



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108426856 B

(45)授权公告日 2019.09.10

(21)申请号 201810254644.1

审查员 田裕

(22)申请日 2018.03.26

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 108426856 A

(43)申请公布日 2018.08.21

(73)专利权人 武汉大学

地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山  
武汉大学

(72)发明人 史天奇 韩舸 厉青 马鹏飞  
马昕 龚威

(74)专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务  
所(特殊普通合伙) 42222

代理人 张火春

(51)Int.Cl.

G01N 21/39(2006.01)

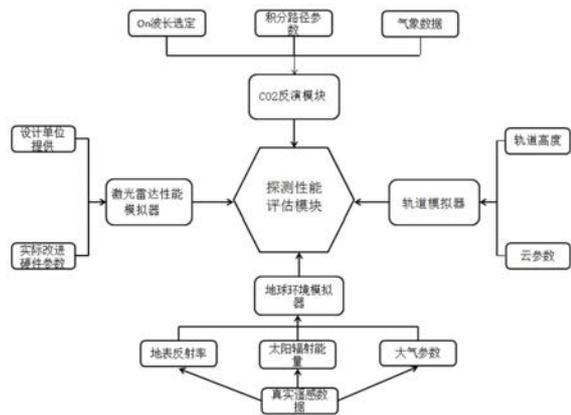
权利要求书3页 说明书8页 附图6页

(54)发明名称

评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统

(57)摘要

本发明公开了评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统,至少包括CO<sub>2</sub>反演模块、激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器、轨道模拟器和探测性能评估模块;所述的CO<sub>2</sub>反演模块,用来利用CO<sub>2</sub>差分吸收激光雷达法模拟CO<sub>2</sub>反演;所述的激光雷达性能模拟器,用来模拟发射能量及星载激光雷达的性能参数;所述的地球环境模拟器,用来获得所需地球环境参数的统计值,并结合时间分辨率和空间分辨率汇总地球环境参数;所述的轨道模拟器,用来模拟待评估卫星的卫星轨道高度和云参数;所述的探测性能评估模块,用来对CO<sub>2</sub>反演效果进行评估。



1. 评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统,其特征是:

至少包括CO<sub>2</sub>反演模块、激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器、轨道模拟器和探测性能评估模块;

所述的CO<sub>2</sub>反演模块,用来采用CO<sub>2</sub>反演理论,模拟选定on波长和积分路径,并结合待验证区域的气象数据,利用CO<sub>2</sub>差分吸收激光雷达法模拟CO<sub>2</sub>反演;

所述的激光雷达性能模拟器,用来根据待评估卫星的星载激光雷达实际的硬件参数,利用激光理论知识,模拟发射能量及星载激光雷达的性能参数;

所述的地球环境模拟器,用来对历史真实遥感数据进行统计,获得所需地球环境参数的统计值,并结合时间分辨率和空间分辨率汇总地球环境参数;所述的历史真实遥感数据包括地表反射率参数数据、大气参数数据以及辐射参数数据;

所述的轨道模拟器,用来根据历史真实遥感数据以及待评估卫星的设计轨道参数,模拟待评估卫星的卫星轨道高度和云参数;

所述的探测性能评估模块,用来根据CO<sub>2</sub>反演模块、激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器、轨道模拟器以及星载激光雷达探测器的输出,对CO<sub>2</sub>反演效果进行评估。

2. 如权利要求1所述的评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统,其特征是:

所述的CO<sub>2</sub>反演模块至少包括:

on波长粗选取子模块,用来对比CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O的吸收谱线数据,选取水汽影响最小的波长,即粗选取的on波长;

on波长精选取子模块,用来获取各粗选取的on波长下各卫星探测气体高度对应的低空权重,选取权重大于预设权重阈值且不受非目标气体影响的一粗选取on波长,即精选取的on波长,也即最终选定的on波长;权重阈值为经验值;

积分路径计算子模块,用来利用卫星运行时间进行测距并结合GPS定位计算积分路径;

CO<sub>2</sub>柱浓度反演子模块,用来计算大气分子数密度的廓线和on波长的差分吸收截面积,并结合验证区域的气象数据以及积分路径,利用CO<sub>2</sub>差分吸收激光雷达法反演CO<sub>2</sub>柱浓度。

3. 如权利要求1所述的评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统,其特征是:

所述的星载激光雷达的性能参数包括单脉冲能量、暗电流噪声、望远镜接收效率和on/off能量比。

4. 如权利要求1所述的评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统,其特征是:

所述历史真实遥感数据采用MODIS观测数据、TERRA观测数据和AQUA观测数据中的一种或多种。

5. 如权利要求1所述的评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统,其特征是:

所述地球环境参数包括地表反射率、大气参数、太阳辐射参数和CO<sub>2</sub>图谱。

6. 如权利要求1所述的评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统,其特征是:

所述的轨道模拟器至少包括:

星下点轨迹图仿真子模块,用来根据所设计的轨道参数以及历史真实遥感数据,仿真运行周期内待评估卫星在对应轨道的星下点轨迹图,所述的星下点轨迹图包括纬度星下点轨迹图和经度星下点轨迹图;

多普勒中心频率计算子模块,用来计算多普勒中心频率,并获得多普勒中心频率与星下点轨迹纬度的关系;

轨道高度和云参数获取子模块,用来依据多普勒中心频率与星下点轨迹纬度的关系,采用高斯投影将星下点轨迹图投影到地图坐标,从而获得待评估卫星的轨道高度和云参数。

7.如权利要求1所述的评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统,其特征是:

所述的探测性能评估模块包括随机误差估计模块,用来根据CO<sub>2</sub>反演模块、激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器、轨道模拟器以及星载激光雷达探测器的输出,利用信噪比和由CO<sub>2</sub>吸收引起的光学厚度,预测CO<sub>2</sub>反演效果的随机误差  $\frac{\Delta\delta_{CO_2}}{\delta_{CO_2}}$ ,其中, $\delta_{CO_2}$ 表示由CO<sub>2</sub>吸收引起的光学厚度, $\Delta\delta_{CO_2}$ 表示由CO<sub>2</sub>吸收引起的光学厚度的标准差,光学厚度可根据气象数据中的压力和温度、以及CO<sub>2</sub>吸收截面积计算获得;

信噪比SNR<sub>on</sub>和SNR<sub>off</sub>根据太阳辐射值和探测器性能计算获得,具体见下式:

$$SNR_{on} = \frac{P_{on}MR}{B(2eM^2FR(P_{on} + P_{back}) + i_D^2)}$$

$$SNR_{off} = \frac{P_{off}MR}{B(2eM^2FR(P_{of} + P_{back}) + i_D^2)}$$

其中:SNR<sub>on</sub>和SNR<sub>off</sub>分别为on波长和off波长时回波信号的平均信噪比,P<sub>on</sub>和P<sub>off</sub>分别表示on波长和off波长时的回波信号强度;P<sub>back</sub>表示太阳背景辐射值;M表示探测器的内部获取参数;R表示探测器的响应程度;B表示电子线宽;e表示基本电流;F表示探测器的额外噪声参数; $i_D^2$ 表示暗电流噪声密度;这里的探测器指激光雷达探测器以及接收探测器。

8.如权利要求1所述的评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统,其特征是:

所述的探测性能评估模块包括系统误差估计模块,用来利用CO<sub>2</sub>反演模块、激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器、轨道模拟器以及星载激光雷达探测器输出的与压力漂移、压力展宽以及多普勒频率漂移有关的气象参数,将该气象参数作为特定参数,分别预测CO<sub>2</sub>反演效果的系统误差。

9.如权利要求1所述的评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统,其特征是:

所述的探测性能评估模块包括覆盖率评估模块,进一步包括:

采样子模块,用来根据设定的卫星轨道高度,获得卫星轨道的最低点,根据经验降低采样密度并增加采样间隔,进行CO<sub>2</sub>探测采样;

覆盖率评估子模块,用来在设定的卫星轨道高度下,结合激光雷达性能模拟器、地球环

境模拟器和轨道模拟器的输出数据,根据采样数据进行实时模拟,并利用差值法评估覆盖率。

10. 如权利要求1所述的评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统,其特征是,还包括:

参数调整模块,用来分析不同轨道参数不同AOD情况下的CO<sub>2</sub>反演效果,从而对反演参数进行调整。

## 评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于卫星可行性方案预测技术领域,尤其涉及评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统。

### 背景技术

[0002] 长期以来,由于全球的工业发展以及能源的消耗,温室气体被大量的排放到大气中,其中对于全球变暖起最大作用的温室气体就是CO<sub>2</sub>。根据夏威夷观测站的统计结果,CO<sub>2</sub>的浓度已经由1900年的305ppm上升到2016年的375ppm。如果不及时控制CO<sub>2</sub>的排放,那么将会对整个生态系统带来巨大的影响。

[0003] 巴黎协会以来,CO<sub>2</sub>越来越受到世界各地的关注。其中最引人注目的当属于中国提出的“节能减排”运动。而且据有关统计,从2010年开始,我国的碳排放已经呈现下降趋势。为了能在碳排放监测方面引领全世界,我国需要实施精确的探测卫星方案。确定碳源以及碳汇是其中的核心内容。由于传统的被动观测卫星具有只能在观测条件好的情况下使用、探测区域有限以及探测精度较低的局限性。发展中国自主研发的主动式探测卫星就显得尤为重要。

### 发明内容

[0004] 针对未来主动式探测碳卫星的可行性方案,本发明提供了一种评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统。

[0005] 本发明评估激光雷达卫星测量大气CO<sub>2</sub>浓度性能的综合分析系统,至少包括CO<sub>2</sub>反演模块、激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器、轨道模拟器和探测性能评估模块;

[0006] 所述的CO<sub>2</sub>反演模块,用来采用CO<sub>2</sub>反演理论,模拟选定 $\lambda_{on}$ 波长和积分路径,并结合待验证区域的气象数据,利用CO<sub>2</sub>差分吸收激光雷达法模拟CO<sub>2</sub>反演;

[0007] 所述的激光雷达性能模拟器,用来根据待评估卫星的星载激光雷达实际的硬件参数,利用激光理论知识,模拟发射能量及星载激光雷达的性能参数;

[0008] 所述的地球环境模拟器,用来对历史真实遥感数据进行统计,获得所需地球环境参数的统计值,并结合时间分辨率和空间分辨率汇总地球环境参数;所述的历史真实遥感数据包括地表反射率参数数据、大气参数数据以及辐射参数数据;

[0009] 所述的轨道模拟器,用来根据历史真实遥感数据以及待评估卫星的设计轨道参数,模拟待评估卫星的卫星轨道高度和云参数;

[0010] 所述的探测性能评估模块,用来根据CO<sub>2</sub>反演模块、激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器、轨道模拟以及星载激光雷达探测器的输出,对CO<sub>2</sub>反演效果进行评估。

[0011] 进一步的,所述的CO<sub>2</sub>反演模块至少包括:

[0012]  $\lambda_{on}$ 波长粗选取子模块,用来对比CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O的吸收谱线数据,选取水汽影响最小的波长,即粗选取的 $\lambda_{on}$ 波长;

[0013]  $\lambda_{on}$ 波长精选取子模块,用来获取各粗选取的 $\lambda_{on}$ 波长下各卫星探测气体高度对应的

低空权重,选取权重大于预设权重阈值且不受非目标气体影响的一粗选取on波长,即精选取的on波长,也即最终选定的on波长;权重阈值为经验值;

[0014] 积分路径计算子模块,用来利用卫星运行时间进行测距并结合GPS定位计算积分路径;

[0015] CO<sub>2</sub>柱浓度反演子模块,用来计算大气分子数密度的廓线和on波长的差分吸收截面,并结合验证区域的气象数据以及积分路径,利用CO<sub>2</sub>差分吸收激光雷达法反演 CO<sub>2</sub>柱浓度。

[0016] 进一步的,所述的星载激光雷达的性能参数包括单脉冲能量、暗电流噪声、望远镜接收效率和on/off能量比。

[0017] 进一步的,所述历史真实遥感数据采用MODIS观测数据、TERRA观测数据和 AQUA观测数据中的一种或多种。

[0018] 进一步的,所述地球环境参数包括地表反射率、大气参数、太阳辐射参数和CO<sub>2</sub>图谱。

[0019] 进一步的,所述的轨道模拟器至少包括:

[0020] 星下点轨迹图仿真子模块,用来根据所设计的轨道参数以及历史真实遥感数据,仿真运行周期内待评估卫星在对应轨道的星下点轨迹图,所述的星下点轨迹图包括纬度星下点轨迹图和经度星下点轨迹图;

[0021] 多普勒中心频率计算子模块,用来计算多普勒中心频率,并获得多普勒中心频率与星下点轨迹纬度的关系

[0022] 轨道高度和云参数获取子模块,用来依据多普勒中心频率与星下点轨迹纬度的关系,采用高斯投影将星下点轨迹图投影到地图坐标,从而获得待评估卫星的轨道高度和云参数。

[0023] 进一步的,所述的探测性能评估模块包括随机误差估计模块,用来根据CO<sub>2</sub>反演模块、激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器、轨道模拟以及星载激光雷达探测器的输出,利

用信噪比和由CO<sub>2</sub>吸收引起的光学厚度,预测CO<sub>2</sub>反演效果的随机误差 $\frac{\Delta\delta_{CO_2}}{\delta_{CO_2}}$ ,其中, $\delta_{CO_2}$ 表示

由CO<sub>2</sub>吸收引起的光学厚度, $\Delta\delta_{CO_2}$ 表示由CO<sub>2</sub>吸收引起的光学厚度的标准差,光学厚度可根据气象数据中的压力和温度、以及CO<sub>2</sub>吸收截面计算获得。

[0024] 进一步的,所述的探测性能评估模块包括系统误差估计模块,用来利用CO<sub>2</sub>反演模块、激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器、轨道模拟以及星载激光雷达探测器输出的与压力漂移、压力展宽以及多普勒频率漂移有关的气象参数,将该气象参数作为特定参数,分别预测CO<sub>2</sub>反演效果的系统误差。

[0025] 进一步的,所述的探测性能评估模块包括覆盖率评估模块,进一步包括:

[0026] 采样子模块,用来根据设定的卫星轨道高度,获得卫星轨道的最低点,根据经验降低采样密度并增加采样间隔,进行CO<sub>2</sub>探测采样;

[0027] 覆盖率评估子模块,用来在设定的卫星轨道高度下,结合激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器和轨道模拟器的输出数据,根据采样数据进行实时模拟,并利用差值法评估覆盖率。

[0028] 进一步的,上述综合分析系统还包括参数调整模块,用来分析不同轨道参数不同AOD情况下的CO<sub>2</sub>反演效果,从而对反演参数进行调整。

[0029] 针对未来碳卫星的可行性方案,本发明主要考虑了随机误差、系统误差、覆盖率等反演效果,采用全方位的多参数模拟,预测未来发射主动卫星的效果。本发明利用CO<sub>2</sub>反演模块、激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器、轨道模拟器,对卫星反演效果进行综合动态分析,从而实现对CO<sub>2</sub>反演测量全过程的高度仿真。本发明系统既能对不同类别的单一参数进行敏感性测试,又能在设定的配置条件下给出卫星系统误差、随机误差和覆盖性的全面评价结果,从而为卫星参数制定提供准确的技术依据,同时也为后续卫星高级产品的开发提供模拟数据。

[0030] 本发明系统的优点和积极效果如下:

[0031] (1) 预先调研影响卫星反演CO<sub>2</sub>浓度效果的因素,基于影响因素设置四大参数模拟模块,并将参数模拟模块的输出进行高度集合化,使得预测结果更具说服力。

[0032] (2) 使用可推算的SNR(singal-to-noise ratio)以及CO<sub>2</sub>光学厚度,对随机误差以及系统误差进行评估。

[0033] (3) 评估覆盖率时,将轨道采样以及环境参数进行巧妙处理,在不影响准确度的情况下,可提高预测精度以及速度。

[0034] (4) 探测性能评估模块对所有的参数都进行控制变量法,可以同时改变多个参数进行模拟。

[0035] (5) 可结合已有的卫星遥感数据,结合AOD分析对CO<sub>2</sub>反演结果的影响,最终使得卫星反演结果更加精确。

## 附图说明

[0036] 图1为本发明性能评估系统的原理示意图;

[0037] 图2为CO<sub>2</sub>反演模块的原理示意图;

[0038] 图3为激光雷达性能模拟器的原理示意图;

[0039] 图4为地球环境模拟器的原理示意图;

[0040] 图5为轨道模拟器计算星下点轨迹图的原理示意图;

[0041] 图6为随机误差估计模块的原理示意图;

[0042] 图7为获得云参数以及太阳辐射等有关参数的过程图;

[0043] 图8为轨道高度750km时的全球采样情况;

[0044] 图9为轨道高度750km时验证区域的采样情况;

[0045] 图10为近一年内AOD(气溶胶)的年均浓度分布图;

[0046] 图11为模拟所得近激光雷达卫星所反演的XCO<sub>2</sub>浓度随机误差分布图。

## 具体实施方式

[0047] 为了更清楚地说明本发明和/或现有技术中的技术方案,下面将对照附图说明本发明的具体实施方式。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图,并获得其他的实施方式。

[0048] 下面将结合附图进一步说明本发明技术方案以及本发明所涉及的技术原理。

[0049] 本发明主要用于对利用CO<sub>2</sub>差分吸收激光雷达进行CO<sub>2</sub>反演的效果进行评估,为便于理解,下面将首先介绍CO<sub>2</sub>差分吸收激光雷达的技术原理。

[0050] 首先,确定CO<sub>2</sub>吸收峰与吸收谷所对应的波长,分别为on波长和off波长,交替发射on波长和off波长的激光,获取探测目标的返回信号。然后,根据返回信号,比较两束激光在路径中的能量消耗,并计算差分吸收光学厚度DAOD(differential absorption optical depth)。接着,根据差分吸收光学厚度DAOD,计算激光所经过的完整路径,即积分路径;结合气象、水汽、压力等气象参数,对整个路径进行积分,并反演CO<sub>2</sub>的干空气体积混合比XCO<sub>2</sub>,反演公式见式(1)。

$$[0051] \quad XCO_2 = \frac{\frac{1}{2} \ln \frac{P_{off} E_{on}}{P_{on} E_{off}}}{\int_{r_{TOA}}^{r_G} \{[\sigma_{CO_2}(\lambda_{on}(T(r), P(r))) - \sigma_{CO_2}(\lambda_{off}(T(r), P(r)))] \cdot N_A P(r) / RT(r)\} dr} \quad (1)$$

[0052] 式(1)中:

[0053] XCO<sub>2</sub>表示CO<sub>2</sub>的干空气体积混合比;P<sub>off</sub>和E<sub>off</sub>表示off波长时的回波信号强度和发射能量;P<sub>on</sub>和E<sub>on</sub>表示on波长时的回波信号强度和发射能量;r<sub>TOA</sub>和r<sub>G</sub>分别表示积分路径的下限和上限,r表示高度瞬时值;P(r)和T(r)分别表示高度瞬时值r对应的压力和温度;σ<sub>CO<sub>2</sub></sub>(λ)表示波长为λ时CO<sub>2</sub>的吸收截面积,λ<sub>on</sub>(T(r), P(r))表示压力P(r)和温度T(r)下on波长的波长长度,λ<sub>off</sub>(T(r), P(r))表示压力P(r)和温度T(r)下off波长的波长长度;N<sub>A</sub>表示阿伏加德罗常数;R表示理想气体常数。

[0054] 为评估CO<sub>2</sub>反演的效果,本发明充分考虑影响CO<sub>2</sub>反演精度的影响因素,将所有影响因素集合,从而提出了一种性能评估系统,见图1,该性能评估系统包括CO<sub>2</sub>反演模块、激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器、轨道模拟器和探测性能评估模块五个模块,可用来预测主动式探测碳卫星的探测效果。

[0055] 下面将结合附图,对构成本发明的四个子模块以及具体实施过程进行详细描述。

[0056] (1) CO<sub>2</sub>反演模块

[0057] CO<sub>2</sub>反演模块用来采用已有的CO<sub>2</sub>反演理论,模拟选定on波长和积分路径,并结合待验证区域的气象数据,利用CO<sub>2</sub>差分吸收激光雷达法模拟CO<sub>2</sub>反演,获得干空气体积混合比XCO<sub>2</sub>。图2所示为CO<sub>2</sub>反演模块的原理示意图,主要包括on波长的选定、计算积分路径以及根据选定的on波长在积分路径上进行CO<sub>2</sub>反演的步骤。

[0058] 所述on波长的选定包括粗选取和精选取,所述精选取即对粗选取的on波长,通过低空CO<sub>2</sub>浓度在整个柱浓度的权重分析,确定on波长。为便于理解,下面将提供on波长选定的一种具体实施方式:粗选取on波长的目的是要将主要干扰气体(即水汽)的影响降低到最小,即采用来源于HITRAN2016的CO<sub>2</sub>吸收谱线数据和来源于HITEM2015的H<sub>2</sub>O吸收谱线数据;对比CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O的吸收谱线数据,得到粗选取的波长。由于不同气体在不同波长下具有不同的吸收强度,为降低水汽的影响,粗选取的波长选择CO<sub>2</sub>的吸收强度大且H<sub>2</sub>O的吸收强度小的波长,具体由人工根据经验进行选择,本具体实施方式中,粗选取的波长包括长度为1576.256nm、1589.681nm和2000.225nm的波行。由于低空的CO<sub>2</sub>浓度最具科学价值,所以根据权重公式分析不同粗选取波长对应的卫星探测气体高度间的权重关系,选取低空权重较

高且稳定的一粗选取波长为精选取波长,即最终确定的on波长。这里,稳定指不易受非目标气体影响的波长,是否稳定通过人工根据经验进行判断。

[0059] 利用CO<sub>2</sub>差分吸收激光雷达法反演CO<sub>2</sub>柱浓度,与大气分子数、吸收截面积以及积分路径有关,而与之关联最密切就是温度、压力以及湿度,所以需要准确收集验证区域的气象数据。本具体实施方式中,利用美国大气标准模式计算大气分子数密度的廓线,利用HITRAN数据库计算选定的on波长的差分吸收截面积,利用卫星运行时间进行测距并结合GPS定位技术计算积分路径。

### [0060] (2) 激光雷达性能模拟器

[0061] 激光雷达性能模拟器用来根据待评估卫星的星载激光雷达实际的硬件参数,模拟出发射能量及星载激光雷达的性能参数。星载激光雷达的实际硬件参数由星载激光雷达及其配件的生产厂家提供,具体的硬件参数可参见表1,但不限于这些。所述星载激光雷达的性能参数包括单脉冲能量、暗电流噪声、望远镜接收效率、on/off能量比等。图3 所示为激光雷达性能模拟器的原理,星载激光雷达实际的硬件参数输入激光雷达性能模拟器,激光雷达性能模拟器利用已有的激光理论知识,模拟出星载激光雷达的性能参数。

[0062] 表1星载激光雷达的硬件参数

[0063]

硬件参数	字母表示
波长	$\lambda$
能量	w
脉冲宽度	s
采样频率	hz
采样范围	m
接收望远镜性能	r
方位角	c
整体转化效率	n
探测器性能	v

### [0064] (3) 地球环境模拟器

[0065] 地球环境模拟器用来对历史真实遥感数据进行统计,获得所需地球环境参数的统计值,并结合时间分辨率和空间分辨率汇总所需地球环境参数统计值,可用来获得激光雷达穿过设定地球环境的模拟信号,其原理见图4所示。本具体实施方式中,所述历史真实遥感数据应包括地表反射率参数数据、大气参数数据以及辐射参数数据;所述地球环境参数包括但不限于地表反射率、大气参数、太阳辐射参数以及CO<sub>2</sub>图谱;CO<sub>2</sub>图谱指特定的波长、压强、温度以及一系列环境因素下,CO<sub>2</sub>的吸收谱线。为确保遥感数据来源的可靠性和准确性,本具体实施方式中,真实历史遥感数据采用MODIS观测数据、TERRA观测数据以及AQUA观测数据。

[0066] 本具体实施方式中,地表反射率的统计值采用地表反射率的年平均值,具体采用如下方法获得:选取MODIS最近一年各月月中24天的观测数据合成各月的地表反射率,并计算地表反射率的平均值,得到全年的平均地表反射率,作为地表反射率的统计值。采用全年的平均地表反射率可解决遥感数据覆盖率不足的问题。

[0067] 本具体实施方式中,大气参数和太阳辐射参数的统计值也是采用大气参数和太阳辐射参数的年平均值,即直接对一年或多年的TERRA以及AQUA观测数据进行统计,获得大气参数和太阳辐射参数的一年或多年的平均值。

[0068] (4) 轨道模拟器

[0069] 轨道模拟器用来根据历史真实遥感数据以及待评估卫星的设计轨道参数,模拟待评估卫星的卫星轨道高度和云参数。本具体实施方式中,卫星轨道高度采用原始设计的卫星轨道高度和类似卫星轨道高度,云参数采用最近一年中国区域的AOD值的平均值。所述类似卫星轨道高度指相同轨道高度的在轨卫星的反演情况,比如反演气溶胶的 MODIS,以及 GOSAT等卫星。

[0070] 下面将结合实施例提供卫星轨道高度具体的模拟方法:

[0071] 本实施例中,需要在600km~700km的高度范围、回归周期为30天的太阳同步轨道上布置一颗L波段的合成孔径雷达卫星。针对该需求,首先从理论角度设计合适的轨道参数,将轨道参数输入轨道模拟器;所述轨道参数包括轨道的长半轴、偏心率、倾角、升交点赤经和近地点幅角。然后,轨道模拟器根据所设计的轨道参数以及历史真实遥感数据,仿真下一运行周期内该合成孔径雷达卫星在对应轨道的纬度星下点轨迹图和经度星下点轨迹图,纬度星下点轨迹图和经度星下点轨迹图统称为星下点轨迹图。星下点轨迹图的计算原理参见图5。接着,计算多普勒中心频率,获得多普勒中心频率与星下点轨迹纬度的关系。最后,依据多普勒中心频率与星下点轨迹纬度的关系,星下点轨迹图采用高斯投影到地图坐标,从而获得该合成孔径雷达卫星的轨道高度和云参数。

[0072] (5) 探测性能评估模块

[0073] 本发明性能评估系统耦合了CO<sub>2</sub>反演模块、激光雷达性能模拟器、地球环境模拟器和轨道模拟器的输出参数,探测性能评估模块则采用控制变量法对输出参数中的待评估参数进行准确分析,估计CO<sub>2</sub>反演效果的随机误差、系统误差或覆盖率,根据随机误差、系统误差或覆盖率设定最优的待评估参数。

[0074] 探测性能评估模块包括随机误差估计模块、系统误差估计模块、覆盖率评估模块中的至少一种,下面将分别介绍随机误差估计模块、系统误差估计模块、覆盖率评估模块的工作原理。

[0075] (a) 随机误差估计模块

[0076] 随机误差是影响卫星探测结果的最重要因素之一,由于随机误差无法直接得出,

所以利用信噪比SNR (signal-to-noise ratio) 以及光学厚度 $\delta_{CO_2}$  预测随机误差 $\frac{\Delta\delta_{CO_2}}{\delta_{CO_2}}$ , 见

公式(2):

$$[0077] \quad \frac{\Delta\delta_{CO_2}}{\delta_{CO_2}} = \frac{1}{2\delta_{CO_2}} \sqrt{\frac{1}{n_{shots}} \left( \frac{1}{SNR_{on}^2} + \frac{1}{SNR_{off}^2} + \frac{1}{(SNR_{on}^L)^2} + \frac{1}{(SNR_{off}^L)^2} \right)} \quad (2)$$

[0078] 式(2)中:

[0079]  $\delta_{CO_2}$  表示由CO<sub>2</sub>吸收引起的光学厚度, $\Delta\delta_{CO_2}$  表示由CO<sub>2</sub>吸收引起的光学厚度的标准差,光学厚度可根据气象数据中的压力和温度、以及CO<sub>2</sub>吸收截面积计算获得。

[0080]  $n_{shots}$ 表示值得独立脉冲对数,  $SNR_{on}^L$ 和 $SNR_{off}^L$ 分别表示值得统计中on波长和off波长的脉冲能量浮动值,  $SNR_{on}$ 和 $SNR_{off}$ 分别表示on波长和off波长时回波信号的平均信噪比。

[0081]  $SNR_{on}$ 和 $SNR_{off}$ 可根据太阳辐射值和探测器性能计算获得, 具体见公式(3)~(4):

$$[0082] \quad SNR_{on} = \frac{P_{on}MR}{B(2eM^2FR(P_{on} + P_{back}) + i_D^2)} \quad (3)$$

$$[0083] \quad SNR_{off} = \frac{P_{off}MR}{B(2eM^2FR(P_{off} + P_{back}) + i_D^2)} \quad (4)$$

[0084] 式(3)~(4)中:

[0085]  $P_{on}$ 和 $P_{off}$ 分别表示on波长和off波长时的回波信号强度;  $P_{back}$ 表示太阳背景辐射值;  $M$ 表示探测器的内部获取参数;  $R$ 表示探测器的响应程度;  $B$ 表示电子线宽;  $e$ 表示基本电流;  $F$ 表示探测器的额外噪声参数;  $i_D^2$ 表示暗电流噪声密度。这里的探测器指激光雷达探测器以及接收探测器。

[0086]  $P_{back}$ 、 $R$ 、 $F$ 、 $\delta_{CO_2}$ 等原始参数都是可以直接通过已有参照卫星数据、HITRAN数据库等可靠途径获得的。随机误差估计中,  $P_{on}$ 、 $P_{off}$ 、 $B$ 、 $e$ 、 $i_D^2$ 为激光雷达性能模拟器的输出数据。

[0087] (b) 系统误差估计模块

[0088] 本发明中, 系统误差来源考虑四个元素: 大气环境、传输过程、卫星自身姿态以及线型误差。由于线型误差可通过吸收池得到改正, 所以主要考虑前三个元素。

[0089] 系统误差主要是通过一个特定参数 $F_i$ 进行表达,  $i$ 表示特定参数 $F$ 的类型, 见公式(5):

$$[0090] \quad \varepsilon_S^i = \frac{|\Delta\delta_{CO_2}(F_i) - \overline{\Delta\delta_{CO_2}} \cdot (F_i + \delta F_i)|}{\Delta\delta_{CO_2}(F_i)} \quad (5)$$

[0091] 式(5)中:

[0092]  $\varepsilon_S^i$ 表示由特定参数 $F_i$ 表达的系统误差;  $\Delta\delta_{CO_2}(F_i)$ 代表的是 $F_i$ 条件下 $CO_2$ 的光学厚度值;  $\overline{\Delta\delta_{CO_2}}$ 代表是平均 $CO_2$ 光学厚度值;  $\delta F_i$ 表示特定参数 $F_i$ 的不确定性; 特定参数 $F_i$ 根据实际情况设置其值, 其中,  $i$ 代表不同的因素, 包括温度、压力、湿度、线强度等与压力漂移、压力展宽以及多普勒频率漂移。

[0093] (c) 覆盖率评估模块

[0094] 所述覆盖率评估模块的工作原理如下:

[0095] (c1) 通过实际模拟设定一卫星轨道高度, 并获得轨道的最低点。为快速模拟采样效果, 将采样密度降低到原有的1/50, 并将原有的采样间隔提高20倍, 采样密度与采样间隔的调整并不固定, 均可按实际情况进行调整。这样做的优点是在没有改变分布模式的情况下, 虽然减少了每个采样通道的采样点数, 但是没有减少采样通道数。图8所示为轨道高度750km时的全球采样情况, 图8中, 横纵坐标分别表示经度和纬度。

[0096] (c2) 通过设定的卫星轨道高度, 结合硬件信息以及环境信息, 对采样点的数量以及分布进行实时模拟, 并合理利用差值法对进行评估。所述的硬件信息指激光雷达性能模拟器的输出数据, 所述的环境信息指地球环境模拟器和轨道模拟器的输出数据。评估主要

包括整体分布均匀程度以及主要验证区域的分布密集度。比较贴切实际的覆盖率情况进行估计,可以提前设定出有利重点研究区域的一些参数。图9为轨道高度750km 时验证区域的采样情况。

[0097] (c3) 轨道模拟器着重考虑了气溶胶光学厚度对探测结果带来的影响,其主要用来对近一年内MODIS卫星对中国区域的AOD值进行平均,由于随机误差与AOD之间具有强的相关性,所以将AOD分布数据输入轨道模拟器中,将卫星轨道高度、云参数、轨道参数、以及AOD分布数据进行数据融合,获得整体观测效果。图10所示为2016 年全球AOD分布图。

[0098] (c4) 通过设置不同的轨道参数,对比分析在不同的AOD情况下得到的反演效果,为了得到合适的轨道高度设定以及分析可反演CO<sub>2</sub>浓度的AOD的极限值,所以选取具有代表性的城市进行对比分析。分别选取了2个AOD平均值较小的城市,2个中等AOD 值城市,以及2个较大AOD值的城市。经过对比得出是否可以达到小于误差极限值 0.3%。然后经过调整参数值得到最优的参数设置。为最后的参数设定作重要参考。

[0099] 上述实施例所述是用以具体说明本发明,文中虽通过特定的术语进行说明,但不能以此限定本发明的保护范围,熟悉此技术领域的人士可在了解本发明的精神与原则后对其进行变更或修改而达到等效目的,而此等效变更和修改,皆应涵盖于权利要求范围所界定范畴内。

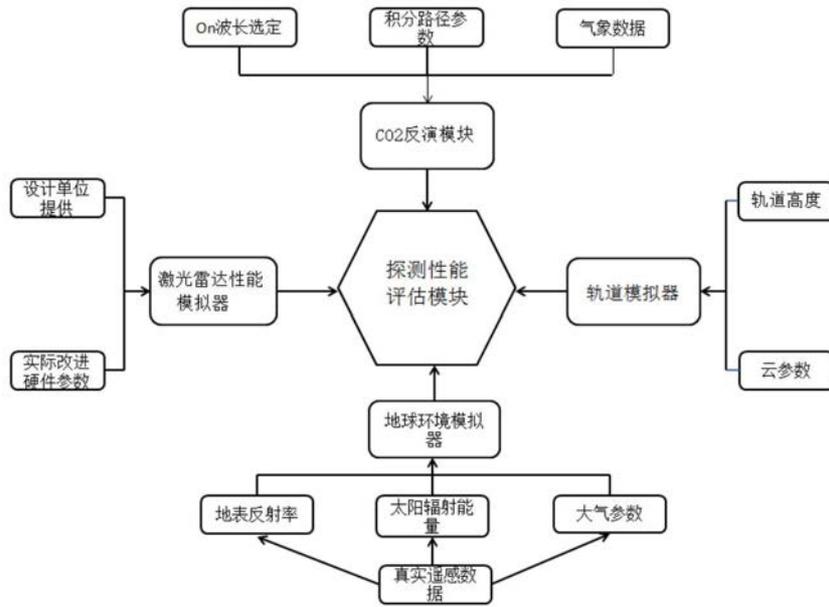


图1

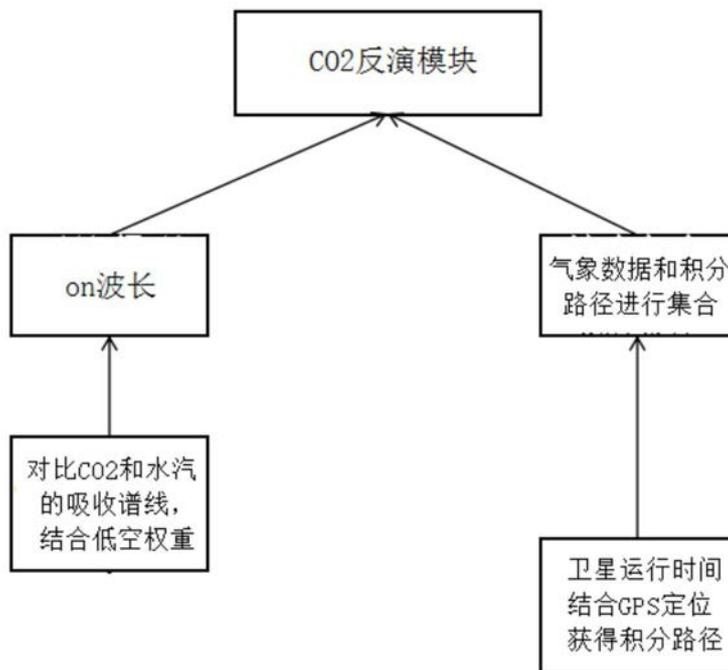


图2

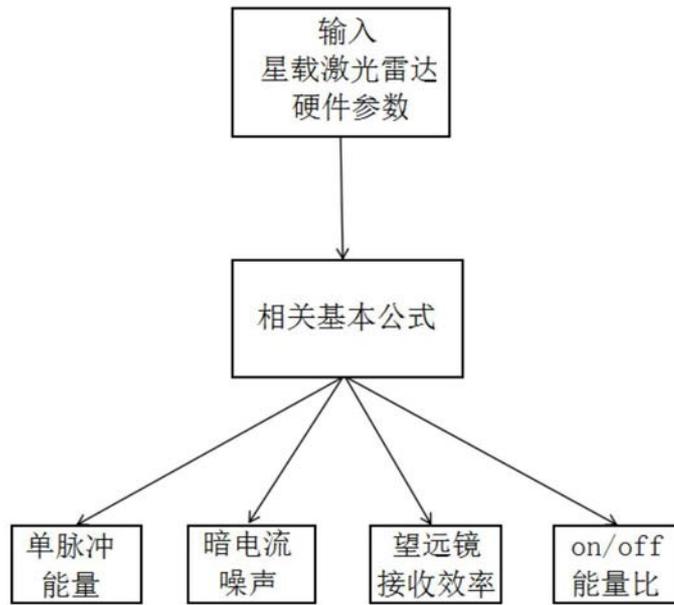


图3

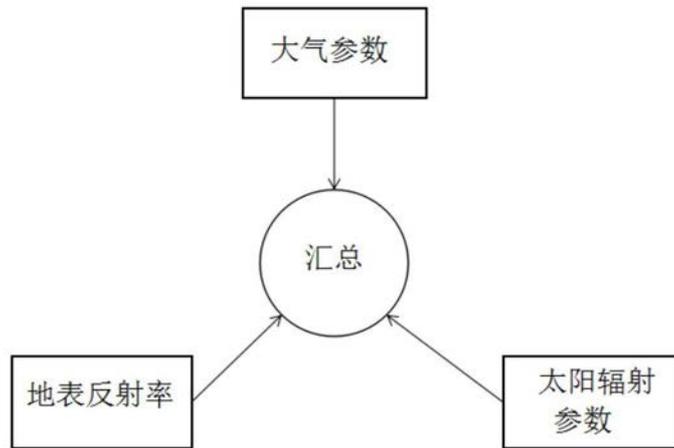


图4

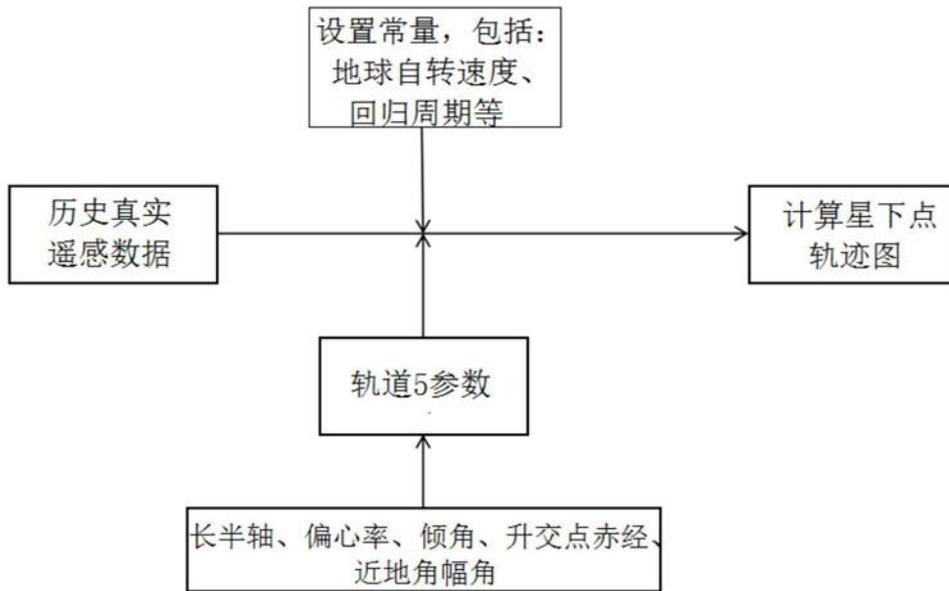


图5

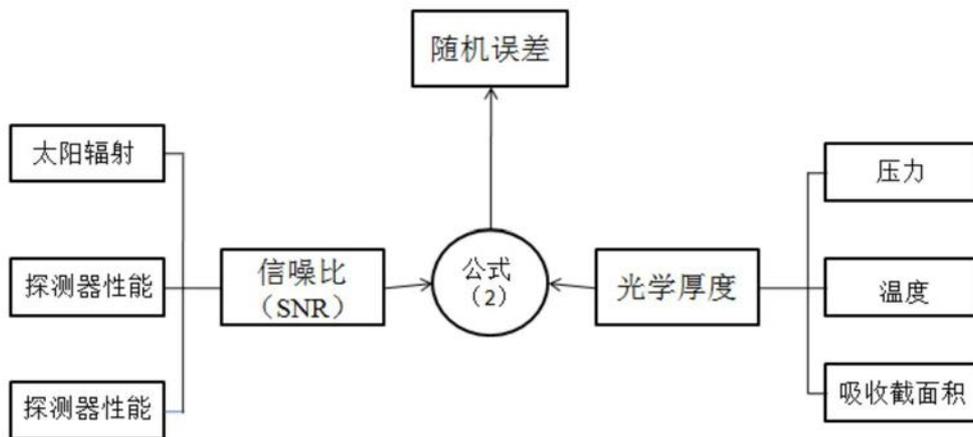


图6

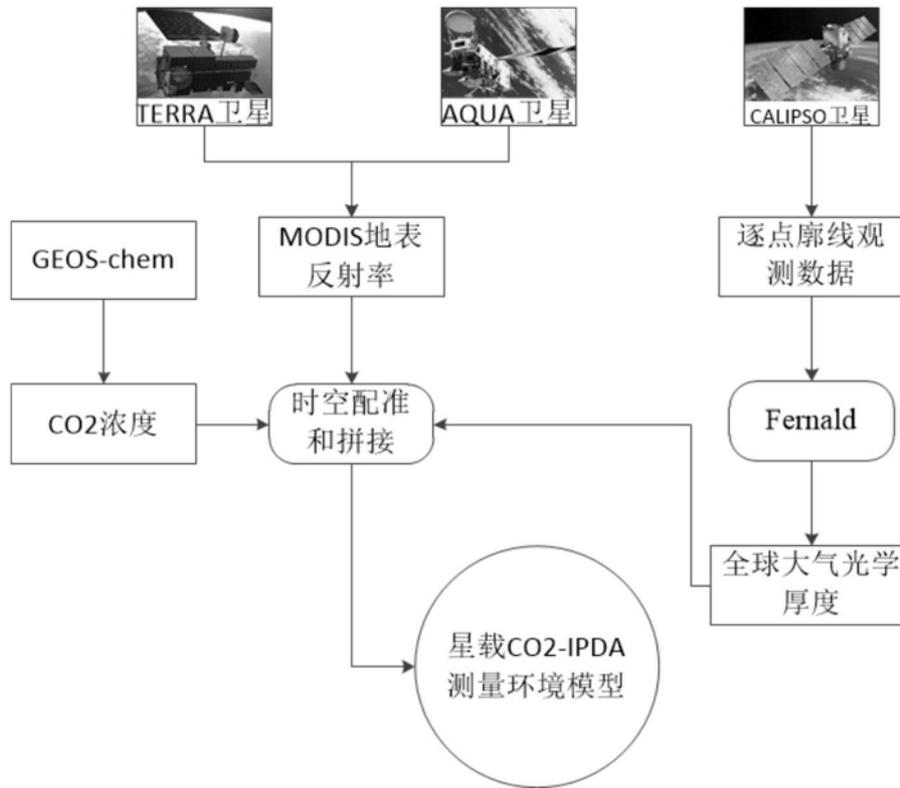


图7

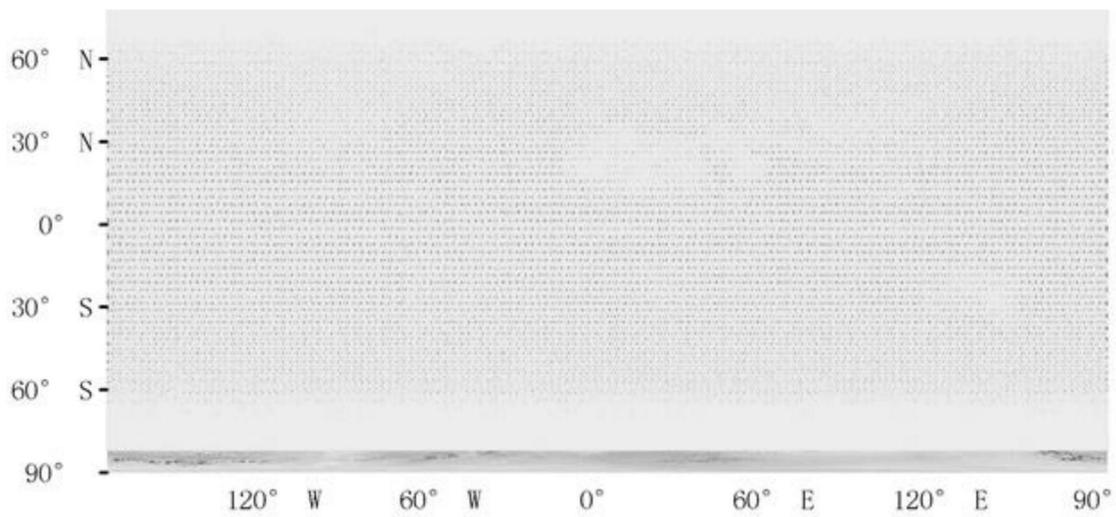


图8

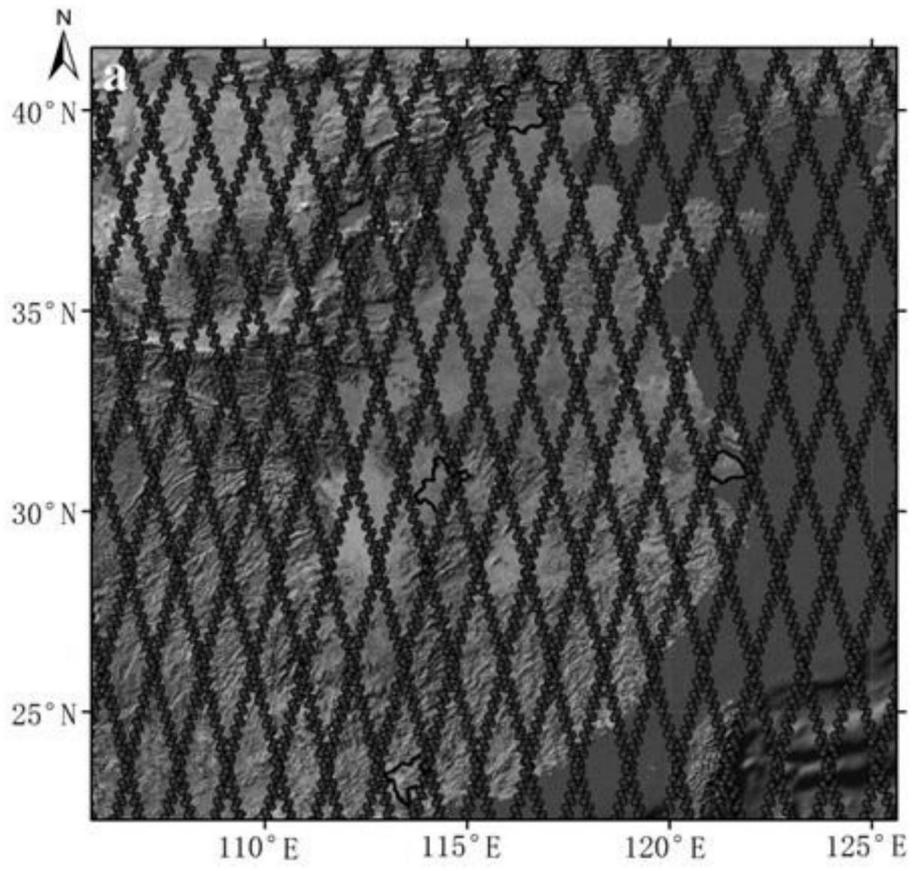


图9

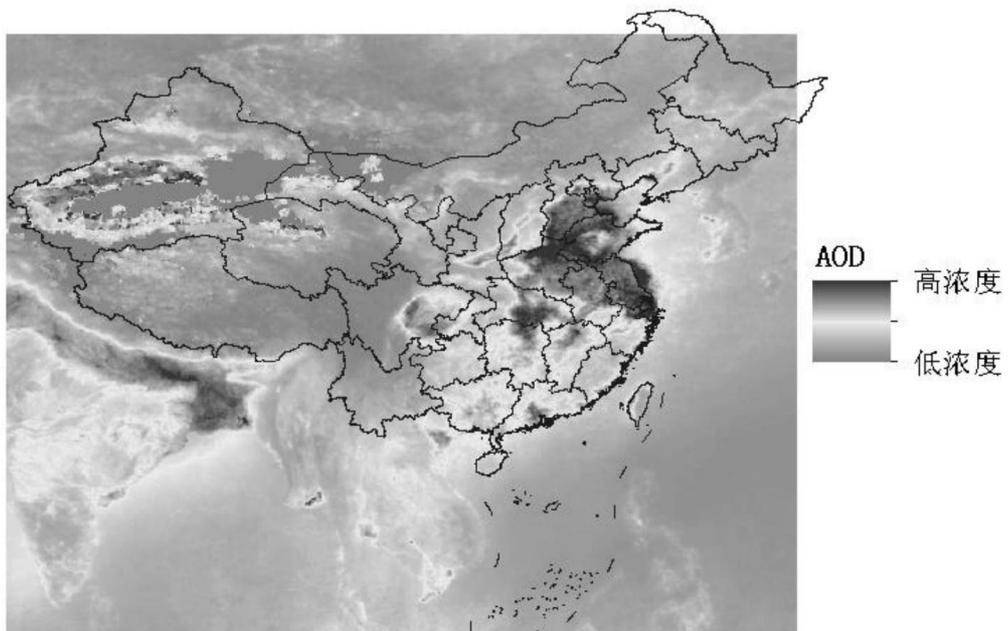


图10

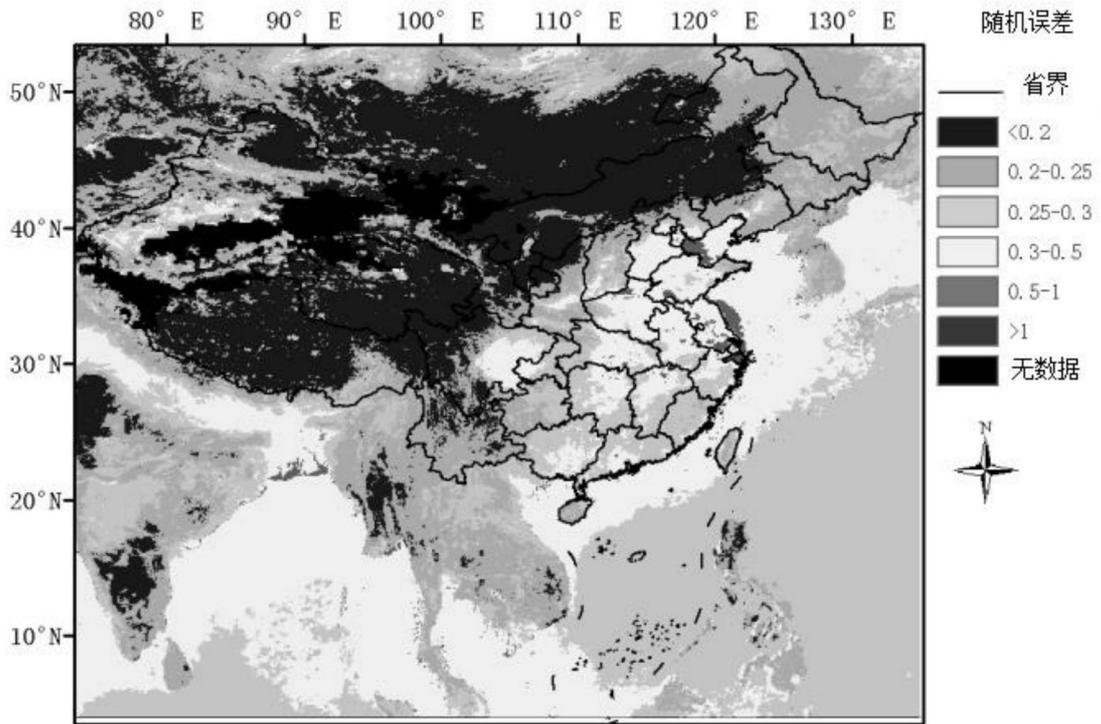


图11