



星载测风激光雷达355 nm光学鉴频器及闭环控制系统

高龙 安超 陶宇亮

355 nm optical frequency discriminator and closed-loop control system for spaceborne wind lidar

GAO Long, AN Chao, TAO Yuliang

引用本文:

高龙, 安超, 陶宇亮. 星载测风激光雷达355 nm光学鉴频器及闭环控制系统[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 904–913. DOI: 10.5768/JAO202344.0407002

GAO Long, AN Chao, TAO Yuliang. 355 nm opticalfrequency discriminator and closed-loop control system for spaceborne wind lidar[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(4): 904–913. DOI: 10.5768/JAO202344.0407002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0407002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[星载激光雷达F-P标准具高效温控算法的设计与实现](#)

Design and implementation of efficient temperature control algorithm for Fabry–Perot etalon of spaceborne lidar

应用光学. 2018, 39(1): 130–134 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0107003>

[星载激光雷达滤波器组件热分析及参数优化](#)

Thermal analysis and parameter optimization of spaceborne lidar filter

应用光学. 2017, 38(4): 660–664 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0407001>

[基于2D微电子机械系统\(MEMS\)镜全向激光雷达光学系统设计](#)

Design on omnidirectional optical system of lidar based on 2D MEMS mirror

应用光学. 2018, 39(4): 460–465 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0401003>

[基于加速度反馈的上反稳瞄系统最优控制研究](#)

Optimal control of upper anti-stabilization aiming system based on acceleration feedback

应用光学. 2021, 42(6): 997–1005 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601008>

[激光雷达辅助驾驶道路参数计算方法研究](#)

Research on road parameters calculation for auxiliary driving with LIDAR

应用光学. 2020, 41(1): 209–213 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0107004>

[基于机载激光雷达点云的雪道坡度提取算法](#)

Slope extraction algorithm of ski tracks based on airborne LIDAR point cloud

应用光学. 2021, 42(3): 481–487 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0302005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 04-0904-10

星载测风激光雷达 355 nm 光学鉴频器及 闭环控制系统

高 龙, 安 超, 陶宇亮

(中国空间技术研究院 北京空间机电研究所, 北京 100194)

摘要: 三通道 355 nm 光学鉴频器广泛应用在星载测风激光雷达回波信号鉴频过程中, 是实现双边缘风速多普勒鉴频的核心元件, 其指标与可靠性决定了系统的探测精度。研制了基于压电换能器 (piezo-electric transducer, PZT) 调谐的 355 nm 三通道标准具鉴频模块, 模块有效口径 35 mm, 峰值透过率 75%, 自由光谱范围 12.5 GHz, 半高宽 1.7 GHz。通过三通道测试系统对自由光谱范围、半高宽、峰值透过率、调谐系数等指标进行了测试。结果表明: 当外部驱动电压为 75 V 时, 峰值透过率分别为 0.859、0.878 和 0.735, 半高全宽分别为 1.843 GHz、1.882 GHz 和 1.611 GHz, 调谐系数为 1.96 GHz/V、1.93 GHz/V 和 1.88 GHz/V。针对光学鉴频模块 3 个通道 PZT 调谐系数不一致的情况, 分析出对风速误差的影响范围为 ± 0.1 m/s。通过对闭环控制系统进行测试, 该系统可实现对 355 nm 激光发射频率的实时锁定, 解决了光学鉴频模块每次工作状态初始位置不一致带来的问题, 提高了风速鉴频精度, 可实现锁定时间长达 30 min 以上, 满足了星载测风激光雷达的应用需求。另外, 仿真研究表明: 当三通道光学鉴频模块间隔变化 0.08 nm 时, 引起的风速误差为 1 m/s。

关键词: 测风激光雷达; 光学鉴频器; 自由光谱范围; 峰值透过率; 闭环反馈控制

中图分类号: TN256; TN249; TN247

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202344.0407002](https://doi.org/10.5768/JAO202344.0407002)

355 nm optical frequency discriminator and closed-loop control system for spaceborne wind lidar

GAO Long, AN Chao, TAO Yuliang

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, China Academy of Space Technology, Beijing 100194, China)

Abstract: The three-channel 355 nm optical frequency discriminator is widely used in the frequency discrimination of the backscattered signal of the space-borne wind lidar, which is the core component to discriminate the wind speed Doppler frequency shift in the double-edge method, and its parameters and reliabilities determine the detection accuracy of the system. A 355 nm three-channel etalon module based on piezoelectric transducer (PZT) crystal tuning was developed, with the effective diameter of 35 mm, the peak transmittance of 75%, the free spectral range of 12.5 GHz, and the full width at half maximum of 1.7 GHz. Through the three-channel test system, the parameters including free spectral range, full width at half maximum, peak transmittance, and tuning coefficient were tested. The test results show that when the external driving voltage is 75 V, the peak transmittances of the three channels are 0.859, 0.878, and 0.735, respectively. The full width at half maximum is 1.843 GHz, 1.882 GHz, and 1.611 GHz, respectively. The tuning

收稿日期: 2022-11-18; 修回日期: 2023-01-10

基金项目: 十三五航天预研基金 (xxxxxxxx)

作者简介: 高龙 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事激光雷达大气探测、测风激光雷达、合成孔径激光成像雷达技术研究。E-mail: gaolongc508@163.com

coefficients are 1.96 GHz/V, 1.93 GHz/V, 1.88 GHz/V, respectively. In view of the inconsistent tuning coefficients of three channels of the PZT crystal of the optical frequency discrimination module, the influence range of the analysis on the wind speed error is ± 0.1 m/s. Through the test of the closed-loop control system, the system can realize the real-time locking of the 355 nm laser emission frequency, solve the problems caused by the inconsistent initial position of the optical frequency discrimination module in each working state, improve the frequency discrimination of wind speed, and can achieve the stable locking time of more than 30 minutes, which meets the application requirements of space-borne wind lidar. Simulation studies show that when the interval of three-channel optical frequency discrimination module changes by 0.08 nm, the resulting wind speed error is 1 m/s.

Key words: wind lidar; optical frequency discriminator; free spectral range; peak transmittance; closed-loop feedback control

引言

非相干测风激光雷达是测量中高空风场的主要技术手段^[1-4]。测风激光雷达的核心部件是它的鉴频系统, 目前主要的鉴频技术分为条纹成像和边缘法两种。条纹成像是利用干涉条纹的重心位置变化来探测频率的变化, 传统的条纹技术是利用法布里-珀罗标准具来产生环状条纹, 通过复杂的接收光路将环状条纹转变为线条纹会聚在CCD上, 或者直接将环状条纹成像到专门匹配的环状成像探测器^[5-7], 但探测器的量子效率不高。另外, 也可以通过菲佐(Fizeau)干涉仪形成的线状条纹, 并直接成像在电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)或线列探测器上, 其信号处理简单, 对系统要求也不高, 但这种方式鉴频的精度受到CCD分辨率的限制, 精度提升的空间有限。另外, 还有通过碘分子气体吸收池鉴频的方式^[8], 该方式属于边缘技术, 虽然精度可以, 但是对星载环境使用有一定的局限性。边缘技术是利用窄带滤波器(如法布里-珀罗标准具)将频率的变化转换为信号强度的变化以测量多普勒频移。边缘技术又分为单边缘技术与双边缘技术, 双边缘技术相对于单边缘技术在鉴频方式上更灵活可靠, 精度更高。目前针对于双边缘鉴频技术的FP标准具鉴频器的测试主要是针对532 nm激光波长^[9-11], 并且主要是针对通道单独测试进行的, 而对于355 nm三通道FP鉴频模块(3个通道同时进行测试)的文献报道较少。

本文针对星载非相干测风激光雷达系统风速鉴频的应用需求, 给出了三通道FP光学鉴频模块的技术指标参数, 仿真计算在不同面形精度、倾斜

角度等参数情况下的透过率函数, 研制了基于PZT晶体调谐的三通道FP激光光学鉴频模块, 根据鉴频模块特性, 采用三通道专用测试系统对鉴频模块进行了三通道透过率、调谐系数、自由光谱范围、半高宽等主要指标测试。结合PZT响应参数曲线对PZT不一致性导致的腔长变化与风速变化进行了数值仿真分析, 同时针对星载应用环境, 分析了在振动环境影响下的三通道FP激光鉴频器最优控制参数。最后, 针对三通道FP光学鉴频器, 研制了闭环反馈控制系统, 通过实验测验证, 可以满足闭环锁定功能, 可实现对激光中心频率抖动的实时锁定, 满足未来星载测风激光雷达的观测需求^[12-13]。

1 FP 原理

FP是一种干涉仪, 主要由两块平板玻璃或石英板组成, 是一种常用的多普勒风速鉴频器, 其透过率函数^[14-15]可用式(1)表示:

$$T = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (1)$$

式中: $\delta = 4\pi nh \cos\theta/\lambda$, θ 为入射激光相对于平板玻璃的入射角; n 为标准具相对折射率; h 为标准具的腔长; λ 为入射激光波长; R 为玻璃对入射激光的反射率。从式(1)可看出, FP的透过率与腔长、波长和入射光角度有关。

研制的三通道FP鉴频模块如图1所示。该FP鉴频模块采用空气隙结构, 与机械结构一体化设计, 其系统可靠性高, 其主要参数如表1所示。



图 1 三通道 FP 标准具鉴频模块

Fig. 1 Three-channel F-P etalon

表 1 FP 标准具鉴频器主要技术指标

Table 1 Main technical indexes of three-channel F-P etalon

| 指标名称 | 数值 |
|---------------|----------------------------------|
| 腔长/自由光谱范围/GHz | 12 |
| 有效通光孔径/mm | ≥0.35 |
| 工作波长/nm | 355 |
| 两反射面反射率/% | 64 |
| 通道间腔长间隔/nm | 37.7±4@1通道与2通道 75.4±4@1通道与3通道 |
| 峰值透过率/% | ≥75 |
| 透射峰半高全宽/GHz | 1.7 |

如图 2 所示为按照表 1 进行仿真的 355 nm 透过率光谱曲线。理想情况下, 式(1) 中 $F = 2\sqrt{R}/(1-R)$, 为条纹精细度。

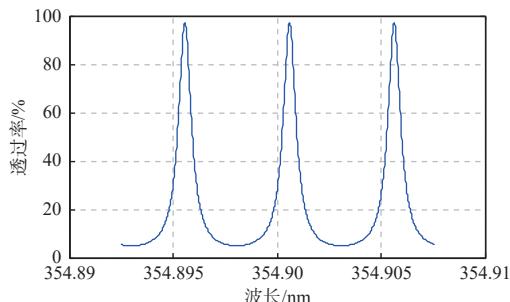


图 2 透过率曲线光谱图

Fig. 2 Spectrogram of transmittance curve

当三通道 FP 鉴频模块标准具前后表面玻璃平板存在不同面型精度、前后表面倾斜以及平面缺陷度时, 式(1) 中的 F 可表达为

$$1/F^2 = 1/F_f^2 + 1/F_R^2 \quad (2)$$

式中: $F_R \approx \pi\sqrt{R}/(1-R)$, 为膜层精细度; F_f 为面型精细度, $F_f \approx M/2$, M 是平面度、平行度的综合, 例如面型精度为 $\lambda/100$, $M=100$; $F_f=50$ 。

按照以上因素及式(1) 仿真出了对透过率的影响, 由图 3 可看出, 标准具的峰值透过率随着面型

精度与表面不规则度变差而降低, 按照峰值透过率优于 75% 的要求, 其面型精度与表面不规则度必须优于 $0.03\lambda(632.8 \text{ nm})$ 与 8 nm(RMS)。

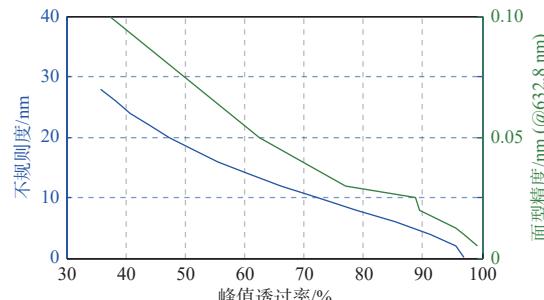


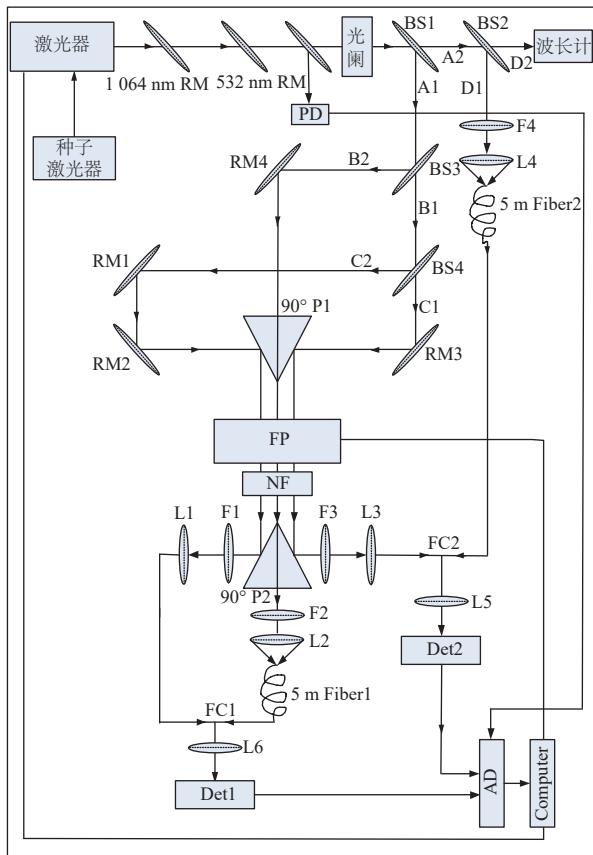
图 3 三通道 FP 鉴频透过率与表面不规则度及面型关系

Fig. 3 Relationship between three-channel F-P etalon transmittance and surface irregularity as well as surface accuracy

2 三通道测试

测试装置如图 4 所示。Nd: YAG 激光器输出的三倍频脉冲激光, 通过种子光注入来获得单纵模高稳频的 355 nm 激光 (Innolas SpitLight 2000)。激光出射后, 经过两片分色镜将 355 nm 激光中的 1 064 nm 和 532 nm 激光滤除, 然后反射部分激光到光电二极管, 用做光触发来触发高速采集卡同步采集。利用分束镜 1、2、3、4 将 355 nm 的测试激光分为 4 束, 其中光束 B2、C1、C2 正入射到 FP 鉴频模块的 3 个通道中; 光束 D1 用于监测激光脉冲的能量波动; 光束 D2 耦合进波长计 (Highfinesse WS6-600 standard), 用于监测激光频率变化。经过衰减后的三束光束依次由直角棱镜、聚焦镜耦合进两根 Y 型光纤, 最后进入探测器 1(Det1) 和探测器 2(Det2) 的光敏面。由图 4 可看出, 探测器 1 用来探测光束 B2 和 C2 的脉冲信号, 探测器 2 探测光束 C1 和 D1 的脉冲信号。为了使两个信号的波形能够很好区分开, 分别接入长光纤来延长光束光程。探测器 1 和 2 输出的电信号经由高速采集卡量化并存入计算机。

在本文中, 选用通过改变 FP 鉴频器模块腔长的方法测量其透过率曲线。激光器输出单纵模稳频激光, 同步调谐控制器的 3 个通道驱动电压, 对 FP 鉴频器模块的腔长进行调谐, 测量记录三通道的光脉冲强度。经过系统校正后, 得到三通道透过率随驱动电压的变化曲线, 实现对 FP 鉴频器模块的各项技术指标测试, 主要包括 FWHM、三通道透过率光谱曲线。



BS1,BS2,BS3,BS4 为分束镜; PD1, PD2, PD3 为光电探测器;
 F 为滤光片; L1,L2,L3,L4,L5,L6 为透镜; RM1,RM2,RM3,
 RM4 为反射镜; NF 为窄带滤光片; FC 为光纤耦合器;
 FP 为法布里标准具。

图 4 测试装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of testing device

2.1 串扰系数

在测量装置中, $I_2(V_i)$ 和 $I_4(V_i)$ 分别为两个探测通道中的第二个激光脉冲, 因此, 对应的串扰系数为

$$\beta_{\text{Fiber1}} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{I_2(V_i)}{I_1(V_i)}}{N}$$

$$\beta_{\text{Fiber2}} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{I_4(V_i)}{I_3(V_i)}}{N} \quad (3)$$

式中: $I_1(V_i)$ 、 $I_2(V_i)$ 、 $I_3(V_i)$ 和 $I_4(V_i)$ 分别代表两个通道中共计4个激光脉冲的信号强度; N 代表测量激光脉冲数。测量的4个通道中脉冲信号的相对强度如图5所示。测量了一组Y型光纤的串扰系数,如图6所示。两根Y型光纤的串扰系数分别为0.063 0和0.071 4,随机测量误差分别为6.39%和10.20%,如图7所示。

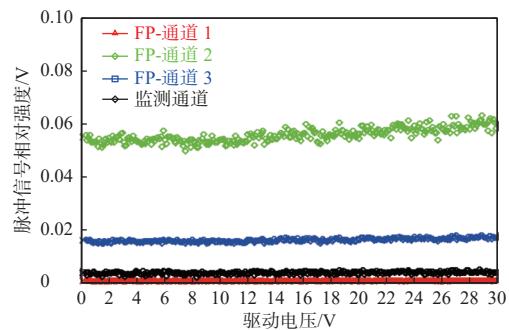


图 5 四个通道串扰系数

Fig. 5 Crosstalk coefficients of four channels

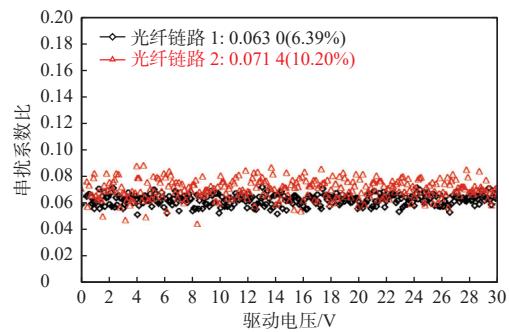


图 6 两根 Y 型光纤串扰系数

Fig. 6 Crosstalk coefficients of two Y-type optical fibers

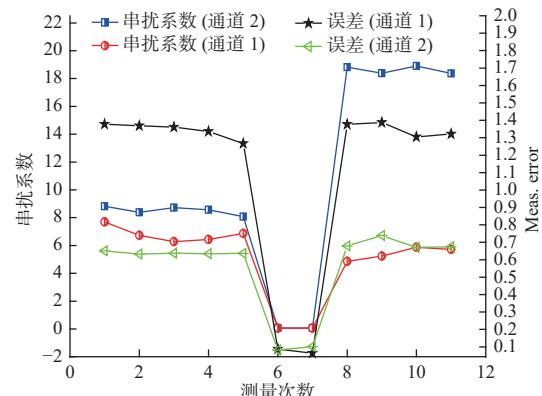


图 7 串扰系数及误差与测量次数的关系

Fig. 7 Relationship between crosstalk coefficients as well as errors and measurement times

2.2 校正系数

利用图4中的装置测量FP鉴频器模块透过率曲线随腔长变化时,需要对整个测试装置中的系统常数进行校正。在FP鉴频器模块放入该测试系统之前,利用测量的光束D1的信号强度来对测量的光束B2、C1、C2的信号强度进行校正,此三通道信号强度与D1信号强度的比值称为校正系数,该系数与系统分光比、光学效率、探测器增益系数等有关。

测量的 4 个通道中脉冲信号的相对强度如图 8 所示。计算得到的校正系数如图 9 所示。FP 鉴频器模块中 3 个通道对应的测量通道中的校正系数分别为 0.320 4、0.755 8 和 0.249 1, 随机测量误差分别为 1.89%、2.21% 和 2.30%。

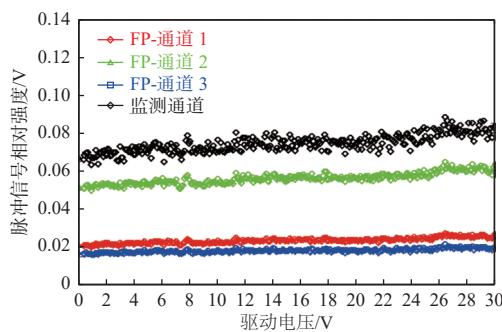


图 8 四个脉冲的校正系数

Fig. 8 Correction coefficients of four pulses

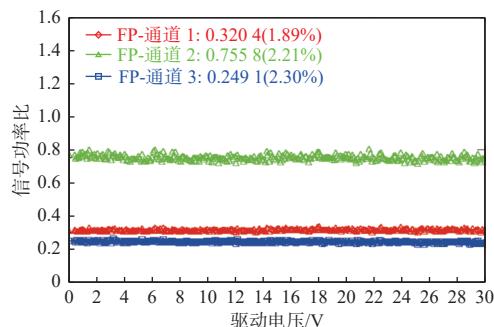


图 9 两根 Y 型光纤的校正系数

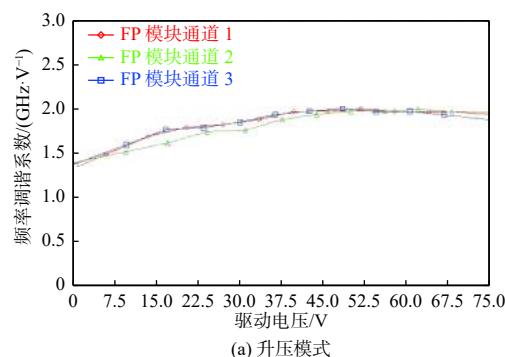
Fig. 9 Correction coefficients of two Y-type optical fibers

2.3 频率电压调谐系数

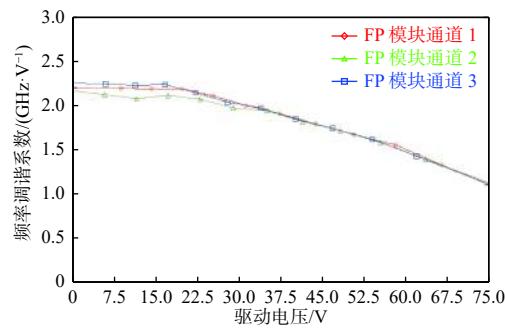
FP 模块的外部控制器三通道的输出电压有 75 V、100 V 和 150 V 三个档位。按照以上 3 个档位, 分别以升压和降压两种不同的方式测量, 测量了 3 个通道的透过率曲线, 根据 3 个通道中透过率峰值的位置和自由光谱范围, 计算得到了频率-电压调谐系数。图 10 所示为 75 V 升压与降压的调谐系数图, 可以看出, 其升压与降压过程中的调谐曲线存在偏差, 这是由 PZT 晶体的固有特性决定。本光学鉴频器模块中 PZT 的特性曲线如图 11 所示。

从测量结果可分析出, FP 鉴频模块 3 个通道的频率-电压调谐系数比较复杂。在 75 V 和 100 V 两个档位中, 升压和降压的初期, 频率-电压调谐系数逐步增加, 然后慢慢趋向于一个定值, 0~75 V: 通道 1 为 1.96, 通道 3 为 1.93, 通道 2 为 1.88。75 V~0: 通道 1 为 2.19, 通道 3 为 2.16, 通道 2 为 2.25。0~100 V:

通道 1 为 1.83, 通道 3 为 1.80, 通道 2 为 1.70。100 V~0: 通道 1 为 2.45, 通道 3 为 2.38, 通道 2 为 2.17。150 V 档位升压过程中, 频率-电压调谐系数逐步增加, 然后逐步减小; 而降压过程中, 频率-电压调谐系数几乎按照一个线性函数随电压减小而增加。总体来说, 通道 1 和通道 3 中的频率-电压调谐系数有很好的一致性, 而通道 2 中的频率-电压调谐系数与其他两个通道有一定的差异, 调谐系数都在(1~2.5) GHz/V 之间变化, 这说明了 3 个通道所对应的 PZT 晶体特性存在一定差异, 在后续的元器件筛选过程中, 尽量保证特性一致性。



(a) 升压模式



(b) 降压模式

图 10 不同调谐电压调谐方式下的频率与电压调谐系数

Fig. 10 Frequency-voltage tuning coefficients under different tuning voltages and tuning modes

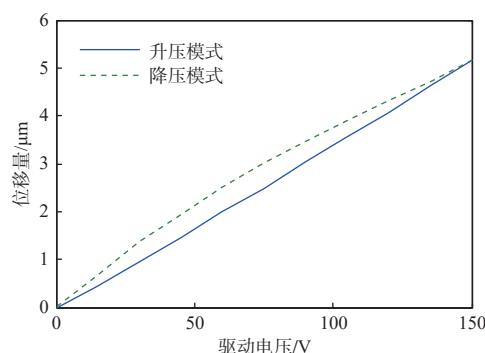


图 11 PZT 升压与降压模式下的位移量响应曲线

Fig. 11 Displacement response curves of PZT with different voltage modes

2.4 透过率光谱曲线

在 75 V、100 V 和 150 V 三个档位, 以升压和降压两种不同的方式测量, 测量了 3 个通道的透过率曲线, 具体如图 12、图 13 与图 14 所示为 FP 鉴频器模块 3 个通道透过率随驱动电压的测量结果。可以看出, 图 12 与图 13 中所示的 75 V 档位与 100 V 档位的透过率随驱动电压的升压与降压过程, 在升压与降压过程中, 3 个通道的透过率与半高全宽参数一致性较好。以图 13 为例, 升压过程见图 13(a) 中所示, 经过对峰值透过率数据进行拟合后, FP 鉴频器模块 3 个通道的峰值透过率分别为 0.859、0.878、0.735, 随机测量误差分别为 1.27%、1.32%、1.44%; 半高全宽分别为 1.843 GHz、1.882 GHz、1.611 GHz, 随机测量误差分别为 2.57%、3.82%、3.38%。降压过程如图 13(b) 中所示, FP 鉴频器模块 3 个通道的峰值透过率分别为 0.838、0.824、0.712, 随机测量误差分别为 2.64%、3.74%、2.14%; 半高全宽分别为 1.833 GHz、1.765 GHz、1.592 GHz, 随机测量误差分别为 2.50%、2.12%、1.72%。图 14 中只显示了通道 1 的半高全宽, 其半高宽满足使用要求。

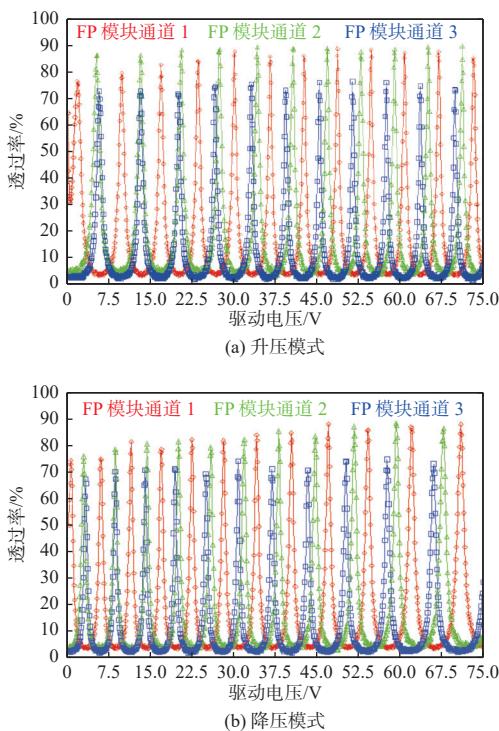


图 12 FP 鉴频模块 3 个通道透过率随驱动电压的变化

Fig. 12 Three-channel transmittance of F-P etalon module varies with driving voltage

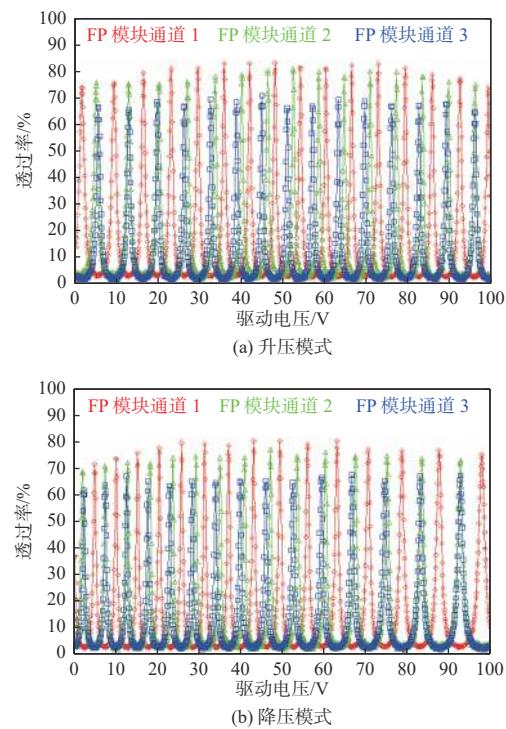


图 13 FP 鉴频器模块 3 个通道透过率随驱动电压的变化

Fig. 13 Three-channel transmittance of F-P etalon frequency discrimination module varies with driving voltage

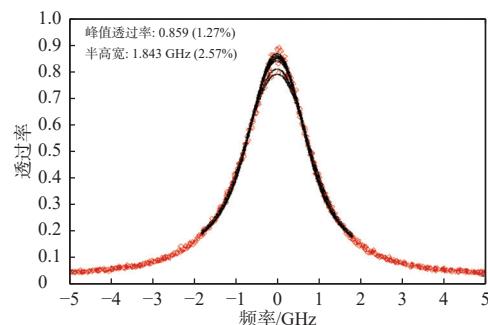


图 14 FP 鉴频模块 3 个通道峰值透过率和半高全宽

Fig. 14 Three-channel peak transmittance and full width at half maximum of F-P etalon frequency discrimination module

如图 15 所示, 相较于 75 V 与 100 V 的情况, 从 150 V 档位的升压与降压过程可以看出, 随着电压的升高或降低, 其透过率逐渐降低或升高, 这种情况不太适用于 FP 鉴频器模块的风速测量。在 150 V 档位的升压过程中, 可以看出 FP 鉴频模块 3 个通道的峰值透过率分别为 0.685、0.713、0.559, 随机测量误差分别为 6.09%、3.16%、4.91%; 半高全宽分别为 2.017 GHz、2.077 GHz、1.709 GHz, 随机测量误差分别为 9.34%、4.54%、8.80%。降压过程见图 15(b), FP 鉴频器模块 3 个通道的峰值透过

率分别为 0.838、0.824、0.712, 随机测量误差分别为 2.64%、3.74%、2.14%; 半高全宽分别为 1.833 GHz、1.765 GHz、1.592 GHz, 随机测量误差分别为 2.50%、2.12%、1.72% (见图 16)。产生这种变化的原因在于在测试过程中, 测试环境周围引入了较强的振动, 导致测试激光信号与 FP 鉴频模块入射方向发生了倾斜, 从而影响了透过率降低与半高宽加宽的情况, 最终引入一定的风速误差 (见图 17)。因此, 在实际使用中必须严格控制激光束与 FP 鉴频器模块之间的入射角度与 FP 鉴频器模块的振动因素 (见图 18)。

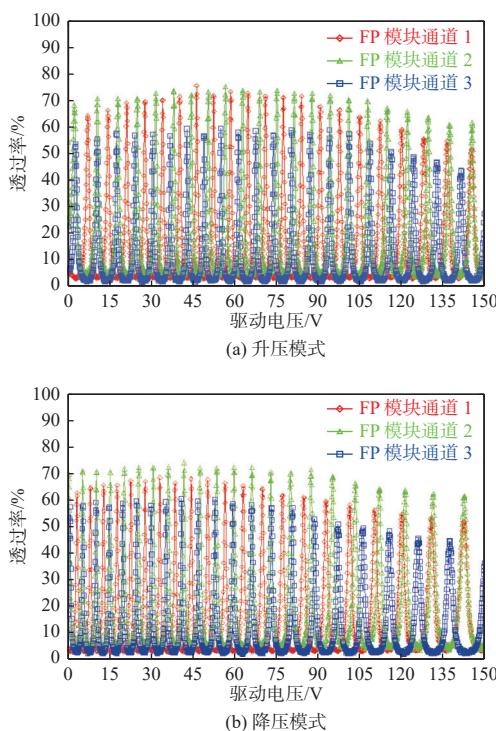


图 15 FP 鉴频模块 3 个通道透过率随驱动电压的变化

Fig. 15 Three-channel transmittance of F-P etalon frequency discrimination module varies with driving voltage

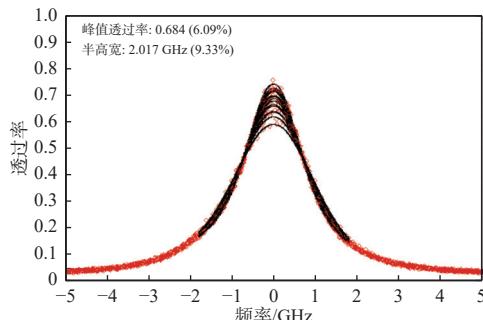


图 16 FP 鉴频器模块 3 个通道峰值透过率和半高全宽

Fig. 16 Three-channel peak transmittance and full width at half maximum of F-P etalon frequency discrimination module

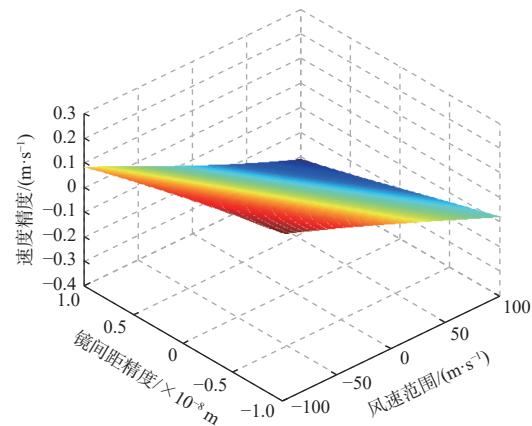


图 17 风速误差与风速范围和 FP 平板间距的关系

Fig. 17 Relationship between wind speed error as well as wind speed range and FP plate spacing

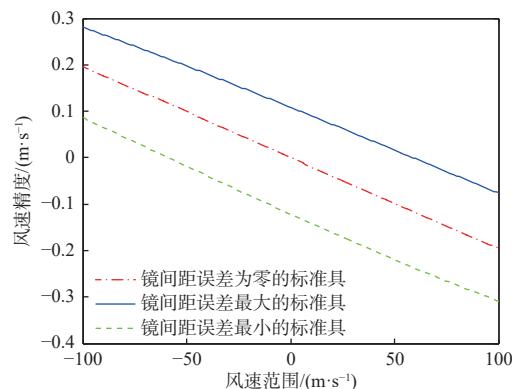


图 18 风速精度与不同风速情况下的对应关系

Fig. 18 Corresponding relationship between wind speed accuracy and different wind speed conditions

2.5 标准具鉴频器间距与风速精度的影响

为了求得透过率对于激光频率的灵敏度, 对公式 T 对 ν 求一阶导数得:

$$\frac{dT}{d\nu} = \frac{-2Fh\pi \sin\left(\frac{4\pi\nu h}{c}\right)}{c\left(1 + \frac{F}{2}\left(1 - \cos\left(\frac{4\pi\nu h}{c}\right)\right)\right)^2} \quad (4)$$

一般使激光雷达回波光频在透过率曲线斜率导数最大的位置, 即二阶导数等于 0 的位置, T 对 ν 求二阶导数得:

$$\frac{dT^2}{d\nu^2} = \frac{8F^2\pi^2h^2 \sin\left(\frac{4\pi\nu h}{c}\right)^2}{c^2\left(1 + \frac{F}{2}\left(1 - \cos\left(\frac{4\pi\nu h}{c}\right)\right)\right)^3} - \frac{8F\pi^2h^2 \cos\left(\frac{4\pi\nu h}{c}\right)}{c^2\left(1 + \frac{F}{2}\left(1 - \cos\left(\frac{4\pi\nu h}{c}\right)\right)\right)} \quad (5)$$

使上式等于 0 化简为

$$\frac{F \sin\left(\frac{4\pi\nu h}{c}\right)^2}{\left(1 + \frac{F}{2}\left(1 - \cos\left(\frac{4\pi\nu h}{c}\right)\right)\right)} - \cos\left(\frac{4\pi\nu h}{c}\right) = 0 \quad (6)$$

在激光频率附近求该方程的数值解, 验证求解到的频率值与预期相符, matlab 的 `vpasolve` 求解器在给定范围内一次只能找到一个解, 因此, 需要划分 2 个范围来找到二阶导数的 2 个零点, 在此以透射率曲线峰值左侧举例, 图 19 中黑色竖线是数值求解找到的二阶导数零点。

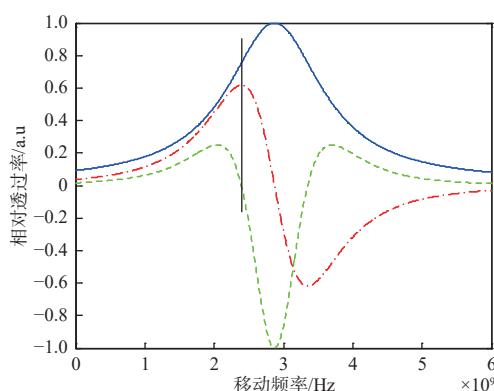


图 19 透过率和求导曲线关系

Fig. 19 Relationship between transmittance and derivative curves

把风速为 1 m/s 引起的频移 5.6 MHz, $R=0.648$, $h=12.5$ mm, 和上面求得的一阶导数最大处的频率代入一阶导数公式, 得到 $dT=0.0044$, 即风速 1 m/s 对应的透过率变化是 0.0044, 透过率锁定误差 0.0044 相当于风速 1 m/s。

由于 $\frac{dT_v}{h dv} = \frac{dT_h}{vdh}$, 得到 $\frac{dT_h}{dh} = \frac{vdT_v}{h dv}$ 。当 $dh=0.08 \text{ nm}$ 时, 引起的透过率变化是 0.0042, 即反射板间隔变化 0.08 nm 引起的误差相当于风速 1 m/s。由以上计算得到测风精度为 1 m/s 时, 要求 FP 滤波器反射板间隔振动幅度允许最大值为 0.08 nm。

2.6 闭环锁定测试及风场测试结果

闭环锁定模块系统如图 20 所示,其闭环控制模块组成及工作流程是:闭环反馈控制系统由激光器、三通道法布里珀罗鉴频模块和控制模块组成,三通道法布里珀罗鉴频模块包括第一通道、第二通道、第三通道、参考通道和鉴频模块,第一通道、第二通道和第三通道均为由法布里珀罗标准具构成的光学通道;每个光学通道包括两片相互平行的平板玻璃,并且设置有用于调节平板玻璃间距的压电陶瓷;参考通道允许激光完全透射经

过；第一通道和第二通道为鉴频通道，另一个作为锁定通道；所述两个鉴频通道分别接收大气对激光信号的回波信号，鉴频模块对经由两个鉴频通道透射后的回波信号进行鉴频；所述锁定通道与参考通道分别接收激光信号并将透射后的激光信号传输至控制模块；所述控制模块接收经锁定通道透射后的激光信号和经参考通道透射后的激光信号，并根据所接收的经两个通道透射后的激光信号的信号强度计算锁定通道的透过率，再判断锁定通道的透过率是否与预设的透过率相等，若不相等则输出控制信号对第一通道、第二通道和第三通道的压电陶瓷的驱动电压进行控制，直至锁定通道的透过率值与预设的透过率值相等，通常预设的透过率值在0.7~0.9之间；若相等则保持各通道压电陶瓷的驱动电压不变。

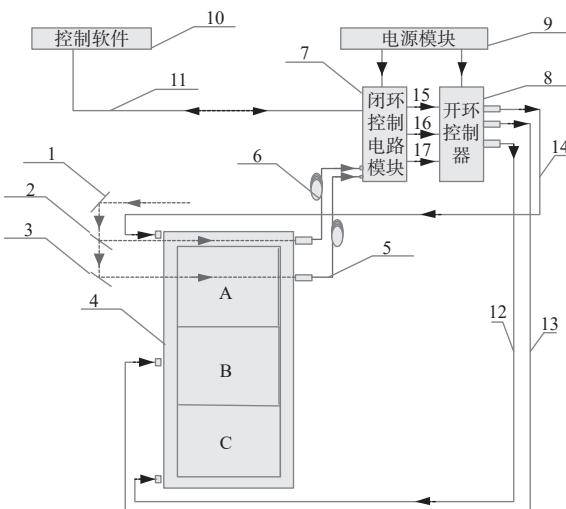


图 20 闭环反馈控制系统组成示意图

Fig. 20 Schematic of closed-loop feedback control system

将研制完成三通道 FP 鉴频模块及闭环反馈控制系统集成到激光测风雷达系统中, 如图 21 所示。该激光雷达为混合探测体制, 激光波长包括 $2 \mu\text{m}$ 与 355 nm , $2 \mu\text{m}$ 用于探测中低空风场, 355 nm 用于探测中高空风场, $2 \mu\text{m}$ 光源的脉冲能量为 10 mJ , 355 nm 光源激光器的脉冲能量为 50 mJ 。采用激光测风雷达系统进行了实际的 $2 \text{ km} \sim 10 \text{ km}$ 风场观测实验。在本次实验中, 重点利用 355 nm 激光探测通道对中高空风场进行了测试验证。测试结果如图 22 所示, 图 22(a) 所示为水平风速测试结果, 在 $2 \text{ km} \sim 10 \text{ km}$ 范围内风速误差为 2.5 m/s ; 图 22(b) 所示为水平风向测试结果。其风向误差优于 8° , 在外场风场测量中, FP 鉴频闭环反馈控制

模块可实现连续稳定激光频率锁定 30 min 以上, 可以满足后续业务化风场观测需求。



图 21 混合体制激光测风雷达样机

Fig. 21 Hybrid laser wind lidar prototype

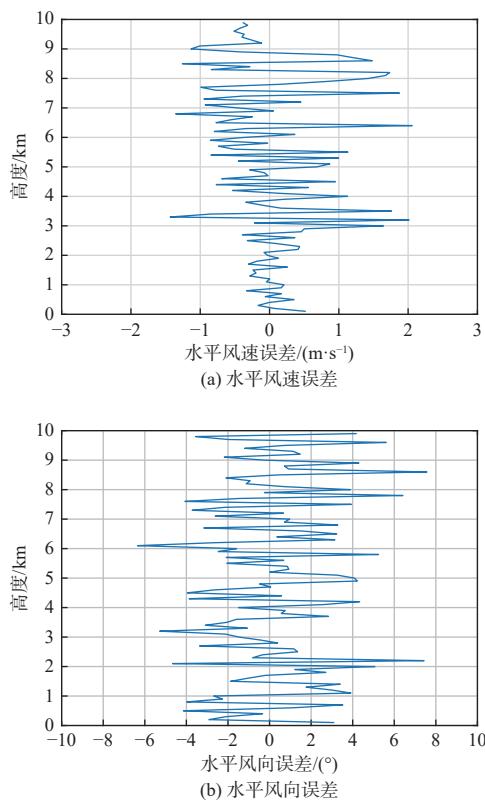


图 22 2 km~10 km 风场观测结果

Fig. 22 Observation results of 2 km~10 km wind field

3 结论

本文研制了基于 PZT 晶体调谐的 355 nm 三通道空气隙标准具鉴频模块, 该模块可满足星载测风激光雷达系统中多普勒风速的双边缘鉴频过程。针对标准具鉴频模块的技术参数与功能特点, 通过专用测试系统对鉴频模块的自由光谱范围、半高全宽、峰值透过率、调谐系数等参数完成

了测试, 测试结果与设计指标一致。具体是: 峰值透过率优于 0.735, 半高全宽分别为 1.843 GHz、1.882 GHz、1.611 GHz, 调谐系数为 1.96 GHz/V、1.93 GHz/V、1.88 GHz/V。针对光学鉴频模块中的 PZT 晶体调谐系数不一致情况, 分析了对风速误差的影响为 ± 0.1 m/s。另外, 当三通道光学鉴频器模块间隔变化 0.08 nm 时, 引起的风速误差为 1 m/s。为解决激光信号抖动与外界环境因素对鉴频模块光谱特性的影响, 完成了对闭环反馈控制系统的研制与测试, 测试表明: 该系统可实现对 355 nm 激光发射频率的实时锁定, 解决了光学鉴频模块每次工作状态初始位置不一致带来的问题, 提高了风速鉴频精度, 可实现稳定锁定长达 30 min 以上。经过在户外激光测风雷达外场试验测量, 三通道 FP 鉴频闭环模块可实现对 355 nm 激光通道的锁定与风场测量需求, 风速测量精度优于 2.5 m/s, 风向误差优于 8°, 以上结果可满足后续星载测风激光雷达的测试需求。

参考文献:

- [1] SUN D S, ZHONG Z Q, ZHOU J, et al. Accuracy analysis of the fabry-perot etalon based Doppler wind lidar[J]. *Optical Review*, 2005, 12(5): 409-414.
- [2] 韩潇, 曹珺雯, 焦建超, 等. 面向空间光学遥感器的增材制造技术的发展与应用[J]. *航天返回与遥感*, 2021, 42(1): 74-83.
HAN Xiao, CAO Junwen, JIAO Jianchao, et al. Applications and development of additive manufacturing for space optical remote sensors[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(1): 74-83.
- [3] 潘俏, 朱嘉诚, 杨子江, 等. 星载高光谱碳监测光学载荷的研究进展[J]. *航天返回与遥感*, 2021, 42(6): 34-44.
PAN Qiao, ZHU Jiacheng, YANG Zijiang, et al. Research progress of spaceborne hyperspectral optical payloads for carbon monitoring[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(6): 34-44.
- [4] IRGANG T D, HAYS P B, SKINNER W R. Two-channel direct-detection Doppler lidar employing a charge-coupled device as a detector[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(6): 1145-1155.
- [5] KORB C L, GENTRY B M, XINGFU S L, et al. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(15): 3097-3104.

- [6] STEPHEN M, FAHEY M, MILLER I. Solid, 3-mirror fabry-perot etalon[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2636-2640.
- [7] 张晨阳, 王春辉, 战蓝, 等. 星载光子探测激光雷达指向调整机构的理论分析[J]. *航天返回与遥感*, 2019, 40(5): 84-94.
- ZHANG Chenyang, WANG Chunhui, ZHAN Lan, et al. Theoretical analysis of fast steering mechanism on space-borne photon detection lidar[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2019, 40(5): 84-94.
- [8] 郭金家, 刘智深, 孙大鹏, 等. 高光谱碘分子和双边缘多普勒测风激光雷达技术比较[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(3): 489-496.
- GUO Jinjia, LIU Zhishen, SUN Dapeng, et al. Comparison between high spectral iodine filter andDouble-edge Doppler wind lidar techniques[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2004, 34(3): 489-496.
- [9] JENNINGS J, HALVERSON S, TERRIEN R, et al. Frequency stability characterization of a broadband fiber Fabry-Pérot interferometer[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15599-15613.
- [10] MCKAY J A. Fabry-Perot etalon aperture requirements for direct detection Doppler wind lidar from Earth orbit[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(27): 5859-5866.
- [11] GENTRY B M, WENG C Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(21): 4202-4213.
- [12] MCGINTY C, REICH R, CLARK H, et al. Design of a sensitive uncooled thermal imager based on a liquid crystal Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(28): 8264-8271.
- [13] HAN Y L, SUN D S, HAN F, et al. Demonstration of daytime wind measurement by using mobile Rayleigh Doppler Lidar incorporating cascaded Fabry-Perot etalons[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 34230-34246.
- [14] ZHAO Q L, YUNG T K, WANG X, et al. Correction of numerical aperture effect on reflection phase measurement using a thick-gap Fabry-Perot etalon[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(15): 4392-4397.
- [15] MCGILL M J, SPINHIRNE J D. Comparison of two direct-detection Doppler lidar techniques[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(10): 2675-2686.