

文章编号 1004-924X(2010)08-1722-10

# 大视场云层分布定位的光电测量系统

王昊京<sup>1,2</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 王鸣浩<sup>1,2</sup>, 阴玉梅<sup>1</sup>, 张艳辉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为获得空间目标监视设备上空适合观测的天区以提高设备的使用效率和观测效率,设计了实时监视观测站上空云层位置分布的光电测量系统。该系统采用以扁椭球折反射透镜组为核心的大视场光学设计,结合非制冷红外焦平面阵列探测器用于全天时采集天空云层图像;通过装有图像采集卡的计算机对采集的天空背景图像进行伪彩处理、图像修复等操作后,获得无云、薄云、厚云以及它们之间过渡区域可清晰区分的伪彩云层图像,并根据实验标定建立的空间角位置和像素的函数关系,给出云的分布位置信息。实验结果表明,该测量系统可以每 5 s 输出一次高度角在 20° 以上的彩色云图,并计算出天空中云层的方位分布,定位精度约为 1°。此系统可以实现云层分布的大视场定位测量,并提高空间目标监视设备的效率。

**关键词:**云层定位;光电测量系统;观测效率;图像修复;伪彩处理;曲线拟合

**中图分类号:**TP722.5;TH765 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101808.1722

## Photoelectric measuring system with large field for cloud position determination

WANG Hao-jing<sup>1,2</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, WANG Ming-hao<sup>1,2</sup>, YIN Yu-mei<sup>1</sup>, ZHANG Yan-hui<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** In order to improve the service and observing efficiencies of space target surveillance equipment, a photoelectric measuring system was designed to determine the positions and distributions of clouds and to decrease the false alarm rate and damage possibility due to severe weather. This system employed a large field optical design and took a set of flat ellipsoid catadioptric lens as its core. By using an uncooled infrared focal plane array detector, it could collect sky images in all day long. A computer with a color card was used to perform pseudo-color and bracket removal operations and to get a pseudo-color image which could distinguish clean, haze, cloud and their transitions. Furthermore, the position information of the interesting points could be obtained based on the pre-established function between position information in the sky and pixels in the image. Experimental results demonstrate that this measurement system can collect cloud images in the sky above elevation 20°, and can offer a

收稿日期:2009-07-22;修订日期:2009-10-26.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA8080502)

processed image every 5 s. The positioning accuracy of the system is  $1^\circ$ , which can achieve the position determination with large field for the cloud distributions and can improve service efficiency.

**Key words:** cloud position determination; photoelectric measuring system; observing efficiency; image inpainting; pseudo-color processing; curve fitting

## 1 引言

科研、军事、工农业生产等众多领域都需要及时了解当地中低空云层的体积、形状以及云层内悬浮粒子性质等参数,尤其是空间云层的状态和分布。这些参数在抗洪救灾、森林防火、环保观测以及局部战争等场合举足轻重。云层状态及定位的全天时实时光学测量,一方面可以避免恶劣天气对设备的损坏,另一方面可以引导空间目标监测设备进行自动观测,提高设备在云雾天气下的使用效率。若要在夜间观测天空云层的分布,则通过红外波段的监测能获得更好的效果。

利用大气红外辐射进行云层测量是地基云层遥感的发展趋势,如红外云分析仪(ICA)和红外云成像仪<sup>[1]</sup>的应用。目前,现有的类似技术在结构设计方面较复杂,功能方面主要用来获取天空区域红外波段的温度特征,绘制辐射图谱,判断云雨状况,而鲜有大视场全天时云层分布定位的测量。

国内类似的技术方案是基于非制冷红外焦平面阵列的全天空红外测云系统。此系统由 5 个单元模块构成,采用旋转扫描的机械伺服单元,用非制冷红外焦平面阵列(UIRFPA)和扫描方式实现天空区域全天空红外测云。此系统通过拼图、温度定标、大气修正、云识别等数据处理,实现全天候云层辐射测量,辐射定标处理以及云类型识别<sup>[1]</sup>。

国外类似的技术方案是 SLR2000 激光测距系统。它是一个无人值守的自动观测网,其每个观测站都配备了全天时云量监视系统。此监视系统使用线阵长波红外探测器采集尺寸为 120 pixel $\times$ 120 pixel 的图像,采用串口传输图像数据;监测设备有 4 条机械支架,有较大面积的成像遮拦;另外云图只包含 3 种成分(晴朗、霾、云),可以给出天空辐射图<sup>[2]</sup>。

本文提出了一种大视场全天候云层分布定位光电测量系统,其结构简单,数据处理速度快,可

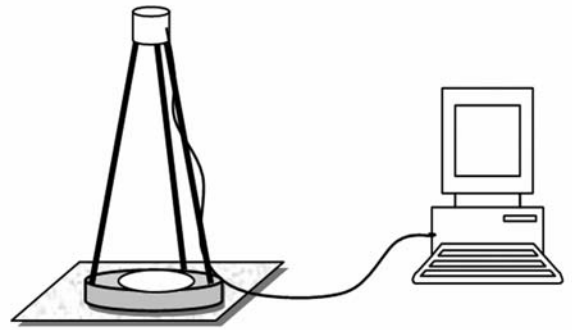
以快速输出天空中云层分布图像,并能够给出云层的分布方位信息。

## 2 系统结构

系统设计方案如图 1 所示,其中图 1(a)为光学成像分系统,图 1(b)为云层状态和定位分析分系统。

### 2.1 光学成像分系统

光学成像分系统是由光学子系统及其机械支撑结构和非制冷红外焦平面阵列探测器组成的,用于采集以天空为背景,云层作为目标的图像信息。



(a) 光学成像分系统 (b) 云层定位分析分系统  
(a) Optical imaging subsystem (b) Determination subsystem for cloud position

图 1 系统框图

Fig. 1 Block diagrams of system

#### 2.1.1 光学子系统

光学子系统要保证测量设备可以全天时工作,尤其是在夜晚进行红外波段探测成像必须有效。光学子系统的探测成像是以天空为背景,云层作为目标的。红外成像通常指  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  的中波红外成像和  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  的远红外成像。虽然在远红外波段,天空背景的辐射和云层的辐射都比中波红外大,但是云层的辐射相对于天空的辐射要远大于在中红外波段时<sup>[3]</sup>,所以采用远红外成像优于中波红外成像。

光学子系统由扁椭球反射镜和成像透镜组组成,系统的光路布局如图 2 所示。其中扁椭球



图 2 光学子系统的布局图

Fig. 2 Layout of optic subsystem

反射镜是实现大视场空间成像的关键,大视场的入射光束经过反射后进入成像透镜组。成像透镜组由 3 片单透镜组成,如图 3 所示,光阑位于最后 1 片透镜之前。系统收集天空中  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  波段的远红外辐射光线,经扁椭球反射后进入后续的成像透镜组,成像在焦面仪器上。

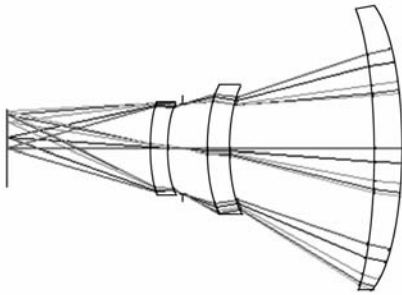


图 3 成像透镜的布局图

Fig. 3 Layout of imaging lens

### 2.1.2 机械支撑结构

图 1 所示的机械支撑结构采用有良好弹性和刚度的钢作为材料,能在多风的天气中保证系统有较好的定位精度。组成光学系统的 3 块成像透镜和非制冷红外焦平面阵列探测器安装在支架的顶端,扁椭球反射集光镜安装机械支撑结构底端的镜座上。

### 2.1.3 非制冷红外焦平面阵列探测器

焦面仪器采用法国 FILR 公司的多晶硅非制冷焦平面微热型探测器,探测器像元数为  $324\ (\text{H})\times 256\ (\text{V})$ ,帧频为  $9\ \text{Hz}$ ,像元尺寸为  $38\ \mu\text{m}\times 38\ \mu\text{m}$ ,响应波段是  $8\sim 14\ \mu\text{m}$ ,探测器的 NETD $<85$ ,满足光学系统的设计要求。

## 2.2 云层定位分析系统

云层定位分析系统是装有图像采集卡的计算机,采用带有 PCI 插槽的台式通用计算机,可

以插入带 PCI 接口的图像采集卡。图像采集卡是可购买到的普通图像采集卡,例如 NI 公司型号为 PCI-1422 的采集卡。

## 3 数据处理算法

从图像采集卡中采集的图像  $I_0$ 。需要经过一系列的处理,最终获得彩色云层图像  $I_c$  和云层定位信息  $P_0$ 。其中  $I_0$  是  $M\times N\times 3$  的三维数字图像, $M=648,N=512$ ,它是经过双线性插值放大后的图像。彩色云层图像  $I_c$  的尺寸也为  $M\times N\times 3$ 。云层的定位信息  $P_0$  包括云层的仰角  $El$  和方位角  $Az$ ,即  $P_0=(El,Az)$ 。

### 3.1 算法流程

云层定位分析分系统的数据处理算法主要包括滤波去噪、支架去除、伪彩处理、定位计算以及显示输出。算法流程图如图 4 所示:



图 4 图像处理算法流程

Fig. 4 Image processing flowchart

首先对采集的图像  $I_0$  进行去除噪声的处理,获得去噪的图像  $I_s$ 。在采集的图像当中,有一部分是系统固有的噪声,有一部分是电子器件引起的噪声,这部分噪声是高斯分布的,可以通过均值滤波器滤除<sup>[4]</sup>。对于  $t$  时刻采集到的图像  $I_{0_t}$ ,它用采集的图像序列  $\{I_{0_{t+i}}\}_{i=0}^N$  的均值  $I_{s_t}$  来表示:

$$I_{s_t} = \frac{\sum_{i=0}^N I_{0_{t+i}}}{N}, \quad (1)$$

式中  $N$  的取值不能太大,因为  $N$  取值较大时,云层的运动会造成图像模糊,设计中采用  $N=9$ 。

机械支撑结构在采集的图像  $I_0$  中留下较大的遮拦,感官效果差,所以需要对其进行处理去除支架,获得无支架的图像  $I_n$ 。接着对图像  $I_n$  进行伪彩色处理得到彩色云层图像  $I_c$ 。

支架去除、伪彩处理以及定位计算在下面给出,显示输出是将处理的图像、定位计算结果输出到显示器中进行显示。

### 3.2 支架的去除

测量设备的机械支撑结构造成云层图像  $I_0$  中有较大的遮拦。国内外类似的设计中均没有对其做处理,例如 SLR2000 激光测距系统配备的全天时云量监视设备<sup>[2]</sup>,为 MAGNUM 2 m 级望远镜配备的红外云监视器<sup>[5]</sup>等设备,在采集的图像中都有遮拦,而这会对气象用户云层信息的统计计算造成不便。在本设计中采用 Criminisi 等人提出的基于样本图像修复算法<sup>[6-7]</sup>去除消噪图像  $I_0$  中的支架部分,获得无支架图像  $I_n$ 。

#### 3.2.1 算法的描述

Criminisi 等人提出的基于样本的图像修复算法标记如图 5 所示。

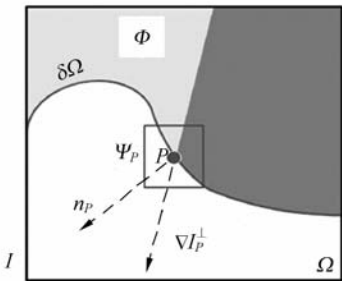


图5 算法标记图

Fig. 5 Notation diagram

图 5 中  $I$  代表整个输入的待修复图像,在本文  $I$  就是经过了均值滤波的图像  $I_0$ ;输入图像  $I$  中待修复的目标区域为  $\Omega$ ;  $\partial\Omega$  表示待修复目标区域  $\Omega$  的填充前沿;  $\Phi$  表示待修复图像  $I$  中已知的源区域,其提供最佳匹配样本,且  $\Phi = I - \Omega$ ;  $\Psi_P$  为位于填充前沿  $\partial\Omega$  上的大小为  $(2\epsilon + 1) \times (2\epsilon + 1)$  的修复块(修复模板),其中心点在  $P$  上,修复块  $\Psi_P$  为方形的。

初始时,手工选定待修复区域或待移除的目

标  $\Omega$ ,算法流程<sup>[6-7]</sup>简述为:计算边界  $\partial\Omega$  上的优先权  $P_r(P)$ ,  $\forall P \in \partial\Omega$ ,寻找优先级最大的像素点  $\hat{P}$  处的窗口模板  $\Psi_{\hat{P}}$ ;在  $\Phi$  中寻找最佳匹配样本  $\Psi_{\hat{q}_i} \in \Phi$ ;将最佳匹配样本  $\Psi_{\hat{q}_i}$  的数据复制到  $\Psi_{\hat{P}}$  中,  $\forall P \in \Psi_{\hat{P}} \cap \Omega$ ;更新信度项  $C(P)$ ,  $\forall P \in \Psi_{\hat{P}} \cap \Omega$ ,循环执行上述操作直至修复完毕。

#### 3.2.2 算法参数的设计

此修复算法中有 2 个重要的参数需要实验选取。其一是修复块  $\Psi_P$  的大小,其二是源区域  $\Omega$  的选取。

对于修复块因子  $\epsilon$ ,如果  $\epsilon$  越大,那么修复效率越高,但修复结果中的块效应越明显;反之  $\epsilon$  越小,修复效率约低,但修复图像更精细。经过实验对效率和效果之间的权衡,确定  $\epsilon=3$ 。

对于源区域  $\Omega$ ,设定为以图像几何中心为圆心,半径为 115 pixel 的圆形区,这样可以保证修复结果中不会出现无效区域,而且满足可测量仰角  $20^\circ$  以上天空区域的设计要求,利于云量统计分析。

此算法可有效修复图像中机械结构造成的遮拦,去除支架耗时约为 5 s。

### 3.3 伪彩参数的确定

为更清晰直观地显示晴朗区域、薄云、厚云以及它们之间的过渡带,需对图像中的云进行分类,并进行伪彩处理。分类总体上分为无云区(Clean)、薄云(haze)、厚云(Cloud)这三部分,无云区域使用蓝色、薄云使用绿色、厚云使用白色,图像中的无效区域设置为黑色,而它们之间的过渡则随灰度值的不同而渐变。

(1) 云层分类的标准 无支架图像  $I_n$  是大小为  $M \times N \times 3$  的 RGB 图像,而每个像素点  $R_{I_n}$ 、 $G_{I_n}$ 、 $B_{I_n}$  分量相等,  $I_n$  可通过下式转换为灰度图像  $I_{\text{Gray}}$ :

$$I_{\text{Gray}} = 0.2989R_{I_n} + 0.5870G_{I_n} + 0.1140B_{I_n} = R_{I_n} = G_{I_n} = B_{I_n}, \quad (2)$$

由上式可知,图像  $I_n$  可由任一个  $R_{I_n}$ 、 $G_{I_n}$ 、 $B_{I_n}$  分量作为灰度图像来代替,在下文分析中取  $I_{\text{Gray}} = R_{I_n}$ 。经实验分析验证,对于  $I_{\text{Gray}}$  中任一像素点  $P$  与无云区(Clean)、薄云(haze)、厚云(Cloud)之间有如下关系:

$$\begin{cases} P \in \text{Clean}, 0 \leq P \leq 70 \\ P \in \text{Haze}, 71 < P \leq 163 \\ P \in \text{Cloud}, 163 < P \leq 255 \end{cases}, \quad (3)$$

天空云层类型的分类是靠人眼来分析判断的,有很大的主观性,所以式子确定的参数范围,并不是绝对的。

(2)参数的确定

在 256 个灰度级的灰度图像中,人眼仅能分辨出 40 个左右的灰度级,而能分辨出的彩色达几百种甚至上千种。人眼对灰度微弱递变的敏感程度远远小于对色彩变化的敏感程度<sup>[8]</sup>,所以采用伪彩处理可以改善图像的显示效果。

对于图像  $I_{Gray}$  中的任一个像素点  $P(x, y)$ ,可通过函数  $R(x, y), G(x, y), B(x, y)$  将其映射到彩色 RGB 空间中。经实验确定的映射函数参数满足下式:

$$R(x, y) = \begin{cases} 0, P(x, y) = 0 \\ \left[ \frac{1983P - 1983}{1160} \right], 0 < P(x, y) \leq 59 \\ \left[ \frac{389728 - 4757P}{1100} \right], 59 < P(x, y) \leq 70 \\ \left[ \frac{332691 - 2579P}{2950} \right], 70 < P(x, y) \leq 129 \\ \left[ \frac{7171P - 264702}{4600} \right], 129 < P(x, y) \leq 162 \\ \left[ \frac{20P + 2805}{31} \right], 162 < P(x, y) \leq 255 \end{cases}, (4)$$

$$G(x, y) = \begin{cases} 0, P(x, y) = 0 \\ \left[ \frac{1983P - 1983}{1160} \right], 0 < P(x, y) \leq 59 \\ \left[ \frac{1495P - 66392}{220} \right], 59 < P(x, y) \leq 70 \\ \left[ \frac{811P + 45831}{590} \right], 70 < P(x, y) \leq 129 \\ \left[ \frac{2433 - 7P}{6} \right], 129 < P(x, y) \leq 162 \\ \left[ \frac{77P + 27795}{186} \right], 162 < P(x, y) \leq 255 \end{cases}, (5)$$

$$G(x, y) = \begin{cases} 0, P(x, y) = 0 \\ 255, 0 < P(x, y) \leq 59 \\ \left[ \frac{100207 - 1223P}{110} \right], 59 < P(x, y) \leq 70 \\ \left[ \frac{171183 - 1327P}{590} \right], 70 < P(x, y) \leq 129 \\ \left[ \frac{65P - 8385}{11} \right], 129 < P(x, y) \leq 162 \\ \left[ \frac{20P + 2805}{31} \right], 162 < P(x, y) \leq 255 \end{cases}, (6)$$

图像  $I_{Gray}$  经式(4),(5),(6)映射后,可得到能最终适合显示彩色图像  $I_c$ 。

3.4 云层空间分布定位的标定

本系统具有云层分布定位功能,可确定天空中云层所在的位置,给出云层的定位信息。云层的定位信息  $P$ 。包括云层的仰角  $El$  和方位角  $Az$  两个参数。确定这两个参数后,即可根据图像的像素点来获得云层在空间中定位信息。这需要建立图像中像素点  $P(x, y)$  与云层的定位信息  $P$ 。( $El, Az$ ) 的函数学模型。云层的仰角信息  $El$  的建模方法如下:

(1)云层仰角信息  $El$  的建模

在地面仰视云层,其定位角度信息模型如图 6 所示。假设云层中的  $n$  个点  $T_0, T_1, \dots, T_i, \dots, T_n$  位于在空间中某一条直线  $T_0T_n$  上,它在焦平面  $xoy$  的对应像素点为  $P_0, P_1, \dots, P_i, \dots, P_n$ 。  $P_0$  为图像的几何中心点,并与焦平面的原点  $o$  重合。  $T_0, T_1, \dots, T_i, \dots, T_n$  在水平面上实际的投影点为  $P_0', P_1', \dots, P_i', \dots, P_n'$  则对于任意一点  $T_i$ ,它在空间中的仰角  $El_i$  定义如下:

$$El_i = \arctan \frac{P_0'T_0}{T_0T_i}, (7)$$

建立的图像  $I$  中的像素点  $P(x, y)$  与云层上的点  $T$  的仰角  $El$  之间的函数关系如式(8)所示:

$$El = f(x, y), \forall P(x, y) \in I, (8)$$

光学系统的成像设计满足几何中心对称的特性,由图 6 可知,在焦平面  $xoy$  上的图像  $I$  中,以原点  $O$  为圆心,  $r$  为半径的圆  $C$  上的两个像素点  $P$  和  $q$  所对应的仰角满足:

$$El_p = El_q, P, q \in C, (9)$$

由式(9)可知,焦平面  $xoy$  中的图像  $I$  上的像素点

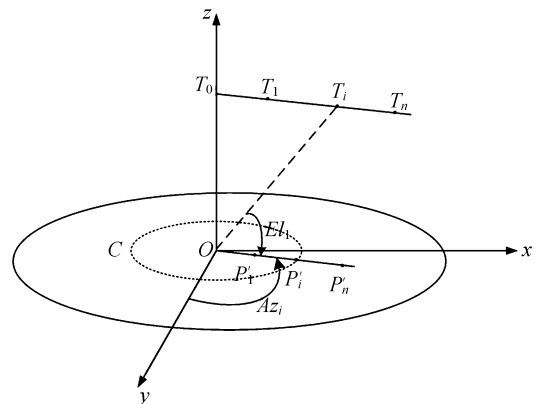


图 6 云层定位的模型

Fig. 6 Determination model for cloud position

$P(x, y)$ 所对应的仰角  $El_P$  关于原点  $O$  对称, 所示式子可以转化为式(10):

$$El = g(r), r = \sqrt{x^2 + y^2}, \forall P(x, y) \in I, (10)$$

显然  $g(r) \in C[0, r_{\max}]$ , 故可通过实验获得离散点集  $\{(El_i, r_i)\}_{i=0}^n$ , 然后采用最小二乘法, 用正交多项式作基, 拟合一个函数  $g^*(r)$  来逼近  $g(r)^{[9-10]}$ . 求解  $g(r)$  的问题转化为求取拟合多项式函数  $g^*(r)$  的问题:

$$g^* \times (r) = \sum_{i=0}^m a_i P_i(r) \quad (m+1 < n), (11)$$

式(11)中的拟合函数  $g^*(r)$  在  $span\{P_0, P_1, \dots, P_n\}$  取, 且  $\{P_k\}_{k=0}^n (m+1 < n)$  是正交多项式函数族. 文献[9-10]给出了系数  $\{a_i\}_{i=0}^m$  的求解结果, 如式(12):

$$a_k = \frac{\sum_{i=1}^n w(r_i) El_i P_k(r_i)}{\sum_{i=1}^n w(r_i) P_k^2(r_i)}, (12)$$

(2) 实验求取函数  $g^*(r)$

在光学成像分系统上方的一条直线  $T_0 T_n$  中确定一系列标识点  $T_0, T_1, \dots, T_i, \dots, T_n, n=35$ . 这条直线在图像  $I$  中成像,  $P_0, P_n$  经过图像的几何中心  $O$ , 其中的特征点对应图形的像素点分别为  $P_0, P_1, \dots, P_i, \dots, P_n$ , 在水平面上投影点为  $P_0', P_1', \dots, P_i', \dots, P_n'$ . 测量的数据经过求取平均值如表 1 所示, 而  $P_0' T_0 = 1542.5 \text{ mm}$ , 可以通过式(7)可获取点集  $\{El_i\}_{i=0}^{35}$ . 表 2 是像素点  $P_0, P_1, \dots, P_i, \dots, P_n$  与图形几何中心之间的距离  $\{r_k\}_{k=0}^{35}$ . 序列  $\{r_k\}_{k=0}^{35}$  是通过多次测量每个点在图像中的坐标位置, 并取平均值计算所得的. 至此已获得离散点集  $\{(El_i, r_i)\}_{i=0}^{35}$ .

表 1 标识点  $T_i$  与  $T_0$  的距离

Tab.1 Distances between labels  $T_i$  and  $T_0$

$i$	$T_0 T_i / \text{mm}$	$i$	$T_0 T_i / \text{mm}$	$i$	$T_0 T_i / \text{mm}$	$i$	$T_0 T_i / \text{mm}$
0	0	9	1 849	18	3 649	27	5 449
1	249	10	2 049	19	3 849	28	5 649
2	449	11	2 249	20	4 049	29	5 849
3	649	12	2 449	21	4 249	30	6 049
4	849	13	2 649	22	4 449	31	6 249
5	1 049	14	2 849	23	4 649	32	6 449
6	1 249	15	3 049	24	4 849	33	6 649
7	1 449	16	3 249	25	5 049	34	6 849
8	1 649	17	3 449	26	5 249	35	7 049

表 2 标识点  $P_i$  与  $P_0$  的距离

Tab.2 Distances between pixels  $P_i$  and  $P_0$

$i$	$P_0 P_i / \text{pixel}$	$i$	$P_0 P_i / \text{pixel}$	$i$	$P_0 P_i / \text{pixel}$	$i$	$P_0 P_i / \text{pixel}$
0	0	9	59.506	18	93.701	27	115.808
1	9.372	10	64.512	19	96.351	28	117.520
2	16.620	11	68.647	20	99.005	29	119.640
3	23.562	12	73.207	21	102.303	30	121.346
4	30.237	13	76.550	22	104.881	31	123.214
5	36.832	14	80.673	23	106.796	32	125.100
6	43.456	15	83.858	24	109.422	33	127.414
7	48.861	16	87.269	25	111.947	34	129.406
8	54.175	17	90.783	26	114.051	35	131.479

用其计算系数  $\{a_i\}_{i=0}^m$  时, 为防止求解方程为病态的, 对于离散点集  $\{(El_i, r_i)\}_{i=0}^{35}$  使用  $\{(El_i, R_i)\}_{i=0}^{35}$  代替,  $R_i$  由下式求出:

$$R_i = \frac{r_i - \mu}{\sigma}, (13)$$

式(13)中  $\mu$  和  $\sigma$  分别为  $\{r_k\}_{k=0}^{35}$  的均值和标准方差.

求解式(12)可得  $g^*(R)$  为:

$$g^*(R) = 0.04613 \times R^9 + 0.2137 \times R^8 + 0.2211 \times R^7 - 0.3925 \times R^6 - 0.8818 \times R^5 - 0.1426 \times R^4 + 0.3425 \times R^3 + 4.861 \times R^2 - 17.32 \times R + 28.45, (14)$$

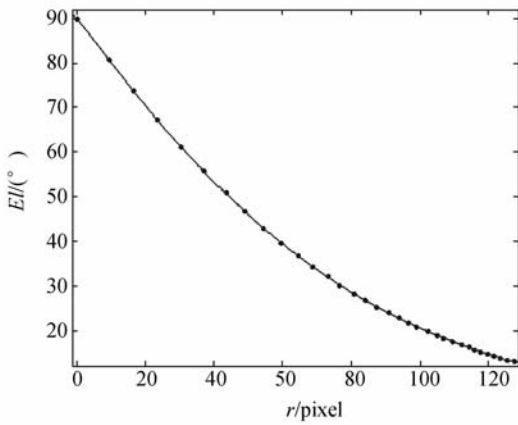
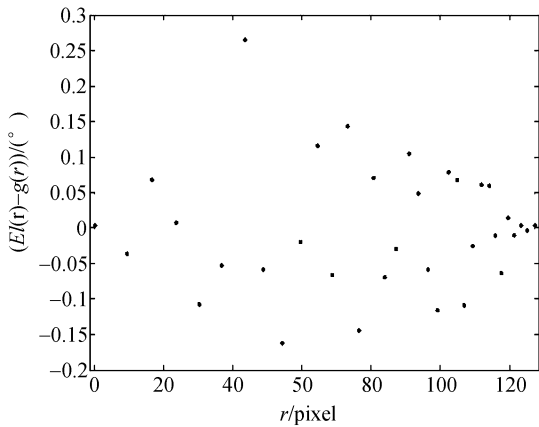
式(14)中的  $R = \frac{r - 80.49}{36.82}$ , 即求解出仰角  $El$ .

图 7 是仰角信息的拟合结果曲线, 其中(a)是函数  $El = g(r)$  的关系曲线, 特征点位于光滑的曲线之上; 而(b)是特征点的残差曲线, 它表明计算的最大误差约为  $0.3^\circ$ , 结果满足设计要求.

(3) 方位角  $Az$  的求解

在本设计中方位角的定义为从正北方向顺时针转向目标位置时所转过的角度. 在图 6 中, 假如  $y$  轴直线正北方向,  $x$  轴为正东方向, 那么对于图像中任意一点  $P(x, y)$  所对应的方位角  $Az$  可以由下式给出:

$$Az = \begin{cases} 90^\circ - \arctan(\frac{y}{x}), & x > 0 \\ 270^\circ - \arctan(\frac{y}{x}), & x < 0 \end{cases}. (15)$$

(a) 拟合函数  $El=g(r)$  的关系曲线(a) Curve of fitting function  $El=g(r)$ 

(b) 特征点的残差关系曲线

(b) Residual error curve of nodes

图 7 仰角的拟合结果

Fig7 Fitting results of El information



图 8 光学成像分系统硬件

Fig. 8 Hardware of optical imaging subsystem

比较典型。图 9(b)是相机采集的红外图形,颜色单一,三根支架突兀、呆板,图像方位符合上北下南左西右东习惯。图 9(c)是最终的处理图形,它去除了图形中的支架,进行了伪彩处理,其中晴朗区域、薄云、厚云区域及它们之间的过渡区域十分清晰,感官效果好。实验中支架处理一帧图形耗时约 5s,实时性不强,有待后续进一步研究。图中有 A, B, C 3 个定位点, A 点是云层区域点,方位角为  $301^\circ$ , 仰角为  $44^\circ$ ; B 点位于晴朗区域中,方位角为  $199^\circ$ , 仰角为  $19^\circ$ , 而 C 点位于薄云区域,方位角为  $18^\circ$ , 仰角为  $46^\circ$ , 在操作中,点击图像中感兴趣的位置,就可以给出此位置定位信息。实验验证其定位误差约为  $1^\circ$ 。

图 10 是经过采集处理的夜空图像,可见光波段相机难以获得高质量的图形。其中图 10(a)是晴朗夜空的图像,天空没有云;图 10(b)是出现薄云的夜空图像,从图中可以看到除了西面少部分晴朗天空以外,其他部分均被薄云覆盖,而且东北面天空的薄云最为厚密;图 10(c)是厚云覆盖的夜空图像,从图中可以看出,除东北角以外,其他天空区域基本上被厚云和薄云覆盖。在没有月亮夜空下,靠人眼和普通相机很难分辨天空的云层分布;而本测量系统成功地获得了清晰的天空云层图像,可以为其他空间目标监测设备提高观测方位指引。

## 4 实验结果及分析

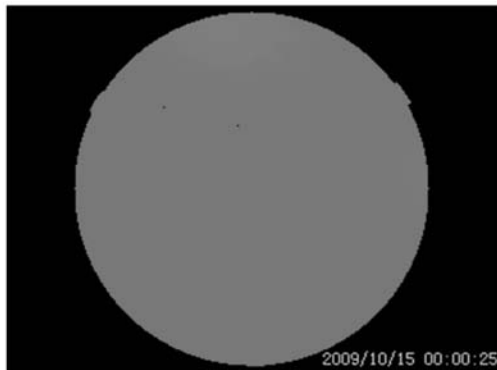
大视场云层分布定位的光电测量系统设计完毕后,对系统的性能进行了测试。实验验证表明系统是成功的,且具有可靠性高、环境适应性强和昼夜测量准确的特性。图 8 是光学成像分系统的实际硬件,将其放在长春一个四周没有建筑物遮挡的高地进行了全天时的测试实验。

图 9 是白天实验的结果。其中图 9(a)是白天使用可见光波段的普通相机采集的一幅东北方向天空区域图像,图中云层和晴朗区域对比明显,



(a) 普通相机采集的图像

(a) Original image acquired by common camera



(a) 晴朗的夜空

(a) Clean midnight sky



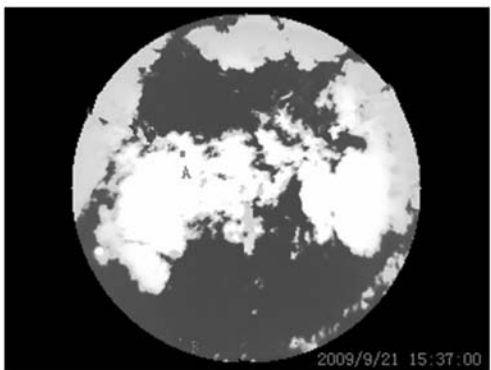
(b) 原始红外图像

(b) Original IR image



(b) 薄云覆盖的夜空

(b) Hazy midnight sky



(c) 处理的图像

(c) Processed image with pseudo-color



(c) 厚云覆盖的夜空

(c) Cloudy midnight sky

图 9 白天实验结果

Fig. 9 Experimental results at daytime

图 10 夜晚的实验结果

Fig. 10 Experimental results at nighttime

## 5 结 论

本文提出的大视场云层分布定位光电测量系统采用了大视场光学系统设计方案,使用非制冷红外焦平面阵列探测器,无论昼夜均可以采集到

天空中  $20^\circ$  以上区域的云层图像,并能够每 5 s 输出一次处理过的云层图像,给出无云区域和有云区域的定位信息,定位误差约为  $1^\circ$ 。该系统可为无人值守的大型地基光电望远镜远程控制提供气象参数的测量服务,提高地基望远镜工作效率,也可以为气象部门等累计局部气象数据。

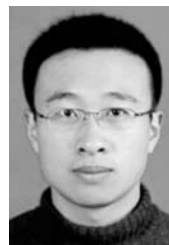
### 参考文献:

- [1] 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):763-764.  
SUN X J, GAO T C, CUI 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):763-764. (in Chinese)
- [2] MALLAMA A, MCGARRY J, DEGNAN J, *et al.*. The weather sensor for SLR2000[C]. *12th International Workshop on Laser Ranging Matera, Italy*, 2000:162-170.
- [3] 丁金伟,张葆,李永刚,等. 气象测云红外成像系统的设计与分析[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2431-2434.  
DING J W, ZHANG B, LI Y G, *et al.*. Design and analysis of infrared imaging system for cloud meteorological observation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2431-2434. (in Chinese)
- [4] 常军,吴锡生. 基于图像子块加权缩小的自适应修正算法[J]. 计算机工程与应用,2009,47(9):181-186.
- [5] MASAHIRO S, YUKIYASU K, NORIO O, *et al.*. The infrared cloud monitor for the MAGNUM robotic telescope at Haleakala[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2007, 119(855):567-582.
- [6] CRIMINISI A, PEREZ P, TOYAMA K. Object removal by exemplar-based inpainting[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE Computer Society Conference*, 2003, 721-728.
- [7] CRIMINISI A, PEREZ P, TOYAMA K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting[J]. *IEEE Trans. of Image Processing*, 2004, 13(9):1200-1212.
- [8] 罗瑞芝. 超声图像处理系统的研究和软件设计[D]. 重庆大学,2005.  
LUO R Z. *Study and Implementation of Ultrasound Image Processing System in Picture Archiving and Communication System*[D]. ChongQin University, 2005. (in Chinese)
- [9] 龙辉平,习胜丰,侯新华. 实验数据的最小二乘拟合算法与分析[J]. 计算技术与自动化,2008,27(3):20-23.  
LONG H P, XI S F, HOU X H. The algorithm and analysis from experiment data by means of minimum double multiplication[J]. *Computing Technology and Automation*, 2008, 27(3):20-23. (in Chinese)
- [10] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 北京:清华大学出版社,2001.  
LI Q Y, WANG N C, YI D Y. *Numerical Analysis*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)

### 作者简介:



王昊京(1983—),男,河南郑州人,博士研究生,2007年于吉林大学获得学士学位,主要从事图像处理、自动控制、导航等方面的研究。E-mail: wanghaojing@vip. qq. com



王鸣浩(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事地基大口径望远镜图像处理的研究。E-mail: Wpaul007@163. com

## 导师简介:



阴玉梅(1960—),女,吉林长春人,副研究员,主要从事电子信息技术、制造工艺等方面的研究。



王建立(1971—),男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp. ac. cn



张艳辉(1965—),女,吉林长春人,博士研究生,主要从事精密机械设计加工工艺方面的研究。E-mail: wangzhi8927@163. com

## ●下期预告

## 利用 PBS 和保偏光纤的传感解调系统的设计

王葵如<sup>1</sup>,张锦龙<sup>2</sup>,余重秀<sup>1</sup>,林妹妹<sup>1</sup>,赵德新<sup>1</sup>

(1. 北京邮电大学 信息光子学与光通信教育部重点实验室,北京 100876

2. 河南大学 物理与电子学院,河南 开封 475001)

为了提高光纤光栅传感解调系统的解调精度和稳定性,提出了一种利用光纤偏振分束器(PBS)和保偏光纤中偏振模间干涉原理实现波长解调的光纤布拉格光栅传感解调方案。在理论上,运用矩阵光学的原理建立了数学分析模型,由此给出了系统输出信号与光纤光栅布拉格波长之间的关系。通过仿真分析,研究了保偏光纤长度、输入光相对于保偏光纤主轴的偏振角度和光纤偏振分束器主轴方位对系统输出信号的影响,明确提出了提高系统灵敏度的方法。根据设计方案搭建了实验系统,并进行了实验验证。实验结果表明:该设计方案可行,系统的波长分辨率 $<1$  pm,测量精度 $<1$  pm,温度可测量范围为 $90$  °C。该系统测量精度高,其稳定性优于利用 M-Z 型干涉仪的解调装置。