

平流层飞艇机载风速测量方法

张澜川, 孟军辉, 吕明云

北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083

摘要 风场数据是平流层飞艇实现长时驻空和飞行控制的重要参数。针对平流层空气稀薄、传统机载压力式测风速方法测量精度低等问题, 提出一种利用激光雷达直接探测技术的平流层飞艇机载风速测量方法。设计了基于直接探测原理的多普勒激光雷达测风速系统, 构建了分别以 FPI (Fabry-Perot 干涉仪) 和 MZI (Mach-Zehnder 干涉仪) 为鉴频器的条纹成像技术的风速反演数学模型, 并进行了数值仿真分析。结果显示, 在 355 nm 波长出射激光和 20 m/s 径向风速条件下, FPI-条纹成像技术与 MZI-条纹成像技术的径向风速测量误差分别为 11.0% 和 6.5%, 测量分辨率分别为 1.90 m/s 和 1.62 m/s, 表明该方法能够满足平流层飞艇机载风速测量要求。

关键词 平流层飞艇; 风速测量; 激光雷达; 条纹成像技术

平流层飞艇飞行在 20~30 km 的高空, 能实现长时区域巡航和驻空, 在通信服务、对地观测等领域有着广泛的应用。但由于平流层飞艇体型巨大、飞行速度低且受机载载荷条件的限制, 艇体在飞行及姿态控制方面仍存在一定难度。驻空区域高度的风场数据是平流层飞艇驻空和飞行控制所需的重要参数。现有的风速测量仪器主要运用在大气风场、气象探测、环境监测、飞机空速测量及风洞风速测量等领域。传统的机载风速测量设备为空速管^[1-2], 对于平流层低空气密度低动态的飞行环境, 其动压引起的压强变化往往不能够精确测得。热线式、热膜式风速仪^[3-4]主要通过检测暴露在流体中的热敏感元件的温度耗散和热能传递速率来推算风速^[5-6], 这两种风速仪稳定可靠、信噪比高且测量精度高、重复性好, 但受单端输入信号饱和的限制, 风速测量的量程不高, 而且温度测量需要一定的响应时间。微压传感器近年来发展迅速, 如硅压阻固态测风传感器、光纤光栅压力传感器、MEMS 微压传感器等^[7-13], 虽然测量精度高(可达 10 Pa 级), 且具有重量轻、耐腐蚀等优点, 但半导体材料存在温漂问题, 连续工作时需要校正, 而且平流层海拔 20 km, 空气密度 0.088 91 kg/m³, 由动压公式计算 10 m/s 风速引起的压差为 4.4 Pa, 不能达到测速精度要求。超声波测速仪^[14-18]基于相对运动的多普勒效应, 测量超声波某方向的传播时间, 可以得到顺风或者逆风的传播速度, 但由于声波的发送及接收器件在大气中对风有阻挡作用, 尤其是风与声波发送及接收处于同一方向时, 易造成较大的误差, 而且结构复杂, 不易在浮空平台实现。另

外, 新型战机如 F-35、J-20 采用嵌入式大气数据系统^[19-21]代替了传统的风速管, 但对于高空低速飞行器, 其压强传感器量程及精度尚不能满足要求。

激光雷达具有分辨率高、响应快等优点^[22], 将激光雷达应用于机载、星载平台进行遥感探测, 精度高且覆盖范围广^[23-24]。激光雷达测风速技术分为直接探测和相干探测, 后者只能通过大气气溶胶颗粒散射信号进行探测, 而对于高层大气如海拔 20 km 的平流层风场而言, 气溶胶含量极低, 只能采用直接探测的方式。直接探测技术可通过气体分子的瑞利散射信号进行大气环境探测, 利用直接探测激光雷达可对高层大气及全球风场进行遥感探测^[25-26]。对于小型化机载测速系统, 目前, 国外已开展了机载湍流探测^[27-28]、低空云层监测^[29]等研究, 微软根航宇公司的分子光学大气数据系统(MOADS)^[30]可代替传统大气数据系统, 能够实现飞行器的空速、压力、温度以及飞行姿态等飞行控制参数的测量。国内对于高空风场的探测, 主要采用地基甚高频雷达或激光雷达进行测量^[31-32], 但对于机载激光雷达测速系统方案目前尚无相关研究报告。本文研究一种基于激光雷达直接探测技术的平流层飞艇机载风速测量方法。

1 测量原理及方法

激光雷达测风速是一种利用大气分子瑞利散射特性及多普勒效应实现气流速度探测的技术。利用光学系统接收大气微粒对激光脉冲的后向散射信号, 进一步将含有风速信

收稿日期: 2016-04-11; 修回日期: 2016-12-16

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2016M600891)

作者简介: 张澜川, 硕士研究生, 研究方向为测速系统及传感器设计, 电子邮箱: zlcddv@163.com; 吕明云(通信作者), 教授, 研究方向为飞行器总体设计, 电子邮箱: lv503@buaa.edu.cn

引用格式: 张澜川, 孟军辉, 吕明云. 平流层飞艇机载风速测量方法[J]. 科技导报, 2017, 35(2): 80-86; doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.02.011

息的光信号从光纤传入高光谱分辨率的鉴频器,经滤波处理后,利用探测器探测产生频移的光信号,通过数据分析反演出风速。激光雷达直接探测技术分为边缘检测技术和条纹成像技术。

1.1 边缘检测技术

边缘检测技术是一种能够有效测量微小频率差异的方法^[33],改进后的双边缘检测技术原理如图1(a)所示。利用FPI(Fabry-Perot干涉仪)作为鉴频器,其频域透过率曲线有1个大斜率的边缘,系统设计保证激光的发射频率处于该边缘

上。FPI仿真光路如图1(b)所示,理论透过率曲线及仿真透过率曲线分别如图1(c)和图1(d)所示。陡峭的边缘使得很小的激光出射频率变化可转化为较大的光信号透过率变化。因此,通过测量比较出射激光和大气回波信号在鉴频器上的透过率变化,并且依据鉴频器谱线特性,可得出大气回波信号的频移。边缘检测技术通过将频率信号转换成能量信号进一步测得频移信息,而条纹成像技术则通过明暗条纹的几何位移得到频率的变化。

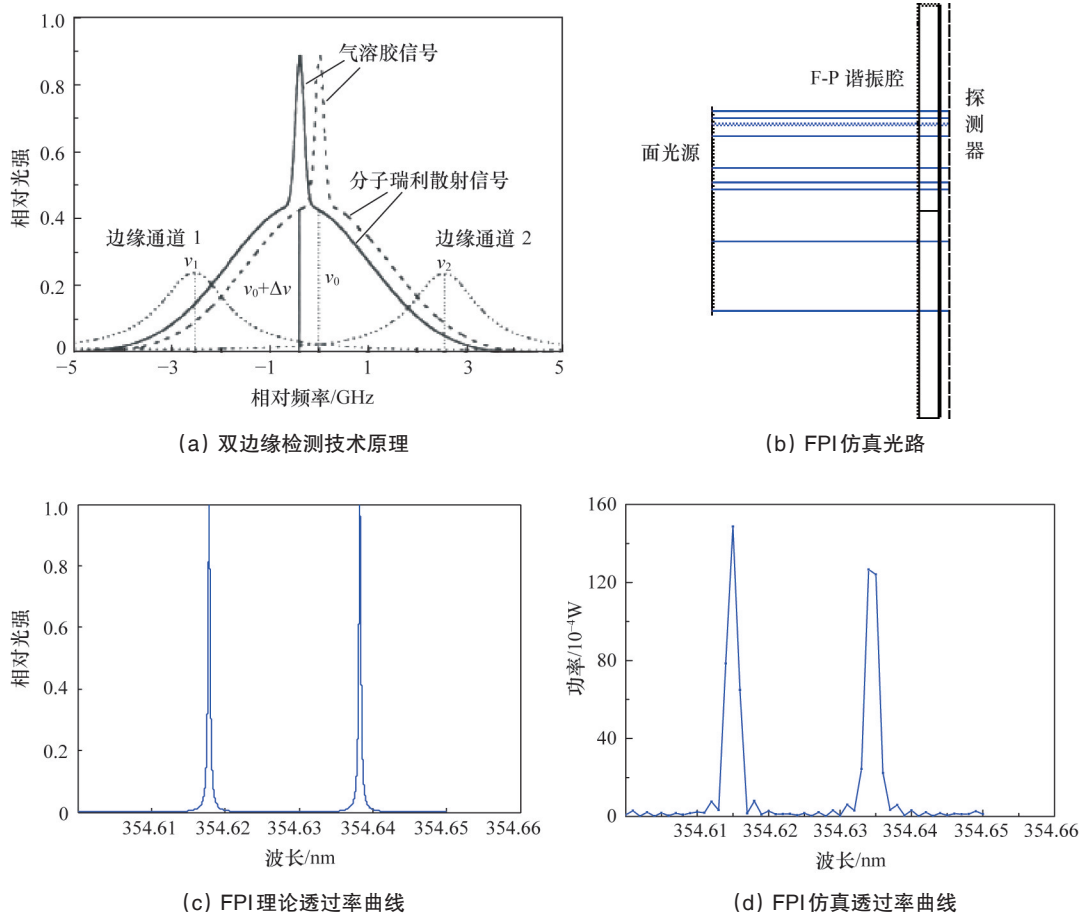


图1 边缘检测技术
Fig.1 Edge technology

1.2 条纹成像技术

条纹成像技术利用FPI或MZI(Mach-Zehnder干涉仪)作为鉴频器^[34],依据干涉原理,根据形成的干涉条纹的变化直接得到信号的频率变化。

对于分子后向散射产生的多普勒频移与风速的关系可表示为

$$\Delta\sigma_{\text{doppler}} = \frac{2u}{c} \sigma_0 \quad (1)$$

式中, $\Delta\sigma_{\text{doppler}}$ 为频移量; u 为径向风速; c 为光速; σ_0 为出射激光的波数。

以MZI作为鉴频器时,其仿真光路如图2所示。

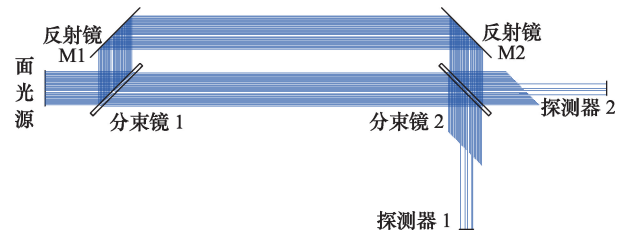


图2 MZI仿真光路
Fig.2 The light path of MZI simulation

通过调整反射镜和分光棱镜的角度,使其偏离一个小角度 θ ,在探测器CCD上形成明暗相间的干涉条纹的光程差,其

表达式为

$$\Delta l_1 = l_0 + \theta x \quad (2)$$

式中, l_0 为初始固有光程差; x 为干涉条纹中心位置到两光波波面所形成的楔形顶端的距离。光程差 Δl_1 对应的相位差为

$$\delta_1 = 2\pi\sigma_0\Delta l_1 = 2\pi\sigma_0(l_0 + \theta x) \quad (3)$$

由于受到平流层大气风速影响, 当后向散射信号产生多普勒频移时, 对应干涉条纹的中心位置也相应改变了 Δx , 此时频移前后干涉条纹相位差的变化为

$$\Delta\delta = 2\pi\Delta x\theta\sigma_0 \quad (4)$$

由式(3), 并忽略光程差的变化 ($\theta(x+\Delta x) \ll l_0$), 可得

$$\Delta\delta = 2\pi l_0 \Delta\sigma_{\text{doppler}} \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可得

$$\Delta\sigma_{\text{doppler}} = \frac{\Delta x\theta\sigma_0}{l_0} \quad (6)$$

将式(1)代入式(6)可得

$$u = \frac{c\theta\Delta x}{2l_0} \quad (7)$$

测得探测器上同级次条纹频移前后的中心位置的变化 Δx , 由式(7)进行仿真分析, 可得到基于 MZI-条纹成像技术的径向风速。

以 FPI 作为鉴频器时(仿真光路见图 1(b)), 由于 FPI 形成的干涉圆环距中心最近的亮条纹清晰, 且亮度最高, 故选择距中心最近的亮条纹作为参考, 计算干涉圆环 1 级亮条纹的半径。

相邻光束的光程差为

$$\Delta l_2 = 2nd \cos i \quad (8)$$

光程差对应的相位差为

$$\delta_2 = \frac{4\pi}{\lambda} nd \cos i \quad (9)$$

式中, n 为介质折射率, d 为间隙宽度, i 为光线入射角。

干涉圆环光强分布为艾里函数, 即

$$I_r = \frac{I_0}{1 + \frac{4r \sin^2(\delta_2/2)}{(1-r)^2}} \quad (10)$$

式中, I_r 为透射光强; I_0 为入射光强; r 为条纹半径; δ_2 为相位差。当 δ_2 为 2π 的整数倍时, I_r 将获得极大值。当 $i=0$ 时, 对应 $k = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{2}{\lambda} nd \cos i$, 则可得接收器上距中心最近的 1 级亮条纹的级数为 $[k]$ 。条纹半径 r 按下式计算, 即

$$r = fi \quad (11)$$

式中, f 为扩束镜焦距。

对应不同的波长 λ , k 值不同则条纹移动的半径 r 不同。测得频移前后的条纹半径 r_1, r_2 , 则

$$\Delta r = |r_1 - r_2| = f \left| \arccos \frac{k_0}{k_1} - \arccos \frac{k_1}{k_1} \right| = f \left| \arccos \frac{2\sigma_0 nd \cos i}{2\sigma_1 nd \cos i} - \arccos \frac{2\sigma_1 nd \cos i}{2\sigma_1 nd \cos i} \right| \quad (12)$$

式中, Δr 为条纹半径差; σ_0 为原始入射激光波数; k_0 为频移前波长对应光程差; k_1 为频移后波长对应光程差; $\sigma_1 = \sigma_0 + \Delta\sigma_{\text{doppler}}$ 为频移后入射激光波数。由式(12)结合式(1)进行仿真分析, 可得基于 FPI-条纹成像技术的径向风速。

2 测量系统结构

基于激光雷达的平流层飞艇机载风速测量系统主要包括 4 个子系统: 发射系统、收发系统、接收系统和控制系统。发射系统由激光器、扩束镜组成, 目的是产生并发射激光束至一定距离的探测区域。收发系统由分束器、接收望远镜组成, 将出射激光分束并接收来自平面两个方向的散射信号。接收系统包括传递光信号的光纤、分束片以及窄带滤光片, 对散射信号进行处理, 提取频移信息并转换成电信号传输给数据分析系统, 其中关键是鉴频元件和探测元件。由计算机、激光电源、标准具温度和校准控制器等组成的控制系统, 能够实现风速的提取与分析, 控制调节其他系统并为各系统提供电源。

基于激光雷达的平流层飞艇机载风速测量系统结构如图 3 所示。大气散射信号经过鉴频器后, 采用边缘检测技术, 鉴频器可由具有高量子效率的 PMT 光电倍增管进行微弱光

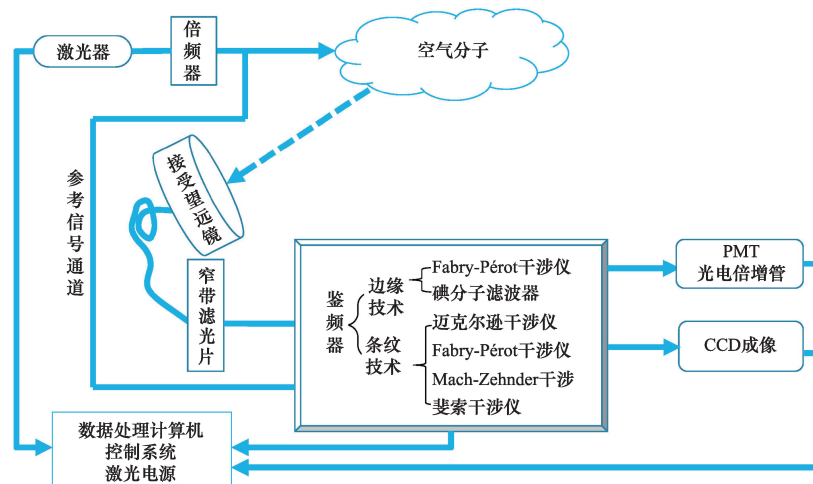


图 3 基于激光雷达的平流层飞艇机载风速测量系统结构

Fig.3 Airborne wind velocity measurement system for stratosphere airship based on lidar

强信号探测;采用条纹成像技术,鉴频器产生的干涉图像可利用具有成像功能的CCD进行条纹探测。探测器将光信号转化成电信号,传递给计算机进行数据处理。

系统以大气分子的瑞利散射作为主要探测目标,根据瑞利散射与波长的四次方反比关系,选用较短的波长有助于获得更强的后向散射系数,从而在同样的发射能量下获得更强的回波信号。目前常见的激光雷达测风速系统及接收望远镜的技术参数分别如表1、表2所示。

表1 激光雷达测风速系统参数

Table 1 Parameters of lidar velocity measurement system

激光雷达测风速系统	脉冲重复频率/Hz	单脉冲能量/mJ	功率/W	搭载平台
AWIATOR	15	—	1~3	空基
GLOW	10	70	—	地基
MOADS	1	—	0.5	空基
BalloonWinds	50	—	>4	天基
TwiliTE	200	30	—	天基
CALIPSO	20	250	>20	天基
ALADIN	100	>150	—	天基

表2 激光雷达测风速接收望远镜参数

Table 2 Parameters of velocity measurement receiving telescope lidar

接收望远镜	探测高度/m	望远镜口径/mm
BalloonWinds	0~30000	500~1500
AWIATOR	50~150	约400
MOADS	3~10	80

3 仿真分析与讨论

参考国外相关研究,空基测风速系统如MOADS^[35-36]、AWIATOR^[27]和BalloonWinds^[37]等均采用条纹成像技术。条纹成像技术与边缘检测技术两者在探测灵敏度上没有明显的优劣,而对于激光雷达技术,多级条纹成像可以实现比双边边缘检测更高的光谱分辨率。

利用ZEMAX光学设计仿真软件对基于条纹成像技术的风速测量方法进行分析,并利用非序列模式验证风速反演算法。

初始波长设为355 nm,采用MZI鉴频器时,其反射镜M2的偏转角 $\theta=0.001^\circ$ (图2),依据风速标准差最小化和条纹间隔最大化要求^[38-39],初始光程差设置为3.16 cm,探测器显示1个条纹周期,即

$$\sigma_\theta \theta d = 1 \quad (13)$$

式中, d 为探测器长度,设置探测器长度为10 mm,分辨率为1024×1024。

假设由于风速频移后波长变为355.00005 nm,利用光线追迹,探测器1和探测器2接收的条纹图像如图4所示。光强以灰度表示,通过提取每一行像素点的光强平均值,可以得到条纹光强沿探测器屏幕垂直方向的分布情况,从而得到探测器1、探测器2分别在两种频率下的条纹光强曲线,如图5所示。

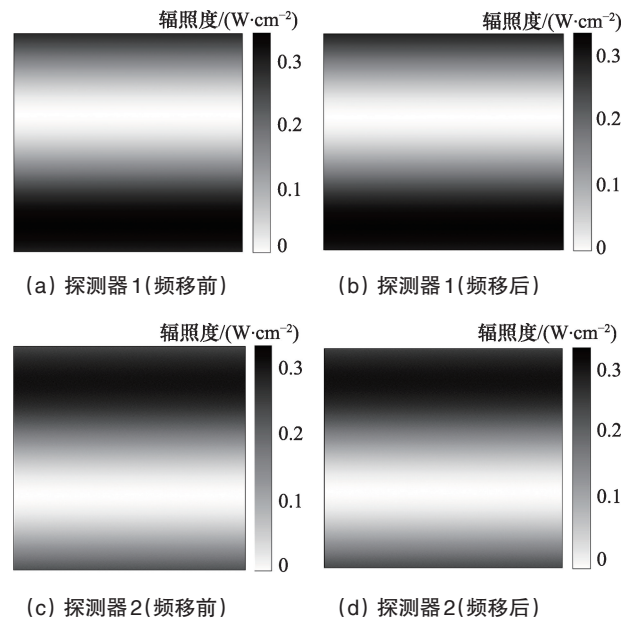


图4 MZI仿真结果

Fig.4 MZI simulation results

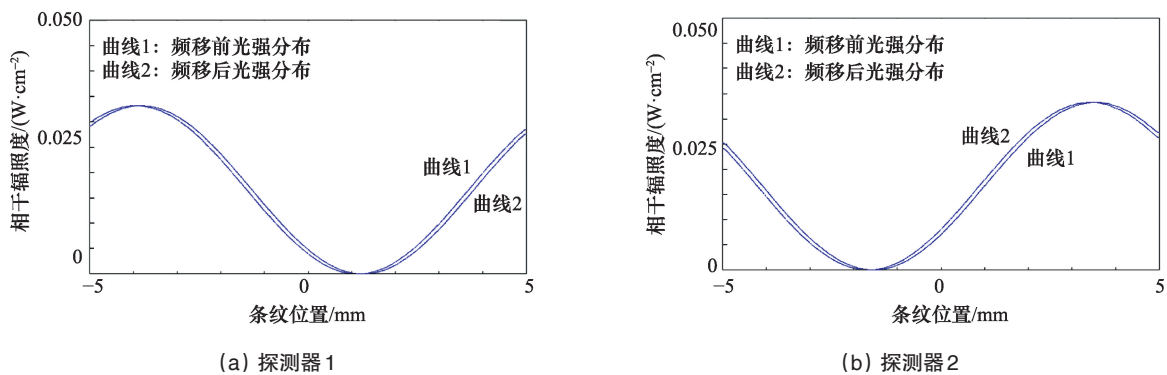


图5 探测器条纹光强分布曲线

Fig.5 Intensity distribution curve for fringe technology in the detector

通过图像处理,测得探测器1的2条光强曲线间隔为0.274 mm,应用式(7)进行仿真分析得径向风速为22.7 m/s;同理,依据探测器2的2条光强曲线间隔进行仿真分析,得到径向风速为22.3 m/s。两探测器的平均风速为22.5 m/s,而式(1)计算的理论风速为21.13 m/s,仿真误差为6.5%。

采用FPI鉴频器时,仿真光路如图6所示,其中F-P标准具两侧镀高反膜,光线通过透镜组产生等倾干涉圆环。由于在反演风速计算时只需1级亮条纹半径,为了使探测的准确度提高,阵列探测器只显示1级条纹。设置探测器尺寸为2 mm×2 mm,分辨率为1024×1024。

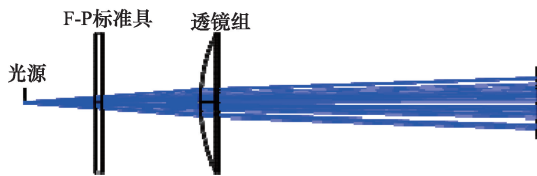


图6 FPI仿真光路

Fig.6 Light path diagram of FPI simulation

频移前后1级亮条纹的干涉圆环如图7(a)(b)所示。将光强数据导出,分别提取频移前后1级亮条纹干涉圆环坐标位置如图7(c)(d)所示,测得频移前后半径差为0.00305 mm,应用式(1)和式(12)进行仿真分析得径向风速为23.57 m/s,与理论值21.13 m/s相比,仿真误差为11%。

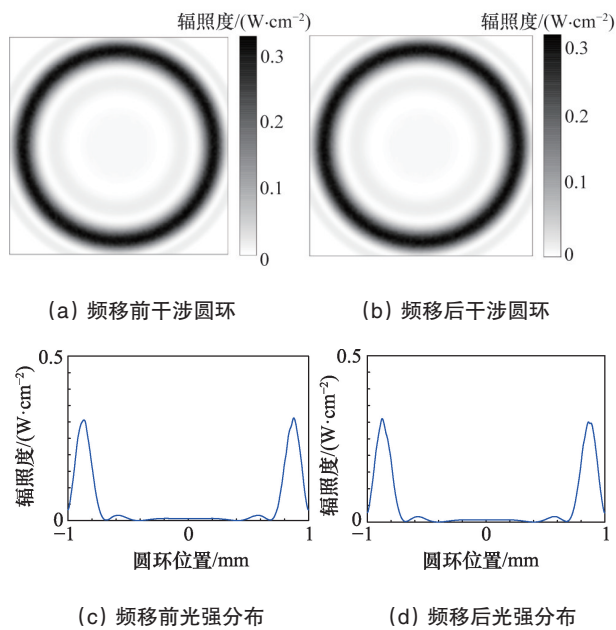


图7 FPI仿真结果

Fig.7 FPI simulation results

采用MZI作为鉴频器时,根据探测器尺寸及分辨率,可得最小探测条纹移动距离为1个像素点0.0098 mm,最小探测速度为1.62 m/s;采用FPI作为鉴频器时,最小探测速度为1.9 m/s,两者探测灵敏度相近。另外,仿真图像中的像素点

亮度的数据处理可能存在一定误差,尤其是采用FPI需要精确测量干涉圆环的直径,因此对一定宽度的圆环光强峰值位置的测量容易引入观测误差,需要改进和优化。

综合分析仿真结果,MZI-条纹成像技术相比于FPI-条纹成像技术测速误差较小。但FPI光路较短,结构简单,具有较小的体积。对于探测器而言,FPI对阵列成像探测器的精度和分辨率有更高的要求,实际应用时需要综合考虑全系统光路设计、光学元件透过率和吸收系数。对于平流层飞艇机载风速测量,MZI-条纹成像技术与FPI-条纹成像技术均能满足测量要求,因此条纹成像技术对于平流层飞艇具有较好的应用条件。

4 结论

本文提出一种基于激光雷达直接探测技术的平流层飞艇机载风速测量方法。与理论值相比,本文方法中,FPI-条纹成像技术测量误差为11.0%,测量分辨率为1.90 m/s;MZI-条纹成像技术测量误差为6.5%,测量分辨率为1.62 m/s,两者均具有较好的测量精度,能够满足工程应用要求。

仿真结果证明了基于激光雷达直接探测技术的平流层飞艇机载风速测量方法的可行性,在实际应用时,还需要考虑系统尺寸和各元件效率等。后续课题将通过实验和实际风洞测试,进一步提高本方法的精确性。

参考文献 (References)

- [1] 王依,姚开明.民用飞机空速管空速输出特性研究[J].科技创新导报,2013(3):17-18.
Wang Yi, Yao Kaiming. Research on civil aircraft pitot tube pitot output characteristic[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013 (3): 17-18.
- [2] 曲国福,刘宏昭.微型智能低空速传感器的设计[J].传感技术学报,2008(11):2404-2407.
Qu Guofu, Liu Hongzhao. The design of a novel micro intelligent low airspeed sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators[J], 2008 (11): 2404-2407.
- [3] 刘佳佳. AIN基MEMS风速风向集成传感器的设计[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2013.
Liu Jiajia. Design of AIN-based MEMS wind speed and direction integrated sensor[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2013.
- [4] 姚炜.微风速矢量测量系统[D].合肥:合肥工业大学,2012.
Yao Wei. Measurement system of low wind speed and direction[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [5] 高冬晖. CMOS集成二维风速传感器的研究[D].南京:东南大学,2005.
Gao Donghui. Research on CMOS integrated two-dimensional thermal wind sensor[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [6] 韦青燕,张天宏.高超声速热线/热膜风速仪研究综述及分析[J].测试技术学报,2012,26(2):142.
Wei Qingyan, Zhang Tianhong. Review and analysis of hot-wire/film anemometry for hypersonic airflow measurement[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2012, 26(2): 142.

- [7] 杨朝辉, 杨长业, 韩晓锋. 硅压阻固态测风仪的设计与研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2005(2): 17-21.
Yang Zhaohui, Yang Changye, Han Xiaofeng. Research and design of silicon piezoresistive solid state wind detecting instrument[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2005(2): 17-21.
- [8] 杨光永. 基于激光位移测量的光学压力传感器研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
Yang Guangyong. Optical pressure sensor based on laser displacement measurement[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [9] 刘波. 高灵敏度光纤光栅压力传感器[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
Liu Bo. High sensitivity fiber bragg grating pressure sensor[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [10] 刘云启, 郭转运. 光纤光栅的压力传感特性研究[J]. 光子学报, 1999, 28(5): 443-445.
Liu Yunqi, Guo Zhuanyun. Pressure properties of fiber bragg grating [J]. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(5): 443-445.
- [11] 薛伟, 王权, 丁建宁. 基于MEMS技术的超微压压力传感器研究进展[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 157-159.
Xue Wei, Wang Quan, Ding Jianning. Research status and prospect of ultraminiature pressure sensor based on MEMS technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 157-159.
- [12] 王立代, 熊沈蜀, 周兆英. 基于MEMS压力传感器的微型空速计[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(8): 1066-1068.
Wang Lidai, Xiong Shenshu, Zhou Zhaoying. Miniature airspeed meter based on MEMS pressure sensor[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2005, 45(8): 1066-1068.
- [13] 朱中华, 丁建宁. 微压压力传感器的设计与研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2008.
Zhu Zhonghua, Ding Jianning. Design and research of micropressure sensor[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2008.
- [14] 张广斌, 王斌斌, 陈玉林. 超声波风速风向测量装置的设计[J]. 电子设计工程, 2013, 21(17): 74-76.
Zhang Guangbin, Wang Binbin, Chen Yulin. Design of ultrasonic wind velocity measurement system[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(17): 74-76.
- [15] 郑毅. 超声波三维测风系统的开发[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
Zheng Yi. Development of ultrasonic three-dimensional wind measuring system[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [16] 李翠. 基于三维实时数据的风速短期预测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
Li Cui. Research on wind short-term prediction based on three dimension real-time data[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012.
- [17] 郭星辰. 三维超声波测风系统的设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
Guo Xingchen. Design of three-dimensional ultrasonic wind measurement system[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.
- [18] 张捷光, 齐文新, 齐宇. 三维超声波测风仪原理与应用[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(1): 124-126.
Zhang Jieguang, Qi Wenxin, Qi Yu. Theory and applications of three-dimensional ultrasonic anemometer[J]. Computer & Digital Engineering, 2013, 41(1): 124-126.
- [19] 张铭格, 刘学强. 高超声速飞行器嵌入式大气数据传感系统测压点布局[J]. 江苏航空, 2014(3): 47-50.
Zhang Mingge, Liu Xueqiang. Research on pressure measuring point layout of hypersonic aircraft flush airdata sensing system[J]. Jiangsu Aviation, 2014(3): 47-50.
- [20] 虞飞, 陶建武, 钱立林. 基于声矢量传感器阵列的空速估计算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(5): 1060-1065.
Yu Fei, Tao Jianwu, Qian Lilin. Airspeed estimation based on acoustic vector sensor array[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(5): 1060-1065.
- [21] 方习高. 嵌入式大气数据传感系统的技术及应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
Fang Xigao. Research on the technique and application of flush airdata sensing system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [22] 李然, 王成, 苏国中. 星载激光雷达的发展与应用[J]. 科技导报, 2007, 25(14): 58-63.
Li Ran, Wang Cheng, Su Guozhong. Development and applications of spaceborne lidar[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(14): 58-63.
- [23] 李峰, 崔希民, 袁德宝. 窗口迭代的克里金法过滤机载lidar点云[J]. 科技导报, 2012, 30(26): 24-29.
Li Feng, Cui Ximin, Yuan Debao. A window iterative kriging algorithm for filtering airborne lidar point clouds[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(26): 24-29.
- [24] 谭莹, 吴夏颖, 丁颖. 多光束测风激光雷达技术分析和比较[J]. 科技导报, 2011, 29(29): 22-26.
Tan Ying, Wu Xiaying, Ding Ying. Analysis and comparison of multiple beam lidars for wind measurement[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(29): 22-26.
- [25] Wang G, Dou X, Xia H, et al. Performance of a rayleigh doppler lidar for middle atmosphere wind measurement[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2351-2357.
- [26] Frehlich R. Errors for space-based doppler lidar wind measurements: Definition, performance, and verification[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(11): 1749-1772.
- [27] Schmitt N P, Rehm W, Pistner T, et al. The awiator airborne lidar turbulence sensor[J]. Aerospace Science and Technology, 2007, 11(7): 546-552.
- [28] Cézarid N, Dolfi-Bouteyre A, Huignard J P, et al. Performance evaluation of a dual fringe-imaging Michelson interferometer for air parameter measurements with a 355 nm Rayleigh-Mie lidar[J]. Applied Optics, 2009, 48(12): 2321-2332.
- [29] Rogers R R, Hostetler C A, Hair J W. Assessment of the CALIPSO Lidar 532 nm attenuated backscatter calibration using the NASA LaRC airborne High Spectral Resolution Lidar[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(3): 1295-1311.
- [30] Tchoryk P, Watkins C B, Nardell C A. Molecular optical air data system[C]/SPIE Aerosense Conference. Orlando, USA: International Society for Optics and Photonics, 2001, 4377: 194-205.
- [31] 沈法华, 舒志峰, 孙东松. 瑞利散射多普勒激光雷达风场反演方法[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 192-198.
Shen Fahua, Shu Zhifeng, Sun Dongsong. Wind retrieval algorithm of Rayleigh Doppler Lidar[J]. Acta Physica Sinica. 2011, 60(6): 192-198.
- [32] 华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2008(3): 26-32.

- Hua Dengxing, Song Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008(S3): 26-32.
- [33] 胡冬冬. 平流层测风激光雷达光学接收机研制及性能分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- Hu Dongdong. Development and analysis of stratospheric wind lidar receiver[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [34] 汪丽, 谭林秋, 李仕春. 基于 Mach-Zehnder 干涉仪条纹成像技术的多普勒测风激光雷达鉴频系统研究及仿真[J]. *量子电子学报*, 2013, 30(1): 98-102.
- Wang Li, Tan Linqiu, Li Shichun. Study and simulation of frequency discriminator for doppler wind lidar based on fringe imaging Mach-Zehnder interferometer[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(1): 98-102.
- [35] Watkins C B, Richey C J, Tchoryk P. Molecular optical air data system prototype III[C]//Defense and Security Symposium. Orlando, USA: International Society for Optics and Photonics, 2004, 5412: 10-20.
- [36] Watkins C B, Richey C J, Tchoryk P. Molecular optical air data system flight experiment[C]//Society of Photo-optical Engineers Aerospace 2003 Symposium. Orlando, USA: International Society for Optics and Photonics, 2003: 236-245.
- [37] Dehring M T, Tchoryk P, Wang J. High altitude balloon-based wind lidar demonstration: from near space to space[C]//Defense and Security Symposium. Orlando, USA: International Society for Optics and Photonics, 2006, 62200P: 1-9.
- [38] Bruneau D. Fringe-imaging Mach-Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular Doppler wind lidar[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(3): 503-510.
- [39] Liu Z, Kobayashi T. Differential discrimination technique for incoherent Doppler lidar to measure atmospheric wind and backscatter ratio [J]. *Optical Review*, 1996, 3(1): 47-52.

Stratospheric airship airborne velocity measurement

ZHANG Lanchuan, MENG Junhui, LÜ Mingyun

School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China

Abstract The wind field data are important input parameters for the stratospheric airship in the long-time loiter and the flight control. In view of the thin air in the stratosphere and the low precision of the pitot tube, a direct detection method based on LIDAR is proposed. A Doppler lidar velocity measurement system based on the direct detection principle is designed. The wind velocity inversion mathematical model of the two fringe imaging techniques is built and numerical simulations are carried out. It is shown that the measurement errors of the Fabry-Perot etalon (FPI) and the Mach-Zehnder interferometer (MZI) are 11.0% and 6.5%, respectively, at 355 nm output laser and 20 m/s wind speed. And the velocity resolution of the two methods are 1.9 m/s and 1.6 m/s, respectively. The results indicate that the new method can effectively meet the requirements of the stratospheric airship wind speed measurement.

Keywords stratospheric airship; wind measurement; lidar; fringe imaging technique

(责任编辑 韩星明)