳光谱数据皆为 NOAA 的 Lawrence E Flynn 博士提供, 在此表示感谢。

## References

- [ 1 ] ZHANG Yan, WANG Wei-he, ZHANG Xing-ying (张艳, 王维和, 张兴赢). Science Technology Review (科技导报), 2015, 33(17): 23.
- [ 2 ] Woods T N, Chamberlin P C, Harder J W, et al. Geophysical Research Letters, 2009, 36(1): 143.
- [ 3 ] Chance K, Kurucz R L. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2010, 111(9): 1289.
- [ 4 ] Myoung-Hwan Ahn, Mina Kang, Xiong Liu, Jhoon Kim. Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015). International Society for Optics and Photonics, 2015, 9535: 95351U.
- [ 5 ] Thuillier G, Deland M, Shapiro A, et al. Solar Physics, 2012, 277(2): 245.
- [ 6 ] Deland M T, Cebula R P. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(D7): 12809.
- [ 7 ] Heath D F, Schlesinger B M. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(D8): 8672.
- [ 8 ] Deland M T, Cebula R P, Hilsenrath E. Studia Geophysica et Geodaetica, 1998, 42(2): 83.
- [ 9 ] Deland M T, Cebula R P. Journal of Geophysical Research Space Physics, 2008, 113(A11): 0377.
- [ 10 ] Dobber M, Voors R, Dirksen R, et al. Solar Physics, 2008, 249(2): 281.
- [ 11 ] Fleig A, Rault D F. Proc SPIE, 2011, 8177: 81770A.



# Temporal Variation Model of Ultraviolet Hyperspectral Solar Reference Spectrum

PEI Guo-chao<sup>1, 2</sup>, LI Yuan<sup>3, 4\*</sup>, BAI Ting-zhu<sup>1, 2</sup>

1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. MOE Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Beijing 100081, China
3. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
4. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, Beijing 100081, China

**Abstract** The solar reference spectrum is the basis for radiometric calibration and wavelength calibration in the field of on-board calibration. During the solar cycle, the amplitude of the solar irradiance spectrum fluctuates periodically, changing by more than 10% in the ultraviolet band. However, the on-board absolute calibration requirement is 3%. Temporal variation characteristics of the sun cannot be ignored. First of all, we studied the influence of calculation of MgII when given spectra, which are based on interpolation and convolution intervals, with different resolutions and sampling. After selecting appropriate interpolation and convolution interval, we model the periodic variation of the solar-based on the MgII of Climate spectrum and SORCE spectrum. Secondly, we select 80 sets (there are two dates for every set) of amplitude variation of MgII and irradiance at a different wavelength from August 21, 2003, to April 15, 2012. By first order fitting instead of ratio method, the first order fitting method decreases error from 1.167% to 0.125% for Climate spectrum, from 1.057% to 0.558% for SORCE spectrum, when compared to true irradiance data from August 21, 2003, to April 15, 2012. The results show that the first-order fitting method has higher inversion precision and prediction accuracy than the ratio method. Finally, based on time series of MgII we fulfil normalization of time and format of the spectrum. By eliminating large deviated data over the different spectrum, we got a solar reference spectrum with the resolution of 1 nm and sampling of 0.1 nm on June 25, 2008. In addition, the spectrum has an absolute error of 0.982% compared to the average of six spectra without eliminating deviated data in all wavelength. The spectrum can also be converted to any day using solar cycle activity model based on MgII and conversion factor. By promotion of resolution and sampling for this reference spectrum based on KNMI hyperspectral, as a result, we get the solar reference spectrum with the spectrum range of 250~500 nm, resolution of 0.1 nm and sampling of 0.01 nm, which can provide reference spectrum for on-orbit observation and on-board calibration of China's FY-3 ultraviolet hyperspectral ozone detector (OMS).

**Keywords** Solar reference spectrum; Ultraviolet band; Solar cycle variation; MgII index; On-board calibration; Spectral calibration

(Received Jul. 19, 2019; accepted Dec. 5, 2019)

\* Corresponding author