

# 光谱滤光器透射率参数对高光谱分辨率 激光雷达的影响分析

成中涛 刘 东 罗 敬 杨甬英 王治飞 周雨迪 黄寒璐 沈亦兵

(浙江大学光电系现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 研究了高光谱分辨率激光雷达(HSRL)中光谱滤光器透射率参数对其反演大气气溶胶光学属性精度的影响。建立了一种基于普通三通道 HSRL 配置的、与光谱透射率参数有关的反演误差理论分析模型,并通过蒙特卡罗(MC)算法仿真验证了该误差分析理论模型的正确性。理论模型及 MC 仿真结果表明,滤光器的分子信号透射率和谱分离比(SDR)越大,HSRL 系统反演精度越高,并且 SDR 主导低海拔区域的反演精度,而分子信号透射率对高海拔区域的反演影响更明显。此结论适用于大多数具有类似的多信号通道结构的 HSRL,对 HSRL 滤光器的选型和设计具有一定的指导意义。

**关键词** 大气光学;激光雷达;高光谱分辨率;光谱滤光器;反演精度;性能优化

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0801003

## Influences Analysis of the Spectral Filter Transmission on the Performance of High-Spectral-Resolution Lidar

Cheng Zhongtao Liu Dong Luo Jing Yang Yongying Wang Zhifei  
Zhou Yudi Huang Hanlu Shen Yibing

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Influences of transmission parameters of the spectral filter on the retrieval accuracy for atmospheric aerosol optical properties in high-spectral-resolution lidar (HSRL) are studied. The theoretical analysis model for retrieval error estimation related to the spectral transmission parameters is established based on a general three-channel HSRL configuration and the correctness of this error analytical model is validated by Monte Carlo (MC) simulations. The model and the MC simulation results indicate that the larger the molecular transmittance and the spectral discrimination ratio (SDR) of the filter are, the larger the HSRL accuracy is. Moreover, SDR dominates the retrieval accuracy at low altitudes while the molecular transmittance attaches more influences to the retrieval accuracy at high altitudes. These results are expected to be adaptable to many HSRLs which have the similar multi-channel layout thus can provide certain guidelines to the choosing or designing of the filter.

**Key words** atmospheric optics; lidar; high spectral resolution; spectral filter; retrieval accuracy; performance optimization

**OCIS codes** 010.1290; 010.3640; 010.1350; 010.1110; 280.1100

**收稿日期**: 2014-03-17; **收到修改稿日期**: 2014-04-29

**基金项目**: 国家自然科学基金(41305014)、浙江省教育厅科研项目(Y201329660)、浙江省“仪器科学与技术”重中之重学科开放基金(JL130113)、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(MOI201208)、教育部博士点基金(20130101120133)、遥感科学国家重点实验室开放基金(OFSLRSS201412)

**作者简介**: 成中涛(1990—),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: cheng\_zhongtao@163.com

**导师简介**: 刘 东(1982—),男,博士,副教授,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)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

# 1 引言

大气气溶胶通过对太阳辐射的散射和吸收,在影响地球气候和辐射平衡中起着重要的作用<sup>[1-3]</sup>。对气溶胶参数(如散射系数、光学厚度等)的测量成为大气物理学、气象学等学科广泛关注的问题。激光雷达作为大气遥感的重要工具,因其探测距离远,分辨率高,一次可探测多种气溶胶参数等优点受到了极大关注<sup>[4-5]</sup>。特别是高光谱分辨率激光雷达(HSRL),由于其使用了窄带光学滤光器,能分离大气后向散射信号中大气分子和气溶胶散射的成分,无需对被测大气的关键参数进行假设即可实现高精度遥感探测<sup>[6]</sup>。

在用于气溶胶测量的 HSRL 系统中,高光谱分辨率的光学滤光器是一个关键器件,它的选型和参数设计直接关系到系统反演精度。目前,碘分子吸收滤光器<sup>[7-9]</sup>和法布里-珀罗干涉仪(FPI)滤光器<sup>[10-11]</sup>均在 HSRL 中得到了广泛的应用。对于不同的滤光器类型,最终考虑的参数都会归结为对大气分子散射信号和对气溶胶散射信号的透射率,即光谱滤光器透射率参数。目前,对于如何选取和设计这些透射率参数才有助于提高 HSRL 反演气溶胶参数的精度报道较少。尤其是,在实际设计中需要权衡系统参数选择的问题(如分子透射率和气溶胶透射率并不能随意取值,而是受特定滤光器特征参数的统一约束),若没有较好的理论指导作为权衡准则,会使设计出来的滤光器透射率参数不合理,进而极大地降低 HSRL 的测量可靠性。本文从一种抽象化了的普通三通道 HSRL 配置的反演误差模型出发,通过将 HSRL 系统反演精度与气溶胶状态、信噪比和光谱滤光器透射率等参数分离开研究,系统地考察了滤光器透射率参数对 HSRL 反演精度的影响。并在分析过程中,重点研究光谱滤光器透射率参数相关的误差源,故意忽略了其他无关的误差干扰。采用蒙特卡罗(MC)方法仿真验证了误差评估理论模型和结论的正确性。由于在 MC 仿真时既可以在一定程度上考虑实际情况中可能遇到的噪声问题,又可以剔除与本文论点无关的误差源,这样得出的与光谱透射率参数相关的结论将是合理可信的。从这个意义上来看,普通的实测数据是很难达到这种验证目的的(因为实际实验中不知道待测参数的真值以及存在各种误差源的混叠,故几乎不可能单独分析和光谱透射率参数相关的误差)。本文提出的模型及仿真结果对 HSRL 滤光器的选型和设计具有一定的指导意义,并对大多数具有类

似的多通道结构配置的 HSRL 同样适用。

## 2 误差评估理论模型

### 2.1 三信号通道 HSRL 反演大气光学属性原理

根据文献[12]描述的 HSRL 系统对大气光学属性的反演原理,HSRL 系统布局如图 1 所示。接收器接收到的散射信号被偏振分光棱镜(PBS)和普通分光棱镜(BS)分成三束并分别被三个光电倍增管(PMT)接收。可见这是一个具有一般意义的三信号通道配置(即混合正交通道、混合平行通道和分子通道)。其中,分子通道使用光谱滤光器抑制气溶胶散射信号,而透过部分分子散射谱。从三个信号通道获取的信号可以由如下三个雷达方程描述为

$$\begin{cases} B_C^\perp = (\beta_m^\perp + \beta_a^\perp) \exp(-2\tau), \\ B_C^\parallel = (\beta_m^\parallel + \beta_a^\parallel) \exp(-2\tau), \\ B_M = (T_m \beta_m^\parallel + T_a \beta_a^\parallel) \exp(-2\tau), \end{cases} \quad (1)$$

式中  $B_C^\perp$ ,  $B_C^\parallel$  和  $B_M$  分别是混合正交通道、混合平行通道和分子通道获得的衰减散射信号(经距离和系统常数校正后的回波信号);  $\beta_a$  和  $\beta_m$  分别是气溶胶和大气分子的后向散射系数,上标“ $\perp$ ”和“ $\parallel$ ”分别表示它们的正交偏振和平行偏振成分。 $\tau$  是大气光学厚度,  $T_m$  和  $T_a$  分别是光谱滤光器对分子散射信号和气溶胶散射信号的透射率。

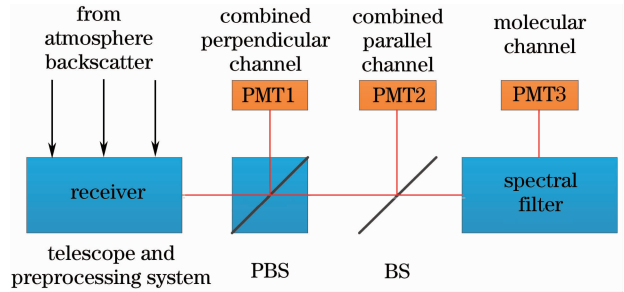


图 1 普通三信号通道 HSRL 系统布局

Fig. 1 Systematic layout of a general three-channel HSRL

根据三个信号通道获取的信号,可以得到大气后向散射系数的反演表达式

$$\beta = \beta_m \frac{(1 + \delta)}{(1 + \delta_m)} \frac{(T_m - T_a)K}{1 - T_a K}, \quad (2)$$

式中  $\delta_m$  是大气分子退偏比,它可以通过大气模型比较精确的评估得到; $\delta$  是大气总退偏比(包括大气分子和气溶胶的贡献)。在该偏振 HSRL 中, $\delta$  可以直接通过混合垂直通道的信号  $B_C^\perp$  和混合平行通道的信号  $B_C^\parallel$  的比值得到

$$\delta = B_C^\perp / B_C^\parallel, \quad (3)$$

式中  $K$  的定义同  $\delta$  相似,即

$$K = B_C^{\parallel} / B_M^{\parallel}, \quad (4)$$

式中  $B_M^{\parallel}$  是分子通道的后向散射信号。大气光学厚度  $\tau$  的反演式为

$$\tau = -\frac{1}{2} \ln \left[ \frac{(1 - KT_a)(1 + \delta_m) B_M^{\parallel}}{(T_m - T_a) \beta_m} \right]. \quad (5)$$

在大气参数中,最感兴趣的是后向散射系数  $\beta$  和光学厚度  $\tau$ ,其他的参数都能通过这两个参数反演得到,所以主要讨论了 HSRL 中光谱滤光器透射率参数对这两个量反演精度的影响。从(1)~(5)式可以看出,可引起反演误差的量主要有四个:  $\delta$ ,  $K$ ,  $T_a$  和  $T_m$ 。其中  $\delta$  和  $K$  的测量误差主要是由探测信号的噪声引起,而  $T_a$  和  $T_m$  的误差则取决于透射率定标精度。重点讨论了与滤光器透射率参数有关的误差源,而忽略掉诸如几何重叠因子、HSRL 系统常数的标定误差等,这是因为无论选取怎样的光谱透射率参数,这些误差始终是存在的,而且与光谱透射率参数取值的关系不大,故没有必要将它们包含在讨论中。为了考察这些量对  $\beta$  和  $\tau$  反演精度的影响,推导出了  $\beta$  和  $\tau$  反演误差的表达式。

## 2.2 后向散射系数反演误差评估

由误差传播理论<sup>[13]</sup>,  $\beta$  的相对误差可以通过(6)式评估

$$\begin{aligned} \epsilon_i^2 = & \left( \frac{\sigma_{\beta}}{\beta} \right)^2 \left( \frac{\partial \beta}{\partial \delta} \right)^2 (\sigma_{\delta})^2 + \left( \frac{\partial \beta}{\partial K} \right)^2 (\sigma_K)^2 + \\ & \left( \frac{\partial \beta}{\partial T_a} \right)^2 (\sigma_{T_a})^2 + \left( \frac{\partial \beta}{\partial T_m} \right)^2 (\sigma_{T_m})^2, \quad (6) \end{aligned}$$

式中  $\epsilon_i$  表示后向散射系数的相对误差,  $\sigma$  表示对应量的统计误差(统计标准差)。(6)式中,第一项为来自  $\delta$  的测量误差,它由混合垂直通道和混合平行通道信号的测量误差引起,通过微分运算可以表示为

$$\epsilon_1^2 = \frac{\bar{\delta}^2}{(1 + \bar{\delta})^2} \left( \frac{1}{R_{SN,C\parallel}^2} + \frac{1}{R_{SN,C\perp}^2} \right), \quad (7)$$

式中  $\bar{\delta}$  表示  $\delta$  的统计平均值,  $R_{SN,C\parallel}$  是混合平行通道的信噪比,即  $B_C^{\parallel} / \sigma_{B_C^{\parallel}}$ ,  $R_{SN,C\perp}^2$  表示混合垂直通道的信噪比。(6)式中第二项为来自  $K$  的测量误差,可以表示为

$$\epsilon_2^2 = \frac{1}{(1 + \bar{T}_a K)^2} \left( \frac{1}{R_{SN,C\parallel}^2} + \frac{1}{R_{SN,M\parallel}^2} \right), \quad (8)$$

式中  $\bar{K}$  表示  $K$  的统计平均值,  $R_{SN,M\parallel}$  表示分子通道的信噪比。在(7)、(8)式推导过程中假设来自不同测量通道的信号的统计不确定性是不相关的。

在非偏振激光雷达中,常常采用  $(\beta_a + \beta_m) / \beta_m$  来表征气溶胶含量分布,即通常所谓的气溶胶散射比<sup>[14-15]</sup>;这里,为了更好地描述偏振 HSRL 系统,

引入平行气溶胶散射比的定义

$$R^{\parallel} = (\beta_a^{\parallel} + \beta_m^{\parallel}) / \beta_m^{\parallel}, \quad (9)$$

由文献[12]中给出的  $\beta_a^{\parallel}$  的反演公式代入(9)式可以得到

$$R^{\parallel} = \frac{(T_m - T_a)K}{1 - T_a K}, \quad (10)$$

将(10)式代入(7)式和(8)式,可以得到

$$\epsilon_1^2 = \left[ \frac{(R^{\parallel} - 1)\delta_a + \delta_m}{R^{\parallel} + (R^{\parallel} - 1)\delta_a + \delta_m} \right]^2 \frac{1}{R_{SN,C\parallel C\perp}^2}, \quad (11)$$

$$\epsilon_2^2 = \left( 1 + \frac{R^{\parallel}}{T_m/T_a - 1} \right)^2 \frac{1}{R_{SN,C\parallel C\perp}^2}, \quad (12)$$

式中  $R_{SN,C\parallel C\perp}$  表示混合平行通道和混合正交通道的等效信噪比且可以表示为  $1/R_{SN,C\parallel C\perp}^2 = 1/R_{SN,C\parallel}^2 + 1/R_{SN,C\perp}^2$ ; 同样,  $R_{SN,C\parallel M\parallel}^2$  是混合平行通道和分子通道的等效信噪比且可以表示为  $1/R_{SN,C\parallel M\parallel}^2 = 1/R_{SN,C\parallel}^2 + 1/R_{SN,M\parallel}^2$ ;  $\delta_a$  是气溶胶退偏比。由(11)式可知该 HSRL 的精度还与所测量的大气分子和气溶胶粒子的退偏特性有关。这是偏振型 HSRL 所特有的性质。

对于(6)式中第三项和第四项,根据文献[12]可知其可表示为

$$\epsilon_3^2 = \left( \frac{R^{\parallel} - 1}{T_m - T_a} \right)^2 (\sigma_{T_a})^2, \quad (13)$$

$$\epsilon_4^2 = \frac{1}{(T_m - T_a)^2} (\sigma_{T_m})^2. \quad (14)$$

由于  $R^{\parallel}$  和  $\delta_a$  本质上与所测量的气溶胶组成成分、物理属性等因数有关,故可以看到:通过引入平行气溶胶散射比后,(11)~(14)式将反演精度对气溶胶状态、信噪比和光谱滤光器透射率参数的依赖性分离开来,从而极大地方便了讨论。

## 2.3 光学厚度反演误差评估

对于光学厚度反演误差的评估,可以通过类似于后向散射系数反演误差评估方法获得。与后向散射系数不同的是,这里将主要评估光学厚度反演的绝对误差。因为对于光学厚度而言,是无法从统计意义上估计其反演相对误差的,对于某高度点的光学厚度其依赖于该高度以下各点的大气状况,因而需要通过具体测试得出。根据(5)式求  $\tau$  对  $K$ ,  $B_M^{\parallel}$ ,  $T_a$  和  $T_m$  的偏微分并结合误差传播理论可以得到  $\tau$  的绝对误差为

$$\begin{aligned} (\sigma_{\tau})^2 = & \frac{1}{4} \left[ \left( 1 + \frac{R^{\parallel}}{T_m/T_a - 1} \right)^2 \frac{1}{R_{SN,M\parallel}^2} + \right. \\ & \left. \left( \frac{R^{\parallel}}{T_m/T_a - 1} \right)^2 \frac{1}{R_{SN,C\parallel}^2} + \epsilon_3^2 + \epsilon_4^2 \right]. \quad (15) \end{aligned}$$

比较(15)式和(11)~(14)式,可以发现决定后向散

射系数和光学厚度反演精度的因素几乎完全相同。需要指出的是,文献[12]中,指出光学厚度的反演绝对误差是后向散射系数反演相对误差的一半。该结论是建立在忽略了信号观测噪声的前提得到的。根据(15)式知,若认为信噪比为无穷大,可同样得到上述结论,但实际测量过程中,信噪比为有限值,因而(15)式对于光学厚度反演误差评估具有更普遍意义。

### 3 光谱滤光器透射率参数对反演精度的影响

根据(11)~(15)式,讨论了光谱滤光器透射率参数对后向散射系数和光学厚度反演精度的影响。由(11)式可知, $\epsilon_1$  仅仅与被测大气状况、混合正交通道和混合平行通道的信噪比有关,而与光谱滤光器的透射率参数无关,而且它只是偏振型 HSRL 所特有的误差项,因而可以忽略。由(12)式可以看到,光谱滤光器对分子信号透射率和气溶胶信号透射率的比对反演精度具有很大的影响,这里将其定义为谱分离比(SDR),其可表示为

$$R_{SD} = T_m/T_a. \quad (16)$$

根据(12)式可以看出, $R_{SD}$  越大, $\epsilon_2$  越小。对于  $R_{SD}$  对反演精度的影响可以从以下两方面考虑:1) 如果  $R_{SD}$  远大于  $R^{\parallel}$ , 则  $\epsilon_2$  仅仅反比于信噪比,而与  $R^{\parallel}$  有关的项则可以被忽略;2) 若  $R_{SD}$  相比于  $R^{\parallel}$  很小,则在  $\epsilon_2$  中与  $R^{\parallel}$  有关的项数值很大,从而导致反演误差很大。作为一个极限情况,若  $R_{SD}$  为 1 时, $\epsilon_2$  将无穷大。对于  $R_{SD}$  为 1,其表示光谱滤光器等量的透过气溶胶信号和分子信号,即光谱滤光器并没有光谱分离的能力。这时,由(1)式知分子通道和混合平行通道的雷达方程是等效的,即分子通道并没有提供关于大气散射谱的更多信息。故而不能可靠地反演出需要的大气参数了。相反,当  $R_{SD}$  值越大,分子通道所带来的有关大气后向散射的信息就越多,由此反演出来的大气参数就越准确。

另一方面,根据误差评估模型知,信噪比越高,反演误差越小。对于任何一个信号通道的信噪比,其由很多因素同时决定:如激光发射器的能量、探测器本身的特性、HSRL 整体的光学效率、大气衰减情况、背景辐射强度等。另外需要指出的是,从(1)式可以看到,分子信号通道的信噪比将还与光谱滤光器的透射率参数有关, $T_m$  和  $T_a$  越大,分子通道的信噪比也越大。这是因为,对于激光雷达的噪声特性常常可以近似借助泊松分布来表征,即信号标准

差等于信号均方根(RMS)。 $T_m$  和  $T_a$  越大,分子通道接收到的信号也就会越强,信噪比也就会越高。从这个意义上来看,设计光谱滤光器时,应该尽量获得比较大的  $T_m$  和  $T_a$ 。但这一要求似乎与获得一个比较大的  $R_{SD}$  相矛盾。对于一个给定的  $T_m$ ,倘若增大  $R_{SD}$ ,会产生两个相反的效果:1)  $\epsilon_2$  会因为  $R_{SD}$  的增大而有增大的趋势;2)  $R_{SD}$  的增大会导致  $T_a$  的减小,从而信噪比和  $\epsilon_2$  减小。事实上,若将  $T_m$  和  $R_{SD}$  看做两个独立变量,求  $\epsilon_2$  对于它们的偏导数可以发现这两个偏导数均是小于 0 的。这表明, $\epsilon_2$  是  $T_m$  和  $R_{SD}$  的单调减函数。故  $T_m$  和  $R_{SD}$  越大,越有利于反演精度的提高。

需要指出的是,即使  $R_{SD}$  为无穷大, $\epsilon_2$  也并不能减少为 0。这时它将趋近于  $1/R_{SN,C\parallel M\parallel}$ 。也就是说,信噪比决定了  $\epsilon_2$  的下限。从这个意义上来看,取得一个比较大的  $T_m$  相对于取得大的  $R_{SD}$  具有更重要的意义,因为过大的  $R_{SD}$  对 HSRL 精度的改善并不明显。

尽管这些结论仅仅是对  $\epsilon_2$  的分析得出,但它们同样适用于  $\epsilon_3$  和  $\epsilon_4$ 。事实上,对于抑制气溶胶散射信号的光谱滤光器而言,当  $R_{SD}$  较大时, $T_a$  很小以至于  $T_m - T_a \approx T_m$ 。由(13)~(14)式可知,大的  $T_m$  和  $R_{SD}$  同样能减小  $\epsilon_3$  和  $\epsilon_4$ 。综上可知后,向散射系数和光学厚度反演误差的提高均需要在设计光谱滤光器时保证比较大的分子信号透射率和较大的谱分离比。

## 4 蒙特卡罗仿真验证

根据前向仿真模型和雷达方程,随机生成 100 次受噪声污染的雷达回波信号。对每一次回波信号做一次后向散射系数和光学厚度的反演,并将反演值和前向模型真实值作对比,记录反演误差。100 次反演完成后,统计反演误差均方根作为该 HSRL 的精度评估。然后把采用 MC 仿真得到的系统精度和采用第 2 节提出的误差评估理论模型直接计算得到的系统精度做对比来达到相互验证的目的。可见,除了信号噪声是计算机按理论随机分布仿真加入的外,MC 仿真的整个过程和实际实验是很接近的;但是它却比实测数据更能满足本文验证的理论需要,因为在 MC 仿真中可以剔除与论题无关的其他误差源的干扰。

### 4.1 前向仿真模型

将最大仿真高度设置在 0.1~6 km,此高度设置一方面使本次仿真可以忽略重叠因子的影响,另一方面也考虑到了普通地基激光雷达回波信号可测

量范围。大气分子后向散射系数和消光系数可以采用文献[16]中给出的拟合公式并结合美国标准大气模型生成。为了让仿真更加符合实际,首先按文献[17]给出的经验公式生成平滑气溶胶背景,然后在海拔3~5 km之间加入黄沙气溶胶参数,在海拔

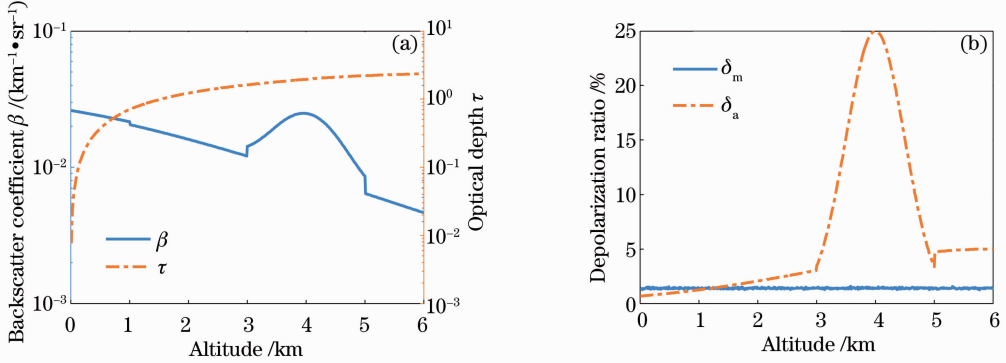


图2 用于仿真的模型输入。(a)后向散射和光学厚度;(b)退偏比

Fig. 2 Modeled inputs for this simulation. (a) Backscatter coefficient and optical depth; (b) depolarization ratio

在仿真中,假设太阳背景光在532 nm辐射能密度为 $0.14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。然后加入随机噪声模拟实际HSRL系统回波信号被背景光和探测器噪声污染的情况。这里,假设噪声符合泊松分布,即信号方差同信号平均值相等。仿真所采用的HSRL系统参数如表1所示。

表1 仿真所用的HSRL系统参数

Table 1 HSRL system specifications employed by simulation

Specification	Value
Laser wavelength / nm	532
Laser energy / mJ	300
Laser linewidth (FWHM) / MHz	100
Telescope diameter / mm	280
Telescope field of view / mrad	0.1
Bandpass width of pre-filter / nm	0.1
Total optical efficiency (except filter)	0.4
Quantum efficiency of PMTs	0.2
Range resolution / m	100

## 4.2 仿真结果

实验过程中进行4次MC仿真来验证理论模型及其得到的结论。其中第一次仿真用来验证所提出的理论模型的正确性。仿真中所使用的分子信号透射率为0.45,  $R_{SD}$ 为100。此外,由于分子信号透射率和气溶胶信号透射率实际都是通过定标得到的,而定标过程往往存在一定的误差。且此定标误差是与信号透射率有关的,故必须将其加入到MC仿真模型中去。仿真过程中,对于分子信号透射率定标相对误差假设为1%,而气溶胶信号透射率定标相

1.2 km以下模拟行星边界层(PBL)气溶胶。这些类型的气溶胶后向散射系数、消光系数以及退偏比等参数在文献[18]中已给出;对于大气分子的退偏比,采用固定值1.4%。用于仿真的模型输入参数如图2所示。

对误差为5%。这两个具体值的选取对结论的有效性不会有本质的影响。在每次生成仿真信号时,让滤光器透射率参数在所给的真值附近按给定的误差限随机变动。重复仿真100次,每次的反演结果如图3所示(红色点)。在图3中,同时给出了由理论模型预测出的 $3-\sigma$ 误差范围(蓝线)以及模型输入的真值(绿线)。由图3可见,理论预测和MC仿真的结果吻合得非常好。在海拔5 km以上,理论预测对误差下限存在轻微的过估计。这是因为在理论模型中,仅仅使用了一阶近似。由于在海拔5 km以上 $R_{SN}$ 非常小,这时高阶项的影响将会开始出现。故MC仿真给出的误差上下限不再具有对称性,但理论误差上下限始终是对称的。尽管如此,所提出的理论模型和MC仿真在5~6 km的偏差对大多数实际应用都是可以接受的。

图4(a)给出了本次MC仿真中统计误差均方根和理论模型计算出的误差值,同时图4(b)给出了气溶胶负载指数 $R^{\parallel}$ 作为参考。显然,理论误差和MC仿真误差吻合较好。从图4可以看到,大气参数反演误差并不是随海拔上升而单调递增的,而是在0.1~2 km附近有下降的趋势。这可以用理论模型进行解释。在该海拔区域,信号 $R_{SN}$ 足够高,这时主导反演误差的将是 $\epsilon_3$ 和 $\epsilon_4$ 。而从(13)式可知, $\epsilon_3$ 是 $R^{\parallel}$ 的线性函数。所以在该海拔区域反演误差将与 $R^{\parallel}$ 具有相同的趋势[见图4(b)]。而在海拔2 km以上,信号 $R_{SN}$ 下降较快,这时 $\epsilon_3$ 和 $\epsilon_4$ 的主导作用下降,反演误差很大程度来自 $\epsilon_1$ 和 $\epsilon_2$ 。由于本次仿



真所使用的  $R_{SD}$  为 100, 远大于  $R^{\parallel}$  的最大值, 故  $\epsilon_2$  中与  $R^{\parallel}$  有关项的贡献也并不明显。这样, 反演误差将

主要由  $R_{SN}$  决定, 而几乎与气溶胶状态无关。此即在海拔约 2 km 以上反演误差单调上升的原因。

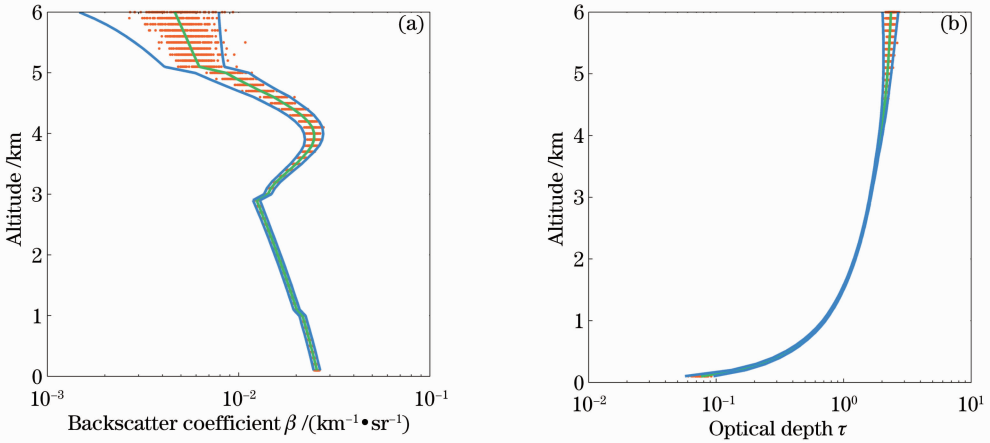


图 3 100 次仿真的结果(红色点)以及使用理论模型预测的  $3-\sigma$  误差限(蓝线)和仿真模型输入的真值(绿线)。(a)后向散射系数;(b)光学厚度

Fig. 3 Results for 100 simulations (red dot) as well as the  $3-\sigma$  error limit from the theoretical model (blue line) and the inputted true values from the simulation model (green line). (a) Backscatter coefficient; (b) optical depth

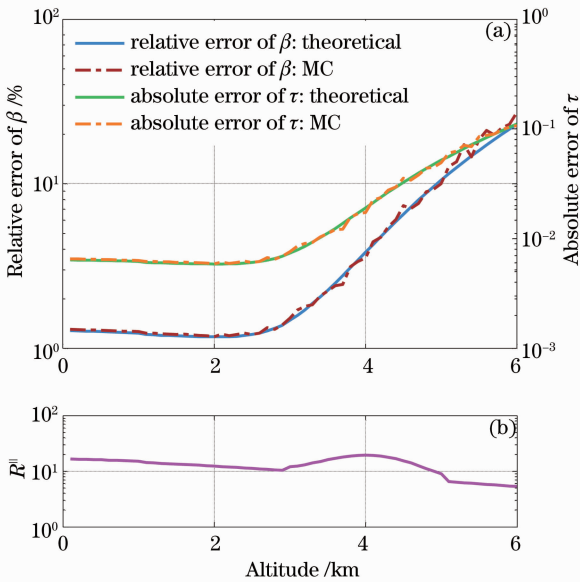


图 4 (a) MC 统计误差均方根和理论模型计算出的误差值和(b)理论模型计算出的气溶胶负载指数  $R^{\parallel}$   
 Fig. 4 (a) Statistical error RMS from the MC simulation and the calculated error; (b) aerosol loading index  $R^{\parallel}$  based on the theoretical model

第二次 MC 仿真用来研究  $R_{SD}$  对反演误差的影响。仿真中采用固定的分子信号透射率为 0.4, 而选取了三个不同的  $R_{SD}$  值。仿真结果如图 5 所示。从图 5 可见, 理论分析与 MC 仿真一致表明,  $R_{SD}$  越大越有助于反演精度的提高。但另一方面,  $R_{SD}$  的提高对高海拔处(如 5 km 以上)的精度提升作用并不

显著。这是因为在这些海拔处信号  $R_{SN}$  太小所致, 即使提高  $R_{SD}$  反演精度也不会有太大的变化。需要指出的是  $R_{SD}$  为 50 和 100 的曲线相隔很近, 这表明过大的  $R_{SD}$  也是没有必要的, 另外,  $R_{SD}$  为 10 的曲线可知  $R_{SD}$  为 10 时反演误差对  $R^{\parallel}$  的依赖性很大。由此可知增大  $R_{SD}$  有助于减小反演精度对大气状态的依赖性, 从而使 HSRL 具有更普遍的适用范围。

第三次 MC 仿真用来考察分子透射率对反演精度的影响。仿真中采用了固定的  $R_{SD}$  和三个不同的分子透射率, 所得结果如图 6 所示。从图 6 明显可以看到, 反演误差随着分子透射率的增大而减小, 且该减小的效果在高海拔处更明显。这是由于, 在低海拔处回波信号本身就很强, 即使增大分子透射率,  $R_{SN}$  的改善也不太显著。图 5 和图 6 更进一步地揭示了分子透射率和  $R_{SD}$  对反演精度的影响: 大的  $R_{SD}$  主要有助于低海拔处反演精度的提高, 而大的分子透射率则可以更显著地改善高海拔处的反演精度。图 6 中, 在海拔 5 km 以上理论模型不能完全预测 MC 仿真结果, 这是因为所采用的分子信号透射率很小, 导致  $R_{SN}$  很低所致。尽管如此, MC 仿真和理论预测的趋势是一致的, 并不影响理论模型的适用性。

最后一次 MC 仿真用于考察  $R_{SD}$  和分子透射率对反演精度的主导性。本次仿真中采用了三个不同的分子透射率和三个不同的  $R_{SD}$  的 9 种组合情况, 仿真结果如图 7 所示。根据图 7 可以看出  $R_{SD}$  和分

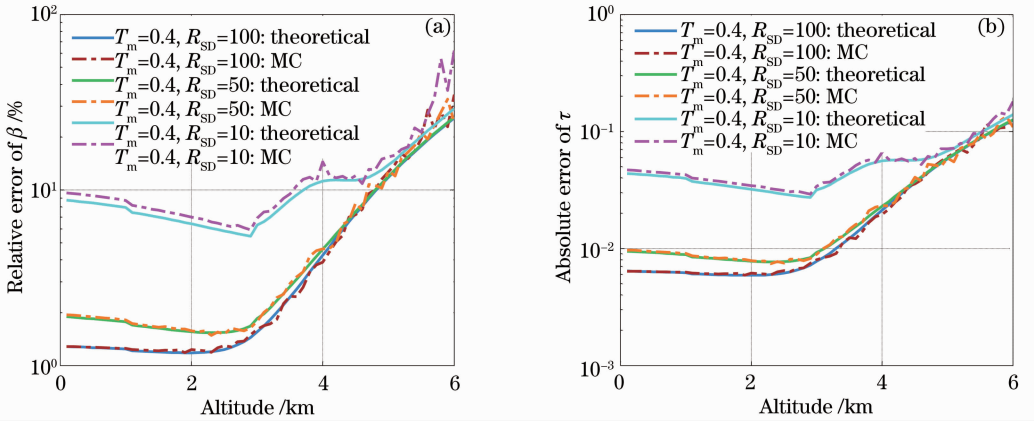


图 5  $R_{SD}$ 对反演精度的影响。(a)后向散射系数相对误差；(b)光学厚度绝对误差

Fig. 5 Influences on the retrieval accuracy from  $R_{SD}$ . (a) Relative error of the backscatter coefficient; (b) absolute error of the optical depth

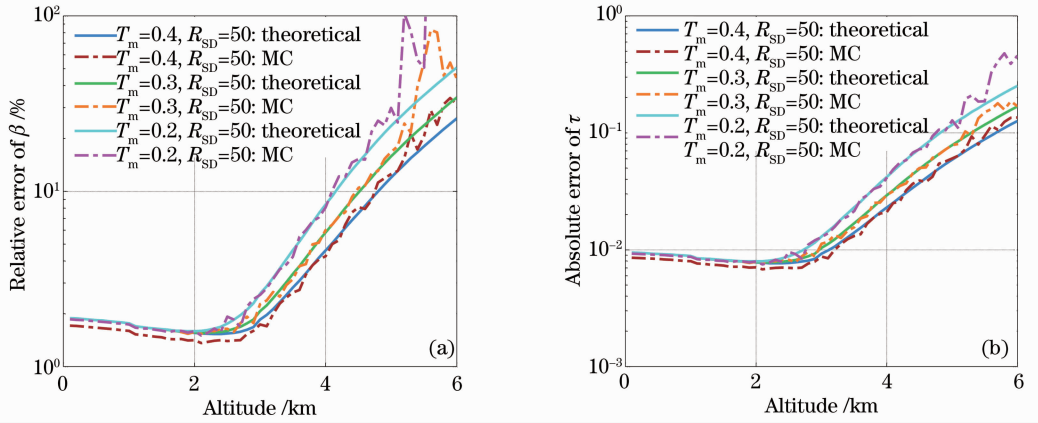


图 6 分子透射率对反演精度的影响。(a)后向散射系数相对误差；(b)光学厚度绝对误差

Fig. 6 Influences on the retrieval accuracy from the molecular transmittance. (a) Relative error of the backscatter coefficient; (b) absolute error of the optical depth

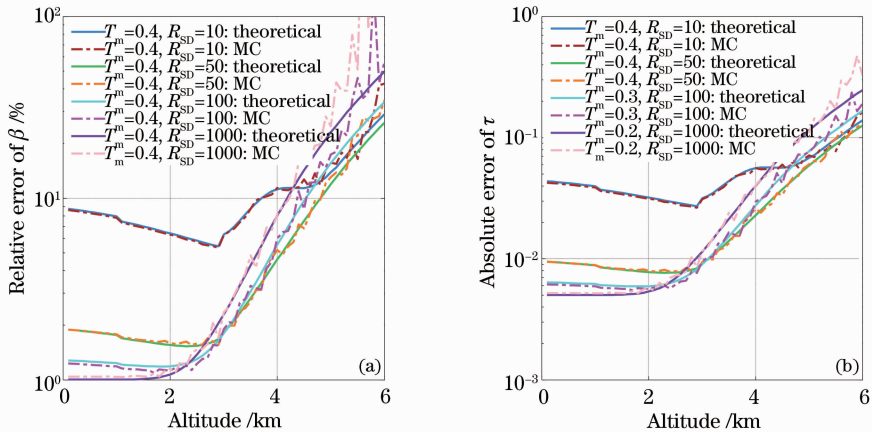


图 7 几种不同的分子透射率和  $R_{SD}$ 情况下的反演误差。(a)后向散射系数相对误差；(b)光学厚度绝对误差

Fig. 7 Retrieval errors in different cases of molecular transmittances and  $R_{SD}$ . (a) Relative error of the backscatter coefficient; (b) absolute error of the optical depth

子透射率显著作用的范围是不同的,这与图 5 和图 6 的结论是一致的。对于中间海拔区域,分子透射

率为 0.4 和  $R_{SD} = 50$  时的反演精度高于取分子透射率为 0.2 和  $R_{SD} = 100$  时的反演精度,而分子透射率

为 0.4 和  $R_{SD} = 10$  时却具有最大反演误差。这说明,在这些区域很难有统一的结论来判别  $R_{SD}$  和分子透射率哪个对反演的影响更大。但事实上,  $R_{SD} = 10$  是仿真中的一种极端情况。而在实际中,  $R_{SD}$  为 10 的情况是很少出现的,这是由于小的  $R_{SD}$  是不利于 HSRL 工作性能提高的。因此,从图 7 可知,在中间海拔区域同样也是分子透射率主导了反演精度:只要  $R_{SD}$  不至于太小(建议  $R_{SD}$  是  $R_{\parallel}$  的 5~10 倍),则分子透射率越大,反演精度越高。

## 5 讨 论

对于以上所得结论是从具体的三通道 HSRL 配置所得出来的,但是它们仍然适用于很多具有类似结构的 HSRL。从数学上来看,许多 HSRL 的反演过程都可以看做是解如(1)式所示的雷达方程组(尽管方程的个数会因为通道数的不同而变化)。例如文献[9,19]中介绍的基于碘分子吸收滤光器的机载 HSRL 即可归结为这种情况。对于此类型的 HSRL,由于碘分子池对气溶胶具有极强的过滤能力以至于气溶胶透射率很低,这时的  $R_{SD}$  将会很大。所以这类 HSRL 具有较好的工作精度,尤其是对低层大气的反演。文献[11]中介绍的基于 FPI 的 HSRL 利用了 FPI 透射通道和反射通道的信号,构成了两路雷达方程。由于 FPI 两通道具有互补的滤波特性,这时  $R_{SD}$  的定义应为对有用信号透射率(透过信号)和对滤除信号透射率的比。按照以上所得结论可知,对 FPI 滤光器的每一路信号通道,加大有用信号的透射率和相应的  $R_{SD}$  可以提高系统精度。但实际情况是, FPI 的两路通道不可能同时获得很高的  $R_{SD}$ 。这时,一种合适的方法是尽可能让其中一路通道的  $R_{SD}$  较大。此方法类同于文献[11]的设计(其给出的数据显示,该 HSRL 气溶胶通道的  $R_{SD}$  为 130 左右,而分子通道的  $R_{SD}$  很小)。另外,大的  $R_{SD}$  意味着更多的大气散射谱信息,而大的有用信号透射率意味着更大的  $R_{SN}$ ,故而有助于提高反演精度。

另外在实际情况中,分子信号的透射率和  $R_{SD}$  不可能同时增加,其中一个量变大会导致另一个量变小。可见在实际应用中需要在分子信号透射率和  $R_{SD}$  之间做出一定的权衡。图 7 已经表明,在大部分区域,只要  $R_{SD}$  不至于太小,分子透过滤决定了反演精度的高低。而图 5 也表明,过大的  $R_{SD}$  对反演精度的提高作用并不明显。因而在实际设计中首先保证具有较好的分子透射率,然后再追求较大的  $R_{SD}$ 。

一种更数学化的权衡策略是定义一个评价函数  $T_{\parallel}^p \cdot R_{SD}$ ,滤光器设计时通过优化选取滤光器的特征参数(如自由光谱范围)最大化该评价函数。权重因子  $p$  依赖于 HSRL 的目标应用。例如,若测量大气主要位于低海拔,则大的  $R_{SD}$  是有益的,这时可以取稍小的  $p$ ,如  $p=2$ ;若目标应用主要在较高的大气,如观测卷云,则大的分子透射率是很重要的,这时应该使用较大的权重因子,如  $p=4$ 。尽管该评价函数缺乏严格的数学依据,但可以为绝大部分应用提供较为合理的滤光器参数设计。

## 6 结 论

主要讨论了 HSRL 系统中光谱滤光器透射率参数对反演大气精度的影响。基于误差传播理论,建立了三通道 HSRL 反演精度的理论模型,并采用 MC 仿真验证了理论模型及其分析结论的正确性。理论和 MC 分析一致表明:分子信号透射率和谱分离比  $R_{SD}$  越大,系统反演精度越高。进一步分析表明:提高  $R_{SD}$  可以显著改善低海拔区域的反演精度,且能部分消除反演精度对大气状态的依赖性,使 HSRL 具有更广的适用范围;但过高的  $R_{SD}$  对提高 HSRL 性能也是没有必要的。分子信号透射率的提高可以显著增加大部分海拔范围的反演精度,尤其是信噪比极低的区域。以上结论表明,在 HSRL 光谱滤光器选型或者设计时,应该首先保证比较大的分子信号透射率,然后再追求较大的  $R_{SD}$ 。此结论对大部分具有类似的多通道结构的 HSRL 系统都是适用的,因而对大气气溶胶探测的 HSRL 滤光器的设计具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin, *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1014002.  
伯广宇, 刘东, 王邦新, 等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1014002.
- 2 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.
- 3 Liu Dong, Tao Zongming, Wu Decheng, *et al.*. Development of three-wavelength-Raman-polarization lidar system and case study [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0228001.  
刘东, 陶宗明, 吴德成, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228001.
- 4 W Gong, J Zhang, F Mao, *et al.*. Measurements for profiles of aerosol extinction coefficient, backscatter coefficient, and lidar ratio over Wuhan in China with Raman/Mie lidar [J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(6): 533-536.



- 5 Hua Dengxin, Song Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S): 21–27.  
华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 21–27.
- 6 C Y She, R J Alvarez II, L M Caldwell, *et al.*. High-spectral-resolution Rayleigh-Mie lidar measurement of aerosol and atmospheric profiles [J]. Opt Lett, 1992, 17(7): 541–543.
- 7 Z Liu, I Matsui, N Sugimoto. High-spectral-resolution lidar using an iodine absorption filter for atmospheric measurements [J]. Opt Eng, 1999, 38(10): 1661–1670.
- 8 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.
- 9 J W Hair, C A Hostetler, A L Cook, *et al.*. Airborne high spectral resolution lidar for profiling aerosol optical properties [J]. Appl Opt, 2008, 47(36): 6734–6752.
- 10 S T Shipley, D H Tracy, E W Eloranta, *et al.*. High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols. 1: theory and instrumentation [J]. Appl Opt, 1983, 22(23): 3716–3724.
- 11 D S Hoffman, K S Repasky, J A Reagan, *et al.*. Development of a high spectral resolution lidar based on confocal Fabry-Perot spectral filters [J]. Appl Opt, 2012, 51(25): 6233–6244.
- 12 D Liu, Y Yang, Z Cheng, *et al.*. Retrieval and analysis of a polarized high-spectral-resolution lidar for profiling aerosol optical properties [J]. Opt Express, 2013, 21(11): 13084–13093.
- 13 P B Russell, T J Swissler, M P McCormick. Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements [J]. Appl Opt, 1979, 18(22): 3783–3797.
- 14 D Bruneau, J Pelon. 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]. Appl Opt, 2003, 42(6): 1101–1114.
- 15 J Zhu, Y Chen, Z Yan, *et al.*. Relationship between the aerosol scattering ratio and temperature of atmosphere and the sensitivity of a Doppler wind lidar with iodine filter [J]. Chin Opt Lett, 2008, 6(6): 449–453.
- 16 A Bucholtz. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere [J]. Appl Opt, 1995, 34(15): 2765–2773.
- 17 J D Spinhirne. Micro pulse lidar [J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 48–55.
- 18 Z Liu, P Voelger, N Sugimoto. Simulations of the observation of clouds and aerosols with the experimental lidar in space equipment system [J]. Appl Opt, 2000, 39(18): 3120–3137.
- 19 M Esselborn, M Wirth, A Fix, *et al.*. Airborne high spectral resolution lidar for measuring aerosol extinction and backscatter coefficients [J]. Appl Opt, 2008, 47(3): 346–358.
- 20 Z Cheng, D Liu, Y Yang, *et al.*. Interferometric filters for spectral discrimination in high spectral resolution lidar: performance comparisons between Fabry-Perot interferometer and field-widened Michelson interferometer [J]. Appl Opt, 2013, 52(32): 7838–7850.

栏目编辑：王晓球