

陶法, 胡树贞, 张雪芬, 2018. 地基可见光/红外全天空成像仪数据融合[J]. 气象, 44(4): 518-525.

地基可见光/红外全天空成像仪数据融合*

陶 法^{1,2} 胡树贞² 张雪芬²

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

提 要: 采用 60 m 基线的双站可见光成像仪和扫描式红外成像仪构建地基双波段全天空测云系统, 双站可见光成像仪根据双站测距原理准确地获取云底高, 通过全方位立体扫描获取全天空可见光云图, 扫描式红外成像仪基于大气辐射传输原理测量云底亮温, 反演云底高度, 通过全方位立体扫描获取全天空红外云图。结合双站可见光成像仪测得云底高, 对大气温度垂直递减率进行实时订正, 提高扫描式红外成像仪反演云底高精度, 达到双波段云底高数据融合目的; 基于小波变换多分辨率分析的图像融合技术, 对全天空可见光和红外云图进行图像融合, 提高能见度低、以及雾、霾等天气条件下云量计算准确度; 最终实现昼夜云高、云量同时观测。

关键词: 双站成像, 红外成像仪, 小波变换, 数据融合, 双波段

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.04.005

Data Fusion for Base Ground Visible/Infrared Whole Sky Imager

TAO Fa^{1,2} HU Shuzhen² ZHANG Xuefen²

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Meteorological Observation Centre, CMA, Beijing 100081

Abstract: Using 60 m base-line binocular visible imager and scanning infrared imager, a dual-band whole sky cloud measurement and control system was built. According to the principle of binocular distance measurement, the binocular visible imager can accurately obtain the height of cloud base, and through comprehensive three-dimensional scanning the whole sky visible light cloud pictures were obtained. The scanning infrared imager can measure the temperature of cloud base and inverse the height of cloud base on the basis of the principle of atmospheric radiation transmission, and through comprehensive three-dimensional scanning, the whole sky infrared cloud pictures were obtained. Combined with the height of cloud base and the real-time correction of atmospheric temperature vertical decline rate, the binocular visible imager could measure the height of cloud base, improve the accuracy of inversion the height of cloud base of the scanning infrared imager, achieving the height of cloud base data fusion. Based on image fusion technology of wavelet multi-resolution analysis, the whole sky visible light and infrared cloud image are fused, improving cloud computing accuracy under the fog-haze conditions. Thus, cloud base height and cloud cover could be observed day and night.

Key words: binocular visible imager, infrared imager, wavelet transform, data fusion, dual band

* 中国气象局关键技术集成与推广应用项目(CMAGJ2015M80)、国家自然科学基金项目(61531019)和江苏省气象局北极圈开放研究基金项目(BJG201602)共同资助

2017 年 1 月 19 日收稿; 2018 年 1 月 12 日收修定稿

第一作者: 陶法, 主要从事大气遥感与大气探测的研究. Email: taofa@163.com

引言

云是指停留在大气中的水滴或冰晶的集合体,是地球水分和能量循环的重要因子,是地球大气辐射收支平衡的主要调节者,也是影响地球大气热量平衡的重要因素,云的年、季节变化对于研究全球气候变化以及水汽收支平衡具有重要意义(徐兴奎, 2012; 马占山等, 2008)。

随着科技发展,越来越多的新技术、新方法被应用于气象观测,国内外在云自动化观测方面已经做了大量研究工作,取得了卓有成效的进展。目前国内外对云高的观测主要采用主动设备如激光云高仪、毫米波测云仪等,而被动式云高观测主要基于红外波段大气传输方程反演云底高度;在云量自动化观测方面主要采用红外和可见光成像方式,利用图像处理技术实现云量探测(高太长等, 2010; 李肖霞等, 2016; 李思腾等, 2015; 赵静等 2017; 周毓荃和欧建军, 2010)。由于激光云高仪等主动式云高观测设备采用单点测量方式,虽然能准确地获取云底高但是无法获取云量,红外和可见光成像仪能够得到全天空总云量,但是缺少云高信息,即使采用大气传输方程反演云底高,由于大气辐射传输的复杂性,使得云底高反演误差较大,很难实现云高、云量同时观测(陶法等, 2013)。

双站可见光成像仪基于双站测距原理能够准确地获取云底高度,并进行全方位立体扫描得到全天空可见光云图,实现云高、云量同时观测,扫描式红外成像仪基于大气辐射传输方程获取云底高,利用全方位立体扫描获取全天空红外云图,实现云高、云量同时观测。由于双站可见光成像仪在可见光波段,受能见度影响较大,且在夜间无法观测,扫描式红外成像仪虽然能够昼夜实时观测,但是云高测量误差较大,且在云量观测上,受到大气气溶胶和大气传输路径的影响,使得低仰角获取云量误差较大;结合双站可见光成像仪和扫描式红外成像仪的优点,基于数据融合技术,构建地基双波段全天空成像仪,实现云高、云量同时观测。将双站可见光成像仪所测得的云底高,结合扫描式红外成像仪的红外辐射亮温,对云底到地面的温度递减梯度参数进行实时订正,反演云底高,提高红外云底高反演精度;充分利用可见光全天空云图分辨率高,而红外全天空云图受雾霾影响小,能够全天候观测,将两者结合起来

提高云量观测精度。

1 系统结构

地基双波段全天空成像仪,主要有两部分组成,一部分是扫描式红外成像仪(SIRIS-1),其结构由热红外测温传感器、地面温湿度传感器、水平和俯仰旋转平台和控制箱等组成,红外测温传感器采用德国欧普士公司生产的 CTlast,用于感应 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段大气向下红外辐射,系统响应时间为 120 ms,温度分辨率为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。距离比 $S=34:1$,系统结构如图 1a 所示(谭涌波等, 2005; 胡树贞等, 2012),另一部分为双站可见光成像仪,采用一对相机置于水平和俯仰可旋转的云台中,两个云台相距 60 m,图像采集传感器采用 Sony 公司的 FCB101P 机芯,视场角为 54° ,图像分辨率为 44 万像素,最低照度为 $0.1\ \text{LX}$ 。旋转云台采用一体化高速球机,球机旋转角范围,水平角为 $0^\circ\sim 360^\circ$,俯仰角为 $0^\circ\sim 93^\circ$,球机预置位重复精度小于 0.05° 。系统结构如图 1b 所示(胡树贞等, 2013)。

2 云高数据融合技术

2.1 双站成像测量云高

双站可见光成像仪利用一对相机同时拍摄一组图片,基于双站成像测距原理测得天顶方向的云底高度。基于双站成像测距原理示意图如图 2 所示(陶法等, 2013; 谭涌波等, 2005)。其中: d 为两相机之间的距离(基线长), p 为目标物, Z_{pc} 为目标物到相机的距离, x_1 、 x_2 分别为目标物成像点到像主点(相片中心的)的距离。根据相似

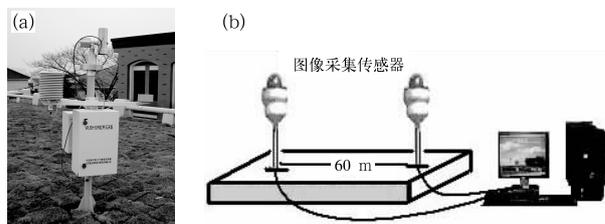


图 1 地基双波段全天空成像仪系统结构
(a)扫描式红外成像仪,(b)双站可见光成像仪

Fig. 1 System structure diagram of
dual-band whole sky imager

(a) scanning infrared imager, (b) binocular visible imager

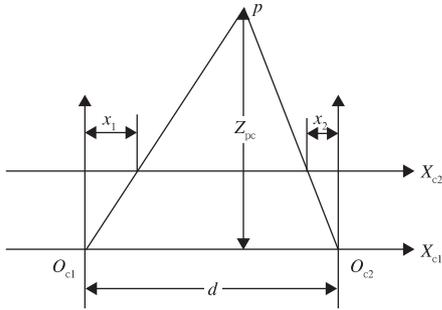


图 2 双站成像测距原理示意图

Fig. 2 Principle diagram of binocular distance measurement

三角形原理可算得,目标物距离:

$$Z = f \frac{d}{|x_1 - x_2|} \quad (1)$$

式中 f 为相机焦距(单位:像素点)。

2.2 红外反演云高

红外测温传感器基于大气辐射传输方程反演云底高度(胡树贞等,2013;章文星等,2007):

$$H = \frac{t_b - t_{\text{hum}} - t_v - t}{\Gamma} \quad (2)$$

式中, t_b 为红外测温传感器采集一次天顶方向的辐射亮温温度, $\Gamma = -6^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, 为大气温度垂直平均递减率, t_{hum} 为湿度因子对辐射亮温的订正温度, t_v 为能见度因子对辐射亮温的订正温度, t 为地面温度。

2.3 云高数据融合

考虑温度垂直递减率随季节、时间、地理环境、地点以及大气气溶胶等影响,导致利用式(2)直接反演云底高度误差较大,结合双站可见光成像仪测得天顶云底高,对大气温度垂直递减率进行实时订正,提高红外反演云底高精度,大气温度垂直递减率订正及云底高度反演公式为:

$$\begin{cases} \Gamma' = \frac{T'_b - t}{h} \\ H = \frac{T_b - t}{\Gamma'} \end{cases} \quad (3)$$

式中, Γ' 为订正后的大气温度垂直递减率, T_b 为红外测温传感器实时测得云体红外辐射亮温, t 为地面环境温度, h 为双站可见光成像仪所测天顶云高, T'_b 为双站可见光成像仪和红外测温传感器同时探测到云体的红外辐射亮温。由于天顶方向云底亮温与双站可见光成像仪所测云高在时间和空间对应上

存在误差,造成 Γ' 值波动,需要对一段时间内计算得到的云底温度递减梯度参数进行统计平均,代替常规的大气温度垂直递减率,进行云高反演。利用2012年1—6月期间,激光云高仪测得天顶云高和扫描式红外全天空成像仪测得的云底高进行对比,订正前后散点分布图(图3)中可以看出订正前相关系数为72%,订正后提高到94%,订正前后相对误差如图4和表1所示。

从图4和表1可以看出订正后相对误差平均值从订正前的-22.4%提高到-5.8%,标准偏差从订正前24.2%减小到15.6%,说明通过数据融合红外云高测量准确度得到有效提高。

3 云量数据融合技术

3.1 可见光全天空云图

通过对双站可见光成像仪云台控制实现全天空扫描,先水平方位扫描1圈得到9张照片,然后抬升 30° 后再水平扫描,依次往复扫描4圈共获得36个方位子图,先对子图进行预处理,消除畸变和光线不均匀,再进行球面投影,采用加权平均方法进行拼接,得到全天空可见光云图(陈青青等,2016),球面投影示意图和全天空可见光云图(图5)。

球体中心为坐标系原点,球半径为相机焦距 f ,相机仰角为 α ,相机旋转角为 β ,图像中心是相机光轴与视平面的交点。设照片宽度为 W ,高为 H ,图像平面任意点 $P(x, y)$ 在相机坐标系中的坐标为 $P(x, y, f)$,世界坐标系中坐标为 $P(x_w, y_w, z_w)$,相机坐标系转化成世界坐标系(曾文锋等,2001)为:

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - W/2 \\ y - H/2 \\ f \end{pmatrix} \quad (4)$$

过点 P 与球面交点 P' 的三维坐标为:

$$\begin{cases} x'_w = \frac{f}{\sqrt{x_w^2 + y_w^2 + z_w^2}} x_w \\ y'_w = \frac{f}{\sqrt{x_w^2 + y_w^2 + z_w^2}} y_w \\ z'_w = \frac{f}{\sqrt{x_w^2 + y_w^2 + z_w^2}} z_w \end{cases} \quad (5)$$

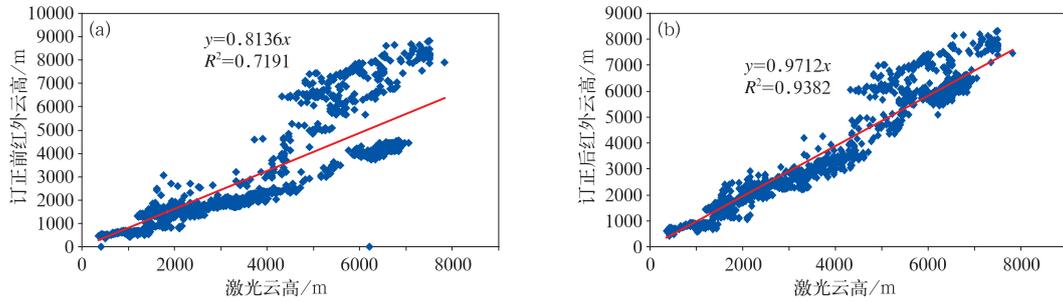


图 3 激光云高与订正前(a)和后(b)红外云高对比散点图

Fig. 3 Comparison of infrared cloud base height by lidar ceilometer before correction (a) and after correction (b)

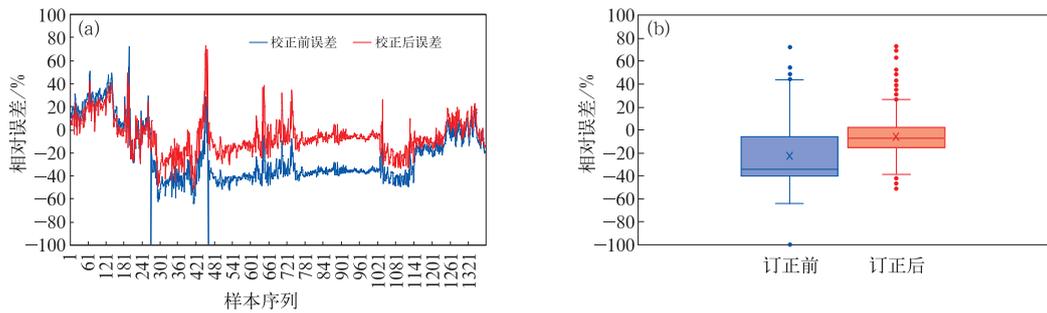


图 4 订正前后红外云高相对误差对比图

(a) 序列图, (b) 箱体图

Fig. 4 Relative error comparison of infrared cloud base height before and after corrections

(a) sequence figure, (b) boxplot

表 1 校正前后云高相对误差对比

Table 1 Relative errors of cloud height before and after corrections

相对误差/%	订正前	订正后
平均值	-22.4	-5.8
标准偏差	24.2	15.6

则点 P' 投影到水平面的二维坐标为 $P'(x'_w, y'_w)$ 。根据投影变换式(4)和(5),进行图像拼接,采用加权平均方法,实现图像间的平滑过度,消除拼接

的痕迹,两幅图像加权平均融合公式(孙晓钢等, 2008;杨燕等,2007;史金霞和王铮,2005)为:

$$I_{(i,j)} = \alpha \cdot I_{1(i,j)} + (1 - \alpha) \cdot I_{2(i,j)} \quad (6)$$

式中, α 为加权系数,

$$\alpha = \frac{d_1}{d_1 + d_2}$$

式中, d_1, d_2 分别为两幅图像重叠区域中的点到重叠区域边沿的距离。

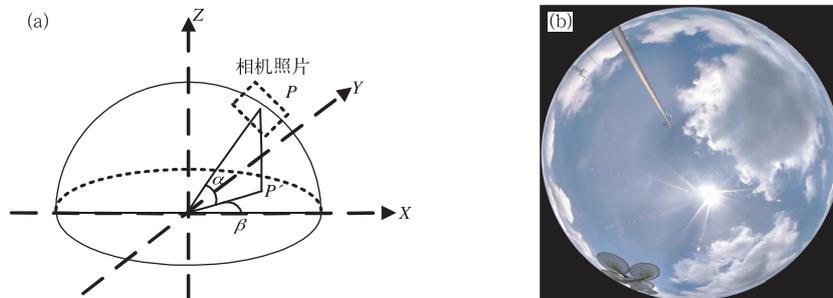


图 5 球面投影示意图(a)和全天空可见光云图(b)

Fig. 5 Spherical projection diagram (a) and the whole sky visible light clouds picture (b)

3.2 红外全天空云图

扫描式红外成像仪旋转平台带动红外测温传感器对全天空进行立体扫描,水平方位扫描 1 圈后抬升一定角度(2.25°)再水平扫描,依次往复扫描 40 圈共获得 4023 个方位点的辐射亮温信息,将不同方位和仰角观测的辐射亮温值拼接为半球全天空垂直向下辐射亮温分布图(章文星等,2010)。平面坐标中径向对应天顶角,原点对应天顶,径向与方位顺时针方向的夹角为方位角。球面投影示意图和全天空红外云图如图 6。

设天空任意一点 P 在球面坐标系中的坐标位置为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta \\ R \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta \\ R \cdot \sin\alpha \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, α 和 β 分别为该点所处位置的仰角和方位角。 P 点在平面坐标系中的投影点 P' 的坐标为:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta \\ R \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta \end{pmatrix} \quad (8)$$

根据式(8)可拼接出全天空红外云图。

3.3 图像配准

扫描式红外成像仪中红外温度测量单元的视场角为 2.25°共扫描 4023 个点,拼接成一幅全天空红外云图,图像像素点为 400×400,而双站可见光成

像仪,相机视场角为 56°共 36 张图片拼接成一幅全天空可见光云图,图像像素点为 1338×1338。由于可见光和红外图像视场角、空间分辨率和传感器的空间位置等方面不一致,图像间不可避免地出现平移、旋转、比例缩放等差异,在图像融合之前需要对两幅图像进行配准(陶冰洁等,2004;王鲲鹏等,2009;苑津莎等,2009;闫钧华等,2013)。

在实际安装过程中很难保证两个扫描装置具有一致的姿态角[横滚(α)、俯仰(β)、旋转(γ)],由于红外采用单点扫描所以不存在横滚,两个设备相距很近,约 1 m 左右,可以近似认为两云图之间没有平移,所以两幅全天空云图之间配准参数主要为:缩放(k)、俯仰(α)和旋转(γ)。

以焦点为中心建立坐标系,则两幅全天空云图中任意像点的三维坐标为 (x_1, y_1, f_1) 和 (x_2, y_2, f_2) ,根据放射变换模型:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ f_1 \end{pmatrix} = k \cdot \mathbf{R} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ f_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中旋转矩阵:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

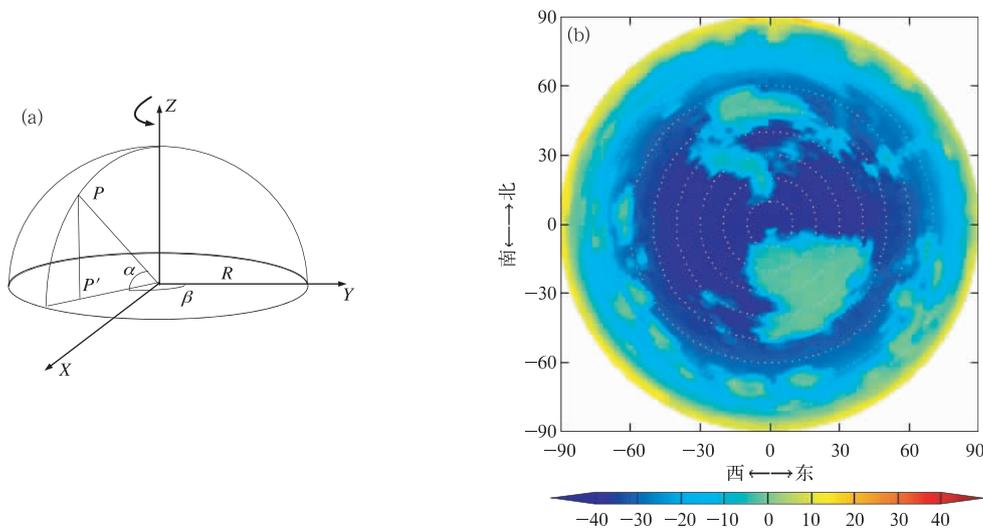


图 6 球面投影示意图(a)和全天空红外云图(b,填色,亮温,单位:K)

Fig. 6 Spherical projection diagram (a) and the whole sky infrared clouds picture (b, shaded, bright temperature, unit: K)

首先通过对可见光云图进行采样得到比例系数 K ,使两幅图像的投影半径相同 $f_1 = f_2 = f$ 。再采用最小二乘法求解旋转矩阵 R ,

令矩阵

$$A = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ f & f & \cdots & f \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ f & f & \cdots & f \end{pmatrix}$$

$$R \cdot B = A$$

则

$$R = AB^T(BB^T)^{-1} \quad (11)$$

选取能见度较好积云天气条件下的红外和可见光全天空云图,在两幅图像中选择 3 个以上的独立点,利用公式(11)可以求得旋转变换矩阵,达到图像配准目的。

3.4 基于多分辨率分析的图像融合

在目前常用的图像融合技术中,基于多分辨率分析的图像融合方法应用非常广泛(刘贵喜等, 2004; Zomet et al, 2006; Lewis et al, 2004; Buch and Sun, 1995; Su et al, 2004)。由于其融合过程是在不同尺度、不同空间分辨率、不同分解层上分别进行,与其他融合方法相比,基于多分辨率分析的图像融合方法可以获得明显改善的融合效果。多分辨率图像融合的原理结构如图 7。

利用小波变换进行多分辨率图像融合,先对两幅图像进行小波分解,得到各自的低频近似分量和三个方向的高频细节分量,并分别对低频分量和高频分量采用不同的融合规则进行融合,得到融合后图像的低频分量和高频分量,最后对融合得到的低频分量和高频分量进行小波重构得到最后的融合图像。算法流程图如图 8。

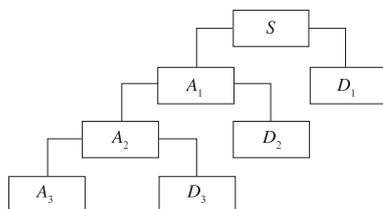


图 7 三层多分辨率分析树结构示意图

Fig. 7 Diagram of the 3-layer multi-resolution analysis tree structure

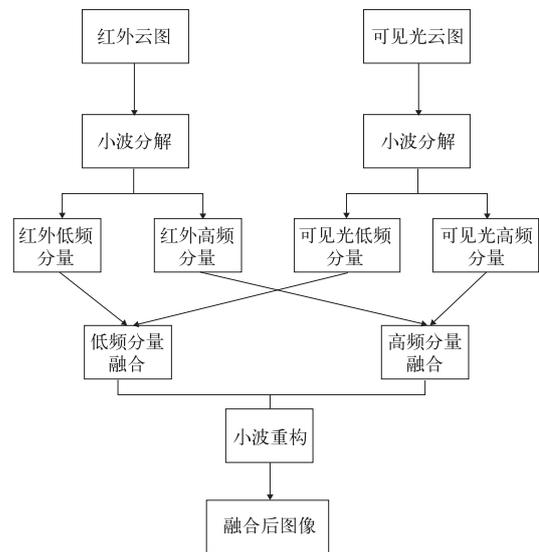


图 8 小波变换图像多分辨率融合算法流程图

Fig. 8 Flow chart of wavelet transform multi-resolution image fusion algorithm flow chart

图中图像低频分量反映图像的强度信息,采用均值法对图像进行融合,其融合系数计算公式为:

$$F_l(x, y) = [D_{lv}(x, y) + D_{lr}(x, y)]/2 \quad (12)$$

式中, $D_{lv}(x, y)$ 表示可见光图像在点 (x, y) 处的低频分量上的分解系数, $D_{lr}(x, y)$ 表示红外图像在点 (x, y) 处的低频分量上的分解系数。

图像高频分量反映图像细节信息,如果采用均值法对图像进行融合会使图像更加平滑,图像细节信息损失较大,融合效果相对较差,为此采用最大值法对图像进行融合,其融合系数计算公式为:

$$F_h(x, y) = \max\{\text{abs}[D_{hv}(x, y)], \text{abs}[D_{hr}(x, y)]\} \quad (13)$$

式中, $D_{hv}(x, y)$ 表示可见光图像在点 (x, y) 处的高频分量上的分解系数, $D_{hr}(x, y)$ 表示红外图像在点 (x, y) 处的高频分量上的分解系数。

3.5 融合后云量计算方法

采用最大类间方差法对图像进行分割一直被公认为是分割阈值选取的最佳方法(杨俊等, 2009)。对一幅灰度图而言,假设其灰度级为 M ,灰度值为 i 的像素点数是 n ,总的像素点数是 $N = \sum_{i=1}^M ni$,灰度值 i 出现的概率是 $P_i = n \cdot i/N$ 。然后用阈值 T 将其分成两组,背景类 $B = \{1, 2, \dots, T-1\}$ 和目标类

$O = \{T, T+1, \dots, M\}$, 则:

背景类发生的概率:

$$P_B = \sum_{i=1}^{T-1} P_i \quad (14)$$

灰度值均值:

$$\mu_B = \frac{\sum_{i=1}^{T-1} (P_i \cdot i)}{P_B} \quad (15)$$

目标类发生的概率:

$$P_O = \sum_{i=T}^M P_i = 1 - P_B \quad (16)$$

灰度值均值:

$$\mu_O = \frac{\sum_{i=T}^M (P_i \cdot i)}{P_O} \quad (17)$$

整幅图片灰度值均值

$$\mu = \sum_{i=1}^M (P_i \cdot i) = \mu_B P_B + \mu_O P_O \quad (18)$$

目标与背景的类型间方差:

$$\begin{aligned} \delta(T) &= (\mu_B - \mu)^2 P_B + (\mu_O - \mu)^2 P_O \\ &= (\mu_B - \mu_O)^2 P_B \mu P_O \end{aligned} \quad (19)$$

让 T 依次在 $1 \sim M$ 取值, 计算出每一个类间方差 $\delta(T)$, 找出 $\delta(T)$ 的最大值, 此时的 T 为该图片灰度值分割的最佳阈值。

2012年7月7日(晴天)和8月23日(雾-霾天)图像融合前后分割图对比如图9。

融合前后云量计算结果如表2。

从图9和表2可以看出:(1)红外图像在低仰角受到大气气溶胶和传输路径影响比较突出, 雾-霾对

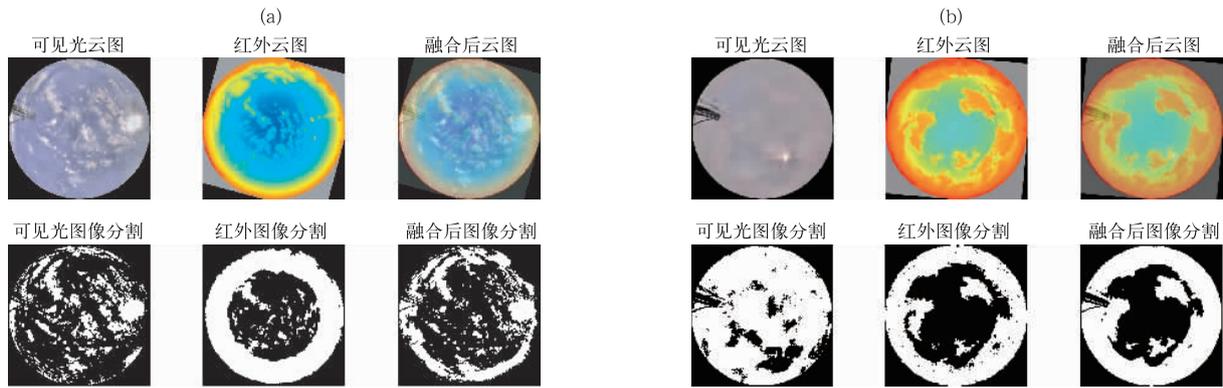


图9 图像融合前后分割图对比

(a)晴天,(b)雾-霾天

Fig. 9 Comparison of segmentation image before and after image fusions

(a) clear sky, (b) fog-hazy day

表2 融合前后云量计算结果

Table 2 The computing results of cloud cover before and after the fusions

天气状况	可见光全天空云量/%	红外全天空云量/%	融合后的全天空云量/%
晴天	26	56	34
雾-霾	81	73	61

可见光云图影响比较大;(2)晴天条件下,融合后的云量更接近可见光云量,图像融合对红外全天空云量起到很好的修正作用;(3)雾-霾天气条件下,可见光云图很难区分云纹理结构,可见光云量偏高,雾-霾对红外云图的影响较小,融合后的云量更接近红外云量。

4 结论

(1) 在云高数据融合上,提出利用双站可见光成像仪测得天顶云底高,对大气温度垂直递减率进行订正,提高红外反演云底高精度。在能见度较高的天气条件下,利用双站可见光成像仪测得准确的天顶云底高,结合云底红外辐射亮温对大气温度垂直递减率进行订正,当夜间和雾-霾天气条件下,可见光云图纹理不清晰无法得到云底高时,利用云底红外辐射亮温结合订正后的大气温度垂直递减率实时反演云底高度。

(2) 在全天空云图拼接上,可见光全天空云图

通过全方位立体扫描获得36个方位子图,对子图进行预处理消除畸变和光线不均匀,然后进行球面投影、加权平均方法进行拼接;红外全天空云图通过全方位立体扫描获得4023个方位点的辐射亮温信息,采用球面投影方式将不同方位和仰角观测的辐射亮温值拼接成全天空红外云图。

(3) 在图像配准上,建立放射变换模型,消除两幅全天空云图之间缩放、俯仰和旋转的影响,采用最小二乘方法求解旋转矩阵 R ,达到图像配准目的。

(4) 在云量数据融合上,采用小波变换进行多分辨率图像融合可以很好地消除红外低仰角大气气溶胶辐射的影响,并且保留可见光在高云、薄云时的观测能力,同时又能增强云纹理信息,提高云图识别率,改进云量观测。

参考文献

- 陈青青,汤志亚,杨玲,2016. 地图投影面上的全天空图像拼接[J]. 微型机与应用,35(8):9-11,14.
- 高太长,刘磊,赵世军,等,2010. 全天空测云技术现状及进展[J]. 应用气象学报,21(1):101-109.
- 胡树贞,马舒庆,陶法,等,2012. 地基双波段测云系统及其对比试验[J]. 应用气象学报,23(4):441-450.
- 胡树贞,马舒庆,陶法,等,2013. 基于红外实时阈值的全天空云量观测[J]. 应用气象学报,24(2):179-188.
- 李思腾,马舒庆,高玉春,等,2015. 毫米波云雷达与激光云高仪观测数据对比分析[J]. 气象,41(2):212-218.
- 李肖霞,王柏林,郭伟,等,2016. 激光云高仪试验数据对比分析[J]. 气象,42(6):764-769.
- 刘贵喜,赵曙光,陈文锦,2004. 红外与可见光图像融合的多分辨率方法[J]. 光电子·激光,15(8):980-984.
- 马占山,刘奇俊,秦琰琰,等,2008. 云探测卫星 CloudSat[J]. 气象,34(8):105-111.
- 史金霞,王铮,2005. 一种拼接缝消除方法[J]. 现代电子技术,28(13):115-117,120.
- 孙晓钢,孙学金,牛珍聪,等,2008. 全天空云图获取的一种方式及算法实现[J]. 气象科学,28(3):338-341.
- 谭涌波,陶善昌,吕伟涛,等,2005. 双站数字摄像测量云高[J]. 应用气象学报,16(5):629-637.
- 陶冰洁,王敬儒,张启衡,2004. 采用仿射变换的红外与可见光图像配准方法[J]. 光电工程,31(11):39-41.
- 陶法,马舒庆,秦勇,等,2013. 基于双目成像云底高度测量方法[J]. 应用气象学报,24(3):323-331.
- 王鲲鹏,徐一丹,于起峰,2009. 红外与可见光图像配准方法分类及现状[J]. 红外技术,31(5):270-274.
- 徐奎奎,2012. 中国区域总云量和低云量分布变化[J]. 气象,38(1):90-95.
- 闫钧华,朱智超,孙思佳,等,2013. 基于多尺度红外与可见光图像配准研究[J]. 激光与红外,43(3):329-333.
- 杨俊,吕伟涛,马颖,等,2009. 基于自适应阈值的地基云自动检测方法[J]. 应用气象学报,20(6):713-721.
- 杨燕,王雪瑞,戴青,等,2007. 球面全景图像生成技术的研究[J]. 计算机应用与件,24(10):164-165,187.
- 苑津莎,赵振兵,高强,等,2009. 红外与可见光图像配准研究现状与展望[J]. 激光与红外,39(7):693-699.
- 曾文锋,李树山,王江安,2001. 基于仿射变换模型的图像配准中的平移、旋转和缩放[J]. 红外与激光工程,30(1):18-20,17.
- 章文星,吕达仁,常有礼,2007. 地基热红外亮温遥感云底高度可行性的模拟研究[J]. 地球物理学报,50(2):354-363.
- 章文星,吕达仁,宣越健,等,2010. 利用扫描式红外亮温仪对天空云量的试验观测[J]. 气象学报,68(6):808-821.
- 赵静,曹晓钟,代桃高,等,2017. 毫米波云雷达与探空测云数据对比分析[J]. 气象,43(1):101-107.
- 周毓荃,欧建军,2010. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其研究[J]. 气象,36(11):50-58.
- Buch K A Jr, Sun C H, 1995. Cloud classification using whole-sky imager data[C]//Proceedings of the Ninth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation. Charlotte, NC, USA: USDOE; 353-358.
- Lewis J J, OCallaghan R J, Nikolov S G, et al, 2004. Region-based image fusion using complex wavelets[C]//Proceedings of the Seventh International Conference on Information Fusion. Stockholm, Sweden: International Society of Information Fusion; 487-496.
- Su M S, Hwang W L, Cheng K Y, 2004. Analysis on multiresolution mosaic images[J]. IEEE Trans Image Process, 13(7):952-959.
- Zomet A, Levin A, Peleg S, et al, 2006. Seamless image stitching by minimizing false edges[J]. IEEE Trans Image Process, 15(4):969-977.