

双波长高光谱分辨率激光雷达光谱鉴频器设计

戎宇航, 沈雪, 王南朝, 童奕澄, 刘崇, 刘东*

浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 提出了一种可作为高光谱分辨率激光雷达(HSRL)光谱鉴频器的双波长视场展宽迈克尔孙干涉仪(FWMI)的设计方法。详细阐述了双波长 FWMI 的设计原理, 权衡考虑色散对于鉴频性能的影响。通过双波长视场展宽设计实现折射率补偿, 从而使 FWMI 在 355 nm 和 532 nm 均有较大的接收视场。给出适用于 355 nm 和 532 nm 的双波长 FWMI 设计的具体参数, 并对其进行性能评估和容差分析。评估结果表明, 双波长 FWMI 拥有超过 6° 的接收视场角, 在两个波长均有较为优异、稳定的性能表现, 对于加工和装配精度要求也并非苛刻。利用蒙特卡罗仿真对基于双波长 FWMI 的 HSRL 系统的光学参数的反演误差进行分析。分析结果表明, 在 532 nm, 气溶胶后向散射系数和消光系数的反演误差分别为 1.82% 和 11.39%, 而在 355 nm, 二者分别为 1.62% 和 2.95%。

关键词 大气光学; 光谱鉴频器; 视场展宽迈克尔孙干涉仪; 蒙特卡罗仿真; 高光谱分辨率激光雷达

中图分类号 P412.25

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0401001

Design of Dual-Wavelength Spectral Discriminator for High-Spectral-Resolution Lidar

Rong Yuhang, Shen Xue, Wang Nanchao, Tong Yicheng, Liu Chong, Liu Dong*

*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering,**Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China*

Abstract A design method of a dual-wavelength field-widened Michelson interferometer (FWMI) used as a spectral discriminator of a high-spectral-resolution lidar (HSRL) is proposed. The theoretical principle of the dual-wavelength FWMI is elaborated in detail. The influence of dispersion on the frequency discrimination performance is considered. The dual-wavelength field-widened design is adopted to compensate for refractive index, so that FWMI has a larger receiving field of view at 355 nm and 532 nm. The specific parameters of the dual-wavelength FWMI suitable for 355 nm and 532 nm are given, and performance evaluation and tolerance analysis are carried out. The evaluation results show that the dual-wavelength FWMI has a receiving field of view of more than 6° and excellent and stable performance at both wavelengths, and the requirements of processing precision and assembly precision are not high. Finally, Monte Carlo simulation is used to analyze the inversion error of optical parameters of the HSRL system using the dual-wavelength FWMI. The results show that the retrieval errors of aerosol backscattering coefficient and extinction coefficient are 1.82% and 11.39% at 532 nm, and 1.62% and 2.95% at 355 nm, respectively.

Key words atmospheric optics; spectral discriminator; field-widened Michelson interferometer; Monte Carlo simulation; high-spectral-resolution lidar

OCIS codes 010.0280; 010.3640; 300.6320; 010.1100

收稿日期: 2020-08-25; 修回日期: 2020-09-10; 录用日期: 2020-09-25

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFC1400900)、国家自然科学基金(41775023)、浙江省自然科学基金杰出青年项目(LR19D050001)、中央高校基础科研项目(2019FZJD011)、现代光学仪器国家重点实验室创新项目

* E-mail: liudongpt@zju.edu.cn

1 引言

大气气溶胶是影响地球环境气候和大气辐射特性的重要物质,其对地球辐射平衡、空气质量、成云降雨等各个方面都会产生巨大影响^[1-2]。激光雷达能够快速、大范围地获取大气光学参数垂直廓线^[3],而高光谱分辨率激光雷达(HSRL)凭借较高的信噪比和反演精度,更是在气溶胶探测领域得到巨大关注^[4-5]。

HSRL 通过光谱鉴频器实现大气分子散射与气溶胶米散射信号的分离,无需假设雷达比即能获得高精度光学参数^[4]。2002 年,俄罗斯国家基础物理研究所的 Veselovskii 等^[6]将三个波段的气溶胶后向散射系数和两个波段的消光系数用于反演气溶胶微物理特性。因此多波段探测成为 HSRL 发展的重要方向,对于 HSRL 光谱鉴频器也提出了至少两个波段的探测要求。2011 年,日本国立环境研究所(NIES)以法布里-珀罗干涉仪(FPI)和碘分子吸收池为光谱鉴频器,分别探测紫外和可见光波段的 HSRL 分子通道信号^[7]。2012 年,美国宇航局(NASA)提出将视场展宽迈克耳孙干涉仪(FWMI)作为 HSRL 干涉光谱鉴频器的想法^[8],并于 2018 年报道了首个基于 FWMI 和碘分子吸收池的机载多波长 HSRL 系统^[9]。国内方面,中国海洋大学、安徽光学精密机械研究所等单位报道了基于碘分子吸收池的可见光波段 HSRL 系统^[10-11];西安理工大学研制了工作在可见光波段的基于 FPI 的 HSRL 系统^[12];浙江大学则报道了可见光和近红外波段 FWMI 的相关进展^[13-16]。在现有的 HSRL 系统中,通常一个特定波长的分子通道对应一个光谱鉴频器。而多波长 HSRL 至少需要两个光谱鉴频器,从而不可避免地导致接收系统体积庞大,光路复杂。这一方面增加了系统硬件成本,另一方面加大了系统搭建难度,从而在某种程度上阻碍了多波长 HSRL 的推广和发展。

本文提出了可以同时两个波段工作的双波长 FWMI 光谱鉴频器的设计方案。该设计兼具单波长 FWMI 的大视场接收角和高光子效率等优点,又能够有效减小多波长 HSRL 接收系统的体积和光路复杂性。本文在第 2 节中介绍双波长 FWMI 光谱鉴频器的设计方法,并针对常用的紫外及可见光波段给出具体设计参数;随后在第 3 节进行了性能评估和容差分析;在第 4 节中利用蒙特卡罗(MC)仿真分析了基于双波长 FWMI 的 HSRL 光学参数

反演误差,进一步论证该设计在 HSRL 技术中应用的可行性。

2 双波长光谱鉴频器设计

HSRL 回波信号主要包含气溶胶米散射信号和大气分子散射信号,光谱鉴频器利用两种散射频谱展宽的不同,滤掉米散射信号,透过分子散射信号^[8]。FWMI 作为一种经过特殊设计的迈克耳孙干涉仪(MI),主要利用干涉消长原理实现高分辨率光谱鉴频。基于干涉型光谱鉴频器的波长适应性,本文提出了一种基于 FWMI 的双波长光谱鉴频器设计方法。

2.1 双波长 FWMI 设计原理

双波长 FWMI 光谱鉴频器主体包括一块立方体分光棱镜、两块玻璃补偿柱和一个空气间隔,具体光路结构如图 1 所示。

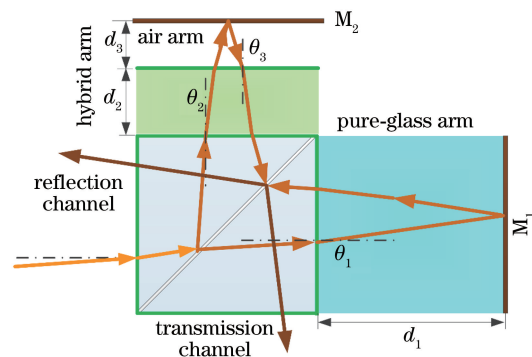


图 1 双波长 FWMI 光路图

Fig. 1 Diagram of optical path of dual-wavelength FWMI

假设光线以任一角度 θ 射入 FWMI,根据几何关系可以得到光程差(OPD)的表达式为

$$\text{OPD}(\theta) =$$

$$2(n_1 d_1 \cos \theta_1 - n_2 d_2 \cos \theta_2 - n_3 d_3 \cos \theta_3), \quad (1)$$

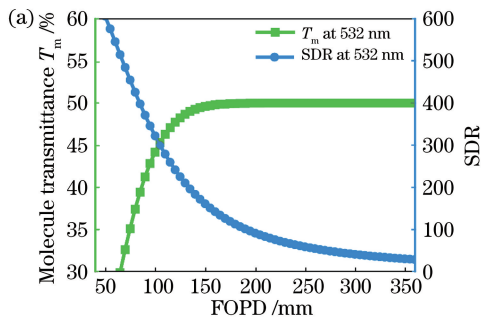
式中: n_i 和 d_i ($i=1,2,3$) 分别代表图 1 中对应干涉臂的折射率和臂长; θ_i ($i=1,2,3$) 是光线在不同材料分界面的出射角。将入射中心光束在干涉仪中的 OPD 称为固有光程差(FOPD)。FOPD 决定了干涉仪的自由光谱范围(FSR),进而会对鉴频曲线产生影响^[13]。需要指出的是,光谱鉴频效果与光谱分离比(SDR)和分子信号透过率(T_m)息息相关。在设计过程中,需要考虑 SDR 和 T_m 的权衡问题。通过选择合适的 FOPD,能够使 FWMI 拥有较大 SDR 的同时,保证较为理想的 T_m ^[13]。在双波长 FWMI 设计中,需要兼顾两个波段的信号展宽特征,并做出

权衡考量后的 FOPD 选择。

此外,拥有大视场接收角是 FWMI 较同为干涉型光谱鉴频器 FPI 的最大优势。通常经过特殊设计的 FWMI 的视场角可达数度,作为对比,FPI 的视场角一般小于 0.5° ^[12]。大视场角使得 HSRL 对接收光路的准直要求相对宽松,同时有助于提升微弱回波信号的信噪比。双波长 FWMI 需要在两个目标波长 λ_i ($i=1,2$) 同时满足视场展宽条件,具体条件可由(1)式并根据 Snell 定理和泰勒展开式推导而来^[15]:

$$\frac{d_1}{\sqrt{n_{1,\lambda_i}^2 - \sin^2\theta_t}} - \frac{d_2}{\sqrt{n_{2,\lambda_i}^2 - \sin^2\theta_t}} - \frac{d_3}{\sqrt{n_{3,\lambda_i}^2 - \sin^2\theta_t}} = 0, \quad (2)$$

式中: n_{1,λ_i} 、 n_{2,λ_i} 、 n_{3,λ_i} 分别为在两个设计目标波长 λ_i 上各干涉臂材料对应的折射率; θ_t 为理论设计的微小倾斜入射角,引入倾斜角能够进一步优化视场展宽范围。需要注意的是,(2)式中,需要将两个波



长对应的材料折射率代入,因此实际上(2)式对应两个视场展宽方程。

联立(1)、(2)式即能解得三个臂长的理论设计值。上述设计的双波长 FWMI 在两个目标波长均有出色的鉴频性能,同时兼具大视场接收角和高光子效率等优点。配合具体装调和锁频方案,通过将干涉仪透过率最低点同发射激光频率中心对准,就能实现双波长光谱鉴频效果。

2.2 紫外及可见光波段双波长 FWMI 设计结果

为更好地说明双波长 FWMI 设计原理,本文以目前 HSRL 系统常用的探测波段 355 nm 和 532 nm 为例,给出紫外及可见光波段双波长 FWMI 的具体设计结果。

对于 355 nm 和 532 nm 波段的 HSRL 回波信号,分子展宽 γ_m 分别为 2.1 GHz 和 1.4 GHz^[8]。综合考虑 FWMI 的透过率模型^[13],两个波长的 SDR 和 T_m 同 FOPD 之间的关系如图 2 所示。

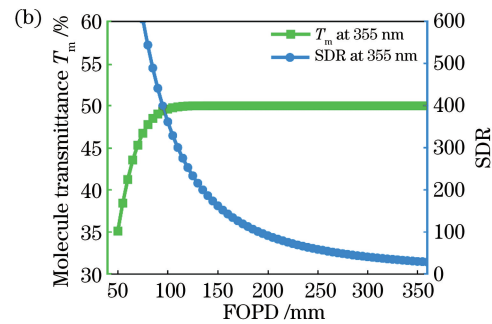


图 2 FWMI 的 SDR 和分子透过率与 FOPD 的变化关系。(a) 532 nm; (b) 355 nm

Fig. 2 Variations in SDR and T_m of FWMI with FOPD. (a) 532 nm; (b) 355 nm

由图 2 可以发现,两个探测波段均面临分子透过率 T_m 和光谱分离比 SDR 的权衡问题。考虑到 355 nm HSRL 的回波信号强度更大,光谱分离更易实现,因此优先考虑 532 nm HSRL 设计的最优化。综合考虑,(1)式选择 FOPD 为 100 mm,则对应干涉仪的 FSR 为 3 GHz。该设计在 355 nm 和 532 nm 波段上的 T_m 分别为 49% 和 44%,SDR 则分别为 362 和 322,这些都是较为理想的设计结果。事实上,对于气溶胶探测 HSRL 而言,通常光谱鉴频器满足 SDR 大于 100 就能够实现高精度光学参数反演^[16]。

尽管存在色散,但在实际进行干涉仪设计时,FOPD 并不需要在两个波长上均严格等于 100 mm。一方面 T_m 及 SDR 不会因色散所产生的微小 FOPD 差异而产生较大的变化;另一方面,FWMI 在实际装调中也必然存在误差,实验时不太可能使 FOPD 等于理论设计值,因此在两个波长上

均严格要求 FOPD 为 100 mm 并非必要。

为满足两个波长的视场展宽条件,直接将 $\lambda_1 = 355$ nm 和 $\lambda_2 = 532$ nm 代入(2)式。

之后进行玻璃材料选择,考虑透过率因素,最终选取康宁公司生产的 C7980 熔融石英玻璃和肖特公司生产的 F2 玻璃。结合(1)、(2)式,计算得到该双波长 FWMI 的设计参数,如表 1 所示。

表 1 355 nm/532 nm 双波长 FWMI 设计参数

Table 1 Design parameters of dual-wavelength FWMI at 355 nm and 532 nm

Arm	Pure-glass arm	Hybrid arm	
Material	C7980	Air gap	F2
Length/mm	143.8510	60.9787	60.9768

3 性能评估及容差分析

3.1 双波长 FWMI 性能评估

确定双波长 FWMI 光谱鉴频器的具体设计参

数后,需要对其进行性能评估。性能评估一方面能够验证该设计的最佳性能表现是否达到设计预期,另一方面也可以知晓鉴频器随使用条件变化的性能劣化程度。本文主要针对视场接收角、入射光发散角、倾斜角偏差以及锁频误差 4 个方面展开讨论。

图 3 评估了该设计的视场接收角。可以清楚地看到,双波长 FWMI 在超过 6° 的视场接收角内,OPD 变化量均小于 0.1λ 。尤其是在 $\pm 2^\circ$ 角度范围内,经过倾斜优化的 FWMI 在两个波长上的 OPD 变化量均小于 0.01λ ,这是一个较为理想的设计结果。需要指出的是,紫外波段的 OPD 随角度的变化劣化较快,这是由短波段的光本身对于光程更敏感所引起的。

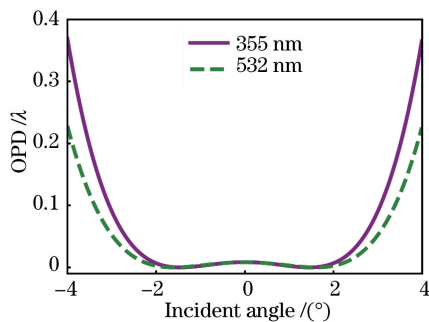


图 3 OPD 与入射角的变化关系

Fig. 3 OPD changes with incident angle

图 4 为 SDR 与入射光发散角的变化关系,可以看出:当入射光发散角小于 1° 时,两个波长的 SDR 均大于 300。同时可以发现,355 nm 处的理论性能较 532 nm 更好,但其随着发散角的增大劣化得更快。而在实际系统中,发散角通常不会超过 0.5° 。

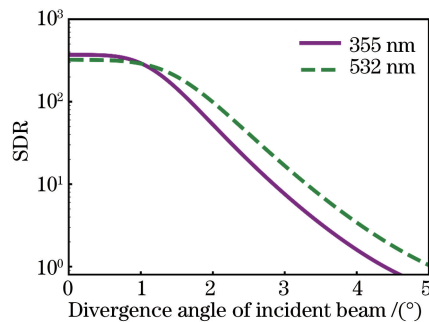


图 4 SDR 随入射发散角的变化

Fig. 4 SDR changes with divergence angle of incident beam

图 5 为 SDR 与倾斜角度误差的变化关系,可以看出,在超过 3.5° 的倾斜角度范围内,双波长干涉仪的 SDR 均处于较高水平。这也说明在实际装调过程中,双波长 FWMI 对于光路对准的要求不高。

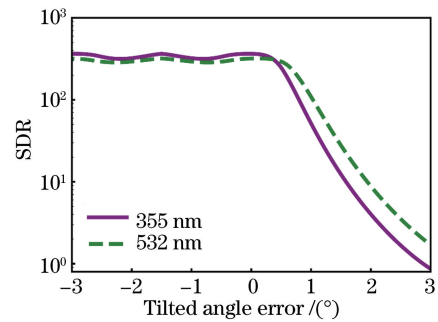


图 5 SDR 与倾斜角度误差的变化关系

Fig. 5 SDR changes with tilted angle error

图 6 为 SDR 随锁频误差的变化,不难看出,两个波长下,锁频误差增大导致的性能劣化具有较好的一致性。当锁频误差小于 0.05 GHz 时,干涉仪的 SDR 仍然可以维持在 100 以上。

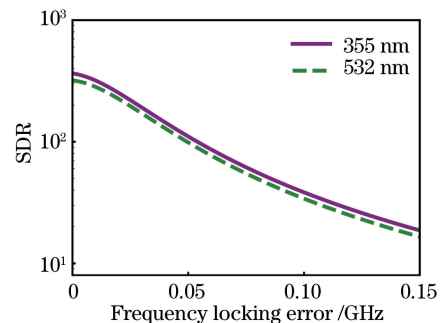


图 6 SDR 随锁频误差的变化

Fig. 6 SDR changes with frequency locking error

从性能评估结果中可以看出,基于双波长 FWMI 设计的光谱鉴频器在两个探测波长具有较好的性能一致性,拥有较大的视场接收角,对于入射光发散角、对准误差以及锁频误差要求均较为宽松。

3.2 双波长 FWMI 容差分析

除了性能评估,对于双波长 FWMI 进行容差分析也是必不可少的。容差分析为原型样机的研制和加工精度提供理论指导,本文主要针对玻璃臂长度、空气臂装调位置以及累计波前误差展开讨论。

图 7(a)、(b)展示了双波长 FWMI 中两个玻璃补偿柱的加工容差。从图中可以看出,玻璃臂长度与理论设计值存在一定误差时,会引起 SDR 的下降。在加工误差小于 0.5 mm 时,两个波长上的 SDR 均大于 100,双波长 FWMI 依旧拥有较好的鉴频性能。而在现代光学精密加工领域,0.1 mm 的加工精度是较易达到的水平,因而不存在较为苛刻的长度加工精度要求。

双波长 FWMI 的样机研制过程中不得不考虑实际空气间隙的装调误差。空气间隙的装调误差同样会

引起干涉仪的鉴频性能下降,且空气臂是唯一可以自由调节的干涉臂,研究其调节范围容差对后续实验装调及锁频有重要意义。从图 7(c)中可以看出,空气间隙误差在 0.3 mm 以内时,SDR 能够保持 100 以上。

在玻璃补偿柱加工过程中,还有另一个至关重要的指标即累计波前误差。累计波前误差会影响入

射光束的波前和相位,从而影响最终的干涉效果和鉴频性能。图 8 展示了累计波前误差对于鉴频器性能的影响。在累计波前误差小于 0.02λ 时,SDR 大于 100,但是当累计波前误差继续增大时,鉴频性能恶化得较为迅速。因此相较于加工长度的绝对精度,波前面型的加工精度是更为关键的指标要求。

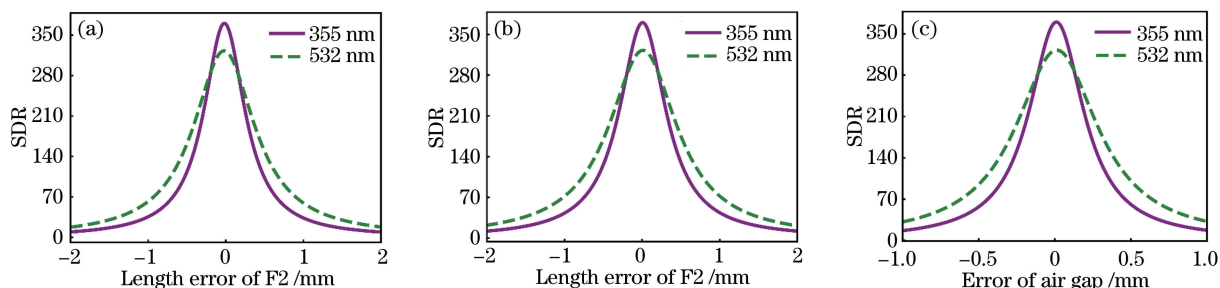


图 7 臂长容差评估。(a) SDR 随 C7980 长度偏差的变化;(b) SDR 随 F2 长度偏差的变化;(c) SDR 随空气间隔偏差的变化
Fig. 7 Evaluation of tolerance of length of arm. (a) Relationship between SDR and length error of C7980; (b) relationship between SDR and length error of F2; (c) relationship between SDR and error of air gap

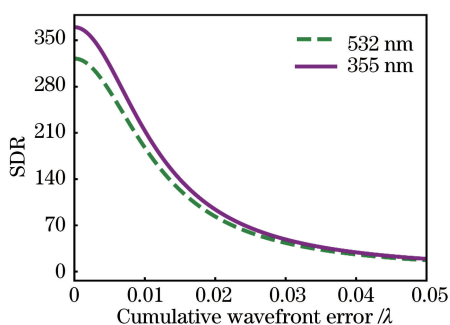


图 8 累计波前误差对 SDR 的影响

Fig. 8 SDR changes with cumulative wavefront error

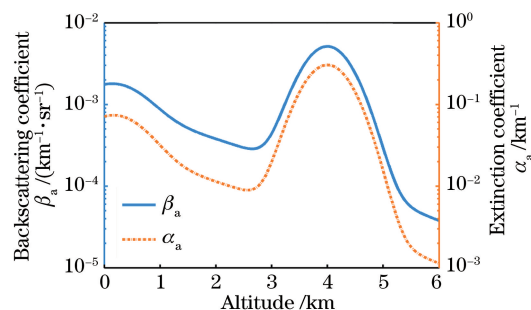


图 9 气溶胶光学特性参数廓线模型

Fig. 9 Profile models of optical characteristic parameters of aerosol

4 基于双波长 FWMI 的蒙特卡罗仿真

光学参数的反演精度能够直接表征 HSRL 系统中光谱鉴频器的性能。本文采用蒙特卡罗 (MC) 仿真方法,针对基于双波长 FWMI 的 HSRL 系统进行两个目标波段的光学参数反演误差分析。

4.1 前向仿真模型及相关参数

前向仿真模型考虑了 HSRL 探测回波信号同大气状态参数和激光雷达系统参数之间的关系,根据输入大气状态,模拟探测回波信号。

本文依据美国标准大气模型^[17]生成大气分子光学参数廓线。之后参考文献^[18]中的经验公式,增加气溶胶光学参数廓线。气溶胶的垂直分布考虑了背景气溶胶、1 km 以下边界层典型城市气溶胶和 3~5 km 的悬浮沙尘气溶胶。具体输入的气溶胶后向散射系数 β_a 和消光系数 α_a 的垂直分布如图 9 所示。

需要说明的是,图 9 为 532 nm 的气溶胶光学

参数的垂直廓线,在针对 355 nm 进行大气参数模拟时,利用 Ångström 波长指数等经验公式^[19],即可完成 355 nm 的气溶胶光学参数输入。

HSRL 系统主要分为发射系统和接收系统两部分,仿真系统的关键参数如表 2 所示。

表 2 HSRL 仿真系统参数

Table 2 Specifications of HSRL system in simulation

System	Specification	Value
Transmitter	Laser wavelength /nm	355, 532
	Laser energy /mJ	300
	Laser linewidth /MHz	100
	Repetition rate /Hz	10
	Range resolution /m	100
Receiver	Diameter of telescope /mm	280
	Field of view /mrad	0.1
	Bandpass width of pre-filter /nm	0.1
	Quantum efficiency of PMTs	0.35 (355 nm), 0.20 (532 nm)
	Total optical efficiency (except filter)	0.4

4.2 MC 误差分析结果

完成大气状态及雷达系统参数输入后,针对基于双波长 FWMI 的 HSRL 系统,使用 MC 仿真进行光学参数反演误差评估。双波长 FWMI 的 SDR 以及 T_m 可由第 3 节的仿真评估得到。此外充分考虑加工误差及装配误差,本文在 532 nm 波段设置 SDR 为 100, T_m 为 44%, 分子透过率 T_m 和气溶胶透过率 T_a 定标的相对误差分别为 1% 和 5%; 355 nm 的 SDR 和 T_m 则分别设置为 100 和 49%,

T_m 和 T_a 定标的相对误差设为 0.5% 和 2.5%。认为探测器的噪声服从理想高斯分布,系统时间分辨率为 30 s。基于上述条件进行光学参数反演,重复 100 次,将反演结果同输入模型进行对比,将两者的统计误差作为评估标准。针对 532 nm 和 355 nm 分别进行仿真评估,具体结果如图 10 所示,图中散点表示 100 次 MC 仿真的结果,点划线表示输入的气溶胶模型的光学参数真值,实线表示理论误差 $\pm 3\sigma$ 值^[16]。

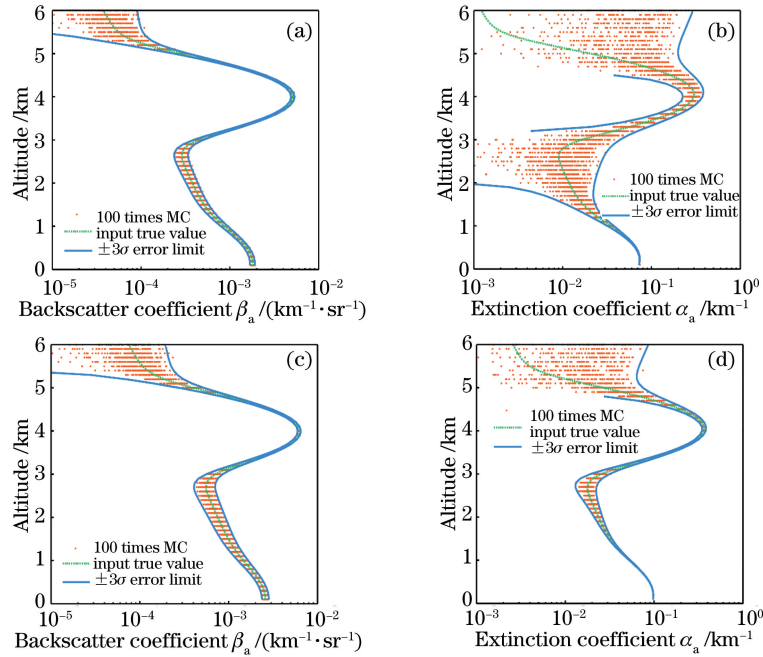


图 10 气溶胶光学特性廓线 MC 仿真结果。(a) 532 nm 后向散射系数 β_a 的仿真结果;(b) 532 nm 消光系数 α_a 的仿真结果;(c) 355 nm 后向散射系数 β_a 的仿真结果;(d) 355 nm 消光系数 α_a 的仿真结果

Fig. 10 MC simulation results of optical characteristic profiles of aerosols. (a) Simulation results of backscattering coefficient β_a at 532 nm; (b) simulation results of extinction coefficient α_a at 532 nm; (c) simulation results of backscattering coefficient β_a at 355 nm; (d) simulation results of extinction coefficient α_a at 355 nm

从图 10 中的仿真结果不难看出,MC 仿真结果同理论模型结果在两个目标波段均能较好地吻合。此外,通过仿真得到紫外波段的气溶胶消光系数 α_a 的反演结果有明显优势,这是由于紫外波段回波信号的信噪比相对更高。之后,对仿真结果进行统计分析,即能得到反演误差的标准差。两个波段的反演误差同理论分析误差^[16]的对比结果如图 11 所示。

由图 11 可见,在近场城市气溶胶高度(1 km 以下)和悬浮沙尘气溶胶高度(3~5 km)上,两个波段光学参数的反演误差较小,均能控制在 15% 以内。对于备受关注的悬浮气溶胶,532 nm 的后向散射系数 β_a 和消光系数 α_a 在 3.5~4.5 km 的反演误差的

算术平均值分别为 1.82% 和 11.39%, 355 nm 波段则分别为 1.62% 和 2.95%。事实上,光学参数相对误差只要小于 20%, 即能进行气溶胶微物理特性反演^[20]。因此,基于此双波长 FWMI 的 HSRL 系统能够实现两个波段的高精度光学参数反演,可以为进一步研究气溶胶微物理特性提供可靠的数据支持。

5 结 论

提出了双波长 FWMI 的干涉光谱鉴频器设计方法,主要考虑色散对于鉴频性能的影响,在两个波长进行折射率补偿,进而实现双波长视场展宽。考虑目前常用的 HSRL 探测波段,给出 355 nm 和

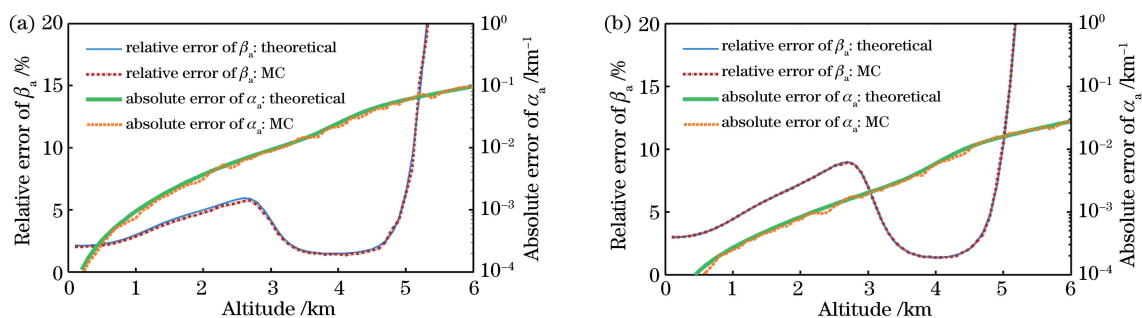


图 11 光学特性参数反演误差。(a) 532 nm 后向散射系数 β_a 和消光系数 α_a ; (b) 355 nm 后向散射系数 β_a 和消光系数 α_a

Fig. 11 Inversion errors of optical characteristic parameters. (a) backscatter coefficient β_a and extinction coefficient α_a at 532 nm; (b) backscatter coefficient β_a and extinction coefficient α_a at 355 nm

532 nm 双波长 FWMI 设计过程和具体设计参数。紫外及可见光波段的双波长 FWMI 采用混合臂设计方案,在两个波段的视场接收角均大于 6° 。随后对该设计方案进行了性能评估和容差分析,根据评估结果,双波长 FWMI 对于入射光发散角、对准精度以及锁频精度等要求并不苛刻。容差分析也表明实际加工及装调精度满足当前工艺加工水平。最后使用 MC 仿真,对基于双波长 FWMI 的 HSRL 进行光学参数反演误差分析。分析结果表明,532 nm 探测波长上的后向散射系数和消光系数的反演误差分别为 1.82% 和 11.39%,而 355 nm 探测波长上对应的后向散射系数和消光系数的反演误差分别为 1.62% 和 2.95%。综上,所设计的双波长 FWMI 能够实现紫外和可见光波段气溶胶光学特性参数的高精度探测,具有成为多波长 HSRL 系统中双波长光谱鉴频器的巨大潜力。

参 考 文 献

- [1] Rosenfeld D, Sherwood S, Wood R, et al. Atmospheric science. Climate effects of aerosol-cloud interactions[J]. *Science*, 2014, 343(6169): 379-380.
- [2] Li J, Gong W, Mao F Y, et al. Dual field of view lidar for observing atmospheric aerosols over Wuhan [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1201001. 李俊, 龚威, 毛飞跃, 等. 探测武汉上空大气气溶胶的双视场激光雷达[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1201001.
- [3] Shao J F, Hua D X, Wang L, et al. Development of ultraviolet dual-wavelength lidar and analysis of its signal-to-noise ratio [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1201004. 邵江锋, 华灯鑫, 汪丽, 等. 紫外双波长激光雷达系统研制与信噪比分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1201004.
- [4] Liu D, Zheng Z F, Chen W B, et al. Performance estimation of space-borne high-spectral-resolution lidar for cloud and aerosol optical properties at 532 nm [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): A481-A494.
- [5] Hong G L, Zhou Y B, Shu R, et al. Lidar for detection of atmospheric Doppler shift based on Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0728002. 洪光烈, 周艳波, 舒嵘, 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪的激光探测大气多普勒频移[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0728002.
- [6] Veselovskii I, Kolgotin A, Griaznov V, et al. Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(18): 3685-3699.
- [7] Nishizawa T, Sugimoto N, Matsui I. Dual-wavelength High-Spectral-Resolution Lidar for advanced classification and retrieval of aerosols [C] // 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 24-29, 2011, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2011: 4157-4160.
- [8] Liu D, Hostetler C, Miller I, et al. System analysis of a tilted field-widened Michelson interferometer for high spectral resolution lidar [J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1406-1420.
- [9] Burton S P, Hostetler C A, Cook A L, et al. Calibration of a high spectral resolution lidar using a Michelson interferometer, with data examples from ORACLES [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(21): 6061-6075.
- [10] She C Y, Yue J, Yan Z A, et al. Direct-detection Doppler wind measurements with a Cabannes-Mie lidar: B. Impact of aerosol variation on iodine vapor filter methods [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(20): 4444-4454.
- [11] Zhao M, Xie C B, Zhong Z Q, et al. Development of

- high spectral resolution lidar system for measuring aerosol and cloud[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2015, 19(6): 695-699.
- [12] Di H G, Hua H B, Zhang J Q, et al. Design and analysis of high-spectral resolution lidar discriminator [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(18): 184202.
狄慧鸽, 华杭波, 张佳琪, 等. 高光谱分辨率激光雷达鉴频器的设计与分析[J]. 物理学报, 2017, 66(18): 184202.
- [13] Cheng Z T, Liu D, Luo J, et al. Field-widened Michelson interferometer for spectral discrimination in high-spectral-resolution lidar: theoretical framework [J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12117-12134.
- [14] Shen X, Liu D, Wang N C, et al. A pressure-tuned field-widened Michelson interferometer system as the spectroscopic filter of high-spectral-resolution lidar [C]//Conference on Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XIV, Berlin: SPIE, 2018.
- [15] Huang H L, Liu D, Yang Y Y, et al. Design of the high spectral resolution lidar filter based on a field-widened Michelson interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0913003.
黄寒璐, 刘东, 杨甬英, 等. 基于视场展宽迈克尔孙干涉仪的高光谱分辨率激光雷达滤光器设计研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0913003.
- [16] Cheng Z T, Liu D, Luo J, et al. Effects of spectral discrimination in high-spectral-resolution lidar on the retrieval errors for atmospheric aerosol optical properties[J]. Applied Optics, 2014, 53(20): 4386-4397.
- [17] Bucholtz A. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere[J]. Applied Optics, 1995, 34(15): 2765-2773.
- [18] Spinhirne J D. Micro pulse lidar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 48-55.
- [19] Bo G Y, Xie C B, Wang B X, et al. Case study of the relationship between aerosol wavelength exponent and relative humidity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0713002.
伯广宇, 谢晨波, 王邦新, 等. 相对湿度影响地表气溶胶波长指数的个例研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0713002.
- [20] Veselovskii I, Dubovik O, Kolgotin A, et al. Linear estimation of particle bulk parameters from multi-wavelength lidar measurements [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5: 1135-1145.