

多普勒非对称空间外差仪探测高层大气风速的三种方法比较研究*

李文文 惠宁菊 李存霞 刘洋河 方妍 李凌青 王彦龙 唐远河†

(西安理工大学理学院, 西安 710048)

(2023 年 8 月 8 日收到; 2023 年 9 月 12 日收到修改稿)

采用多普勒非对称空间外差仪 (Doppler asymmetric spatial heterodyne, DASH) 被动遥感探测高层大气风速, 目前有傅里叶级数法和流行的傅里叶变换两种测风方法. 本文提出“四强度法”测风. 比较研究了傅里叶级数法、傅里叶变换法和“四强度法”测风的原理、正演、噪声和反演等内容, 3 种测风方法均从 DASH 斐索干涉条纹的相位差变换而来. 假设风速为 0—100 m/s, 利用傅里叶级数法、傅里叶变换法和“四强度法”得到正演的斐索干涉图后, 再对应得到正演风速的误差分别为 2.93%, 4.67% 和 3.00%. 人为添加均值为 0、标准差为 0.1 的高斯噪声后, 假设风速是 0—100 m/s, 用傅里叶级数、傅里叶变换和“四强度法”分别对平场后的数据正演, 得到相对误差对应分别为 2.30%, 11.66%, 2.27%. 人为添加高斯噪声后, 假设风速为 31—39 m/s 和 30.1—30.9 m/s, 用傅里叶级数法和“四强度法”得到正演风速值, 两种情况的傅里叶级数法的测风误差是 3.55% 和 4.15%, 均高于“四强度法”的测风误差 2.20% 和 2.69%. 利用 GBAIL-DASH 野外拍摄西安上空 98 km 的 $O(^1S)$ 557.7 nm 气辉, 得到天顶角为 0° 和 45° 的成像干涉图, 再用傅里叶级数、傅里叶变换和“四强度法”得到反演风速分别为 32.21 m/s, 43.55 m/s 和 32.17 m/s. 从 DASH 的正演、反演结果看, 本文提出的“四强度法”探测高层大气风速的结果较好, 计算简便, 测风精度相对较高.

关键词: 非对称空间外差光谱仪, “四强度法”, 傅里叶变换, 测风

PACS: 06.30.-k, 07.60.Ly, 42.79.Pw, 02.30.Nw

DOI: 10.7498/aps.72.20231292

1 引言

地球中高层大气的风速、风速结构和变化特性与空间航空环境、遥感探测水平和日地物理等密切相关^[1]. 随着火星、土星等行星大气风速的遥感探测热潮, 高精度探测大气风速已成为研究热点^[2]. 高层大气风速含在气辉辐射的多普勒频移中, 通过广角迈克耳孙干涉仪 (Michelson interferometer, MI) 等光学仪器的成像干涉条纹可提取视线方向上的风速. 为了提高测风仪器的稳定性和测风精度, 世界范围内的科学家不断努力发展了多种星载

和地基光学测风仪器, 努力提高测风精度. WINDII (wind imaging interferometer) 探测地球上空 80—300 km 的大气风速是通过压电陶瓷驱动广角 MI 一臂的动镜步进 4 次以实现“四强度法”测风, 测风精度达到 10 m/s^[3]; PAMI (polarizing atmospheric Michelson interferometer) 利用广角 MI 中在一个周期内的偏振态变化 4 次实现“四强度法”测风, 测风精度达 5 m/s^[4]; WAMI (waves Michelson interferometer) 将 MI 两臂的反射镜都固定, 把一臂反射镜分为 4 个区域再镀反射膜, 分别产生 0 , $\lambda/4$, $2\lambda/4$, $3\lambda/4$ (λ 为波长) 的步进光程差, 实现“四强度法”测风^[5,6]. WINDII, PAMI 和 WAMI 等仪器

* 国家自然科学基金 (批准号: 41975040) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2020JZ-46, 2021JQ-469) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ltp1801@163.com

均产生干涉圆条纹. 多普勒非对称空间外差光谱仪 (Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy, DASH) 将 MI 两臂的反射镜分别换成闪耀光栅, 产生干涉直条纹, 采用傅里叶变换法探测地球上空峰值高度 250 km 的 $O(^1D)$ 630.0 nm 气辉, 室内测风精度为 1.6 m/s^[7]; MIGHTI (Michelson interferometer for global high-resolution imaging) 也采用 DASH 思路将 MI 两臂的两个闪耀光栅的衍射光再相干叠加, 采用傅里叶变换法探测高层大气风速, 测风精度达 1.2—4.7 m/s^[8,9]. 中国科学院西安光学精密机械研究所的陈洁婧等^[10]分析了 DASH 傅里叶变换法测风中窗函数的选取对测风精度的影响, 中国科学院光电技术研究所的彭翔等^[11]对 DASH 测风的复合光程差相移解算方法的前提也是由傅里叶变换法从干涉图中提取位相差. 宁通^[12]将 DASH 的干涉图用傅里叶级数拟合而提取风速, 测风精度为 12.6 m/s. 所以目前从 DASH 干涉条纹中提取风速有傅里叶级数法^[12]和流行的傅里叶变换法^[7].

本课题组研制的地基气辉成像干涉仪 GBAII (ground based airglow imaging interferometer) 成功探测地球上空 90—100 km 的大气风速、温度、密度等信息^[13-15], 通过改进, 利用“四强度法”测风精度能达到 4—6 m/s^[16]. 本文将 GBAII 的两臂换成闪耀光栅, 改造为 GBAII-DASH 系统, 首次提出用“四强度法”反演 GBAII-DASH 的大气风速. 比较研究 DASH 测风的 3 种方法——傅里叶级数法、傅里叶变换法和“四强度法”获取风速的原理、仪器正演和野外拍摄 $O(^1S)$ 557.7 nm 气辉的风速数据反演及测风精度.

2 DASH 探测高层大气风速的 3 种方法

2.1 DASH 测风关键——提取干涉条纹位相差

DASH 光路如图 1 所示, 待测气辉经准直透镜 $Lens_1$ 后入射至立方分束器 (beam splitter, BS) 分成两束光强相同的相干光, 经闪耀光栅 G_1 和 G_2 衍射后原路返回 BS, 再到 CCD 上成像干涉. 轴向光以 θ 角入射到光栅上, 如果光线以 θ 角沿原方向衍射回来, 此时波数称为光栅的 Littrow 波数 (σ_L), 此角 θ 称为 Littrow 角. 如图 2 所示的平面反射式光栅的夫琅禾费衍射光强为^[17]

$$I = I_0 \frac{\sin^2 [\pi a (\sin i + \sin i') / \lambda]}{[\pi a (\sin i + \sin i') / \lambda]^2} \times \frac{\sin^2 [N \pi d (\sin \varphi + \sin \varphi') / \lambda]}{\sin^2 [\pi d (\sin \varphi + \sin \varphi') / \lambda]}, \quad (1)$$

其中 a 是光栅小反射面的宽度; d 是光栅常数; i 和 i' 是光线关于小反射面法线 n 的入射角和衍射角, φ 和 φ' 是光线关于光栅法线 N 的入射角和衍射角; i, i', φ 和 φ' 的正负规定按光线以锐角转向法线的顺时针为正、逆时针为负. $\pi a (\sin i + \sin i') / \lambda$ 是单缝衍射因子, $\pi d (\sin \varphi + \sin \varphi') / \lambda$ 是缝间干涉因子. 缝间干涉确定主极大峰值强度、位置和数目, 满足光栅方程 $d (\sin \varphi + \sin \varphi') = k \lambda$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时衍射产生主极大, 考虑反射角与衍射角的正负, $|\sin \varphi + \sin \varphi'|$ 不可能大于 1, 这就限制了主极大数目. 主极大的最大级 $|k| < d / \lambda$, 故一般选取第 1 级衍射.

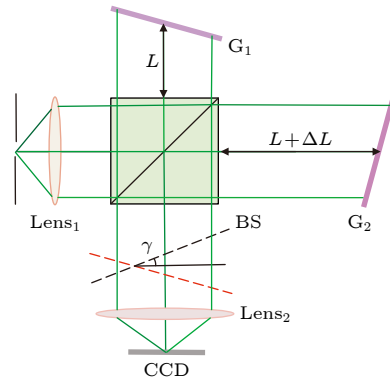


图 1 DASH 的光路图^[7]

Fig. 1. Optical path diagram of DASH.

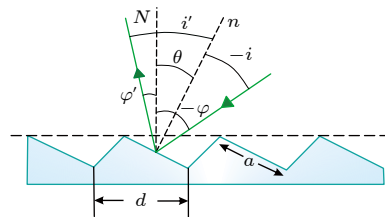


图 2 闪耀光栅结构图

Fig. 2. Blazing grating structure diagram.

入射到 DASH 光束的波数若是 σ_L , 过 BS 后的两光束经光栅衍射后返回的出射波面都与光轴垂直, 相位差为 0; 若入射光波数不是 σ_L , 两出射波面的传播方向与光轴都有一夹角 $\pm \gamma$, 形成斐索干涉条纹, 此时 $\varphi = \theta$, $\varphi' = \theta - \gamma$, 将其代入光栅方程, 便可求出 γ . 斐索干涉条纹经透镜 $Lens_2$ 后成

像于 CCD 靶面, 此时斐索干涉条纹的空间频率为

$$f_x = 4(\sigma - \sigma_L) \tan \theta. \quad (2)$$

若高斯线型气辉入射到 DASH 上, 其干涉方程为

$$I(\Delta) = (1/2) \int_0^\infty B(\sigma) \{1 + \cos[2\pi\Delta(\sigma - \sigma_L)]\} d\sigma, \quad (3)$$

其中, 光程差 $\Delta = 4 \tan \theta [x + \Delta L / (2 \tan \theta)]$ (单位为 cm), x 是 CCD 探测器的像素点位置坐标, ΔL 是两臂的路径差, 如图 1 所示, $2\Delta L$ 是干涉仪的固定光程差. $B(\sigma) = B_0 \exp[-4 \ln 2 (\sigma - \sigma_0)^2 / \omega^2]$ 是光源辐射谱, $B_0 = (2/\omega) / (\ln 2 / \pi)^{1/2}$, 零风速波数 σ_0 与波长对应关系 $\sigma_0 = 1/\lambda_0$, $\omega = [(7.16 \times 10^{-7})^2 \times \sigma_0^2 T / M]^{1/2}$ 是高斯线型气辉的半高宽, 其中 T 是热平衡时的大气温度 (单位 K), M 是发光物质的原子量.

如果视线方向的气辉粒子对探测器有相对运动速度 v , 则波数变为 $\sigma = \sigma_0(1 + v/c)$, 根据 (3) 式及多普勒频移, 得到含大气风速项的相位 φ_v :

$$\varphi_v = 4\pi\sigma_0\Delta Lv/c, \quad (4)$$

零风速相位 φ_0 为

$$\varphi_0 = 4\pi(\sigma_0 - \sigma_L)\Delta L, \quad (5)$$

由 (4) 式可知, DASH 干涉仪测风的关键是探测出干涉条纹的相位差. 国际上采用傅里叶级数和傅里叶变换两种方法从 DASH 干涉图中提取相位量来反演大气风速.

2.2 傅里叶级数法测风

对单一谱线入射的气辉光源, 因为傅里叶级数可转变成余弦函数, 积分变为求和, 由 (3) 式可知干涉强度 I 是像素点 x 的余弦函数^[12]:

$$I(x) = B(\sigma) \{1 + \cos[2\pi(\sigma - \sigma_L)(4 \tan \theta_L x + 2\Delta L)]\}. \quad (6)$$

首先对 DASH 干涉图进行傅里叶拟合, 得出傅里叶级数方程:

$$I(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n [a_i \cos(ixf) + b_i \sin(ixf)]. \quad (7)$$

根据傅里叶级数三角变换, 将 (7) 式转换成如下余弦函数^[12]:

$$I(x) = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i \cos(ixf + \varphi_i), \quad (8)$$

其中 c_i 是权重系数; φ_i 可由 (8) 式中的系数求得, $\varphi_i = -\arctan(b_i/a_i)$; f 是频率. 余弦函数 (8) 中包括 i 个不同频率的余弦项, φ_i 是第 i 项余弦项的初始相位.

当被拍摄的气辉谱线是单一波长时, 可用一级谐波作为含该主要信息的数学模型, 即当 $i = 1$ 时, (8) 式中的 φ_1 项是 (6) 式中的 $4\pi(\sigma - \sigma_L)\Delta L$ 项. 当干涉图是零风速的光所成像时, φ_1 便是 (5) 式所示的零风速相位 φ_0 ; 当干涉图是含有多普勒频移的光所成像时, φ_1 便是 (4) 式和 (5) 式中有大气风速相位和零风速相位之和 $\varphi_1 = \varphi_v + \varphi_0$. 傅里叶级数法分别对零风速和含风速干涉图的数据进行傅里叶级数拟合, 求出 $v = 0$ 的 φ_1 及风速 $v \neq 0$ 的 φ_1 , 两者相减得到 φ_v , 结合 (4) 式即可求出视线方向上的风速.

2.3 傅里叶变换法测风

当 DASH 干涉仪接收连续谱线简化为几条离散光谱时, 则 (3) 式写成^[7]:

$$\begin{aligned} I_D(x) &= \sum_j S_j [1 + E_j(x) \cos(2\pi\kappa_j x + \varphi_j + \delta\varphi_j)] \\ &= \sum_j S_j (1 + \{E_j(x) \exp[i(2\pi\kappa_j x + \varphi_j + \delta\varphi_j)] \\ &\quad + E_j(x) \exp[-i(2\pi\kappa_j x + \varphi_j + \delta\varphi_j)]\} / 2), \end{aligned} \quad (9)$$

其中 j 指的是第 j 条谱线, S_j 与探测器上干涉图条纹亮度成正比, $E_j(x)$ 依赖光谱线型和光程差的包络函数, $\kappa_j = 4(\sigma_j - \sigma_L) \tan \theta_L$ 是每条谱线中心 σ_j 的外差空间条纹频率, $\varphi_j = 4\pi(\sigma_j - \sigma_L)\Delta L$ 是固定光程差 $2\Delta L$ 引起的相位, $\delta\varphi_j$ 是每条谱线多普勒频移导致的相位频移量.

选择合适的光谱带、Littrow 波数和 ΔL 后, (9) 式的傅里叶变换产生一个复频谱, 在空间频率 κ_j 和 $-\kappa_j$ 附近有局部分离良好特性. 分离出这些特性, 如令 $j = 0$, 通过归零除了 $+\kappa_0$ 附近局域内的光谱元素, 有效消除了所有干涉图贡献, 仅保留一个指数项, 因此在傅里叶逆变换后得到^[7]

$$\begin{aligned} I_D^0(x) &= S_0 E_0(x) \exp[i(2\pi\kappa_0 x + \varphi_0 + \delta\varphi_0)] / 2 \\ &= S_0 E_0(x) [\cos(2\pi\kappa_0 x + \varphi_0 + \delta\varphi_0) \\ &\quad + i \sin(2\pi\kappa_0 x + \varphi_0 + \delta\varphi_0)] / 2, \end{aligned} \quad (10)$$

相位项可从 (10) 式的虚部和实部之比得到

$$2\pi\kappa_0 x + \varphi_0 + \delta\varphi_0 = \arctan [\Im(I_D^0) / \Re(I_D^0)]. \quad (11)$$

将 (11) 式计算结果减去零风速相位 $2\pi\kappa_0x + \varphi_0$, 便得到相移 $\delta\varphi_0$, 根据 (4) 式求出该谱线在视线方向上的风速, 这就是国际上常用的傅里叶变换测风方法.

2.4 “四强度法”测风

WINDII 用压电陶瓷驱动 MI 的“动镜”实现相位的 4 步进测风^[3], 而 DASH 结构中没有移动部件, 我们提出也可以用“四强度法”测风, 阐述如下. 如图 3 所示的简化 GBAIL-DASH 光路, 非 Littrow 波长光入射时, 两出射光的波面间会有夹角 2γ , 如图 4 所示. 两出射光到达 CCD 相同像素点时, 若两者的光程差正好是一个 λ 的长度, 或者是一个 λ 的整数倍时, 探测器 CCD 靶面上会形成亮条纹. 故对于 GBAIL-DASH 来说, 我们用两出射光到达 CCD 相同像素点的光程差来实现相位的四步进法测风.

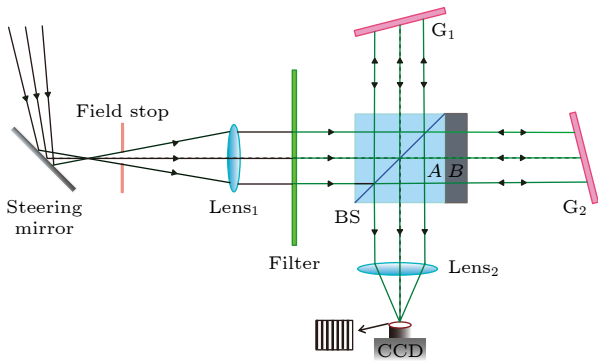


图 3 GBAIL-DASH 的光路图

Fig. 3. Optical path diagram of GBAIL-DASH.

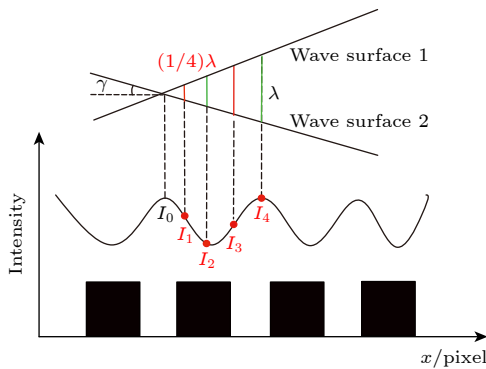


图 4 两出射波面夹角示意图

Fig. 4. Angle of emergent wave surface.

高斯线型气辉经广角 MI 后所成干涉图的强度为^[3]

$$I(\Delta) = I_0[1 + \exp(-QT\Delta^2) \cos(2\pi\sigma_0\Delta)], \quad (12)$$

其中 σ_0 是零风速时的波数, T 是大气温度, $Q = (\pi^2\omega^2)/4T \ln 2$, $\omega = [(7.16 \times 10^{-7})^2 \sigma_0^2 T / M]^{1/2}$ 是高斯线型气辉的半高宽, M 是以 σ_0 为中心的发射线的物质的原子量. 令条纹调制度 $V = \exp(-QT\Delta^2)$, 则

$$I = I_0[1 + V \cos(2\pi\sigma_0\Delta)]. \quad (13)$$

根据多普勒效应 $\sigma = \sigma_0(1 + v/c)$, 将 (13) 式的 σ_0 换成 σ , 光程差 Δ 分为含固定光程差 Δ_0 、含风光程差 Δ_v 、步进光程差 Δ' 之和 $\Delta = \Delta_0 + \Delta_v + \Delta'$ (且 $\Delta_0 \gg \Delta_v, \Delta'$), 则由 (3) 式可得 $\Delta_0 = 2\Delta L$, $\Delta_v = \Delta_0(v/c)$, $\Delta' = 4x \tan \theta$, 3 种光程差对应相位分别为 $\varphi_0, \varphi_v, \varphi'$. 因此 (13) 式变为

$$I = I_0[1 + V \cos(\varphi_0 + \varphi' + \varphi_v)]. \quad (14)$$

当 $\varphi' = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ (对应 $\Delta' = 0, \lambda/4, 2\lambda/4, 3\lambda/4$, 条纹周期很小, 量级是 10^{-5} , 为了防止步进太小而被吞掉, 会以 $(\pi/2 + 2k\pi)$ (k 是整数) 方式步进), 代入 (14) 式得 4 个强度值:

$$\begin{cases} I_1 = I_0 [1 + V \cos(\varphi_0 + \varphi_v)], \\ I_2 = I_0 [1 - V \sin(\varphi_0 + \varphi_v)], \\ I_3 = I_0 [1 - V \cos(\varphi_0 + \varphi_v)], \\ I_4 = I_0 [1 + V \sin(\varphi_0 + \varphi_v)], \end{cases} \quad (15)$$

由此得到

$$I_0 = (I_1 + I_3)/2 = (I_2 + I_4)/2, \quad (16)$$

$$V = \exp(-QT\Delta^2) = \frac{\sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2}}{2I_0}, \quad (17)$$

$$\tan(\varphi_0 + \varphi_v) = (I_4 - I_2)/(I_1 - I_3). \quad (18)$$

由 (18) 式得到 $\varphi_0 + \varphi_v$ 后, 减去零风速定标所确定的 φ_0 (定标选择 $\cos 2\pi\sigma_0\Delta_0 = 1$ 条件得 Δ_0 , 亦即 $\varphi_0 = 2k\pi$ (k 为整数)), 就得出含有风速的相位 φ_v , 再根据 (4) 式即可求出视线方向上的风速, 这便是我们提出的 GBAIL-DASH 的“四强度法”测风法.

3 三种测风方法的正演结果

利用计算机仿真正演 GBAIL-DASH 干涉仪的光学成像过程, 需要考虑大气传输模型和仪器模型等诸多部分, 这里只对大气传输模型及仪器模型进行比较研究.

本系统以氧原子 $O(^1S) 557.7 \text{ nm}$ 作为目标谱

线, 其体发射率分布为^[18]

$$\xi(h) = V_e \exp[1 - b_e - \sec \chi_e \exp(-b_e)] + V_f \exp[1 - b_f - \sec \chi_f \exp(-b_f)], \quad (19)$$

式中 V_e , V_f 代表地球上空 E 层 (100—300 km) 和 F 层 (300—500 km) 的峰值体发射率 (单位 $\text{photons} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$), χ 是太阳天顶角 (单位 $^\circ$), $b_e = (h - H_e)/W_e$, $b_f = (h - H_f)/W_f$, h 是海拔高度, H_e 和 H_f 分别是 E 层和 F 层的峰值高度, W_e 和 W_f 为 E 和 F 层气体的标高.

GBAII-DASH 探测系统使用窄带滤波片的滤波函数与波长 λ 、入射角 θ 的关系为^[19]

$$f_{\text{filter}}(\lambda, \theta) = \frac{f_{\text{max}}}{1 + \left[\frac{2(\lambda - \lambda_0)}{\Delta\lambda} + \left(\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \right) \left(\frac{\theta^2}{n^2} \right) \right]^2}, \quad (20)$$

其中 $\Delta\lambda$ 是半高宽, λ_0 是中心波长, n 是滤光片的有效折射率.

(14) 式中的 φ_0 可由零风速定标而确定, 选择适当的固定光程差 $2\Delta L$, 令 $\varphi_0 = 2k\pi$ (k 为整数), 而不出现在余弦函数中, 则展开干涉强度函数 (14) 式得

$$I = I_0 + I_0 V \cos \varphi_v \cos(\varphi_0 + \varphi') - I_0 V \sin \varphi_v \sin(\varphi_0 + \varphi'). \quad (21)$$

令 $J_1 = I_0$, $J_2 = I_0 V \cos \varphi_v$ 和 $J_3 = I_0 V \sin \varphi_v$, 则 CCD 的第 l 行 j 列像素上获得的模拟结果为

$$N_{klj} = R f_{\text{filter}}(\lambda, \theta_{lj}) [J_1 + J_2 \cos(4\pi \Delta L_{lj} / \lambda + \varphi') - J_3 \cos(4\pi \Delta L_{lj} / \lambda + \varphi')] + N_{\text{noise}}, \quad (22)$$

其中 R 是仪器响应度, $2\Delta L_{lj}$ 是固定光程差, N_{noise} 是输出信号中存在的噪声.

仪器正演仿真时我们选取 CCD 是 1024×1024 面阵探测器, 单像素尺寸 $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$, 固定光程差 $2\Delta L = 7.495 \text{ cm}$; 光栅 Littrow 波长 550 nm , Littrow 角 14.3° , 刻线密度 900 L/mm . 模拟西安上空峰值高度为 98 km 的 $\text{O}(\text{I})\text{S}$ 557.7 nm 气辉. 假设一个大气风速值, 得到正演仿真干涉图后, 分别用傅里叶级数法、傅里叶变换法和“四强度法”从干涉图中提取风速.

3.1 傅里叶级数法测风的正演结果

干涉条纹进行一级傅里叶级数拟合后的结果如图 5 所示, 图 6 是图 5 的局部放大图, 从图 6 可明显观察到, 因为风速而导致的干涉图相位的频移.

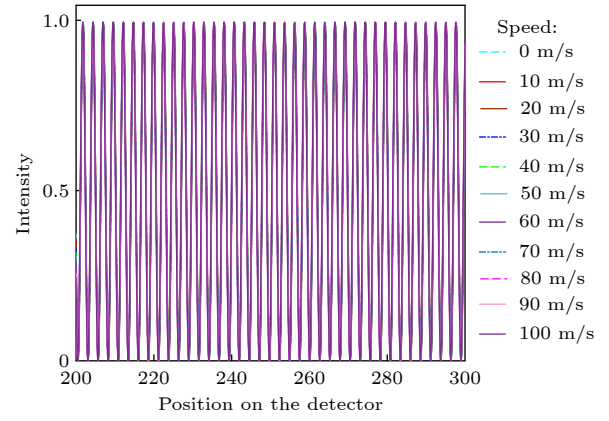


图 5 干涉图的傅里叶级数正演结果

Fig. 5. Fourier series forward results of interferograms.

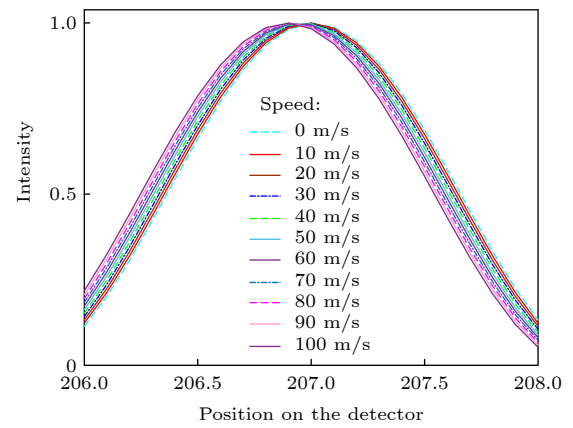


图 6 图 5 中正演结果的局部放大

Fig. 6. Local amplification of forward results in Fig. 5.

假设以 10 m/s 为风速间隔的 $0\text{--}100 \text{ m/s}$ 风速, 得到正演干涉结果, 对风速为 0 m/s 干涉结果进行傅里叶级数拟合后的方程式如下:

$$F_0(x) = 0.5 + 0.3264 \cos(2.424x) - 0.3787 \sin(2.424x). \quad (23)$$

同理可得出其他风速的傅里叶级数拟合方程. 根据 (7) 式和 (8) 式可求出不同风速的相位 φ , 此时 0 风速相位 φ_0 就是 GBAII-DASH 系统固定光程差 $2\Delta L$ 导致的相位, 则不同风速导致的相位频移量 $\varphi_v = \varphi - \varphi_0$, 根据公式 $v = c\varphi_v / 4\pi\Delta L\sigma_0$ 求出风速如表 1 第 2 列所示, 平均测风相对误差是 2.98% .

3.2 傅里叶变换法测风的正演结果

对干涉数据进行傅里叶变换后, 利用 (11) 式分别求出不同风速的干涉图上各像素点的相位, 如图 7 所示. 选取第 387 个像素点的相位进行分析, 即 $x = 387$ 时, 不同风速的相位 $\Phi = 2\pi\kappa x + \varphi_0 + \delta\varphi_v$.

表 1 三种测风方法的正演结果
 Table 1. Forward wind speed results by three methods.

Calculated wind/(m·s ⁻¹)	Method category					
	Fourier series		Fourier transformation		Four-point algorithm	
	φ/rad	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Φ/rad	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	φ/rad	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
0	-0.7114		1.2615		0.7338	
10	-0.6833	9.69	1.2917	10.43	0.7619	9.69
20	-0.6551	19.41	1.3220	20.86	0.7901	19.41
30	-0.6271	29.07	1.3523	31.32	0.8181	29.07
40	-0.5988	38.83	1.3827	41.79	0.8464	38.83
50	-0.5706	48.55	1.4131	52.29	0.8745	48.52
60	-0.5426	58.21	1.4436	62.81	0.9025	58.19
70	-0.5144	67.93	1.4742	73.36	0.9307	67.92
80	-0.4864	77.59	1.5049	83.94	0.9588	77.58
90	-0.4581	87.34	1.5357	94.56	0.9870	87.33
100	-0.4299	97.07	1.5666	105.21	1.0152	97.05

而 0 风速的相位就是系统固定光程差 $2\Delta L$ 导致的相位 $\Phi_0 = 2\pi\kappa x + \varphi_0$, 则不同风速导致的相位频移量 $\delta\varphi_v = \Phi - \Phi_0$, 用 $v = c\delta\varphi_v/4\pi\Delta L\sigma_0$ 求出风速如表 1 第 3 列所示, 平均测风相对误差是 4.67%.

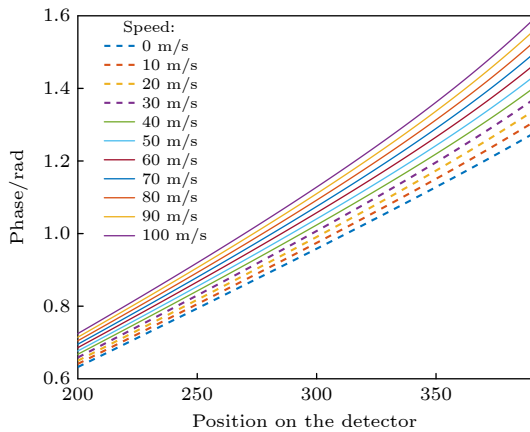


图 7 傅里叶变换的相位分布图

Fig. 7. Phase distribution diagram of Fourier transformation.

3.3 “四强度法”测风的正演结果

用“四强度法”反演风速, 首先需确定如图 4 所示起点 I_0 的坐标 x_0 , 然后以两出射光到达 CCD 像素点 x_0 的光程差为起点, 令光程差依次步进 $\lambda/4$ 或者 $k\lambda + \lambda/4$ (k 是整数), 故 x_0 的选取很重要. 干涉图的强度 I 是关于 CCD 像素点坐标 x 的函数, 将 GBAIL-DASH 干涉仪中固定光程差 $2\Delta L$ 所导致的相位 φ_0 , 代入到干涉图方程中, 求出相位是 φ_0 的像素点坐标 x , 则此 x 便是步进的起始点坐标 x_0 .

假设风速为 50 m/s 得到仿真干涉数据的拟合函数如图 8 的绿色曲线所示, 因为干涉图的周期很

小, 一个周期量级为 10^{-5} , 为 3 个像素大小, 每次步进 $1/4$ 个周期, 即 $3/4$ 个像素的距离, 这个距离太小而被吞掉, 故我们将周期性函数进行拉伸, 得到拉伸后的“四强度法”拉伸函数结果如图 8 的红色虚线所示. 经过拉伸后再步进, 确定出 x_1, x_2, x_3, x_4 , 各像素点对应的强度值 $I_1 = 0.1793, I_2 = 0.8836, I_3 = 0.8207$ 和 $I_4 = 0.1164$, 利用 $\tan(\varphi_0 + \varphi_v) = (I_4 - I_2)/(I_1 - I_3)$ 和反正切求出 $v = 50$ m/s 时 $\varphi = 0.8745$ rad.

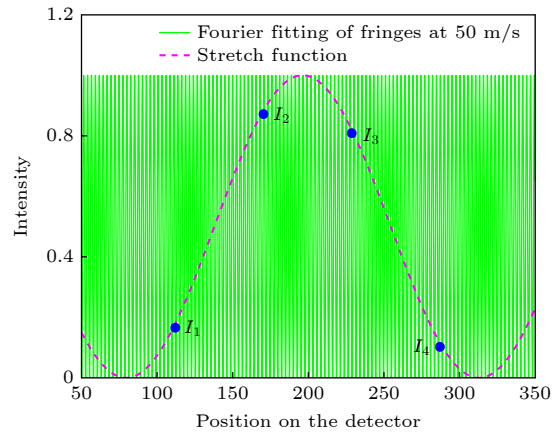


图 8 函数拉伸后的“四强度法”

Fig. 8. Four steps of phase determination.

用同样的方法处理其他风速的干涉图数据, 得出相位. 将 0 风速的相位 φ_0 作为 GBAIL-DASH 固定光程差 $2\Delta L$ 所对应的相位, 则风速导致的相位频移量是 $\varphi_v = \varphi - \varphi_0$, 利用 $v = c\delta\varphi_v/4\pi\Delta L\sigma_0$ 求出正演风速如表 1 第 4 列所示, 平均测风相对误差是 3.00%.

3.4 三种测风方法正演结果的误差

上述正演研究中未考虑噪声的影响,但是实际拍摄气辉的成像干涉图存在多种噪声,从干涉图提取相位之前需对原始数据去噪和平场.为了探测噪声和平场对3种方法测风误差的影响,我们在正演过程中对上述风速的干涉图人为添加均值为0、标准差为0.1的高斯噪声,对各数据进行平场处理后,利用傅里叶级数、傅里叶变化和“四强度法”进行正演,得到正演风速结果如表2所示,3种方法得到的平均相对误差分别为2.30%, 11.66%, 2.27%.可见干涉图存在噪声时,傅里叶变换法的测风误差相对较大,傅里叶级数法和“四强度法”测风的测风精度高,但两种方法在测风间隔是10 m/s时的测风误差相近,为了更好地区分出傅里叶级数法和“四强度法”的测风精度,我们继续分析测风间隔在1 m/s和0.1 m/s时两种方法的测风误差.

模拟含有噪声的以1 m/s为间隔的风速是31—39 m/s和以0.1 m/s为间隔的风速是30.1—30.9 m/s的干涉图,用傅里叶级数法和“四强度法”从干涉图中提取风速,求出误差,结果如图9所示.从图9可以看出,1 m/s为风速间隔时“四强度法”的平均测风相对误差是2.20%,明显低于傅里叶级数法的平均测风相对误差3.55%,以及0.1 m/s为风速间隔时“四强度法”的平均测风相对误差是2.69%,也明显低于傅里叶级数法的平均测风相对误差4.15%.故“四强度法”的测风精度更优于傅里叶级数法测风.

从正演和增添噪声的上述结果可见,傅里叶变换法测风的误差较大.傅里叶变换法测风时,将窗函数频谱卷积过程中导致复原干涉图的包络与理

想干涉图的包络在小光程差和大光程差区域发生明显变形,直接影响干涉相位的计算,导致测风误差大.减小误差的办法是选择中心区域的光程差点能较准确反演出风速^[20].

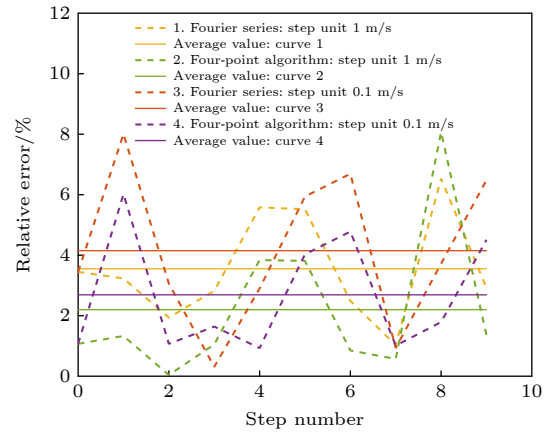


图9 两种方法的测风误差

Fig. 9. Wind measurement error of two methods.

“四强度法”测风时,是通过(18)式的反正切求出相位,其中 $(I_4 - I_2)$ 和 $(I_1 - I_3)$ 已经把干涉图的背景噪声和直流部分统统减掉,故对数据平场后测风精度较高;况且“四强度”法测风计算简便,不用考虑窗函数因子的不确定性带来的测风误差.

4 室外实验3种方法的反演结果

采用图3所示的GBAIL-DASH光学系统(实物见图10),于2023年4月19日凌晨1—3点在陕西西安临潼洪庆山顶(海拔1250 m, 34°19'52" N, 109°16'56" E)拍摄O(¹S) 557.7 nm气辉的成像干涉图如图11所示,图11(a)是GBAIL-DASH的

表2 加入噪声后的3种测风方法的正演误差
Table 2. Speed Error after adding noise by three methods.

Calculated wind/(m·s ⁻¹)	Method category					
	Fourier series		Fourier transformation		Four-point algorithm	
	$v/(m·s^{-1})$	Relative error/%	$v/(m·s^{-1})$	Relative error/%	$v/(m·s^{-1})$	Relative error/%
10	9.45	5.52	7.85	21.47	9.47	5.28
20	20.28	1.38	13.25	33.76	20.30	1.49
30	29.55	1.49	28.70	4.34	29.57	1.42
40	40.03	0.09	35.13	12.19	40.04	0.10
50	49.10	1.79	55.03	10.07	49.04	1.74
60	58.76	2.07	69.15	15.25	58.77	2.05
70	67.93	2.96	65.15	6.34	67.93	2.96
80	77.83	2.72	81.17	1.46	77.85	2.69
90	87.96	2.26	92.80	3.11	87.97	2.25
100	97.31	2.69	108.67	8.67	97.33	2.67

0°天顶角所拍的结果,用于零风速定标,图 11(b)是天顶角为 45°时拍摄的 O(¹S) 气辉成像干涉图.

通过去噪和平场等措施后,分别用傅里叶级数法、傅里叶变换法和“四强度法”提取图 11 气辉干

涉图的大气风速如表 3 所列. 分别用傅里叶级数法、傅里叶变换法和“四强度法”测得当晚西安上空 98 km 的一维风速为 32.21 m/s, 43.55 m/s 和 32.17 m/s.

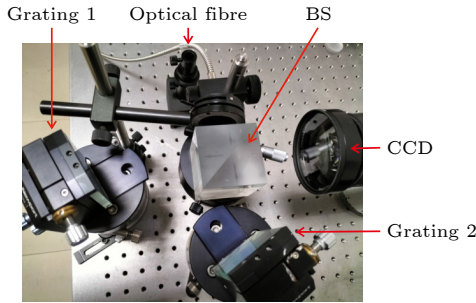


图 10 GBAII-DASH 的实验系统
Fig. 10. GBAII-DASH system in the laboratory.

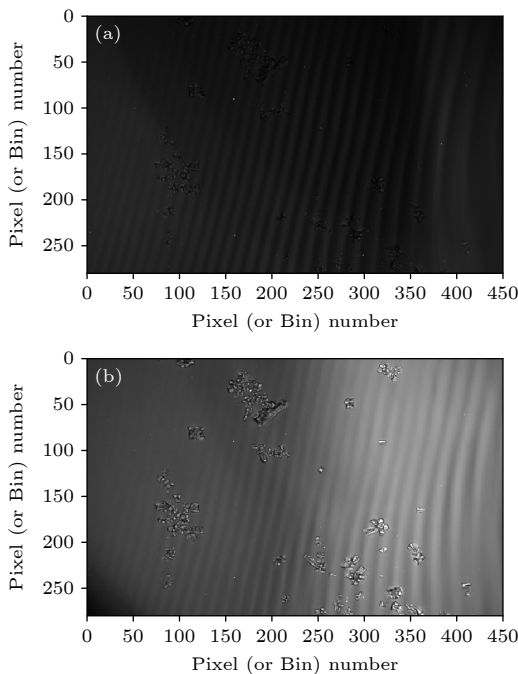


图 11 GBAII-DASH 拍摄 O(¹S) 557.7 nm 气辉的成像干涉图 (a) 0°天顶角时拍摄的干涉图; (b) 45°天顶角时拍摄的干涉图

Fig. 11. Imaging interferogram of O(¹S) 557.7 nm gas glow obtained by GBAII-DASH: (a) Interferogram taken at 0° zenith angle; (b) interferogram taken at 45° zenith angle.

表 3 三种方法反演室外测风结果

Table 3. Inversion wind speed outdoor experiment by three methods.

Method category	φ_0/rad	$\varphi_0 + \varphi_v$ /rad	φ_v/rad	v /(m·s ⁻¹)
Fourier series	-0.7129	-0.8063	0.0934	32.21
Fourier transformation	-0.0152	0.1111	0.1263	43.55
Four-point algorithm	0.1362	0.2295	0.0933	32.17

5 结 论

基于 DASH 探测高层大气风速, 比较研究了傅里叶级数法、傅里叶变换法和“四强度法”提取风速的原理、正演、噪声和反演等内容, 3 种方法探测风速均从 DASH 光学系统所得斐索干涉条纹的相位差变换而来, 结论如下:

1) 模拟以 10 m/s 为风速间隔的风速 0—100 m/s 的正演斐索干涉图, 用傅里叶级数法、傅里叶变换法和“四强度法”得到正演风速值, 计算得到 3 种方法的平均测风误差分别为 2.93%, 4.67% 和 3.00%.

2) 人为添加均值为 0、标准差为 0.1 的高斯噪声后, 假设风速是 0—100 m/s, 用傅里叶级数、傅里叶变换和“四强度法”分别对平场后的数据进行正演, 得到平均相对误差分别为 2.30%, 11.66%, 2.27%.

3) 以 1 m/s 为间隔模拟风速 31—39 m/s, 得到含高斯噪声的正演斐索干涉图, 用傅里叶级数法和“四强度法”得到正演风速值, 并得到平均测风误差分别为 3.55%, 2.20%; 以 0.1 m/s 为间隔的风速 30.1—30.9 m/s, 模拟得到含高斯噪声的正演斐索干涉图, 用傅里叶级数法和“四强度法”的平均测风误差分别为 4.15%, 2.69%; “四强度法”的测风误差都小于傅里叶级数法的测风误差.

4) 利用 GBAII-DASH 拍摄西安上空 98 km 的 O(¹S) 557.7 nm 气辉, 得到天顶角为 0°和 45°的成像干涉图, 再用傅里叶级数、傅里叶变换和“四强度法”得到风速的反演结果分别为 32.21 m/s, 43.55 m/s 和 32.17 m/s.

5) 从 DASH 的正演、反演数据结果看, 我们提出的“四强度法”探测高层大气风速的结果较好, 计算简便且测风精度相对较高.

参考文献

- [1] Yi F 1997 *Fundamental Research* **11** 43 (in Chinese) [易帆 1997 中国科学基金 **11** 43]
- [2] Ren Z P 2020 *Sci. Bull.* **65** 1320 (in Chinese) [任志鹏 2020 科学通报 **65** 1320]
- [3] Shepherd G G, Thuillier G, Gault W A, Solheim B H,

- Hersom C, Alunni J M, Brun J F, Brune S, Charlot P, Cogger L L, Desaulniers D L, Evans W F J, Gattinger R L, Girod F, Harvie D, Hum R H, Kendall D J W, Llewellyn E J, Lowe R P, Ohrt J, Pasternak F, Peillet O, Powell I, Rochon Y, Ward W E, Wiens R H, Wimperis J 1993 *J. Geophys. Res. Atmos.* **98** 10725
- [4] Bird J C, Facheng L, Solheim B H, Shepherd G G 1995 *Meas. Sci. Technol.* **6** 1368
- [5] Piotrowski McCall S H C, Dobrowolski J A, Shepherd G G 1989 *Appl. Opt.* **28** 2854
- [6] Shepherd G G, Gault W A, Koehler R A 1991 *Can. J. Phys.* **69** 1175
- [7] Englert C R, Babcock D D, Harlander J M 2007 *Appl. Opt.* **46** 307
- [8] Englert C R, Harlander J M, Brown C M, Marr K D, Miller I J, Stump J E, Hancock J, Peterson J Q, Kumler J, Morrow W H, Mooney T A, Ellis S, Mende S B, Harris S E, Stevens M H, Makela J J, Harding B J, Immel T J 2017 *Space Sci. Rev.* **212** 553
- [9] Englert C R, Harlander J M, Marr K D, Harding B J, Makela J J, Fae T, Brown C M, Ratnam M V, Rao S V B, Immel T J 2023 *Space Sci. Rev.* **219** 27
- [10] Chen J J, Feng Y T, Hu B L, Li J, Sun J, Hao X B, Bai Q L 2017 *Acta Opt. Sin.* **37** 92 (in Chinese) [陈洁婧, 冯玉涛, 胡炳樑, 李娟, 孙剑, 郝雄波, 白清兰 2017 *光学学报* **37** 92]
- [11] Peng X, Liu E H, Tian S L, Fang L 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 240601 (in Chinese) [彭翔, 刘恩海, 田书林, 方亮 2022 *物理学报* **71** 240601]
- [12] Ning T 2012 *M. S. Thesis* (Toronto: York University)
- [13] 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
- [14] 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** 2273
- [15] Tang Y H, Cui J, Gao H Y, Qu O Y, Duan X D, Li C X, Liu L N 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 130601 (in Chinese) [唐远河, 崔进, 郜海阳, 屈欧阳, 段晓东, 李存霞, 刘丽娜 2017 *物理学报* **66** 130601]
- [16] Tang Y, Yang R, Gao H, Zhai F, Yu Y, Cui J 2017 *Proc. SPIE* **10256** 102563C
- [17] Zhao B, Yan L, Li Y Q, Qi X D, Gao J X 2011 *Opt. Techn.* **27** 103 (in Chinese) [赵博, 晏磊, 李颜青, 齐向东, 高键翔 2011 *光学技术* **27** 103]
- [18] Zhang S P, Shepherd G G 2005 *J. Geophys. Res. Space* **110** A03304
- [19] Shepherd G G 2002 *Spectral Imaging of the Atmosphere* (London: Academic Press) p113
- [20] Shen J, Xiong W, Shi H L, Li Z W, Hu G X, Qiao Y L 2016 *Spectrosc. Spect. Anal.* **36** 3014 (in Chinese) [沈静, 熊伟, 施海亮, 李志伟, 胡广骁, 乔延利 2016 *光谱学与光谱分析* **36** 3014]

A comparative study of three methods to detect the upper atmospheric wind speed by DASH*

Li Wen-Wen Hui Ning-Ju Li Cun-Xia Liu Yang-He Fang Yan
Li Ling-Qing Wang Yan-Long Tang Yuan-He[†]

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

(Received 8 August 2023; revised manuscript received 12 September 2023)

Abstract

The DASH (Doppler asymmetric spatial heterodyne) is used to detect the upper atmospheric wind speed by its imaging Fizeau interference fringes. There are two wind measurement methods: Fourier series method (FSM) and popular Fourier transform method (FTM). However, the wind speed measurement accuracy of FTM is greatly influenced by window function, and the calculation is relatively complicated. The Four-point algorithm (FPA) for DASH's wind speed measurement is proposed in this paper. The contents of wind speed measurement principle, forward modeling, noise and inversion by the FSM, FTM and FPA are wholly compared and studied. The three wind speed measurement methods are all derived from the phase difference transformation of DASH Fizeau interference fringes. The Fizeau interference fringes with wind speed of 0–100 m/s at the interval of 10 m/s are simulated, and the forward wind speeds are obtained by FSM, FTM and FPA, and the corresponding wind measurement errors are 2.93%, 4.67% and 3.00%, respectively. After artificially adding Gaussian noise with a mean value of 0 and a standard deviation of 0.1, FSM, FTM and FPA are used to forward the Fizeau interference fringes after flat field, and the corresponding relative errors are 2.30%, 11.66% and 2.27%, respectively. After artificially adding Gaussian noise, the Fizeau interference fringes of wind speeds of 31–39 m/s with 1 m/s interval and 30.1–30.9 m/s with 0.1 m/s interval are simulated, and the forward wind speeds are obtained by FSM and FPA. In both cases, the wind speed measurement errors of FSM are 3.55% and 4.15% higher than those of FPA. The O(¹S) 557.7 nm airglow at peak altitude of 98 km in Xi'an was photographed by using our GBAlI (ground based airglow imaging interferometer)-DASH, and the imaging interferograms with zenith angles of 0° and 45° were obtained. Then by the methods of Fourier series, Fourier transform and FPA are used to obtain the inversion wind speed of 32.21 m/s, 43.55 m/s and 32.17 m/s, respectively. From the forward and inversion results of DASH, we can see that the FPA has a better result for detecting the upper atmospheric wind due to its simple calculation and smaller wind measurement error.

Keywords: asymmetric spatial heterodyne spectrometer, four-point algorithm, Fourier transform, wind measurement

PACS: 06.30.-k, 07.60.Ly, 42.79.Pw, 02.30.Nw

DOI: [10.7498/aps.72.20231292](https://doi.org/10.7498/aps.72.20231292)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41975040) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2020JZ-46, 2021JQ-469).

[†] Corresponding author. E-mail: ltp1801@163.com

多普勒非对称空间外差仪探测高层大气风速的三种方法比较研究

李文文 惠宁菊 李存霞 刘洋河 方妍 李凌青 王彦龙 唐远河

A comparative study of three methods to detect the upper atmospheric wind speed by DASH

Li Wen-Wen Hui Ning-Ju Li Cun-Xia Liu Yang-He Fang Yan Li Ling-Qing Wang Yan-Long Tang Yuan-He

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 240601 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231292

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231292>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光外差光谱仪模拟风场探测

Simulation of wind field detection by laser heterodyne spectrometer

物理学报. 2022, 71(7): 074204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211252>

基于多普勒非对称空间外差光谱技术的多普勒测速仿真

Simulation of Doppler velocity measurement based on Doppler asymmetric space heterodyne spectroscopy

物理学报. 2018, 67(14): 140703 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180063>

基于多普勒非对称空间外差光谱测速的复合光程差相移解算方法

A compound optical path difference phase-shift solution method based on Doppler asymmetric spatial heterodyne spectral velocimetry

物理学报. 2022, 71(24): 240601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221469>

基于分段边缘拟合的测风多普勒差分干涉仪成像热漂移监测方法

Thermal imaging drift monitoring of Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy for wind measurement based on segmented edge fitting

物理学报. 2022, 71(8): 084201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212086>

基于傅里叶变换的波长扫描腔衰荡光谱

Wavelength-scanned cavity ring down spectroscopy based on Fourier transform

物理学报. 2019, 68(20): 204204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191062>

激光外差光谱仪的仪器线型函数研究

Instrument line shape function of laser heterodyne spectrometer

物理学报. 2019, 68(6): 064208 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181620>