

激光测风雷达鉴频技术研究

王 东¹, 刘 成²

¹中国人民解放军91550部队, 辽宁 大连

²中国人民解放军91913部队, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年6月28日; 录用日期: 2026年7月20日; 发布日期: 2026年7月30日

摘 要

鉴频技术是直接探测激光测风雷达的关键环节, 其任务是将大气回波中的微弱多普勒频移转换为可测量的光强变化, 进而实现径向风速反演。鉴频器件的频率响应特性、锁定稳定性和环境适应能力, 直接决定了系统的测风精度、探测高度和工程可实现性。本文围绕激光测风雷达鉴频技术的发展脉络与关键问题, 首先概述了多普勒频移测量的基本原理及鉴频性能评价方法; 随后对法布里-珀罗标准具、斐索干涉仪、马赫-曾德尔干涉仪、原子/分子吸收滤波以及微环谐振腔等主要和新兴技术路线进行了系统梳理; 在此基础上, 从科学目标、应用场景和系统集成需求出发, 比较不同鉴频方案在灵敏度、动态范围、频率锁定、探测器匹配、平台适应性和工程复杂度方面的差异; 进一步讨论鉴频器与激光器、探测器和反演算法之间的协同设计问题。最后, 从技术成熟度、工程瓶颈和未来发展趋势角度, 对直接探测测风激光雷达鉴频技术的选型逻辑和发展方向进行了评述。

关键词

激光测风雷达, 多普勒频移, 鉴频技术

Research on Frequency Identification Technology for Laser Wind Measurement Radar

Dong Wang¹, Cheng Liu²

¹PLA Unit 91550, Dalian Liaoning

²PLA Unit 91913, Dalian Liaoning

Received: June 28, 2026; accepted: July 20, 2026; published: July 30, 2026

Abstract

Frequency discrimination technology serves as a critical component in direct detection laser wind

文章引用: 王东, 刘成. 激光测风雷达鉴频技术研究[J]. 图像与信号处理, 2026, 15(3): 384-391.

DOI: 10.12677/jisp.2026.153034

radar systems. Its primary function is to convert the weak Doppler frequency shifts in atmospheric echoes into measurable changes in optical intensity, thereby enabling radial wind speed inversion. The frequency response characteristics, locking stability, and environmental adaptability of frequency discrimination devices directly determine the wind measurement accuracy, detection altitude, and engineering feasibility of the system. This paper examines the developmental trajectory and key challenges of frequency discrimination technology in laser wind radars. It first outlines the fundamental principles of Doppler shift measurement and methods for evaluating frequency discrimination performance. Subsequently, it provides a systematic review of major and emerging technical approaches, including Fabry-Pelloux standards, Fizeau interferometers, Mach-Zehnder interferometers, atomic/molecular absorption filters, and microring resonant cavities. Building on this foundation, the paper compares different frequency discrimination schemes in terms of sensitivity, dynamic range, frequency locking, detector matching, platform compatibility, and engineering complexity, based on scientific objectives, application scenarios, and system integration requirements. It further discusses the collaborative design considerations among frequency discriminators, lasers, detectors, and inversion algorithms. Finally, this paper evaluates the selection rationale and development direction of frequency discrimination technology for direct wind-measuring lidar from the perspectives of technical maturity, engineering bottlenecks, and future trends.

Keywords

Laser Wind Measurement Radar, Doppler Frequency Shift, Frequency Discrimination Technology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气风场是表征大气运动状态的基本参数之一,在数值天气预报、灾害性天气监测、航空航天保障、风能评估以及中高层大气动力学研究中具有重要作用。与常规探空、雷达和被动遥感手段相比,激光测风雷达具有高时空分辨率、连续廓线探测和较强平台适应性等优势,已成为风场遥感的重要技术路线[1]。

激光测风雷达按照探测机理通常可分为相干探测和直接探测两类。前者主要利用气溶胶米散射回波与本振光的相干拍频实现测速,后者则更多依赖高光谱分辨鉴频器件,将回波频率变化映射为光强变化,用于分子瑞利散射或分子/气溶胶混合回波的测量。对于直接探测系统而言,多普勒频移通常仅为 MHz 至数百 MHz 量级,而激光线宽、发射频率漂移以及鉴频器件自身漂移均可能处于同一数量级甚至更大,因此鉴频技术始终是决定系统性能的核心环节[2]。

经过多年发展,激光测风雷达鉴频技术已经形成了以干涉型边缘技术和吸收型边缘技术为主体、多种新型器件并行发展的格局。其中,法布里-珀罗标准具仍是当前应用最广泛、工程成熟度最高的方案;斐索干涉仪、马赫-曾德尔干涉仪等结构在特定场景下表现出良好的适应性;原子/分子吸收滤波器则在高光谱分辨和米散射抑制方面具有独特优势。近年来,随着集成光子学、精密稳频和信号处理技术的发展,微环谐振腔、双频比率鉴频以及多纵模非相干测风等新方案也为系统轻量化和低成本化提供了新的思路。

2. 鉴频技术基本原理与性能指标

2.1. 多普勒频移与风速反演

当大气散射体沿激光视线方向以径向速度 V_r 运动时,后向散射信号相对于发射激光产生多普勒频移。

对于后向散射的频移可表示为[3]:

$$\Delta\nu = -\frac{V_r}{\lambda}$$

其中, λ 为工作波长。通过测量回波频率相对于发射频率的偏移量, 即可反演径向风速; 若采用多视线扫描或多波束布设, 则可进一步合成水平风场乃至三维风场。

由上述关系可知, 工作波长越短, 相同风速对应的频移越大。以 1 m/s 的径向风速为例, 在 1.5 μm 波段对应的频移约为 1.3 MHz, 而在 355 nm 波段可达约 5.6 MHz。虽然短波长更有利于提高测速灵敏度, 但直接探测系统同时面临分子散射谱宽、器件稳定性和紫外激光稳频等一系列问题, 因此需要通过高性能鉴频器件对微弱频移进行可靠提取。

2.2. 鉴频器作用机理

从系统功能上看, 鉴频器可视为一个频率到强度的转换单元。其核心并不在于直接给出光频值, 而在于构建一个对频率变化足够敏感、同时又具备良好单值性和稳定性的光谱响应曲线。回波光进入鉴频器后, 由于多普勒频移引起工作点在响应曲线上的偏移, 最终表现为探测器输出光强或多通道比值的变化; 利用预先标定的响应关系, 即可完成风速反演[4]。

理想的鉴频系统应同时满足若干要求。首先, 响应曲线在工作点附近应具有较大的斜率, 以保证单位频移能够引起足够显著的信号变化, 从而提高测速分辨率。其次, 响应曲线应在目标测速范围内保持良好的单调性或可解性, 避免在大风速条件下出现模糊或饱和。再次, 鉴频器特征频率、激光发射频率以及系统零风速基准之间必须维持稳定关系, 否则器件漂移会直接转化为风速偏差。最后, 鉴频结果还应尽可能降低对发射能量起伏、链路透过率波动以及气溶胶与分子散射比例变化的敏感性。

2.3. 鉴频器性能评价指标

鉴频性能通常从灵敏度、误差、分辨率和稳定性等方面进行综合评价。鉴频灵敏度反映频率变化引起输出信号变化的能力, 可由响应曲线斜率或归一化斜率表征[4]。灵敏度越高, 在给定信噪比条件下风速反演的不确定度通常越小, 但过高的斜率往往意味着线性工作范围缩小, 因此实际设计中需要在灵敏度与动态范围之间进行权衡。

风速测量误差由多种因素共同决定, 包括回波信噪比、鉴频器响应曲线形状、光电探测器噪声、激光发射频率抖动以及器件漂移等。对于直接探测系统而言, 低层大气中较强的回波通常可以支持更高的时间分辨率和更小的测速误差, 而在平流层和中间层, 高度增加导致信号迅速减弱, 鉴频器效率和锁定稳定性的重要性更加突出。

除测速误差外, 频率锁定精度和长期稳定性也是评价鉴频系统工程化能力的关键指标。对于采用注入锁定或稳频参考的系统, 激光实际输出频率与设定频率之间的偏差将直接影响零风速基准; 对于多通道边缘技术, 通道之间的一致性及其随温度、压力和机械扰动的变化, 也会进一步影响反演精度。与此同时, 时间分辨率和高度分辨率还受到脉冲重复频率、积累时间、距离门宽和系统能量预算的共同制约, 因此应结合具体应用场景进行综合设计。

3. 主要鉴频技术路线

从实现方式看, 激光测风雷达鉴频技术可概括为两类: 一类是基于干涉型或吸收型光谱边缘的频率—强度转换方法, 另一类是在此基础上围绕器件结构、频率体制和信号处理策略开展的改进方案。前者

构成了当前直接探测测风激光雷达的主体技术框架, 后者则反映了近年来面向高稳定性、低成本和高集成度的拓展方向。

3.1. 法布里 - 珀罗标准具边缘技术

法布里 - 珀罗标准具由两块高反射率平行平板构成, 其透射谱表现为周期性分布的窄带透射峰。若将激光工作频率设置在透射峰边缘附近, 回波中的多普勒频移便会引起透射率的显著变化, 由此实现频率到强度的转换[3]。由于该类器件具有较高的谱分辨能力, 且通过腔长、反射率和通道配置可以在灵敏度、自由光谱范围与通带宽度之间进行灵活设计, 因此长期以来一直是直接探测测风激光雷达中最常用的鉴频方案。

在具体实现上, 法布里 - 珀罗标准具通常采用单边缘、双边缘或三通道结构。双边缘技术将两个频率响应对称分布的通道布设在工作频率两侧, 通过两个通道信号的归一化比值反演频移, 能够有效抑制发射能量波动及链路衰减带来的共同影响。三通道方案则在双边缘基础上引入能量监测或参考通道, 以进一步改善系统对透过率变化和通道不平衡的鲁棒性。相关地基和车载系统的实践表明, 该方案在分子瑞利测风和瑞利 - 米耦合测风中均具有较高的工程成熟度。

法布里 - 珀罗标准具边缘技术的优势在于原理清晰、技术积累深厚、适用波长范围较宽, 且可通过多通道设计获得较高的鉴频灵敏度。然而, 这一方案对器件加工一致性、温控精度和机械稳定性要求较高。尤其是在多通道或多腔长结构中, 通道之间的相对频率位置必须长期保持稳定, 否则系统零风速基准将发生漂移。此外, 标准具透射峰的周期性也要求滤波设计与发射频率控制相配合, 以避免频率混叠和工作点偏移。

3.2. 斐索干涉仪鉴频技术

斐索干涉仪通常采用楔形间隙结构, 其干涉条纹在空间位置上与入射光频率相关, 因此可以将频率变化转换为空间条纹的位移或光强分布变化[5]。与依赖离散多通道输出的法布里 - 珀罗标准具不同, 斐索干涉仪更适合与阵列探测器结合, 直接获取空间编码的频谱信息, 从而在一定程度上简化多通道分光与探测结构。

这一方案在星载或机载测风体制研究中受到持续关注, 尤其适用于需要兼顾系统紧凑性和成像测量能力的场景。其优势在于结构相对简洁、可实现频率信息的空间展开, 且便于与成像探测器匹配; 不足之处在于频率反演精度同时受条纹锐度、像元尺寸、系统像差和平台扰动影响, 对成像质量和机械稳定性要求较高。在气溶胶和云影响显著的场景下, 回波谱形变化还会进一步增大反演误差, 因此往往需要结合大气散射模型和仪器响应模型进行联合校正。

3.3. 马赫 - 曾德尔干涉仪鉴频技术

马赫 - 曾德尔干涉仪通过两臂之间的固定光程差产生干涉, 其输出响应通常表现为随频率变化的周期性余弦函数。通过合理设置光程差并构造多相位通道, 可以将频率变化映射为多路互补的强度输出, 进而实现风速反演[6]。与传统腔型器件相比, 马赫 - 曾德尔干涉仪在结构实现上更具灵活性, 可采用自由空间光路, 也可采用光纤器件构建, 因而在小型化和工程封装方面具有一定优势。

近年来, 基于多通道马赫 - 曾德尔干涉仪的多纵模非相干测风方案受到关注。该类方法利用自由运转多纵模激光器作为发射源, 不再强依赖注入锁定和高精度稳频, 而是借助部分相干干涉理论和多通道反演算法提取多普勒信息, 从而为低成本、高可靠性直接探测系统提供了新的实现路径。其主要局限在于: 余弦型响应的线性区有限, 动态范围扩展往往依赖多通道相位配置和解模糊算法; 同时, 干涉臂光

程差和偏振态变化也会对系统稳定性带来额外要求。

3.4. 原子/分子吸收滤波鉴频技术

原子/分子吸收滤波技术利用特定原子或分子的窄带吸收线作为频率判别基准,本质上同样属于边缘鉴频思路,只是其频率选择特性来自原子或分子跃迁谱线,而非人工构造的干涉透射峰[7]。由于吸收线具有天然的绝对频率参考属性,这类技术在高光谱分辨、零基准稳定和米散射抑制方面具有明显优势。

对于以分子瑞利散射为主要探测对象的系统而言,原子/分子滤波器能够利用窄带吸收对谱宽较窄的米散射成分进行抑制,从而增强对分子散射频谱的选择性,提高复杂对流层条件下的测速可靠性。已有研究围绕碘分子、钠、钾以及亚稳态钡等滤波介质开展了器件设计与系统仿真,结果表明该类技术在高层风场探测和高光谱分辨应用中具有较大潜力。

然而,原子/分子滤波方案通常需要工作波长与特定谱线匹配,系统波长选择自由度较低;同时,吸收池温度、压力和磁场条件等参数会显著影响谱线形状和透过率,因此工程实现复杂度较高。对直接探测测风雷达而言,这类器件更适合用于具有明确工作波段和高分辨测量需求的专用系统。

3.5. 微环谐振腔鉴频技术

微环谐振腔是近年来随着集成光子学发展而受到关注的一类片上窄带频率选择器件。其基本结构通常由总线波导与闭合环形波导耦合构成,当入射光频率满足环形波导一周相位匹配条件时,光场在环内发生谐振增强,并在透射端形成周期性的谐振峰或谐振谷。若将激光工作频率设置在谐振曲线边缘,回波多普勒频移将引起透过率变化,因此微环可作为一种片上频率—强度转换单元。与传统分立式法布里-珀罗标准具相比,微环谐振腔的突出特点是器件尺寸小、易于与光纤链路和片上光电器件集成,理论上有利于实现轻量化、低功耗和阵列化鉴频模块。

已有研究提出将 Si₃N₄ 微环谐振腔用于多普勒频移检测,并通过时分复用方式实现微环谐振中心与激光中心频率的锁定。同时结合上、下频移双频发射思路构造双边缘鉴频,使微环方案具备直接探测测风应用的可行性[8]。

微环谐振腔目前仍处于探索和原理验证阶段,距离直接替代成熟工程系统仍存在若干瓶颈。首先,微环谐振频率对温度、封装应力和波导折射率扰动高度敏感,若缺少稳定的热控和锁定机制,谐振漂移会直接转化为风速零点误差。其次,微环的自由光谱范围、线宽、耦合系数和插入损耗需要与目标风速动态范围、回波谱宽和探测器灵敏度协同设计;过窄线宽虽可提高鉴频斜率,却可能压缩可测风速范围并增加锁定难度。再次,微环谐振腔在近红外通信波段具有较成熟的工艺基础,而面向紫外或可见波段的低损耗片上材料、耦合封装和长期可靠性仍需进一步验证。因此,在当前阶段,微环方案更适合作为小型化、低功耗或近红外直接探测系统的潜在技术储备,而在高精度中高层瑞利测风等场景中,仍需通过长期外场比对证明其稳定性和误差闭合能力。

3.6. 技术对比与适用性分析

不同鉴频路线在灵敏度、稳定性、系统复杂度和应用场景方面各具特点,难以以单一指标进行优劣排序,不同鉴频路线技术特性对比见表1。总体而言,法布里-珀罗标准具仍然是高精度直接探测系统的主流选择;斐索干涉仪更适合强调成像与紧凑布局的方案;马赫-曾德尔干涉仪在多通道实现和多纵模兼容方面表现突出;原子/分子吸收滤波器则在高光谱分辨和米散射抑制方面具有独特价值;微环谐振腔等新方案则代表了低成本、小型化和高集成度方向。

Table 1. Comparison of technical characteristics of different frequency identification routes**表 1.** 不同鉴频路线技术特性对比

技术路线	主要优势	主要局限	适用回波	典型场景
法布里 - 珀罗标准具	技术成熟、灵敏度高、波长适应性较强	加工与温控要求高，长期稳定性维护复杂	瑞利散射和米散射	地基高精度直接探测系统
斐索干涉仪	可进行空间频谱编码，结构紧凑	受条纹成像质量和平台扰动影响较大	米散射为主	机载/星载方案研究
马赫 - 曾德尔干涉仪	结构灵活，可兼容多纵模体制	线性范围有限，需解模糊与相位控制	瑞利散射和米散射	低成本多通道或非相干方案
原子/分子吸收滤波	高光谱分辨、零基准特性好、抑制米散射能力强	波长受限，热控和器件条件复杂	瑞利散射为主	高分辨中高层风场探测
微环谐振腔	尺寸小、易片上集成，适合低功耗和阵列化	温度和封装应力敏感，紫外和可见工艺及长期锁定可靠性待验证	以米散射直接探测为主	小型化和集成化

从应用取向看，若优先追求高精度和长期工程运行能力，法布里 - 珀罗标准具仍然具有较强优势；若重点面向平台载荷约束和系统紧凑化，可优先考虑斐索、微环等更易集成的结构；若系统更强调降低激光源和稳频单元复杂度，则马赫 - 曾德尔干涉仪结合多纵模体制具有一定吸引力；而在复杂散射背景下追求高光谱分辨能力时，原子/分子吸收滤波仍具不可替代性；微环谐振腔则代表片上化方向，但当前主要挑战是环境敏感性、封装应力、耦合损耗和长期锁定可靠性。

4. 鉴频器与其他系统部件的协同设计

直接探测测风激光雷达的性能并不由鉴频器单独决定，而是由发射激光器、接收光路、鉴频器、探测器、数据采集和反演算法共同形成的闭环误差链决定。鉴频器的响应曲线斜率决定频移到强度的转换效率，但激光线宽、脉冲频率稳定性、发射能量起伏、回波谱宽、探测器噪声和背景光水平会共同决定该斜率能否转化为实际风速精度。因此，在系统设计中需要避免“孤立优化鉴频器”的思路，而应围绕目标高度、时间分辨率、风速范围和平台条件开展协同优化。

4.1. 激光器

在激光器方面，鉴频器工作点必须与发射激光频率、线宽和频率漂移特性匹配。对于法布里 - 珀罗标准具和微环谐振腔等人工谐振结构，若激光频率漂移与器件漂移缺少共同参考，零风速基准会随时间变化；因此常需要引入参考光路、频率扫描标定、边缘锁定或时分复用锁定。对于原子/分子吸收滤波方案，激光波长必须与吸收谱线匹配，激光稳频策略和吸收池温压控制则成为系统核心。对于多纵模或双频体制，激光频率结构本身参与鉴频，因此激光器不再只是光源，而是鉴频函数的重要基准源。

4.2. 探测器

在探测器方面，不同波段和不同散射目标对探测器提出的要求差异明显。紫外和可见瑞利测风通常依赖 PMT 或单光子计数器，对暗计数、后脉冲、计数率非线性和背景光抑制敏感；近红外系统则需要关注 InGaAs APD、上转换探测器或超导纳米线探测器的量子效率、噪声和工程可用性[9]。若鉴频器插入损耗较大或通道分光比例不合理，即使理论鉴频斜率较高，也会因光子数不足而导致随机误差增大。因此，鉴频器通带宽度、透过率、通道数量和探测器动态范围必须一并考虑。

4.3. 反演算法

在反演算法方面，气溶胶和分子混合回波会使实际谱形偏离标定模型，云层、强气溶胶和背景光变

化还会改变各通道信噪比。对于边缘技术, 应在反演算法中显式考虑通道响应、气溶胶比例、背景噪声和探测器非线性; 对于条纹成像技术, 应同时标定空间像差、像元响应和平台姿态扰动; 对于微环等集成器件, 则应建立温度漂移、耦合效率和谐振锁定误差到风速误差的传播模型。只有将鉴频器标定结果纳入端到端误差预算, 才能判断某一方案是否真正满足科学目标。

5. 关键技术挑战

5.1. 鉴频灵敏度与动态范围的权衡

提高鉴频灵敏度通常意味着在响应曲线局部获得更陡的斜率, 但这往往会压缩近似线性工作区间, 使系统在较大风速或频率漂移条件下更易进入非线性区。因此, 高灵敏度与宽动态范围之间存在天然矛盾。工程上常通过多通道互补设计、工作点优化以及比值反演策略, 在两者之间取得折中。

5.2. 频率锁定与环境稳定性

无论采用何种鉴频器件, 发射激光频率、鉴频器特征频率以及零风速参考之间的相对稳定性都至关重要。温度波动、机械振动、气压变化以及器件老化均可能导致响应曲线漂移, 最终转化为系统性风速偏差。为此, 实际系统通常需要引入参考光路、主动稳频、温控反馈以及零基准实时校正等措施。对于新型集成器件, 还需要进一步解决封装应力和环境敏感性问题。

5.3. 系统复杂度与成本约束

高性能鉴频系统往往伴随复杂的光路分束、多通道探测、精密温控及稳频控制链路, 这会显著增加系统体积、功耗和成本。对于车载、机载乃至星载平台而言, 复杂度与可靠性之间的矛盾尤为突出。近年来出现的单通道加频率体制重构方案、集成光子方案以及多纵模非相干方案, 实质上都是在尝试重塑这一复杂度分布, 将困难从精密光学加工转移到频率控制或信号处理环节。

5.4. 气溶胶干扰与谱形失配

在对流层和低平流层条件下, 米散射和瑞利散射往往同时存在, 两者谱宽差异显著, 若鉴频器响应模型与实际回波谱形不匹配, 反演结果将出现偏差。尤其是在云和高气溶胶负载条件下, 窄谱米散射成分可能主导探测信号, 从而削弱对分子散射频移的敏感性。解决这一问题通常需要从器件和算法两个层面同步入手, 包括提高光谱分辨能力、优化多通道设计、引入参考通道以及开展散射模型约束下的联合反演。

6. 发展趋势与展望

激光测风雷达鉴频技术的发展正呈现出四个明显趋势。其一是器件层面的集成化与小型化, 微环谐振腔、集成干涉仪和片上光谱器件的发展, 使得传统依赖分立光学元件的鉴频模块有望向紧凑封装甚至片上实现演进。其二是平台层面的轻量化与空间化, 未来地基、机载和星载系统对鉴频器件在重量、功耗、抗振和长期稳定性方面将提出更加严格的要求[10]。其三是系统层面的协同优化, 鉴频器需要与激光稳频、探测器动态范围、背景抑制和反演算法共同设计, 而不是作为独立器件简单替换。其四是处理层面的智能化, 面向复杂环境扰动和多源误差耦合问题, 结合系统建模、在线标定和数据驱动算法的自适应反演方法将成为提升测风质量的重要方向。

总体来看, 未来高性能鉴频技术的发展并不单纯取决于某一种器件路线的胜出, 而更可能表现为多种技术在不同平台、不同高度层和不同任务需求下的协同演化。如何在精度、稳定性、复杂度和成本之间建立更合理的系统级平衡, 将是该领域持续推进工程应用的关键。

7. 结论

鉴频技术是直接探测激光测风雷达实现高精度风速反演的核心支撑。围绕微弱多普勒频移的可靠提取, 法布里-珀罗标准具、斐索干涉仪、马赫-曾德尔干涉仪以及原子/分子吸收滤波等路线分别形成了各具特点的技术体系。现阶段, 法布里-珀罗标准具仍是工程应用最成熟的主流方案, 而原子/分子滤波、高集成微环谐振器、双频比率鉴频和多纵模非相干体制等方向, 则正在推动鉴频技术向高分辨、低成本和小型化并行发展。

面向未来应用, 鉴频系统的性能提升仍将取决于器件设计、频率控制、探测器匹配、误差建模和反演算法的协同优化。尤其对于新兴微环谐振腔和集成光子方案, 其真正价值不应仅由器件鉴频灵敏度决定, 而应由外场环境下的锁定稳定性、误差闭合能力和长期运行可靠性决定。随着集成光子学、精密稳频技术以及智能数据处理方法的不断成熟, 激光测风雷达鉴频技术有望在更广泛的平台和应用场景中发挥作用。

参考文献

- [1] 黄荣辉, 陈文, 魏科, 等. 平流层大气动力学及其与对流层大气相互作用的研究: 进展与问题[J]. 大气科学, 2018, 42(3): 463-487.
- [2] 闫召爱, 胡雄, 郭文杰, 等. 临近空间多普勒激光雷达技术及其应用(特邀) [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 36-45.
- [3] Flesia, C. and Korb, C.L. (1999) Theory of the Double-Edge Molecular Technique for Doppler Lidar Wind Measurement. *Applied Optics*, **38**, 432-440. <https://doi.org/10.1364/ao.38.000432>
- [4] Korb, C.L., Gentry, B.M. and Weng, C.Y. (1992) Edge Technique: Theory and Application to the Lidar Measurement of Atmospheric Wind. *Applied Optics*, **31**, 4202-4213. <https://doi.org/10.1364/ao.31.004202>
- [5] McKay, J.A. (2002) Assessment of a Multibeam Fizeau Wedge Interferometer for Doppler Wind Lidar. *Applied Optics*, **41**, 1760-1767. <https://doi.org/10.1364/ao.41.001760>
- [6] Smith, J.A. and Chu, X. (2016) Investigation of a Field-Widened Mach-Zehnder Receiver to Extend Fe Doppler Lidar Wind Measurements from the Thermosphere to the Ground. *Applied Optics*, **55**, 1366-1380. <https://doi.org/10.1364/ao.55.001366>
- [7] Liu, Z.S., Liu, B.Y., Li, Z.G., Yan, Z.A., Wu, S.H. and Sun, Z.B. (2007) Wind Measurements with Incoherent Doppler Lidar Based on Iodine Filters at Night and Day. *Applied Physics B*, **88**, 327-335. <https://doi.org/10.1007/s00340-007-2674-y>
- [8] Jiang, C., Xuan, Y., Wan, S., Liu, B., Hu, X., Dong, C., et al. (2024) Frequency-Locked Si₃N₄ Microring for Doppler Frequency Shift Detection. *Optics Express*, **32**, 42445-42454. <https://doi.org/10.1364/oe.539300>
- [9] Shangguan, M., Qiu, J., Yuan, J., Shu, Z., Zhou, L. and Xia, H. (2022) Doppler Wind Lidar from UV to NIR: A Review with Case Study Examples. *Frontiers in Remote Sensing*, **2**, Article 787111. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.787111>
- [10] Long, W., Dai, G., Wu, S., Sun, K., Zhai, X., Xu, N., et al. (2025) Simulation and Assessment of Spaceborne Hybrid Doppler Wind Lidar, Part 1: The Spaceborne Two-Beam Stepping Direct Detection Doppler Wind Lidar. *Optics Express*, **33**, 9070-9090. <https://doi.org/10.1364/oe.551023>