

doi:10.3788/gzxb20184707.0701001

# 非对称空间外差光谱仪风场模拟探测实验研究

姜通<sup>1</sup>, 施海亮<sup>2</sup>, 沈静<sup>3</sup>, 代海山<sup>1</sup>, 熊伟<sup>2</sup>

(1 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

(2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(3 中国电子科技集团第二十七研究所, 郑州 450047)

**摘 要:** 针对已搭建的非对称空间外差光谱仪开展地基风场模拟探测研究, 验证该仪器进行中高层大气风场的探测精度水平。介绍了非对称空间外差光谱技术进行风场探测的基本原理以及研制的光谱仪基本性能参数, 设计了风速模拟装置开展风场模拟探测实验, 并对风速模拟过程中电机转速、安装机械角度、转盘半径测量值、光线入射角度等不确定因素进行了分析和计算, 该装置模拟的理论风速误差不高于 1.3%, 能够满足风场模拟探测验证要求。利用该风速模拟装置并通过调节不同电机转速实验, 获得了模拟风速在 34.19~78.63 m/s 内的 24 组测量数据, 模拟覆盖了中高层大气风速范围, 对测量数据进行误差修正及风速反演处理, 非对称空间外差光谱仪实测风速结果与理论模拟风速对比后得出了风速误差标准差 3.28 m/s 的风速探测精度, 有效验证了非对称空间外差光谱技术开展风场探测具有相位灵敏、精度高等特点。

**关键词:** 光谱学; 傅里叶; 模拟实验; 中高层风场; 空间外差; 相位

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)07-0701001-8

## Experimental Study on Wind Field Simulation of Asymmetric Spatial Heterodyne Spectrometer

JIANG Tong<sup>1</sup>, SHI Hai-liang<sup>2</sup>, SHEN Jing<sup>3</sup>, DAI Hai-shan<sup>1</sup>, XIONG Wei<sup>2</sup>

(1 Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

(2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(3 China Electronics Technology Group Corporation Twenty-seventh Institute, Zhengzhou 450047, China)

**Abstract:** In order to verify the accuracy level of the wind field in the middle and upper atmosphere, the simulation of the ground wind field is carried out by the asymmetrical spatial heterodyne spectrometer. The basic principle of wind field detection by asymmetric spatial heterodyne spectroscopy and the basic performance parameters of the developed spectrometer are introduced. The wind field simulation detection experiment is designed by the wind speed simulation device, and the inaccuracy of the motor speed, the installation mechanical angle, the measuring value of the radius of the turntable and the angle of the ray incident during the simulation of wind speed are also introduced. The theoretical wind speed error of the device is no more than 1.3%, which is able to meet the requirements of wind field simulation detection and verification. By using the wind speed simulation device and adjusting the speed experiment of different motor, the data of 24 sets of measured results of simulated wind speed in 34.19~78.63 m/s are obtained. The simulation covers the range of wind speed in middle and upper atmosphere, error correction and wind velocity inversion for the measured data, and the results of wind velocity measured by the asymmetric spatial heterodyne spectrometer and the results of wind velocity measurement. The

基金项目: 遥感科学国家重点实验室开放基金(No. Y7Y00100KZ)资助

第一作者: 姜通(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光学遥感卫星总体设计. Email: jiangtong@126.com

通讯作者: 施海亮(1983-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为超光谱大气遥感探测技术. Email: hlshi@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2018-02-08; 录用日期: 2018-04-03

<http://www.photon.ac.cn>

accuracy of wind velocity detection by 3.28 m/s of standard deviation of wind speed error is obtained after theoretical simulation of wind velocity comparison. It is proved that asymmetric spatial heterodyne spectroscopy has the characteristics of high phase sensitivity and high precision.

**Key words:** Spectroscopy; Fourier transform; Simulation experiment; Middle upper atmospheric wind; Spatial heterodyne; Phase

**OCIS Codes:** 010.0280; 010.1310; 010.620; 120.0280; 300.6540

## 0 引言

风能可将能量和动能从一个位置传输到另一个位置,大气风场和温度场是中高层大气基本的重要参量,它对于中高层大气及上下层之间能量和动量的输运与大气成分的传输都起着巨大作用,大气风场的探测不仅有利于理解大气行为,加深对空间天气的掌握,而且与军事航天活动密切相关<sup>[1-3]</sup>.对于中高层大气风场探测技术而言,主动探测技术由于回波信号弱,无法实现该高度层精确风速信息获取,而被动探测可利用高层大气中存在的气辉、极光等辐射源进行风速信息反演.被动风场探测技术主要基于干涉测量法,通过接收大气中具有一定多普勒频移的自然光源的发光信号,将其转化为干涉条纹的变化,从而反演中高层大气风场参数,主要有 Fabry-Perot 和 Michelson 两种干涉测量方法<sup>[4-5]</sup>.

Fabry-Perot 干涉测量技术具有高测量精度和稳定性,但是对标准具制作平整度要求极高,且光通量小、体积大.Michelson 干涉测量技术克服了 Fabry-Perot 干涉测量技术中严格的制造误差要求,采用扩视场技术增加系统的光通量,体积相对较小.但是干涉图采样点数少(四个相位点),仪器漂移不能被实时跟踪,除此之外,动镜的高精度控制系统也成为星载探测的限制因素之一.近年来,针对上述两类传统探测技术的不足,多普勒非对称空间差光谱技术(Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Spectroscopy, DASH)以其独特的优势逐渐成为中高层大气风场探测的研究热点,具有无运动部件、大光程差、多谱线同步等技术特色<sup>[6-9]</sup>.

非对称空间外差光谱仪风场探测性能验证是其技术发展中的关键环节之一,文献[8]利用研制的仪器开展了地基中高层风场实际观测实验来评估探测精度,但该方案较难获取同步观测状态下的理论风速信息,对实验要求条件较高(需配置高精度的风场探测设备).若采用实验室内风场模拟探测方案可较好的解决上述问题,能够获取精度的理论风速,从而客观的风场评估探测精度.

本文针对已成功研制的非对称空间外差光谱仪开展探测性能验证研究,采用实验室风速模拟方案,重点开展了风速模拟实验装置的设计及模拟不确定度因素分析与计算.通过开展不同风速下的风场模拟探测实验,并对测试数据进行误差修正及反演,最终获取了非对称空间外差光谱仪进行风场探测的精度水平.

## 1 中高层大气风场探测原理

非对称空间外差技术的测风原理与 Michelson 干涉技术类似,也是通过测量干涉相位的改变来反演风速.因此风速引起的干涉相位频移与探测目标的波数、干涉仪的光程差和速度之间关系为

$$\delta\varphi = 2\pi\sigma_0 Lv/c \quad (1)$$

式中, $\sigma_0$  是目标气辉谱线的波数, $L$  是干涉仪的光程差, $v$  是大气水平风速, $c$  是光速.非对称空间外差干涉仪与 Michelson 干涉仪结构上的主要区别在于将 Michelson 干涉仪两臂的平面反射镜用刻线光栅替换,并且以一定的角度固定在干涉仪臂的末端;与空间外差干涉仪<sup>[10]</sup>的区别在于干涉一臂增加了  $\Delta d$  偏置量,从而形成大光程差.DASH 的基本结构如图 1.

非对称空间外差干涉图的干涉方程为

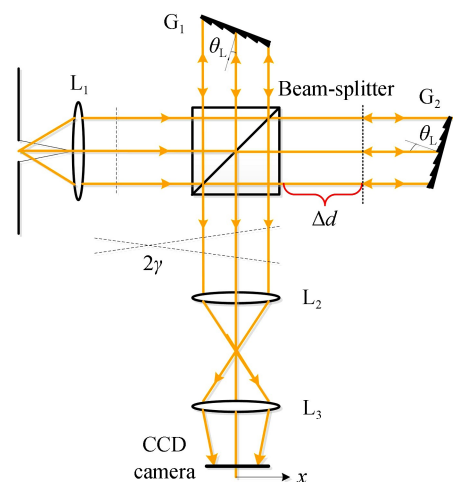


图 1 非对称空间外差干涉仪原理光路图

Fig.1 Asymmetric spatial heterodyne interferometer optical path principle

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\sigma) \left\{ 1 + \cos \left\{ 2\pi \left[ 4(\sigma - \sigma_L) \tan \theta_L \right] \left( x + \frac{\Delta d}{2 \tan \theta_L} \right) \right\} \right\} d\sigma \quad (2)$$

式中,  $B(\sigma)$  是入射光谱函数,  $\sigma$  是波段内的任意波数,  $\sigma_L$  是系统基频波数,  $\theta_L$  是光栅的 Littrow 角,  $x$  是探测器的位置坐标,  $\Delta d$  是干涉仪一臂的偏置量, 最优光程差  $L_{opt} = 2\Delta d$ . 干涉仪的光程差表示为  $L = 4x \tan \theta_L + 2\Delta d$ . 从相位公式可以看出, 增加非对称空间外差干涉仪一臂的偏置量  $\Delta d$ , 能够增加干涉相位的灵敏度, 从而实现对风速多普勒现象引起的气候频移探测, 获取风速信息.

风场模拟探测实验基于已成功搭建的 DASH 光谱仪装置<sup>[11]</sup>, 该装置针对 760 nm 氧气气辉谱线进行风速探测, 基本参数指标见表 1.

表 1 风场探测 DASH 光谱仪基本参数指标  
Table 1 Basic parameter index of DASH spectrometer in wind field detection

Parameter index	Parameter value
Characteristic wavelength	760 nm
Spectral resolution	0.5 cm <sup>-1</sup>
Optimal optical path difference	5.65 cm
Grating line density	600 gr/mm
Littrow angle	13.263 8°
Collimation focal length	250 mm
Imaging focal length	100 mm
CCD	1 024 × 1 024 @ 13 μm

## 2 风场模拟探测方案

中高层风场探测中谱线的频移是发光气辉粒子随着大气运动而产生的. 但是在实验室, 难以通过空气运动的方式控制实验光源产生一定的多普勒频移, 因此在模拟测量过程中引入了风速模拟器, 可以根据需要调节谱线的多普勒频移量, 用以验证仪器的风场探测能力.

### 2.1 风速模拟原理

非对称空间外差光谱仪进行风场探测的目标是中高层大气气辉或极光谱线, 当大气环境存在较大风场时, 会造成气辉或极光谱线的波长发生频移, 从而形成多普勒效应, 利用非对称空间外差光谱仪进行谱线频移信息的探测从而能够获取对应的风速信息. 实验室风速模拟正是基于这一探测原理, 利用高速电机带动转盘运动形成一定速度来模拟大气环境中的风场现象, 当气辉模拟光源(谱线灯或激光器等)入射到旋转中的转盘, 模拟光源的谱线同样会发生频移, 形成多普勒效应, 此时利用非对称空间外差光谱仪进行观测可反演出对应的模拟风场速度信息.

当模拟气辉谱线的入射光束在反射盘表面经过一层特殊材料的膜后按照原路返回, 当反射盘按照一定的转速匀速旋转时, 返回光束的波长产生多普勒频移, 根据这一原理设计风速模拟器, 模拟大气中的气辉辐射信号运动产生的波长改变, 如图 2 所示. 由于反射盘最低点线速度沿着水平方向, 且与入射光束在同一个平面内, 通常作为光束入射参考点. 然而, 在实验平台搭建时光束入射点产生一定的偏差, 因此本文中给出了在反射盘上任意一点 A 入射的情况下返回光束的速度(如图 2(a)所示), 即

$$V_r = 2v_0 \cos \alpha_r \cos \gamma = 4\pi N_s r \cos \alpha_r \cos \gamma \quad (3)$$

式中,  $N_s$  表示电机的转速,  $v_0$  表示 A 点的线速度,  $\alpha_r$  表示光束与反射盘之间的夹角(如图 2(b)所示),  $\gamma$  表示 OA 与垂直方向的夹角. 根据上式克制, 当入射光以垂直于反射盘的方向入射时, 反射光的速度为 0. 为了使反射光获得一定的速度, 反射盘与入射光的夹角设置为 45°. 为了使入射光线的方向在较大范围变化时, 反射光仍然能够按照反方向返回, 在反射盘表面贴逆反射膜.

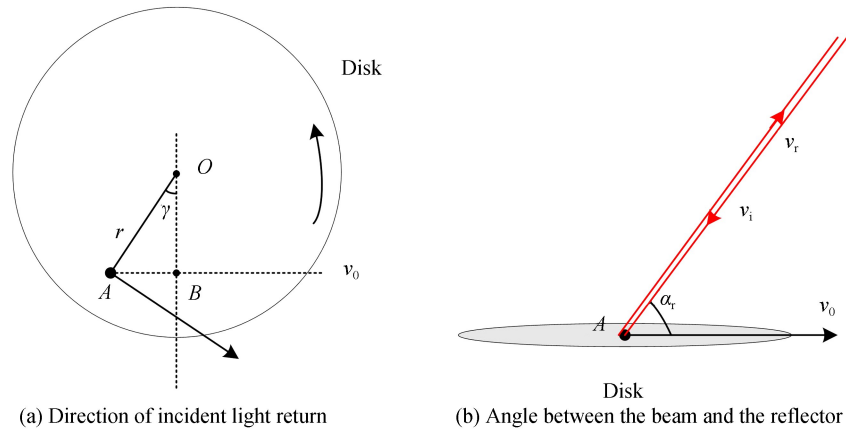


图2 多普勒风速模拟原理图  
Fig.2 Doppler wind speed simulation schematic diagram

## 2.2 风速模拟器设计

80~300 km 的中高层大气中,最大风速约为 100 m/s.为了能够在实验室模拟较大范围的风速变化,选择一个高转速的电机作为驱动装置,电机最大转速到 6 000 RPM,满足实验室模拟风速的需求.风速模拟器通过电机驱动反射盘转动,模拟一定风速下的多普勒频移.为了达到 100 m/s 的反射速度,当  $\alpha_r = 45^\circ$  且  $\gamma = 0^\circ$  时,电机最大转速下的半径为 112.5 mm,考虑到一定的设计余量以及实际实验室光斑位置的误差,反射盘的半径设计为 150 mm.反射盘厚度在选择时,既要考虑反射盘的力矩不能超过电机的额定转矩,又要考虑反射盘太薄时产生形变影响光束反射.在风速模拟器中,电机的负载仅有一个反射盘.考虑到反射盘在电机驱动下高速旋转时(最大 6000 RPM),风速模拟器整体的稳定性要求,采用密度较小的铝作为制作材料,厚度为 3 mm.

电机及转盘的固定采用 L 型支架,稳定性高、体积小且便于整个风速模拟测试系统平台的搭建.在进行风速模拟器测试时,当电机转速增加至 4000 RPM 以上,整体产生明显的振动,严重影响了干涉仪系统的工作,使模拟结果产生误差,分别从以下几个方面考虑消除风速模拟器振动的误差:通过增加支架的自重从而增加稳定性;电机与支架之间选择螺钉的方式固定;在支架底面加橡胶缓冲垫,减小支架与实验平台之间的振动.

## 3 风场模拟探测不确定分析

在实验室用风速模拟器设定一定的电机转速(模拟风速)作为输入条件.用探测器采样光源经过非对称空间外差干涉仪后形成的干涉条纹,计算干涉相位的频移反推出风速.将反演的风速值与模拟风速值进行对比,得出仪器的风速探测精度.在这个过程中,输入的风速值必须足够精确,因此需要对风速模拟器产生的理论风速误差进行分析.

风速模拟器主要由反射盘、电机和支架组成,光轴与反射盘的夹角为  $45^\circ$ ,实际测量  $OA = 115$  mm,  $AB = 6$  mm.将风速模拟误差考虑在内,则式(3)可以改写成

$$V_{\text{err}} = 4\pi(N_s + N_{\text{err}})(r + r_{\text{err}})\cos(\alpha_r + \alpha_{r_{\text{err}}})\cos(\gamma + \gamma_{\text{err}}) \quad (4)$$

式(4)中的误差包括电机转速误差、安装误差和测量误差三个方面.

### 1) 电机转速的误差 $N_{\text{err}}$

实验采用直流无刷电机,电机的转速可由电机控制器实时显示并控制.实验中,通过记录控制器上数显的转速获得模拟的风速.由于电机出厂提供了最大 10 RPM 的随机转速误差,因此记录的转速并不准确.仅考虑电机转速误差的情况下,根据公式(4)计算转速误差引起的最大风速误差为

$$e_{v1} = \frac{4\pi N_{\text{err}} r}{60} \cos \alpha_r \cos \gamma = \frac{4\pi \times 10 \times 0.115}{60} \times \cos 45^\circ \cos 2.99^\circ = 0.17 \text{ m/s} \quad (5)$$

### 2) 反射盘安装机械角度误差

在安装时反射盘与电机轴不同轴导致存在一个角度误差.这个角度误差使反射盘发生了倾斜,倾斜角度

影响了反射盘的有效直径,从而改变光轴与反射盘的角度.反射盘安装时的角度误差低于  $1'$ ,则

$$\Delta r = r - r \cos \left( \frac{1}{60} \right)^\circ = 0.115 \times (1 - \cos \frac{1}{60}) = 4.86 \text{ nm}$$

当电机的转速为 6000RPM 时,安装角度引起的误差为

$$e_{v2} = \frac{4\pi\Delta r N_s}{60} \cos \alpha_r = 4\pi \times 6.35 \times 10^{-9} \times 100 \times \cos 45^\circ \cos 2.99^\circ = 4.32 \times 10^{-6} \text{ m/s} \quad (6)$$

3)光轴与反射盘之间的夹角误差  $\alpha_{r \text{err}}$

谱线灯发出的光经过准直后形成平行光束入射到反射盘上.准直光束准有一定的发散角,我们通过测量在分束器面出射处光斑的直径和转盘上光斑的直径比,根据几何关系计算出光束的发散角为  $0.3979^\circ$ ,这个误差即认为光轴与反射盘之间的夹角误差.

$$e_{v3} = \frac{4\pi r N_s [\cos \alpha_r - \cos (\alpha_r + 0.3979)] \cos \gamma}{60} = 4\pi \times 100 \times 0.115 \times (\cos 45^\circ - \cos 45.3979^\circ) \cos 2.99^\circ = 0.71 \text{ m/s} \quad (7)$$

4)实际测量半径的误差  $r_{\text{err}}$

根据速度方程,模拟风速与光源入射到反射盘上的位置有关,用长度测量工具测量 OA 的距离时,不可避免存在一定的误差,这个误差约为 0.5 mm,则

$$e_{v4} = \frac{4\pi N_s r_{\text{err}}}{60} \cos \alpha_r \cos \gamma = 4\pi \times 100 \times 0.0005 \times \cos 45^\circ \cos 2.99^\circ = 0.44 \text{ m/s} \quad (8)$$

5)OA 与垂直方向夹角误差  $\gamma_{\text{err}}$

OA 与垂直方向的夹角完全由测量长度 OA 和 AB 决定,因此长度的测量误差导致夹角误差.设长度测量误差为 0.5 mm,则引起的角度误差可以计算

$$\gamma_{\text{err}} = \arcsin \left( \frac{AB}{OA} \right) - \arcsin \left( \frac{AB + 0.0005}{OA - 0.0005} \right) = 0.2568^\circ$$

$$e_{v5} = \frac{4\pi N_s r}{60} \cos \alpha_r (\cos (\gamma + \gamma_{\text{err}}) - \cos \gamma) = 4\pi \times 100 \times 0.115 \times \cos 45^\circ (\cos (2.99^\circ + 0.2492^\circ) - \cos (45^\circ)) = 0.02 \text{ m/s} \quad (9)$$

从风速方程出发,分别讨论了每一项引起的误差.实际上,这些误差同时存在于测量计算中,因此综合计算可以得到理论模拟风速为 102.05 m/s 时的风速误差为 1.53 m/s.将最大转速下(6000 RPM)风速误差列表如表 2 所示.

表 2 风速模拟误差分析  
Table 2 Analysis of wind speed simulation error

Wind speed simulation error source	Maximum simulated wind speed error/(m · s <sup>-1</sup> )	Error type
Error of motor speed	0.17	Random error
Mechanical angle error of the reflector plate installation	$4.32 \times 10^{-6}$	Negligible
Angle error between the optical axis and the reflector	0.71	Related to speed
Error of measuring radius	0.44	Related to speed
Angle error with vertical direction	0.02	Related to speed
Total wind speed error	1.53	
Relative wind speed error	1.3%	

从表中可以看出,电机转速误差是随机误差,并且是绝对误差,不随模拟风速的改变而变化.反射盘的安装角度误差在  $\mu\text{m}$  量级,因此可以忽略不计;后三个误差都是与转速相关的误差,并且对总风速误差起主导作用,因此用相对风速误差来衡量更为合理,总的相对风速不确定性为 1.3%.由于风速误差与 A 点的位置有关(误差 4 和误差 5),并且具有随机性每次测量的误差都不相同.因此进行风场探测时,通过多次测量 A 点的位置求均值的方法尽量减小这一误差.



## 4 风场模拟实验及结果

利用非对称空间外差干涉光谱仪和风速模拟器装置搭建实验平台,进行风速模拟探测.由于地面观测 760 nm 波段  $O_2$  大气带气辉具有严重的吸收效应,因此实验中采用具有双线结构的钾元素灯模拟  $O_2$  气辉谱线,风场模拟探测实验装置布局如图 3.

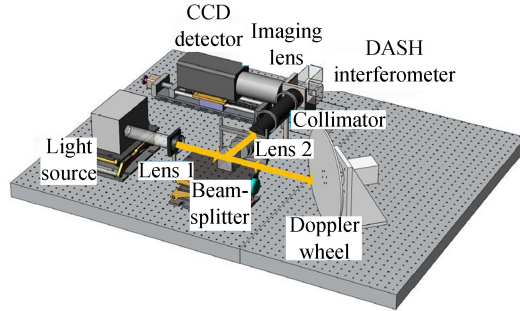


图 3 风场模拟探测实验布局示意图

Fig.3 Layout diagram of wind field simulation detection experiment

实验过程中通过设置电机转速来模拟不同风速,风速模拟器的电机提供了最高 6 000 RPM 的转速可调范围.但是,在转速低时,电机轴具有离轴效应;而在转速过高时,风速模拟器会产生一定振动,从而影响干涉仪系统的频移探测.因此,选择转速从 2 000~5 000 RPM 进行不同风速下的模拟探测,模拟风速从 30 m/s 到 80 m/s.图 4 为电机转速 4 623 RPM 时,获取的风场探测干涉数据及其对其的光谱.

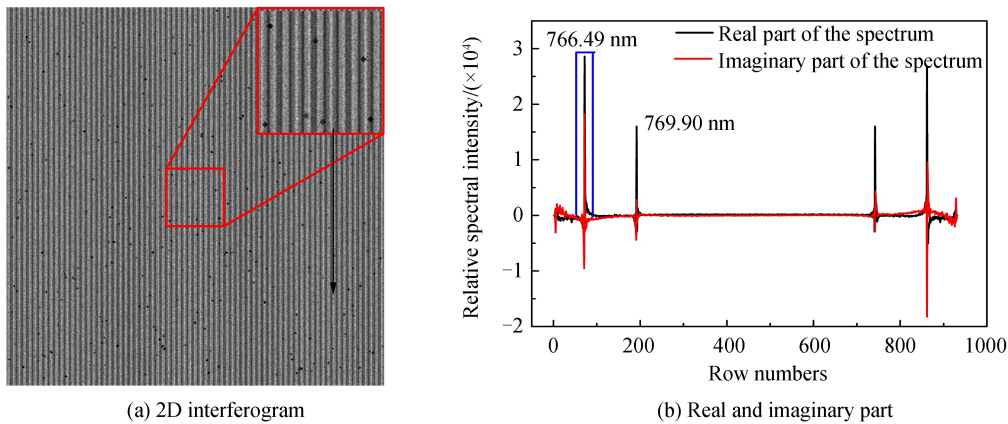


图 4 风场模拟探测实验数据

Fig.4 Wind field simulation test data

对获取的探测数据进行傅里叶变换获取光谱,利用窗函数进行目标谱线提取,并进行反傅里叶变换从而获取相位变化信息,完成风速信息反演<sup>[12]</sup>,获取反演风速.模拟风速采用第 3 节中的公式(3)计算获取, $r$  值为 0.115 m, $\alpha_r$  值为  $3^\circ$ , $\gamma$  值为  $45^\circ$ .表 3 给出实验室风场模拟探测实验获取的不同反演风速的结果和风速误差,风速误差不确定性由第 3 节公式(4)计算获取.

通过 24 组不同风速下的实验,风速误差的标准差为 3.28 m/s 的实验室风速探测精度.图 5(a)是模拟风速和反演风速随着电机转速变化的关系图,图 5(b)是对应测量转速下的风速误差.由图中看出,在低转速下,风速误差的波动较小,而在高转速下,风速误差的波动相对较大,这主要是因为高转速模拟风速时,整个系统的稳定性受到影响.另外,蓝色误差棒表示模拟风速误差的不确定性,随着电机转速的增加,模拟风速的不确定性也随之增加.

表 3 不同转速下的风速反演结果和风速误差  
Table 3 Wind velocity inversion and wind speed error at different rotational speeds

Motor speed/RPM	Simulated wind speed/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Inversion of wind speed/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Wind speed error/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Uncertainty of wind speed error/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Standard deviation of wind speed error/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
2 010	34.19	32.60	-1.58	0.37	
2 109	35.87	32.78	-3.09	0.38	
2 220	37.76	34.30	-3.46	0.39	
2 296	39.05	36.71	-2.34	0.39	
2 507	42.64	45.73	3.10	0.41	
2 619	44.54	47.04	2.50	0.43	
2 695	45.84	49.01	3.17	0.43	
2 800	47.62	48.71	1.09	0.44	
2 912	49.53	45.08	-4.45	0.45	
2 988	50.82	54.28	3.46	0.46	
3 093	52.61	50.74	-1.87	0.47	
3 304	56.19	52.55	-3.64	0.49	
3 404	57.89	58.75	0.85	0.50	3.28
3 521	59.88	63.24	3.36	0.51	
3 595	61.14	63.48	2.34	0.52	
3 708	63.07	57.97	-5.09	0.53	
3 714	63.17	62.41	-0.76	0.53	
4 048	68.85	63.63	-5.22	0.56	
4 119	70.06	73.54	3.49	0.57	
4 236	72.05	71.31	-0.73	0.58	
4 318	73.44	77.45	4.01	0.59	
4 429	75.33	76.61	1.28	0.60	
4 511	76.72	71.70	-5.02	0.61	
4 623	78.63	82.72	4.09	0.62	

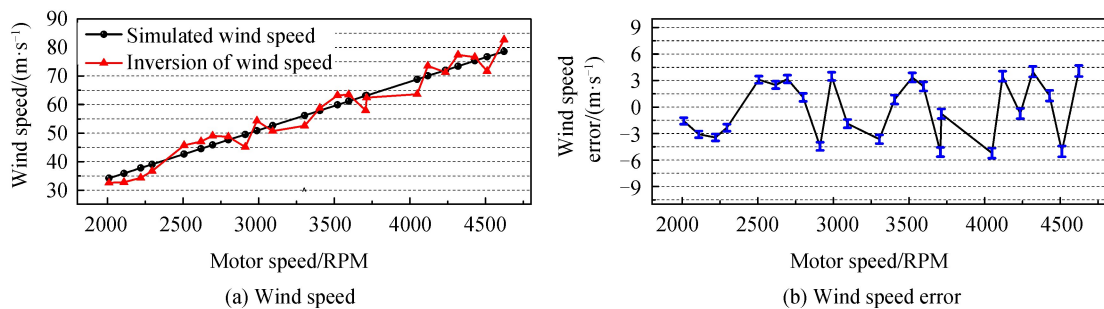


图 5 不同转速下的风速和风速误差

Fig.5 Wind speed and wind speed error at different speeds

## 5 结论

本文针对已成功研制的非对称空间外差光谱仪开展风速模拟探测实验研究,分析了风速模拟基本原理,对风速模拟器进行设计,然后对风速模拟装置的误差进行分析,指出模拟的理论风速误差不高于 1.3%,通过精确测量控制和多次测量求均值的方式能够进一步减小误差.对获取的风场探测数据完成干涉数据误差修正后,对影响实验室风场探测精度的因素进行了分析,并通过实验获得了模拟风速在 34.19 m/s 到 78.63 m/s 范围内的 24 组测量结果,给出了风速误差标准差为 3.28 m/s 的风速探测精度.需要指出的是,由于测量误差使通过风速模拟器模拟的风速的不确定性最终影响了风速探测精度,在风速误差分析时以误差棒的形式标出.外场探测时,由于测量目标是多普勒频移后的气辉发射线,风速模拟的误差并不存在,分析探测精度时就可以不必考虑此误差项的影响.

本文研究工作意义体现在以下几方面:1)针对新型的中高层大气风场探测仪器,首次解决了非对称空间外差光谱仪探测性能验证实验方法和设备等问题,为下一步该仪器开展实际应用奠定了一定基础;2)首次,对风场模拟器风场模拟过程中存在的各类误差进行了定量分析,得出总风速模拟误差主要是由夹角误差和测量误差导致,从而为客观评估风场探测误差提供了保障.3)基于风场模拟探测实验,首次贯通了硬件探测数据到风速结果的数据处理流程,涉及数据预处理、风速反演等环节,验证了各环节中的算法的应用效果,为将来该仪器数据处理模型的建立奠定了基础.

#### 参考文献

- [1] SOLHEIM B, BROWN S, SIORIS C, *et al.* Swift-dash: spatial heterodyne spectroscopy approach to stratospheric wind and ozone measurement[J]. *Atmosphere-ocean*, 2013 (AHEAD-OF-PRINT): 1-8.
- [2] SHEPHERD G G, THUILLIER G, GAULT W A, *et al.* WINDII, the wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, **98**(D6): 10725-10750.
- [3] HAYS P B, ABREU V J, DOBBS M E, *et al.* The high-resolution doppler imager on the upper atmosphere research satellite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, **98**(D6): 10713-10723.
- [4] KILLEEN T L, KENNEDY B C, HAYS P B, *et al.* Image plane detector for the dynamics explorer Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 1983, **22**(22): 3503.
- [5] KILLEEN T L, HAYS P B. Doppler line profile analysis for a multichannel Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(4): 612.
- [6] ENGLERT C R, HARLANDER J M, BABCOCK D D, *et al.* Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): an innovative concept for measuring winds in planetary atmospheres[C]. SPIE, International Society for Optics and Photonics, 2006: 63030T.
- [7] ENGLERT C R, BABCOCK D D, HARLANDER J M. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): concept and experimental demonstration[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(29): 7297-7307.
- [8] ENGLERT C R, HARLANDER J M, EMMERT J T, *et al.* Initial ground-based thermospheric wind measurements using doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH)[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(26): 27416-27430.
- [9] HARLANDER J M, ENGLERT C R, BABCOCK D D, *et al.* Design and laboratory tests of a doppler asymmetric spatial heterodyne (DASH) interferometer for upper atmospheric wind and temperature observations [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 26430-26440.
- [10] HARLANDER J M. Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning [D]. The University of Wisconsin, 1991.
- [11] MARR K D, ENGLERT C R, HARLANDER J M. Flat-fields in dash interferometry[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(9): 9535-9544.
- [12] ENGLERT C R, HARLANDER J M, BROWN C M, *et al.* MIGHTI: the spatial heterodyne instrument for thermospheric wind measurements on board the icon mission[C]. Fourier Transform Spectroscopy, Optical society of America, 2015: FM4A. 1.

**Foundation item:** Open Fund of State Key Laboratory of Remote Sensing (No.Y7Y00100KZ)

引用格式: JIANG Tong, SHI Hai-liang, SHEN Jing, *et al.* Experimental Study on Wind Field Simulation of Asymmetric Spatial Heterodyne Spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0701001

姜通, 施海亮, 沈静, 等. 非对称空间外差光谱仪风场模拟探测实验研究[J]. 光子学报, 2018, **47**(7): 0701001