

光学学报

双波段全天空云量观测系统研制及数据分析

王依人^{1,2}, 杨明³, 刘达新^{4*}, 夏营威¹, 谢婉怡^{1,2}, 王洪坤⁵, 刘勇¹, 刘东^{1**}

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, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³中国民用航空华东地区空中交通管理局安徽分局, 安徽 合肥 230001;

⁴中国气象局气象探测中心, 北京 100081;

⁵安徽大学, 安徽 合肥 230039

摘要 为实现全天时、全天空云量观测,提出并研制了一种双波段全天空云量观测系统。该系统在可见光波段通过内置遮光装置和高动态范围(HDR)图像合成技术,可采集清晰完整的全天空图像,同时,其在红外波段的一次成像可获取160°视场范围天空图像,较传统扫描拼接式红外观测模式更加简单快捷。主要阐述了该系统在不同波段的全天空成像原理以及云图分割方法。从双波段云量观测数据的一致性和准确性两方面进行分析,验证了该系统在云量观测上具有较高的准确性。

关键词 测量; 全天空成像; 地基云观测; 红外; 可见光

中图分类号 TP732.2 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS220979

1 引言

云对地球辐射收支平衡和水循环起着至关重要的作用,其形成和演变与天气变化有着十分密切的关系^[1]。对云参数的持续观测和分析结果,可用于太阳能产能预报^[2-4]、航空、航船气象研究领域^[5-6]。云量是云的主要宏观参数之一,也是地面气象观测的重要参数之一,因此对其观测方法的研究具有重要的应用价值和广泛的应用前景。

地基云量观测早期以人工观测方式为主^[7],其主观性强、连续性差。国外对地基云的自动化观测研究起步较早,研制的相关设备比较成熟的主要有美国ARM公司的WSI(Whole Sky Imager)^[8]、美国Yankee环境系统公司的TSI(Total Sky Imager)^[9]和西班牙的ASI(All Sky Imager)^[10]等。上述设备多利用鱼镜头(Fisheye Lens)加装电荷耦合器件(CCD)相机的方式在可见光波段进行成像,为避免太阳直射,WSI和ASI都装有太阳遮挡设备,采集的可见光全天空图像都有部分被遮挡。国内自主研发的地基云观测设备有中国气象科学研究院研制的TCI(Total-sky Cloud Imager)^[11]和中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的ASC100(All Sky Camera)型全天空成像仪^[12]等。随着红外探测技术的发展,在红外波段进行地基云观

测的研究也取得一定进展。Gillotay等^[13]研制的CIR-7(Clouds Infrared Radiometer)将7个探头安装在一个半圆环上,每个探头的有效视场角为12°,通过扫描拼接测量全天空红外辐射。Shaw等^[14]研发的ICI(Infrared Cloud Imager),采用商业的非制冷红外相机对天空进行观测,其观测视场为18°×13.5°。ICI观测视场较小,只能观测到天顶附近的部分天空。关于红外波段的观测,孙学金等^[15]研制的WSIRCMS(Whole Sky Infrared Cloud Measuring System)的单次观测视场大大增大,但也只有45°×60°。总结现有云观测设备可得:可见光波段云观测只能在白天观测,且大部分设备都装有太阳挡光板或太阳跟踪装置;红外波段云量观测系统一次成像观测的天空视场较小,需通过扫描拼接获取全天空图像,扫描时间较长,云的移动造成拼接出现误差,扫描拼接增加了系统的复杂性。

鉴于上述技术现状,本文提出并研制了一种双波段全天空云量观测系统。其中:可见光波段的云量观测沿用ASC100型全天空成像仪的设计思路,结合高动态范围(HDR)图像合成技术实现全天空成像;红外波段的云量观测利用大面阵红外热像仪在8~14 μm红外波段进行成像,加装定制的鱼镜头,其视场角可达160°以上。该双波段云量观测系统以白天可见光加红外观测的方式工作,可实现全天时的云量观测,系统

收稿日期: 2022-04-15; 修回日期: 2022-07-05; 录用日期: 2022-07-25; 网络首发日期: 2022-08-05

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3090203)、安徽省重点研究与开发计划(202104b11020028)

通信作者: *ldxaoc@cma.gov.cn; **dliu@aiofm.cas.cn

内置双波段云量识别算法。为验证该系统观测数据的有效性,对双波段云量数据的一致性和准确性进行了具体分析。该系统双波段观测的设计,不仅可实现地基云量的全天时观测,还可为云的光学厚度、云底高度、可降水量等参数的反演提供多通道的原始数据。

2 系统结构及原理

2.1 系统结构

双波段全天空云量观测系统(All-Sky-Camera 200, ASC200)在可见光波段(450~650 nm)和热红外

波段(8~14 μm)对全天空云况进行监测,可实现地基云量的自动化观测。ASC200 云量观测系统主要由成像模块、数据处理模块、温湿度控制模块、数据传输模块、数据管理模块、终端显示模块以及外围组件组成。其中,成像模块包括可见光成像单元和红外成像单元。可见光成像单元的视场角达 180° ,图像分辨率为 $2000 \text{ pixel} \times 1944 \text{ pixel}$;红外成像单元的视场角达 160° ,图像分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。系统原理结构图如图 1(a)所示,实物图如图 1(b)所示。

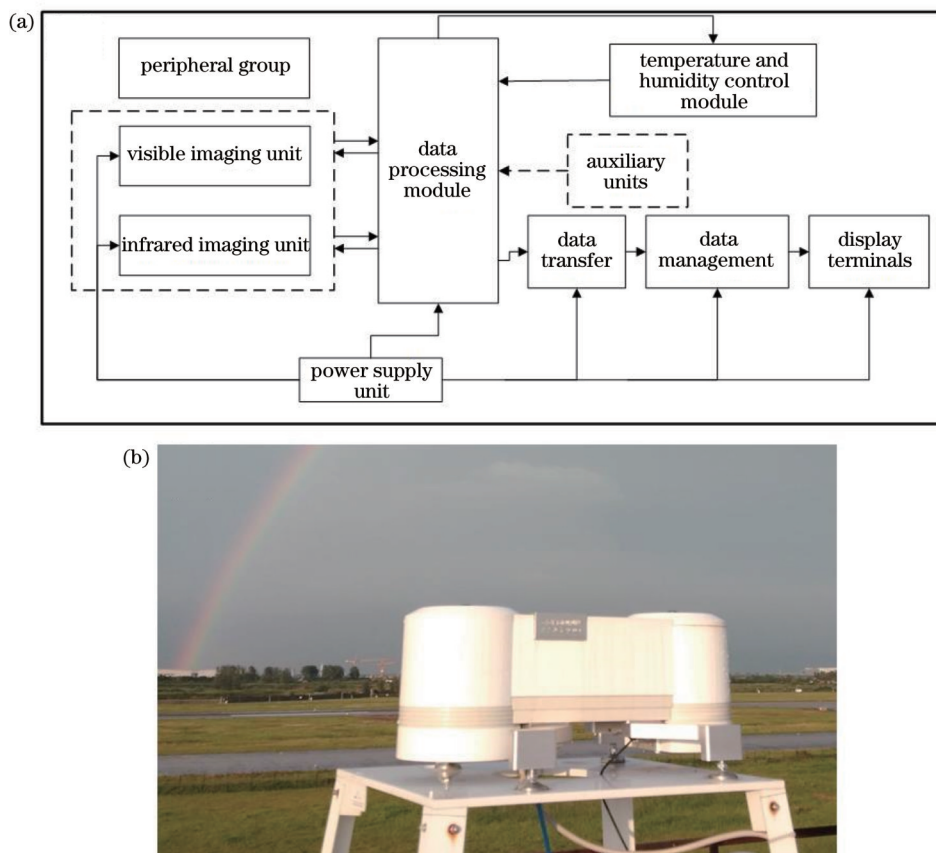


图 1 双波段云量自动观测系统结构图。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 1 Structure diagram of dual-band automatic cloud cover observation system. (a) Schematic diagram; (b) physical picture

系统工作时,成像模块采集原始天空图像,温湿度控制模块调控系统内部环境,数据处理模块接收图像和温湿度控制数据,通过对原始图像数据进行分析得到云量参数,同时对温湿度进行反馈控制。系统工作的外部环境温度范围为 $-45 \sim 55^\circ\text{C}$ 。数据传输模块将云量分析结果传输至数据管理模块,并在终端显示,方便用户实时获取数据。开展连续观测时,观测周期为 10 min,白天可见光和红外成像单元同时工作,夜间则只有红外成像单元继续观测,从而实现天空的全天时观测。可见光成像单元的工作时段为系统安装地日出日落时段。

2.2 可见光成像原理

云量观测系统中成像模块能够采集高质量的天空图像,是准确获取云量的前提。针对现有全天空成像设备存在的成像问题,本研究在成像系统设计上取得突破,采用双光路成像技术能一次拍摄获取全天空可见光和红外云图。图 2 所示是同一时刻采集的可见光和红外全天空图像。

可见光成像单元主要包括鱼镜头和相机。鱼镜头是视场角为 180° 的广角镜头,使用的工业相机分辨率为 $2000 \text{ pixel} \times 1944 \text{ pixel}$,相机朝天空方向安装。相机拍照时,在日常环境中通过自适应曝光可以获得亮度均匀的图像,但在相机直接朝向天空进行拍照时,

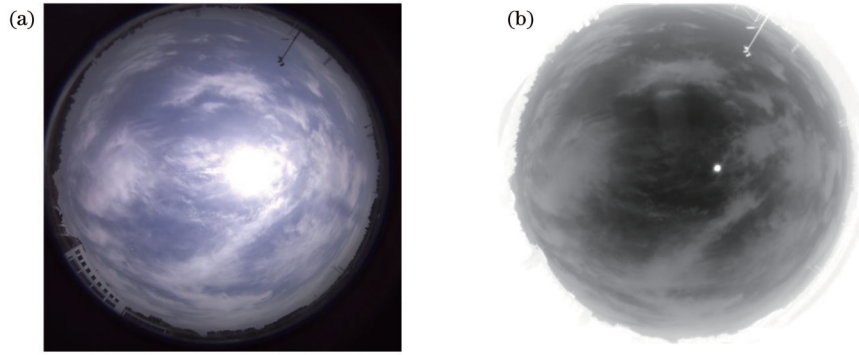


图 2 全天空云图。(a)可见光波段;(b)红外波段

Fig. 2 All-sky cloud images. (a) Visible light band; (b) infrared band

自适应曝光值下采集的天空图像的太阳及其周边像素会有过度曝光现象,天空纹理信息被淹没。因此 WSI、TSI 等设备都加装太阳遮挡装置,避免太阳直射灼伤 CCD 像元和造成图像过度曝光。

ASC200 的可见光成像单元不同于 WSI、TSI 等全天空成像设备,无需安装太阳跟踪遮挡装置,而是在鱼镜头与相机之间安装微型斩光板(light-cut 模块)。当成像单元开始采集图像,light-cut 模块转换到开合状态,光线进入相机,并在感光元件上成像;相机不工作时,处于闭合状态,阻挡太阳光线。此过程周期性自动进行,无需人工干预。light-cut 模块只能解决因太阳光线长时间照射灼伤 CCD 像元的问题,却不能解决直接采集天空图像时太阳周边过度曝光的问题。为此,引入 HDR 成像技术^[16],将在不同曝光值下采集的天空图像进行合成,得到一张亮度均匀、清晰无遮挡的全天空图像。

合成 HDR 图像的关键是获取相机的光照响应曲线,该曲线是相机曝光量与图像像素值之间的关系曲线。假设图像像素值与曝光时间和相机接收照度的关系为

$$V_{ij} = f(E_i \Delta t_j), \quad (1)$$

式中: i 表示像素位置的索引; E_i 表示相机在第 i 个位置接收到的照度; Δt_j 表示第 j 幅图像的曝光时间; V_{ij} 表示第 j 幅图像在第 i 个位置的像素。一般来说,图像的曝光量越大,像素值就越大,则认为函数 f 是单调增函数。对式(1)求反函数并取对数,有

$$\ln f^{-1}(V_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j, \quad (2)$$

$$F(V_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j, \quad (3)$$

式中: $F(V_{ij})$ 为相机响应函数, $F(V_{ij}) = \ln f^{-1}(V_{ij})$ 。在数字图像中, V_{ij} 是 0~255 的整数。为求响应函数,可设置相机拍摄固定场景,场景的辐照度 E 是不变的,曝光时间可调,因此对式(3)的求解转化成对最小二乘目标函数的求解:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [F(V_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 + \lambda \sum F''(v)^2 = 0, \quad (4)$$

式中: M 为合成 HDR 图所用的原图像数; N 为原图像中采样像素的组数;平滑项 $F''(v) = F(v-1) - 2F(v) + F(v+1)$, v 表示与 V_{ij} 对应的连续变量; λ 为平滑项的权重参数,根据预期的噪声量适当地对其进行选择。通过求解最小二乘函数,即可求出函数 F 。获得相机的响应曲线后,通过以下步骤获得 HDR 图:

1) 根据公式 $V_{ij,lin} = \exp[F(V_{ij})]$ 转换非线性的 RGB 图像为线性化的图像(针对每个像素位置),其中 $V_{ij,lin}$ 表示线性化后的图像灰度值;2) 寻找多帧图像中的有效像素值;3) 获取这些像素的权重;4) 加权融合,生成此位置的最终像素值。

根据上述 HDR 图像合成技术,ASC200 型的可见光成像单元设置 4 个梯度曝光时间采集天空图像,如图 3(a1)~(a4)、(b1)~(b4) 所示。图 3 中虚线右侧图 3(a5)、(b5) 则是合成的 HDR 天空图像。

由图 3 可知,HDR 图像具有更丰富的细节信息,能够清晰记录天空云的纹理颜色等信息,同时有效减少了过饱和与暗像素点的数量。

2.3 红外成像原理

利用红外成像设备,从地面向天空方向观测,在热红外波段(8~14 μm)红外成像设备可感测到来自低层大气的热红外辐射,其原理基于大气辐射传输特性。不同电磁波通过大气后的衰减程度是不一样的,有些波段的电磁波在大气中的透过率很低,甚至完全不能通过,称之为大气屏障;反之,有些波段的电磁波通过大气后衰减较小,透过率较高,称之为大气窗口。

图 4 是软件 MODTRAN^[17]模拟的晴空下大气红外辐射透过率曲线。从图 4 可知,红外辐射在 0.7~2.5 μm 、3~5 μm 和 8~14 μm 波段的大气透过率达 80% 左右,即大气窗口。其中,8~14 μm 波段是红外工程应用中重要的光谱区之一,是地基云观测常用的红外波段。

红外云观测设备在地面接收的热红外辐射主要来自云底大气和大气中水汽、云等红外辐射发射体向外辐射的能量。当晴空无云时,接收到的热辐射只取决于观测大气路径上水汽和气温的分布,一般

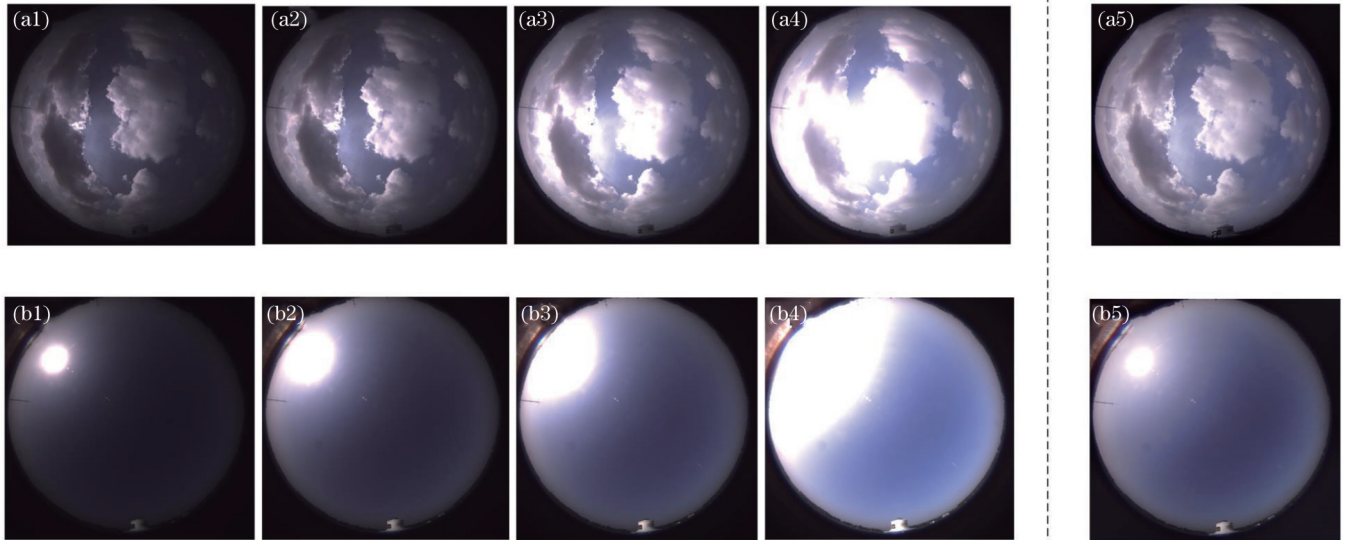


图 3 不同曝光值的全天空图像。(a)有云天空;(b)晴空

Fig. 3 Sky images with different exposure values. (a) Cloudy sky; (b) clear sky

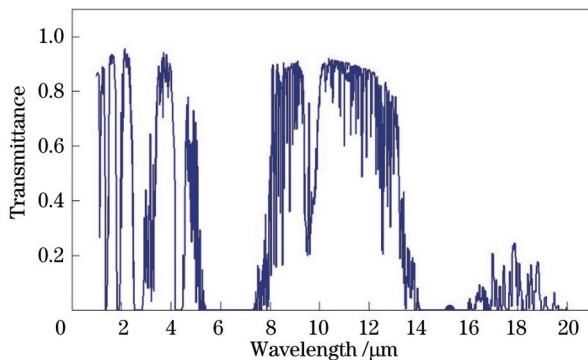


图 4 大气窗口特性

Fig. 4 Atmospheric window characteristics

接收到的辐射量很低;当视线方向有云时,热辐射来自云和路径大气两部分。云是红外波段的强发射体,在白天和夜间具有相同的红外辐射特性。具有一定厚度的云在热红外波段可近似看作黑体^[18],且以云底大气温度向外进行黑体辐射,有云时接收到的辐射量将大大增加。另外,太阳对热红外波段的辐射影响较小^[19],在夜间红外相机也可以采集清晰的天空图像,因此热红外云观测设备可实现天空的昼夜连续观测。

ASC200的红外成像单元由定制的红外广角镜头、8~14 μm红外感光芯片组成。红外广角镜头采用反远距型光学结构,会引入较大桶形畸变,可实现对角220°和水平160°的观察视场。定制红外镜头加装大面阵红外成像传感器,可采集16 bit的高分辨率红外天空图像,图像像素为640 pixel × 512 pixel,是目前地基云观测时采集到的最高分辨率的红外图像,如图2(b)所示。与传统红外观测设备的扫描式、多台观测单元联合观测等方式相比,该红外成像单元无需进行扫描

拼接,一次拍摄可获得不低于160°视场的红外天空图像。

3 全天空云量识别

采集清晰的全天空图像是进行地基全天空云量识别的基础,而准确地进行云图分割是精确反演云量参数的核心。ASC200的研制中,根据可见光和红外全天空图像的不同特点,提出了针对不同波段的全天空云图分割算法。

3.1 可见光云图分割

大气分子瑞利散射与 λ^4 成反比,晴空时可见光中波长较短的蓝色光散射较多,天空呈蓝色;天空中的云由液滴和冰晶组成,其直径远大于可见光光波波长,主要发生米散射,因此云呈白色^[20]。但现实情况下,由于雾霾、气溶胶等因素的影响,天空有时会呈灰白色,云有时因太阳光折射作用呈彩色,此时传统的阈值分割法对云量的识别精度较低。因此,ASC200型云量自动观测系统的可见光云图分割采用文献[21]中提出的基于卷积神经网络的SegCloud网络进行云图分割。

SegCloud网络结构主要包括编码网络、对应的解码网络,以及像素级分类层Softmax层。每层卷积层后加批归一化层(Batch Normalization)、ReLU激活层和最大池化层,批归一化层对网络学习图像进行分布归一化,可达到加速网络学习的效果。最大池化层进行下采样,并且将尺度不变性传递到下一层。解码网络则是对编码网络的输出特征图进行带索引的上采样(Upsampling),生成稀疏特征图,再执行卷积操作,将生成的密集特征图送入softmax分类器,进行逐像素的分类处理,以达到图像分割的效果。像素标记过程中将天空图像分为天空、云、太阳和无效区域,如图5所示。

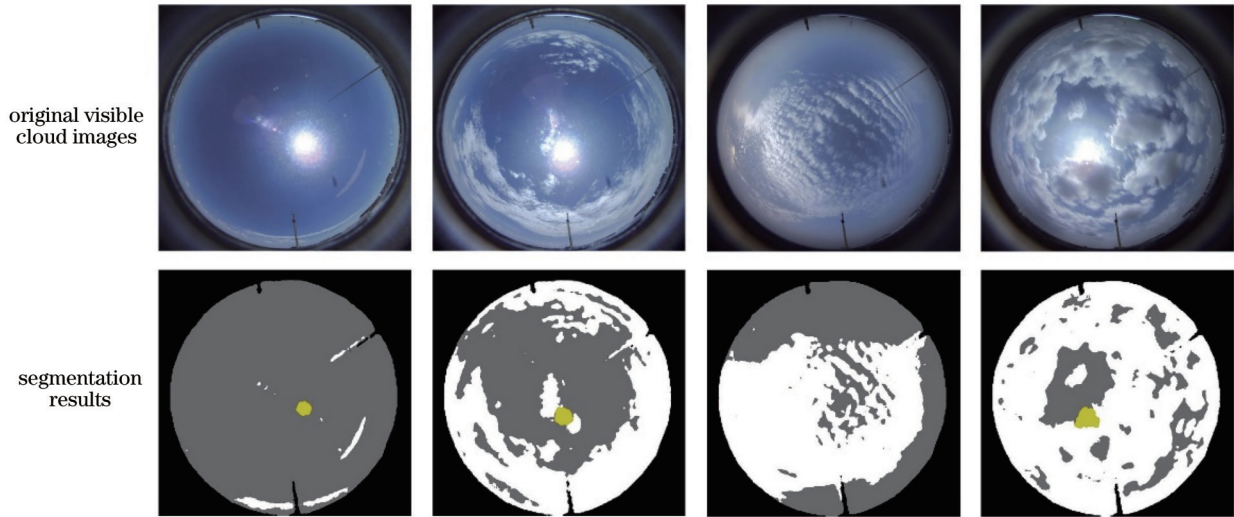


图5 SegCloud分割可见光云图结果

Fig. 5 SegCloud segmentation results of visible light cloud images

3.2 红外图像分割

对红外云图中的云点像素进行识别,首先需对大气背景辐射增量进行修正,然后通过阈值分割分辨出云点和非云点像素。在红外成像设备观测视场较小时,通常不考虑大气路径导致的辐射增量^[22]。ASC200的红外波段观测视场较传统红外设备大得多,因此,在识别红外云图中的云点像素时,不仅要考虑大气背景辐射增量,还需考虑大气路径变长带来的红外辐射增量。

根据已有研究^[19, 22-23],晴空条件下地基接收的红外辐射随观测天顶角的增大而增大,观测天顶处最小,且与观测方位角无关。全天空红外云图表现为由图像中心向外像素灰度值随像素与中心距离的增加而增大,呈趋势一致的非线性变化。基于大视场红外云图的特点,提出一种基于红外原始灰度图像的红外云图分割算法^[23]。红外相机采集的原始灰度图像的灰度值也称数字量化值(DN),是一个无单位的量化值。从图像分析处理角度出发,可对大气背景辐射的辐射亮度值与观测天顶角关系进行拟合,拟合函数为

$$D_{\text{sky}} = a \times [f(\theta)]^2 + bT \times f(\theta) + cT, \quad (5)$$

式中: D_{sky} 为天顶角为 θ 时对应的红外图像中的像素灰度值; $f(\theta)$ 为与观测天顶角相关的函数;参数 a 、 b 、 c 为拟合参数, b 、 c 与环境温度 T 相关。根据鱼镜头的等角度投影设计原理,红外图像上的一点 p 到图像中心的距离 $d_p = k\theta$,其中 k 为系数,则天顶角 θ 可表示为

$$\theta = \frac{d_p}{k} = \frac{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}}{k}, \quad (6)$$

式中: (x_p, y_p) 为点 p 在以图像中心为坐标原点的图像坐标系中的坐标。

晴空条件下,天空红外辐射较小,全云和部分有云天气下,有云部分的天空红外辐射值均高于晴空时的辐射值,无云部分的天空辐射值与相同气象条件下晴空时天空的辐射值相近或相等。因此根据式(5)模拟出晴空无云情况下红外云图的灰度值分布,然后在有云天空红外云图的基础上减去该模拟的晴空无云的红外云图,最后通过设置合适的分割阈值,即可获得红外图像的云量分割图。图6(a)为天空某一方位角上图像的灰度值和模拟灰度值,图6(b)为根据式(5)模拟的晴空无云条件下的红外天空图像。

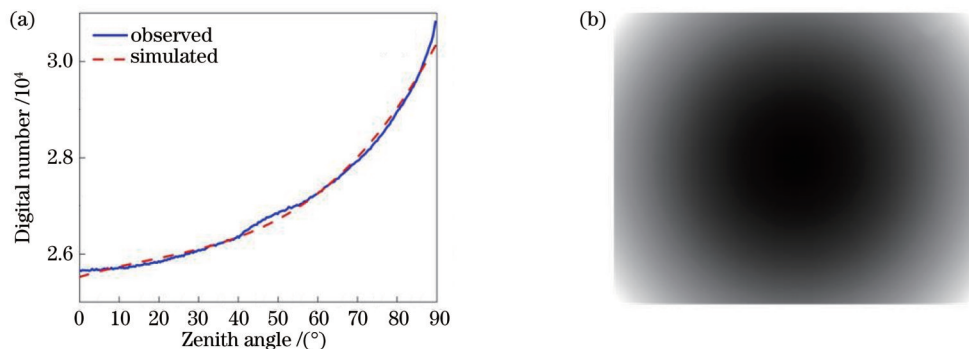


图6 晴空背景辐射模拟。(a)参数拟合;(b)背景模拟图

Fig. 6 Clear sky background radiation simulation. (a) Parameter fitting; (b) background simulation result

图 7 为部分天空不同云况下,利用所提方法对红外云图进行分割的结果。图 7 中第一行为原始全天空红外云图的灰度图,第二行为云图分割结果图,图中黑色区域为无效和障碍物区域,白色部分为云像素部分,

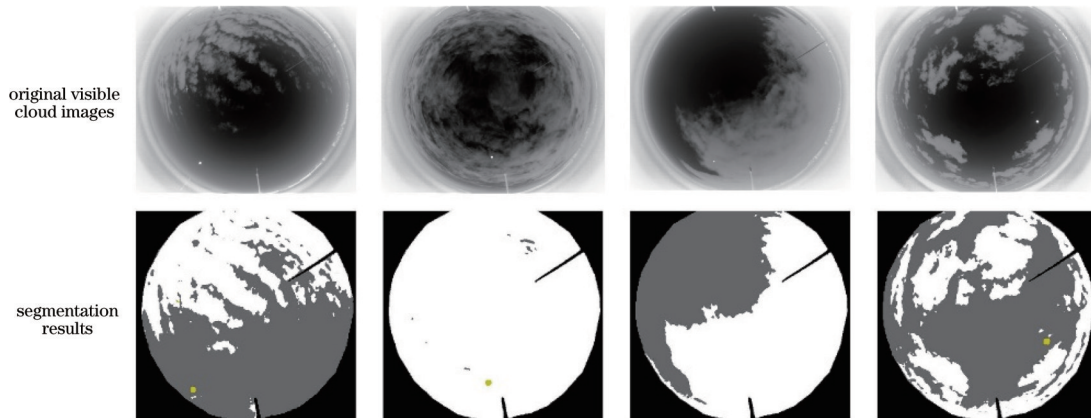


图 7 红外云图分割结果

Fig. 7 Segmentation results of infrared cloud images

4 双波段云量观测结果分析

ASC200 双波段云量观测系统已安装于合肥、上海、北京等多地并开展地基云观测,积累了大量观测数据。为量化分析该系统的云量观测精度,下面分别从红外和可见光观测数据一致性、云量观测精度两方面对系统观测数据进行分析。

4.1 数据介绍

本文取合肥新桥机场(31°59'N, 116°59'E)2020年8月1日到10月31日的观测数据为样本进行分析,此设备工作时,观测周期设为10 min。气象观测人员进行云量观测时,通常将天空分为10等份,然后根据天空云层分布情况将云量定义为0~10。天空无云时,云量为0;天空满云时,则定义云量为10。ASC200在进行云量观测时,其天空云量 P_{cloud} 可根据云图分割结果计算得到,根据文献[12],其计算公式如下:

$$P_{\text{cloud}} = M_{\text{cloud}} / N_{\text{all-sky}}, \quad (7)$$

式中: M_{cloud} 表示云图分割结果图中云点像素的个数; $N_{\text{all-sky}}$ 为系统可观测的有效区域像素总数,其计算公式为

$$N_{\text{all-sky}} = M_{\text{sky}} + M_{\text{cloud}}, \quad (8)$$

式中: M_{sky} 为天空部分的像素个数。

4.2 双波段数据一致性分析

红外和可见光观测单元在白天工作时段同步采集天空图像,夜间红外单元继续观测。为分析可见光和红外波段的云量观测数据一致性,选取白天时段两者的观测数据进行分析。除去因设备或网络故障丢失的数据外,2020年8月至10月间,选取的样本数据量如表1所示。对红外云量和可见光云量进行相关性分析,其结果如表1所示,其中 R 表示相关系数。两类云

灰色部分为天空像素部分。从图7中可看到,所提出的红外云图分割方法能够有效消除天空背景辐射,有效分割出图像中的云点像素。

量数据的相关系数拟合结果图如图8所示。

表1 可见光和红外云量相关性分析

Table 1 Correlation analysis of visible light and infrared cloud cover

Time	August	September	October
Sample number	1032	1790	1884
R	0.885	0.869	0.897

从拟合结果可知,2020年8月至10月间可见光云量与红外云量的相关系数分别为0.885、0.869和0.897。从上面的统计结果可知,在样本数据量较多的情况下,可见光和红外云量的相关系数均接近0.9,说明二者具有较高的相关性。由于观测波段的不同特性,为进一步分析两个波段对不同云状的云探测能力,依据激光云高仪的云高数据将样本中有云时刻的数据分为高、中、低云三类,对两个波段观测结果的一致性进行分析(图9)。其中,以民航云底高为标准,将云底高小于2500 m的云定义为低云,云底高大于等于2500 m且小于6000 m的云定义为中云,将云底高大于等于6000 m的云定义为高云。统计比较两个波段的观测结果,如表2所示。结果显示双波段对高、中、低云的观测结果的相关系数 R 分别为0.67、0.73和0.84。系统对高、中、低云的观测能力有所不同,其中对于高云的观测一致性相对较差。

总体上分析导致两个波段的云量数据存在差异的原因主要有以下几个方面:可见光云图和红外云图的分辨率存在较大差异;两个成像单元的观测波段不同,可见光和红外波段的光谱特性不同导致成像单元对云的探测能力存在差异,如红外相机受最低观测温度限制,对温度较低的高云的探测能力较弱,而在能见度好

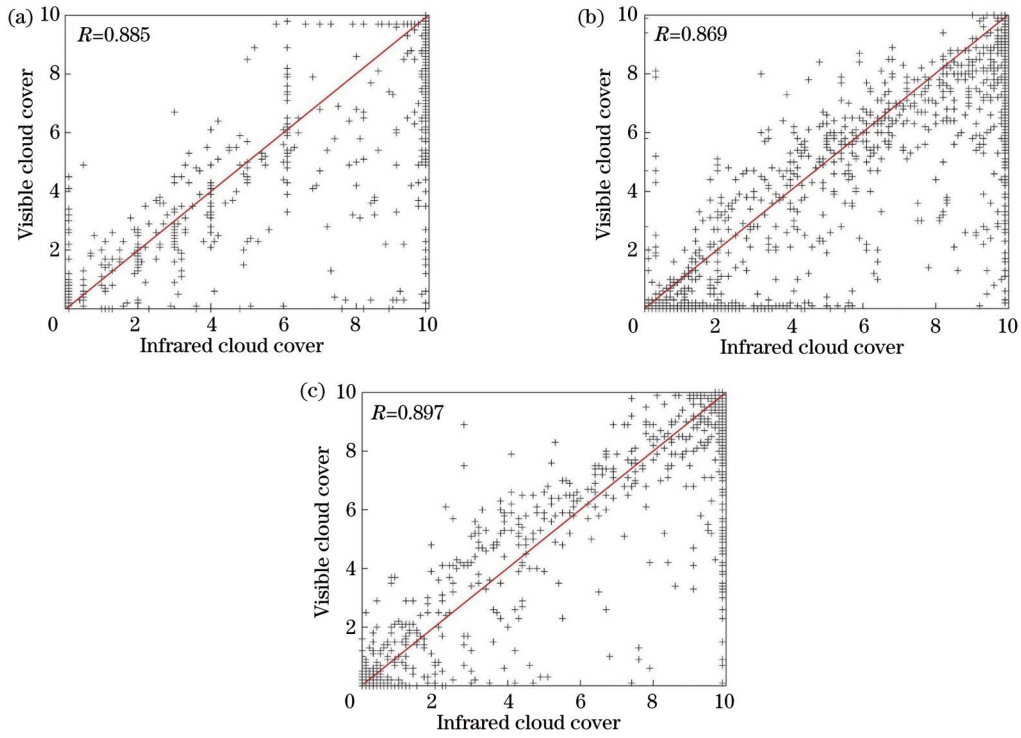


图 8 可见光与红外云量相关性分析。(a) 8月数据;(b) 9月数据;(c) 10月数据

Fig. 8 Correlation analysis of visible light and infrared cloud cover. (a) Data of August; (b) data of September; (c) data of October

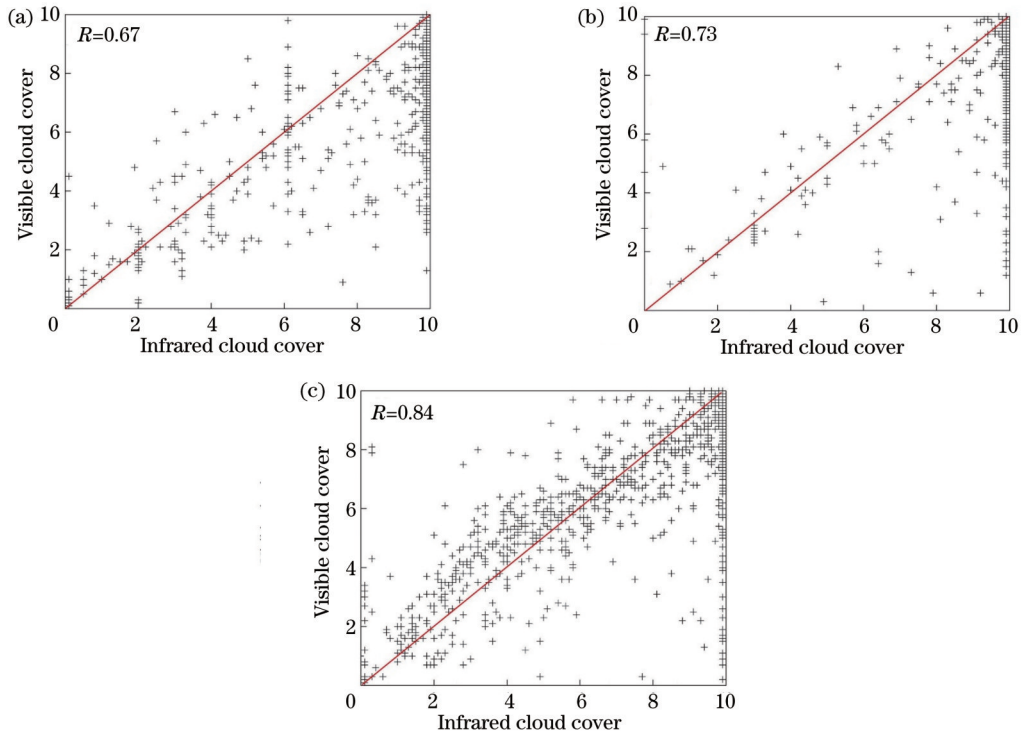


图 9 不同云状下观测结果相关性分析。(a)高云数据;(b)中云数据;(c)低云数据

Fig. 9 Correlation analysis of observation results of different cloud types. (a) High cloud data; (b) middle cloud data; (c) low cloud data

的情况下,成像单元在可见光波段也能准确识别出高云。另外,在特殊天气条件下,如能见度差的雾、霾、沙尘等天气,可见光图像因受气溶胶粒子散射作用呈黄色,云与天空背景的对比度差异减小,造成可见光云量识别出现误差,而此时红外云图是基于红外辐射量的

成像,受雾霾沙尘影响小,仍能够准确用于云点像素识别。此外,ASC200云量观测系统全天候开展观测,在有雨天气时,可见光镜头上的雨水积蓄使图像整体出现偏蓝现象,SegCloud网络进行云图分割时,出现把此类云图识别成晴空或部分有云的错误情况,导致出

表 2 对不同云状观测的结果相关性分析

Table 2 Correlation analysis of observation results of different cloud types

Cloud type	High cloud	Middle cloud	Low cloud
Sample number	718	940	1412
R	0.67	0.73	0.84

现可见光波段云量较低而红外波段云量较高甚至接近 10 的特殊情况。

4.3 数据准确性分析

云变幻莫测,早期的地基云观测主要以人工观测为主,业务观测上无自动化的全天空云量观测设备,因此在进行 ASC200 观测数据准确性分析时,选取新桥机场人工云量观测数据与其进行对比分析。机场气象观测员每小时对全天空云量进行一次观测并记录。依据观测时间,对设备数据和人工观测数据进行对齐筛选,获得 2020 年 8 月至 10 月间的样本数如表 3 所示。

表 3 中 $V_{diff1} > 2$ 和 $V_{diff2} > 2$ 分别表示人工观测云量与设备观测的红外云量和可见光云量的差值大于 2。从表 3 中可知,人工观测数据与设备观测数据差值大于 2 的数据占总数据量的比例均不超过 20%,说明设备数据与人工数据较为一致,但也存在两者差异较大的数据。分析差异存在的原因是:人工观测主观性较强,与设备观测标准不完全统一,人工观测是直接对天空进行观测,其观测范围不好确定。机场观测员将总云量划分为 8 等分,统一到 ASC200 的云量计算方式即满云为 10,也存在一定误差。另外,特殊天气条件

下,能见度低时人工观测结果也将受到影响。

表 3 人工观测与设备观测数据的对比结果

Table 3 Comparison results of manual and equipment observation data

Time	August	September	October
Sample number	171	297	317
Data percent for $V_{diff1} > 2$	18.13%	17.51%	9.46%
Data percent for $V_{diff2} > 2$	14.04%	19.53%	11.99%

为进一步分析 ASC200 数据的准确性,选取风云卫星 FY4A 云量数据进行一致性分析,初步探索地基云量观测与卫星云量观测的相互验证。卫星云量数据的选取主要结合 ASC200 的观测视场和风云卫星的云产品的空间分辨率,选取卫星云图上新桥机场区域 30 km 范围内云检测产品所求出的云量数据。另外,选取卫星整点时刻的云量数据与 ASC200 整点时刻的观测数据进行比较。表 4 所示为 2020 年 8 月至 10 月间卫星数据与设备数据的差异值统计结果。表 4 中 $V_{diff3} > 2$ 和 $V_{diff4} > 2$ 分别表示卫星云量数据与红外和可见光波段云量的差值大于 2。

图 10 为 8 月至 10 月间卫星云量数据与 ASC200 数据分布统计图。从统计结果来看,ASC200 的红外云量数据与卫星数据具有更好的一致性。同时,卫星观测到的全云和晴空次数较 ASC200 多,而后者观测到更多有云的天空。地基云观测设备较卫星观测设备的空间分辨率要高,能够更详细地观测到天空的云况,

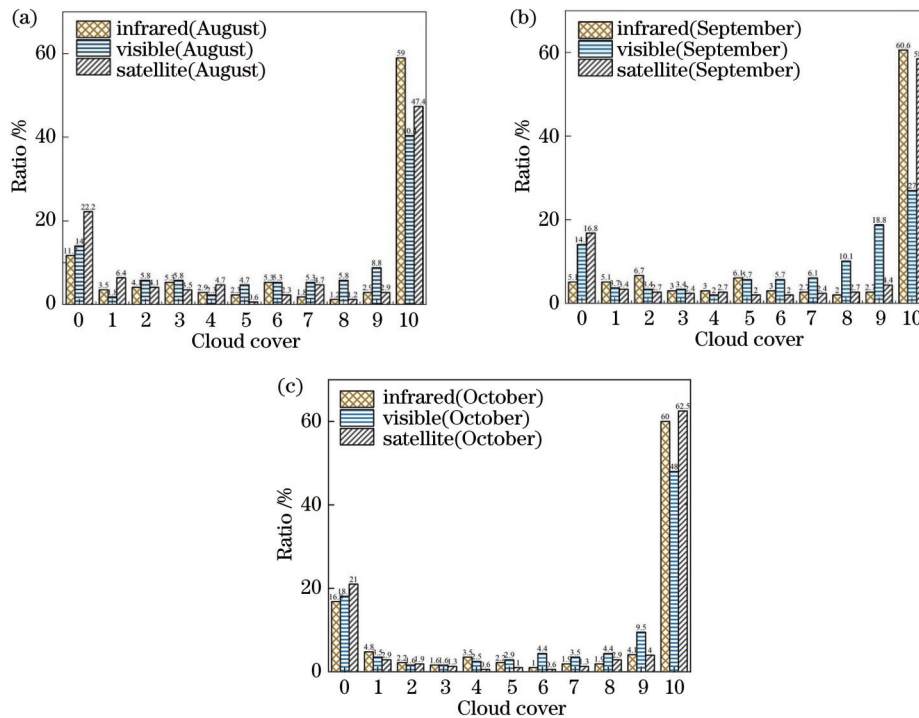


图 10 卫星云量数据与设备数据统计分布图。(a) 8 月数据;(b) 9 月数据;(c) 10 月数据

Fig. 10 Statistical distributions of satellite cloud cover data and equipment data. (a) Data of August; (b) data of September; (c) data of October

表 4 卫星数据与设备观测数据对比

Table 4 Comparison of satellite data and equipment observation data

Time	August	September	October
Sample number	171	297	315
Data percent for $V_{diff3} > 2$	28.1%	17.5%	10.5%
Data percent for $V_{diff4} > 2$	20.5%	22.3%	13.0%

可用于卫星云数据的验证和补充。

5 结 论

提出并研制了一种双波段全天空云量观测系统,在 450~650 nm 可见光波段和 8~14 μm 红外波段实现云量的昼夜连续观测。所提系统的可见光观测单元通过内置挡光板,结合 HDR 图像合成技术,采集无遮挡、清晰的全天空图像;其红外观测单元摒弃传统的红外扫描拼接或多观测单元联合观测的设计思路,采用大面阵红外传感器加装红外鱼镜头,通过一次拍摄可获取 160° 视场范围的天空红外图像。所提系统的机械结构得到大大简化,仪器研制成本大幅度降低。为验证系统云量观测精度,对该系统在合肥新桥机场 2020 年 8 月至 10 月间双波段观测数据进行一致性和准确性分析。分析结果表明,可见光和红外云量的相关系数均可接近 0.9,两个波段的观测结果具有较高的一致性;另外,系统观测数据与同时刻人工观测数据和风云卫星云量数据的对比结果也证明所提系统得到的云量数据的准确性。

参 考 文 献

- [1] 高华哲, 胡斯勒图, 李明, 等. 基于被动遥感卫星可见至红外通道观测的云特性遥感[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0600003. Shang H Z, Husi L, Li M, et al. Remote sensing of cloud properties based on visible-to-infrared channel observation from passive remote sensing satellites[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0600003.
- [2] Urquhart B, Kurtz B, Dahlin E, et al. Development of a sky imaging system for short-term solar power forecasting[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, 8(2): 875-890.
- [3] Koyasu T, Yukita K, Ichiyanaagi K, et al. Forecasting variation of solar radiation and movement of cloud by sky image data[C]// 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, November 20-23, 2016, Birmingham, UK. New York: IEEE Press, 2016: 401-406.
- [4] 蒋俊霞, 高晓清, 吕清泉, 等. 基于地基云图的云跟踪与太阳辐照度超短期预报方法研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(5): 351-358. Jiang J X, Gao X Q, Lü Q Q, et al. Study on cloud tracking and solar irradiance ultra-short-term forecasting based on TSI images [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(5): 351-358.
- [5] Yin B S, Min Q L. Climatology of aerosol and cloud optical properties at the Atmospheric Radiation Measurements Climate Research Facility Barrow and Atqasuk sites[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(4): 1820-1834.
- [6] Mace G G, Benson S, Sonntag K L, et al. Cloud radiative forcing at the Atmospheric Radiation Measurement Program Climate Research Facility: 1. Technique, validation, and comparison to satellite-derived diagnostic quantities[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D11): D11S90.
- [7] 杨成武, 刘文清, 张玉钧. 激光云高仪云量自动反演算法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 030102. Yang C W, Liu W Q, Zhang Y J. Automatic inversion algorithm of cloud cover of laser ceilometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 030102.
- [8] Shields J E, Johnson R W, Karr M E, et al. Delivery and development of a day/night whole sky imager with enhanced angular alignment for full 24 hour cloud distribution assessment [R]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography La Jolla Ca Marine Physical Lab, 1997.
- [9] Long C N, Slater D W, Tooman T P. Total sky imager model 880 status and testing results[M]. Washington, D. C.: Pacific Northwest National Laboratory Richland, 2001.
- [10] Cazorla A, Olmo F J, Alados-Arboledas L. Development of a sky imager for cloud cover assessment[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2008, 25(1): 29-39.
- [11] Yang J, Lu W T, Ma Y, et al. An automated cirrus cloud detection method for a ground-based cloud image[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29(4): 527-537.
- [12] Fa T, Xie W Y, Wang Y R, et al. Development of an all-sky imaging system for cloud cover assessment[J]. Applied Optics, 2019, 58(20): 5516-5524.
- [13] Gillotay D, Besnard T, Zanghi F. A systematic approach of the cloud cover by thermic infrared measurements[EB/OL]. [2022-04-15]. [https://orfeo.belnet.be/bitstream/handle/internal/5228/Gillotay\(2002a\).pdf?sequence=1](https://orfeo.belnet.be/bitstream/handle/internal/5228/Gillotay(2002a).pdf?sequence=1).
- [14] Shaw J A, Nugent P W, Pust N J, et al. Radiometric cloud imaging with an uncooled microbolometer thermal infrared camera[J]. Optics Express, 2005, 13(15): 5807-5817.
- [15] 孙学金, 高太长, 翟东力, 等. 基于非制冷红外焦平面阵列的全天空红外测云系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 761-764. Sun X J, Gao T C, Zhai D L, et al. Whole sky infrared cloud measuring system based on the uncooled infrared focal plane array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 761-764.
- [16] Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs[C]//International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques 2008, August 11-15, 2008, Los Angeles, California, USA. New York: ACM Press, 2008: 1-10.
- [17] Berk A, Anderson G P, Bernstein L S, et al. MODTRAN4 radiative transfer modeling for atmospheric correction[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3756: 348-353.
- [18] Shaw J A, Nugent P W. Physics principles in radiometric infrared imaging of clouds in the atmosphere[J]. European Journal of Physics, 2013, 34(6): S111-S121.
- [19] 魏合理, 陈秀红, 戴聪明, 等. 地基大气背景红外光谱辐射特性测量[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 284-290. Wei H L, Chen X H, Dai C M, et al. Ground-based measurements of infrared atmospheric background spectral radiances[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 284-290.
- [20] 高太长, 刘磊, 赵世军, 等. 全天空测云技术现状及进展[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 101-109. Gao T C, Liu L, Zhao S J, et al. The actuality and progress of whole sky cloud sounding techniques[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(1): 101-109.
- [21] Xie W Y, Liu D, Yang M, et al. SegCloud: a novel cloud image segmentation model using a deep convolutional neural network for ground-based all-sky-view camera observation[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13(4): 1953-1961.
- [22] Nugent P W, Shaw J A, Piazzolla S. Wide angle infrared cloud imaging for measuring cloud statistics in support of earth space optical communication[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6709: 67090F.

[23] Wang Y R, Liu D, Xie W Y, et al. Day and night clouds detection using a thermal-infrared all-sky-view camera[J].

Remote Sensing, 2021, 13(9): 1852.

Development and Data Analysis of Dual-Band All-Sky Cloud Cover Observation System

Wang Yiren^{1,2}, Yang Ming³, Liu Daxin^{4*}, Xia Yingwei¹, Xie Wanyi^{1,2}, Wang Hongkun⁵,
Liu Yong¹, Liu Dong^{1**}

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

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

³Anhui Branch of East China Air Traffic Administration of Civil Aviation of China, Hefei 230001, Anhui, China;

⁴Meteorological Observation Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

⁵Anhui University, Hefei 230039, Anhui, China

Abstract

Significance Cloud plays a crucial role in the Earth's radiation balance and the water cycle, and its formation and evolution are very closely related to weather change. The results of continuous observation and analysis of cloud parameter data can be used in the fields of solar energy production forecasting and meteorological research for aviation and shipping. Cloud cover is one of the main macroscopic parameters of cloud and one of the important elements of ground-based meteorological observations. Thus, the study of its observation methods and approaches has important application value and wide application prospects.

Cloud observation can be divided into air-based observation, space-based observation, and ground-based observation according to the different observation platforms. Among them, ground-based cloud observation has a wide range of fields, low observation cost, and other characteristics, which attracts extensive attention. In the early days, ground-based observation mainly relies on manual observation, which is subjective and has poor continuity. With the continuous development of hardware sensor technology, digital image processing technology, computer technology, and other technologies as well as the increase in the business needs for ground-based cloud observation automation, a series of ground-based cloud observation equipment has been developed.

According to the imaging band of the observation equipment, ground-based cloud observation equipment is mainly divided into two categories for visible band (450–650 nm) and infrared band (8–14 μm) observation. The observation equipment for the visible band can be used only in the daytime and is equipped with a solar baffle or a solar tracking device in most cases. As a result, the acquired sky image is partially blocked, which affects the inversion accuracy of cloud parameters. Regarding the observation equipment for the infrared band, the field of view of the sky observed by one imaging is usually small, and acquiring all-sky images needs scanning and stitching. However, scanning takes a long time, and the movement of clouds causes stitching errors. In addition, scanning and stitching increase system complexity. Therefore, it is important to solve the current problems of ground-based cloud observation equipment so that it can meet the needs for operational ground-based cloud observation.

Progress To realize all-sky cloud cover observation, this paper proposes a dual-band all-sky cloud cover observation system. The visible light imaging unit is based on a fisheye lens and a high-resolution industrial camera and adopts the built-in chopper plate design idea to achieve unobstructed all-sky cloud map acquisition. In addition, through the acquisition of multiple sky images with different exposure values, combined with high dynamic range (HDR) image synthesis technology to synthesize an all-sky image, the impact of overexposure of pixels caused by the sun on imaging can be reduced to a minimum. The infrared imaging unit uses a large array of infrared detectors with a customized infrared wide-angle lens, and a field of view of more than 160° can be observed in a single time. It is faster and easier than the traditional scanning modes which splice images with very limited fields of view and achieves the largest field of view in a single observation among similar equipment. The dual-band all-sky cloud cover observation system works in the way of dual-band observation in the daytime and infrared observation in the nighttime, which thereby realizes all-day cloud observation. To obtain all-sky cloud cover information, the equipment has different built-in cloud cover segmentation

algorithms based on the all-sky imaging principle and imaging characteristics of different wavelength bands. For the visible band, a visible cloud image segmentation network, SegCloud, is proposed in light of deep learning technology, while for the infrared band, an infrared cloud segmentation algorithm based on numerical simulation of the infrared raw grayscale image is proposed. To quantitatively analyze the effectiveness of the algorithm, this paper analyzes the consistency and accuracy of the dual-band cloud observation data and verifies the high accuracy of the system in cloud cover observation.

Conclusions and Prospects The dual-band all-sky cloud cover observation system proposed in this paper effectively solves the problems of the blocking of traditional visible all-sky imaging equipment and the small observation field of view of the infrared equipment, laying the foundation for the accuracy improvement of ground-based cloud observation. In addition, the dual-band all-sky cloud cover observation design not only enables all-day ground-based cloud observation but also provides multi-channel raw data for the inversion of parameters such as cloud optical thickness, cloud base height, and precipitable water.

Key words measurement; all-sky imaging; ground-based cloud observation; infrared; visible