

# 多纵模高光谱分辨率激光雷达研究

成中涛, 刘 东, 刘 崇, 白 剑, 罗 敬, 唐培钧, 周雨迪,  
张与鹏, 徐沛拓, 汪凯巍, 沈亦兵, 杨甬英

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** 提出了一种新型的采用多纵模激光器作为发射光源的大气气溶胶遥感高光谱分辨率激光雷达(HSRL)技术。该技术将视场展宽迈克耳孙干涉仪(FWMI)作为光谱鉴频器,并在设计 FWMI 时使其周期鉴频特性与多纵模激光器的模式间隔相匹配,因而每个纵模的回波信号可被 FWMI 鉴频器进行效果一致的精细光谱分离。详细阐明了所提出的多纵模 HSRL 的原理和实现方式,定量讨论了制约多纵模 HSRL 中 FWMI 鉴频性能的主要因素。在 1064 nm 波段采用计算机仿真验证了所提技术的性能。多纵模 HSRL 技术可避免目前 HSRL 对单纵模激光器的依赖,既能减小 HSRL 中激光器的成本、体积和重量,又可以大幅提升了 HSRL 激光系统的稳定性,对我国机载和星载 HSRL 的研制具有一定的借鉴意义。

**关键词** 大气光学; 激光雷达; 高光谱分辨率; 多纵模激光器; 大气气溶胶探测

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0401001

## Multi-Longitudinal-Mode High-Spectral-Resolution Lidar

Cheng Zhongtao, Liu Dong, Liu Chong, Bai Jian, Luo Jing, Tang Peijun, Zhou Yudi,  
Zhang Yupeng, Xu Peituo, Wang Kaiwei, Shen Yibing, Yang Yongying

*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering,*

*Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China*

**Abstract** A novel high-spectral-resolution lidar (HSRL) technique for atmospheric aerosol remote sensing, which uses multi-longitudinal-mode laser as the transmitting light source, is proposed. A field-widened Michelson interferometer (FWMI) is used as the spectral discriminator, and the periodic frequency discrimination characteristic in the process of FWMI designing should match with the mode interval of multi-longitudinal-mode laser to ensure consistent fine spectral discrimination for the return signal from each longitudinal mode laser. The principle and the realization way of the proposed multi-longitudinal-mode HSRL are illustrated in detail and the main factors which constrain the frequency discrimination characteristic of the FWMI in multi-longitudinal-mode HSRL are discussed quantitatively. The performance of the proposed technique is verified further at the wavelength of 1064 nm by computer simulation. The multi-longitudinal-mode HSRL technique can avoid the dependence of the current HSRLs on the single multi-longitudinal-mode lasers remarkably. The proposed technique can not only decrease the cost, volume and weight of the laser in HSRL, but also improve its stability notably, which is of great significance for airborne and satellite-borne HSRL development in our country.

**Key words** atmospheric optics; lidar; high spectral resolution; multi-longitudinal-mode laser; atmospheric aerosol detection

**OCIS codes** 010.1290; 010.3640; 120.2440; 280.1100

**收稿日期:** 2016-08-15; **收到修改稿日期:** 2016-11-10

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0200704)、国家自然科学基金(41305014, 61475141)、浙江省公益技术研究项目(2016C33004)、现代光学仪器国家重点实验室创新基金(MOI2015QN01)

**作者简介:** 成中涛(1990—),男,博士研究生,主要从事激光雷达大气遥感方面的研究。E-mail: cheng\_zhongtao@163.com

**导师简介:** 刘 东(1982—),男,博士,副教授,主要从事光电检测与遥感技术方面的研究。E-mail: liudongopt@zju.edu.cn (通信联系人)

## 1 引 言

高光谱分辨率激光雷达(HSRL)是对大气气溶胶进行精确遥感测量的重要工具。通常 HSRL 向被遥感大气发射极窄带光谱的高能量激光脉冲,并采用具有高光谱分辨能力的光谱鉴频器分离大气回波信号中的气溶胶米散射成分和大气分子瑞利散射成分,不需要对大气激光雷达比作假设即可反演出大气气溶胶后向散射系数和消光系数等重要光学参数。为保证大气回波具有较窄的频谱、实现精细的光谱分离,目前的 HSRL 系统均采用单纵模激光。具体来说,在 532 nm 波段采用碘吸收池作为高光谱鉴频器<sup>[1-2]</sup>。由于碘吸收谱线在 532 nm 波段附近的最大带宽为吉赫兹量级,故不允许大气回波谱线具有多个大气气溶胶散射峰。在 355 nm 波段采用法布里-珀罗(FP)标准具作为光谱鉴频器时,完全沿用了碘吸收池的使用方式<sup>[3-4]</sup>。

除了以上两种常见光谱鉴频器外,美国国家航空航天局(NASA)提出的视场展宽迈克耳孙干涉仪(FWMI)鉴频器与 FP 标准具鉴频器相比,视场角更大,口径更小,加工要求更低<sup>[5]</sup>。同时,FWMI 可用于任意 HSRL 波段,有望解决近红外 HSRL 光谱鉴频的局限性<sup>[6]</sup>。目前,FWMI 已用于构建 532 nm 波段的 HSRL 实验系统<sup>[7]</sup>,但其使用方式仍然与传统碘分子吸收鉴频器以及 FP 标准具相同,即采用窄带单纵模激光作为发射光源。

本文提出了一种基于 FWMI 光谱鉴频器的新型 HSRL 系统——多纵模 HSRL。不同于传统 HSRL 系统必须采用单纵模激光的工作条件,多纵模 HSRL 可在采用多纵模激光器作为发射光源的情况下工作。由于 FWMI 光谱鉴频曲线具有周期性,只要 FWMI 鉴频曲线周期与激光器纵模间隔相匹配,即可实现对激光雷达回波的高光谱分辨率鉴频。在这种情况下,利用 FWMI 鉴频器对每个纵模的回波光谱进行统一处理,使多纵模 HSRL 系统与单纵模 HSRL 系统没有本质区别。由于该 HSRL 技术可以采用多纵模激光器,将极大地减轻构建 HSRL 时对激光器的苛刻要求,对 HSRL 激光器的国产化和低成本化具有重要意义。这是因为目前要做到完全的单纵模输出,激光器大多采用种子注入技术,这样的激光系统不仅体积庞大,而且需要对谐振腔腔长和脉冲建立时间等参数进行精确控制,环境适应性较差,这对 HSRL 仪器的机载和星载极为不利。单纵模激光器由于受累积振动、环境温度变化等因素的影响,种子注入特性变差,进而使激光系统不再呈单纵模输出,此时 HSRL 将出现严重的测量误差,甚至无法正常工作。如果能采用多纵模激光器作为 HSRL 发射光源,既能实现激光系统的小型化,也不需要谐振腔实施精密控制,极大地提高了激光器的稳定性和环境适应性,对研制 HSRL 载荷具有很大的促进作用。

本文详细介绍了基于 FWMI 的多纵模 HSRL 原理,并给出了系统实现和数据反演方案。结合误差分析结果,考察了设计多纵模 HSRL 时对鉴频器性能的要求,重点研究了 FWMI 在多纵模工作条件下的性能灵敏度问题,用于指导多纵模 HSRL 的系统构建。最后,采用计算机仿真进一步验证了多纵模 HSRL 的可行性。

## 2 多纵模 HSRL 原理

### 2.1 多纵模 HSRL 回波信号特性

由激光原理可知,多纵模激光器的纵模间隔与激光器腔长有关 $[\Delta\nu=c/(2nL),\Delta\nu$ 为纵模间隔, $n$ 和 $L$ 分别为谐振腔内介质的折射率和腔长, $c$ 为光速],每条纵模带宽与腔镜反射率、腔长以及激光介质特性有关。各条纵模的强度受激光介质增益曲线的调制。将多纵模激光发射到大气中,每条纵模都会受到大气分子的瑞利散射作用和大气气溶胶粒子的米散射作用而出现谱线拓宽现象,因此,多纵模 HSRL 的回波信号将是每一条单纵模展宽谱线叠加的结果。

多纵模中每一条单纵模谱线的回波谱仍可用高斯线型近似,则归一化的多纵模 HSRL 的总回波谱函数可以表示为

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

式中 $q$ 为以选定的中心频率 $\nu_0$ 为参考的纵模序数(规定中心频率对应 $q=0$ ); $\Delta\nu$ 为纵模间隔; $A_q$ 为各条谱线的相对强度(规定 $A_0=1$ ); $i$ 为 $a$ (表示大气气溶胶参数)或 $m$ (表示分子散射参数)。

### 2.2 多纵模 HSRL 回波信号光谱分离的实现

为了实现米散射信号和瑞利散射信号的光谱分离,HSRL 技术需要采用具有高光谱分辨能力的光谱鉴

频器。考虑到多纵模 HSRL 回波谱的分布特点,采用干涉仪作为鉴频器才能与之完全匹配。由于 FP 标准具中鉴频器视场角及口径的限制在多纵模 HSRL 中仍然存在,且带来的频率匹配误差会因多模式的存在而产生叠加,所以将 FP 标准具用于多纵模 HSRL 的技术难度比传统单纵模 HSRL 更大,鉴频效果相对较差。相比之下,在单纵模 HSRL 中展现出巨大优势的 FWMI 鉴频器<sup>[8]</sup>仍然是用来实现多纵模 HSRL 的最佳鉴频器选择。FWMI 的设计和制造在相关文献中已有详细介绍<sup>[7,9-11]</sup>,这里将重点关注其在多纵模 HSRL 中的表现。

作为迈克耳孙干涉仪,FWMI 的滤波特性为余弦函数,可以表示为<sup>[9]</sup>

$$F(\nu - \nu_0) = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[2\pi(\nu - \nu_0)/F_{SR} + \Delta\phi], \quad (2)$$

式中  $\Delta\phi$  为可能的相位偏移,  $I_1$ 、 $I_2$  为双光束干涉光强,  $F_{SR}$  为 FWMI 光谱余弦曲线周期(称之为自由光谱范围)。在理想状态下,  $\Delta\phi = 0$ , 此时 FWMI 在选定的参考频率  $\nu_0$  处的透过率为 0, 即抑制了中心频率为  $\nu_0$  的纵模。如果通过设置使 FWMI 的  $F_{SR}$  与多纵模的模式间隔一致, 此时 FWMI 会对所有纵模的中心频率产生相同的抑制效果, 从而达到与单纵模工作时相同的光谱分离效果。但实际上, 入射光线发散角的存在、FWMI 实际加工缺陷和频率锁定误差等因素均会造成 FWMI 谱线的谐振频率与各纵模中心频率不匹配, 因而附加相位偏移  $\Delta\phi$  一般不为 0, 会造成 FWMI 对多纵模大气气溶胶信号和分子信号的透过率与期望值发生偏差。因此, 首先需要研究多纵模 HSRL 中 FWMI 对回波信号的透过率。

FWMI 对多纵模 HSRL 回波信号的总体透过率计算公式为

$$T_i = \int_{-\infty}^{\infty} S_i(\nu - \nu_0) F(\nu - \nu_0) d\nu / \int_{-\infty}^{\infty} S_i(\nu - \nu_0) d\nu, \quad (3)$$

式中  $i$  为 a 时  $T_a$  表示大气气溶胶信号透过率;  $i$  为 m 时  $T_m$  表示分子信号透过率。将(1)、(2)式代入(3)式即可得到

$$T_i = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \sum_q A_q \exp\left[-\left(\frac{\pi r_i}{F_{SR}}\right)^2\right] \cos\left[\Delta\phi + \frac{2\pi}{F_{SR}} q \Delta\nu\right] / \sum_q A_q. \quad (4)$$

相比于单纵模工作时的透过率表达式, (4)式可以看作是各个纵模信号透过率表达式的和。另外, 额外引入的相移项  $2\pi q \Delta\nu / F_{SR}$  是多纵模 HSRL 与单纵模 HSRL 最本质的差异之一。不难发现, 只有当  $F_{SR} = \Delta\nu$  时相移项对透过率的影响才能忽略不计。

### 2.3 多纵模 HSRL 系统结构、数据反演与误差分析

基于 FWMI 的多纵模 HSRL 系统的通用结构如图 1(a)所示, 为了突出多纵模 HSRL 的概念, 仅显示与 FWMI 有关的高光谱接收通道部分。在通用结构的基础上, 可以根据需要加入其他探测通道(如偏振通道)来探测大气气溶胶更全面的信息。图 1(b)为采用 FWMI 分离多纵模 HSRL 回波信号光谱的实例。可以看到, 多纵模 HSRL 的实质是充分利用 FWMI 鉴频曲线的周期性来设计 FWMI, 使每个纵模的回波中心刚好落在 FWMI 鉴频曲线不同周期的谷底, 则 FWMI 对多纵模回波的光谱分离效果同单纵模工作时完全一致, 可实现回波信号中米散射成分和瑞利散射成分的精细分离。

首先研究图 1(a)所示的 HSRL 结构数据反演问题, FWMI 在该系统中组成两个高光谱探测通道。其中, 透射通道用于抑制大气气溶胶散射信号, 透过分子散射信号, 故称为分子通道; 由于 FWMI 反射通道和透射通道的互补性, 反射通道会透过较多的大气气溶胶散射信号, 故称为大气气溶胶通道。这两个探测通道的激光雷达方程为

$$\begin{cases} B_A = (T_{a-A}\beta_a + T_{m-A}\beta_m) \exp(-2\tau) \\ B_M = (T_{a-M}\beta_a + T_{m-M}\beta_m) \exp(-2\tau) \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $B_A$ 、 $B_M$  分别为大气气溶胶通道和分子通道常数因子、距离和重叠因子校正的回波信号,  $\beta_a$  和  $\beta_m$  分别为气溶胶和大气分子后向散射系数,  $\tau$  为光学厚度,  $T_{a-A}$  为 FWMI 大气气溶胶通道的气溶胶信号透过率,  $T_{m-A}$  为 FWMI 气溶胶通道的大气分子信号透过率,  $T_{a-M}$  为 FWMI 分子通道的大气气溶胶信号透过率,  $T_{m-M}$  为 FWMI 分子通道的大气分子信号透过率。根据能量守恒, 有

$$T_{a-A} + T_{a-M} = T_{m-A} + T_{m-M} = C, \quad (6)$$

式中常数  $C$  为考虑 FWMI 光学元件对能量的吸收效应后的总透过率(即  $C$  与吸收率之和为 1)。可以直接根据(4)式对  $T_{a-M}$  和  $T_{m-M}$  进行评估, 之后根据(6)式对  $T_{a-A}$  和  $T_{m-A}$  进行评估。这 4 个透过率参数代表了

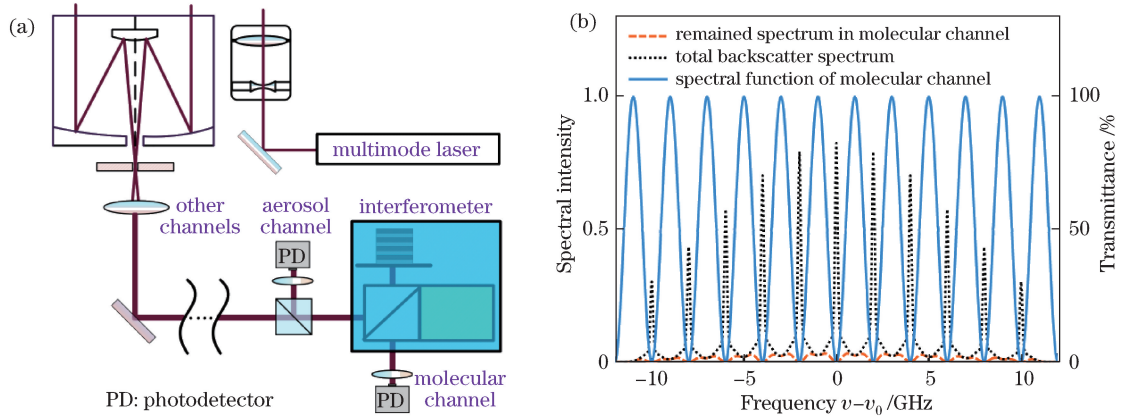


图 1 (a) 多纵模 HSRL 系统通用结构示意图; (b) 采用 FWMI 分离的多纵模 HSRL 光谱分离  
 Fig. 1 (a) General structural schematic for multi-longitudinal-mode HSRL system;  
 (b) spectral discrimination of multi-longitudinal-mode HSRL by FWMI

FWMI 光谱鉴频器的本质特性,对 HSRL 光谱鉴频的要求体现在对这些参数的要求上。根据(5)式可以得到大气总后向散射系数  $\beta$  的反演表达式为

$$\beta = \beta_a + \beta_m = R_a \beta_m = \frac{(T_{m-A} - T_{a-A}) - K(T_{m-M} - T_{a-M})}{KT_{a-M} - T_{a-A}} \beta_m, \quad (7)$$

式中  $R_a = \beta/\beta_m = (\beta_a + \beta_m)/\beta_m$  为大气气溶胶后向散射比<sup>[12]</sup>,  $K = B_A/B_M$  为两探测通道信号比。代入(5)式即可得出光学厚度表达式。

为了指导多纵模 HSRL 的设计,对系统反演误差进行分析。系统常数定标和重叠因子定标等误差均会反映到反演误差中,但这些误差是所有激光雷达所共有的,已在很多文献中做了充分的讨论<sup>[1-2,13-14]</sup>,因此不予考虑。对于 HSRL 系统而言,之所以要采用高光谱分辨率的光谱鉴频器,一方面是可以提供另一路激光雷达反演方程,避免传统米散射激光雷达必需的先验假设;另一方面,HSRL 中更为精细的光谱分离可使反演误差更小。为了说明这一点,考察(7)式中由信号噪声带来的相对误差  $\epsilon$ 。(7)式中只有参数  $K$  与信号噪声有关,因此可以得到

$$\epsilon = \frac{\sigma_\beta}{\beta} = \frac{\partial \beta}{\beta \partial K} \sigma_K = \frac{1}{R_{SN}} \left( 1 + \frac{R_a T_{a-M}}{T_{m-M} - T_{a-M}} \right) \left[ 1 - \frac{T_{m-M} + (R_a - 1) T_{a-M}}{CR_a} \right], \quad (8)$$

式中  $R_{SN}$  为两路通道的等效信噪比,且有  $1/R_{SN}^2 = 1/R_{SN,A}^2 + 1/R_{SN,M}^2$ ,其中  $R_{SN,A}$  和  $R_{SN,M}$  分别为气溶胶通道和分子通道的信噪比。由(6)式可知,表征 FWMI 透过率的 4 个参数中,只有两个是独立的,不妨选定分子通道的参数  $T_{m-M}$  和  $T_{a-M}$  作为自由独立参量来讨论。若定义光谱分离比为

$$R_{SD} = T_{m-M}/T_{a-M}, \quad (9)$$

则信号噪声带来的反演误差可以表示为

$$\epsilon = \frac{1}{R_{SN}} \left( 1 + \frac{R_a}{R_{SD} - 1} \right) \left[ 1 - \left( 1 + \frac{R_{SD} - 1}{R_a} \right) T_{a-M}/C \right]. \quad (10)$$

关于(10)式的讨论如下。

1)  $\epsilon$  是关于  $R_{SD}$  的单调递减函数。这意味着在多纵模 HSRL 系统中,光谱分离比越大,系统的反演精度就越高。事实上,该结论对所有的 HSRL 系统都是成立的,从理论上验证了精细光谱分离有助于提升 HSRL 的探测精度。

2) 理想情况下  $T_{a-M} = 0$ ,即大气气溶胶信号在分子通道中被完全抑制。这意味着  $R_{SD}$  为无穷大,此时反演误差反比于信噪比,则  $1/R_{SN}$  是系统反演精度的上限。

3)  $R_{SD}$  的增大带来的另一个好处是比例项  $R_a/(R_{SD} - 1)$  减小,这种情况下反演误差对大气气溶胶负载的依赖性会变小,可以解释一些光谱分离不够精细的 HSRL 系统在反演清洁大气廓线时精度较高而当大气污染比较严重时反演精度快速恶化的情况。

4) 虽然  $R_{SD}$  增大时误差项会变小,但是当  $R_{SD}$  增大到一定程度时, $\epsilon$  降低得很慢。通过考察  $R_a/(R_{SD} - 1)$

随  $R_{SD}$  的变化趋势可以发现这个事实。一般而言,当  $R_{SD} > 5R_a$  时,即可视作理想结果。但实际上除了碘吸收池外,其他干涉光谱鉴频器很难获得如此高的  $R_{SD}$ 。

多纵模 HSRL 是在单纵模 HSRL 的基础上,根据 FWMI 周期性鉴频特性所做的重要推广。FWMI 鉴频器是整个系统得以正常工作的保证。如果 FWMI 能保持完全理想的鉴频特性,则 FWMI 处理的回波信号与单纵模 HSRL 信号没有本质区别,然而实际情况并非如此。干涉仪自身的频率锁定、干涉仪自由光谱范围与激光器纵模间隔的匹配以及干涉仪本身的加工缺陷等因素均会导致多纵模 HSRL 系统光谱分离特性的恶化,对这些因素进行评估是验证与设计多纵模 HSRL 的关键所在。

### 3 多纵模 HSRL 光谱鉴频器性能分析

#### 3.1 激光器多纵模模式间隔选取

如(4)式和图 1(b)所示,多纵模 HSRL 系统原理要求光谱鉴频器的自由光谱范围与激光器纵模间隔相等,否则多纵模的存在会引入附加相移,从而造成鉴频器光谱鉴频能力的退化。但为了完成精细光谱分离,鉴频器的自由光谱范围并不能任意选取,而是要与大气回波信号谱宽相对应。因此,用于构建多纵模 HSRL 的激光器的纵模间隔也需要与大气回波谱宽相匹配,不能任意选取。以 1064 nm 近红外波段的多纵模 HSRL 设计为例来阐明该问题。根据美国标准大气,在 10 km 范围内,大气分子瑞利展宽谱线的半峰全宽约为 1.4 GHz。原则上,用于多纵模 HSRL 的激光器的每条纵模谱线越窄越好,但实际情况中谱线宽度不仅与激光谐振腔的腔内损耗有关,对于脉冲激光而言,谱线宽度还与傅里叶变换极限相关。对于脉冲宽度为 10 ns 的激光,其谱线宽度的傅里叶变换极限约为 100 MHz。考虑到腔内损耗对谱线的展宽作用,在计算中采用 200 MHz 作为每条纵模的谱线宽度。激光器纵模的数量理论上不受限制,但实际应用中纵模数量越多,激光波段分布范围就越大,往往会超过系统通光波段的范围,因此要按照 HSRL 设计的最小波长带宽来确定激光器纵模数量的上限。根据(4)式计算采用不同纵模间隔的激光器时 FWMI 光谱鉴频器的透过特性参数,结果如图 2 所示,可以发现 FWMI 光谱鉴频器对分子信号的透过率和光谱分离比随激光器纵模间隔的变化呈现相反的趋势。一方面,多纵模 HSRL 系统需要有较大的光谱分离比,以提高系统的反演精度;另一方面,系统要有较大的分子信号透过率,以保证回波信号的信噪比。从图 2 可以看到,随着激光纵模模式间隔的加大,光谱分离比变化越来越缓慢,所以采用过大的模式间隔虽然会使光谱分离比缓慢增大,但会造成分子信号透过率的严重下降。权衡之后选取激光纵模模式间隔为 2 GHz,此时光谱分离比约为 29,分子信号透过率约为 35%(FWMI 对分子信号的极限透过率为 50%),均处在较高的水平。35% 的分子信号透过率和碘 1109 线在 532 nm 波段对大气分子信号的透过率相近。在近红外波段,由于大气气溶胶信号谱线宽度与分子信号谱线宽度差别不大,所以无法得到很高的光谱分离比,这也是目前国际上采用法布里-珀罗干涉仪(FPI)无法完成近红外 HSRL 研制的原因之一<sup>[6]</sup>。采用 FWMI 得到的光谱分离比为 29,超过了 FPI 在紫外波段单纵模 HSRL 得到的最高光谱分离比,FPI 用于近红外 HSRL 时得到的光谱分离比更低。因此,FWMI 可能是未来近红外 HSRL 系统研制的最佳光谱鉴频器之一。对于其他波段的多纵模 HSRL 激光器,模式间隔的选取均可按此方式来确定。

#### 3.2 多纵模 HSRL 频率匹配问题

频率匹配是多纵模 HSRL 设计的关键,主要包括 FWMI 自由光谱范围同纵模间隔的匹配以及 FWMI 自身频率锁定。FWMI 频率锁定是指将 FWMI 透过率函数的谐振频率锁定到选定的激光中心参考频率  $\nu_0$ 。由(4)式可见,当 FWMI 的自由光谱范围与激光器纵模间隔不一致时,各纵模在 FWMI 透过率表达式中以附加相位的方式体现,不同纵模序数带来的附加相位也不同。因此,从本质上看,相对于单纵模 HSRL 而言,多纵模 HSRL 中每条纵模的存在都会使 FWMI 产生相应的相位偏差,对透过率的影响和 FWMI 自身缺陷带来的附加相位是相似的。同单纵模 HSRL 类似,多纵模 HSRL 工作时也必须保持 FWMI 良好的谐振频率锁定,一般可以通过多谐波外差技术来实现<sup>[15]</sup>。当 FWMI 频率失锁定时,每条纵模处的气溶胶散射信号都没有得到最高程度的抑制,导致 HSRL 光谱分离性能降低。下面定量讨论这两个频率匹配因素对多纵模 HSRL 光谱分离特性的影响。

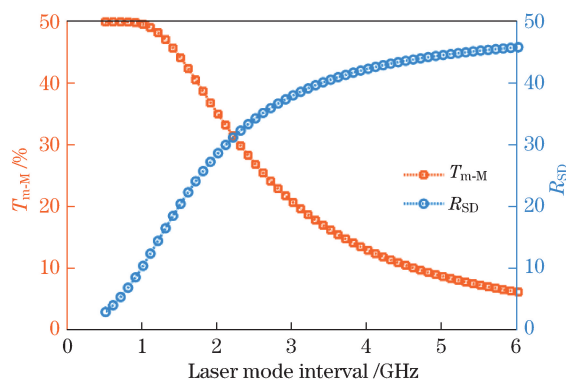


图 2 FWMI 光谱透过特征参数与多纵模激光器模式间隔的关系

Fig. 2 Relationship between characteristic parameters of spectral transmission of FWMI and mode interval of multi-longitudinal-mode laser

图 3 考察了多纵模 HSRL 系统中自由光谱范围匹配误差和 FWMI 频率锁定误差对鉴频器特征参数的影响。从图 3(c)可以发现,只有当自由光谱范围完全匹配且不存在锁定误差时,系统的光谱分离比才能达到最高。这与直观判断是一致的,进而给出多纵模 HSRL 的理论依据,并验证了该理论的正确性。从图 3 也能得到多纵模 HSRL 中频率匹配的容限要求。由图 3(a)可见,自由光谱范围失匹配和 FWMI 频率失锁定会导致 FWMI 对大气气溶胶信号抑制能力的急剧下降,这是导致光谱分离能力下降的主要原因。例如,当存在 0.1 GHz 的自由光谱范围失匹配和 0.1 GHz 的 FWMI 频率失锁定时,FWMI 大气气溶胶透过率由理想的 1% 上升到 20%,而分子信号透过率变化相对较小,由理想的 35% 上升到 42%,最终造成的结果是光谱分离比从理想的 29 降低至 2,FWMI 几乎没有光谱分离能力。由图 3 可知,对于实际的多纵模 HSRL,需要将 FWMI 的自由光谱范围和纵模间隔匹配误差保持在 0.01 GHz 以内,并且将 FWMI 频率锁定误差保持在 0.03 GHz 以内,以保证光谱分离比不低于 21。事实上,FWMI 的自由光谱范围对各种缺陷(如入射光发散角、玻璃面型加工误差和温度漂移等)并不敏感,可以较高精度设计为任何需要的值。这是因为 FWMI 的自由光谱范围等于光速除以其光程差,这些实际缺陷对光程差的影响都在纳米量级范围内,相对于光速而言非常小,所以优化设计的 FWMI 的自由光谱范围十分稳定。例如,要保证自由光谱范围匹配误差小于 0.01 GHz,只需 FWMI 的实际光程差与理论设计值偏差不大于 1 mm 即可,易实现。而 FWMI 的锁频误差通过多谐波外差技术已经实验证明了近 10 MHz 的锁定精度<sup>[15]</sup>。

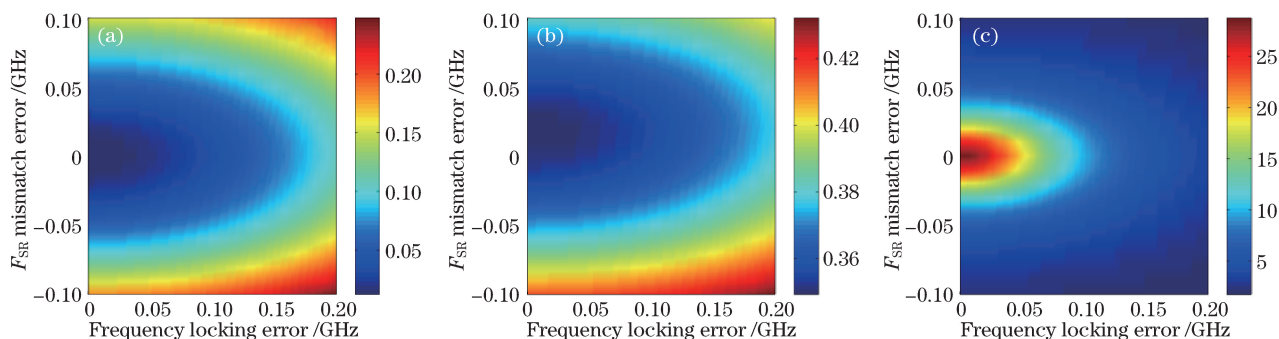


图 3 FWMI 的光谱分离特征参数随频率锁定误差及自由光谱范围匹配误差的变化。(a) 大气气溶胶信号透过率  $T_{a-M}$ ; (b) 分子信号透过率  $T_{m-M}$ ; (c) 光谱分离比  $R_{SD}$

Fig. 3 Variations in characteristic parameters of spectral discrimination of FWMI with frequency locking error and  $F_{SR}$  mismatch error. (a) Atmospheric aerosol signal transmittance  $T_{a-M}$ ; (b) molecular signal transmittance  $T_{m-M}$ ; (c) spectral discrimination ratio  $R_{SD}$

### 3.3 回波信号发散角

对于干涉光谱鉴频器而言,回波信号发散角是必须考虑的因素,因为干涉型光谱鉴频器的光程差与入射角有关。FWMI 具有特殊的视场补偿设计,因而能将光谱鉴频性能对视场角的敏感性降到最低。要考察入

射光发散角对 FWMI 鉴频特性的影响,只需要考察入射光线中不同入射角引入的附加相移并通过(4)式计算 FWMI 透过率参数。FWMI 对具有一定发散角的光束的整体透过率即为对不同入射角光线透过率的平均。以文献[6]给出的近红外 FWMI 参数为例,考察多纵模 HSRL 中 FWMI 鉴频器光谱分离比随入射光发散角的变化,结果如图 4 所示。可以明显看到,当入射光发散角为  $0^{\circ}\sim 2^{\circ}$ (半角)时,FWMI 鉴频特性几乎没有任何改变。HSRL 信号回波发散角一般不会超过  $0.5^{\circ}$ ,因此采用 FWMI 作为多纵模 HSRL 鉴频器时,发散角问题几乎可以忽略,这样的特性一方面保证 FWMI 性能不受 HSRL 系统视场角的限制,另一方面也能保证 FWMI 的体积较小。这是因为光学系统的视场孔径是一个常数,代表的是该光学系统最大的集光能力。FWMI 的视场角较大,说明 FWMI 可以采用较小的入射孔径收集光能。传统的 FP 标准具光谱鉴频器的视场角很小,一般要靠增大标准具口径来补偿其视场角接收能力的不足。

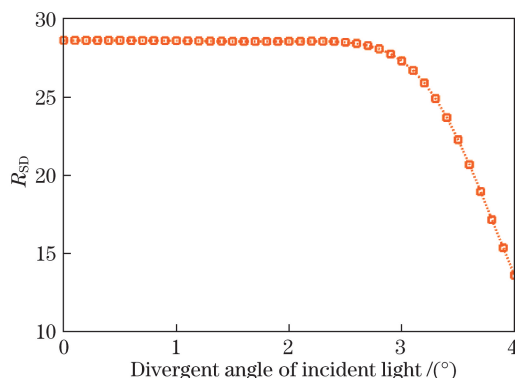


图 4 入射光发散角对 FWMI 光谱分离比的影响

Fig. 4 Effect of the divergent angle of incident light on the spectral discrimination ratio of FWMI

### 3.4 FWMI 波前精度

波前精度是干涉型光谱鉴频器最重要的技术指标之一。实际加工缺陷(如玻璃元件面型不平整、玻璃材料折射率不均匀等)会使通过 FWMI 的波前发生扭曲,无法达到理想的干涉相消条件,致使光谱鉴频特性下降。这种总体波前的扭曲称为累积波前误差,也会在(4)式中引入附加相移。图 5 为 FWMI 鉴频器光谱分离比随累积波前误差均方根(RMS)的变化情况。为了考察波前误差形状对 FWMI 光谱鉴频特性的影响,分析倾斜波前误差、离焦波前误差和自定义随机波前误差 3 种不同情况。可以看到,FWMI 的光谱鉴频特性与累积波前误差 RMS 有关,与其形状没有关系。当累积波前误差 RMS 达到  $0.2\lambda$  时,光谱分离比几乎已经降至 1,表明此时 FWMI 不再有光谱分离能力。如果依靠精密的光学加工将 FWMI 累积波前误差 RMS 控制在  $0.02\lambda$  以下,则光谱分离比大于 22。目前的商用玻璃研磨和抛光技术可以制造面型精度 RMS 优于  $\lambda/100$  的大口径光学元件,而 FWMI 需要的口径一般很小[1 inch(2.54 cm)即可],更容易实现精密波前控制。

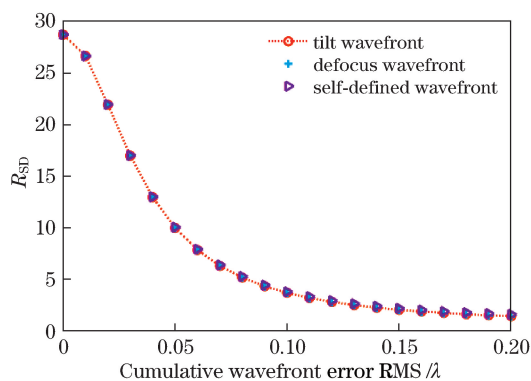


图 5 累积波前误差 RMS 对 FWMI 光谱分离比的影响

Fig. 5 Effect of the cumulative wavefront error RMS on  $R_{SD}$  of FWMI

本小节分析了影响 FWMI 在多纵模 HSRL 系统中鉴频性能的几个重要因素。结果表明,在设计多纵模 HSRL 时,多纵模激光器模式间隔需要根据工作激光波长而定。对于 1064 nm 波段,推荐激光纵模间隔设计为 2 GHz。与此同时,FWMI 的自由光谱范围与纵模间隔匹配误差要小于 0.01 GHz,FWMI 频率锁定误差小于 0.03 GHz,FWMI 累积波前误差 RMS 小于  $0.02\lambda$ 。在目前的技术条件下,这些要求易于满足,因此基于 FWMI 的多纵模 HSRL 是可行的。

## 4 系统仿真

### 4.1 仿真模型

以 1064 nm 近红外多纵模 HSRL 为例,进行计算机仿真以进一步验证所提技术的性能。为了更加合理地模拟大气状况,使用 1976 年美国标准大气模型来模拟大气分子散射。对于大气气溶胶散射,在 1.2 km 以下模拟了行星边界层(PBL)大气气溶胶参数,在海拔 3~5 km 处模拟了沙尘存在的情况,在海拔 8~10 km 处模拟了卷云。作为模拟输入的参数如图 6 所示。

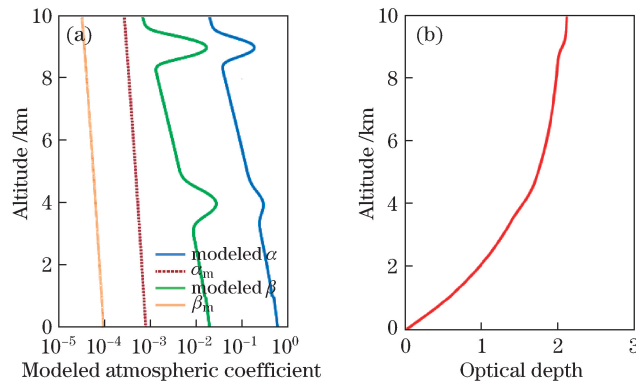


图 6 用于仿真的模型大气参数。(a) 后向散射系数  $\beta$  和消光系数  $\alpha$ ; (b) 光学厚度

Fig. 6 Modeled atmospheric parameters for simulation. (a) Backscatter coefficient  $\beta$  and extinction coefficient  $\alpha$ ; (b) optical depth

仿真所用的多纵模 HSRL 系统参数如表 1 所示,所用的近红外 FWMI 设计参数参见文献[6]。结合激光雷达方程和模型大气参数可以得到经距离校正的 HSRL 回波信号曲线,如图 7 所示。图 7 中加入了随机噪声来模拟实际 HSRL 系统回波信号被太阳背景噪声污染的情况。假设噪声符合泊松分布(散粒噪声),即噪声方差与信号均方根相等,则每个通道的信噪比可以表示为

$$R_{SN,j} = \sqrt{m} S_j / \sqrt{S_j + N_b}, \quad (11)$$

式中  $j$  为 HSRL 的两个通道,  $j=1, 2$ ;  $S_j$  为每个通道的信号光子数;  $N_b$  为背景噪声引起的光子数;  $m$  为回波信号叠加数。(11)式忽略了光电探测器本身的暗电流噪声,因为该噪声相对于背景噪声而言很小。太阳背景噪声的近似计算公式为<sup>[16]</sup>

$$N_b = \frac{I_b}{h\nu} \frac{\pi\Omega^2}{4} A \eta_o \eta_{QE} \Delta\lambda \Delta t_s, \quad (12)$$

式中  $I_b=0.168 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \text{nm})$  为太阳背景光在 1064 nm 波段处的典型辐射能密度,  $h\nu$  为单光子能量,  $\Delta\lambda$  为前置滤波器带宽,  $\Omega$  为望远镜视场角,  $A$  为望远镜接收面积,  $\eta_o$  为系统的整体光学效率,  $\eta_{QE}$  为光电倍增管的量子效率,  $\Delta t_s$  为单点信号采集时间。

由图 7 不难发现,在分子通道中仍然存在显著的大气气溶胶散射特性。一方面,近红外波段的大气气溶胶米散射谱宽与大气分子瑞利散射谱宽差异进一步缩小,分子信号通过 FWMI 时有部分大气气溶胶信号随之通过;另一方面,近红外波段的瑞利散射强度较可见光波段弱一个数量级,而大气气溶胶散射强度变化相对较小,因而近红外波段的大气散射比很高,大气气溶胶负载很重。由于这两个原因,在近红外波段要实现与可见光波段同等程度的光谱分离性能是非常困难的。从第 3 节分析可知,在多纵



模 HSRL 中,FWMI 有望实现大于 20 的光谱分离比,相对于目前基于 FPI 鉴频器的单纵模 HSRL 来说,这是比较理想的大气气溶胶抑制程度。

表 1 仿真所用的多纵模 HSRL 系统参数

Table 1 Multi-longitudinal-mode HSRL system parameters for the simulation

Parameter	Value
Laser wavelength /nm	1064
Single pulse energy /mJ	270
Laser mode number	11
Laser mode interval /GHz	2
Laser mode linewidth /MHz	200
Telescope diameter /mm	280
Telescope field of view /mrad	0.1
Bandpass width of pre-filter /nm	1
Total optical efficiency (except FWMI)	0.4
Quantum efficiency of photon detector	0.2
Range resolution /m	100

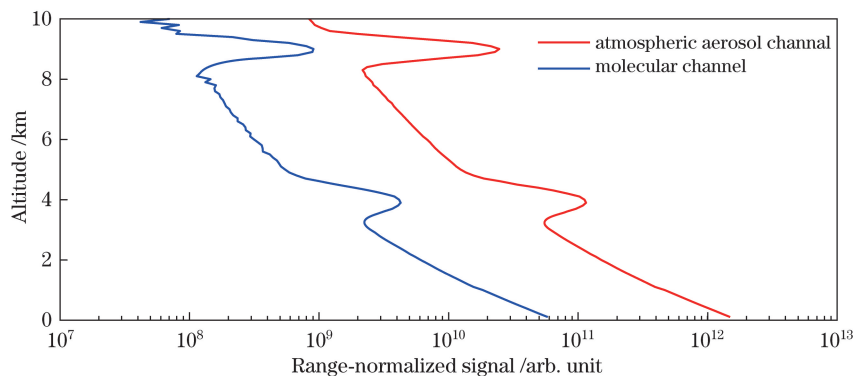


图 7 多纵模 HSRL 距离校正的回波信号

Fig. 7 Range-corrected return signal for multi-longitudinal-mode HSRL

#### 4.2 反演结果与分析

图 8 所示为反演得到的大气散射系数  $\beta$  和光学厚度  $\tau$  及其相对误差。从图 8(a)、(b) 可以看到,大气气溶胶光学属性的轮廓得到了很好的恢复;从图 8(c) 可以看到,在海拔 8 km 以下,后向散射系数的反演误差小于 30%,光学厚度的误差在 10% 之内,达到了令人满意的精度。需要强调的是,由于高空信噪比相对较低,反演得到的光学厚度出现了一定的波动,不再随高度单调上升。但是这些波动都是在真值附近的微小抖动,在精度允许范围内。光学厚度单调上升,从侧面证明了反演结果的正确性。在海拔 8 km 以上,后向散射能量非常弱,信噪比也很低,导致这两个参数的测量误差加大。如果在晚上进行测量,由于不存在太阳光背景噪声,测量精度主要受到光电探测器噪声的限制,测量误差远小于白天的测量误差。为了突出 FWMI 在多纵模 HSRL 系统中的光谱分离表现,反演仿真中认为系统常数和重叠因子是准确已知的。在实际系统中,这两方面的定标误差会对最终反演结果造成一定的影响,它们对多纵模 HSRL 和现有单纵模 HSRL 的影响是相似的,已有很多文献对此做了较为系统的分析<sup>[1-2,13-14]</sup>,在此不予考虑。

本节在 1064 nm 波段对基于 FWMI 的多纵模 HSRL 进行了仿真,以进一步研究并验证采用 FWMI 构建多纵模 HSRL 的可行性。对近红外波段的理论分析为近红外 HSRL 的研制打下良好的技术基础,指明了 FWMI 在构建近红外 HSRL 时的优势。FWMI 可以构建多纵模 HSRL,且波段越窄,光谱分离特性就越好。

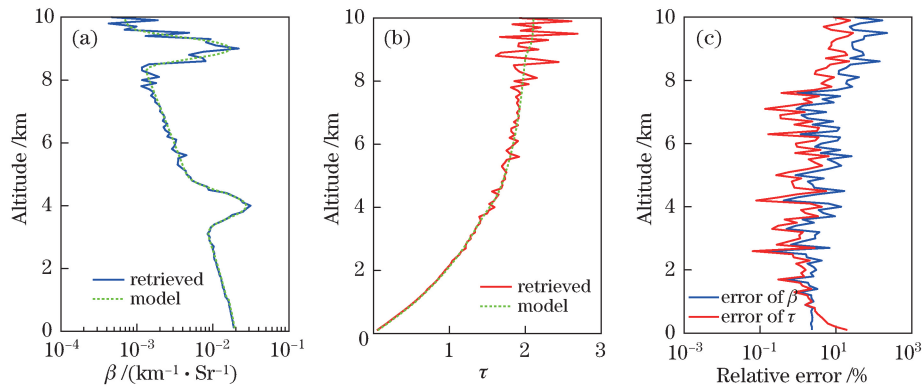


图 8 (a)反演的后向散射系数;(b)反演的光学厚度;(c)相对误差

Fig. 8 (a) Retrieved backscatter coefficient; (b) retrieved optical depth; (c) relative error

## 5 结 论

目前的 HSRL 均使用单纵模激光器作为发射光源,导致 HSRL 技术受激光器成本、体积和稳定度等因素的制约。基于课题组研制的 FWMI 光谱鉴频器技术,提出了多纵模 HSRL 系统的概念。通过使 FWMI 鉴频器的周期鉴频特性与多纵模回波信号相匹配,FWMI 能在多纵模 HSRL 中实现良好的光谱分离。详细阐明了多纵模 HSRL 系统的原理和实现方式,并给出了大气气溶胶的光学参数反演方程。讨论了制约多纵模 HSRL 中 FWMI 鉴频性能的主要因素,对激光器纵模间隔的选取、FWMI 自由光谱范围匹配、FWMI 频率锁定误差、入射光发散角和 FWMI 波前误差等参数进行了定量分析,结果表明通过现有技术实现多纵模 HSRL 是可行的。最后采用计算机仿真验证了在 1064 nm 波段基于 FWMI 的多纵模 HSRL 的性能。所提出的多纵模 HSRL 概念是对 HSRL 技术的重要改进,是 FWMI 光谱鉴频器应用的重要推广。该技术的发展将有望减轻 HSRL 对单纵模激光器的依赖,节省激光器的成本,并会在一定规模上减小激光器的体积和重量,极大地提高激光器的稳定性和环境适应性,对我国机载和星载 HSRL 的研制具有非常好的技术导向作用。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Esselborn M, Wirth M, Fix A, *et al.* Airborne high spectral resolution lidar for measuring aerosol extinction and backscatter coefficients[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(3): 346-358.
- [3] Hoffman D S, Repasky K S, Reagan J A, *et al.* Development of a high spectral resolution lidar based on confocal Fabry-Perot spectral filters[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6233-6244.
- [4] Shipley S T, Tracy D H, 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.
- [5] 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.
- [6] Zhang Yupeng, Liu Dong, Yang Yongying, *et al.* Spectrum filter performance analysis on near-infrared high-spectral-resolution lidar[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(4): 0414004.  
张与鹏, 刘 东, 杨雨英, 等. 近红外高光谱分辨率激光雷达光谱滤光器性能分析[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0414004.
- [7] Cheng Z T, Liu D, Zhang Y P, *et al.* Field-widened Michelson interferometer for spectral discrimination in high-spectral-resolution lidar: Practical development[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7232-7245.
- [8] Cheng Z T, Liu D, Yang Y Y, *et al.* 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.
- [9] 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.

- [10] Huang Hanlu, Liu Dong, Yang Yongying, *et al.* Design of the high spectral resolution lidar filter based on a field-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光器设计研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0913003.
- [11] Cheng Zhongtao, Liu Dong, Luo Jing, *et al.* Tolerance evaluation for anti-reflection coatings in field-widened Michelson spectroscopic filter[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0813002.  
成中涛, 刘 东, 罗 敬, 等. 视场展宽迈克尔孙光谱滤光器增透膜容差评估[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0813002.
- [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] Tao Zongming, Wu Decheng, Liu Dong, *et al.* Estimation of aerosol backscatter coefficient error in lidar data processing[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1214001.  
陶宗明, 吴德成, 刘 东, 等. 激光雷达反演气溶胶后向散射系数误差估算[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1214001.
- [14] Wang Wei, Mao Feiyue, Gong Wei, *et al.* Overlap factor calculation method based on laser intensity distribution and its sensitivity analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0228005.  
王 威, 毛飞跃, 龚 威, 等. 基于激光强度分布的激光雷达重叠因子计算及其敏感性分析[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0228005.
- [15] Cheng Z T, Liu D, Zhou Y D, *et al.* Frequency locking of a field-widened Michelson interferometer based on optimal multi-harmonics heterodyning[J]. Optics Letters, 2016, 41(17): 3916-3919.
- [16] Liu Jintao, Chen Weibiao, Song Xiaoquan. Theory of iodine filter based on high spectral resolution lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1548-1553.  
刘金涛, 陈卫标, 宋小全. 基于碘分子滤波器的高光谱分辨率激光雷达原理[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1548-1553.