

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2020.01.005

大气海洋高光谱分辨率激光雷达鉴频特性研究

刘东¹, 周雨迪¹, 朱小磊², 陈扬¹, 徐沛拓¹, 刘崇¹, 王南朝¹, 沈雪¹

(1 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;

2 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 统一分析大气海洋高光谱分辨率激光雷达 (HSRL) 的鉴频性能, 能够为大气海洋的联合探测研究提供帮助。提出了一种基于视场展宽迈克尔逊干涉仪 (FWMI) 鉴频器的大气海洋 HSRL 系统和算法, 用于反演海水和大气颗粒的 180° 体积散射系数。该系统的核心在于采用混合 - 分子双通道接收信号, 其中分子通道利用 FWMI 鉴频器滤除颗粒信号, 透过分子信号。研究表明, 反演误差会随着颗粒散射比 (总 180° 体积散射系数与分子 180° 体积散射系数之比) 增大而线性增大, 而光谱分离比 (分子与颗粒透过率之比) 的提高能够显著抑制误差的增长趋势。因为海洋的分子散射与颗粒散射在光谱上更加分离, 因此 FWMI 在海洋 HSRL 上的鉴频能力高于大气 HSRL。所提的基于 FWMI 的 HSRL 系统能够工作于水体和大气中, 对大气海洋激光雷达的性能提升有重要的意义。

关键词: 光学遥感; 高光谱分辨率激光雷达; 大气遥感; 海洋遥感; 视场展宽迈克尔逊干涉仪

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6141(2020)01-0048-07

Investigation on Discrimination Characteristics of Atmospheric and Oceanic High-Spectral-Resolution Lidar

LIU Dong¹, ZHOU Yudi¹, ZHU Xiaolei², CHEN Yang¹, XU Peituo¹, LIU Chong¹,
WANG Nanchao¹, SHEN Xue¹

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

2 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The combined analysis of the discrimination performance of the atmospheric and oceanic high-spectral-resolution lidar (HSRL) can help the joint atmospheric and oceanic observation research. An atmospheric and oceanic HSRL system based on the field-widened Michelson interferometer (FWMI) discriminator is proposed in this work, which can be used to retrieve the 180-degree volume scattering function of oceanic and

基金项目: Supported by National Key Research and Development Program of China (国家重点研发计划, 2016YFC1400900); National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 41775023); Excellent Young Scientist Program of Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (浙江省自然科学基金杰出青年项目, LR19D050001); Public Welfare Project of Zhejiang Province (浙江省公益项目); Fundamental Research Funds for the Central Universities (中央高校基础科研项目); State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation Innovation Program (现代光学仪器国家重点实验室创新项目)

作者简介: 刘东 (1982 -), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光雷达与光电检测方面的研究。

E-mail: liudongopt@zju.edu.cn

收稿日期: 2019-12-16; **修改日期:** 2019-12-23

atmospheric particles. The core of the system is the combined-molecular dual channel, in which the molecular channel uses FWMI discriminator to filter the particle signal but transmit the molecular signal. It is shown that the retrieval error will increase proportionally with the particulate scattering ratio (the ratio of the total 180-degree volume scattering function to that of molecular), while the enhancing of the spectral discrimination ratio (the ratio of the molecular transmittance to the particulate transmittance) can significantly suppress the growth trend of the retrieval error. Because molecular scattering and particulate scattering are separated in the spectrum of oceanic HSRL, FWMI has a better discriminating characteristics in the oceanic HSRL than in the atmospheric HSRL. The proposed HSRL system based on FWMI can work in water and atmosphere, which is of great significance to the performance improvement of atmospheric and oceanic lidar.

Key words: optical remote sensing; high-spectral-resolution lidar; atmospheric remote sensing; oceanic remote sensing; field-widened Michelson interferometer

1 引 言

海洋占地球面积的 71%, 监测海洋能够为全球气候变化和生物地球化学循环提供重要数据^[1]。目前有多种方法可以探测水体内部特性。原位探测能够精确获取海洋光学参数, 但受限于时空分辨率和探测效率。水色遥感能够高效长期观测全球海洋数据, 然而其有限的深度信息和对自然光的依赖性限制了它的应用^[2]。声学探测可用于获取水体剖面信息, 但由于海气界面的高反射率, 声学设备只能在水下工作。海洋激光雷达是一种能够进行水下深度信息观测的主动遥感手段, 几乎不受平台和自然光的限制, 具有高时空分辨率和全天时、全天候的工作优势。其探测结果通过原位测量得到了验证^[3-5], 目前正在鱼群、浮游植物层、海洋内波等上层海水特性的探测中体现出巨大潜力^[2]。

激光雷达回波信号包含了水体的 180° 体积散射系数和激光雷达衰减系数的光学信息, 但受到“一个方程, 两个未知数”的限制, 从标准后向散射激光雷达廓线中同时反演两个参数的技术, 仅适用于光学性质随深度变化缓慢的水体^[2]。而在不均匀的海水中, 则必须对激光雷达比进行假设。拉曼激光雷达利用分子拉曼散射信号作为弹性散射信号的参考, 能够在不假设激光雷达比的情况下进行反演, 然而海水分子的拉曼散射在单位波长上的强度很小, 这限制了激光雷达的信噪比^[6]。海水分子的布里渊散射与拉曼散射的总强度基本相同, 但其强度集中分布于更窄的波长范围内, 不容易受到太阳光、荧光等外部源的干扰, 有利于基于超窄带光谱鉴频器的高光谱分辨率激光雷达 (High-spectral-resolution lidar, HSRL) 的研制^[7]。

事实上, HSRL 技术已经在大气中得到成功的应用。1968 年英国剑桥大学的 Fiocco 和 Dewolf 等模拟了大气回波信号并实现其频谱测量, 预示着 HSRL 技术的开启^[8]。此后, 大气 HSRL 技术得到快速发展, 并逐渐成熟^[9-10]。1991 年 Sweeney 等首次提出了采用 HSRL 技术测量水体的漫射衰减系数^[11]。2017 年 Zhou 等系统地评估并展示了海洋 HSRL 的理论可行性^[7], 同年 Schullien 等报道了 NASA 的实验比对结果^[12]。2019 年 Zhou 等报道了散射相函数和光谱展宽对海洋 HSRL 精度的影响^[13-14]。然而, 目前还没有同时分析海洋和大气 HSRL 的鉴频性能的研究。本文提出了一种基于视场展宽迈克尔逊干涉仪 (Field-widened Michelson interferometer, FWMI) 鉴频器的大气海洋 HSRL 和算法, 用于反演海水和大气颗粒的 180° 体积散射系数, 能够为大气海洋的联合反演提供依据。

2 方 法

如图 1 所示, 大气海洋 HSRL 发射一束激光脉冲进入海水中, 通过望远镜接收海水的后向散射光, 再经过准直、滤波、分束等操作后, 分别由混合通道和分子通道进行探测, 用于海水光学性质的分析, 图 2 示

出了望远镜接收信号的光谱分布, 颗粒散射 (深灰线) 集中于中心光谱上, 水分子布里渊散射 (灰线) 相对中心频率频移了约 7~8 GHz @532 nm。水分子瑞利散射和布里渊散射的比值 (Landau-Placzek 比) 通常小于 2% [15], 因此本文将忽略瑞利散射的贡献以简化计算流程。大气分子散射 (浅灰) 由 Cabannes-Brillouin 散射主导, 是线宽 2.6-3 GHz 的高斯线型。如图 1 所示, HSRL 技术依赖于不同信号组分的光谱差异, 在混合通道接收颗粒和分子的后向散射信号, 在分子通道利用 HSRL 鉴频器, 如 FWMI 鉴频器 (图 2 中的黑线), 滤除颗粒信号, 透过分子信号。灰色和浅灰色的阴影表示透过鉴频器的信号强度。

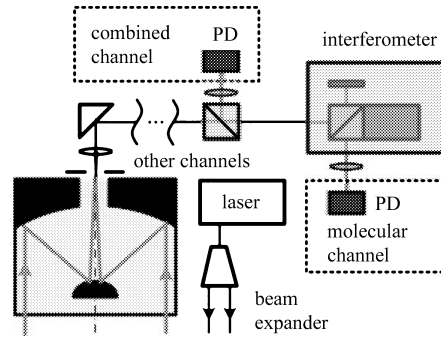


图 1 大气海洋 HSRL 结构示意图

Fig.1 Structure diagram of atmospheric and oceanic HSRL

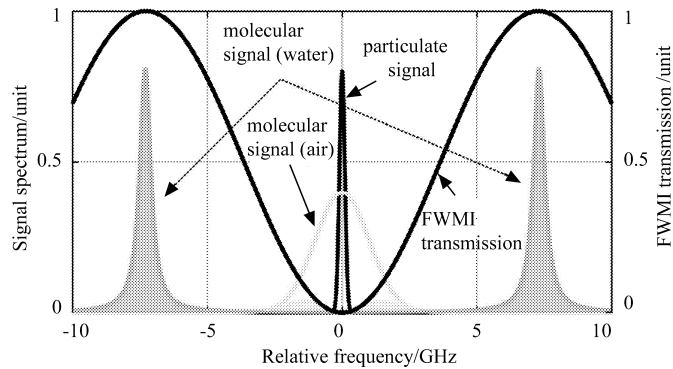


图 2 大气海洋 HSRL 分子通道工作原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of molecular channel of atmospheric and oceanic HSRL

混合和分子通道信号强度 B_c 和 B_m 分别为

$$\begin{cases} B_c(z) = S_p(z) + S_m(z) \\ B_m(z) = T_p S_p(z) + T_m S_m(z) \end{cases}, \quad (1)$$

其中, 颗粒和分子回波信号在准单次散射近似下可以分别写为

$$\begin{cases} S_p(z) = C(z) \beta_p^\pi(z) \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(\xi) d\xi \right] \\ S_m(z) = C(z) \beta_m^\pi(z) \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(\xi) d\xi \right] \end{cases}, \quad (2)$$

其中, $C(z)$ 为考虑激光雷达常数和距离平方后的参量, α 为激光雷达衰减系数, β_p^π 和 β_m^π 是颗粒和分子 180° 体积散射函数。根据 (1) 式和 (2) 式, 可以将 180° 体积散射函数写为

$$\beta^\pi = \beta_p^\pi + \beta_m^\pi = \beta_m^\pi \frac{T_p - T_m}{T_p - 1/K}, \quad (3)$$

其中, $K = B_c/B_m$, 事实上, 激光雷达衰减系数 α 也可以通过 (1) 式和 (2) 式反演得到, 但 α 受到系统参数的影响, 通常不是水体的固有光学参数, 因而本文将略过对 α 的讨论。

为了指导大气海洋 HSRL 的设计, 需要分析系统的反演误差。系统常数定标、重叠因子定标等误差均会反映到反演误差中去, 但这些误差是所有激光雷达中共有的部分, 这里将主要讨论信噪比引起的误差。根据 (3) 式, 可以将相对误差写为

$$\varepsilon = \frac{\partial \beta^\pi}{\beta^\pi \partial K} \sigma_K = \left(1 + \frac{R}{SDR - 1}\right) \sqrt{\left(\frac{1}{SNR_c^2} + \frac{1}{SNR_m^2}\right)}, \quad (4)$$

其中, σ 为物理量的统计标准差, 引入颗粒散射比 $R = \beta^\pi/\beta_m^\pi$ 来量化大气和海洋中的颗粒物负载, 引入光谱分离比 $SDR = T_m/T_p$ 来评估光谱鉴频器对颗粒和分子散射信号的分离能力, SNR_c 和 SNR_m 分别为混合通道和分子通道的信噪比。

光谱鉴频器的分子和颗粒信号透过率可表示为

$$\begin{cases} T_m = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} [I_m(\nu) \otimes I_L(\nu)] F(\nu) d\nu}{\int_{-\infty}^{+\infty} [I_m(\nu) \otimes I_L(\nu)] d\nu} \\ T_p = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} I_L(\nu) F(\nu) d\nu}{\int_{-\infty}^{+\infty} I_L(\nu) d\nu} \end{cases}, \quad (5)$$

其中, ν 是相对于激光中心波长的频率, 符号 \otimes 表示卷积, $F(\nu)$ 是光谱鉴频器的透过率, $I_L(\nu)$ 是激光光谱分布, 可表示为

$$I_L(\nu) = \frac{1}{\Delta\nu_L \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{\nu^2}{\Delta\nu_L^2}\right), \quad (6)$$

其中, $\Delta\nu_L$ 为激光光谱的 1/e 半宽度。 $I_m(\nu)$ 是不考虑激光线宽的分子散射光谱分布^[16], 水分子散射用布里渊散射的洛伦兹分布来描述, 而大气分子散射用 Cabannes-Brillouin 散射的高斯分布来描述, 可分别写为

$$\begin{cases} I_{m,\text{water}}(\nu) = \frac{1}{\pi \Delta\nu_B^\pi} \frac{1}{\left\{1 + \left[2(\nu \pm \nu_B^\pi)/\Delta\nu_B^\pi\right]^2\right\}} \\ I_{m,\text{air}}(\nu) = \frac{1}{\Delta\nu_C \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{\nu^2}{\Delta\nu_C^2}\right) \end{cases}, \quad (7)$$

其中, ν_B^π 和 $\Delta\nu_B^\pi$ 分别是与温度、盐度和压力有关的 180° 布里渊散射的频移和半高全宽, $\Delta\nu_C$ 为 Cabannes-Brillouin 散射高斯分布的 1/e 半宽度。

3 结 果

(4) 式主要反映了信噪比对误差的影响, 显然较高的信噪比将极大地减少相对误差。(4) 式还进一步说明了系统参数对误差的影响, SDR 的提高能够提升激光雷达的反演精度, 当 SDR 趋向于无穷大时, 反演误差直接反比于信噪比。值得注意的是, SDR 较大时, 误差的下降趋势变缓, 因此追求无限大的 SDR 意义不大, 一般来说当 SDR 大于 R 约 5 倍的时候, 能够达到非常好的误差抑制效果。比例项 $R/(SDR - 1)$ 显示了海洋颗粒物负载对反演精度的影响, 在较为浑浊的大气或水体中, 一个较高的 SDR 非常有利于抑

制误差。根据 (1) 式, 提高 T_p 和 T_m 可以提高分子通道的信号强度和信噪比。然而, 对于相对误差 ε 来说, 提高 T_m 可以减小 ε , 提高 T_p 则会导致 ε 的恶化, 这主要是因为提高 T_p 虽然可以提升分子通道信噪比, 但会降低 SDR , 详细推导分析可见文献 [17]。

假设混合通道和分子通道信噪比均为 20, 图 3 示出了光谱分离比 SDR 和颗粒散射比 R 对 180° 体积散射系数的相对误差 ε 的影响。 ε 随 R 增大而线性增大, SDR 的提高能够显著抑制 ε 的增长趋势。当颗粒散射比 R 较小时, 不同 SDR 对应的相对误差较为接近, 即对于清澈海水或干净大气, 不需要很高的 SDR 。当颗粒物负载 R 较大时, SDR 为 50、100 和 200 时的相对误差较为接近, 显示在研制具有更高 SDR 的鉴频器和控制鉴频器的研制成本之间需要进行权衡。对于一般大气和水体状态, 当 SDR 为 50 时已经可以在一定程度上抑制误差, 但为了更高的探测精度, 可以不断提高鉴频器的光谱分离比。

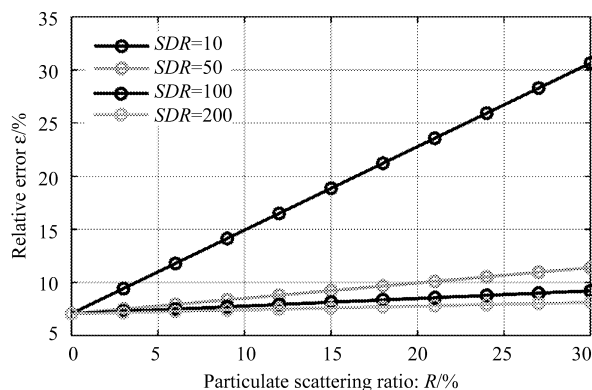


图 3 光谱分离比和颗粒散射比对 180° 体积散射系数的相对误差的影响

Fig.3 Effects of the spectral discrimination ratio and particulate scattering ratio on the relative error of 180° volume scattering function

光谱鉴频器是大气海洋 HSRL 中的关键器件, 其性能直接影响了 HSRL 的数据反演。将以 FWMI 为例, 对实际应用中 FWMI 的 T_m 和 SDR 进行分析^[18]。作为干涉型的光谱鉴频器, FWMI 的性能不仅取决于回波信号的光谱特性, 还取决于其自身特性, 包括自由光谱间距、锁频性能、对接收角和累积波前误差的敏感度等^[18]。为更好地评估在实际工作模式下, 各种因素对 FWMI 性能的影响, 设定了包含环境因素和工作条件在内的因素, 如表 1 所示。布里渊频移和线宽分别为标准海水 (温度 20°C , 盐度 35‰, 压强 1 个大气压) 中的 7.67 GHz 和 0.62 GHz, 大气分子产生的 Cabannes-Brillouin 线宽为 2.8 GHz。自由光谱间距选择为 15.34 GHz 时, 能够最大程度地透过水分子散射信号。根据自由光谱间距, 计算得到 FWMI 在 532 nm 时的设计参数, 锁频误差和累积波前误差均为目前能够达到的性能^[18]。

FWMI 具有较大的视场角, 非常有利于大气和海洋 HSRL 中的装调, 同时也有利于接收到更多的信号。对于干涉型光谱鉴频器, 接收角增大通常会导致干涉仪性能恶化, 如传统的法布里珀罗标准具。FWMI 具有特殊的视场补偿机制, 能够在一定的角度范围内将光谱鉴频性能对视场角的敏感性降到最低。考察 HSRL 中的 FWMI 鉴频器的光谱特性随发散角的变化, 如图 4 所示。当入射光发散角在 $0\sim 100$ mrad 之间变化时, 分子透过率 T_m 和光谱分离比几乎没有变化。当发散角大于 100 时, T_m 几乎不发生变化, 而 SDR 会迅速恶化。这是因为发散角超过了 FWMI 的视场补偿范围后, 对 T_p 的影响要远大于 T_m 。如图 4 所示, 海洋 HSRL 中的 FWMI 鉴频特性要远优于大气, 由于 T_p 在大气和海洋应用时都不变, 唯一的影响因素为 T_m 。根据图 2, 这是因为大气分子散射与颗粒散射在光谱上混合在一起, 而水分子散射与颗粒散射则明显分开, 因此图 2 的阴影部分显示仅有小部分大气分子信号能够通过 FWMI (浅灰色阴影), 而大部分的水分子信号能够通过 FWMI (灰色阴影)。由于需要满足海洋探测, FWMI 选择了较大的自由光谱间

距, 在常用的大气 HSRL 设计中, FWMI 的自由光谱间距约为 3 GHz。但即便对于自由光谱间距更小的 FWMI, 其分子透过率通常也只有 50% 左右, 约为海洋 HSRL 分子透过率的一半^[18]。

表 1 FWMI 性能仿真参数

Table 1 Parameters in simulation of FWMI performance

Parameters	Value
Seawater Brillouin shift (GHz)	7.67
Seawater Brillouin width (GHz)	0.62
Air Cabannes-Brillouin 1/e width (GHz)	2.8
Free spectral range error (GHz)	15.34
Locking error (MHz)	20
Cumulative wavefront error (λ)	0.02
Glass arm	P-SF68, $d_1=6.412$ mm
Air arm	$d_2=3.174$ mm

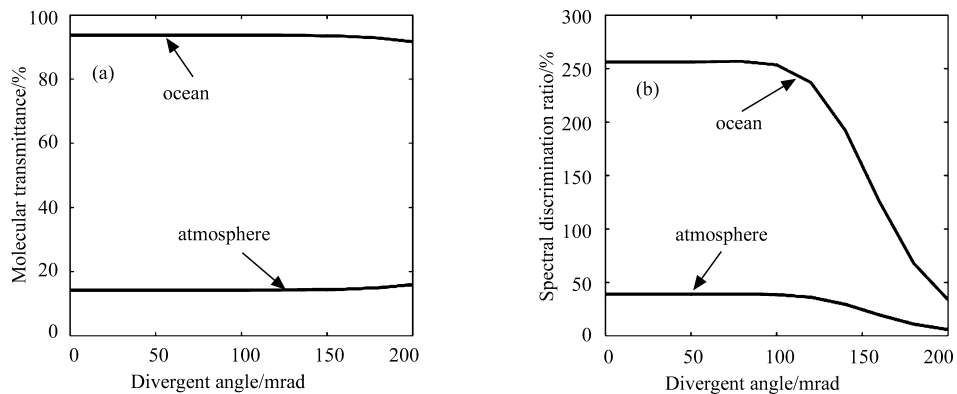


图 4 发散角对海洋和大气 HSRL 中的 FWMI 鉴频特性的影响。(a) 分子透过率; (b) 光谱分离比

Fig.4 Influence of field of view on FWMI discrimination characteristics in oceanic and atmospheric HSRL.

(a) Molecular transmittance; (b) spectral discrimination ratio

4 结 论

提出了一种基于 FWMI 鉴频器的大气海洋 HSRL 系统和算法, 用于反演海水和大气颗粒的 180° 体积散射系数。核心在于采用混合 - 分子双通道接收信号, 其中分子通道利用 FWMI 鉴频器滤除颗粒信号, 透过分子信号。研究表明, 反演误差会随着颗粒散射比 (总 180° 体积散射系数与分子 180° 体积散射系数之比) 增大而线性增大, 光谱分离比 (分子与颗粒透过率之比) 的提高能够显著抑制误差的增长趋势。仿真表明, 对于一般大气和水体状态, SDR 为 50 已经能够在一定程度上抑制误差, 但为了更高的探测精度, 可以不断努力提高鉴频器的。因为海洋的分子散射与颗粒散射在光谱上更加分离, FWMI 在海洋 HSRL 中的鉴频能力高于大气 HSRL。所提的基于 FWMI 的 HSRL 系统能够工作于水体和大气中, 对大气海洋激光雷达的性能提升有重要的意义。

参考文献 :

- [1] Balino B M, Fasham M J R, Bowles M C. Ocean biogeochemistry and global change: JGOFS research highlights 1988-2000 [J]. *Igbp Science*, 2001, **2**: 1-32.
- [2] Churnside J H. Review of profiling oceanographic lidar [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(5): 051405.
- [3] Liu D, Xu P, Zhou Y, *et al.* Lidar remote sensing of seawater optical properties: experiment and Monte Carlo simulation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **57**(11): 9489-9498.
- [4] Liu Q, Cui X, Chen W, *et al.* A semianalytic Monte Carlo radiative transfer model for polarized oceanic lidar: Experiment-based comparisons and multiple scattering effects analyses [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, **237**: 106638.
- [5] Zhou Y, Chen W, Cui X, *et al.* Validation of the analytical model of oceanic lidar returns: comparisons with Monte Carlo simulations and experimental results [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(16): 1870.
- [6] Hirschberg J, Byrne J. Rapid underwater ocean measurements using Brillouin scattering [C]. *Monterey:Ocean Optics VII*, 1984: 270-276.
- [7] Zhou Y, Liu D, Xu P, *et al.* Retrieving the seawater volume scattering function at the 180° scattering angle with a high-spectral-resolution lidar [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(10): 11813-11826.
- [8] Fiocco G, DeWolf J. Frequency spectrum of laser echoes from atmospheric constituents and determination of the aerosol content of air [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1968, **25**(3): 488-496.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Sweeney H E, Titterton P, Leonard D A. Method of remotely measuring diffuse attenuation coefficient of sea water [P]. *Google Patents*, 1991.
- [12] Schulien J A, Behrenfeld M J, Hair J W, *et al.* Vertically-resolved phytoplankton carbon and net primary production from a high spectral resolution lidar [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(12): 13577-13587.
- [13] Liu D, Zhou Y, Chen W, *et al.* Phase function effects on the retrieval of oceanic high-spectral-resolution lidar [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(12): A654-A668.
- [14] Zhou Y, Chen W, Liu D, *et al.* Multiple scattering effects on the return spectrum of oceanic high-spectral-resolution lidar [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(21): 30204-30216.
- [15] O'Connor C L, Schlupf J P. Brillouin scattering in water: the Landau-Placzek ratio [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1967, **47**(1): 31-38.
- [16] Fabelinskii I L, Levine H B. *Molecular Scattering of Light* [M]. Berlin: Springer,1968.
- [17] 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.
- [18] 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): 12117-12134.