

海洋激光遥感技术研究进展(特邀)

华灯鑫, 王 骏

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 国内正处于实施 21 世纪海洋“丝绸之路”战略部署的关键时期, 发展海洋光学技术是支撑国家中长期发展战略的重要方向。海洋激光遥感技术是海洋光学的重要研究领域之一。激光雷达作为近年来快速发展的新型主动遥感技术, 由于其具有高精度及高时空分辨率的优点, 已在海洋激光遥感领域得到广泛的应用。文中基于布里渊散射激光雷达和海洋成像激光雷达介绍了海洋激光遥感技术的研究进展, 以及我国在水体参数测量、水下目标探测和海洋地形地貌的激光遥感中的应用。

关键词: 海洋激光遥感; 激光雷达; 水体参数探测; 水下目标探测; 海洋地形地貌

中图分类号: P714 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0903003

Research progress of ocean laser remote sensing technology(*invited*)

Hua Dengxin, Wang Jun

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: China is in the critical period of implementing the strategic deployment of the 21st Century Ocean "Silk Road". The development of ocean optical technology is an important direction to support the country's medium and long-term development strategy. Ocean laser remote sensing technology is one of the important research fields in ocean optics. As a new active remote sensing technology developing rapidly in recent years, lidar has been widely used in the field of ocean laser remote sensing because of its high precision and high spatial-temporal resolution. In this paper, based on Brillouin scattering lidar and ocean imaging lidar, the research progress of ocean laser remote sensing technology and its application in water parameter measurement, underwater target detection and laser remote sensing of ocean topography in China were introduced.

Key words: ocean laser remote sensing; lidar; water parameter detection; underwater target detection; marine topography

收稿日期: 2018-06-13; 修订日期: 2018-08-17

基金项目: 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(41627807); 国家自然科学基金面上项目(61575159)

作者简介: 华灯鑫(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光雷达和光电测试技术及仪器方面的研究。

Email: dengxinhua@xaut.edu.cn

0 引言

随着国内确立了由海洋经济大国向海洋经济强国转变的发展战略,海洋参数遥感、海洋资源测绘、水下目标探测等领域的新原理及关键技术研究日益受到关注^[1-3]。利用上述研究成果获得海洋水体特征参数(如声速、温度、盐度、折射率、体粘滞系数等),可为研究全球气候和生态环境体系,改善海洋环境、海洋灾害预警与海洋气象预报准确度,研究全球气候变暖对策等基础科学领域提供可靠的数据支持;也为我国在民生经济领域对海洋信息的探索与研究,以及对海洋资源的全方位、高效益和可持续地开发与利用具有重要的研究价值和显著的社会效益;特别对我国海军新的战略需求、海上利益保障和积极探索全球全域作战的战略战术提供技术保障^[4-6]。目前,声学探测手段在海洋探测领域一直占据着统治地位。然而,声波在海水中的传播速度不仅受海水的盐度、温度和水压等环境因素的影响较大,而且还受到海洋的边界条件和时空变化等的制约。声纳水下成像技术虽然探测距离较远,但图像分辨率较低,不易辨识小目标^[7]。此外,传统的接触式光学与电学海洋探测手段存在覆盖面小、测量速度慢、同步测量困难等缺点;而非接触式的星载微波辐射和红外辐射遥感探测技术虽然可实现快速、大范围探测,但由于水体对微波和红外极高的吸收性,只能获得海水表层信息。因此,急需发展激光遥感新原理及关键技术来弥补海洋探测中的不足,实现高速、高精度、低成本和大面积的海洋探测。

近年来,随着光谱探测、干涉测量、微弱信号检测等技术和水体布里渊散射、拉曼散射理论的迅猛发展,以及相关高性能器件的相继出现,使海洋激光遥感的实时、多参量、高精度探测成为可能。目前,国内研究包括基于光散射理论的频率探测和基于成像的幅度探测的海洋激光遥感新原理及关键技术。众多科研院所在布里渊散射基础理论、布里渊散射谱信息获取技术、布里渊激光雷达探测水温、海洋水体特征参量获取、水体气泡、海洋地形地貌等^[8-10]领域开展了大量的基础理论与工程技术方面的研究工作,取得了多项原创性的研究成果。

1 海洋激光遥感理论

在海洋激光遥感领域国内发展了基于光散射和光反射的两类遥感理论^[7,11]。在利用光散射信号实现海洋遥感中,研究主要集中在水体的布里渊散射领域。而在利用光反射信号实现海洋遥感中,研究主要集中在如何抑制后向散射噪声领域。

1.1 水体布里渊散射

海水中存在着随机的密度涨落并以声速在海水中传播,相当于位相光栅,从而引起入射光的 Bragg 衍射,衍射光的频率产生 Doppler 位移 $\Delta\pm\omega_B$,位于入射光频率(分子散射)的两侧 $\pm 1.0\text{ cm}^{-1}$ 范围内。其关系如图 1 所示。

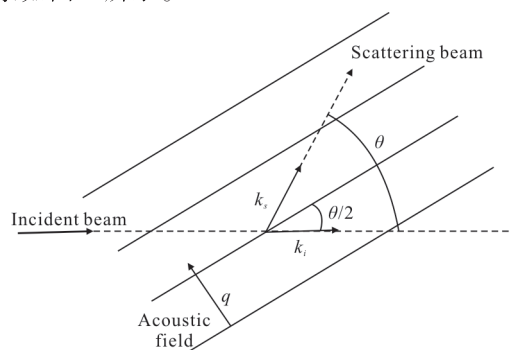


图 1 布里渊散射的经典物理图

Fig.1 Classical diagram of Brillouin scattering

$$|\vec{k}_{\text{sound}}|^2 = |\vec{k} - \vec{k}_{\text{scat}}|^2 = k^2 + k_{\text{scat}}^2 - 2\vec{k}\vec{k}_{\text{scat}} - 4k^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

布里渊散射频移表示为:

$$\nu_B = \frac{2kV_{\text{sound}}}{2\pi} \sin \frac{\theta}{2} = \frac{2nV_{\text{sound}}}{\lambda_0} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

当入射光波长为 λ , 温度为 T , 盐度为 S , 折射率为 n , 散射角为 θ , 声速的表达式为:

$$V_{\text{sound}}(S, T) = \frac{\lambda \nu_B(S, T)}{2n(S, T) \sin \frac{\theta}{2}} \quad (3)$$

只要获得布里渊频移就能得出声速。

1.2 海洋成像

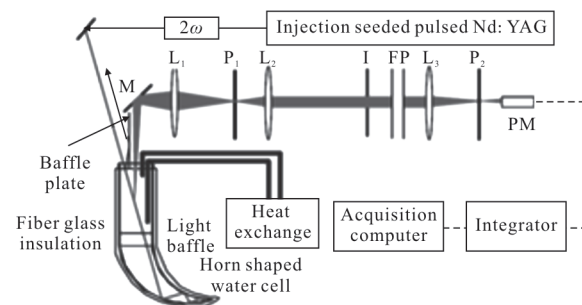
在海洋成像中,激光光源往返于激光雷达系统(反射与接收系统)、大气、气液界面和海水之间,激光雷达发出的信号光在水中传输时,在目标处产生反射信号,以及传输链路上水体后向散射信号,两者之间存在时间差,利用时间分辨获得距离分辨,实现

水体中目标的深度。由于使用的光学技术在海洋中传输的最大问题就是当激光通过水体介质时存在极大的后向散射，主要原因是海水中存在各种杂质和浮游物质，即所谓的黄色物质。这些物质所产生的散射和吸收在很大程度上降低了目标对比度，使探测灵敏度得到限制。绝大部分散射光在没有抵达目标的情况下返回到光电探测器，产生了很强的散射噪声电平，而抵达目标并返回光电探测器的这些光又由于海水的前向散射，当这些光返回到光电探测器时也会产生噪声电平，降低目标信号的对比度和清晰度。同时，还有其他光源(如太阳光、恒星光等)与暗电流也会产生探测器的噪声电平，即回波信号中的杂波。除此之外，在一些特殊的海域，强烈的湍流和气泡等复杂海洋环境也产生强烈的背景噪声。因此如何抑制后向散射噪声电平成为了考察系统探测性能很重要的技术手段。

2 水体参数的激光遥感

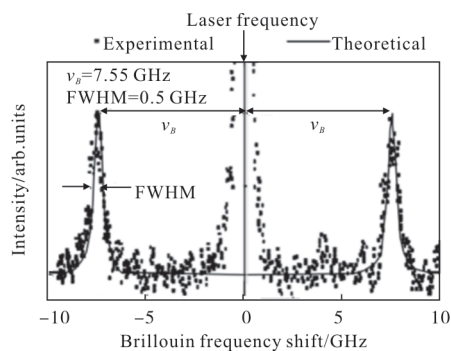
海水温度是表征海洋状态的最重要参数，几乎海洋中发生的所有现象和过程都与海水温度相关，并对地球气候变化具有十分显著的影响。因此，目前水体参数的激光遥感聚焦在海水温度探测领域。由于蓝绿激光在海水中的衰减系数较小、可以穿透一定深度的水体，因此水体参数的遥感雷达主要采用蓝绿激光作为激励源。国内发展的遥感雷达主要是基于水体光散射的布里渊激光雷达系统，并开展了初步的海试试验。由于布里渊散射是一种非弹性散射，散射光与激励激光中心频率存在频移，该频移与水体的声波特性以及散射角有关，而声速又与水体的温度、盐度、密度、折射率等特征参量密切相关。因此，可以利用布里渊激光雷达系统探测布里渊频移，反演水体温度。此外，海水盐度可通过不同海域盐度均值、海洋盐度探测卫星或拉曼激光雷达获得，再利用海水折射率与海水温度、盐度和波长的定量函数关系，即可精确获取海水温度。在海水温度探测中，同时可以获得如声速、盐度、折射率、体粘滞系数等。目前发展的布里渊频移探测方法主要包括扫描法布里-珀罗(F-P)干涉仪法、F-P 标准具与增强型电荷耦合器件(ICCD)结合测量布里渊散射光谱法、双边缘探测法等，国内北京师范大学、青岛海洋大学、南

昌航空大学、华中科技大学、西安理工大学等利用上述探测方法开展了水体参数的激光遥感研究。扫描法布里-珀罗干涉仪是一种高精度光谱测量仪器，可以精确测量布里渊散射光谱，图 2 所示为扫描法布里-珀罗干涉仪测量布里渊散射谱的装置及其测量的布里渊频谱。但是由于需要使用的高峰值功率脉冲激光器一般重复频率较低，完成如此宽谱段(约 20 GHz)的扫描需要很长的扫描周期(如若采用重复频率为 10 Hz 的脉冲激光器，实现约 20 MHz 的测量精度，至少需要 100 s 左右才能扫描完成 1 幅完整的布里渊散射频谱图)。图 3 为应用 ICCD 和 F-P 标准具测量布里渊散射谱的装置。该技术对散射光的平行度和激光器的稳频特性没有严格的要求，将布里渊散射激光雷达的实用化推进了一大步。然而，目前 ICCD 的像素尺寸较大，且帧频较低，对布里渊散射谱的测量误差和测量速度还有一定限制。



(a) 实验装置

(a) Experimental setup



(b) 测量结果

(b) Measuring result

图 2 扫描法 F-P 干涉仪测量布里渊散射谱及测量结果^[12]

Fig.2 Measurement of Brillouin scattering spectrum by scanning F-P interferometer^[12]

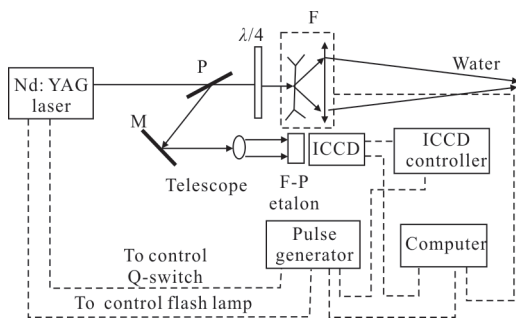


图 3 基于 ICCD 和 F-P 标准具的布里渊散射谱测量法^[13]

Fig.3 Measurement of Brillouin scattering spectrum based on the ICCD and the F-P etalon^[13]

图 4 为西安理工大学发展的一种基于多通道 F-P 标准具的双边缘探测法。发射系统采用种子注入 Nd:YAG 脉冲激光器的二次谐波(532 nm), 结合动态锁频技术和频移补偿方法, 作为激励光源。利用

时间延时器将激励光源从第 1 脉冲至第 i 脉冲形成间隔时间(τ_i), 脉冲光束的间隔时间逐渐增大, 依次与水体相互作用。由卡塞格林望远镜(Cassegrain telescope)接收不同深度 $D_n(n=1, 2, 3, \dots)$ 处, 激励光束产生的瑞利-米散射、拉曼散射和受激布里渊散射回波信号。其在分光系统中首先利用 FPE1 剔除瑞利-米散射和受激布里渊散射, 利用干涉光谱技术测量拉曼的反斯托克斯支的谱形获得水体盐度; 再利用溴分子吸收池抑制瑞利-米散射后分为两路: 第一路, 采用基于双通道 FPE 的双边缘探测技术, 获得受激布里渊散射斯托克斯支的频移; 第二路, 利用光子相关光谱技术获得受激布里渊散射光强的自相关函数 $G^{(2)}(\tau)$, 结合动态光散射与水体受激布里渊散射谱宽的自相关特性获得受激布里渊散射谱宽。

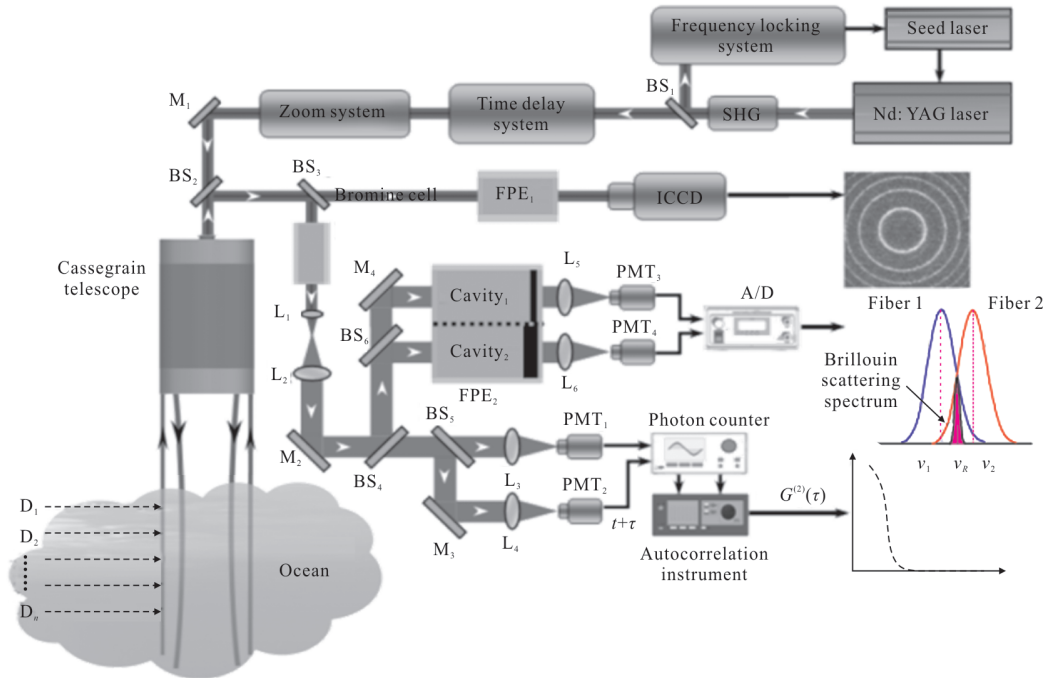


图 4 基于多通道 F-P 标准具的双边缘探测法

Fig.4 Double-edge detection based on multi-channel F-P etalon

3 水下目标的激光遥感

3.1 频率探测

在频率探测中, 利用激光雷达获得水体后向光散射频率信息, 探测水下目标。其中, 主要是利用水体的受激布里渊散射, 该散射是当入射光场强度超过某一阈值并通过介质时, 会在介质内部产

生电致伸缩效应, 引起介质的密度涨落, 从而激发出相干声波场以及斯托克斯支散射光, 声波和散射光会沿着特定的方向传播, 这种类似于受激辐射特性的布里渊散射过程称之为受激布里渊散射, 其具有高信噪比、相位共轭特性、单频特性等优点。国内北京师范大学、南昌航空大学、华中科技大学等利用当激光作用目标界面由纯液相变为固液相时, 受激

布里渊散射干涉条纹的消失来判断水下目标的存在。受激布里渊散射是激光与单一水相介质作用产生的非弹性散射，存在水下目标的位置水介质被排空，因此不产生受激布里渊散射。该方法是通过探测水下目标周围环境场的散射光谱有无来探测水下目标，如图 5 所示。

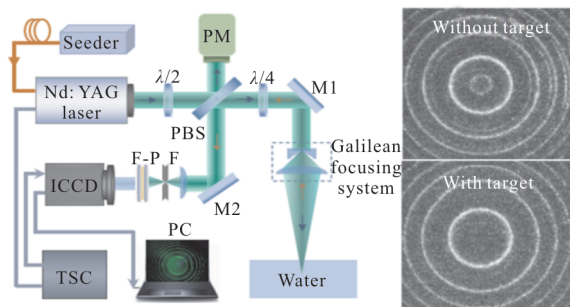


图 5 基于受激布里渊散射的水下目标激光探测法^[14]

Fig.5 Underwater target laser detection method based on stimulated Brillouin scattering^[14]

3.2 幅度探测

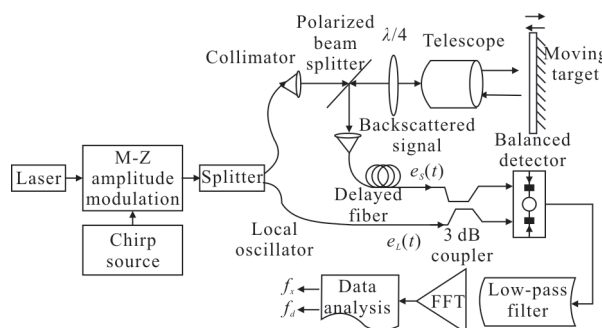
在幅度探测中，利用激光雷达获得水下目标反射光信息，来探测水下目标形貌。从 20 世纪 80 年代末，国内开始开展幅度探测激光雷达系统的研究，以华中科技大学为代表，研制成功了机载激光雷达海洋探测(CALYT)系统，并于 1996 年在国内南海海域进行了机载激光雷达探测实验，具有激光扫描、高速数据处理功能。由于国内在该领域的起步较晚，对激光雷达系统水下探测的研究较少，跟发达国家研究水平的距离还比较大。目前，国内众多科研院所：清华大学、电子科技大学、苏州大学、长春理工大学、重庆光电技术研究所、天津津航技术物理研究所等也开展了蓝绿激光雷达的理论和应用研究，发展了扫描同步空间滤波技术、偏振光水下成像技术、距离选通技术、载波调制技术等来解决强烈的背景噪声问题，获得高分辨率的水下目标图像，如图 6 和图 7 所示。



(b) 测量结果

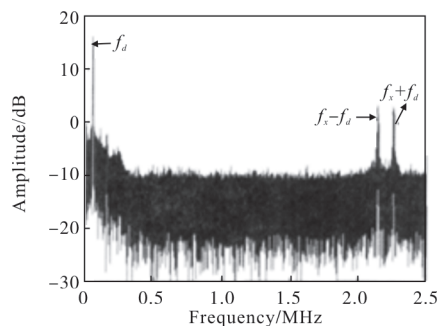
(b) Measuring result

图 6 基于目标成像与图像处理的水下目标激光探测
Fig.6 Underwater target laser detection based on target imaging and image processing



(a) 实验装置

(a) Experimental setup

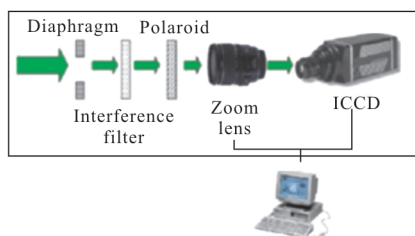


(b) 测量结果

(b) Measuring result

图 7 基于载波调制的水下目标激光探测^[15]

Fig.7 Underwater target laser detection based on carrier modulation^[15]



(a) 实验装置

(a) Experimental setup

4 海洋地形地貌的激光遥感

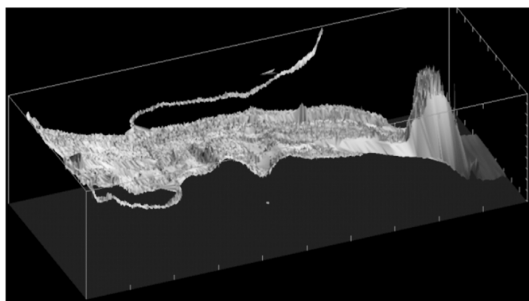
激光海洋测深与海底地形地貌是我国紧随世界潮流发展的一个研究领域，利用激光雷达进行水下探测的技术大致可分为四个发展阶段，第一个阶段是以 1960~1970 年代澳大利亚研制成功的 WRELADS-I 系统为代表，这一代系统都没有激光扫描和高速数据

记录功能,主要进行激光测深机理性研究,并用于海水深度的测量;第二个发展阶段是 1980~1990 年,此时,激光测深系统普遍增加了激光扫描、飞机定位和高速数据记录等功能,使机载激光测量海水深度系统向机载激光测绘海底地貌系统转化,主要代表作有:澳大利亚 WRELADS-II、加拿大的 LARSEN500 型、美国的 SHOALS 等;第三阶段是以 20 世纪 90 年代瑞典研制成功的 HAWK EYE 系统为代表,普遍采用了半导体泵浦的 Nd:YAG 激光器,增加了 GPS 卫星全球定位系统,使机载激光测绘近海海底地貌进入实用化。第四阶段是进入 21 世纪以来,以美国的 SHOALS 的升级系统 SHOALS-1000T 为代表,SHOALS-1000T 与 SHOALS 相比最大的不同在于它包含一个综合型全功能的数字照相机,可以同时检测水下和地面。该系统的数据搜集量是原系统的 2.5 倍,但是整体耗费功率只有原来的三分之一。目前中国科学院上海光学精密机械研究所研制了机载海洋测深与地形地貌探测系统,并实现了现实应用,如图 8 所示。



(a) 探测系统

(a) Detection system



(b) 测量结果

(b) Measuring result

图 8 中国科学院上海光学精密机械研究所研制的 ILADM-II 型机载海洋测深系统

Fig.8 Ocean depth of detection system of ILADM-II airborne developed by SIOM, CAS

5 结 论

目前,国防科工委遥感技术专项,海军装备预研创新项目、国家高科技计划及国家自然科学基金等先后启动了对水下目标激光探测新原理及关键技术研究的资助。2017 年,海洋发展战略论坛在京召开,提出了“打造海洋高端智库,助力海洋强国建设”的口号;2018 年,在西安召开了第二届全国海洋光学高峰论坛,论坛展示了海洋光学领域的最新研究成果、学科前沿发展及研究热点等,为海洋激光遥感展示技术创新、推动技术应用、探讨携手合作的开放学术平台。因此,发展和应用海洋激光遥感技术,对我国辽阔海洋安全具有深远的现实意义,而且由于西方发达国家对我国的技术封锁,使得研究成果更具战略意义。

参考文献:

- [1] Costa B M, Battista T A, Pittman S J. Comparative evaluation of airborne lidar and ship-based multibeam sonar bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 1082-1100.
- [2] Ma Yong, Ji Hang, Liang Kun. Application of modulated lidar on optical carrier for ocean exploration [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(4): 346-349. (in Chinese)
- [3] Yan D, Xue Q J. Atmosphere ocean laser communication channel simulation and modeling [J]. *IEEE*, 2009, 978(1): 554-557.
- [4] Brock J C, Purkis S J. The emerging role of lidar remote sensing in coastal research and resource management[J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, 25 (6): 1-5.
- [5] Yamanaka C, Fujita M. Raman spectroscopy measurements of CO₂ dissolved in water and CO₂ bubbles for laser remote sensing in water [C]//SPIE, 2014, 9240(4): 534-539.
- [6] Muller K F E. Remote Sensing Applications to Ocean and Human Health. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology [M]. New York: Springer, 2012: 8919-8939.
- [7] Shi J, Wang H, Qian J. Investigations on thermal-transfer characteristics of water based on stimulated

- Brillouin scattering[J]. *Opt Commun*, 2016, 363: 21–25.
- [8] Zhu X H, Wang Y L, Lu W. Measurement of the threshold of nonfocusing-pumped stimulated Brillouin scattering based on temporal characteristic of the reflected pulse[J]. *Appl Phy Express*, 2014, 7: 122601.
- [9] Li J, Lv Q, Zhang M, et al. Effects of atmospheric dynamics and aerosols on the fraction of supercooled water clouds [J]. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17: 1847–1863.
- [10] Gao W, Liu S G, Bi Y F, et al. Narrowband flat-top Brillouin gain spectrum and low distortion amplification based on pump phase modulation [J]. *Laser and Particle Beams*, 2013, 31: 515–521.
- [11] Zhu X, Lu Z, Wang Y. High stability, single frequency, 300 mJ, 130 ps laser pulse generation based on stimulated Brillouin scattering pulse compression [J]. *Laser and Particle Beams*, 2015, 33: 11–15.
- [12] Emery Y E, Fry E S. Laboratory development of a Lidar for measurement of sound velocity [J]. *Ocean Optics XIII*, 1997, 2963: 210–215.
- [13] Shi J, Li G, Gong W. A lidar system based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Applied Physics B*, 2007, 86: 177–179.
- [14] Shi J, Wu H, Liu J, et al. Stimulated scattering effects in gold-nanorod-water samples pumped by 532 nm laser pulses[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11964.
- [15] Yu Xiao, Hong Guanglie, Ling Yuan, et al. Homodyne detection of distance and velocity by chirped-amplitude modulated lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0606002. (in Chinese)