



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111220557 B

(45) 授权公告日 2022. 08. 23

(21) 申请号 201911146481.6

(22) 申请日 2019.11.21

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 111220557 A

(43) 申请公布日 2020.06.02

(73) 专利权人 中国科学院合肥物质科学研究院  
地址 230031 安徽省合肥市蜀山湖路350号

(72) 发明人 赵敏杰 司福祺 汪世美 江宇

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责  
任公司 11251  
专利代理师 邓治平

(51) Int. Cl.  
G01N 21/27 (2006.01)  
G01J 3/28 (2006.01)

(56) 对比文件  
CN 109238991 A, 2019.01.18

CN 103776532 A, 2014.05.07

US 6333501 B1, 2001.12.25

CN 104457985 A, 2015.03.25

CN 102446351 A, 2012.05.09

CN 110458212 A, 2019.11.15

DE 102018205400 A1, 2019.10.10

US 7554667 B1, 2009.06.30

US 2017264833 A1, 2017.09.14

赵敏杰. 基于谱线匹配技术的星载成像光谱仪星上光谱定标方法研究.《光谱学与光谱分析》.2015,

黄珊. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪狭缝函数研究.《光谱学与光谱分析》.2019,

汪世美. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪基于太阳的在轨辐射定标.《大气与环境光学学报》.2019,

审查员 刘建朝

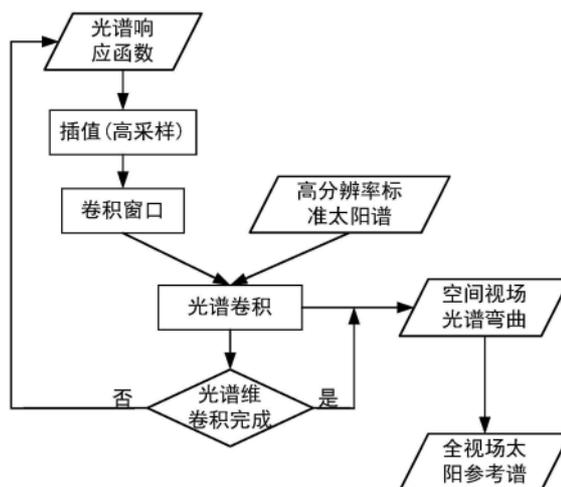
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

一种高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法

(57) 摘要

本发明公开了一种高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法, 首先选取高光谱分辨率的标准太阳谱, 并在实验室采用高精度光谱定标设备获取成像光谱仪在不同光谱间隔、不同视场间隔下的光谱响应函数实测值, 其次对光谱响应函数进行插值以匹配标准太阳谱的采样率, 然后设置每个光谱响应函数对应的卷积窗口, 不同视场卷积窗口基于光谱弯曲值进行调整, 卷积窗口设置完成后, 在其内将光谱响应函数与高分辨率太阳标准谱进行卷积, 由此可得到每个卷积窗口的太阳参考谱, 并将太阳参考谱进行降采样以匹配成像光谱仪的光谱采样间隔, 最后在光谱维上对每个卷积窗口的太阳参考谱进行拼接, 在空间维上对其它视场进行插值, 进而得到全视场的太阳参考谱。



CN 111220557 B

1. 一种高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

第一步, 高分辨率太阳标准谱选取;

基于成像光谱仪探测光谱范围 $\lambda_s$ 、光谱分辨率也即半高宽FWHM, 选取SA02010太阳谱作为高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ , 标准太阳谱的光谱范围为 $\lambda_s$ ,  $\Delta\lambda_s$ 为标准太阳谱的采样间隔;

第二步, 成像光谱仪光谱响应函数的获取;

选取可调谐激光器作为高精度光谱定标系统, 其发出的特征峰在成像光谱仪光谱维及空间维进行扫描, 获取的光谱响应函数为 $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$ ,  $v_1$ 为空间视场、 $\lambda_1$ 为光谱响应函数的中心光谱位置,  $\lambda'_1$ 为光谱响应函数在中心光谱 $\lambda_1$ 前后的光谱范围;

第三步, 卷积窗口的设置;

对每个光谱响应函数设置对应的卷积窗口为 $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$ ,  $v_1$ 为空间视场、 $\lambda_1$ 为光谱响应函数的中心光谱位置,  $\delta$ 为空间视场光谱弯曲值, 中心视场对应的光谱弯曲值 $\delta = 0$ ,  $\lambda'_f$ 为卷积窗口的光谱范围;

第四步, 光谱卷积;

首先对光谱响应函数 $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$ 进行插值, 插值点数 $N$ 以高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ 的采样间隔 $\Delta\lambda_s$ 及光谱响应函数的光谱范围 $\lambda'_1$ 确定, 插值后得到采样间隔同样为 $\Delta\lambda_s$ 的光谱响应函数 $R'(v_1, \lambda_1, \lambda'_1, \Delta\lambda_s)$ , 然后 $R'(v_1, \lambda_1, \lambda'_1, \Delta\lambda_s)$ 在其对应的卷积窗口 $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$ 内与高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ 进行卷积, 据此可获取到不同卷积窗口下的太阳参考谱 $S(F, v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f, \Delta\lambda_s)$ , 其中 $F$ 为卷积窗口标识, 并对其进行降采样以匹配成像光谱仪的采样点数;

第五步, 全视场太阳参考谱的获取;

在光谱维对不同卷积窗口下的太阳参考谱 $S(F, v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f, \Delta\lambda_s)$ 进行拼接, 获取到光谱维方向的太阳参考谱, 在空间视场测试时存在视场间隔, 进行插值可得到全视场的太阳参考谱, 最终得到成像光谱仪全视场的太阳参考谱, 基于日地距离修正, 可得到一年内每天对应的太阳参考谱。

2. 根据权利要求1所述的高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法, 其特征在于: 所述第一步, 高分辨率太阳标准谱选取, 获取具体实现如下:

(11) 测定成像光谱仪的光谱范围 $\lambda_s$ 及光谱分辨率也即半高宽FWHM;

(12) 基于测定的光谱范围 $\lambda_s$ 及光谱分辨率FWHM选取SA02010太阳谱作为高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ , 其光谱范围即为成像光谱仪探测光谱范围 $\lambda_s$ ,  $\Delta\lambda_s$ 为采样间隔, 其取值由太阳标准谱确定,  $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ 光谱分辨率优于成像光谱仪10倍。

3. 根据权利要求1所述的高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法, 其特征在于: 第二步, 成像光谱仪光谱响应函数的获取, 具体实现如下:

(21) 设置可调谐激光器输出光谱特征峰范围, 以覆盖成像光谱仪的光谱探测范围;

(22) 设置可调谐激光器光谱特征峰对成像光谱仪的光谱维扫描的光谱间隔为 $\Delta\lambda_1$ , 空间维扫描的视场间隔为 $\Delta v_1$ ;

(23) 获取的视场为 $v_1$ 、中心光谱位置为 $\lambda_1$ 的光谱响应函数为 $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$ , 其中 $\lambda'_1$ 为光谱响应函数在中心光谱 $\lambda_1$ 前后的光谱范围, 其值可根据光谱响应函数的半高宽FWHM确定。

4. 根据权利要求1所述的高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法, 其特征在于: 第三步, 卷积窗口的设置, 具体实现如下:

(31) 空间维光谱弯曲值的确定,  $\delta$  为空间视场光谱弯曲值, 中心视场对应的光谱曲值  $\delta = 0$ ;

(32) 设置视场为  $v_1$ 、中心光谱位置为  $\lambda_1$  处的光谱响应函数  $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$  对应的卷积窗口  $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$ , 不同视场下的卷积窗口中心波长位置经空间视场光谱弯曲值  $\delta$  校正, 中心视场对应的光谱弯曲值  $\delta = 0$ 。

5. 根据权利要求1所述的高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法, 其特征在于: 第四步, 光谱卷积, 具体实现如下:

(41) 首先对光谱响应函数为  $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$  进行插值, 插值点数  $N$  以高分辨率标准谱  $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$  的采样间隔  $\Delta\lambda_s$  及光谱响应函数的光谱范围  $\lambda'_1$  确定, 即  $N = \frac{2 \cdot \lambda'_1}{\Delta\lambda_s}$ , 插值后得到采样间隔同样为  $\Delta\lambda_s$  的光谱响应函数  $R'(v_1, \lambda_1, \lambda'_1, \Delta\lambda_s)$ ;

(42) 对插值后的不同视场、不同光谱位置的光谱响应函数  $R'(v_1, \lambda_1, \lambda'_1, \Delta\lambda_s)$ , 在其对应的卷积窗口  $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$  内与高分辨率标准谱  $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$  进行卷积, 获取到不同卷积窗口下的太阳参考谱  $S(F, v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f, \Delta\lambda_s)$ ;

(43) 对每个卷积窗口处的卷积结果进行降采样以匹配成像光谱仪的采样点数。

6. 根据权利要求1所述的高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法, 其特征在于: 第五步, 全视场太阳参考谱的获取, 具体实现如下:

(51) 在光谱维对不同卷积窗口太阳参考谱  $S(F, v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f, \Delta\lambda_s)$  进行拼接, 得到此光谱维下的太阳参考谱;

(52) 按此方法可得到视场间隔  $\Delta v_1$  下的太阳参考谱  $S(v_1, \Delta\lambda_s)$ , 对此太阳参考谱进行插值可得到全视场的太阳参考谱  $S(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ ;

(53) 由于标准太阳谱为平均日地距离下的光谱值, 由于日地距离不同产生的变化达到 3% 左右, 为此对全视场太阳参考谱进行日地距离修正, 最终得到成像光谱仪全视场的每日的太阳参考谱。

## 一种高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于高光谱大视场成像光谱仪遥感数据应用领域,具体涉及一种高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法。

### 背景技术

[0002] 对于星载高光谱大视场成像光谱仪遥感数据定量应用时,需要无大气气体吸收的太阳参考谱反演地球大气散射光谱,以获取大气污染物的浓度,其次,在考察光谱仪在轨辐射定标精度时,需要仪器太阳参考谱作为标准输入参数,另外,成像光谱仪在轨光谱定标时,也需要其太阳参考谱的夫琅禾费线作为标准谱线,进行光谱拟合。因成像光谱的光谱响应函数表征了其光谱响应特性,精确的光谱响应函数是获取高精度太阳参考谱的前提。

[0003] 星载高光谱大视场成像光谱仪一般具有高分辨率(0.3-0.5nm)、大视场角(114°大视场)的特点,其探测器采用面阵CCD,能够获取光谱维和空间维的光谱数据。由于成像光谱仪的光谱分辨率高,其光谱响应函数在光谱维方向随光谱位置会发生变化,在空间维方向由于大视场引起的光谱弯曲,导致光谱响应函数随空间视场也会发生变化。所以为了保证获取的成像光谱仪的太阳参考谱能够更好的表征其自身的响应特性,有必要以实测值作为光谱响应函数、并考虑其随光谱及空间视场的变化情况,提出一种高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法。

[0004] 目前国外同类型的成像光谱仪OMI(Ozone Monitoring Instrument)的光谱响应函数采用展宽的高斯函数模型,基于此模型获取到太阳参考谱,OMI没有考虑光谱响应函数随光谱及空间视场的变化(参见Marcel R.Dobber,et al.Ozone Monitoring Instrument Calibration.IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING,44(5),2003:1209-1238.),SCIAMACHY(SCanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric CHartography)在获取太阳参考谱以考察在轨绝对辐照度定标精度时,采用高斯模型对实测的光谱响应函数进行拟合,作为其光谱响应函数(参见J.Skupi,et al.SCIAMACHY solar irradiance observation in the spectral range from 240to 2380nm.Advances in Space Research,35,2005:370-375)。

[0005] 综上所述,目前对成像光谱仪在获取太阳参考谱时,通常采用函数模型如Gaussian、Super-Gaussian、Lorentzian等作为仪器的光谱响应函数,未采用实测光谱响应值,并未考虑光谱响应函数随光谱及空间视场的变化,函数模型有可能不能精确表征仪器的响应特性,基于函数模型获取的太阳参考谱与仪器实际的响应特性有可能存在偏差,针对此问题,本发明采用光谱响应函数实测值、并充分考虑到其随光谱及空间的变化,可以获取更好表征仪器响应特性的全视场太阳参考谱。

### 发明内容

[0006] 本发明的技术问题:克服现有技术的不足,提供一种高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法,该方法采用光谱响应函数实测值、并充分考虑到其随光

谱及空间的变化,可以获取更好表征仪器响应特性的全视场光谱参考谱。

[0007] 为了达到上述目的,本发明所采用的技术方案为:一种高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法,选取高光谱分辨率的标准太阳谱,并在实验室获取成像光谱仪在不同光谱间隔、不同视场间隔下的光谱响应函数实测值,其次基于空间视场光谱弯曲值设置光谱响应函数的卷积窗口,光谱响应函数在卷积窗口内与高光谱分辨率标准太阳谱进行卷积,卷积完成后,在光谱维上对每个卷积窗口的太阳参考谱进行拼接,在空间视场进行插值,最终获取到成像光谱仪的全视场太阳参考谱。

[0008] 具体实现方法如下:

[0009] 第一步,高分辨率太阳标准谱选取;

[0010] 基于成像光谱仪探测光谱范围 $\lambda_s$ 、光谱分辨率也即半高宽FWHM,选取SAO2010太阳谱作为高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ ,标准太阳谱的光谱范围为 $\lambda_s$ ,  $\Delta\lambda_s$ 为标准太阳谱的采样间隔。

[0011] 第二步,成像光谱仪光谱响应函数的获取;

[0012] 选取可调谐激光器作为高精度光谱定标系统,其发出的特征峰在成像光谱仪光谱维及空间维进行扫描,获取的光谱响应函数为 $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$ ,  $v_1$ 为空间视场、 $\lambda_1$ 为光谱响应函数的中心光谱位置、 $\lambda'_1$ 为光谱响应函数在中心光谱 $\lambda_1$ 前后的光谱范围;

[0013] 第三步,卷积窗口的设置;

[0014] 对每个光谱响应函数设置对应的卷积窗口为 $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$ ,  $v_1$ 为空间视场、 $\lambda_1$ 为光谱响应函数的中心光谱位置、 $\delta$ 为空间视场光谱弯曲值,中心视场对应的光谱曲值 $\delta = 0$ ,  $\lambda'_f$ 为卷积窗口的光谱范围;

[0015] 第四步,光谱卷积;

[0016] 首先对光谱响应函数 $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$ 进行插值,插值点数 $N$ 以高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ 的采样间隔 $\Delta\lambda_s$ 及光谱响应函数的光谱范围 $\lambda'_1$ 确定,插值后得到采样间隔同样为 $\Delta\lambda_s$ 的光谱响应函数 $R'(v_1, \lambda_1, \lambda'_1, \Delta\lambda_s)$ 。然后 $R'(v_1, \lambda_1, \lambda'_1, \Delta\lambda_s)$ 在其对应的卷积窗口 $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$ 内与高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ 进行卷积,据此可获取到不同卷积窗口下的太阳参考谱 $S(F, v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f, \Delta\lambda_s)$ ,其中 $F$ 为卷积窗口标识,并对其进行降采样以匹配成像光谱仪的采样点数;

[0017] 第五步,全视场太阳参考谱的获取;

[0018] 在光谱维对不同卷积窗口下的太阳参考谱 $S(F, v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f, \Delta\lambda_s)$ 进行拼接,获取到光谱维方向的太阳参考谱,在空间视场测试时存在视场间隔,进行插值可得到全视场的太阳参考谱,最终得到成像光谱仪全视场的太阳参考谱,基于日地距离修正,可得到一年内每天对应的太阳参考谱。

[0019] 进一步地,第一步,高分辨率太阳标准谱选取,获取具体实现如下:

[0020] (11) 测定成像光谱仪的光谱范围 $\lambda_s$ 及光谱分辨率也即半高宽FWHM;

[0021] (12) 基于测定的光谱范围 $\lambda_s$ 及光谱分辨率FWHM选取SAO2010太阳谱作为高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ ,其光谱范围即为成像光谱仪探测光谱范围 $\lambda_s$ ,  $\Delta\lambda_s$ 为采样间隔,其取值由太阳标准谱确定。 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ 光谱分辨率优于成像光谱仪10倍。

[0022] 进一步地,第二步,成像光谱仪光谱响应函数的获取,具体实现如下:

[0023] (21) 设置可调谐激光器输出光谱特征峰范围,以覆盖成像光谱仪的光谱探测范

围；

[0024] (22) 设置可调谐激光器光谱特征峰对成像光谱仪的光谱维扫描的光谱间隔为  $\Delta \lambda_1$ ，空间维扫描的视场间隔为  $\Delta v_1$ ；

[0025] (23) 获取的视场为  $v_1$ 、中心光谱位置为  $\lambda_1$  的光谱响应函数为  $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$ ，其中  $\lambda'_1$  为光谱响应函数在中心光谱  $\lambda_1$  前后的光谱范围，其值可根据光谱响应函数的半高宽 FWHM 确定；

[0026] 进一步地，第三步，卷积窗口的设置，具体实现如下：

[0027] (31) 空间维光谱弯曲值的确定， $\delta$  为空间视场光谱弯曲值，中心视场对应的光谱曲值  $\delta=0$ ；

[0028] (32) 设置视场为  $v_1$ 、中心光谱位置为  $\lambda_1$  处的光谱响应函数  $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$  对应的卷积窗口  $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$ ，不同视场下的卷积窗口中心波长位置经空间视场光谱弯曲值  $\delta$  校正，中心视场对应的光谱曲值  $\delta=0$ ；

[0029] 进一步地，第四步，光谱卷积，具体实现如下：

[0030] (41) 首先对光谱响应函数为  $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$  进行插值，插值点数  $N$  以高分辨率标准谱  $I(\lambda_s, \Delta \lambda_s)$  的采样间隔  $\Delta \lambda_s$  及光谱响应函数的光谱范围  $\lambda'_1$  确定，即  $N = \frac{2 \cdot \lambda'_1}{\Delta \lambda_s}$ ，插值后得到

采样间隔同样为  $\Delta \lambda_s$  的光谱响应函数  $R'(v_1, \lambda_1, \lambda'_1, \Delta \lambda_s)$ ；

[0031] (42) 对插值后的不同视场、不同光谱位置的光谱响应函数  $R'(v_1, \lambda_1, \lambda'_1, \Delta \lambda_s)$ ，在其对应的卷积窗口  $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$  内与高分辨率标准谱  $I(\lambda_s, \Delta \lambda_s)$  进行卷积，获取到不同卷积窗口下的太阳参考谱  $S(F, v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f, \Delta \lambda_s)$ ；

[0032] (43) 对每个卷积窗口处的卷积结果进行降采样以匹配成像光谱仪的采样点数；

[0033] 进一步地，第五步，全视场太阳参考谱的获取，具体实现如下：

[0034] (51) 在光谱维对不同卷积窗口太阳参考谱  $S(F, v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f, \Delta \lambda_s)$  进行拼接，得到此光谱维下的太阳参考谱；

[0035] (52) 按此方法可得到视场间隔  $\Delta v_1$  下的太阳参考谱  $S(v_1, \Delta \lambda_s)$ ，对此太阳参考谱进行插值可得到全视场的太阳参考谱  $S(\lambda_s, \Delta \lambda_s)$ ；

[0036] (53) 由于标准太阳谱为平均日地距离下的光谱值，由于日地距离不同产生的变化达到 3% 左右，为此对全视场太阳参考谱进行日地距离修正，最终得到成像光谱仪全视场的每日的太阳参考谱。

[0037] 本发明与现有技术相比的优点在于：

[0038] (1) 本发明采用实验室获取的高精度光谱响应函数实测值与高分辨率光谱进行卷积，与目前的研究选取函数模型作为光谱响应，能够提高光谱响应函数的表征精度。

[0039] (2) 本发明对光谱维的每个光谱响应函数实测值设置对应的卷积窗口，与目前光谱维设置一个卷积窗口相比，能够更精细地控制卷积范围，提高光谱卷积精度。

[0040] (3) 本发明要求在光谱维以一定光谱间隔、在空间维以一定角度间隔获取光谱响应函数的实测值，充分考虑到光谱响应函数随光谱及空间的变化，能够更全面的反映光谱仪在不同视场角度下对不同谱段的光谱响应特性，进而提高成像光谱仪全视场太阳参考谱的表征精度。

## 附图说明

- [0041] 图1为高光谱大视场成像光谱仪全视场太阳参考谱的获取流程；
- [0042] 图2为在实验室基于可调谐激光器获取的成像光谱仪在光谱维方向的光谱响应函数实测值；
- [0043] 图3为从图2中选取的中心波长为480.0nm处的光谱响应函数。
- [0044] 图4为图3插值后的光谱响应函数实测值在其卷积窗口中的卷积结果，卷积结果已进行了降采样处理；
- [0045] 图5为成像光谱仪在空间视场方向上的光谱弯曲值，用以调整卷积窗口在不同视场处的中心波长位置；
- [0046] 图6为应用于本发明实施的以中心视场和边缘视场为例的太阳参考谱。

## 具体实施方式

- [0047] 下面结合附图以及具体实施方式进一步说明本发明。
- [0048] 如图1~图6所示，本发明中，一种高光谱大视场成像光谱仪的全视场太阳参考谱获取方法，全视场太阳参考谱的获取是针对高光谱大视场成像光谱仪，解决其光谱分辨率高、空间视场光谱弯曲，导致光谱响应函数随光谱、空间视场变化的问题，以期获取更高精度、更好表征仪器响应特性的全视场太阳参考谱。
- [0049] 第一步，高分辨率太阳标准谱选取；
- [0050] 基于成像光谱仪探测光谱范围 $\lambda_s$ 、光谱分辨率也即半高宽FWHM，选取SAO2010太阳谱作为高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ ，标准太阳谱的光谱范围为 $\lambda_s$ ， $\Delta\lambda_s$ 为标准太阳谱的采样间隔。
- [0051] 第二步，成像光谱仪光谱响应函数的获取；
- [0052] 选取可调谐激光器作为高精度光谱定标系统，其发出的特征峰在成像光谱仪光谱维及空间维进行扫描，获取的光谱响应函数为 $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$ ， $v_1$ 为空间视场、 $\lambda_1$ 为光谱响应函数的中心光谱位置， $\lambda'_1$ 为光谱响应函数在中心光谱 $\lambda_1$ 前后的光谱范围；
- [0053] 第三步，卷积窗口的设置；
- [0054] 对每个光谱响应函数设置对应的卷积窗口为 $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$ ， $v_1$ 为空间视场、 $\lambda_1$ 为光谱响应函数的中心光谱位置， $\delta$ 为空间视场光谱弯曲值，中心视场对应的光谱曲值 $\delta = 0$ ， $\lambda'_f$ 为卷积窗口的光谱范围；
- [0055] 第四步，光谱卷积；
- [0056] 首先对光谱响应函数 $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$ 进行插值，插值点数 $N$ 以高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ 的采样间隔 $\Delta\lambda_s$ 及光谱响应函数的光谱范围 $\lambda'_1$ 确定，插值后得到采样间隔同样为 $\Delta\lambda_s$ 的光谱响应函数 $R'(v_1, \lambda_1, \lambda'_1, \Delta\lambda_s)$ 。然后 $R'(v_1, \lambda_1, \lambda'_1, \Delta\lambda_s)$ 在其对应的卷积窗口 $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$ 内与高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ 进行卷积，据此可获取到不同卷积窗口下的太阳参考谱 $S(F, v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f, \Delta\lambda_s)$ ，其中 $F$ 为卷积窗口标识，并对其进行降采样以匹配成像光谱仪的采样点数；
- [0057] 第五步，全视场太阳参考谱的获取；
- [0058] 在光谱维对不同卷积窗口下的太阳参考谱 $S(F, v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f, \Delta\lambda_s)$ 进行拼接，获取到光谱维方向的太阳参考谱，在空间视场测试时存在视场间隔，进行插值可得到全视场的

太阳参考谱,最终得到成像光谱仪全视场的太阳参考谱,基于日地距离修正,可得到一年内每天对应的太阳参考谱。

[0059] 具体地,第一步,高分辨率太阳标准谱选取,获取具体实现如下:

[0060] (11) 图2中成像光谱仪中心视场对应的光谱范围 $\lambda_s$ 为400-550nm,光谱分辨率FWHM为0.5nm,基于此参数用于确定标准太阳谱的选取;

[0061] (12) 基于成像光谱仪的光谱范围 $\lambda_s$ 及光谱分辨率FWHM,选取SA02010太阳谱作为高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ ,其光谱范围 $\lambda_s$ 为400-550nm,  $\Delta\lambda_s$ 采样间隔为0.01nm,  $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ 的光谱分辨率优于成像光谱仪10倍。

[0062] 具体地,第二步,成像光谱仪光谱响应函数的获取,具体实现如下:

[0063] (21) 设置可调谐激光器输出光谱特征峰范围为400-550nm,其光谱输出精度为10pm,此精度优于成像光谱仪500pm的光谱定标精度,基于此激光器可获取高精度的光谱响应函数;

[0064] (22) 设置可调谐激光器光谱特征峰对成像光谱仪的光谱维扫描的光谱间隔 $\Delta\lambda_1 = 10\text{nm}$ ,空间维扫描的视场间隔 $\Delta v_1 = 5^\circ$ ,图2为可调谐激光器在成像光谱仪中心视场光谱维方向进行扫描的结果;

[0065] (23) 选取的视场为 $v_1$ 为中心视场、中心光谱位置 $\lambda_1$ 为486.0nm处的光谱响应函数 $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$ 如图3所示,中心光谱 $\lambda_1$ 前后的光谱范围 $\lambda'_1 = 0.5\text{nm}$ ,其值可根据光谱响应函数的半高宽FWHM=0.5nm确定;

[0066] 具体地,第三步,卷积窗口的设置,具体实现如下:

[0067] (31) 空间维光谱弯曲值 $\delta$ 如图5所示,中心视场对应的光谱曲值 $\delta = 0$ ;

[0068] (32) 设置视场为 $v_1$ 、中心光谱位置为 $\lambda_1$ 处的光谱响应函数 $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$ 对应的卷积窗口 $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$ ,不同视场下的卷积窗口中心波长位置经空间视场光谱弯曲值 $\delta$ 校正,选取的视场 $v_1$ 为中心视场、中心光谱位置 $\lambda_1$ 为486.0nm处的光谱响应函数 $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$ 对应的卷积窗口 $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$ 如图4所示,中心视场对应的光谱曲值 $\delta = 0$ ,卷积窗口的光谱范围 $\lambda'_f = 10\text{nm}$ ,其由光谱维扫描的光谱间隔 $\Delta\lambda_1 = 10\text{nm}$ 确定;

[0069] 具体地,第四步,光谱卷积,具体实现如下:

[0070] (41) 首先对光谱响应函数为 $R(v_1, \lambda_1, \lambda'_1)$ 进行插值,插值点数 $N$ 以高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ 的采样间隔 $\Delta\lambda_s = 0.01\text{nm}$ 、光谱响应函数的光谱范围 $\lambda'_1 = 0.5\text{nm}$ 确定,即

$$N = \frac{2 \cdot 1}{0.01} = 200, \text{插值后得到采样间隔同样为 } \Delta\lambda_s \text{ 的光谱响应函数 } R'(v_1, \lambda_1, \lambda'_1, \Delta\lambda_s);$$

[0071] (42) 对插值后的不同视场、不同光谱位置的光谱响应函数 $R'(v_1, \lambda_1, \lambda'_1, \Delta\lambda_s)$ ,在其对应的卷积窗口 $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$ 内与高分辨率标准谱 $I(\lambda_s, \Delta\lambda_s)$ 进行卷积,获取到不同卷积窗口下的太阳参考谱 $S(F, v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f, \Delta\lambda_s)$ ;图4为视场 $v_1$ 为中心视场、中心光谱位置 $\lambda_1$ 为486.0nm处的卷积窗口 $F(v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f)$ 对应的卷积结果。

[0072] (43) 对每个卷积窗口处的卷积结果进行降采样以匹配成像光谱仪的采样点数,图4为降采样的卷积结果。

[0073] 具体地,第五步,全视场太阳参考谱的获取,具体实现如下:

[0074] (51) 在光谱维对不同卷积窗口太阳参考谱 $S(F, v_1, \lambda_1 + \delta, \lambda'_f, \Delta\lambda_s)$ 进行拼接,得到此光谱维下的太阳参考谱,图6中显示了中心视场与边缘视场的光谱维下的太阳参考谱;

[0075] (52) 按此方法可得到视场间隔  $\Delta v_1$  下的太阳参考谱  $S(v_1, \Delta \lambda_s)$ , 对此太阳参考谱进行插值可得到全视场的太阳参考谱  $S(\lambda_s, \Delta \lambda_s)$ ;

[0076] (53) 由于标准太阳谱为平均日地距离下的光谱值, 由于日地距离不同产生的变化达到3%左右, 为此对全视场太阳参考谱进行日地距离修正, 最终得到成像光谱仪全视场的每日的太阳参考谱, 图6为平均日地距离下的太阳参考谱。

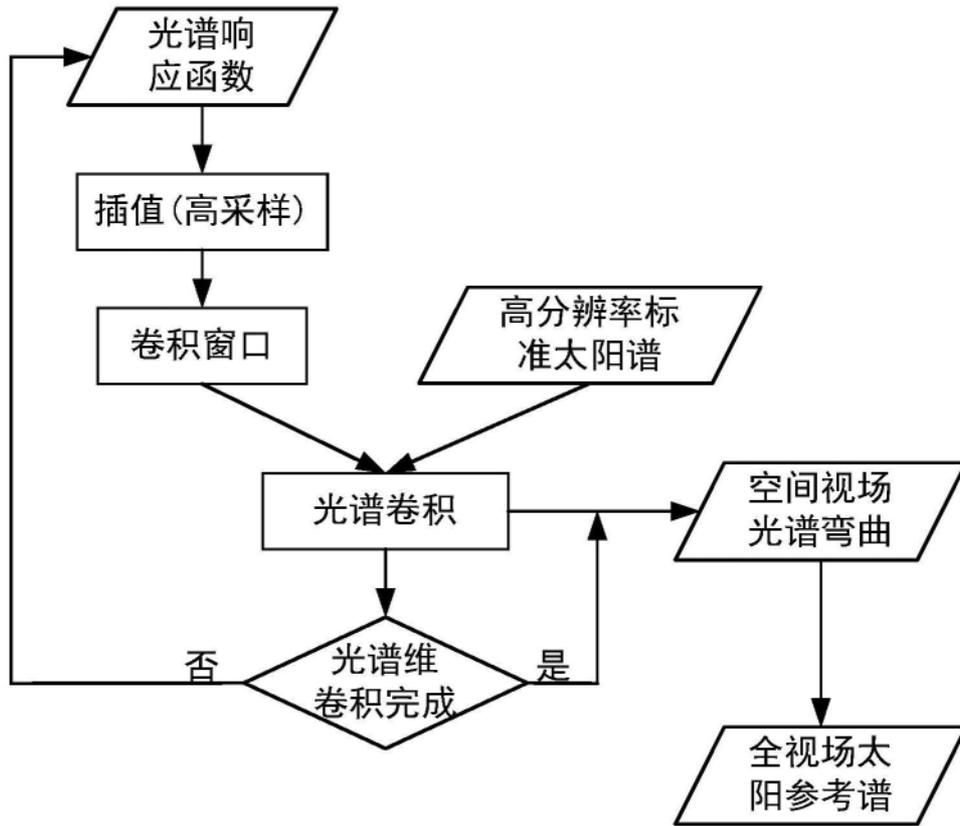


图1

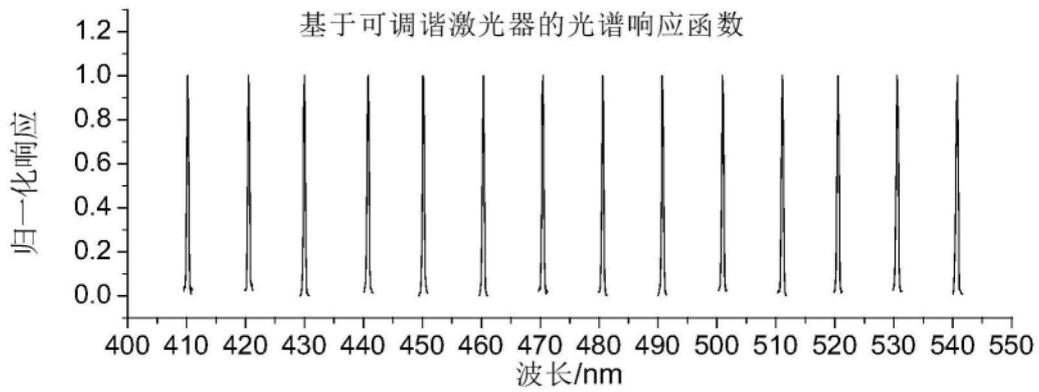


图2

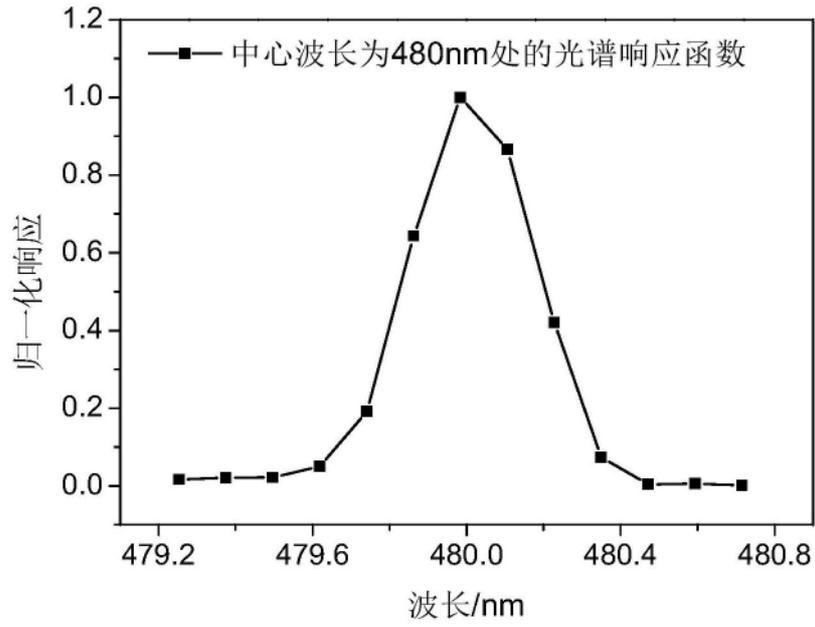


图3

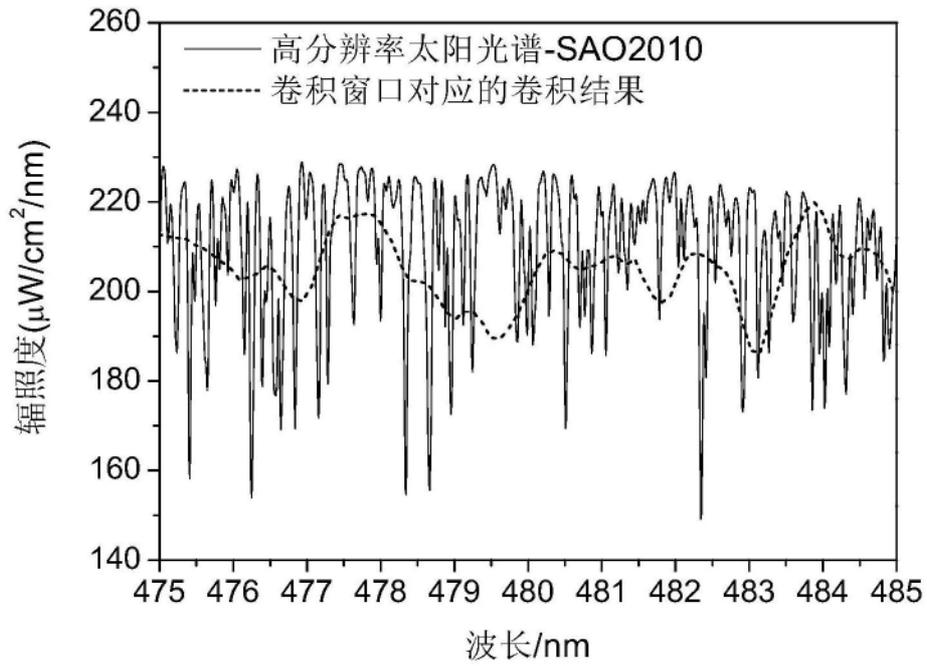


图4

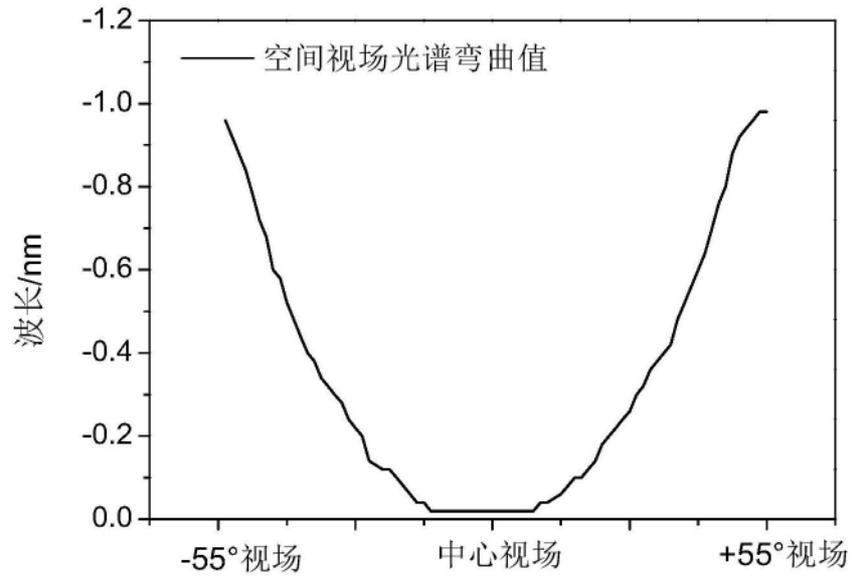


图5

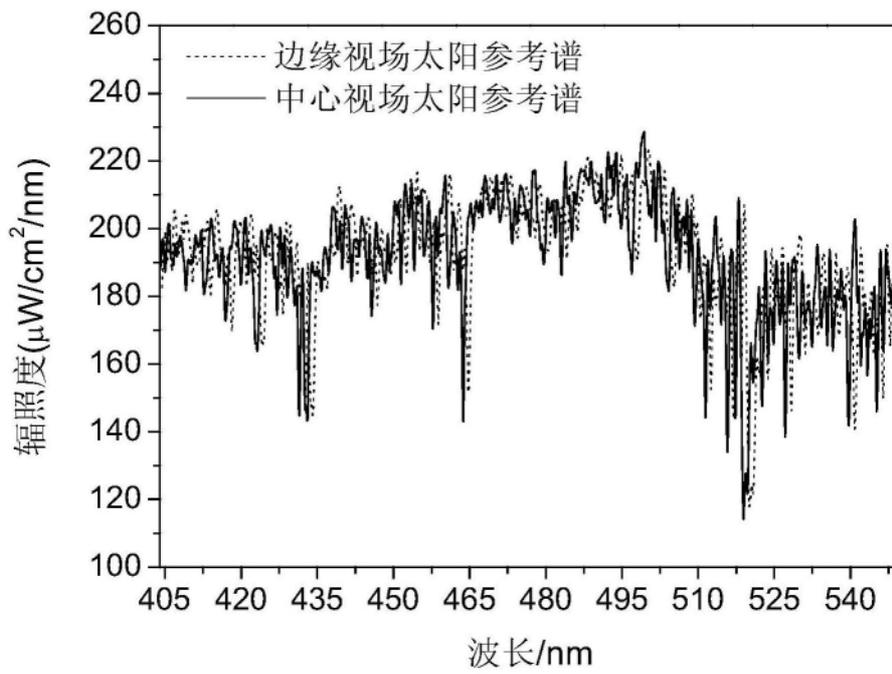


图6