

# 近红外高光谱分辨率激光雷达光谱滤光器性能分析

张与鹏<sup>1</sup> 刘 东<sup>1</sup> 杨甬英<sup>1</sup> 罗 敬<sup>1</sup> 成中涛<sup>1</sup> 周雨迪<sup>1</sup> 白 剑<sup>1</sup> 汪凯巍<sup>1</sup> 沈亦兵<sup>1</sup> 杨李茗<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中国工程物理研究院精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041

**摘要** 近红外高光谱分辨率激光雷达(HSRL)分子散射回波信号具有频谱展宽窄、能量弱等特点,相对于紫外和可见光HSRL研发难度大大增加。光谱滤光器作为HSRL的关键器件之一,与HSRL系统的反演精度密切相关。根据光谱滤光器的信号透射率和光谱分离比与HSRL系统反演精度的关系,通过分析1064 nm HSRL 散射回波的特点,对两种具有代表性的干涉光谱滤光器进行了建模和仿真分析。结果表明,在光束发散角较小时,Fabry-Perot干涉滤光器具有较好的滤光性能,但对面形精度要求较高,不易于加工和装调;视场展宽 Michelson干涉滤光器(FWMI)对光束的发散角不敏感,集光能力强,且对面形精度的要求相对较低,在实际应用中更适合用于近红外HSRL系统光谱滤光器。

**关键词** 遥感;近红外高光谱分辨率激光雷达;干涉光谱滤光器;光谱分离比;光束发散角;面形精度

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0414004

## Spectrum Filter Performance Analysis on Near-Infrared High-Spectral-Resolution Lidar

Zhang Yupeng<sup>1</sup> Liu Dong<sup>1</sup> Yang Yongying<sup>1</sup> Luo Jing<sup>1</sup> Cheng Zhongtao<sup>1</sup> Zhou Yudi<sup>1</sup>  
Bai Jian<sup>1</sup> Wang Kaiwei<sup>1</sup> Shen Yibing<sup>1</sup> Yang Liming<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

<sup>2</sup>Fine Optical Engineering Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China

**Abstract** Near-infrared high-spectral-resolution lidar (HSRL) is more difficult to develop as its molecule scattering echo signal has a narrower spectrum width and a weaker energy strength than that of the ultraviolet and visible HSRLs. As one of the key components of HSRL, the spectrum filter has significant influences on the retrieval accuracy of HSRLs. Based on the relationship between the spectral filter's signal transmittance and spectral discrimination ratio and the retrieval accuracy of the HSRL, the performances of two typical interference spectrum filters are modeled and simulated by analyzing the characteristics of lidar echo at 1064 nm. Results show that Fabry-Perot interference filter has moderately good performances when the divergence of incident beam is small. While the requirement for surface precision is fairly high and it is not easy to be processed and installed. Field-widened Michelson interferometer (FWMI) is insensitive to the divergence of incident beam and has a stronger ability to gathering the lidar echo. And the requirement for surface precision is relatively low. In practical application, it is more suitable for the application requirement of near-infrared HSRL.

**Key words** remote sensing; near-infrared high-spectral-resolution lidar; interference spectral filter; spectral discrimination ratio; beam divergence angle; surface precision

**OCIS codes** 280.3640; 010.3640; 010.0280; 010.1100; 010.1350; 280.1100

收稿日期: 2015-10-10; 收到修改稿日期: 2015-12-15

**基金项目:** 国家自然科学基金(41305014)、教育部博士点基金(20130101120133)、中央高校基本科研业务费专项资金(2013QNA5006)、现代光学仪器国家重点实验室创新基金(MOI2015QN01)、遥感科学国家重点实验室开放基金(OFSLRSS201412)

**作者简介:** 张与鹏(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达大气遥感方面的研究。E-mail: zhyp\_opt@163.com

**导师简介:** 刘 东(1982—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事光学传感与信息处理技术方面的研究。

E-mail: liudongopt@zju.edu.cn(通信联系人)

## 1 引 言

大气气溶胶的微观性质复杂、时空分布多变,对太阳辐射散射、吸收造成的直接辐射强迫和间接辐射强迫目前仍难以用确定的模式描述,影响地球气候和辐射平衡的不确定性<sup>[1]</sup>。激光雷达因其时空分辨率高,被广泛应用于气溶胶的遥感定量研究。然而,激光雷达探空数据局限于有限谱段及低信噪比,使得对气溶胶微观性质的反演常面临“病态求逆”问题<sup>[2]</sup>。因此,多谱段乃至全谱段高精度激光雷达探测数据对于大气气溶胶的微观性质研究十分重要<sup>[3]</sup>。

普通弹性散射激光雷达需要假定消光系数和后向散射系数之比(也称雷达比)才能够反演得到气溶胶的光学特性,存在一定的不确定性<sup>[4]</sup>。高光谱分辨激光雷达(HSRL)根据气溶胶粒子散射频谱分布与大气分子散射频谱分布的差异,采用光谱滤光器使之分离,无需假定雷达比即可得到气溶胶的光学性质<sup>[5-6]</sup>。固态Nd:YAG激光器具有增益高、阈值低、量子效率高、热效应小、机械性能良好等优点,广泛应用于激光雷达遥感大气物理及光学参数的研究。其两倍频(532 nm)和三倍频(355 nm)HSRL系统目前均已研制成功并投入观测研究<sup>[7-8]</sup>,但未见其基频1064 nm HSRL系统研制成功的报道。大量研究表明,大气气溶胶在1064 nm处的光学特性可以提高气溶胶微观性质的反演精度<sup>[9-10]</sup>,研究1064 nm高光谱分辨率激光雷达具有重要的科学与实际意义。

光谱滤光器作为近红外HSRL系统的关键技术之一,其光谱滤光特性对近红外HSRL系统的探测精度具有十分重要的影响。本文分析了不同特征参数的典型HSRL干涉型光谱滤光器在近红外波段时的信号透射率及谱分离比特性,以及光束发散角和累积波前误差对光谱滤光器的滤光特性影响,对近红外HSRL光谱滤光器的选择和参数设计具有较大的参考价值,对近红外HSRL系统的设计具有一定的指导意义。

## 2 近红外HSRL光谱滤光器

### 2.1 近红外HSRL回波信号特点

激光雷达的回波信号主要包括大气分子和悬浮在大气中的气溶胶粒子的散射信号。大气气溶胶粒子的散射主要为Mie散射过程,而大气分子的Rayleigh散射信号主要由Cabannes散射中心线和转动Raman散射旁瓣组成。在HSRL系统中,转动Raman散射旁瓣可被前置的光学预滤波系统抑制,故一般仅需考虑Cabannes散射中心线<sup>[11]</sup>。此时,两种散射信号的频谱分布都近似为高斯分布:

$$S_i(\nu - \nu_0) = \frac{1}{\gamma_i \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{\gamma_i^2}\right], \quad (1)$$

式中 $\gamma_i$ 为信号频谱谱峰1/e处的谱宽, $\nu_0$ 为发射激光的中心频率。

大气气溶胶粒子的运动速度较小,可认为Mie散射回波的频谱宽度和激光器的频谱宽度相当(约100 MHz)。大气分子散射回波信号频谱由于大气分子的Doppler展宽而具有较宽的频谱分布。由大气分子的Maxwell速率分布方程,可以得到大气分子的散射回波频谱宽度为<sup>[12]</sup>

$$\gamma_m = \frac{2\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2kT}{\bar{m}}}, \quad (2)$$

式中 $c$ 为大气中的光速, $\bar{m}$ 为大气分子的平均质量, $k$ 为玻尔兹曼常数, $T$ 为大气温度。由(2)式可知,入射波长为1064 nm时散射光谱的展宽比532 nm时的光谱展宽窄一倍。

根据1899年瑞利利用Maxwell电磁理论对分子散射的解释和Chandrasekhar对相函数的修正,大气分子的散射强度满足<sup>[13]</sup>

$$\beta(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{8\pi^3(m^2 - 1)^2}{3N\lambda^4} \frac{3}{4(1 + 2\chi)} \left[ (1 + 3\chi) + (1 + \chi)\cos^2\theta \right], \quad (3)$$

式中 $m$ 为大气介质折射率, $N$ 为大气分子数密度, $\theta$ 为观察方向与激光传播方向的夹角, $\chi$ 为相函数修正因子。由(3)式可知,瑞利散射的强度与波长的 $\lambda^4$ 成反比。因此,1064 nm激光雷达的大气分子散射回波强度约为532 nm时的1/16。

气溶胶回波信号的强度和气溶胶的大小、种类、形状等相关。机载双波长激光雷达的观测研究表明,气溶胶粒子不同波长的后向散射系数比 $C = \beta_{532}(\pi)/\beta_{1064}(\pi)$ (也称为色比)在0.4~4.5之间<sup>[14-15]</sup>。因此,气溶胶散射回波信号在1064 nm和532 nm处的强度基本在同一数量级上。

综上所述可以看出,近红外 HSRL 相对于可见光及紫外 HSRL 系统的技术难点如下:

- 1) 大气分子频谱宽度相对较窄,要更好地将其与气溶胶散射信号进行分离,对激光器、光谱滤光器及系统的锁频等均提出了更高的要求;
- 2) 大气分子散射信号相对更弱,对探测器的性能及干涉光谱滤光器的光学效率都提出了更高的要求;
- 3) 与大气分子散射回波相对更弱不同的是,气溶胶的 Mie 散射回波信号强度可能与 532 nm 时的回波信号强度在同一量级,对探测器的动态范围以及光谱滤光器的分光性能都提出了更高的要求。

由此可见,1064 nm HSRL 系统对激光光电技术、信号探测技术及滤光器光谱分离技术等均提出了更高要求。相对于激光器及探测器比较明确的指标要求,窄带光谱滤光器的选择及指标要求就显得更复杂一些,也需要做进一步分析。通过对近红外 HSRL 的关键技术之一(即指光谱分离滤光器)进行分析,为建立近红外 HSRL 提供理论参考。

## 2.2 干涉型 HSRL 光谱滤光器

截至目前,HSRL 光谱滤光器主要有原子/分子吸收型和干涉型两大类。原子/分子吸收型光谱滤光器根据原子/分子的特征吸收谱线来实现窄带的光谱吸收,以滤除气溶胶散射回波信号。特别是碘分子吸收池滤光器具有较高的气溶胶散射信号抑制比,且对入射角度的误差并不敏感而备受青睐。尽管原子/分子吸收型光谱滤光器有很多优点,其目前只局限于几个固定的波长,大大局限了其应用范围<sup>[16-17]</sup>。干涉型光谱滤光器依据光学干涉相长相消的原理,通过对光程差的设计实现对特定波长信号的抑制,达到气溶胶和分子散射信号分离的目的。Fabry-Perot 干涉仪(FPI)早在 1983 年就被提出作为 HSRL 系统的光谱滤光器<sup>[5]</sup>,已广泛应用于 HSRL 系统中。Bruneau 等<sup>[12]</sup>提出将 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)作为光谱滤光器应用于 HSRL 系统,并进行了仿真分析。美国国家航空航天局(NASA)和浙江大学研究人员用视场展宽 Michelson 干涉仪(FWMI)作为 HSRL 的光谱滤光器进行了系统研究,通过对设计和误差理论的分析证实了 FWMI 用于 HSRL 系统的可行性<sup>[18-20]</sup>。

对于近红外 HSRL 系统,目前未见适用于 1064 nm 的原子吸收型光谱滤光器,因此干涉型光谱滤光器成为首选方案。FPI 基于多光束干涉理论,具有较高的条纹锐度。但其对入射角十分敏感,接收角度较小,集光能力较弱,装调精度要求高。根据目前近紫外 HSRL 系统中的应用情况,FPI 作为 HSRL 的光谱滤光器时,可以有 3 种不同的应用形式,即中心透射应用抑制分子散射信号(CSMS 模式)<sup>[8]</sup>、中心反射应用抑制气溶胶散射信号(CSAS 模式)<sup>[5]</sup>和边带透射应用抑制大气气溶胶信号(SSAS 模式)<sup>[21]</sup>[如图 1(a)~(c)所示]。

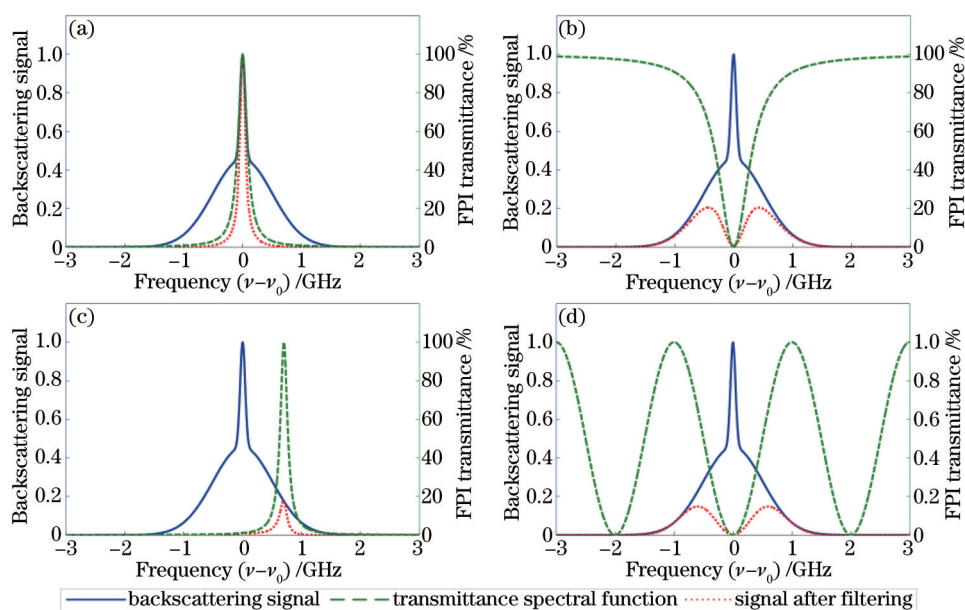


图 1 干涉光谱滤光器滤光示意图。(a) FPI 的 CSMS 模式;(b) FPI 的 CSAS 模式;(c) FPI 的 SSAS 模式;(d) FWMI  
Fig.1 Schematic diagrams of interference spectrum filter working principle. (a) CSMS mode of FPI; (b) CSAS mode of FPI;  
(c) SSAS mode of FPI; (d) FWMI

FWMI 和 MZI 从本质上来讲都基于双光路干涉原理,都可以实现视场展宽而具有较高的集光能力,对安

装精度的要求也都相对宽松。因此, 仅以 FWMI 为例来讨论这类干涉滤光器在近红外 HSRL 系统中的表现。在透射通道 FWMI 一般设计用于抑制气溶胶粒子散射信号, 如图 1(d) 所示。

### 3 近红外干涉型 HSRL 滤光器仿真分析

Cheng 等<sup>[22-23]</sup>的研究结果表明, HSRL 系统的反演误差主要和光谱滤光器的信号透射率  $T_i$  (下标  $i$  在分子通道为  $m$ , 气溶胶通道为  $a$ , 分别表示大气分子、气溶胶散射信号的透射率) 以及光谱滤光器的谱分离比  $R_{sd,i}$  (分子通道  $R_{sd,m} = T_m/T_a$ , 气溶胶通道  $R_{sd,a} = T_a/T_m$ ) 有关。透射率  $T_i$  和  $R_{sd,i}$  越大, HSRL 的反演精度相对越高。然而, 透射率  $T_i$  和  $R_{sd,i}$  通常无法同时增大。透射率  $T_i$  增大时,  $R_{sd,i}$  就会减小, 反之亦然。设计光谱滤光器时, 需要权衡两者的取值。Cheng 等<sup>[22-23]</sup>的研究表明, 低空气溶胶浓度大 [气溶胶散射比  $R = (\beta_m + \beta_a)/\beta_m$  较大], HSRL 反演精度对光谱滤光器的谱分离比依赖性较强, 而在高空气溶胶浓度较小 (卷云及沙尘等情况存在时除外), HSRL 反演精度主要受限于信号的信噪比; 而且, 过分追求大的  $R_{sd}$  对提高 HSRL 系统的精度并没有明显帮助。因此权衡透射率  $T_i$  和  $R_{sd}$  时, 应当优先保证接收光学系统的光学效率, 兼顾光谱分离比<sup>[23]</sup>。

#### 3.1 仿真系统参数

本设计仿真主要基于课题组正在研究的近红外 HSRL 系统的参数。使用 1064 nm 脉冲 Nd:YAG 固态激光器, 光束束腰半径约 5 mm, 发散角约为 1 mrad (全角), 经 8 倍扩束。望远镜有效通光口径为 280 mm,  $F$  数为 10, 视场角可调。激光发射系统和接收望远镜具体参数见表 1, 表 1 中 FWHM 半峰全宽。

表 1 仿真使用的参数

Table 1 Parameters used in simulation

Specification	Value
Laser wavelength /nm	1064
Laser linewidth (FWHM) /MHz	100
Laser divergence (after expanding) /mrad	0.125
Telescope diameter /mm	280
Telescope field of view (adjustable) /mrad	0.125 to 0.35
Bandpass width of pre-filter /nm	0.1

根据美国大气标准模型, 大气的温度随高度不同而变化。由 (2) 式可以估算 10 km 以下大气分子散射回波的频谱展宽约为 0.76~0.67 GHz。因此在设计光谱滤光器时, 考虑  $\gamma_m = 0.71$  GHz 具有较好的代表性。

#### 3.2 FPI 光谱滤光器

FPI 是基于光学多光束干涉原理的光学干涉滤光器, 其透射率曲线为 Airy 函数<sup>[24]</sup>, 即

$$t_{\text{FPI}}(\nu, \theta) = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 \frac{1}{1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \sin^2(\pi\nu \cos \theta / f_{\text{FSR}})}, \quad (4)$$

式中  $R$  和  $A$  分别为 FPI 平板内表面反射膜的反射系数和吸收系数,  $\theta$  为光束入射角,  $F = \pi\sqrt{R}/(1-R)$  为 FPI 条纹的精细度,  $f_{\text{FSR}} = cl/(2nh)$  为 FPI 的自由光谱范围 ( $n$  为平板间介质的折射率,  $h$  为 FPI 的腔长)。类似地, FPI 的反射率曲线与频率和入射角度的关系为

$$r_{\text{FPI}}(\nu, \theta) = \frac{[A/(1-R)]^2 R + (1-A)\frac{4F^2}{\pi^2} \sin^2(\pi\nu \cos \theta / f_{\text{FSR}})}{1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \sin^2(\pi\nu \cos \theta / f_{\text{FSR}})}. \quad (5)$$

忽略膜的吸收, FPI 透射率曲线将由  $f_{\text{FSR}}$  和  $R$  决定。下面对 FPI 在不同应用模式下的滤光性能表现进行分析。

##### 3.2.1 CSMS 模式下 FPI 性能分析

当 FPI 应用于中心透射应用抑制分子散射信号时, 为气溶胶信号通道, HSRL 的反演精度和透射率  $T_a$  及  $R_{sd,a}$  有关。为使 FPI 的透射率中心与气溶胶回波信号的峰值频率重合, 应满足

$$\delta(\nu_0, 0) = 2\pi\nu_0 / f_{\text{FSR}} = 2m\pi, \quad m \in \forall \mathbf{Z}, \quad (6)$$



式中  $\mathbf{Z}$  为整数集。此时,光束正入射 FPI,忽略光束发散角,改变 FPI 反射膜的反射系数  $R$  和  $f_{\text{FSR}}$ , 可以看到 FPI 对 1064 nm 激光雷达回波的透射率  $T_a$  及  $R_{\text{SD},a}$  的变化趋势。图 2(a)、(b) 分别显示了在 CSMS 模式下雷达回波单次透过 FPI 时,透射率  $T_a$  和  $R_{\text{SD},a}$  随  $R$  和  $f_{\text{FSR}}$  的变化趋势,而图 2(c)、(d) 则分别给出了上述模式下雷达回波两次透过 FPI 的情况。由图 2 可见,无论是单次滤光还是两次滤光,FPI 在 CSMS 模式下的  $R_{\text{SD},a}$  均较小。由于 1064 nm HSRL 回波信号散射比一般较大,不利于近红外 HSRL 精度的提高。

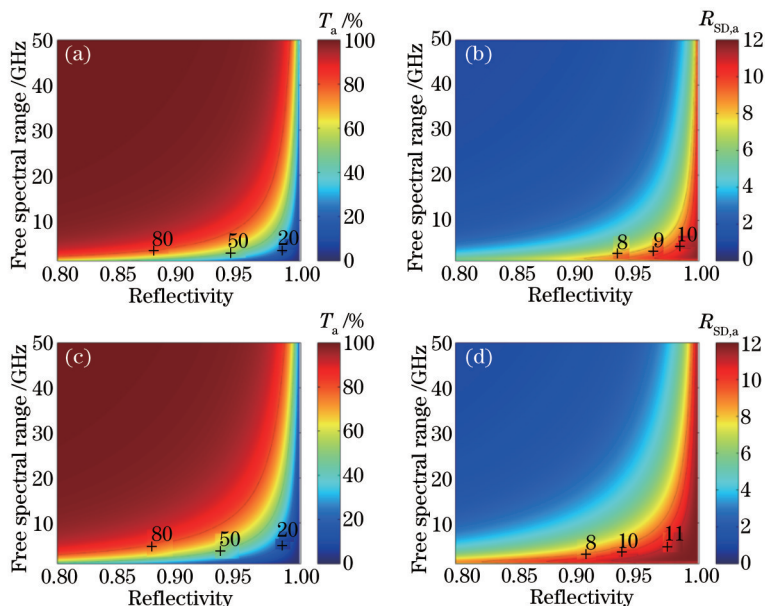


图 2 FPI 在 CSMS 模式下透射率  $T_a$  和  $R_{\text{SD},a}$  随  $R$  和  $f_{\text{FSR}}$  的变化趋势。(a) 单次透过时  $T_a$  变化趋势;  
(b) 单次透过时  $R_{\text{SD},a}$  变化趋势;(c) 两次透过时  $T_a$  变化趋势;(d) 两次透过时  $R_{\text{SD},a}$  变化趋势

Fig.2 Tendency of  $T_a$  and  $R_{\text{SD},a}$  of FPI in CSMS mode with change of  $R$  and  $f_{\text{FSR}}$ . (a) Tendency of  $T_a$  under single transmission;  
(b) tendency of  $R_{\text{SD},a}$  under single transmission; (c) tendency of  $T_a$  under double transmission; (d) tendency of  $R_{\text{SD},a}$  under double transmission

### 3.2.2 CSAS 模式下 FPI 性能分析

FPI 用于中心反射应用抑制气溶胶散射信号时,为分子信号通道,HSRL 的反演精度和分子散射信号“透射率”  $T_m$  (实为反射率,后面不再特殊说明)及光谱分离比  $R_{\text{SD},m}$  有关。为引出反射光,光路的结构相对于透射式应用要复杂一些,FPI 一般需要倾斜一定的角度  $\theta_i$ <sup>[5]</sup>。 $\theta_i$  的大小与前置光学系统的结构参数有关,一般在几个 mrad,取  $\theta_i = 0.1^\circ$  (约 1.7 mrad)。设计 FPI 时,考虑其反射率曲线与气溶胶散射回波信号的峰值中心重合,应满足

$$\delta(\nu_0, \theta_i) = 2\pi\nu_0 \cos(\theta_i)/f_{\text{FSR}} = 2m\pi, m \in \mathbb{Z}. \quad (7)$$

同样地,忽略光束发散角的影响,改变 FPI 反射膜的反射系数  $R$  和  $f_{\text{FSR}}$ , 可以看到 FPI 对 1064 nm 激光雷达回波的透射率  $T_m$  及  $R_{\text{SD},m}$  的变化趋势。图 3(a)、(b) 分别显示了在 CSAS 模式下单次通过 FPI 的反射信号时,  $T_m$  和  $R_{\text{SD},m}$  随  $R$  和  $f_{\text{FSR}}$  的变化趋势。考虑光束发散角时,FPI 的  $R_{\text{SD},m}$  会迅速减小(第 4 节将重点讨论),权衡  $T_m$  和  $R_{\text{SD},m}$  的取值时,可以把  $R_{\text{SD},m}$  稍微取大一些。故此处取  $f_{\text{FSR}}$  约为 24 GHz,膜层反射率  $R$  为 0.91,则透射率  $T_m = 43.87\%$ ,  $R_{\text{SD},m}$  约为 35.6,详细参数见表 2。

类似地,设置光路让雷达散射回波信号两次通过 FPI 反射来增大  $R_{\text{SD},m}$ 。两次透过 FPI,增加了光路的复杂度,透射率  $T_m$  有一定程度地减小,但  $R_{\text{SD},m}$  得到大幅提高,图 3(c)、(d) 分别显示了在 CSAS 模式下两次通过 FPI 反射滤光时,  $T_m$  和  $R_{\text{SD},m}$  随  $R$  和  $f_{\text{FSR}}$  的变化趋势。在这种情况下,选取 FPI 的  $f_{\text{FSR}}$  为 20 GHz,  $R$  为 0.92,对应的透射率  $T_m$  和  $R_{\text{SD},m}$  分别为 39.59% 和 252.9,详细参数见表 2。

FPI 应用在 CSAS 模式下,为获得反射信号,干涉仪需倾斜一定角度,相对于 CSMS 模式,光路结构要复杂一些。由上述分析可看出,分子通道的光谱分离比在透射率适中的情况下,可以达到较高水平(尤其是两次反射信号),满足近红外 HSRL 的光谱滤光要求。

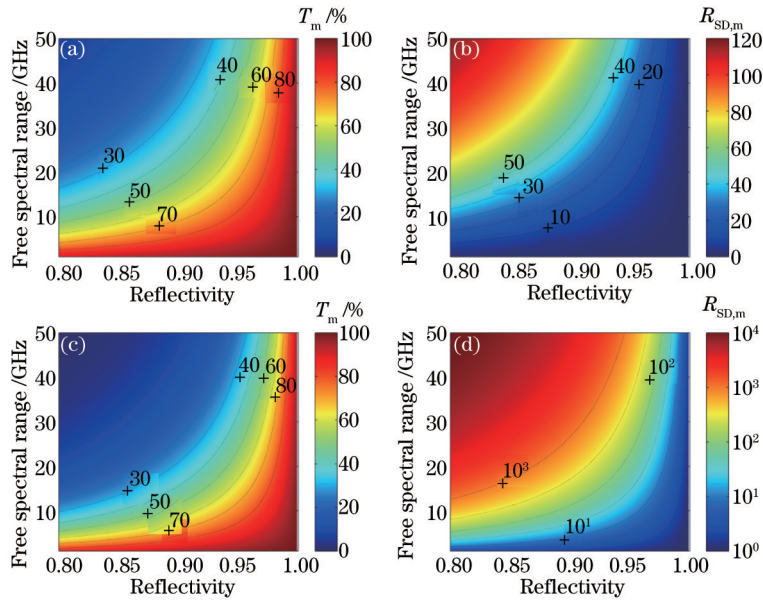


图3 FPI在CSAS模式下  $T_m$  和  $R_{SD,m}$  随  $R$  和  $f_{FSR}$  的变化趋势。(a) 单次反射时  $T_m$  变化趋势; (b) 单次反射时  $R_{SD,m}$  变化趋势; (c) 两次反射时  $T_m$  变化趋势; (d) 两次反射时  $R_{SD,m}$  变化趋势

Fig.3 Tendency of  $T_m$  and  $R_{SD,m}$  of FPI in CSAS mode with change of  $R$  and  $f_{FSR}$ . (a) Tendency of  $T_m$  under single reflection; (b) tendency of  $R_{SD,m}$  under single reflection; (c) tendency of  $T_m$  under double reflection; (d) tendency of  $R_{SD,m}$  under double reflection

表2 FPI在CSAS模式下的参数选择

Table 2 Parameters selection of FPI in CSAS mode

Parameter	Value	
FPI mark	FPI1	FPI2
Application mode	CSAS mode, single reflection	CSAS mode, double reflection
Beam input angle $\theta_i / (^\circ)$	0.1	0.1
Free spectral range /GHz	25	20
Etalon reflectivity $R$	0.91	0.92
Etalon gap $h$ /mm	5.9924	7.4907
Molecular signal transmittance $T_m / \%$	43.87	39.59
Aerosol signal transmittance $T_a / \%$	1.23	0.16
Spectral discrimination ratio	35.6	252.9

### 3.2.3 SSAS 模式下 FPI 参数选取

FPI用于边带透射应用抑制分子散射信号时,为分子信号通道,HSRL的反演精度和透射率  $T_m$  及  $R_{SD,m}$  有关。此时,要考虑的不仅仅是FPI的膜反射率  $R$  和  $f_{FSR}$ ,还要考虑透射率中心与激光中心频率的频率差  $\Delta\nu$ 。此时,FPI的透射率中心与激光中心频率存在偏移,应满足

$$\delta(\nu_0, 0) = 2\pi(\nu_0 + \Delta\nu)f_{FSR} = 2m\pi, m \in \mathbb{Z}. \quad (8)$$

在光束发散角增大时FPI的透射率中心将向高频方向移动,为了保持对气溶胶散射信号的抑制,在SSAS模式下FPI的透射率中心偏向高频边带。考虑到1064 nm激光雷达大气分子回波的频谱半峰全宽的一半约为0.6 GHz,  $\Delta\nu$  为0.5、0.6、0.7 GHz时,忽略光束发散角,改变FPI的反射膜的  $R$  和  $f_{FSR}$ ,可得FPI对1064 nm激光雷达回波的透射率  $T_m$  及  $R_{SD,m}$  的变化趋势,如图4所示。

当FPI应用于SSAS模式,  $R_{SD,m} > 10$  时,透射率  $T_m < 10\%$ ,因为1064 nm大气分子散射回波频谱宽度较紫外波段窄了很多。进一步分析发现,即便使散射回波信号两次透过FPI也没有太大改观。而近红外HSRL分子散射回波相对于532 nm已经弱了约16倍,信号透射率过小,导致信噪比较差,必将影响反演精度。因此,SSAS模式也不利于1064 nm HSRL系统的高精度反演。

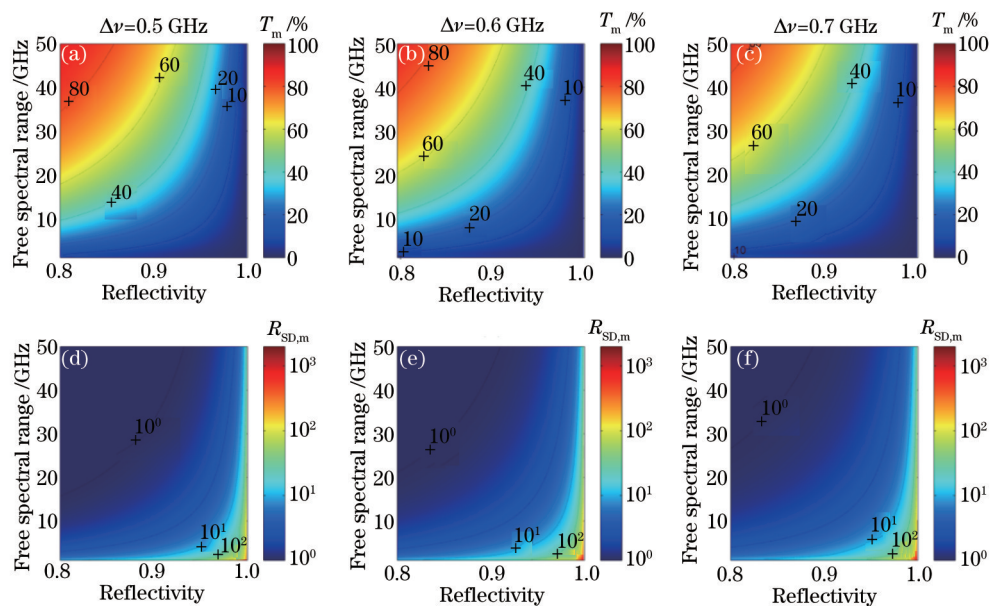


图4 FPI在SSAS模式单次透射时分子信号透射率  $T_m$  和光谱分离比  $R_{SD,m}$  随  $R$  和  $f_{FSR}$  的变化趋势。

(a)  $\Delta\nu = 0.5$  GHz时  $T_m$  变化趋势; (b)  $\Delta\nu = 0.6$  GHz时  $T_m$  变化趋势; (c)  $\Delta\nu = 0.7$  GHz时  $T_m$  变化趋势;  
 (d)  $\Delta\nu = 0.5$  GHz时  $R_{SD,m}$  变化趋势; (e)  $\Delta\nu = 0.6$  GHz时  $R_{SD,m}$  变化趋势; (f)  $\Delta\nu = 0.7$  GHz时  $R_{SD,m}$  变化趋势  
 Fig.4 Tendencies of  $T_m$  and  $R_{SD,m}$  of FPI in SSAS mode with change of  $R$  and  $f_{FSR}$ . (a) Tendency of  $T_m$  when  $\Delta\nu = 0.5$  GHz;  
 (b) tendency of  $T_m$  when  $\Delta\nu = 0.6$  GHz; (c) tendency of  $T_m$  when  $\Delta\nu = 0.7$  GHz; (d) tendency of  $R_{SD,m}$  when  $\Delta\nu = 0.5$  GHz;  
 (e) tendency of  $R_{SD,m}$  when  $\Delta\nu = 0.6$  GHz; (f) tendency of  $R_{SD,m}$  when  $\Delta\nu = 0.7$  GHz

### 3.3 FWMI光谱滤光器

视场展宽 Michelson干涉仪是基于光学双光路干涉原理的光学干涉滤光器,其透射率曲线可以表示为<sup>[22]</sup>

$$t_{FWMI}(\nu, \theta) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{2\pi\nu}{f_{FSR}} \frac{\Delta L(\theta)}{\Delta L(0)}\right], \quad (9)$$

式中  $I_1, I_2$  分别为经过两支干涉臂的光强,理想情况下  $I_1 = I_2 = I_0/4$  ( $I_0$  为干涉仪的入射光强),  $f_{FSR} = c/\Delta L(0)$  为FWMI的自由光谱范围,  $\Delta L(\theta)$  为入射角为  $\theta$  时对应的光程差,  $\Delta L(0)$  为正入射时对应的光程差,为使FWMI透射率曲线谷值与气溶胶散射信号峰值重合(如图1(d)所示),光程差  $\Delta L(0)$  应满足:  $\Delta L(0) = (2m + 1)\pi$  (其中,  $m \in \mathbb{Z}$ )。FWMI一般采用透射式应用,忽略光束的发散角,考虑正入射,并假定理想情况  $I_1 = I_2$ ,改变FWMI的  $f_{FSR}$ ,可以得到透射率  $T_m$  和  $R_{SD,m}$  的变化趋势,如图5所示。

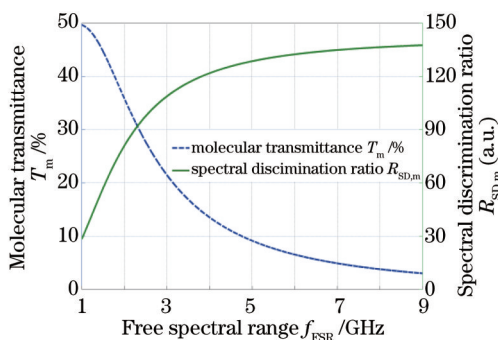


图5 FWMI的透射率  $T_m$  和  $R_{SD,m}$  随  $f_{FSR}$  的变化趋势

Fig.5 Tendency of  $T_m$  and  $R_{SD,m}$  of FWMI with change of  $f_{FSR}$

权衡透射率  $T_m$  和  $R_{SD,m}$  的变化,并考虑到FWMI的结构大小,FWMI的  $f_{FSR}$  取为 2 GHz,此时透射率  $T_m$  为 35.85%,  $R_{SD,m}$  约为 80.6。FWMI的设计方法及实例可参考 Cheng 等的相关研究<sup>[19,25]</sup>,现详细列于表3。

表 3 FWMI 的参数选择与设计实例

Table 3 Parameters selection and designing example of FWMI

Parameter	Hybrid arm		Pure glass arm
Material	N-SF66	air	P-SF68
Refractive index	1.87981 ( $n_2$ )	1.000269 ( $n_3$ )	1.95953 ( $n_1$ )
Length /mm	7.254 ( $d_2$ )	25.9972 ( $d_3$ )	58.504 ( $d_1$ )
Free spectral resolution /GHz	2		
Molecular signal transmittance $T_m$ /%	35.85		
Aerosol signal transmittance $T_a$ /%	0.44		
Spectral discrimination ratio	80.6		

### 3.4 讨 论

由上述仿真分析可知,作为近红外 HSRL 系统的光谱滤光器时, FPI 在 CSMS 模式下光谱分离比较小, 1064 nm 雷达回波信号散射比一般较大, 不利于 HSRL 精度的提高; 而 FPI 应用于 SSAS 模式时, 分子散射信号的透射率太低, 1064 nm 激光雷达分子散射回波信号较弱, 也必将影响后续数据的高精度反演。通过使 FPI 倾斜一定角度, 获取 FPI 的反射信号 (CSAS 模式), 合理选择 FPI 的  $f_{FSR}$  和  $R$ , 可以获得适当的透射率  $T_m$  和  $R_{SD,m}$ , 若两次通过 FPI 反射, 则可以改善  $R_{SD,m}$ 。同时, FWMI 也可以选择合理的  $f_{FSR}$  实现较大的透射率  $T_m$  和  $R_{SD,m}$ 。因此, 光束正入射情况下, FWMI 及 CSAS 模式下的 FPI 均有潜力作为近红外 HSRL 系统的光谱滤光器。

## 4 近红外 HSRL 干涉光谱滤光器实际性能评估

上述分析及结论都是在基于光束不存在发散角并且干涉滤光器可以理想加工的假设下得到的。实际上, 激光雷达回波信号存在一定的发散角, 并且干涉光谱滤光器也不可能被理想加工, 总会存在一定的面形及装调误差等, 这些因素将会使得干涉滤光器的表现有所退化。因此, 有必要对发散光束条件下光谱滤光器的性能表现以及面形精度等对于干涉滤光器的滤光性能影响进行分析。

### 4.1 发散光束下干涉光谱滤光器性能仿真

激光雷达回波的能量角度分布会随着高度的不同而变化, 而考虑到大气状态的复杂性, 很难进行精确地建模描述。为了消除回波信号角分布与高度的依赖性对于干涉光谱滤光器 (尤其是 FPI) 透射率及光谱分离比的影响, 入射光谱滤光器的光一般要先经过光纤扰模器, 使光束均匀分布<sup>[26]</sup>。基于此假定, 发散光束倾斜入射干涉滤光器时的透射率曲线 (对于 CSMS 模式的 FPI 为反射率) 可以描述为<sup>[19]</sup>

$$T_i(\nu) = \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi \int_0^{\theta_m} l_{map,i}(\nu, \rho, \varphi) \rho d\rho / \pi f^2 \theta_m^2, \quad (10)$$

式中  $l_{map,i}(\rho, \varphi, \nu) = l_i \left[ \nu, a \cos \left( \frac{f \cos \theta_i - \rho \sin \theta_i \cos \varphi}{\sqrt{f^2 + \rho^2}} \right) \right]$ , 其中,  $\theta_i$  为入射光束的倾斜角,  $\theta_m$  为光束的发散角 (半角),  $f$  为准直透镜的焦距;  $l_i(\nu, \theta)$  可以是平行光入射时 FWMI 的透射率曲线或者 FPI 的透射率/反射率曲线。 $f\theta_m$  对应于光纤的纤芯半径, 并与望远镜的视场角相对应。在望远镜视场角一定时,  $f$  越大, 对应的  $\theta_m$  越小, 对滤光器通光口径的要求越大, 系统总体尺寸越大; 反之,  $f$  越小, 对应的  $\theta_m$  越大, 滤光器和系统的整体尺寸都可以减小。研究表明, 对于固定  $\theta_m$  的入射光, 最终透射率与  $f$  无关。

Cheng 等<sup>[27]</sup>的研究表明, FWMI 的相位随频率和光束入射角的变化关系为

$$\delta(\nu, \theta) = \frac{2\pi\nu}{f_{FSR}} \frac{\Delta L(\theta)}{\Delta L(0)} = \frac{2\pi\nu_0}{f_{FSR}} + \frac{2\pi(\nu - \nu_0)}{f_{FSR}} - \frac{\pi\nu_0 M \theta^4}{2c}, \quad (11)$$

式中  $M = d_3/n_3^3 + d_2/n_2^3 - d_1/n_1^3$  是与 FWMI 的具体结构相关的常数。

假定耦合光纤的纤芯直径为 500  $\mu\text{m}$  (对应望远镜的视场角约为 0.18 mrad), 若准直透镜焦距为 50 mm, 对应入射光束发散角为 5 mrad (半角)。利用第 3 节分析确定的 FPI 和 FWMI 的优化参数, 得到光谱滤光器在不同发散角发散光束入射下的滤光性能表现, 如图 6 所示。对于 FWMI, 其透射率  $T_m$  和  $R_{SD}$  仍能保持设计值。



对于FPI,为了保持良好的滤光性能,光束发散角应当控制在0.3 mrad以内,需要选用较长焦距的准直透镜,为保证光能充分利用,通光口径将大大增大,而生产大通光口径的FPI十分困难;若通过光阑对通光口径或者光束发散角加以限制,势必会损失光能,降低系统的光学效率,不利于信噪比的提升。同时,FPI的装调角度误差也会影响其滤光表现,而FWMI却因其视场展宽特性而具有较大的安装角度容差。

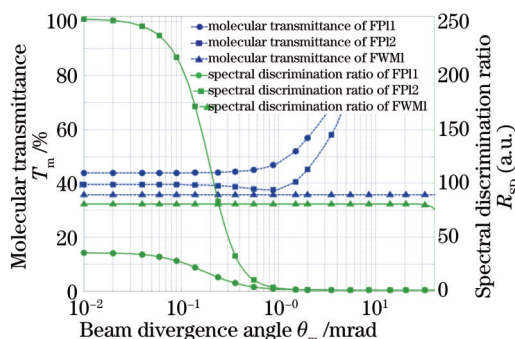


图6 FPI和FWMI的 $T_m$ 和 $R_{sd}$ 随 $\theta_m$ 的变化趋势

Fig.6 Tendency of  $T_m$  and  $R_{sd}$  of FPI and FWMI with change of  $\theta_m$

#### 4.2 累积波前误差对干涉光谱滤光器性能的影响

在上述讨论中,均假定FPI和FWMI没有加工误差。但实际中干涉光谱滤光器的面形加工误差及装调的不平行度等都会导致干涉光谱滤光器的性能进一步偏离设计值<sup>[20]</sup>。面形加工误差将会导致透过滤光器的波前发生畸变,而装调的不平行度会引入附加的倾斜相位,因此上述两种误差都可以用累积波前误差来衡量。FPI和FWMI在存在累积波前误差的情况下,其透射率 $T_m$ 和 $R_{sd}$ 的变化趋势如图7所示。

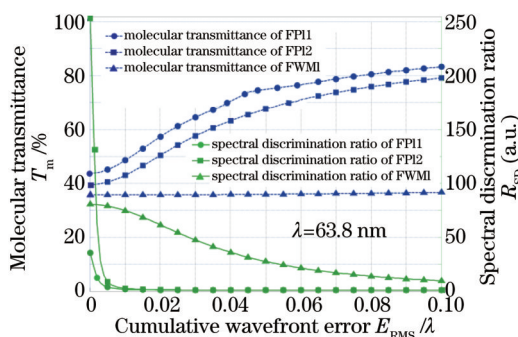


图7 累积波前误差对干涉光谱滤光器滤光性能的影响

Fig.7 Influence of cumulative wavefront error on interference spectrum filters' filtering performances

由图7可见,FPI相对于FWMI对累积波前误差的要求更高一些。在累积波前误差( $E_{RMS}$ )为 $0.01\lambda$ 时,FPI的光谱分离比严重退化,而FWMI在累积波前误差达到 $0.02\lambda$ 时,光谱分离比 $R_{sd}$ 依然大于60,具有较好的表现。目前国内加工水平可以将累积波前误差控制在 $0.02\lambda$ 以内,而累积波前误差小于 $0.01\lambda$ 则非常困难,这大大提高了近红外HSRL系统的成本及国产化难度。

#### 4.3 讨论

FPI对入射角度敏感,只允许在较小的光束发散角下应用,这就要求使用焦距较大的准直透镜,或者牺牲部分回波信号。使用焦距较大的准直透镜,使系统的体积较大,还要求FPI的有效通光口径较大。FPI的滤光性能对面形精度的要求较高,加工大通光口径的FPI时,面形精度难以保证且价格昂贵;若牺牲部分回波信号,由于 $1064\text{ nm}$ 大气分子回波信号本身已经较弱,使系统的信噪比大大降低,影响了HSRL系统的反演精度。

相反,FWMI具有视场展宽特性,可以接收较大发散角的光束,有利于系统的小型化,对装调的角度误差也不敏感,稳定性较好。FWMI对面形精度的要求较之FPI低,在国内加工水平下易于实现。因此,FWMI可以作为近红外HSRL系统的光谱滤光器。

根据 Cheng 等的研究<sup>[19]</sup>,非偏振系统并忽略光谱滤光器  $T_m$  和  $T_a$  的定标误差,系统后向散射系数 $\beta$ 的反演相对误差可以表示为

$$\varepsilon_{\beta} = \left(1 + \frac{R}{R_{SD} - 1}\right) \frac{1}{R_{SN}}, \quad (12)$$

式中  $R_{SN}$  为系统信号探测的信噪比,与激光器的发射功率、探测器的电子噪声及背景光噪声等有关。

图 8 显示了在光谱滤光器的光谱分离比取不同值时,不同信噪比水平下 $\beta$ 相对不确定度随气溶胶散射比的变化趋势。需要说明的是,这里考虑的信噪比大小,对于 HSRL 反演是比较极限的情况<sup>[28]</sup>,主要为了预估近红外 HSRL 系统探测精度的极限情况。可以看出, $R_{SD}$ 在 40~60 之间变化时对 $\beta$ 相对不确定度的影响远小于  $R_{SD}$  为 20 时,因此  $R_{SD}$  大于 40 时,都是比较合适的。而对于 FWMI,  $R_{SD}$  达到 40 以上是容易实现的<sup>[25]</sup>,当信噪比  $R_{SN}$  大于 30,气溶胶散射比小于 80 时,HSRL 系统的 $\beta$ 相对不确定度可以控制在 10% 以下。又鉴于 FWMI 的集光能力比较强,系统信噪比较好,且对角度装调误差并不敏感,因此比较适合于近红外 HSRL 系统的应用。

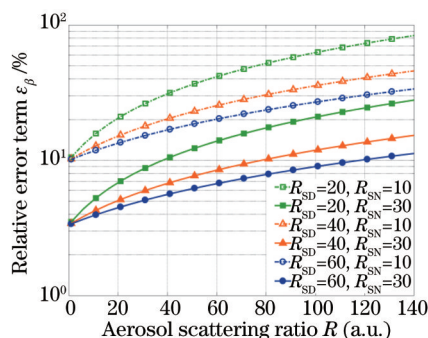


图 8 不同信噪比下 $\beta$ 的相对不确定度

Fig.8 Relative uncertainty of  $\beta$  under different signal-to-noise ratios

## 5 结 论

光谱滤光器作为高光谱分辨率激光雷达的关键技术之一,其滤光性能表现对 HSRL 的反演精度有重要影响。根据干涉滤光器的信号透射率和光谱分离比与 HSRL 反演误差的关系,在近红外波段对不同应用形式下 FPI 和 FWMI 的信号透射率和光谱分离比进行分析,对近红外 HSRL 系统的研发有一定指导意义。应用于 CSMS 模式和 SSAS 模式的 FPI 滤光器由于光谱分离比或信号透射率较低,无法满足近红外 HSRL 的滤波要求。应用于 CSAS 模式的 FPI 滤光器在理想情况下,对发散角很小的入射光束具有较好的滤光效果。但是,对于大发散角的光束,FPI 的滤光性能急剧减弱,因此在实际的 HSRL 系统中要严格控制入射 FPI 的光束发散角,势必会增大系统的尺寸。同时,FPI 对面形精度的要求相对较高,目前国内加工水平还难以实现。FWMI 作为光谱滤光器,具有以下优势:1) 由于加入视场补偿条件,具有视场展宽特性,对光束的发散角不敏感,对于大发散角的光束仍能保持较高的分子散射信号透射率和光谱分离比,对装调精度要求低;2) 对面形精度的要求相对较低,容易加工实现;3) 集光能力较强,易于系统的小型化和紧凑化。因此,FWMI 比较适合于近红外 HSRL 的光谱滤光要求。

## 参 考 文 献

- 1 Mao Jietai, Li Chengcai. Aerosol radiation characteristics of observational studies[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(5): 622-635.  
毛节泰,李成才.气溶胶辐射特性的观测研究[J].气象学报,2005,63(5):622-635.
- 2 Müller D, Wandinger U, Ansmann A. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Theory[J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2346-2357.
- 3 Bo Guangyu, Xie Chenbo, Wang Bangxin, et al.. Case study of the relationship between aerosol Ångström exponent and relative humidity [J]. Chinese J 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.
- 4 Zhang Zhaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0513002.

- 张朝阳, 苏 林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0513002.
- 5 Shipley S T, Tracy D, Eloranta E W, *et al.*. High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols, 1: Theory and instrumentation[J]. Applied Optics, 1983, 22(23): 3716–3724.
- 6 Liu D, Yang Y, Cheng Z, *et al.*. Retrieval and analysis of a polarized high-spectral-resolution lidar for profiling aerosol optical properties [J]. Optics Express, 2013, 21(11): 13084–13093.
- 7 Hair J W, Hostetler C A, Cook A L, *et al.*. Airborne high spectral resolution lidar for profiling aerosol optical properties[J]. Applied Optics, 2008, 47(36): 6734–6752.
- 8 Nishizawa T, Sugimoto N, Matsui I. Development of a dual-wavelength high-spectral-resolution lidar[C]. SPIE, 2010, 7860: 78600D
- 9 Chemyakin E, Müller D, Burton S, *et al.*. Arrange and average algorithm for the retrieval of aerosol parameters from multiwavelength high-spectral-resolution lidar/Raman lidar data[J]. Applied Optics, 2014, 53(31): 7252–7266.
- 10 Gasteiger J, Freudenthaler V. Benefit of depolarization ratio at  $\lambda=1064$  nm for the retrieval of the aerosol microphysics from lidar measurements[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(11): 3773–3781.
- 11 She C Y. Spectral structure of laser light scattering revisited: Bandwidths of nonresonant scattering lidars[J]. Applied Optics, 2001, 40(27): 4875–4884.
- 12 Bruneau D, Pelon J. Simultaneous measurements of particle backscattering and extinction coefficients and wind velocity by lidar with a Mach-Zehnder interferometer: Principle of operation and performance assessment[J]. Applied Optics, 2003, 42(6): 1101–1114.
- 13 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.*. Atmospheric physics (second edition)[M]. Beijing: Peking University Press, 2013: 426–488. 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学(第二版)[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013: 436–488.
- 14 Burton S, Ferrare R, Hostetler C, *et al.*. Aerosol classification using airborne high spectral resolution lidar measurements—methodology and examples[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5(1): 73–98.
- 15 Wang Zhifei, Liu Dong, Cheng Zhongtao, *et al.*. Pattern recognition model for haze identification with atmospheric backscatter lidars[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1113001.  
王治飞, 刘 东, 成中涛, 等. 基于模式识别的激光雷达遥感灰霾组分识别模型[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1113001.
- 16 Liu D, Yang Y, Cheng Z, *et al.*. Development of the ZJU polarized near-infrared high spectral resolution lidar[C]. SPIE, 2013, 8905: 89052W.
- 17 Liu Dong, Yang Yongying, Zhou Yudi, *et al.*. High-spectral-resolution lidar for atmosphere remote sensing: A review[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2535–2546.  
刘 东, 杨甬英, 周雨迪, 等. 大气遥感高光谱分辨率激光雷达研究进展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2535–2546.
- 18 Liu Dong, Chris H, Ian M, *et al.*. System analysis of a tilted field-widened Michelson interferometer for high spectral resolution lidar[J]. Optics Express, 2012, 20(2): 1406–1420.
- 19 Cheng Z, 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.
- 20 Seaman S T, Cook A L, Scola S J, *et al.*. Performance characterization of a pressure-tuned wide-angle Michelson interferometric spectral filter for high spectral resolution lidar[C]. SPIE, 2015, 9612: 96120H.
- 21 Liu J, Hua D X, Li Y. Development of a high-spectral-resolution lidar for accurate profiling of the urban aerosol spatial variations[C]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 48(1): 745–749.
- 22 Cheng Z, 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.
- 23 Cheng Zhongtao, Liu Dong, Luo Jing, *et al.*. Influences analysis of the spectral filter transmission on the performance of high-spectral-resolution lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0801003.  
成中涛, 刘 东, 罗 敬, 等. 光谱滤波器透射率参数对高光谱分辨率激光雷达的影响分析[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0801003.
- 24 Born M, Wolf E. Principles of optics (7<sup>th</sup> edition)[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 359–411.
- 25 Huang Hanlu, Liu Dong, Yang Yongying, *et al.*. Design of the high spectral resolution lidar filter based on a filed-widened Michelson interferometer[J]. Chinese J 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波器设计研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0913003.
- 26 Grund C J, Eloranta E W. Fiber-optic scrambler reduces the bandpass range dependence of Fabry-Perot etalons used for spectral analysis of lidar backscatter[J]. Applied Optics, 1991, 30(19): 2668–2670.

- 27 Cheng Z, Liu D, Yang Y. Interferometric filters for spectral discrimination in high-spectral-resolution lidar: Performance comparisons between Fabry-Perot interferometer and field-widened Michelson interferometer[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(32): 7838-7850.
- 28 Althausen D, Oelsner P, Rohmer A, *et al.*. Comparison of high-spectral-resolution lidar with Raman lidar[C]. 26<sup>th</sup> International Laser Radar Conference, 2012: 43-46.

栏目编辑: 史 敏