

地基气辉成像干涉仪探测高层大气风场的定标研究

唐远河 崔进 郜海阳 屈欧阳 段晓东 李存霞 刘丽娜

Calibrations of ground based airglow imaging interferometer for the upper atmospheric wind field measurement

Tang Yuan-He Cui Jin Gao Hai-Yang Qu Ou-Yang Duan Xiao-Dong Li Cun-Xia Liu Li-Na

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 130601 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.130601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.130601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Bayer 滤波型彩色相机调制传递函数测量方法

A method to measure the modulation transfer function of Bayer filter color camera

物理学报.2017, 66(7): 074204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074204>

点源透过率测试系统精度标定与分析

Analysis and calibration of precision for point source transmittance system

物理学报.2016, 65(11): 114206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.114206>

新型离轴反射变焦距光学系统的多视场检测方法

Novel multiple field of view detection method for the off-axis reflection zoom optical system

物理学报.2016, 65(8): 084208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084208>

光声内窥镜系统在人体直肠癌离体组织中的实验研究

The human colorectal cancer tissue in vitro experimental study based on photoacoustic endoscopic system

物理学报.2014, 63(8): 084204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084204>

微通道板的饱和效应对条纹相机动态范围的影响分析

Influence analysis of saturation effect of microchannel plate on dynamic range of streak cameras

物理学报.2012, 61(19): 194211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.194211>

地基气辉成像干涉仪探测高层大气风场的定标研究*

唐远河[†] 崔进 郜海阳 屈欧阳 段晓东 李存霞 刘丽娜

(西安理工大学理学院, 西安 710048)

(2017年3月23日收到; 2017年4月7日收到修改稿)

我们研制的地基气辉成像干涉仪 (ground based airglow imaging interferometer, GBII) 样机成功地探测了地球上空 90—100 km 的大气风速和温度. 为了提高 GBII 的探测精度, 本文研究 GBII 所拍摄的成像干涉条纹的定标: 对干涉条纹中心位置定标、电荷耦合器 (CCD) 暗噪声和平场定标、整个光学系统衰减系数定标、步进步长定标、光程差随入射角变化量定标、仪器响应度定标和零风速相位定标等理论和实验进行了研究. 利用最小二乘法对 GBII 拍摄的 30 幅成像干涉图的圆心坐标定标在 CCD(123.3, 121.1) 像素位置; 利用 632.8 nm 激光获得 GBII 所用 CCD 的平场定标系数矩阵, 分别得到平场前后的干涉图并检测出 CCD 的噪声和坏点; 利用 GBII 获得图像的边缘亮环相位与中心亮斑相位的差值对入射角 10.24° 时, 光程差相对 0° 入射角时变化了 0.356 个条纹; 拍摄 200 幅成像干涉图的实验离散点进行正弦拟合后的均方根标准偏差达 90.34%, 该完整干涉条纹的步进间隔为 4.06 nm, 对应步进相位为 0.0094π ; 针对正演公式中 GBII 的系统衰减系数对所拍摄的原始干涉图利用 IDL 编程得到光学系统衰减系数的多项式, 拟合的均方根标准偏差达 99.98%; 采用 632.8 nm 激光作光源, 简化了 GBII 的响应度表达式, 通过实验得其响应度为 $4.97 \times 10^{-3} \text{ counts} \cdot (\text{Rayleigh} \cdot \text{s})^{-1}$; 针对 GBII 室外观测, 给出零风速定标的矩阵表达式后, 对 532.0 nm 和 632.8 nm 激光的对应零风速相位分别为 -9.2442° 和 -68.6353° . 本文提供了多种定标方法, 并逐一通过实验进行验证, 为国内被动遥感探测高层大气风场提供了强有力的实验支持.

关键词: 定标, 高层大气风场, 相位

PACS: 06.20.fa, 42.79.Pw, 42.87.-d, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.66.130601

1 引言

地球上空 60—120 km 中间层和低热层 (mesosphere and lower thermosphere, MLT) 的大气温度、风速和成分等参量的基本结构和变化决定这一区域动力学和光化学因素. 鉴于 MLT 大气稀薄, 对它们的测量十分困难, 一直以来都是大气科学领域一个极具挑战的研究热点, 研究和探测 MLT 的大气风场 (风速、温度、体发射率等) 能更好地理解全球气候变化. 国际上, PSMOS (planetary scale mesopause observing system) Workshop 是一个 MLT 区域大气观测网^[1]; SATI (spectral airglow

temperature imager) 探测这一区域温度的测温精度理论达 1 K^[2]; WINDII (wind imaging interferometer) 利用广角 Michelson 干涉仪 (MI) 的“四强度法”探测了地球上空 80—300 km 高层的大气风场^[3]; HRDI (high resolution Doppler imager)^[4] 基于 Fabry-Pérot 干涉仪 (FPI) 利用多原子分子的“转动谱线测温法”探测了 10—120 km 的大气风速和温度; 鉴于 WINDII 利用压电陶瓷步进 MI 的一个反射镜, 产生 1/4 波长步长的“四强度法”有运动部件, WAMI (waves michelson interferometer) 将 MI 的两个反射镜固定, 将一个反射镜镀上反射膜并四分区, 使每个分区的镀膜依次产生 1/4 波长的光

* 国家自然科学基金 (批准号: 61675165)、陕西自然科学基金 (批准号: 2016JM1011) 和西安理工大学特色项目 (批准号: 2015TS012) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: htp1801@163.com

程差, 实现“四强度法”对地球中层及高层大气的静态测风^[5], DASH (Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy) 是在MI的两臂上添加两个固定光栅, 利用空间外差技术探测高层大气风场^[6].

中国的“子午工程”是一个具备多种观测手段的中高层大气监测网^[7], 中国科学院空间中心利用FPI对北京上空的高层大气风速进行被动探测^[8], 武汉大学^[9]和中国科技大学^[10]利用激光雷达对高层大气风场进行主动探测研究; 西安交通大学^[11,12]和我们课题组提出了利用反射式液晶LCoS (liquid crystal on silicon) 替换MI的一个反射镜, 通过相位调制技术实现“四强度法”测风模式^[13-15]. 我们研制了地基气辉成像干涉仪 (ground based airglow imaging interferometer, GBaII) 样机, 成功地探测了西安城区上空90—100 km的大气风速和温度^[16-17], GBaII融合了广角MI测风和FPI测温的优点于一体, 利用大空气隙广角MI的“四强度测风”和“转动谱线测温”来提高风场探测精度^[18,19]. 鉴于GBaII的研制与测试涉及气辉光源、大气传输、探测模式、正演、定标、反演和探测器等内容^[20], 每台仪器研制出来都要定标. 本文研究GBaII的定标, 以推动国内被动遥感探测高层大气风场的进程.

2 GBaII的定标

GBaII用于探测地球上空90—100 km的大气风速、温度、体发射率等参量. GBaII参数如下: 以

O₂(0—1) 867.7 nm附近的12条转动谱线(865.2, 865.4, 865.7, 865.8, 866.2, 866.3, 866.6, 866.8, 867.2, 867.3, 867.7, 867.8 nm)和O(¹S) 557.7 nm单线气辉为探测光源, MI光程差为7.495 cm, 视场角±6°, CCD 512 × 512 像素, 单像素20 μm. 利用广角MI和FPI构成两个4*f*(*f* 焦距)光学系统. 鉴于GBaII使用了广角、消色差和热补偿条件的视场展宽技术, 即便光程差达7.495 cm, 测风时也仅从一个干涉条纹中获取大气温度和风速信息.

定标在GBaII的光学设计、研制过程、实测过程中都很重要, 直接涉及GBaII探测大气物理量的精度. GBaII的定标包括室内和室外定标, 室外定标基本上都要重复室内定标的相关内容, 所以我们着重对GBaII实验室定标进行定标考量. GBaII的定标内容包括: 光源谱线的测试定标、滤光片透过率测试、成像干涉条纹中心位置、暗噪声、CCD平场、整个光学系统衰减系数、步进步长、光程差随入射角变化量、仪器响应度、零风速相位等的定标, 其中光源谱线的定标测试和滤光片透过率测试定标已发表在参考文献16中, 下面介绍GBaII的其余参量定标方法及结果. GBaII的定标光路如图1所示. 以GBaII样机整体结构光路为基础, 用到NEWPORT公司的6032型笔形定标灯、直径0.3 m的4π式积分球、632.8 nm/532.0 nm红绿激光、CCD探测器、电控位移平台等.

2.1 CCD上GBaII拍摄干涉条纹中心的确定

GBaII拍摄气辉得到的成像干涉条纹圆心不

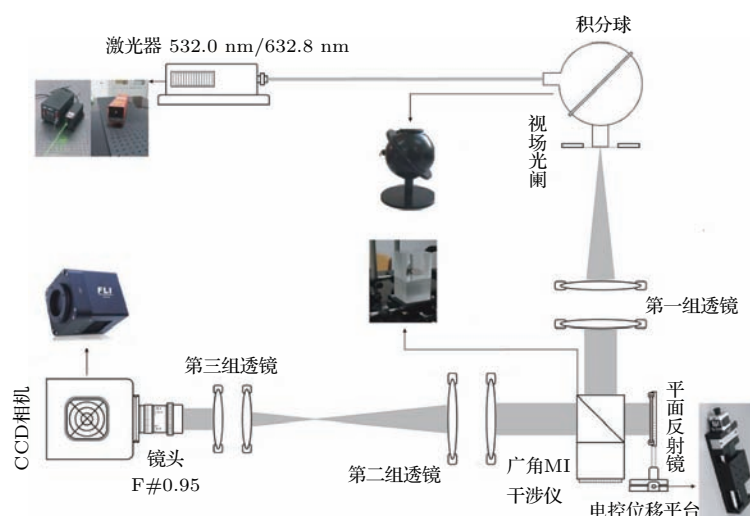


图1 GBaII实验室定标总体图
Fig. 1. Calibration laboratory equipment of GBaII.

一定恰好在 CCD 的中心位置, 该项定标就需确定气辉产生的干涉条纹的圆心到底在 CCD 的哪个像素处, 才能提高大气风场的反演精度. 除了利用参考文献 [16] 提供的两种定标方法外, 我们还用最小二乘法确定干涉条纹的中心位置. 假设在 GBII 拍摄得到半径为 r 某个干涉圆环上, 采集数据样本点的坐标为 (X_i, Y_i) ($i \in 1, 2, 3, \dots, N$), 设圆心坐标为 (A, B) , 样本点到圆心距离为 d_i , 则

$$d_i^2 = (X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2. \quad (1)$$

令 $a = 2A$, $b = 2B$ 和 $c = A^2 + B^2 - r^2$, 则圆环上某点 (X_i, Y_i) 距离平方 d^2 与 r^2 之差为

$$\delta_i = d_i^2 - r^2 = X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c. \quad (2)$$

令

$$Q(a, b, c) = \sum_i \delta_i^2 = \sum_i [(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)]^2, \quad (3)$$

如果 $Q(a, b, c)$ 最小, 解方程 (3) 就得干涉圆环的圆心坐标 A, B 和 r :

$$A = \frac{a}{2}, \quad B = \frac{b}{2}, \quad r = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2 - 4c}. \quad (4)$$

利用 MATLAB 编程求解方程 (1)–(4) 再做图, 得到某条干涉条纹圆心在 CCD 上的坐标及半径如图 2 所示, 圆心坐标在 CCD 的 (123.3, 121.1) 像素位置, 而并非所用 CCD 的正中心 128×128 像素处 (所用 CCD 像素为 512×512 , 利用 2×2 为 1 个 bin).

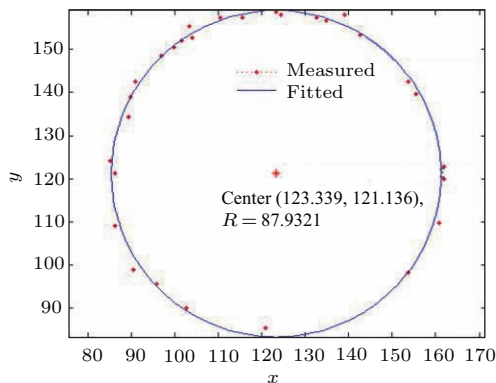


图2 GBII 成像干涉条纹的圆心坐标的定标

Fig. 2. Calibration of the centre of the interference fringe.

2.2 CCD 暗噪声定标

对图 1 所示的积分球, 我们需检测其出射光的均匀性: 用 532 nm 激光从 2π 结构射入、 4π 结构射出, 产生平面光源, 将仪器置于完全黑暗环境下拍

摄, 用 10×10 作为一个 bin 得到 CCD 曝光图, 进行数据处理得到图 3 所示的灰度值分布图. 不考虑 CCD 上的两个坏点, 可见积分球射出光线的灰度值在 2084—2196, 所有数据平均灰度值为 2125, 出射光的均匀性为 98% (出厂标准为 99%), 可见该积分球产生的面光源有很好的均匀性. 当然, 后面 CCD 的平场定标可以进一步弥补出射光的均匀性.

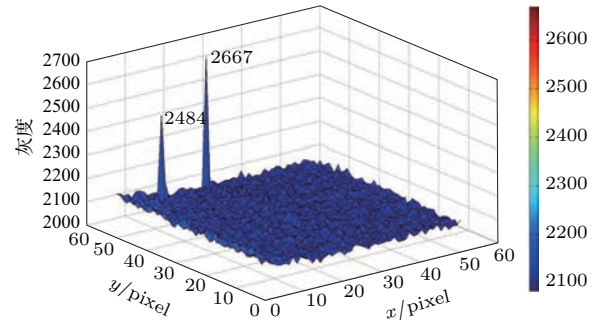


图3 (网刊彩色) 积分球出射光的均匀性测试

Fig. 3. (color online) Uniformity test for the emergent light of the integrating sphere.

利用 GBII 获得成像干涉条纹进行大气风速和温度的反演时, 首先需要剪掉 CCD 的暗噪声, 才能做进一步计算和分析, 这样对 GBII 暗噪声测试或暗噪声定标就很有必要. CCD 暗噪声是在没有任何光信号输入到 GBII 系统情况下, CCD 仍有输出信号. 将暗噪声转换为电流则称作暗电流, GBII 的暗噪声用每个像素的电子计数值来表示. 暗噪声定标是将 GBII 的密封性和遮光性做得足够好的情况下, 将 CCD 的快门关闭, 再与真实拍摄条件相同的情况下进行一次暗拍摄, 便可获得暗噪声值. 本实验用 632.8 nm 激光, 室温 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、曝光时间为 0.1 s, 分别步进测试暗电流, 再用 MATLAB 归一化并读取相应像素灰度值, 用 632.8 nm 激光进行 GBII 的暗噪声定标的测试, 结果如图 4(a) 所示, 从而得到 CCD 暗电流平均值为每个像素有 2009.2 个电子计数. 从图 4(a) 还可见 CCD 上已有 1 个像素存在坏点, 反演时需删掉这个像素信息.

2.3 CCD 的平场定标

CCD 的平场定标也称相对定标, 是针对 CCD 各像素对入射光敏感程度的定标. 一台 CCD 相机, 若输入一个均匀平行面光源, 理论上在其焦平面上的各像元均有相同输出. 但是, 实际上由于轴线光束有一定入射角, 导致 CCD 各像元的实际输出

不同, 在视场中心 CCD 输出较大, 沿中心到边缘输出逐渐降低. 另外, 当一个标准平面光照射到成像光学系统时, 在视场中心处的亮度最大, 边缘逐渐变暗, 从而导致渐晕现象, CCD 平场定标的目的就是所得亮度非均匀的图像转化为一副处处均匀的图像. 具体操作方法如下: 先计算出 CCD 边缘区域各亮度与中心区域亮度的比值, 再将比值取倒数, 获得一个二维平场系数矩阵, 在后期图像处理时将原始图像乘以这个二维平场系数矩阵便可得到均匀图像, 这便是 CCD 的平场定标. 平场系数为

$$F_c = (I_{\max} - I_{\text{Dark}})/(I - I_{\text{Dark}}), \quad (5)$$

其中 I_{\max} 为 CCD 读取的最大强度 (灰度值), I_{Dark} 为暗电流, I 为各像素点的强度值. 每幅干涉图的各像素点均有对应的平场系数, 每幅图对应 512×512 的平场系数矩阵, 最后计算 512×512 矩阵系数的平均值就得到我们所需的平场系数矩阵. 拍摄平场定标的原始图实验时, 需将 GBII 的 MI 连接空气隙的那面反射镜的反光用黑屏遮住, 以消除干涉效应, 在积分球位置处放置 632.8 nm 红色激光, 开启 CCD, 得到 632.8 nm 的平场系数矩阵如图 4(b), 可见平场系数在 1—16.7037 内变化. 我们得到 CCD 的平场前后的成像干涉图如图 5 所示. 从图 5 可见, CCD 上的某条干涉条纹达到均匀的灰度值.

2.4 GBII 光程差随入射角变化的定标

GBII 的光学设计系统中使用了一个大空气隙 MI, GBII 的光程差随入射角的变化关系为

$$\Delta_{\theta} = 2(n_1 d_1 - n_2 d_2 - n_3 d_3) - \sin^2 \theta \left(\frac{d_1}{n_1} - \frac{d_2}{n_2} - \frac{d_3}{n_3} \right), \quad (6)$$

$$- \frac{\sin^4 \theta}{4} \left(\frac{d_1}{n_1^3} - \frac{d_2}{n_2^3} - \frac{d_3}{n_3^3} \right) \dots, \quad (6)$$

其中 θ 为入射角; n_1, n_2 和 n_3 分别为两种玻璃和空气的折射率; d_1, d_2 和 d_3 分别为对应玻璃和空气隙的长度. (6) 式右边第一项是 GBII 的基准光程差, 根据广角条件、热补偿、消色差条件优化出 GBII 的基准光程差为 7.495 cm. 虽然广角条件使 (6) 式中 $\sin^2 \theta$ 前系数为 0, 但 (6) 式 $\sin^4 \theta$ 一项还不为 0, 所以光程差随入射角的变化趋势还存在, 我们希望尽可能地降低其变化, 也就是说对 7.495 cm 的大光程差, 只需调制出一个干涉条纹来探测高层大气的风速和温度等信息, 这就涉及对 GBII 光程差随入射角的变化量定标. 在本定标实验中, 鉴于使用的笔形定标灯是复色光源, 我们只能借助图像边缘亮环的相位变化与中心亮斑相位变化的差值来获取光程差的变化量. 取 GBII 获得的每一幅图像外围亮环的 9 个像素 (3×3 为 1 个 bin) 的平均值, 然后将这些值列在一起进行计算和分析, 结果如图 6 所示. 对图 6 的实验离散点进行正弦拟合, 得到图 6 实线曲线, 其拟合表达式为

$$y_1 = 3163.350 \sin[\pi(x - 44.37279)/78.590] + 28269.745. \quad (7)$$

图 6 的曲线拟合的均方根标准偏差达到 89.5%. 如果一个完整周期为 157.18 步, 对应的入射角和波长分别为 10.24° 和 868.2 nm, 因此可算出光程差相对中间的变化值为 308.993 nm, 换算成条纹为 0.356 个. 即当入射角为 10.24° 时, 光程差相对入射角为 0° 时变化了 0.356 个条纹, 相当于 0.712π 相位, 这样就完成了 GBII 的光程差随入射角变化量定标.

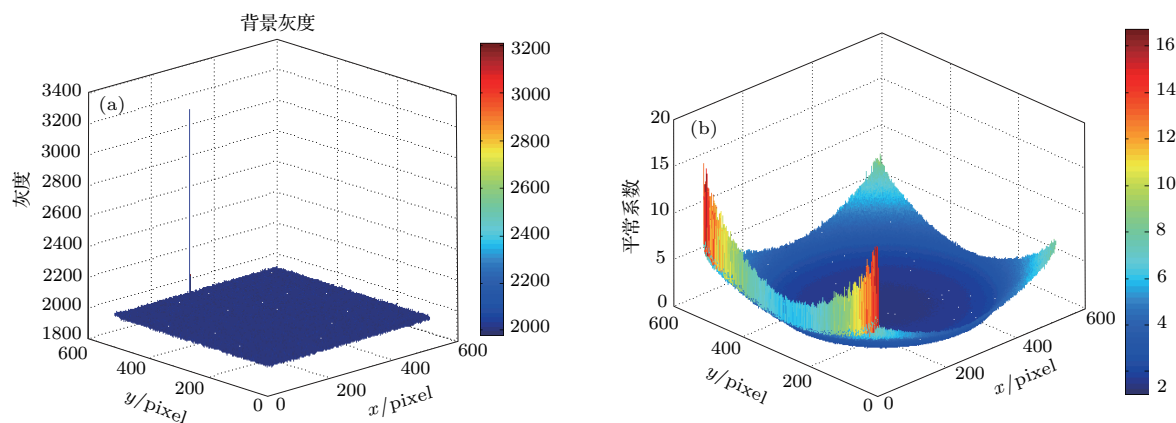


图 4 (网刊彩色) 632.8 nm 激光对 GBII 的暗电流检测 (a) 和平场系数图 (b)

Fig. 4. (color online) CCD's dark current (a) and flat field detect (b) by 632.0 nm laser.

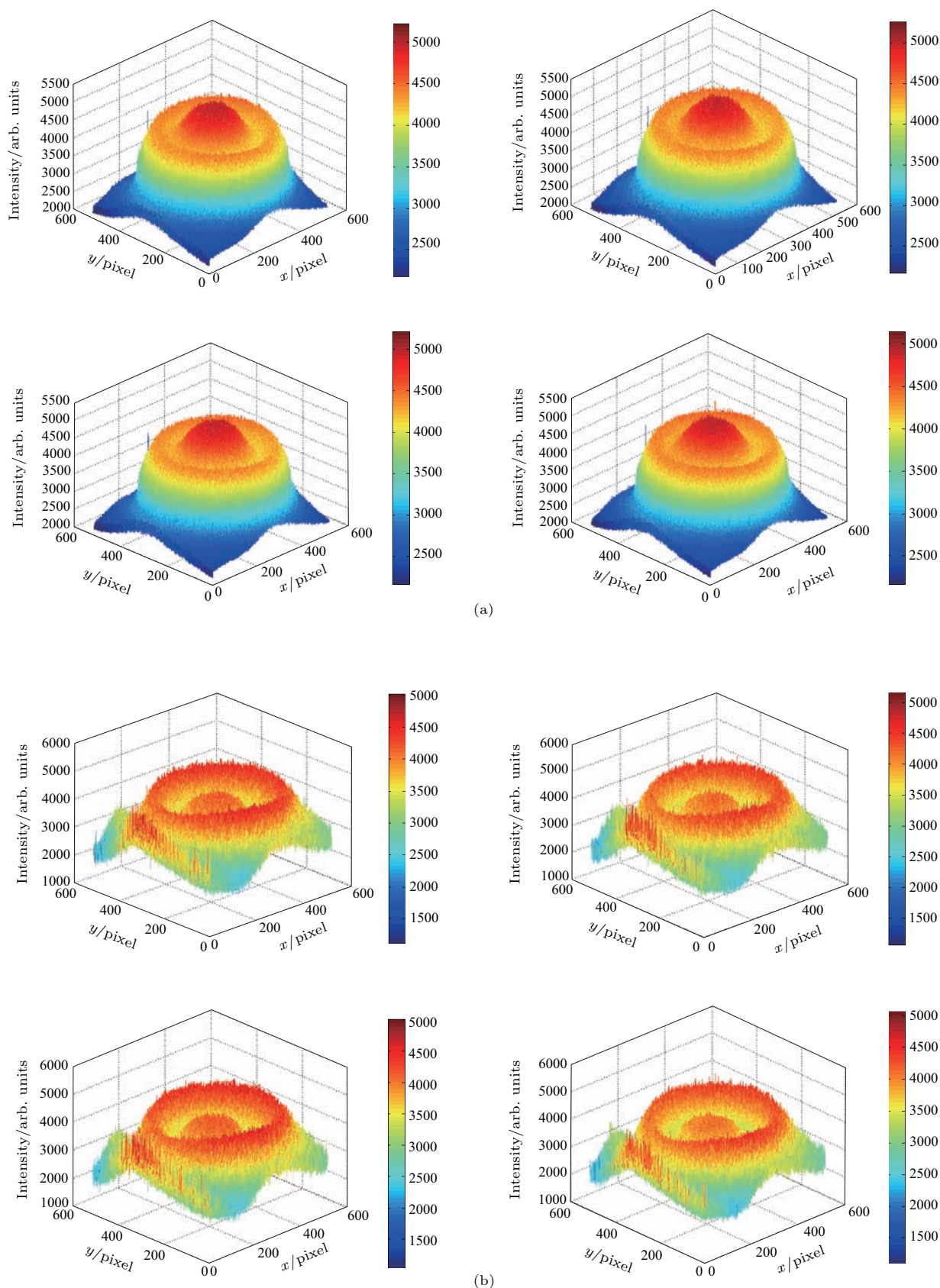


图5 (网刊彩色)用632.8 nm激光对GBAII的CCD进行平场定标的前后结果 (a) 632.8 nm平场前的4幅干涉图; (b) 632.8 nm平场后的4幅干涉图

Fig. 5. (color online) Calibration comparison of four interference fringes before and after by CCD's flat field: (a) Four imaging interference fringes before flat-field by 632.8 nm; (b) four interference fringes after flat-field by 632.8 nm.

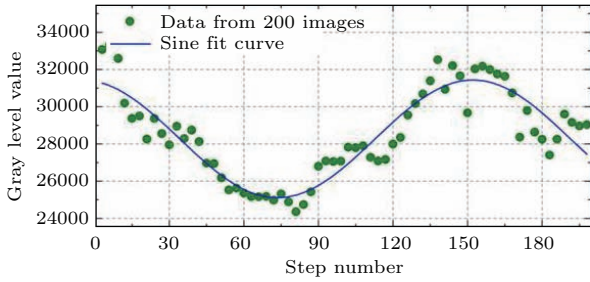


图6 (网刊彩色) 10.24°入射角时相位步进间隔的测试结果

Fig. 6. (color online) Test result of phase step interval at incident angle of 10.24°.

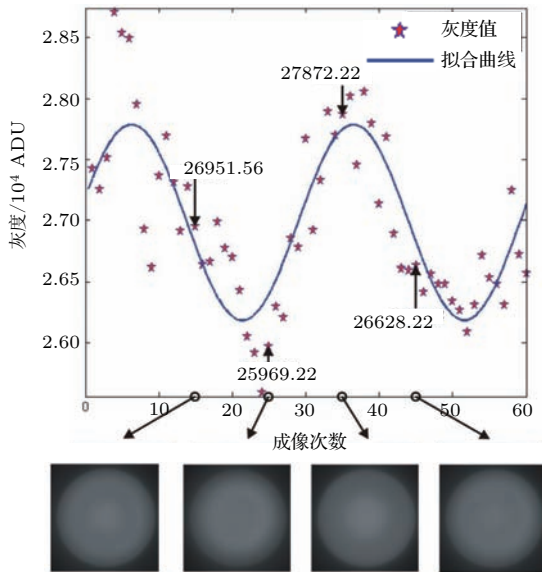


图7 (网刊彩色) 532.0 nm对GBAII的相位步进定标结果
Fig. 7. (color online) Phase step calibration by 532.0 nm laser.

2.5 GBAII相位步进的步长定标

对于“四强度法”的测风技术，需要利用GBAII所获得的一个干涉条纹，使其相位以 $\pi/2$ 步进4次，亦即将气辉波长以 $\lambda/4$ 步进4次，获得一个干涉条纹中的4个强度值，进一步反演出大气风速和温度^[17,18]。为此，一个精确的步进装置尤为重要。作为地基版GBAII，我们使用了国产TSA50-C型精密电控位移平台和进口精细纳米平移台(Sigma Fine Stage)进行步进测试定标，以确定步长大小。精细纳米平移台对GBAII的步进定标很便利，但我们成功地利用了国产TSA50-C对GBAII进行步进定标：GBAII使用的波长之一为 $\lambda = 867.7 \text{ nm}$ 气辉， $\lambda/4=217 \text{ nm}$ 。我们将TSA50-C平台调在64细分状态，其每步的最小分辨率约为78 nm，这不能满足GBAII的要求。因此，我

们将平移台的平台横放，并与光轴呈一个微小夹角(约 1°)，这样步进精度就大大提高，其步进间隔减小到 $78 \times \tan 1^\circ \text{ (nm)}$ ，虽然这样做会引起步进总行程等参数的降低，但由于GBAII的行程在3 mm左右，因此，这样的改进完全适应探测需求。

利用532.0 nm的激光对GBAII的相位步进定标，实验结果如图7所示。对光程差步进一个周期左右的结果进行等间隔扫描拍摄，拍摄了60幅干涉图像，CCD工作在 $-20^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ 环境下，曝光时间0.25 s。如果光源换为632.8 nm的红光，加入窄带干涉滤光片，用0.05 s曝光时间，随着步进规律连续拍摄200幅干涉图进行分析。对于每一幅干涉图，选取中心像素周围的9个像素($3 \times 3 \text{ bin}$)灰度值并取平均，然后将这些值列在一起进行计算和分析，结果如图8所示。对图8的实验离散点进行正弦拟合，得到图8所示的实线曲线可用下式表达：

$$y_2 = 154.944 \sin[\pi(x - 73.946)/106.905] + 1115.956, \quad (8)$$

该曲线拟合的均方根标准偏差达到90.34%。亦即一个完整干涉条纹的周期为213.81步，对应一个波长868.2 nm，因此一步间隔为4.06 nm，对应的步进相位为 0.0094π ，这样就完成了中心波长的步进定标。

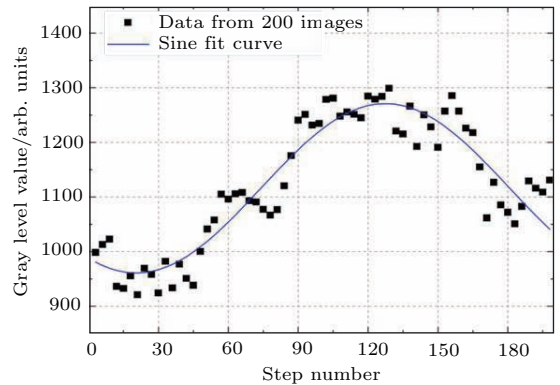


图8 GBAII的0°入射角时相位步进间隔的测试结果
Fig. 8. Phase step interval test at incident angle of 0°.

2.6 GBAII光学系统衰减系数的定标

到达GBAII前端的气辉光线经MI干涉仪调制后将在CCD成像，对这个过程的模拟称为GBAII仪器的正演，CCD上将得到四步进的正演成像干涉图像。GBAII的正演需将气辉、大气辐射传输、成像干涉仪、滤波函数和成像CCD等子模型都考虑进去，建立风场探测的正演方程：

$$\begin{aligned}
 N_{m,n,k} &= I_{\text{abs}} \cdot I_{T-\lambda_1} \cdot R_{m,n} \cdot \tau_{f(m,n)}(\lambda_1) \cdot \tau_{\text{ins}} \cdot \tau_{\text{trans}} \cdot D_{m,n} \cdot [1 + V \cdot U \cdot \cos(2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \Delta_{m,n} + \phi_k)] \\
 &\quad + I_{\text{abs}} \cdot I_{T-\lambda_2} \cdot R_{m,n} \cdot \tau_{f(m,n)}(\lambda_2) \cdot \tau_{\text{ins}} \cdot \tau_{\text{trans}} \cdot D_{m,n} \cdot [1 + V \cdot U \cdot \cos(2\pi \cdot \sigma_2 \cdot \Delta_{m,n} + \phi_k)] \\
 &\quad \dots \\
 &\quad + I_{\text{abs}} \cdot I_{T-\lambda_{12}} \cdot R_{m,n} \cdot \tau_{f(m,n)}(\lambda_{12}) \cdot \tau_{\text{ins}} \cdot \tau_{\text{trans}} \cdot D_{m,n} \cdot [1 + V \cdot U \cdot \cos(2\pi \cdot \sigma_{12} \cdot \Delta_{m,n} + \phi_k)] \\
 &\quad + I_{\text{b}}(N_{\text{noise}}) \\
 &= \sum_{i=1}^{12} I_{\text{abs}} I_{T-\lambda_i} R_{m,n} \tau_{f(m,n)}(\lambda_i) \tau_{\text{ins}} \tau_{\text{trans}} D_{m,n} [1 + V U \cos(2\pi \sigma_i \Delta_{m,n} + \phi_k)] + I_{\text{b}}(N_{\text{noise}}), \quad (9)
 \end{aligned}$$

其中 $I_{\text{abs}} \cdot I_{T-\lambda_i}$ 是某一大气温度 T 下第 i 条谱线的绝对强度和相对强度乘积, $R_{m,n}$ 为 (m, n) 像素的响应度, $\tau_{f(m,n)}(\lambda_i)$ 第 i 条谱线的滤光片透过率, τ_{ins} 为仪器系统的整体透过率, τ_{trans} 为大气传输透过率, $D_{m,n}$ 为光学系统衰减系数, V 为谱线可见度, U 为仪器可见度, λ_i 和 σ_i 分别为谱线的波长和波数, $\Delta_{m,n}$ 为整体光程差, ϕ_k 为步进相位, $I_{\text{b}}(N_{\text{noise}})$ 为符合正态分布的噪声计数值. (9) 式中涉及 82 个参数, 利用 MATLAB 模拟, 得到相应的成像干涉条纹, 再从干涉图中提取大气风速和温度的预期理论值.

由于图 1 所示的 GBII 设计系统中有 3 组透镜组合、1 个 MI 成像干涉仪和 F-P 滤光片等器件, 涉及光源经过光学仪器的多次透射. 虽然单个仪器透过率的理论值可知, 但 (12) 式中 GBII 的整体光学系统透过率 τ_{ins} 还需定标而获取. 由于 GBII 的整体光学系统透过率 τ_{ins} 定标与 CCD 平场定标联系在一起, 在 GBII 的平场定标基础上做些改动即可, 我们不再需要整幅干涉图的平场系数矩阵, 而是直接使用原图中各像素相对最亮像素的比值组成的系数矩阵, 再把图像划分为以一个像素为宽度的环, 并将这一矩阵中的系数投影到各自的环中然后求环的平均值, 最终得到 1 个 1 维矩阵, 代表从中心到边缘的亮度变化, 从而构成了 GBII 的光学系统衰减系数. 在 GBII 的反演中, 我们需要将图像分环并取平均值, 而正演模型也需乘上光学系统衰减系数, 这样反演与正演的数据就可以较好地得到匹配. 以我们测试的原始图为基础, 使用 IDL 编程获得光学系统衰减系数如图 9 所示. 对图 9 进行多项式拟合:

$$\begin{aligned}
 y_3 &= 0.99914 - 7.59941 \times 10^{-4}x \\
 &\quad + 2.39855 \times 10^{-5}x^2 - 1.28709 \times 10^{-6}x^3 \\
 &\quad + 1.48271 \times 10^{-8}x^4 \\
 &\quad - 6.45151 \times 10^{-11}x^5. \quad (10)
 \end{aligned}$$

该曲线拟合均方根标准偏差达到 99.98%, 因此该式将直接加入到正演方程 (9) 式使用. 对于 GBII 的每一次拍摄我们都需要这样的定标来获得特定光学系统衰减系数的表达式.

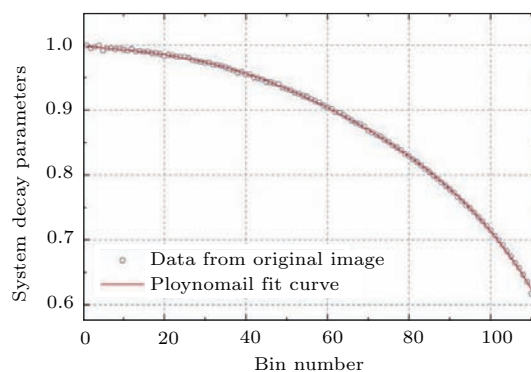


图 9 (网刊彩色) GBII 的光学系统衰减系数

Fig. 9. (color online) GBII's system decay coefficient.

2.7 GBII 响应度的定标

GBII 的正演方程 (9) 中的仪器响应度 R 值与正演模型的预期电子计数和真实测量值是否符合尤为重要, 但要精确对响应度进行标定是件很困难的事情. 本文介绍我们摸索的响应度定标方法: 由于笔形定标灯的光强实在太弱, 照度计无法响应, 采用 632.8 nm 氦氖激光器作光源. 对于单波长而言, 在 (9) 式中将干涉项、大气传输项、衰减系数项、滤光片项都消除, 得到简化响应度 R 表达式:

$$R = \frac{N_s - N_d}{I(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot t}, \quad (11)$$

其中 N_s 是 CCD 像素输出的电子计数值或灰度值; N_d 为暗噪声计数值; t 为曝光时间, I 为输入光强, 单位为瑞利 (Rayleigh); τ 为透过率; $\Delta\lambda$ 为谱线的半高宽; R 单位是 $\text{counts} \cdot (\text{Rayleigh} \cdot \text{s})^{-1}$. 照度与瑞利转化关系为

$$I[\text{Rayleigh}] = \frac{E[\text{lx}]}{1.682 \times 10^{-10}}. \quad (12)$$

我们给出GBAII响应度定标的一次实验结果: 光源照度 20 lx, 平均强度 $N_s = 28696$ counts, $N_d = 2096$ counts, $\tau = 0.18$, $\Delta\lambda = 10^{-3}$ nm, 曝光时间 $t = 0.25$ s, 可得 $R = 4.97 \times 10^{-3}$ counts·(Rayleigh·s) $^{-1}$. 在GBAII最终观测和反演中, 我们需不断调节诸如透过率和谱线宽度等参数来获取更加真实的响应度, 从而使正演图像与观测图像相匹配, 提高探测精度.

2.8 GBAII零风速相位的定标

GBAII探测高层大气的基本方程为

$$I = I_0[1 + UV \cos(\phi_0 + \phi_w + \phi_s)], \quad (13)$$

其中 I_0 为气辉最大光强; U 和 V 分别为仪器和谱线可见度; ϕ_0, ϕ_w, ϕ_s 分别为仪器固定光程差引起的相位、视线方向上风速引起的相位和步进相位. 零风速定标就是要找出零风速, 亦即对应找出 (13) 式中 $\phi_w = 0$ 时的相位 ϕ_0 , 如果相位 ϕ_s 步进 4 次, 则 GBAII 的反演方程中就构造出实际观测值矩阵 \mathbf{g} 和系数矩阵 \mathbf{A} , 则可得反演表观量 \mathbf{F} 矩阵:

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{g}. \quad (14)$$

GBAII反演中系数矩阵 \mathbf{A} 应为已知量, 通过定标求解, 求解矩阵 \mathbf{A} 的定标就是零风速相位定标:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1UV \cos(\phi_{10} + \phi_1) & -UV \sin(\phi_{10} + \phi_1) \\ 1UV \cos(\phi_{10} + \phi_2) & -UV \sin(\phi_{10} + \phi_2) \\ 1UV \cos(\phi_{10} + \phi_3) & -UV \sin(\phi_{10} + \phi_3) \\ 1UV \cos(\phi_{10} + \phi_4) & -UV \sin(\phi_{10} + \phi_4) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

零风速相位定标通常选一个与观测光源谱线相同的定标灯来模拟大气信号, 由于定标灯与仪器没有相对运动, 不产生多普勒频移, 也就没有风速相位. 对于 GBAII 的零风速定标, 我们选择将 GBAII 的物镜朝着天空正上方进行拍摄, 由于通常认为大气垂直风速几乎为零, 因此拍摄到的图像可以认为不存在多普勒频移, 风速的相位为 0. 把 (15) 式展开, 步进 4 次得到零风速的干涉条纹 4 个强度值为

$$\begin{cases} I_1 = J_1 + \gamma VU \cos(\phi_{10} + \phi_1) = J_1 + \gamma VU(\cos \phi_{10} \cos \phi_1 - \sin \phi_{10} \sin \phi_1), \\ I_2 = J_1 + \gamma VU \cos(\phi_{10} + \phi_2) = J_1 + \gamma VU(\cos \phi_{10} \cos \phi_2 - \sin \phi_{10} \sin \phi_2), \\ I_3 = J_1 + \gamma VU \cos(\phi_{10} + \phi_3) = J_1 + \gamma VU(\cos \phi_{10} \cos \phi_3 - \sin \phi_{10} \sin \phi_3), \\ I_4 = J_1 + \gamma VU \cos(\phi_{10} + \phi_4) = J_1 + \gamma VU(\cos \phi_{10} \cos \phi_4 - \sin \phi_{10} \sin \phi_4), \end{cases} \quad (16)$$

其中 $\gamma = \sum_{i=1}^{12} I_{\text{abs}} I_{T-\lambda_i} R_{m,n} \tau_{m,n,\lambda_i} D_{m,n} \varepsilon_i$. 将 (16) 式中 J_1 和 γ 消掉, 得到

$$\frac{I_1 - I_2}{I_3 - I_4} = \frac{(\cos \phi_1 - \cos \phi_2) \cos \phi_{10} - (\sin \phi_1 - \sin \phi_2) \sin \phi_{10}}{(\cos \phi_3 - \cos \phi_4) \cos \phi_{10} - (\sin \phi_3 - \sin \phi_4) \sin \phi_{10}}. \quad (17)$$

再进行简单运算可得 ϕ_{10} :

$$\phi_{10} = \arctan \left(\frac{\sin \phi_{10}}{\cos \phi_{10}} \right) = \frac{(I_1 - I_2)(\cos \phi_3 - \cos \phi_4) - (I_3 - I_4)(\cos \phi_1 - \cos \phi_2)}{(I_1 - I_2)(\sin \phi_3 - \sin \phi_4) - (I_3 - I_4)(\sin \phi_1 - \sin \phi_2)}. \quad (18)$$

(18) 式右侧各项参数均已知, 因此 ϕ_{10} 就可求出, 再加之仪器可见度 U 也能通过定标来获得, 因此系数矩阵 \mathbf{A} 便被求解出, 从而就可进行风速和温度的反演了. 在长期观测中, 系数矩阵 \mathbf{A} 会随着温度等环境条件而变化, 因此, 需要频繁地定标来获取准确的系数矩阵.

通过 GBAII 的定标实验, 利用 532.0 nm 和 632.8 nm 激光进行零风速定标拍摄, 入射激光为

0° 时, 取 532.0 nm 的 60 幅成像干涉图中的第 1, 8, 16 和 24 幅, 632.8 nm 成像干涉图取 70 幅图中的第 1, 13, 26 和 39 幅, 分别利用四强度法和 MATLAB 软件, 得出零风速的初相位分别如图 10 所示, 它们对应条纹中心位置 (255, 261) 和 (247, 300) 处的零风速相位分别为 -9.2442° 和 -68.6353° , 这样就实现了零风速定标.

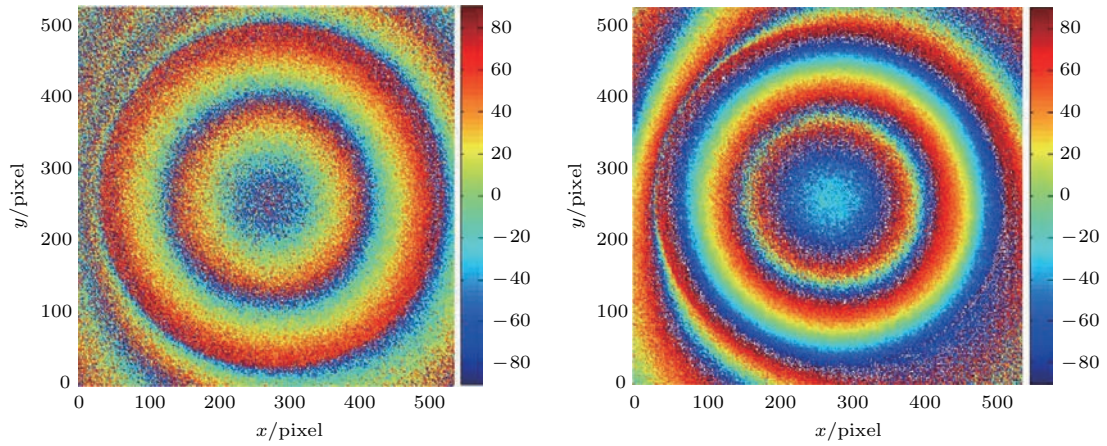


图10 (网刊彩色) 零风速相位定标的实验结果 (左 532.0 nm 激光, 右 632.8 nm 激光)

Fig. 10. (color online) Phase calibration for zero wind speed by laser (left 532.0 nm, right 632.8 nm).

3 结 论

GBAII 探测高层大气风速和温度的方法, 是将 GBAII 的正演结果与实验测试结果相减, 如果二者的差值为 0, 那测试结果就是对应的正演值, 所以 GBAII 研制过程中的正演方程非常重要. 本文的定标研究都围绕正演方程 (9) 中的各参数对风速探测精度的影响而展开讨论. 分别对干涉条纹的中心位置、暗噪声、CCD 平场、整个光学系统衰减系数、步进步长、光程差随入射角变化量、仪器响应度和零风速相位定标等理论和实验的研究, 逐一得到实验结果. 虽然未给出 (9) 式各项参数的定标对测风精度的具体影响, 但根据系统论的相关原理, 系统中各参量均仔细定标后, GBAII 整体系统的测风精度有一个好的提升. 希望本文能推动国内被动遥感探测高层大气风场的研究进展.

参考文献

[1] Pancheva D, Mitchell N J, Hagan M E, Manson A H, Meek C E, Luo Y 2002 *J. Atmos. Sol-Terr Phys.* **64** 1011
 [2] Sargoytchev S I, Brown S, Solheim B H 2004 *Appl. Phys.* **43** 5712
 [3] Shepherd G G, Thuillier G, Gault W A 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 10725
 [4] Hays P B, Abreu V J, Dobbs M E 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 10713
 [5] Ward W E, Power A, Langille J 2008 *37th COSPAR Scientific Assembly* 3424
 [6] Harlander J M, Englert C R, Babcock D D 2010 *Opt. Express* **18** 26430

[7] Meridian project <http://www.meridianproject.acn/> [2008]
 [8] Yuan W, Xu J Y, Wu Y F, Bian J C, Chen H B 2009 *Adv. Space Res.* **43** 1364
 [9] Shuai J, Huang C M, Zhang S D, Yi F, Huang K M, Gan Q, Gong Y 2014 *Chin. J. Geophys.* **57** 2465 (in Chinese) [帅晶, 黄春明, 张绍东, 易帆, 黄开明, 甘泉, 龚韵 2014 地球物理学报 **57** 2465]
 [10] Shuai J, Huang C M, Zhang S D, Yi F, Huang K M, Gan Q, Gong Y 2014 *Chin. J. Geophys.* **57** 2465 (in Chinese) [帅晶, 黄春明, 张绍东, 易帆, 黄开明, 甘泉, 龚韵 2014 地球物理学报 **57** 2465]
 [11] Tang Y H, Zhang C M, Liu H C, Chen G D, He J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4065 (in Chinese) [唐远河, 张淳民, 刘汉臣, 陈光德, 贺健 2005 物理学报 **54** 4065]
 [12] Zhang X N, Zhang C M, Ai J J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 030701 (in Chinese) [张宣妮, 张淳民, 艾晶晶 2013 物理学报 **62** 030701]
 [13] Gao H Y, Hua D X, Tang Y H, Cao X G, Jia W L 2013 *Opt. Commun.* **292** 36
 [14] Gao H Y, Tang Y H, Hua D X 2011 *JQSRT* **112** 268
 [15] Tang Y H, Qin L, Gao H Y, Zhu C, Wang D Y 2011 *Opt. Commun.* **284** 2672
 [16] Gao H Y, Tang Y H, Hua D X, Liu H C, Cao X G, Duan X D, Jia Q J, Qu O Y, Wu Y 2013 *Appl. Opt.* **52** 8650
 [17] Tang Y H, Duan X D, Gao H Y, Qu O Y, Jia Q J, Cao X G, Wei S N, Yang R 2014 *Appl. Opt.* **53** 2272
 [18] Gao H Y, Tang Y H, Hua D X, Liu H C 2011 *Appl. Opt.* **50** 5655
 [19] Wang J, Cui M, Lu H, Wang L, Yan Q, Liu J J, Hua D X 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 089202 (in Chinese) [王骏, 崔萌, 陆红, 汪丽, 闫庆, 刘晶晶, 华灯鑫 2017 物理学报 **66** 089202]
 [20] Sun Y W, Liu W Q, Xie P H, Chan J L, Zeng Y, Xu J, Li A, Si F Q, Li X X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 140705 (in Chinese) [孙友文, 刘文清, 谢品华, 陈嘉乐, 曾议, 徐晋, 李昂, 司福祺, 李先欣 2012 物理学报 **61** 140705]

Calibrations of ground based airglow imaging interferometer for the upper atmospheric wind field measurement*

Tang Yuan-He[†] Cui Jin Gao Hai-Yang Qu Ou-Yang Duan Xiao-Dong
Li Cun-Xia Liu Li-Na

(School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 23 March 2017; revised manuscript received 7 April 2017)

Abstract

Ground based airglow imaging interferometer (GBAII) prototype made by our group is used to successfully detect the atmospheric wind velocity and temperature at the altituded of 90–100 km. In order to improve GBAII's velocity accuracy, its calibrations are studied in this paper where covered are the calibration of imaging interference fringe center position, CCD dark noise and flat field, the decay coefficient of GBAII's optical system, the phase step length, GBAII's optical path difference with the angle of incidence, GBAII instrument response and the zero wind speed phase calibration, etc. The theoretical and experimental researches of calibration show the following conclusions. The fringe center coordinates by shooting 30 imaging interference fringes are confirmed on the pixel of CCD (123.3, 121.1) by using the least squares method; by 632.8 nm laser for the CCD flat field calibration, the parameters of CCD's flat field coefficients, dark intensity, dead pixels and the imaging interference fringes before and after flat field are all obtained, respectively; the comparison between GBAII's one edge fringe bright whose incidence angle of 10.24° and the center fringe bright whose incidence angle of 0° shows that the edge fringe phase is stepped by 0.356 fringes relative to the center fringe. After taking the sample of 200 imaging interference fringes, from the sine fit curve of the phase step interval at an incident angle of 10.24° , the fitted root mean square (RMS) deviation is obtained to be 90.34% and the step interval of 4.06 nm for one interference fringes is corresponding to the stepped phase of 0.0094π ; According to the forward formula, GBAII's system decay coefficient calibration is performed after taking imaging interference fringes by IDL programming, the RMS deviation of fitted curve is 99.98%; GBAII's response is 4.97×10^{-3} counts (Rayleigh-s)⁻¹ from the 632.8 nm laser experiment; GBAII's zero wind speed calibration phases are obtained to be -9.2442° and -68.6353° for the 532.0 nm and 632.8 nm lasers for the outdoor experiment, respectively. This paper provides a series of calibration methods for GBAII and these methods are all verifies experimentally. These calibration methods can support the upper atmospheric wind field passive measurement.

Keywords: calibration, upper atmospheric wind field, phase

PACS: 06.20.fa, 42.79.Pw, 42.87.-d, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.66.130601

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61675165), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2016JM1011), and the Characteristic Fund of Xi'an University of Technology, China (Grant No. 2015TS012).

[†] Corresponding author. E-mail: ltpl801@163.com