

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于直接散射光谱的多环境要素激光遥感方法

郭圆新, 梁琨, 徐杨睿, 赵延鹏, 王元庆, 王蓓

引用本文:

郭圆新, 梁琨, 徐杨睿, 等. 基于直接散射光谱的多环境要素激光遥感方法[J]. *光电工程*, 2024, 51(3): 240003.

Guo Y X, Liang K, Xu Y R, et al. Multiple environmental elements laser remote sensing method based on direct scattering spectrum[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 240003.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240003>

收稿日期: 2024-01-03; 修改日期: 2024-03-06; 录用日期: 2024-03-06

相关论文

Brillouin scattering spectrum for liquid detection and applications in oceanography

Yuanqing Wang, Jinghao Zhang, Yongchao Zheng, Yangrui Xu, Jiaqi Xu, Jiao Jiao, Yun Su, Hai-Feng Lü, Kun Liang

Opto-Electronic Advances 2023, 6(1): 220016 doi: [10.29026/oea.2023.220016](https://doi.org/10.29026/oea.2023.220016)

基于激光雷达数据的火星表面障碍物识别

陈海平, 李萌阳, 曹庭分, 严寒, 张亮, 张尽力, 王成程

光电工程 2023, 50(2): 220240 doi: [10.12086/oe.2023.220240](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220240)

结合遥感卫星及深度神经决策树的夜间海雾识别

李涛, 金炜, 符冉迪, 李纲, 尹曹谦

光电工程 2022, 49(9): 220007 doi: [10.12086/oe.2022.220007](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220007)

协同随机森林方法和无人机LiDAR空谱数据的盐沼植被“精灵圈”识别

韩江涛, 谭凯, 张卫国, 周若彤, 刘帅

光电工程 2024, 51(3): 230188 doi: [10.12086/oe.2024.230188](https://doi.org/10.12086/oe.2024.230188)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240003

基于直接散射光谱的多环境要素激光遥感方法

郭圆新^{1,2}, 梁琨^{1,2*}, 徐杨睿¹,
赵延鹏¹, 王元庆^{1,3}, 王蓓¹

¹华中科技大学电子信息与通信学院, 湖北 武汉 430074;

²多谱信息智能处理技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074;

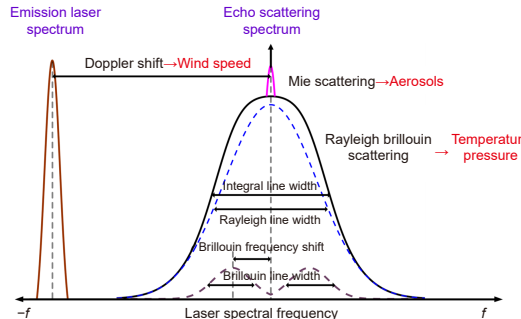
³武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430205

摘要: 激光雷达以其具有主动发射、高测量精度、良好的实时性和高时空分辨率等特点, 在环境要素遥感中发挥着重要作用。直接散射光谱激光雷达可以基于散射光谱与介质环境的耦合关系, 通过直接测量能量维度和光谱维度多特征信息诸如能量、频移、线宽等进行多环境要素的反演。文章对近年来直接散射光谱激光雷达在光谱特性研究技术和光谱探测技术两个方面取得的进展进行了归纳分析和总结, 主要介绍了基于直接散射光谱的水下和大气多环境要素探测理论和反演模型, 以及目前已有的多种直接散射光谱的测量方法。

关键词: 激光遥感; 激光雷达; 多环境要素探测; 直接散射光谱

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A



郭圆新, 梁琨, 徐杨睿, 等. 基于直接散射光谱的多环境要素激光遥感方法 [J]. 光电工程, 2024, 51(3): 240003

Guo Y X, Liang K, Xu Y R, et al. Multiple environmental elements laser remote sensing method based on direct scattering spectrum[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 240003

Multiple environmental elements laser remote sensing method based on direct scattering spectrum

Guo Yuanxin^{1,2}, Liang Kun^{1,2*}, Xu Yangrui¹, Zhao Yanpeng¹, Wang Yuanqing^{1,3}, Wang Bei¹

¹School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

²National Key Laboratory of Multispectral Information Intelligent Processing Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

³School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430205, China

Abstract: LiDAR plays an important role in the remote sensing of environmental elements due to its active emission, high detection accuracy, good real-time performance, and high spatial and temporal resolution. Based on the coupling relationship between the scattering spectrum and the medium environment, the direct scattering spectrum LiDAR can invert the multiple environment elements by directly measuring the energy dimension and the

收稿日期: 2024-01-03; 修回日期: 2024-03-06; 录用日期: 2024-03-06

基金项目: 民用航天技术预先研究项目 (D040107)

*通信作者: 梁琨, liangkun@hust.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

spectral dimension multi-feature information such as energy, frequency shift, linewidth, etc. In this paper, the recent advances in spectrum characteristics research and spectrum detection techniques of direct scattering spectrum LiDAR are briefly summarized. The detection theory and inversion models of underwater and atmospheric direct scattering spectrum are mainly introduced, as well as the existing measurement methods of direct scattering spectrum.

Keywords: laser remote sensing; LiDAR; multiple environmental elements detection; direct scattering spectrum

1 引言

大气和海洋环境要素信息表明了两者的物理状态, 对其进行精确测量对人类生产生活具有重要意义。在现有的环境要素遥感技术中, 激光雷达因具有主动发射、测量精度高、实时性好、时空分辨率高等特点, 在大气和海洋环境探测领域内得到了广泛应用^[1-3]。

在激光雷达遥感技术中, 基于能量检测的激光雷达最先得发展^[4-7]。这种体制的激光雷达一般通过检测回波信号强度并依据激光雷达方程来获取有关海洋或者大气环境性质的信息。它通过望远镜收集激光脉冲与大气或海洋中物质的相互作用所产生的散射回波信号并对回波信号进行能量分析, 然后基于激光雷达方程进行环境要素求解, 实现环境要素的探测。激光雷达方程中包含的未知参量主要有后向散射系数和消光系数, 其中, 大气中后向散射系数和消光系数包含了大气分子散射和气溶胶散射两个部分, 海洋中则包括水分子散射和悬浮粒子散射部分。分子散射和气溶胶/悬浮粒子散射强度的大小会使得激光回波能量强度发生变化, 根据这一变化并结合诸如激光接收的效率、接收面积、激光脉冲的宽度等已知参量代入到激光雷达方程进行大气或水体后向散射系数和消光系数的求解。但是, 在利用激光雷达方程进行求解时, 存在由一个方程进行两个未知参量求解的问题。针对这一问题, 研究人员提出了很多方法, 其中主要的有斜率法^[8]、Klett法^[9]、Fernald法^[10]三种方法, 这三种方法在原有条件的基础上都添加了对后向散射系数和消光系数之间关系的假设, 根据假设关系和激光雷达方程联立可以进行两个未知参量的求解。

虽然基于能量检测的激光雷达收发系统简单, 容易实现, 但是回波能量信号易受到噪声干扰, 导致探测精度较低。因此基于能量检测的激光雷达对回波信号信噪比要求较高, 如何抑制信道噪声、提高回波信号信噪比和精度是一大关键问题。除此之外, 为了求解激光雷达方程, 研究人员提出了一些新的假设关系,

而这些假设与事实并不完全相符, 这将导致反演得到的结果精确度较低。特别是激光雷达方程只包含了两个未知参量, 这意味着依据单一激光雷达方程进行多环境要素的探测较为困难。

为了提高回波信号的信噪比和实现大气环境参数的高精度反演, 目前普遍认为高光谱分辨率激光雷达 (high spectral resolution LiDAR, HSRL) 是可行的方法^[11-13]。1968年, 美国的 Foicco 等提出了 HSRL 的基本概念, 并最先应用到大气气溶胶探测中^[14]。激光在大气或海洋中传输时, 其散射光谱主要受到散射粒子的多普勒展宽影响, 气溶胶粒子的布朗运动使得气溶胶散射的光谱展宽较小, 大气分子的多普勒展宽则会使分子散射光谱谱线宽度相对较大, 因此可以利用滤波器在光谱域分离气溶胶散射和分子散射光谱, 此即 HSRL 最初在大气中和海水中应用的原理^[15-16]。由 HSRL 分离出的信号依据激光雷达方程即可进行环境要素的探测, 这种方式不需要对消光系数与后向散射系数进行假设, 可以直接反演出后向散射系数和消光系数等光学参数。相较于基于能量检测的激光雷达, HSRL 将回波信号中的气溶胶散射信号与大气分子散射信号进行了分离, 不仅可以对不同散射光谱区域特征能量进行提取, 提升回波信号的信噪比, 还能获得更多已知量, 避免进行一些假设, 提高环境参数的反演精度。近些年来, HSRL 在大气和海洋科学遥感中的应用日益广泛, 但其本质上还是利用分离出来的能量信息结合激光雷达方程来进行环境要素探测, 这一方法仍无法有效解决基于能量探测的激光雷达利用单一激光雷达方程获取多环境要素信息较难的问题。

目前, 基于能量检测的激光雷达和 HSRL 在单环境要素探测上都发挥了重要作用, 但均无法满足多环境要素精确探测的需求。例如, 基于能量检测的激光雷达收发系统简单, 容易实现, 但其对回波信号的信噪比要求也更高, 存在进行多环境要素探测较难的问题。HSRL 提高了回波信号信噪比, 并且无需进行假设即可获得更多的已知参量进行环境要素的高精度反

演, 但其无法有效解决基于能量探测的激光雷达依据单一激光雷达方程进行多环境要素探测较难的问题。基于能量检测的激光雷达和 HSRL 均利用能量维度信息进行环境要素遥感, 单一能量维度能够反映的环境信息有限。而环境信息不仅仅体现在能量维度上, 也表现在光谱维度上。散射光谱的特征信息如光谱能量、光谱线宽、光谱频移等多环境要素的探测具有十分重要的作用, 基于散射光谱特征信息与介质环境的耦合关系可以直接进行多环境要素的反演^[17-19]。这种基于光谱维度信息, 直接进行散射光谱探测的激光雷达可以被称为直接散射光谱激光雷达 (direct scattering spectrum LiDAR, DSSL)。

DSSL 不仅可以利用回波能量信息, 还可以利用激光与环境介质间产生的散射光谱信息, 在能量维度和光谱维度进行环境要素的探测, 这一方式利用了直接散射光谱信息, 而直接散射光谱信息反映的环境要素更多, 因此可以进行多环境要素的探测, 同时该方式获得了更高的信噪比和探测精度。在海洋和大气中, 环境的变化不仅会改变激光回波能量, 还会使得激光散射光谱特征发生变化, 如大气的温度压强会改变散射光谱的整体线宽和布里渊频移等^[20-21], 海洋的温度、盐度等会改变散射光谱的布里渊频移和布里渊线宽等^[22-23], 在对这些光谱维度特征信息进行测量后, 利用大气或海洋多环境要素与光谱特征之间的耦合关系即可进行多环境要素的探测。虽然 DSSL 在多环境要素探测中具备更多优势, 但是面对更加精细的光谱, 其探测要求也随之提高, 这主要表现在两个方面^[24-25]: 1) 光谱特性研究。在利用光谱维度特征信息进行多环境要素探测时, 明确水下温度、盐度和大气温度、压强等多要素环境场与散射光谱之间的关系是探测的前提, 因此需要深入研究不同环境下的直接散射光谱特征, 再依据散射光谱与环境参数之间的耦合联系建立多环境要素反演模型; 2) 光谱探测技术。相对于能量探测, DSSL 利用的是更加精细的谱维度特征信息, 其对光谱探测技术有着更高要求, 如在光谱检测时需注意系统的灵敏性和精确性, 兼顾实时性、垂直廓线的测量连续性、光谱检测的完整性以及精确性等。本文将上述两个方面对当前 DSSL 的研究进行论述。

2 理 论

2.1 散射光谱特性

激光在介质中传播时, 会和介质中的分子发生碰

撞, 产生光散射现象。根据碰撞理论, 光散射通常可以分为两类, 一类是弹性散射, 另一类是非弹性散射^[26-28]。

发生弹性散射的光子在碰撞过程中, 碰撞前后其频率不发生改变且不存在能量损失。此外, 散射光强度与入射光波长之间的关系一般表现为 $I \propto \frac{1}{\lambda^4}$, 其中 λ 为入射光的波长, σ 与散射点中心的尺寸 α_0 有关。典型的弹性散射主要包括丁达尔效应散射、瑞利散射和米散射。若 $\alpha_0 \gg \lambda$, 则 $\sigma \rightarrow 0$, 散射光强度与入射光强度无关, 如丁达尔效应散射。若 $\alpha_0 \ll \lambda$, 则 $\sigma \approx 4$, 散射光强和入射光波长的四次方成反比, 如瑞利散射。瑞利散射的散射光谱为单一峰, 展宽较宽, 峰强度也较强, 散射光频率不变。若 α_0 与 λ 可比, 则 σ 取值在 0~4 之间, 如米散射。米散射强度更高, 谱线相较于瑞利散射更窄, 米散射在大气中主要由气溶胶所引起, 在水下则由悬浮粒子如颗粒物和叶绿素等引起。

发生非弹性散射的光子在碰撞过程中, 光子的能量会发生改变, 即散射光的频率 ω_s 与入射光的频率 ω_i 不相等, 碰撞前后频率发生了变化, 散射光相对于入射光发生了频移。典型的非弹性散射主要包括拉曼散射和布里渊散射。入射光与介质接触时, 介质内原子发生转动跃迁或振动跃迁, 分子的感生电偶极矩作周期性变化, 入射光能量发生改变, 产生散射作用, 此即拉曼散射。拉曼散射又分为转动拉曼散射和振动拉曼散射。拉曼散射的频移在 $10 \sim 5000 \text{ cm}^{-1}$ 间, 谱线频移较大, 远离中心入射光频率, 同时拉曼散射谱线区域整体更宽, 分布更为紧凑。此外, 组成介质的各质点会自发做热运动, 介质密度会随之发生变化, 从而产生了一个自发的声波场, 这也导致对入射光的散射作用, 此即布里渊散射。频率为 ν_i 的入射光与频率为 ν_a 的超声波相互作用产生了 $\nu_a \pm \nu_i$ 的两个散射光, 它们对称分布于入射光频率两侧。布里渊散射在光谱上频移较小, 在 $0.1 \sim 2 \text{ cm}^{-1}$ 间, 更加靠近中心入射光频率, 其谱线线宽较宽。

综上所述, 光散射主要包含了拉曼散射、瑞利布里渊散射、米散射等, 散射光谱如图 1 所示, 水下和大气散射光谱在瑞利布里渊散射部分有所差别, 水下瑞利散射和布里渊散射谱线分离, 大气瑞利散射和布里渊散射谱线重叠。光散射中拉曼散射光谱频移比较大, 频谱比较宽, 光谱检测相对比较容易, 因而采用拉曼方式的激光雷达最先得到发展^[29-30]。但拉曼散射

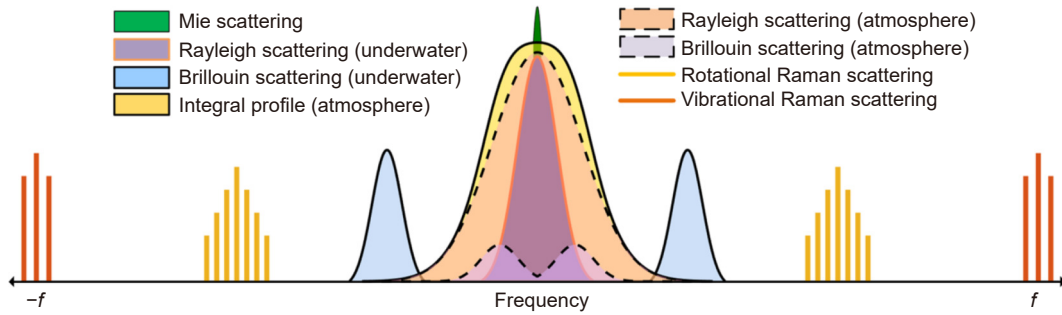


图 1 散射光谱示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scattering spectrum

的散射截面较小, 散射信号较弱, 且容易受到荧光的干扰, 信噪比与探测距离受限。同时拉曼散射的散射光谱频移量级小, 散射光谱分布紧凑, 再加上分子或者晶体的振动或转动十分复杂, 导致拉曼散射光谱更加复杂。相比于拉曼散射, 瑞利布里渊散射截面较大, 拥有更强的散射信号以及更深的探测能力; 同时, 布里渊光谱较窄、频移小, 其谱段内噪声更小, 布里渊散射光谱谱线也更为简单, 这种激光雷达拥有更加精确的探测能力^[31-34]。因此在直接散射光谱激光雷达中, 基于瑞利布里渊散射光谱的激光雷达在多环境要素探测中有着更多应用。

对于瑞利布里渊散射光谱, 在不同物理条件下散射谱线结果不同^[35-37]。如图 2 所示, 在不同散射区域, 瑞利布里渊散射光谱谱型存在差异。不同的散射区域, 可以采用入射光波长与平均分子自由程之间的比值——无量纲参数 y 表示。对于较为稀薄的介质如气体, 其平均分子自由程较大, 入射光波长同平均分子自由程的比值 y 较小, $y \ll 1$, 称这时发生的散射现象位于努森区域。在该区域中, 介质的密度波动所引起的布里渊散射现象不明显, 从谱线上可以看到瑞利散射谱线同两侧的布里渊散射谱线相互混叠, 无法区分。而在介质密度较大时如液体、固体, 介质的平

均分子自由程较小, $y \gg 1$, 称散射发生在流体动力学区域。这时, 介质的密度波动所引起的布里渊散射现象非常明显, 可以看到瑞利谱线同两侧的布里渊谱线产生了分离, 它们的线型可以用洛伦兹函数表示。而当入射光波长与介质平均分子自由程相近, 散射发生在动力学区域, 此时可以看到瑞利散射谱线同两侧的布里渊散射谱线部分混叠在一起。

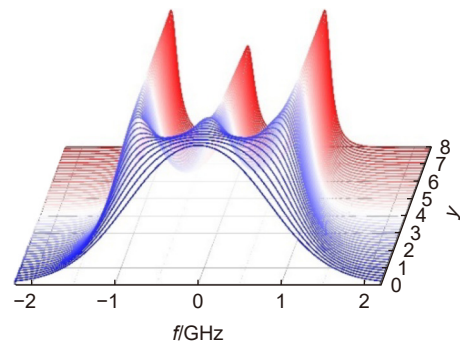


图 2 不同散射区域布里渊散射光谱图

Fig. 2 Brillouin scattering spectrum in different scattering regions

对于海洋和大气两种环境, 因为介质的不同瑞利布里渊散射光谱也不同, 如图 3 所示。而环境要素的不同, 如在海洋中, 海水的温度、盐度等不一样会导致瑞利布里渊散射光谱中的布里渊频移、布里渊线宽

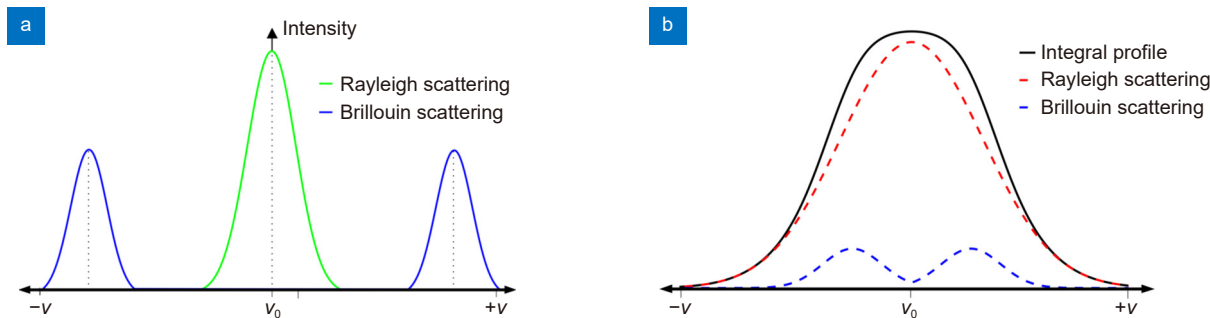


图 3 典型瑞利布里渊散射光谱。(a) 海洋瑞利布里渊散射光谱; (b) 大气瑞利布里渊散射光谱

Fig. 3 Typical Rayleigh-Brillouin scattering spectrum: (a) In the ocean; (b) In the atmosphere

等特征存在差异, 而在大气中, 大气的温度、压强等不同也会使得瑞利布里渊散射光谱的整体线宽、布里渊频移等特征存在差异。因此利用环境多要素与光谱特征之间的耦合关系, 基于瑞利布里渊散射光谱的多维特征即可进行多环境要素的探测。

2.2 水下直接散射光谱探测理论

水下瑞利布里渊散射处于流体动力学区域, 瑞利光谱谱线和布里渊光谱谱线是分开的, 对其进行检测和处理相较于大气散射光谱更为容易。水下直接散射光谱探测经过几十年的发展, 出现了多种海洋环境要素反演模型, 而这些反演模型主要是针对两个反映海洋特性的基本物理参量即海水的温度和盐度。其中通过瑞利布里渊散射光谱特征与海洋环境参数之间的耦合关系建立反演模型是水下直接散射光谱探测系统的测量理论基础。

最早的水下温度反演模型是 1984 年 Hirschberg 等提出的, 其通过测量的布里渊频移反演声速, 然后通过盐度、声速与温度之间的经验公式来反演温度^[38]。

在 Hirschberg 的研究中, 得到声速 V_s 与温度 T 的关系^[38]:

$$V_s = 1449 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.003T^3 + (S - 35)(1.39 - 0.012T) + 0.01z + \dots, \quad (1)$$

其中, z 是水的深度。如果深度和盐度已知, 则可以根据布里渊频移测量的声速推断出温度。根据 Hirschberg 的实验验证, 在根据热敏电阻测量得到的 29 °C 环境中利用该反演公式推导得到的温度为 34±4 °C。虽然现场试验表明该方法可以使用, 但精度还有待提高。该方法需要已知盐度信息, 盐度测量的不确定性会导致温度和声速测量不确定性增大, 同时该方法属于一种多级模型, 每一级模型的误差都会使得最终的反演误差增大。

为了避免上述 Hirschberg 的多级模型误差传递的问题, Fry 对这种反演方法进行了简化, 根据频移、温度、盐度、折射率以及声速之间的关系, 直接建立了依据频移和盐度反演温度的经验公式^[39-40]。Fry 的模型如下:

$$T(S, \nu_B) = t_0 + t_1(\nu_B - 7.5) + t_2(\nu_B - 7.5)^2 + t_3(\nu_B - 7.5)^3 + t_4(\nu_B - 7.5)^6 + S[t_5 + t_6(\nu_B - 7.5) + t_7(\nu_B - 7.5)^2 + t_8(\nu_B - 7.5)^3], \quad (2)$$

$$\nu_s(S, \nu_B) = c'_0 + c'_1(\nu_B - 7.5) + c'_2(\nu_B - 7.5)^2 + c'_3(\nu_B - 7.5)^3 + c'_4(\nu_B - 7.5)^5 + S[c'_5 + c'_6(\nu_B - 7.5)^2 + c'_7(\nu_B - 7.5)^3], \quad (3)$$

其中: 系数 $t_0 \sim t_8$ 、 $c'_0 \sim c'_7$ 均为常数, 取值见参考文献 [39]。Fry 的反演方法主要适用于 $30\% \leq S \leq 40\%$ 和 $7.0 \text{ GHz} < \nu_B < 8.0 \text{ GHz}$ 的情况。该方法中每 0.5‰ 的盐度不确定度产生的温度不确定度为 0.2 °C、声速不确定度为 0.12 m/s; 每 1 MHz 的频移不确定度引起的温度不确定度为 0.055 °C、声速不确定度为 0.2 m/s。在淡水中, 温度的测量误差约为 0.06 °C, 声速的测量误差约为 0.2 m/s。

除了依据频移和盐度反演温度外, 还可以依据线宽和盐度反演温度。哈尔滨工程大学的高玮等发现采用布里渊线宽反演海水温度比采用布里渊频移更具优势, 其利用线宽与温度的关系, 提出了布里渊线宽反演温度的单参数反演模型, 有效地提高了测量精度^[40]。在高玮的反演模型中, 首先依据布里渊峰的线宽公式、海水折射率经验公式、海水剪切粘滞系数经验公式等生成一个数据表格, 其中包含了固定 S 和 T 值的 170 °C 反向散射的布里渊线宽 $\Gamma_B(S, T)$, 然后进行数据拟合得到最后的温度与线宽和盐度相关的经验表达式 $T(\Gamma_B, S)$ ^[40]:

$$T(\Gamma_B, S) = \sum_{i=0}^5 t_i \Gamma_B^{-i} + S(t_6 \Gamma_B^{-1} + t_7 \Gamma_B^{-2} + t_8 \Gamma_B^{-3}), \quad (4)$$

其中: 系数 $t_0 \sim t_8$ 均为常数, 取值见参考文献 [40]。高玮的反演公式主要适用于 $0 \text{ °C} \leq T \leq 30 \text{ °C}$ 和 $0\% \leq S \leq 35\%$ 的情况。当布里渊线宽在 1.7 GHz 和 0.5 GHz 之间时, 该方法每 0.5‰ 的盐度不确定度引起的温度不确定度为 0.007 ~ 0.04 °C; 每 1 MHz 的线宽不确定度引起温度不确定度为 0.015 °C。相较于 Fry 的反演方法, 该方法中海洋盐度的测量误差对测温精度影响变得更小。但这两种方法虽然对 Hirschberg 的方法进行了改进, 但在实际使用中, 依然需要对盐度信息定标, 温度测量精度会受到盐度测量误差限制。

高玮和 Fry 的反演模型主要是海水温度的单参数反演模型, 即将盐度作为一个已知的参量, 只通过频移或线宽来反演温度。这类模型在实际海洋环境要素探测中仍存在一定弊端, 均需要一个较为精确的盐度测量值才可以进行温度的反演, 为了避免盐度测量误差对温度反演结果的影响, 华中科技大学的马泳等开展了基于布里渊后向散射的海水温度与盐度同步测量研究, 利用布里渊频移和布里渊峰能量进行海水温度

和盐度的双参数反演^[41]。在马泳的研究中, 依据布里渊频移与海水温度和盐度的关系及布里渊散射功率与海水温度和盐度的关系, 联立求解温度和盐度关于布里渊频移和布里渊散射功率的关系。由于利用这些关系联立直接求解温度和盐度存在困难, 所以该研究用大量数据进行拟合从而得到最终的温盐反演表达式, 拟合出盐度 S 的经验公式如下^[41]:

$$S = m_0 + m_1 V_B + m_2/P + m_3 V_B^2 + m_4/P^2 + m_5 V_B/P + m_6 V_B^3 + m_7/P^3 + m_8 V_B/P^2 + m_9 V_B^2/P, \quad (5)$$

其中, 系数 $m_0 \sim m_9$ 均为常数, 取值见参考文献 [41]。而温度 T 的表达式则可直接计算得到^[41]:

$$T = \frac{V_B^2}{A'} \cdot P, \quad (6)$$

其中, A' 表示布里渊功率归一化后的系数。该方法通过仿真实验分析, 认为能够实现海水温度和盐度的同步测量。由于盐度为实时测量值, 即理想情况下盐度的不确定度为零, 因此在布里渊频移量的测量精度为 1 MHz 的条件下, 其温度的测量精度为 0.05 °C, 远低于盐度的不确定为 5×10^{-4} 的条件下 0.2 °C 的测量精度。该方法使得以前仅能测温的激光雷达具备了复合功能, 可以实现海水温度、盐度的同步测量, 但由于该模型利用布里渊功率这一能量域参量, 能量域信息较光谱域信息更易受到干扰, 会降低该参量的测量精度, 最终影响温盐反演精度。

为了提高双参数模型对温度和盐度的测量精度, 后续研究人员从信噪比更高的光谱域寻找适宜的特征参量构建模型进行温盐反演。华中科技大学的梁琨等提出了利用布里渊频移和布里渊线宽进行海水温度和盐度的同步反演模型^[42]。在梁琨等人的研究中, 海水温度 T 和盐度 S 与布里渊频移 ν_B 和布里渊线宽 Γ_B 都有关联, 因而可以利用这两个函数建立联立的方程组, 将方程组中的 ν_B 和 Γ_B 认定为已知量, 把 T 和 S 认作未知量, 通过求解方程组

$$\begin{cases} \nu_B = \nu_B(T, S) \\ \Gamma_B = \Gamma_B(T, S) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T = T(\nu_B, \Gamma_B) \\ S = S(\nu_B, \Gamma_B) \end{cases}, \quad (7)$$

得到 T 和 S 关于 ν_B 和 Γ_B 的表达式, 即基于布里渊频移和布里渊线宽的温盐同步反演模型。具体如下^[42]:

$$T(\nu_B, \Gamma_B) = t_1 + t_2 \cdot \nu_B + \frac{t_3}{\Gamma_B} + t_4 \cdot \nu_B^2 + \frac{t_5}{\Gamma_B^2} + \frac{t_6 \cdot \nu_B}{\Gamma_B} + t_7 \cdot \nu_B^3 + \frac{t_8}{\Gamma_B^3} + \frac{t_9 \cdot \nu_B}{\Gamma_B^2} + \frac{t_{10} \cdot \nu_B^2}{\Gamma_B}, \quad (8)$$

$$S(\nu_B, \Gamma_B) = s_1 + \frac{s_2}{\nu_B} + \frac{s_3}{\nu_B^2} + \frac{s_4}{\nu_B^3} + \frac{s_5}{\nu_B^4} + \frac{s_6}{\nu_B^5} + s_7 \cdot \ln \Gamma_B + s_8 \cdot \ln^2 \Gamma_B + s_9 \cdot \ln^3 \Gamma_B + s_{10} \cdot \ln^4 \Gamma_B + s_{11} \cdot \ln^5 \Gamma_B, \quad (9)$$

式中: 布里渊频移 ν_B 和布里渊线宽 Γ_B 的单位为 GHz, 参数 $t_0 \sim t_{10}$ 和 $s_0 \sim s_{11}$ 为常数, 其值见参考文献 [42]。数据分析结果表明, 该模型会产生 0.08 °C 以内的温度拟合误差和 0.21‰ 以内的盐度拟合误差, 两者相对误差分别少于 0.26% 和 0.57%, 这些误差在海水温度和盐度反演的可接受范围内。同时该模型 1 MHz 的频移测量误差和线宽测量误差所引起的温度和盐度平均测量不确定度分别为 0.06 °C 和 0.84 °C。

以上反演模型均是基于瑞利布里渊光谱的双参数特征进行的海水温度和盐度的同步反演, 这类方法的研究和应用更为普遍, 同时也有研究人员从其他角度进行海水温盐的同步反演研究。

2014 年华中科技大学的余寅等开展了双波长反演海水温盐的研究, 该研究采用不同波长下测量的布里渊频移或者布里渊线宽作为输入参数, 以此建立温盐同步反演模型^[43]。在余寅的研究中, $\nu_B(T, S)$ 和 $\Gamma_B(T, S)$ 与波长 λ_i 均存在关系, 而频移和线宽测量精度对温度测量精度的影响相当, 线宽测量精度对盐度测量精度的影响要远大于频移测量精度对盐度测量精度影响。因而在综合考虑温度和盐度的测量精度的情况下, 其将采用布里渊频移作为输入参数建立双波长温盐同步反演模型:

$$\begin{cases} \nu_{B1} = \nu_{B, \lambda 1}(T, S) \\ \nu_{B2} = \nu_{B, \lambda 2}(T, S) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T = T(\nu_{B1}, \nu_{B2}) \\ S = S(\nu_{B1}, \nu_{B2}) \end{cases}, \quad (10)$$

其中: λ_1 和 λ_2 是所选择的两种激光波长 (在该研究中分别为 532 nm 和 480 nm), 而 ν_{B1} 和 ν_{B2} 分别为两种波长下测量得到的布里渊频移。在该研究中, 余寅等先得到两组不同的三维数据 (ν_{B1}, ν_{B2}, S) 和 (ν_{B1}, ν_{B2}, T) , 再采用最小二乘回归拟合的方法, 得到温度 T 和盐度 S 关于这两组布里渊频移的关系^[43]:

$$T(\nu_{B1}, \nu_{B2}) = T_1 + T_2 \cdot \nu_{B1} + T_3 \cdot \nu_{B2} + T_4 \cdot \nu_{B1}^2 + T_5 \cdot \nu_{B2}^2 + T_6 \cdot \nu_{B1} \cdot \nu_{B2} + T_7 \cdot \nu_{B1}^3 + T_8 \cdot \nu_{B2}^3 + T_9 \cdot \nu_{B1} \cdot \nu_{B2}^2 + T_{10} \cdot \nu_{B1}^2 \cdot \nu_{B2}, \quad (11)$$

$$S(\nu_{B1}, \nu_{B2}) = S_1 + S_2 \cdot \nu_{B1} + S_3 \cdot \nu_{B2} + S_4 \cdot \nu_{B1}^2 + S_5 \cdot \nu_{B2}^2 + S_6 \cdot \nu_{B1} \cdot \nu_{B2} + S_7 \cdot \nu_{B1}^3 + S_8 \cdot \nu_{B2}^3 + S_9 \cdot \nu_{B1} \cdot \nu_{B2}^2 + S_{10} \cdot \nu_{B1}^2 \cdot \nu_{B2}, \quad (12)$$

其中: 布里渊频移 ν_{B1} 和 ν_{B2} 的单位为 GHz, 参数 $T_0 \sim T_{10}$ 以及 $S_0 \sim S_{10}$ 为常数, 其值见参考文献 [43]。在余寅的反演模型中, 对温度和盐度的拟合误差不超过 ± 0.1 °C 和 ± 0.06 ‰。

水下直接散射光谱探测理论在逐渐向高精度、多参数方向发展, Hirschberg 的多级传递模型可以实现温度的测量, 但每一级模型的误差也会向下传递, 导致最终误差较大; 高玮和 Fry 的单参数反演模型对 Hirschberg 的模型进行了改进, 利用单一模型直接反演温度, 但这一类模型需要已知盐度信息, 盐度测量误差会对温度测量误差带来较大影响。为了避免盐度误差的影响, 研究人员提出了温盐同步反演的双参数模型, 马泳建立的模型可以实现温盐同步反演, 但其利用了易受干扰的能量域信息, 降低了测量精度; 梁琨等从光谱域出发构建双参数反演模型, 有效提高了温盐测量精度。余寅等从其他方向着手, 建立了双波长的双参数反演模型, 只需要单一光谱特征, 这一模型也在温盐反演上取得了较好成果。因此, 光谱域信息对最终的水下环境要素探测具有更好的效果和精度。

2.3 大气直接散射光谱探测理论

大气散射处于动力学区域 ($0.3 \leq y \leq 3$), 瑞利光谱谱线和布里渊光谱谱线部分混叠在一起, 对其进行检测和识别变得更为复杂。因此对于大气直接散射光谱探测, 进行大气瑞利布里渊散射光谱谱线的特性研究和大气环境要素反演模型研究都十分重要。

大气中分子的分布满足玻尔兹曼分布规律, 对于大气瑞利布里渊散射, 理论上可以采用求解非线性玻尔兹曼方程来获得大气瑞利布里渊散射光谱。但是非线性玻尔兹曼方程的求解非常困难, 一般是通过求解近似的线性玻尔兹曼方程来获得大气瑞利布里渊散射光谱模型, 如最早的 S6 和 S7 模型等。但是这些模型为非解析模型, 其求解过程依然非常复杂, 同时也无法将内部的瑞利成分和布里渊成分分离开, 只能实现单参数的反演。因此, 更多研究趋向于对谱线线型的近似描述, 即基于谱线展宽理论的解析模型。解析模型求解过程简单, 并且可以区分内部瑞利和布里渊成分, 获得更多的光谱特征参量, 通过光谱特征参量的提取, 可以建立与大气环境参数的联系。

在早期的研究中, 瑞利布里渊散射光谱简单近似为高斯函数来反演温度。2009 年, 在密歇根大学光学大气数据系统 (optical air data system, OADS) 中^[44], 首先采用了高斯函数来描述瑞利布里渊散射光谱。OADS 利用瑞利布里渊散射光谱的整体线宽反演大气温度, 接着再利用瑞利布里渊散射回波能量反演大气密度, 最后利用反演得到的温度、密度反演大气压强。

该反演方法中用于描述大气瑞利布里渊散射光谱的高斯模型表达式如下^[44]:

$$G_{\text{mol}}(\Delta\nu, \Delta\nu_G) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta\nu_G} e^{-\frac{\Delta\nu^2}{\Delta\nu_G^2}} \quad (13)$$

高斯拟合如图 4 所示, 该模型主要对瑞利散射进行高斯拟合, 对内部布里渊散射的谱线有所忽略。

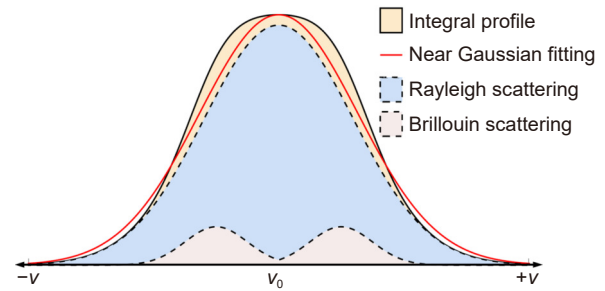


图 4 大气瑞利布里渊高斯拟合示意图

Fig. 4 Schematic diagram of approximation Gaussian fitting for Rayleigh-Brillouin in the atmosphere

高斯拟合的半高线宽表达式如下^[44]:

$$\Delta\nu_G = \frac{\nu_l}{c} \left(\frac{2kT}{m} \right)^{1/2} \quad (14)$$

式中: k 为玻尔兹曼常量, m 为大气分子平均质量, T 为大气温度, ν_l 为激光频率。

由式 (14) 可以看出, 半高线宽与大气温度的平方根是成正比的关系, 基于此可以实现对大气温度的反演。

同时, 通过接收大气瑞利布里渊散射光谱还可以获取其回波能量。由激光雷达方程可知, 瑞利布里渊散射回波信号光子数与大气密度有关, 其关系表达式如下^[44]:

$$\rho = C \cdot M_{\text{counts}} \quad (15)$$

其中: C 是一个常数, M_{counts} 为分子散射光子数。

已知大气温度、密度值后, 再根据理想气体状态方程就可以获取大气压强值, 理想气体状态方程表达式如下^[44]:

$$pM = \rho RT \quad (16)$$

其中: M 为气体摩尔质量, R 为理想气体常数。

由上述论述可知, 大气压强值的反演精度取决于大气温度值和大气密度值的反演精度。在理想条件下, 大气压强的误差主要受大气温度反演精度的影响, 而利用上述方法反演出的大气温度误差最大理论上就有 2.15 K, 实际大气瑞利布里渊散射光谱受噪声影响会带来整体线宽读取的误差, 同时在对大气瑞利布里

渊散射谱线进行描述时, 忽略了对布里渊散射的影响, 这导致最终高斯函数并不能很好地匹配实际的光谱数据, 从而使得获得的整体线宽产生误差, 如图 4 所示。线宽误差使得反演的温度误差进一步扩大, 导致最终反演的压强误差也进一步扩大。

为了避免 OADS 中对布里渊散射影响的忽略, 后续研究通过解析模型对瑞利布里渊光谱谱线内部成分进行了描述, 兼顾考虑瑞利散射和布里渊散射的影响。在 2011 年, Witchas 建立了 G3 模型, 该模型从谱线展宽理论出发, 用三个高斯函数进行瑞利布里渊散射谱线的描述^[45]。G3 模型的表达式为^[45]

$$S(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} \mathcal{A} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_R}\right)^2\right] + \frac{1-\mathcal{A}}{2\sqrt{2\pi}\sigma_B} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x+x_B}{\sigma_B}\right)^2\right] + \frac{1-\mathcal{A}}{2\sqrt{2\pi}\sigma_B} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_B}{\sigma_B}\right)^2\right]. \quad (17)$$

Witchas 导出了一个用于描述大气中瑞利布里渊谱线的易于处理的分析模型。该模型对于 $0 \leq y \leq 1.027$ 有效, 理论仿真表明在该区域内其与 Tenti S6 模型的偏差小于 0.85%。但该模型在气体温度、压强较高时会产生一定偏差, 因为此时瑞利布里渊谱线内部成分并不符合高斯函数形式。

为了使得所有区域内瑞利布里渊散射谱线均可以得到较好的表示, 需要对 G3 模型进行改进。在 2012 年, 华中科技大学的马泳等建立了 V3 模型, 该模型利用高斯函数与洛伦兹函数的卷积类 Voigt 函数进行瑞利布里渊散射谱线的描述^[46], V3 模型的表达式为^[46]

$$V_{RB} = C_0^T \{ \text{Diag}(\rho)G + [I_3 - \text{Diag}(\rho)]L \}. \quad (18)$$

V3 模型与 S7、S6 模型在不同压力条件下吻合的都非常好, 同时 V3 模型适用于 $y \leq 1$ 和 $y > 1$ 的区域, 比 G3 模型适应范围更广。此外, 由于 V3 线性函数包括瑞利峰和布里渊峰的独立表达形式, 非常有助于将它们分开, 从而获取各自更加精确的光谱特征参数。

解析模型的建立, 能够更加方便地获取多种光谱特征参数, 为实现大气环境参数的反演奠定了模型基础。但要对大气多环境要素的反演, 还需要对环境要素与光谱特征参数之间的耦合关系进行研究, 建立环境要素反演模型。在此方面诸多学者开展了研究,

反演的环境要素主要为温度和压强这两个大气基本物理参量。

早期的大气温度测量模型即为前文所述的 OADS 模型, 这一模型在反演温度时步骤较为复杂, 同时只是将瑞利布里渊散射光谱简单近似为高斯函数来提取整体线宽反演温度, 这使得最终的温度反演误差较大。在 2017 年, 华中科技大学的梁琨等深入研究大气瑞利布里渊散射谱线特性, 建立了大气温度与瑞利布里渊散射光谱整体线宽和压强之间的联系, 提出了基于整体线宽和压强的温度反演模型^[47], 该模型避免了将瑞利布里渊散射光谱简单近似为高斯函数, 而是采用 V3 模型对光谱谱线进行描述来提取更高精度的整体线宽, 并直接建立其与温度的关系, 使得温度测量精度有所提升。该反演模型利用 130 组整体线宽 (l)、温度 (T) 和压力 (p) 之间一一对应的数据, 使用最小二乘拟合获得 $T(l, p)$ 函数, 其形式为^[47]

$$T(l, p) = c_0 + c_1 l + c_2 p + c_3 l^2 + c_4 p^2 + c_5 l p + c_6 l^3 + c_7 p^3 + c_8 l p^2 + c_9 l^2 p, \quad (19)$$

其中, 系数 $c_0 \sim c_9$ 为常数, 具体取值见参考文献 [47]。

该模型适用于对流层温度的遥感, 对温度的反演简便、快速。研究表明, 该模型反演的温度误差在 3 K 以内, 证明了该方法的有效性。但该模型需要已知压强值才可以进行温度的反演, 为单一参数反演模型。在实际进行大气环境要素遥感探测时, 压强参数并不能事先获得, 因此上述反演模型并不适应于实际观测应用。

为了避免需事先测量压强等参数的问题以及满足实际环境要素遥感探测需求, 2021 年华中科技大学的张鹏等开展了大气温压同步反演模型的研究, 利用散射光谱的整体线宽以及瑞利线宽反演大气温度和压强, 从而实现大气温压的反演^[48]。该方法用 V3 模型对大气瑞利布里渊散射光谱内部成分进行描述来获取散射光谱瑞利线宽 Γ_R 和整体线宽 Γ_{RBS} 。然后基于不同温度、压强条件下的 Γ_R 和 Γ_{RBS} 与温度、压强之间对应的数据, 使用最小二乘拟合获得 $T(\Gamma_R, \Gamma_{RBS})$ 、 $P(\Gamma_R, \Gamma_{RBS})$ 函数, 其形式为^[48]:

$$T = 114.08 + 253.15\Gamma_R - 341.51\Gamma_{RBS} - 104.34\Gamma_R^2 + 121.37\Gamma_{RBS}^2 + 42.68\Gamma_R\Gamma_{RBS} - 227.68\Gamma_R^3 + 145.92\Gamma_{RBS}^3 - 559.31\Gamma_R\Gamma_{RBS}^2 + 642.97\Gamma_R^2\Gamma_{RBS}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
P = & 7.36 - 17.26\Gamma_R + 6.41\Gamma_{RBS} + 11.63\Gamma_R^2 \\
& + 1.08\Gamma_{RBS}^2 - 7.46\Gamma_R\Gamma_{RBS} - 0.23\Gamma_R^3 \\
& - 1.01\Gamma_{RBS}^3 + 3.75\Gamma_R\Gamma_{RBS}^2 - 3.34\Gamma_R^2\Gamma_{RBS}. \quad (21)
\end{aligned}$$

氮气的实验光谱数据表明, 该模型在压力为 10 kPa 的情况下, 温度反演误差仅达到 1.56 K, 温度和压力反演误差可以满足实际气体检测的要求。对于空气, 该模型温度反演的最大误差为 1.202 K, 压力反演的最大误差为 8.3 kPa。然而, 实际大气环境下的散射光谱数据受外界因素干扰较大, 在对瑞利布里渊散射谱线进行内部成分分解时, 由于约束条件不够, 导致内部成分的光谱特征参数值存在着多值解的问题, 此时无法获取真实准确的光谱特征参数值, 也就无法实现对大气温压的精确反演。

后来在 2021 年华中科技大学的许佳琪等研究了利用相较于瑞利线宽更易获取的布里渊频移和光谱整体线宽这两个特征参数进行大气温压的反演^[49]。在该研究中, 其根据修正后的布里渊频移公式结合整体线宽模型, 建立了温压反演模型, 表达式为^[49]

$$\begin{cases} f_B(y) = \frac{2n}{\lambda} \sqrt{\frac{c_p \kappa_B T}{c_p m}} e^{-T_0 \frac{\pi y}{100}} \sin(\theta/2) \\ T(l, p) = c_0 + c_1 l + c_2 p + c_3 l^2 + c_4 p^2 + c_5 l p \\ \quad + c_6 l^3 + c_7 p^3 + c_8 l p^2 + c_9 l^2 p \end{cases} \quad (22)$$

该方法通过 G3 模型获得布里渊频移和整体线宽, 并基于式 (22) 来获得温度和压强数据。外场大气数据表明, 该模型得到的压强误差范围在 0.54 kPa~1.49 kPa 之间, 相对误差为 0.55%~1.57%, 得到的温度误差在 0.94 K~2.42 K 之间, 相对误差为 0.33%~0.82%。该模型通过线宽模型求解温度, 进而利用布里渊频移理论拟合得到压强值, 虽然使用了更易获取的布里渊频移, 但该模型也涉及到瑞利布里渊光谱内部成分的分解, 这一过程会引入这些参数的误差, 从而影响最终反演的温压误差。

2022 年, 华中科技大学的王蓓进一步开展了大气温压同步反演模型的研究^[50], 她所建立的反演模型主要从外部廓线出发, 利用大气瑞利布里渊散射光谱的回波能量和整体线宽这两个外部整体光谱特征参量进行大气温压同步反演, 由此避免了进行瑞利布里渊光谱内部成分分解导致的多值解问题。在回波能量方面, 与大气温度、压强直接相关的是分子后向散射。因此, 其通过将温度和压强同时作为自变量, 得到不同温压条件下整体线宽、分子后向散射系数的数据, 然后依据这些数据建立温压反演模型, 表达式为^[50]

$$\begin{aligned}
T = & a_1 + b_1 l + c_1 N + d_1 l^2 + e_1 N^2 + f_1 l N \\
& + g_1 l^3 + h_1 N^3 + i_1 l N^2 + j_1 l^2 N, \quad (23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p = & a_2 + b_2 l + c_2 N + d_2 l^2 + e_2 N^2 + f_2 l N \\
& + g_2 l^3 + h_2 N^3 + i_2 l N^2 + j_2 l^2 N. \quad (24)
\end{aligned}$$

模型中的具体参数结果见参考文献 [50]。

仿真结果显示, 由该公式计算得到大气温度误差值小于 0.2 K, 温度平均反演误差为 0.07 K, 计算得到大气压强相对误差小于 0.18%, 压强平均相对反演误差为 0.04%, 该反演模型理论反演误差比较小。在实际数据的验证上, 该反演方法得到的温度和压强反演结果与探空仪实测的温度、压强廓线进行比较, 结果表明, 在 4~9 km 海拔区域内, 温度反演误差在 3 K 以内, 平均误差为 1.75 K, 而压强相对反演误差在 4% 以内, 平均相对反演误差为 2.92%。

大气直接散射光谱探测理论也在逐渐向高精度、多参数方向发展, 其在谱线描述上也在向着更加精确的解析模型发展。早期 OADS 的模型将瑞利布里渊散射光谱近似为高斯函数, 忽略了布里渊散射影响, 导致温度测量误差较大; 为了避免 OADS 对布里渊散射忽略的问题, Witchas 建立了 G3 模型, 这一模型对瑞利散射和布里渊散射进行了分解, 但其在高温高压时效果不佳; 马泳等建立了 V3 模型, 能够在 $y \leq 1$ 和 $y > 1$ 的区域都可以和非解析模型 S6、S7 模型很好地吻合。在大气温压反演理论上, 有别于 OADS 的模型, 梁琨等基于 V3 模型提取更加精确的整体线宽建立了温度反演模型, 提高了温度反演精度, 但这一模型仍需要已知压强信息, 压强测量误差会对温度测量精度带来较大影响。为了避免压强影响, 研究人员提出了温压同步反演的双参数模型, 张鹏建立的模型可以实现温压同步反演, 但其利用的是难以更高精度获取的瑞利线宽, 降低了测量精度; 许佳琪则选择了相比较容易提取的布里渊频移构建双参数反演模型, 提高了温压测量精度。但这两类模型都使用了光谱内部成分, 在对光谱内部成分分解时存在多值解问题, 从而影响到最终的温压测量。因此, 王蓓为了避免这一问题, 选择使用外部整体光谱特征参量进行大气温压同步反演, 这一模型在温压反演上取得了很好的结果。因此, 大气环境要素探测相较于水下环境要素探测更加困难, 外部整体光谱特征相较于内部成分特征更容易获取, 使得最终的大气环境要素探测更加容易和精确。

3 直接散射光谱的测量方法

光谱的精确测量是 DSSL 实现多环境要素探测的前提, DSSL 光谱测量的精确性和稳定性主要体现在系统的发射部分和接收部分。在发射部分, 需要采用具备良好稳频特性和窄线宽的激光器, 从而降低直接散射光谱的整体抖动情况, 以及减少激光线宽对直接散射光谱测量的误差影响。在 DSSL 发射部分达到要求时, 其关键研究就在于接收端的光谱测量技术。

目前, 可用于直接散射光谱测量的技术主要有法布里珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 扫描干涉仪技术^[51-54]、F-P 标准具结合增强型电耦合器 (intensified charge coupled device, ICCD) 技术^[55-58]、多边缘探测技术^[59-60]、菲索 (Fizeau) 干涉仪结合光电倍增管 (photomultiplier tubes, PMT) 阵列探测技术^[61-64] 和虚像相位阵列 (virtually imaged phased array, VIPA) 干涉仪技术^[65-66] 等。

3.1 F-P 扫描干涉仪技术

F-P 干涉仪一般由两块内侧镀有高反射膜的平行玻璃板或石英板构成。如图 5 所示, G_1 与 G_2 为两块玻璃板, m_1 与 m_2 为镀了高反射薄膜的互相平行的内侧, Q_1 区域为反射腔。光束 I 垂直入射 F-P 干涉仪时光在反射腔内进行多次反射, T_n 为透射光、 R_n 为反射光。其中满足相干干涉条件的光会极大透过 F-P 干涉仪, 通过改变 F-P 的腔长, 可以输出对应不同频率的透射光, 之后的透射光则可以通过光电转换器件如 PMT 进行接收。F-P 干涉仪腔长一般可以通过 PZT、温度、压强等进行控制。Kai^[51] 和 Gu^[53] 等研究小组分别采用这一技术获得了水下和大气瑞利布里渊散射光谱。

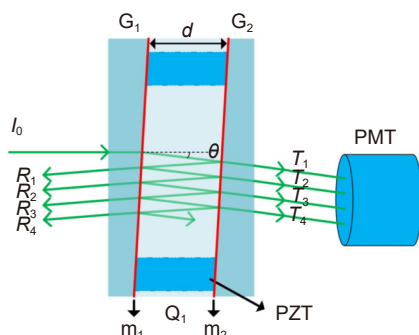


图 5 F-P 干涉仪原理图

Fig. 5 Schematic diagram of F-P interferometer

Kai 等人在 2008 年使用扫描 F-P 干涉仪获取水中布里渊散射光谱的实验装置图如图 6 所示^[51]。实验使

用 F-P 扫描干涉仪与 PMT 作为光谱接收系统的核心, 扫描周期为 50 s, 数据采集持续 9 小时以上。图 7 为扫描 F-P 干涉仪测得的水下布里渊散射谱线图, 可以看到干涉仪自由光谱范围为 20.622 GHz, 布里渊散射峰无混叠地对称分布在瑞利峰的两侧。通过对得到的光谱进行拟合, 获得的布里渊频移为 7.603 ± 0.015 GHz, 光谱测量的平均误差为 14.4 MHz。频移反演的温度误差为 0.57 °C。该方式获得的结果精度比较高, 但是其仅能得到固定距离水中的散射光谱, 无法获取一段距离内各点的散射光谱, 并且实验持续时间较长。

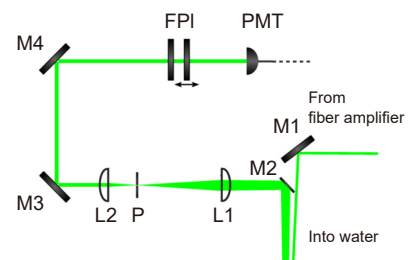


图 6 扫描 F-P 干涉仪测量水中布里渊散射实验装置图^[51]

Fig. 6 Experimental diagram of scanning F-P interferometer for measuring Brillouin scattering in water

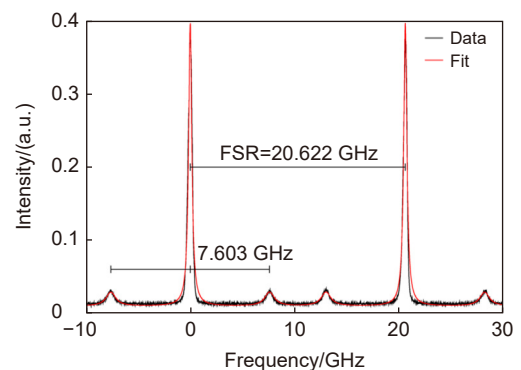


图 7 使用扫描 F-P 干涉仪在水中测得的布里渊散射谱线图^[51]

Fig. 7 Brillouin scattering spectrum plot obtained using scanning F-P interferometer in water

Gu 等人使用扫描 F-P 干涉仪在气体中测量布里渊散射的实验装置图如图 8 所示^[53]。实验将激光入射气室中并发生散射, 通过 F-P 干涉仪与 PMT 获得布里渊散射光谱。在该气体实验中, 扫描周期为 780 s, 干涉仪自由光谱范围为 7.5 GHz。如图 9 所示为扫描 F-P 干涉仪在大气中测得的布里渊散射谱线与理论谱线对比图。图中, 布里渊散射峰对称分布在瑞利散射峰两侧并发生混叠, 实验谱与理论谱误差在 3% 以内。

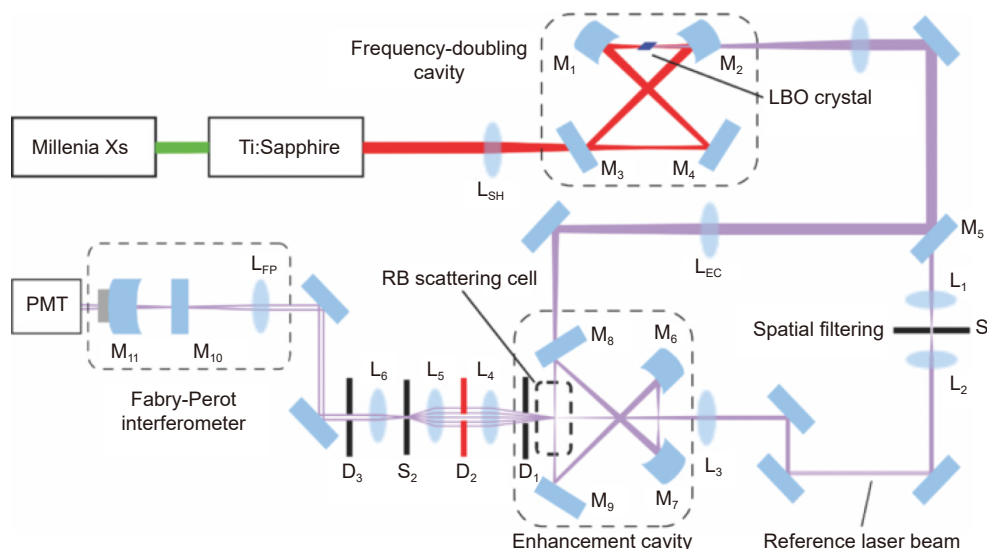
图 8 采用扫描 F-P 干涉仪的大气激光雷达系统实验装置图^[53]

Fig. 8 Experimental diagram of atmospheric LiDAR system with scanning F-P interferometer

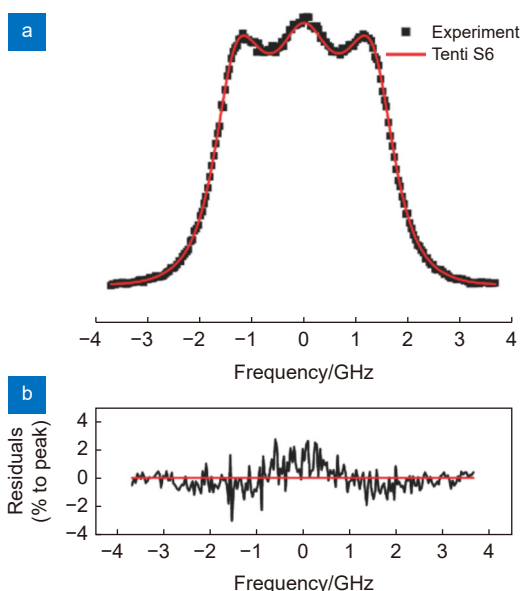


图 9 使用扫描 F-P 干涉仪在大气中测得的布里渊散射谱线与理论谱线对比图^[53]。(a) 最终的瑞利布里渊散射剖面；
(b) 测量值与 Tenti S6 模型之间的残差

Fig. 9 Comparison of experimental and theoretical Brillouin scattering spectrum using scanning F-P interferometer in the atmosphere. (a) The final Rayleigh-Brillouin scattering profile; (b) Residuals between experimental measurements and Tenti S6 model

荷兰阿姆斯特丹自由大学的 Ubachs 等在 2020 年利用扫描 F-P 干涉仪在实验室内进一步对空气的瑞利布里渊散射光谱进行了分析^[54]。该实验中，激光波长为 532.22 nm，功率为 5 W，带宽低于 5 MHz，实验气室的压强变化范围为 25~300 kPa，温度变化范围

为 273.2~333.2 K。瑞利布里渊散射光谱的分布通过压电扫描 F-P 干涉仪来记录，每一步的积分时间为 1 s，通常超过 18 MHz。在大约 3 小时内获得了覆盖大量连续瑞利布里渊峰值和 10000 个数据点的全谱。利用所获得的瑞利布里渊散射光谱，Ubachs 等获取了空气的体积粘度 η_b ，并对其与温度的关系进行了分析，发现在一定压强时， η_b 与温度呈线性关系，如图 10(a) 所示，该实验获得的部分散射光谱如图 10(b) 所示。

扫描干涉仪技术可以精确获取散射光谱，但是对入射到干涉仪的光角度要求严格，在实际应用中对系统光路的稳定性要求较高。此外，扫描需要获得一次布里渊散射光谱扫描耗时较长，导致散射光谱的测量不满足实时快速的要求，同时该方法仅能一次性获得单个散射点的散射光谱，无法获得剖面信息，在实际运用上存在有一定缺陷。

3.2 F-P 标准具结合 ICCD 的技术

为了能够获得实时的散射光谱，北京师范大学史久林等人对海洋布里渊激光雷达接收系统进行改进，将接收部分改为 F-P 标准具结合 ICCD 的方式对瑞利布里渊散射光谱进行探测^[55]。F-P 标准具与干涉仪的区别在于 F-P 标准具两个玻璃板的间隔 d 为一固定值。F-P 标准具结合 ICCD 的检测原理图如图 11 所示，光束 I 在入射 F-P 标准具时，光在反射腔内进行多次反射和透射， T_n 为透射光、 R_n 为反射光。透射光经过透镜汇聚到平面上的某一点。入射到标准具的折射角

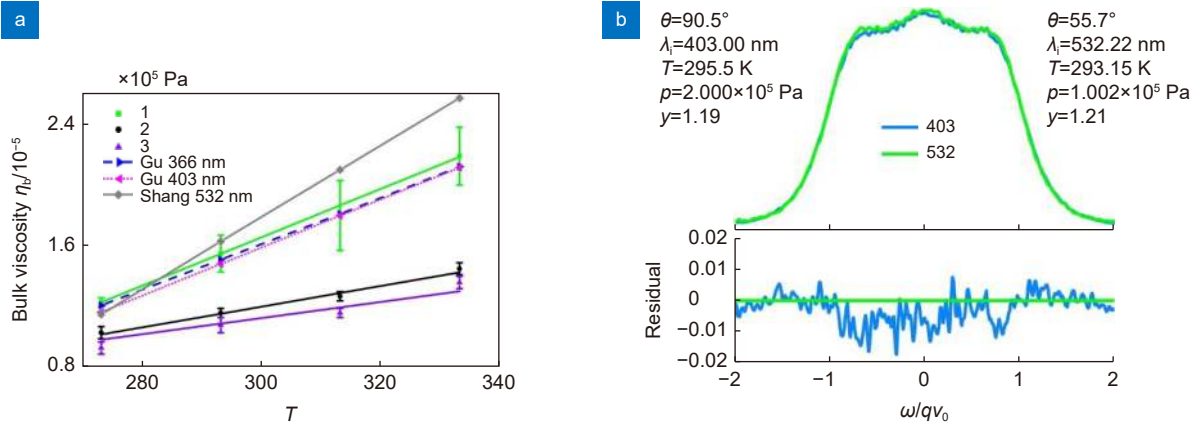


图 10 Ubachs 实验结果图^[54]。(a) 体积粘度 η_b 与温度对应关系; (b) 瑞利布里渊散射光谱图
Fig. 10 Ubachs experimental results map^[54]. (a) Correlation between volume viscosity η_b and temperature; (b) Rayleigh Brillouin scattering spectrum

θ 不同, 透射光经过凸透镜后聚焦的点的位置也不一样, 而该点的亮暗则取决于透射光束之间的光程差。相同折射角度光束的聚焦点则形成等倾的二维干涉圆环, 使用 ICCD 就可以获得干涉圆环光谱。由于散射光通过 F-P 标准具后就能即刻分离开, 因此, 该方法能够满足实时探测的需求。

2011 年华东科技大学梁琨等人利用 F-P 标准具结合 ICCD 技术精确测量了海洋中的瑞利布里渊散射谱^[56], 实验中 F-P 标准具的自由光谱范围为 19.6 GHz, 采用的 ICCD 相机分辨率为 1024×256 , 像素为 $26 \mu\text{s} \times 26 \mu\text{s}$, 最小门宽为 2 ns, 如图 12 所示为海水中测得的布里渊散射谱线图。经过去噪、平滑和拟合后的谱线在情况 10°C 下谱频移相对误差仅在 0.36%~0.95%, 线宽相对误差仅在 0.14%~0.86%。

2022 年南昌航空大学的徐宁等利用 F-P 标准具结合 ICCD 技术进行了海水的瑞利布里渊散射光谱测

量以及利用该测量光谱进行了水体温度和盐度的反演^[37]。实验中 F-P 标准具的自由光谱范围为 20.1 GHz, ICCD 相机参数同上述实验一样, 该实验测量了不同温度和盐度下的布里渊频移和线宽, 以实际温度 20°C 和实际盐度 35‰为例, 图 13(a) 为实验中 ICCD 采集到的圆环光谱图。将圆环光谱转化为二维光谱并进行低通滤波去噪、线性拟合、谱线去展宽等数据处理, 从而获得频移和线宽值, 如图 13(b) 所示。由处理后的光谱信号计算得到频移和线宽的实验测量值分别为 7.682 GHz 和 0.652 GHz。将频移和线宽值代入反演公式中进行温度和盐度的反演求解, 得到的温度和盐度值分别为 20.38°C 和 35.62‰。温度和盐度的反演误差主要取决于频移和线宽的实验测量误差, 误差结果如图 14 所示。在图 14(a) 中, 实验的频移和线宽测量误差均在 10 MHz 以内。在图 14(b) 中, 温度的反演误差在 0.4°C 以内, 盐度的反演误差在 0.7‰以

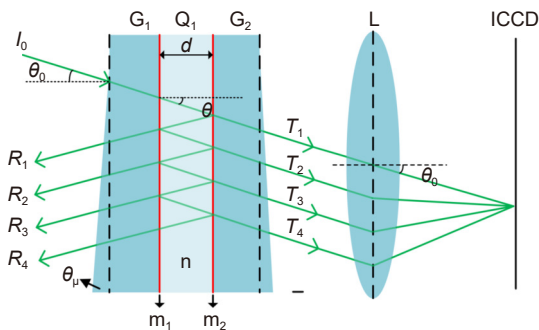


图 11 F-P 标准具结合 ICCD 进行光谱检测原理图

Fig. 11 Schematic diagram of spectrum detection using F-P etalon combined with ICCD

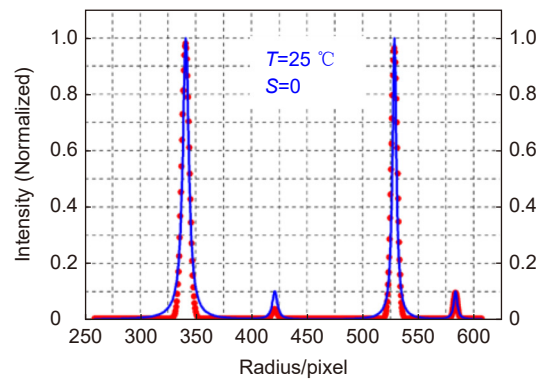


图 12 使用 F-P 标准具结合 ICCD 测得的海水瑞利布里渊散射谱线图^[56]

Fig. 12 Brillouin scattering spectra obtained in seawater using F-P etalon combined with ICCD^[56]

内, 频移和线宽的测量误差越大, 温度和盐度的反演误差也越大。

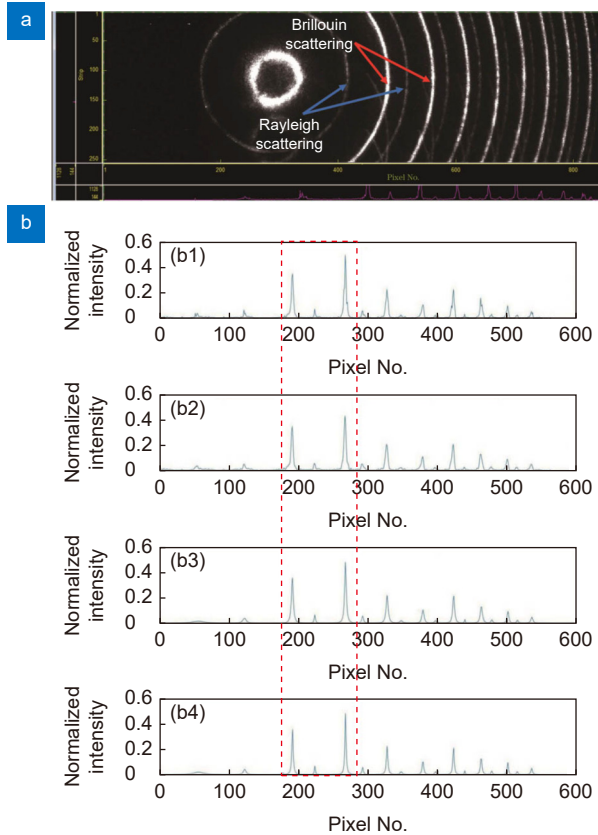


图 13 实验原始光谱及处理后结果^[57]。(a) 实际温度 20℃ 和实际盐度 35‰ 下 ICCD 采集的干涉光谱图; (b) 散射信号的二维光谱及其处理

Fig. 13 Experimental raw spectra and processed results. (a) Interference spectrogram collected by ICCD with actual temperature of 20 °C and actual salinity of 35‰; (b) Two-dimensional spectra and processing of scattering signals

采用 F-P 标准具结合 ICCD 的激光雷达系统可以

一次性在空间上采集出完整的散射谱线, 避免了 F-P 扫描干涉仪用时间区分不同的频率采集完整谱线耗时较长的问题, 从而达到实时测量光谱的要求。同时该方法也存在新的问题, 因为其获取的是二维散射圆环图, 不能直接用于测量, 需要对该图样进行处理转化为瑞利布里渊散射谱线才能进行后续的反演工作。而且 ICCD 的分辨率并不高, 通过其获得的二维散射圆环图的分辨率限制了多环境要素反演的高精度要求, 需要进一步采用处理算法提升分辨率。

3.3 多边缘探测技术

F-P 扫描干涉仪技术和 F-P 标准具结合 ICCD 的技术都可以对散射光谱进行高灵敏度和高精度的测量, 但前者在光谱测量实时性和连续性上表现较差, 后者因为 ICCD 的积分时间和帧率问题, 不能实现垂直剖面分辨率为米级 (对应时间分辨率为 10 ns 量级) 的连续测量。

面向多环境要素探测需求, 直接散射光谱测量技术不仅要具备高灵敏度和高精度, 还需要兼顾实时性、光谱完整性和测量连续性, 为此华中科技大学的梁琨等针对水下光谱探测提出了多通道边缘技术稀疏重构的直接散射光谱测量方法^[59]。

边缘探测技术最先应用的是在大气领域中, 但其并非用来进行直接散射光谱的探测, 而是利用边缘探测技术测量光谱的多普勒频移进而测量风速^[67-69]。在边缘探测技术中, 激光频率位于高分辨率光学滤波器的光谱响应函数的边缘, 光谱响应函数十分尖锐。由于边缘的陡坡, 整体光谱微小的频率变化会导致滤波器传输产生较大的能量变动, 根据能量变动即可获取对应的整体光谱频率的变化, 即多普勒频移, 如

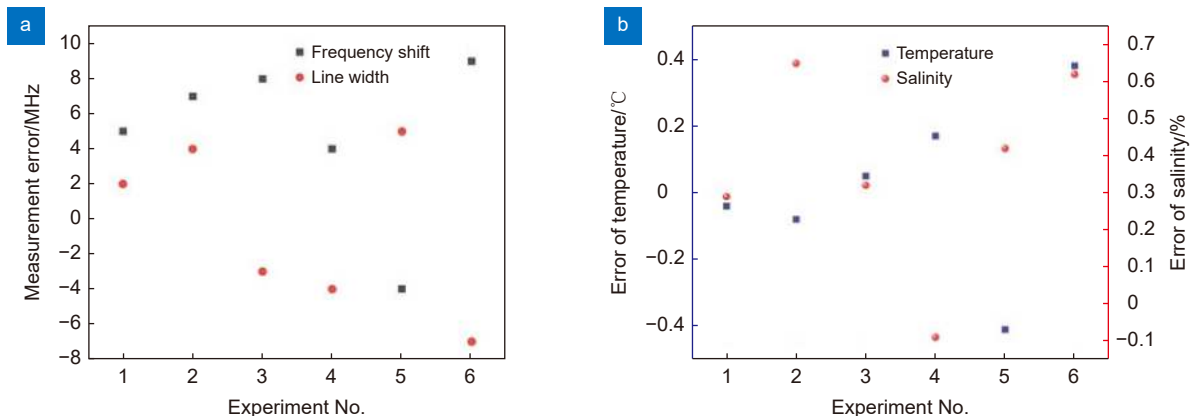


图 14 误差分布图^[57]。(a) 频移和线宽的测量误差; (b) 温度和盐度的反演误差

Fig. 14 Error distribution graphs^[57]. (a) Measurement errors of frequency shift and line width; (b) Inversion errors of temperature and salinity

图 15 所示。盐城师范大学的 Guo 等利用 F-P 标准具四边缘的双频多普勒激光雷达进行了大气风速的测量, 其基本原理如图 16(a) 所示。根据这一多边缘探测技术测量了激光散射光谱的多普勒频移, 从而对径向风速和后向散射比进行了测量, 测量结果如图 16(b, c) 所示, 当总后向散射光子数为 5 万个、后向散射比在 1.1~10 之间时, 在 ±25 m/s 的风速动态范围内, 径向风速误差小于 2 m/s, 后向散射比的相对误差小于 4.1%。

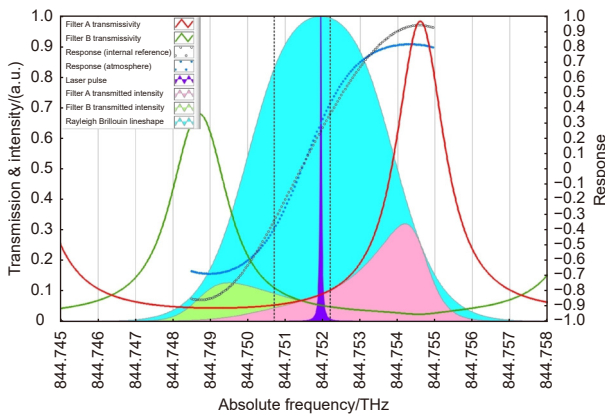


图 15 大气边缘探测技术测量原理图^[67]

Fig. 15 Schematic diagram of atmospheric edge technology^[67]

由 2.2 节直接散射光谱理论可知, 水下布里渊散射发生在流体动力学区域, 光谱可以用洛伦兹函数来表达, 并且该谱函数主要由布里渊频移和布里渊线宽决定。如果已知洛伦兹函数上两个点的位置及能量大小就可以对该函数进行还原, 这意味着只要同时获得通过至少两个光学窄带滤波器后的特征能量点, 就能够根据洛伦兹函数进行布里渊频移以及布里渊线宽的求解, 进而可以重构出布里渊散射光谱。

基于上述思想, 华中科技大学提出了基于稀疏重构的多边缘探测原理, 如图 17(a) 所示, 并搭建了相应的激光雷达系统, 如图 17(b) 所示。两个边缘滤波器分别设置在单个布里渊散射峰的光谱两侧, 透过滤波器的光分别被 PMT2 和 PMT3 接收。因此, 与布里渊频移和线宽变化相对应的温度和盐度的变化将导致被 PMT2 和 PMT3 接收的能量强度的变化, 根据这一能量强度变化可以获得布里渊频移和线宽的变化。边缘滤波器 1 和 2 分别位于布里渊峰两侧的陡峭边缘, 用于从布里渊散射光谱中提取两个特征能量, 同时实验中使用碘分子吸收池作为带阻滤波器来减弱瑞利散射的影响, 使用 PMT1 探测回波能量强度作为参考信号。PMT1、PMT2、PMT3 接收的能量强度分别为 I_g 、 I_1 、 I_2 , 相对能量变化记为 $S_1=I_1/I_g$ 、 $S_2=I_2/I_g$ 。根据理论推导, 该课题组建立了布里渊频移及线宽与相对能量的关系 S_1 、 S_2 之间的依赖关系 $\nu_B(S_1, S_2)$ 和 $\Gamma_B(S_1, S_2)$ 。

该经验模型所测得的布里渊频移和线宽的误差分别低于 4.3 MHz 和 3.2 MHz, 利用所测频移和线宽反演得到的温度和盐度精度较高, 分别达到了 0.1 °C 和 0.5%, 如图 18 所示。

基于稀疏重构的多通道边缘技术, 能够实现探测距离的提高, 同时也可以实现直接散射光谱的高精度测量。但是这种方法对激光器和系统稳定性要求极高, 同时稀疏重构方式获取的散射谱线在分辨率上也会较差, 影响后续温度和盐度反演精确度的提升。

3.4 Fizeau 干涉仪结合 PMT 阵列探测技术

上述三种布里渊散射光谱探测技术都能够实现高灵敏度和高精度的布里渊散射光谱测量, 但是在面向

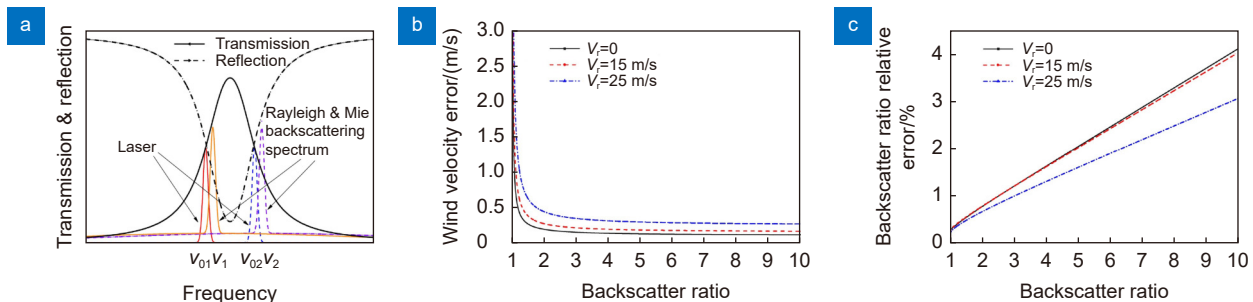


图 16 多边缘探测技术测风原理及测量结果图^[69]。(a) 基于 F-P 标准具四边双频技术的测风原理; (b) 径向风速测量误差; (c) 后向散射比测量误差和后向散射比

Fig. 16 Principle and measurement results of multi-edge detection technique for wind measurement^[69]. (a) Wind measurement principle based on F-P etalon quad-edge and dual-frequency technique; (b) Radial wind speed measurement error; (c) Backscatter ratio measurement error vs. backscatter ratio

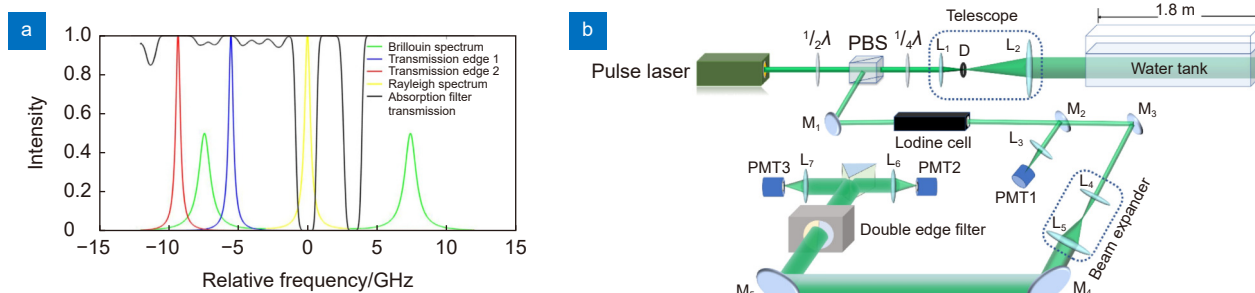


图 17 布里渊散射光谱中使用的双边缘技术。(a) 双边缘滤波技术的原理^[59]；(b) 双边缘水下实验装置系统原理图^[60]

Fig. 17 Double edge technique used in Brillouin scattering spectrum. (a) Principle of double edge filtering technique^[59];
(b) Schematic diagram of the double edge underwater experimental system^[60]

实时性、光谱完整性以及测量连续性这些需求时前两种方式还不能做到兼顾，而多边缘探测技术虽然可以兼顾这几条需求，但其对激光器和系统的稳定性要求较高，在实际应用中存在较大难度。

针对目前在面向多环境要素遥感实际应用需求的直接散射光谱检测技术的要求，同时兼顾实时性、光谱完整性以及测量连续性这几条需求，德国宇航中心提出了 Fizeau 干涉仪结合 PMT 阵列探测技术的直接散射光谱测量方法^[61]，其将直接散射光谱激光雷达的接收端改进为 Fizeau 干涉仪结合 PMT 阵列的方式，使系统能够实时获取直接散射光谱信号。这一技术对激光器和系统的稳定性要求较低，鲁棒性好，符合实际应用需求，该方式测量光谱原理如图 19 所示。

该探测技术采用了 Fizeau 干涉仪作为鉴频器件。Fizeau 干涉仪的基本原理为等厚干涉，当回波散射光通过干涉仪后会形成明亮相间的干涉条纹，当散射光频率发生改变时，条纹的位置也会发生相应的移动，

因此其具有鉴频特性。形成干涉条纹采用 PMT 阵列进行接收，为了达到实时精确完整测量光谱的目的，PMT 需要具有高灵敏度和高时间分辨率。Fizeau 干涉仪解析入射的散射光谱形成出射的干涉条纹，再由 PMT 阵列进行接收，从而将散射光谱的频域信息转化为位置信息。根据这一原理，最终一次成像获得完整的直接散射光谱。

该光谱检测技术被德国宇航局应用于大气温度的测量^[62]，后来华中科技大学梁琨课题组也利用该技术应用于水下和大气直接散射光谱探测多环境要素中^[63-64]。王元庆等人在水下采用了如下系统方案设计，如图 20(a) 所示。其对不同数量的 PMT 通道的布里渊频移和线宽误差进行了仿真和分析。根据布里渊谱和干涉仪特性确定了 Fizeau 干涉仪的参数。考虑到现有实验仪器和成本，PMT 通道数设置为 16 个。为了验证该方法的抗干扰能力，通过仿真反演了频谱偏移时的布里渊频移和线宽。仿真研究结果表明，在 0.762

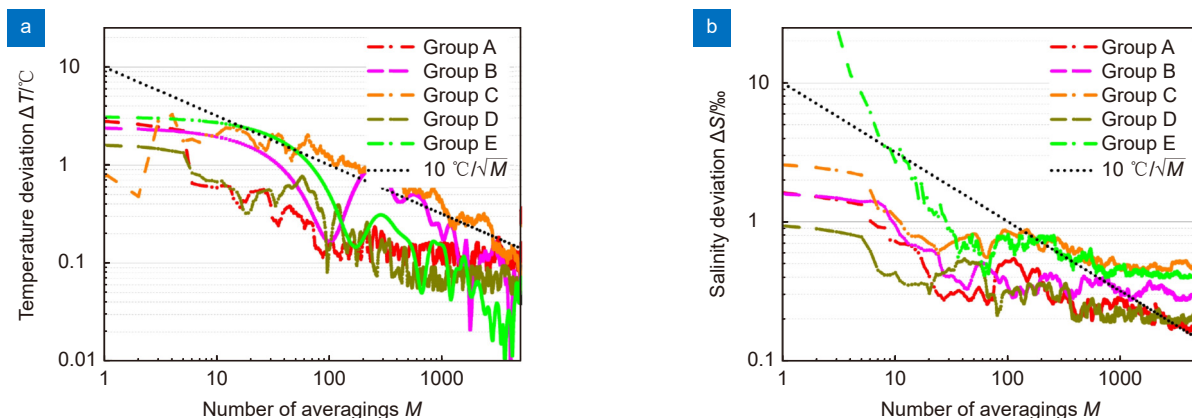


图 18 DSSL 利用双边缘技术反演温盐结果^[60]。(a) 反演温度误差随积分次数变化 (5000 次时误差小于 0.1 °C)；
(b) 反演盐度误差随积分次数变化 (5000 次时误差小于 0.5%)

Fig. 18 Temperature and salinity retrieval using double edge technique in DSSL^[60]. (a) Variation of temperature retrieval error with integration iterations (Error is less than 0.1 °C at 5000 iterations); (b) Variation of salinity retrieval error with integration iterations (Error is less than 0.5% at 5000 iterations)

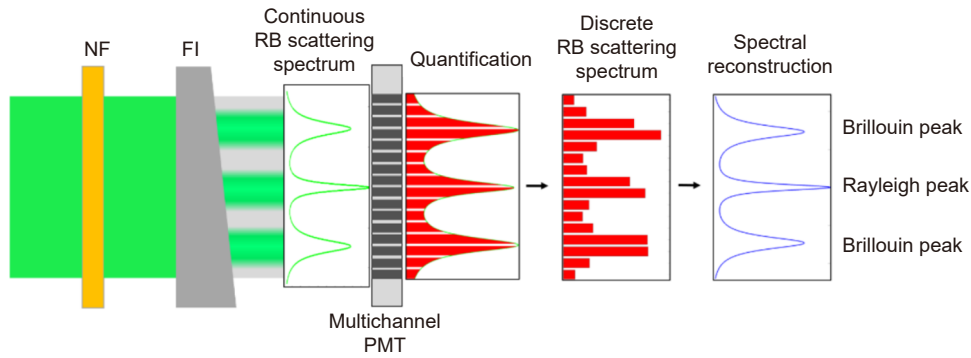


图 19 Fizeau 干涉仪结合 PMT 阵列进行光谱检测原理图

Fig. 19 Schematic diagram of spectrum detection using the Fizeau interferometer combined with PMT array

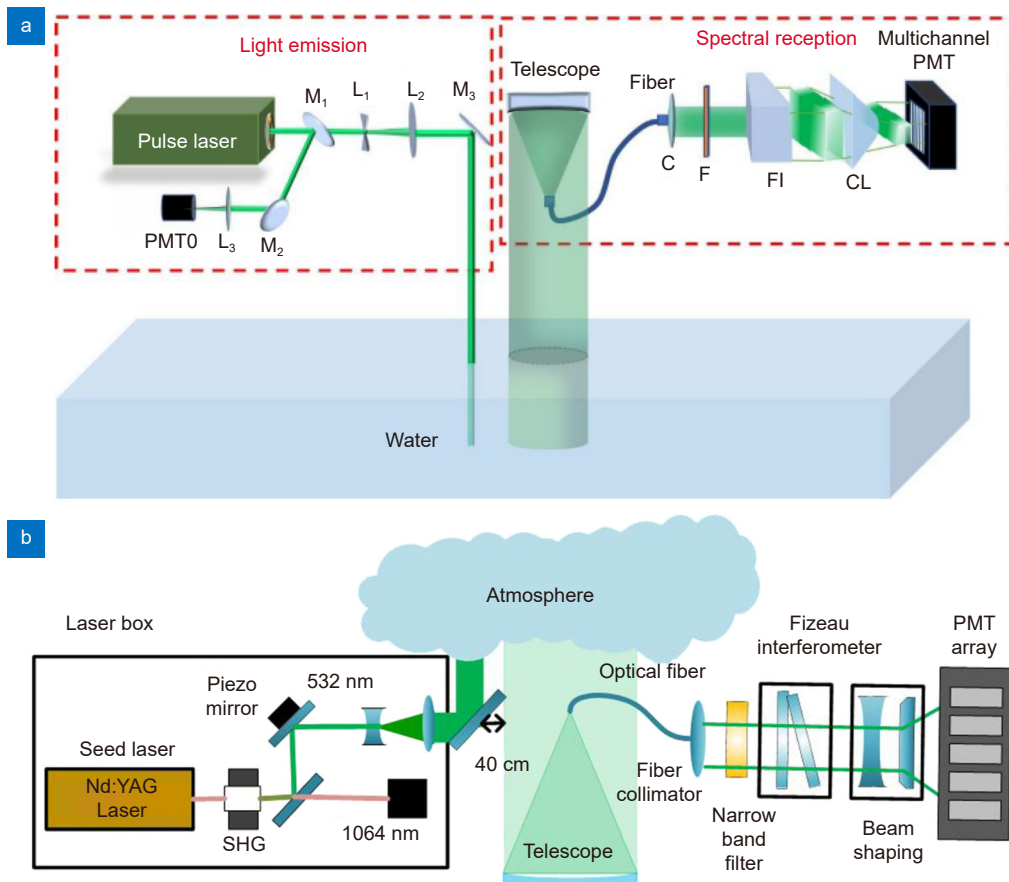


图 20 采用 Fizeau 干涉仪结合 PMT 阵列的激光雷达系统示意图。(a) 水下激光雷达系统示意图^[64]；(b) 大气激光雷达示意图^[63]
 Fig. 20 Schematic diagram of the laser radar system using the Fizeau interferometer combined with PMT array^[64]. (a) Schematic diagram of the underwater LiDAR system; (b) Schematic diagram of the atmospheric LiDAR System^[63]

GHz 范围内，布里渊频移误差小于 2 MHz，布里渊线宽误差大多小于 3 MHz，这表明该方法具有较强的抗干扰能力。在温度测量精度为 0.5 °C、盐度测量精度为 1‰的情况下，该系统有效探测深度超过 40.51 m。

德国宇航中心利用该光谱检测技术在大气中实现了温度的测量，其测量的有效温度误差在 2~8.5 km 高度之间低于±2 K，相应的随机误差在 0.1 K

到 0.4 K 之间变化，如图 21 所示。梁琨课题组采用的基于 Fizeau 干涉仪结合 PMT 阵列的 DSSL 探测系统如图 20(b) 所示。为了验证该系统的功能并表征可实现大气环境参数测量的准确度和精确度，利用该系统进行了从距离地面至 9 km 高空的大气光谱数据测量。基于回波光谱数据，其最终反演的温度在 4.0 km 到 9.2 km 内误差小于 3 K，而该区域的平均误差为

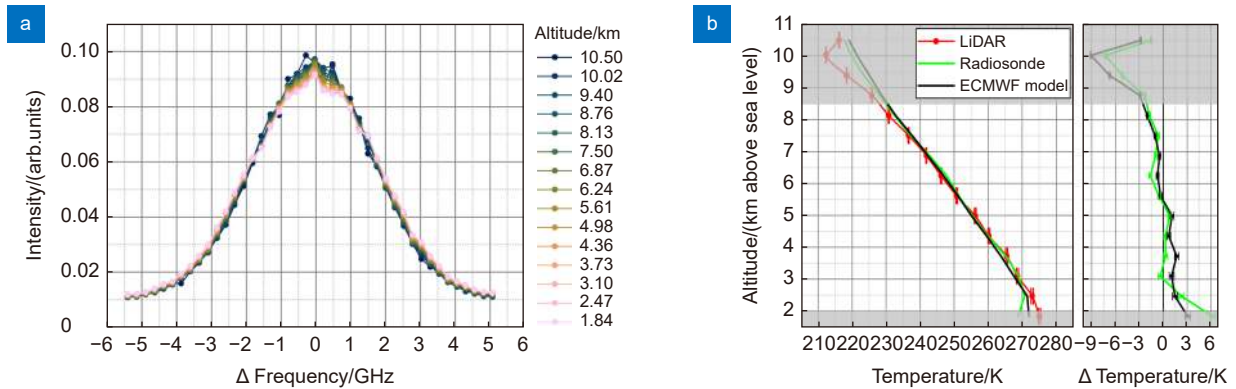


图 21 德国宇航中心瑞利布里渊散射光谱和温度测量结果^[62]。(a) 瑞利布里渊散射光谱不同高度测量结果；(b) 测量温度 (红线) 和无线电探空仪测量温度对比曲线

Fig. 21 Rayleigh Brillouin scattering spectroscopy and temperature measurement results at DLR^[62]. (a) Measurement results of Raman Brillouin scattering spectroscopy at different altitudes; (b) Comparison of measured temperature (red line) with radiosonde measured temperature

2.0 K, 在海拔 4.0 km 处为 1.7 K, 海拔 9.2 km 处为 2.3 K, 如图 22 所示。不仅如此, 在大气参数反演过

程中, 梁琨课题组还利用光谱数据评估了气溶胶和风速的探测能力^[50], 如图 23 所示。图 23(a) 显示了不同

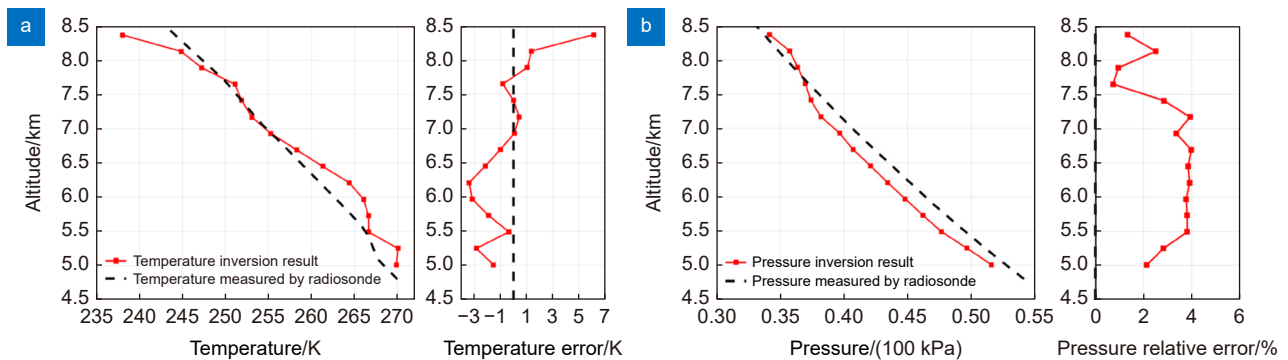


图 22 DSSL 反演温压结果^[50]。(a) 反演温度 (红线) 和无线电探空仪测量温度对比曲线；(b) 反演压强 (红线) 和无线电探空仪测量压强对比曲线

Fig. 22 Temperature and pressure retrieval results based on DSSL^[50]. (a) Comparison of retrieved temperature (red line) with radiosonde measured temperature; (b) Comparison of retrieved pressure (red line) with radiosonde measured pressure

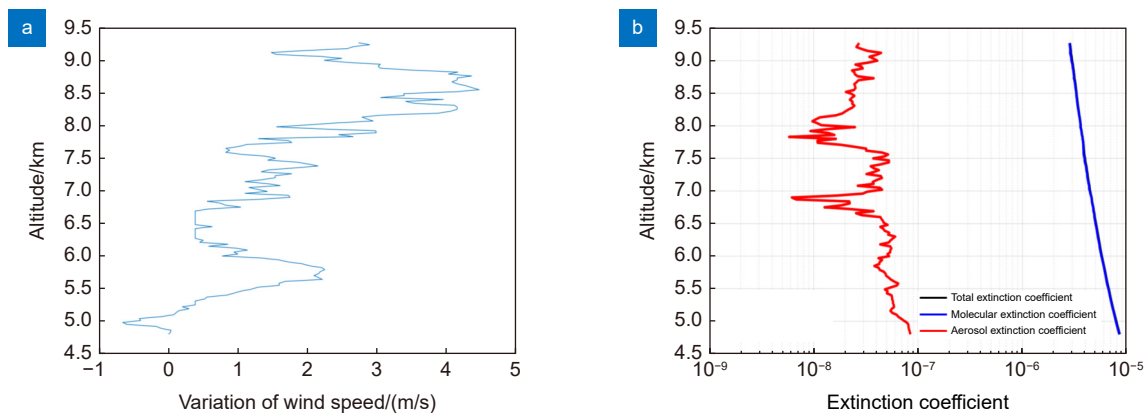


图 23 风速和气溶胶探测潜力结果^[50]。(a) 4~9 km 高度内风速变化量反演结果；(b) 气溶胶消光系数反演结果

Fig. 23 Results of wind velocity and aerosol detection potential^[50]. (a) Retrieval results of wind speed variation within the altitude range of 4~9 km; (b) Retrieval results of aerosol extinction coefficient

高度下风速变化范围在 -1 m/s 到 5 m/s 内。图 23(b) 为基于激光雷达方程, 由米散射能量反演出的气溶胶的消光系数。虽然反演结果没有实测的数据来进行验证, 但是能够说明 DSSL 具有大气风速反演和气溶胶消光系数反演的潜力。

采用 Fizeau 干涉仪结合 PMT 阵列的布里渊激光雷达系统获取的是能够直接用于测量的布里渊散射谱线, 避免了采用 F-P 标准具结合 ICCD 方法需要预先从二维圆环图样中提取出布里渊散射谱或采用一定的方法从中读取频谱信息, 才能进行后续测量的问题, 满足了多环境要素探测实时性的要求。同时频谱分辨率可以通过更改 PMT 阵列通道数来进行提升, 以达到更高精度的频谱参数的获取。

3.5 VIPA 干涉仪技术

Fizeau 干涉仪结合 PMT 阵列探测技术可以实时、连续、完整地探测布里渊散射光谱, 其在实际的工程应用中具备较强的稳定性。同时, 也有研究人员使用其他干涉仪技术用以替代 F-P 干涉仪技术, 以弥补该技术实时性较差的缺点, 其中发展较为成熟的为 VIPA 干涉仪技术。

VIPA 干涉仪的简化模型如图 24 所示, 其相当于倾斜的标准具, 主要组件是一块玻璃板, 其法线相对于输入光略微倾斜。平板玻璃的入射面涂有反射率为 100% 的高反膜, 出射面则涂有高反射率但部分透射、反射率一般为 $95\% \sim 98\%$ 的高反膜。光线在入射面进入玻璃板, 在里面来回反射, 在经过出射面一侧时一小部分光通过反射镜出射, 并经过透镜采集信号, 同时在最后加上 CCD 等相机设备采集最后的光谱数据。

在 2016 年, Meng 等利用 VIPA 干涉仪结合 CCD

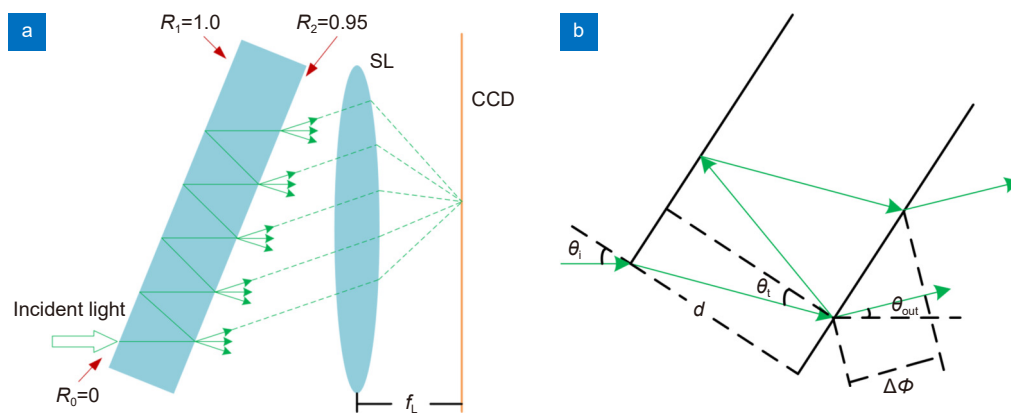


图 24 VIPA 进行光谱检测原理图。(a) VIPA 色散几何图解; (b) VIPA 干涉的特写图

Fig. 24 Schematic diagram of spectrum detection using VIPA. (a) Illustration of the VIPA spectral dispersing geometry; (b) A close-up illustration of the interference geometry of the VIPA

相机进行了水体的布里渊散射光谱的测量^[65], 其实验装置如图 25 所示。该实验采用 532 nm 波长的激光, 利用该技术采集了热水在冷却过程中的布里渊光谱, 初始水温为 45 $^{\circ}\text{C}$, 最终温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 。图 26(a) 显示了冷却过程开始后不同时间收集的典型布里渊光谱。激发功率高达 100 mW, 积分时间为 1 s。将碘池的温度调节至 100 $^{\circ}\text{C}$, 使得弹性峰可以被部分阻挡但仍可识别。最后提取到的布里渊位移和线宽分别如图 26(b) 和图 26(c) 所示。

在 2023 年, Ya 等利用 VIPA 干涉仪进行了气体的布里渊散射光谱的测量^[66]。该实验在 295 K 温度、 $50 \sim 400$ kPa 气压下获取 CO_2 的瑞利布里渊散射光谱, 光谱采集时间为 10 s, 并使用 Tenti S6 模型进行了温度反演分析。该实验获取的不同气压下的瑞利布里渊散射光谱如图 27 所示, 在低压范围内, 光谱中心的瑞利峰占主导地位, 而在较高压力范围内, 布里渊峰与瑞利峰分离。图 27(b) 显示了 400 kPa 气压下 CCD 相机上的瑞利布里渊光谱轮廓图像。每个较大的亮点包含三个条纹, 分别对应于反斯托克斯峰、瑞利峰和斯托克斯峰。CCD 相机上的这一现象也表明瑞利峰和布里渊峰在较高的压力范围内可以完全区分。该实验对所有光谱进行了剖面拟合, 最大拟合均方根误差 (RMSE) 小于 2.95% 。该实验利用所获取的瑞利布里渊散射光谱进行了气体温度的反演, 结果如图 28 所示。三个光谱谱反演的温度绝对误差分别为 0.67 K、 0.21 K 和 2.45 K, 平均绝对误差为 1.11 K。

VIPA 干涉仪技术其相较于 F-P 干涉仪更易搭建, 数据采集速度更快, 可以短时间内获得大量的光谱数据, 具有高光谱分辨率, 可用于较快速度的瑞利布

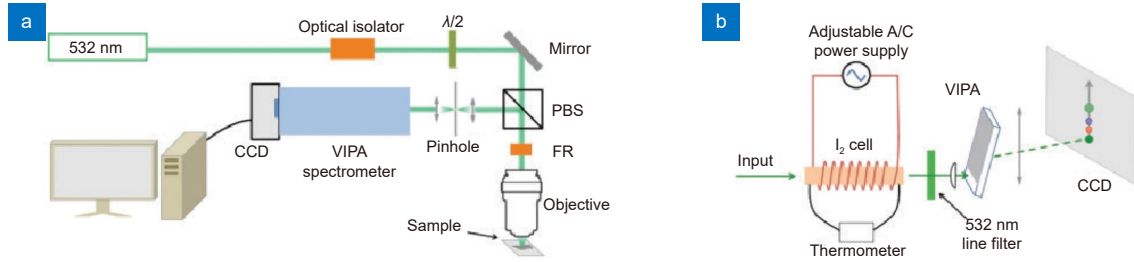


图 25 采用 VIPA 干涉仪结合 CCD 相机的实验装置图^[65]。(a) 布里渊光谱和显微镜的光学装置示意图；(b) VIPA 光谱仪细节
Fig. 25 Experimental setup diagram combining the VIPA interferometer with a CCD camera^[65]. (a) The schematics of the optical setup for the Brillouin spectroscopy and microscopy; (b) The VIPA spectrometer in greater details

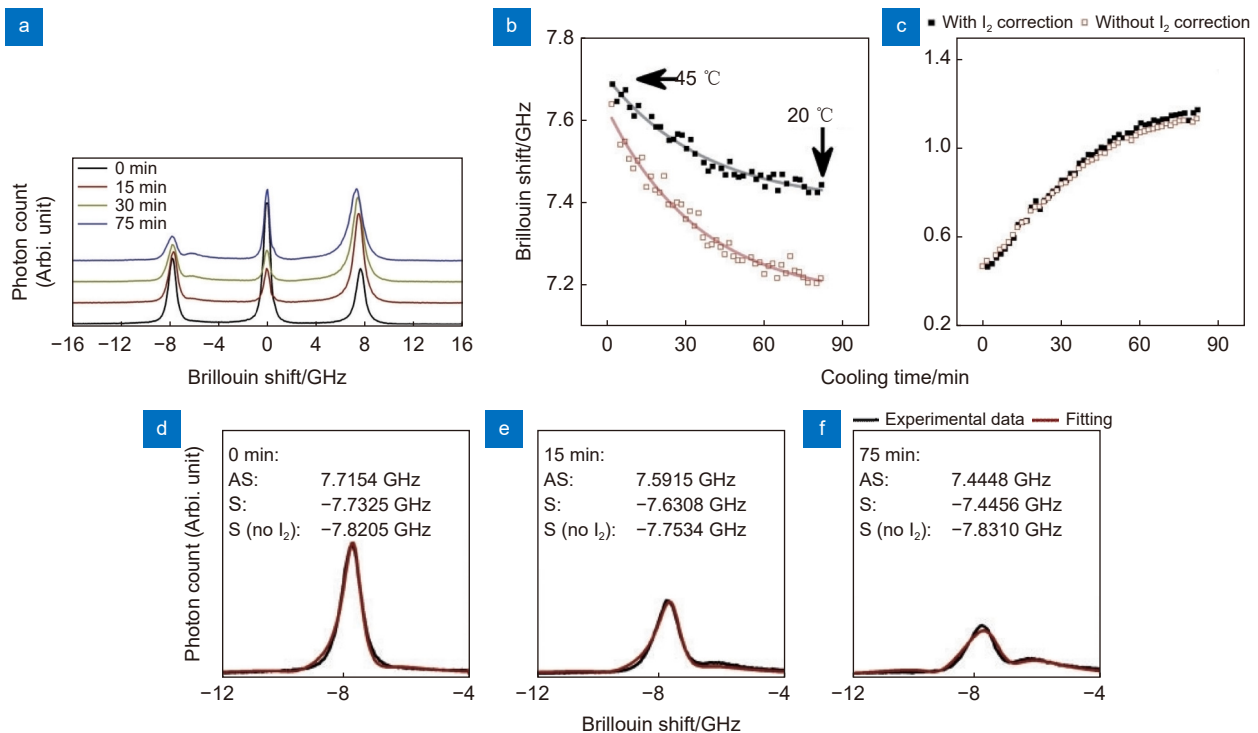


图 26 在热水的自发冷却过程中获得的布里渊散射光谱图^[65]。(a) 不同时间所得布里渊光谱图；(b,c) 在考虑分子碘吸收和
不考虑分子碘吸收的情况下，得到的布里渊位移和线宽；(d-f) 基于 Stokes 峰和反 Stokes 峰的布里渊位移的比较
Fig. 26 Illustration of the Brillouin spectra acquired during a spontaneous cooling process of hot water^[65]. (a) The acquired Brillouin spectra at
different times; (b, c) The retrieved Brillouin shift and linewidth with and without consideration of the molecular iodine absorption;
(d-f) Comparison between the Brillouin shift based on the Stokes and anti-Stokes peaks

里渊光谱检测，从而方便、高效、准确地获取布里渊信号。

4 总结

激光雷达具有测量精度高、实时性好、时空分辨率高等优异特性，在大气和海洋环境要素遥感领域得到了广泛的应用。相比于基于能量检测的激光雷达和 HSRL，DSSL 通过利用光谱维度多特征信息，基于散射光谱与介质环境的耦合关系，通过直接测量光谱进行环境多要素的反演。DSSL 测量结果信噪比高，

反演精度高，在多环境要素遥感中具备有更多优势。

目前，DSSL 利用直接散射光谱特征参量构建多环境要素反演模型的理论研究逐步得到完善，光谱探测技术也趋向于成熟。在探测理论方面，DSSL 突破了散射光谱与水下和大气多要素耦合机理关键技术。在水下从最初单参数反演模型到后来的更多参数同步反演模型，实现了水下温度和盐度的同步反演。在大气中由于大气瑞利布里渊散射光谱的复杂性，在光谱描述上也进行了大量研究，从非解析模型到解析模型，从近似高斯拟合到后来的 G3、V3 等模型进行光

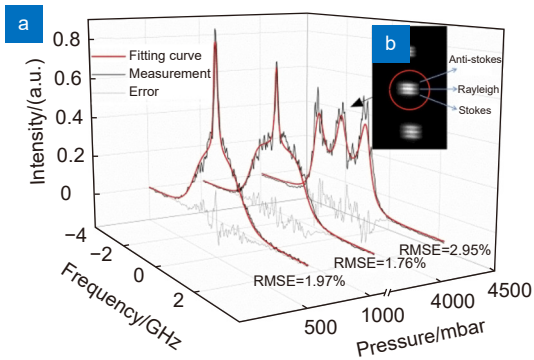


图 27 瑞利布里渊光谱测量结果^[66]。(a) 50~400 kPa 所测光谱; (b) 在气压为 400 kPa 时 CCD 相机上的光谱轮廓图像

Fig. 27 Rayleigh Brillouin spectroscopy measurement results^[66]. (a) Spectra measured from 50~400 kPa; (b) Spectral profile image on the CCD camera at gas pressure of 400 kPa

谱描述, 取得了较好的结果。而在散射光谱与大气多要素耦合机理上, 也从最初的单参数反演模型逐渐发展为更多参数同步反演模型。为了追求高精度环境要素反演, 这些反演模型也在进一步利用更多光谱维度信息, 实现对大气温度、压强的更高精度同步反演。在光谱探测技术方面, 为了能够兼顾直接散射光谱测量的灵敏性、精确性、实时性、连续性和光谱完整性, 并同时满足实际应用需求, Fizeau 干涉仪结合 PMT 阵列探测技术和 VIPA 干涉仪技术都是一个十分合适的选择, 其不仅兼顾散射光谱测量的几大需求, 同时对激光器和系统的稳定性要求低, 鲁棒性好, 符合外场实验需求。

DSSL 的探测理论和光谱测量技术都已经取得了较大突破, 但距离其实现真正意义上的工程实际应用还需要进行进一步研究。首先是在环境多要素和直接散射光谱耦合理论上, DSSL 在大气气溶胶和风速反演上已被证实具备有应用潜力, 但仍需进一步深入剖析两者与散射光谱之间的耦合关系, 并结合具体实验数据分析其反演精度, 而在水下也需要进一步研究在叶绿素和光学参数等方面反演的耦合理论, 并展开实验研究。其次是 DSSL 目前的研究在理论研究取得了很大突破, 同时大气已进行了外场实验验证, 取得了十分理想的结果, 表明了 DSSL 满足大气多环境要素探测的实际应用, 但水下目前均为实验室内验证, 缺少外场实验研究, 其实际应用效果尚待进一步确认。

DSSL 在环境要素遥感领域具有广阔的应用前景。随着技术的不断进步和创新, 未来直接散射光谱激光雷达有望在以下几个方面取得更大的突破和发展:

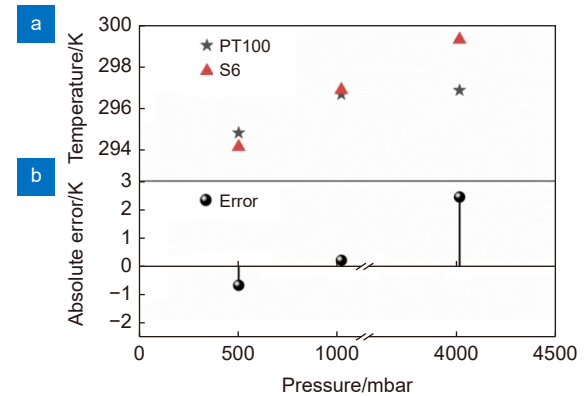


图 28 由瑞利布里渊散射光谱所测温度结果^[66]。(a) 测量温度值 (红色三角形) 和 PT100 测量值 (黑色星形); (b) 误差结果

Fig. 28 Temperature results measured by Rayleigh Brillouin scattering spectrum^[66]. (a) Retrieved temperature values (red triangle) and PT100 measured values (black star); (b) Error result

1) 多环境要素反演模型的提高: 直接散射光谱激光雷达可以通过多特征信息的反演, 实现对水下和大气等多种环境要素的准确测量。未来的研究可以进一步深化对光谱特性与环境要素之间的关系认识, 优化反演模型, 提高反演的精度和准确性。

2) 激光雷达技术的创新与集成: 随着光电子技术的快速发展, 激光雷达的技术也将不断创新和突破。未来的 DSSL 可以借鉴其他领域的技术进展, 如光学元件的优化设计、激光源的改进和高性能探测器的应用, 以提高测量精度和扩大测量范围。

3) 多源数据融合与综合应用: 除了 DSSL 本身的数据, 未来可以将其与其他遥感数据源进行融合, 如卫星遥感、无人机影像等, 以实现更全面、多维度的环境要素监测与分析。数据融合可以提供更全面的信息, 为环境保护、资源管理、灾害监测等领域提供更准确的决策支持。

4) 实时性与自动化技术的提升: 随着自动化技术的快速发展, 未来的 DSSL 可以更好地实现实时、自动化的监测和数据处理。通过优化算法和软件系统, 可以实现数据的实时传输、自动处理和分析, 提高数据利用的效率和及时性。

激光各类技术特别是光谱探测技术的逐步提升和直接散射光谱理论进一步完善, 将大力促进 DSSL 在多环境要素遥感中的实际应用, 更好地服务于大气和海洋环境遥感事业。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Tang J W, Chen G, Chen W B, et al. Three dimensional remote sensing for oceanography and the *Guanlan* ocean profiling Lidar[J]. *Natl Remote Sens Bull*, 2021, **25**(1): 460–500. 唐军武, 陈戈, 陈卫标, 等. 海洋三维遥感与海洋剖面激光雷达[J]. *遥感学报*, 2021, **25**(1): 460–500.
- [2] Liu D, Zhou Y D, Zhu X L, et al. Investigation on discrimination characteristics of atmospheric and oceanic high-spectral-resolution lidar[J]. *J Atmos Environ Opt*, 2020, **15**(1): 48–54.
- [3] Liu W Q, Chen Z Y, Liu J G, et al. Advances with respect to the environmental spectroscopy monitoring technology[J]. *Acta Opt Sin*, 2020, **40**(5): 0500001. 刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 等. 环境监测领域中光谱学技术进展[J]. *光学学报*, 2020, **40**(5): 0500001.
- [4] Liu B, Yu Y, Jiang S. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(7): 190167. 刘博, 于洋, 姜朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展[J]. *光电工程*, 2019, **46**(7): 190167.
- [5] He Y, Hu S J, Chen W B, et al. Research progress of domestic airborne dual-frequency LiDAR detection technology[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2018, **55**(8): 082801. 贺岩, 胡善江, 陈卫标, 等. 国产机载双频激光雷达探测技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, **55**(8): 082801.
- [6] Ma Y Z, Zhang Y F, Feng S. A denoising algorithm based on neural network for side-scatter lidar signal[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(6): 220341. 马愈昭, 张岩峰, 冯帅. 基于神经网络的侧向激光雷达信号去噪算法[J]. *光电工程*, 2023, **50**(6): 220341.
- [7] Ke J, Sun Y S, Dong C Z, et al. Development of China's first space-borne aerosol-cloud high-spectral-resolution lidar: retrieval algorithm and airborne demonstration[J]. *PhotonIX*, 2022, **3**(1): 17.
- [8] Collis R T H, Russell P B. Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption[M]//Hinkley E D. *Laser Monitoring of the Atmosphere*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1976: 71–151. https://doi.org/10.1007/3-540-07743-X_18.
- [9] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl Opt*, 1981, **20**(2): 211–220.
- [10] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(5): 652–653.
- [11] Liu B Y, Zhuang Q F, Qin S G, et al. Aerosol classification method based on high spectral resolution lidar[J]. *Infrared Laser Eng*, 2017, **46**(4): 411001. 刘秉义, 庄全风, 秦胜光, 等. 基于高光谱分辨率激光雷达的气溶胶分类方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(4): 411001.
- [12] Liu D, Yang Y Y, Zhou Y D, et al. High spectral resolution lidar for atmosphere remote sensing: a review[J]. *Infrared Laser Eng*, 2015, **44**(9): 2535–2546. 刘东, 杨雨英, 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.
- [13] Lmaki M, Takegoshi Y, Kobayashi T. Ultraviolet high-spectral-resolution Lidar with Fabry–perot filter for accurate measurement of extinction and Lidar ratio[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2005, **44**(5R): 3063–3067.
- [14] Fiocco G, Benedetti-Michelangeli G, Maischberger K, et al. Measurement of temperature and aerosol to molecule ratio in the troposphere by optical radar[J]. *Nat Phys Sci*, 1971, **229**(3): 78–79.
- [15] Huang Z W, Wang Y K, Bi J R, et al. An overview of aerosol lidar: progress and prospect[J]. *Natl Remote Sens Bull*, 2022, **26**(5): 834–851. 黄忠伟, 王雍恺, 闭建荣, 等. 气溶胶激光雷达的国内外研究进展与展望[J]. *遥感学报*, 2022, **26**(5): 834–851.
- [16] Chen P, Jamet C, Liu D. LiDAR remote sensing for vertical distribution of seawater optical properties and chlorophyll-a from the East China Sea to the South China Sea[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2022, **60**: 4207321.
- [17] Xu J, Guo Y N, Luo N N, et al. Influence of water temperature on temporal coherence of stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Opt Sin*, 2020, **40**(9): 0929001. 许锦, 郭洋宁, 罗宁宁, 等. 水体温度对受激布里渊散射时间相干性的影响[J]. *光学学报*, 2020, **40**(9): 0929001.
- [18] Zhang N, Ma Y, Liang K, et al. Characteristics measurement of the ocean Brillouin scattering spectrum[J]. *Opto-Electron Eng*, 2014, **41**(11): 84–88. 张念, 马泳, 梁琨, 等. 海水布里渊散射谱特征参数的测量[J]. *光电工程*, 2014, **41**(11): 84–88.
- [19] Chen X C, Dai G Y, Wu S H, et al. Coherent high-spectral-resolution lidar for the measurement of the atmospheric Mie–Rayleigh–Brillouin backscatter spectrum[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(21): 38060–38076.
- [20] Liu D H, Xu J F, Li R S, et al. Measurements of sound speed in the water by Brillouin scattering using pulsed Nd: YAG laser[J]. *Opt Commun*, 2002, **203**(3–6): 335–340.
- [21] Lin X F, Bu L B, Liang K, et al. Simulation analysis of a lidar performance for atmospheric temperature profile measurements based on the Fizeau interferometer and multichannel photomultiplier tube[J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2022, **64**(4): 650–654.
- [22] He X D, Wei H J, Shi J L, et al. Experimental measurement of bulk viscosity of water based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Opt Commun*, 2012, **285**(20): 4120–4124.
- [23] Emery Y, Fry E. Laboratory development of a lidar for measurement of sound velocity in the ocean using Brillouin scattering[J]. *Proc SPIE*, 1997, **2963**: 210–215.
- [24] Xu J Q, Wang Y Q, Xu Y R, et al. Research progress of ocean environmental laser remote sensing based on Brillouin scattering[J]. *Infrared Laser Eng*, 2021, **50**(6): 20211036. 许佳琪, 王元庆, 徐杨睿, 等. 基于布里渊散射的海洋环境激光遥感技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2021, **50**(6): 20211036.
- [25] Zhou B, Fan Q M, Ma Y, et al. Experimental analysis on the rapid measurement of a high precision Brillouin scattering spectrum in water using a Fabry–Pérot etalon[J]. *Laser Phys Lett*, 2016, **13**(5): 055701.
- [26] 张明生. 激光光散射谱学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 9–11.
- [27] Shi J W, Gong W P, Bai J H, et al. Brillouin scattering and its application in LiDAR[J]. *Physics*, 2007, **36**(10): 777–782. 石锦卫, 弓文平, 白建辉, 等. 布里渊散射及其在激光雷达中的应用[J]. *物理*, 2007, **36**(10): 777–782.
- [28] Liu J, Shi M Q, Chen Z, et al. Quantum photonics based on

- metasurfaces[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(9): 200092.
- [29] Liu Y L, Zhang Y C, Su J, et al. Rotational Raman lidar for atmospheric temperature profiles measurements in the lower-air[J]. *Opto-Electron Eng*, 2006, **33**(10): 43–48.
刘玉丽, 张寅超, 苏嘉, 等. 探测低空大气温度分布的转动拉曼激光雷达[J]. *光电工程*, 2006, **33**(10): 43–48.
- [30] Ren X Y, Wang L, Tian Z S, et al. Study on practical Raman Lidar seawater temperature remote sensing system[J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2019, **39**(3): 778–783.
任秀云, 王玲, 田兆硕, 等. 实用化拉曼光谱水下温度遥测系统研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, **39**(3): 778–783.
- [31] Yuan D P, Xu J, Liu Z, et al. High resolution stimulated Brillouin scattering lidar using Galilean focusing system for detecting submerged objects[J]. *Opt Commun*, 2018, **427**: 27–32.
- [32] Wang Y Q, Ubachs W, van de Water W. Bulk viscosity of CO₂ from Rayleigh-Brillouin light scattering spectroscopy at 532 nm[J]. *J Chem Phys*, 2019, **150**(15): 154502.
- [33] Li T F, Ba D X, Zhou D W, et al. Recent progress in optical fiber sensing based on forward stimulated Brillouin scattering[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(9): 220021.
李天夫, 巴德欣, 周登望, 等. 前向受激布里渊散射光纤传感研究进展[J]. *光电工程*, 2022, **49**(9): 220021.
- [34] Shang J C, Wu T, Yang C Y, et al. Pressure and temperature retrieval of nitrogen respectively by analysis of spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering profiles[J]. *Opt Commun*, 2019, **436**: 127–133.
- [35] Witschas B, Gu Z Y, Ubachs W. Temperature retrieval from Rayleigh-Brillouin scattering profiles measured in air[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(24): 29655–29667.
- [36] Liang K, Xu J Q, Wang Y Q, et al. Grüneisen approach for universal scaling of the Brillouin shift in gases[J]. *New J Phys*, 2022, **24**: 103005.
- [37] Witschas B, Lemmerz C, Reitebuch O. Daytime measurements of atmospheric temperature profiles (2–15 km) by lidar utilizing Rayleigh-Brillouin scattering[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(7): 1972–1975.
- [38] Hirschberg J G, Byrne J D, Wouters A W, et al. Speed of sound and temperature in the ocean by Brillouin scattering[J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(15): 2624–2628.
- [39] Fry E S, Emery Y, Quan X H, et al. Accuracy limitations on Brillouin lidar measurements of temperature and sound speed in the ocean[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(27): 6887–6894.
- [40] Gao W, Lü Z W, Dong Y K, et al. A new approach to measure the ocean temperature using Brillouin lidar[J]. *Chin Opt Lett*, 2006, **4**(7): 428–431.
- [41] Ma Y, Liang K, Lin H, et al. Study on simultaneous measurement of temperature and salinity based on Brillouin scattering[J]. *Acta Opt Sin*, 2008, **28**(8): 1508–1512.
马泳, 梁琨, 林宏, 等. 基于布里渊后向散射的海水温度与盐度同步测量研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1508–1512.
- [42] Liang K, Ma Y, Yu Y, et al. Research on simultaneous measurement of ocean temperature and salinity using Brillouin shift and linewidth[J]. *Opt Eng*, 2012, **51**(6): 066002.
- [43] Yu Y, Ma Y, Li H, et al. Simulation of simultaneously obtaining ocean temperature and salinity using dual-wavelength Brillouin Lidar[J]. *Laser Phys Lett*, 2014, **11**(3): 036001.
- [44] Hays P B, Richey C J, Hays A B, et al. Optical air data system: 7522291[P]. 2009-04-21.
- [45] Witschas B. Analytical model for Rayleigh-Brillouin line shapes in air[J]. *Appl Opt*, 2011, **50**(3): 267–270.
- [46] Ma Y, Fan F, Liang K, et al. An analytical model for Rayleigh-Brillouin scattering spectra in gases[J]. *J Opt*, 2012, **14**(9): 095703.
- [47] Liang K, Xu J Q, Zhang P, et al. Temperature dependence of the Rayleigh Brillouin spectrum linewidth in air and nitrogen[J]. *Sensors*, 2017, **17**(7): 1503.
- [48] Zhang P, Xu J Q, Zhang R Z, et al. Retrieval of gas temperature and pressure based on Rayleigh-Brillouin spectrum[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 22964–22975.
- [49] Xu J Q. Study on gas Rayleigh-Brillouin scattering spectral characteristics and spectral detection technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 60–83.
许佳琪. 气体瑞利布里渊散射光谱特性及光谱检测技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 60–83.
- [50] Wang B. Simultaneous measurement of atmospheric temperature and pressure profiles based on Rayleigh-Brillouin scattering spectrum[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023: 21–34.
王蓓. 基于瑞利布里渊散射光谱的大气温压廓线同步反演方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023: 21–34.
- [51] Schorstein K, Popescu A, Göbel M, et al. Remote water temperature measurements based on Brillouin scattering with a frequency doubled pulsed Yb: doped fiber amplifier[J]. *Sensors*, 2008, **8**(9): 5820–5831.
- [52] Fry E, Katz J, Liu D H, et al. Temperature dependence of the Brillouin linewidth in water[J]. *J Mod Opt*, 2002, **49**(3-4): 411–418.
- [53] Gu Z Y, Vieitez M O, van Duijn E J, et al. A Rayleigh-Brillouin scattering spectrometer for ultraviolet wavelengths[J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, **83**(5): 053112.
- [54] Wang Y Q, Gu Z Y, Liang K, et al. Rayleigh-Brillouin light scattering spectroscopy of air; experiment, predictive model and dimensionless scaling[J]. *Mol Phys*, 2021, **119**(1-2): e1804635.
- [55] Shi J, Ouyang M, Gong W, et al. A Brillouin lidar system using F-P etalon and ICCD for remote sensing of the ocean[J]. *Appl Phys B*, 2008, **90**(3-4): 569–571.
- [56] Liang K, Ma Y, Huang J, et al. Precise measurement of Brillouin scattering spectrum in the ocean using F-P etalon and ICCD[J]. *Appl Phys B*, 2011, **105**(2): 421–425.
- [57] Xu N, Zhang B, Luo N N, et al. Simultaneous inversion of seawater temperature and salinity based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Opt Sin*, 2022, **42**(24): 2429001.
徐宁, 张博, 罗宁宁, 等. 基于受激布里渊散射的海水温度和盐度同步反演[J]. *光学学报*, 2022, **42**(24): 2429001.
- [58] Huang J, Ma Y, Zhou B, et al. Processing method of spectral measurement using F-P etalon and ICCD[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(17): 18568.
- [59] Liang K, Zhang R, Sun Q, et al. Brillouin shift and linewidth measurement based on double-edge detection technology in seawater[J]. *Appl Phys B*, 2020, **126**(10): 160.

- [60] Wang Y Q, Zhang J H, Zheng Y C, et al. Brillouin scattering spectrum for liquid detection and applications in oceanography[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**(1): 220016.
- [61] Xu J Q, Witschas B, Liang K, et al. Characterization of a novel temperature Lidar receiver by means of laboratory Rayleigh-Brillouin scattering measurements[J]. *EPJ Web Conf*, 2020, **237**: 07004.
- [62] Witschas B, Lemmerz C, Lux O, et al. Airborne temperature profiling in the troposphere during daytime by lidar utilizing Rayleigh-Brillouin scattering[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(17): 4132-4135.
- [63] Xu J Q, Witschas B, Kableka P, et al. High-spectral-resolution lidar for measuring tropospheric temperature profiles by means of Rayleigh-Brillouin scattering[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(13): 3320-3323.
- [64] Wang Y Q, Xu Y R, Chen P, et al. Remote sensing of seawater temperature and salinity profiles by the Brillouin Lidar based on a Fizeau interferometer and multichannel photomultiplier tube[J]. *Sensors*, 2023, **23**(1): 446.
- [65] Meng Z K, Yakovlev V V. Precise determination of Brillouin scattering spectrum using a virtually imaged phase array (VIPA) spectrometer and charge-coupled device (CCD) Camera[J]. *Appl Spectrosc*, 2016, **70**(8): 1356-1363.
- [66] Yan H D, Wu T, Pi S H, et al. Demonstration of a Rayleigh-Brillouin scattering spectrometer with a high spectral resolution for rapid gas temperature detection[J]. *Opt Lett*, 2023, **48**(22): 5931-5934.
- [67] Marksteiner U, Lemmerz C, Lux O, et al. Calibrations and wind observations of an airborne direct-detection wind LiDAR Supporting ESA 's Aeolus Mission[J]. *Remote Sens*, 2018, **10**(12): 2056.
- [68] Korb C L, Gentry B M, Weng C Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind[J]. *Appl Opt*, 1992, **31**(21): 4202.
- [69] Guo W X, Shen F H, Shi W J, et al. Data inversion method for dual-frequency Doppler lidar based on Fabry-Perot etalon quad-edge technique[J]. *Optik*, 2018, **159**: 31-38.

作者简介



郭圆新 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事大气/海洋激光散射光谱方面的研究。

E-mail: yux_g@hust.edu.cn



【通信作者】梁琨 (1981-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光散射光谱及遥感应应用方面的研究。

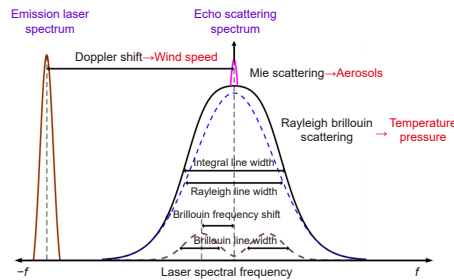
E-mail: liangkun@hust.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Multiple environmental elements laser remote sensing method based on direct scattering spectrum

Guo Yuanxin^{1,2}, Liang Kun^{1,2*}, Xu Yangrui¹, Zhao Yanpeng¹, Wang Yuanqing^{1,3}, Wang Bei¹



Schematic diagram of detection of multiple environmental elements (atmosphere) by DSSL

Overview: Classical LiDAR based on energy detection was the first to be developed for environmental element detection, employing the lidar equation for the inversion of environmental parameters. In order to enhance the signal-to-noise ratio of the return signal and achieve accurate parameter inversion, high spectral resolution lidar (HSRL) has been identified as a viable approach. Both energy-detection-based lidar and HSRL utilized energy dimension information for remote sensing of environmental elements. However, the information captured solely in the energy dimension is limited. Environmental information is not only manifested in the energy dimension but also in the spectral dimension. Since the environmental information is not only manifested in the energy dimension but also in the spectral dimension, the characteristic information of the scattering spectrum, such as spectral energy, spectral line width, and spectral frequency shift, plays a very important role in the detection of multiple environmental elements. Based on the coupling relationship between the scattering spectral characteristic information and the medium environment, the inversion of multi-environmental elements can be directly carried out. By directly coupling the characteristic information of scattering spectra with the medium's environment parameters, direct scattering spectral lidar (DSSL) can realize the inversion of multiple environmental parameters. DSSL exhibits significant advantages in the detection of multiple environmental elements. However, with the demand for more detailed spectral information, the detection requirements of DSSL have also increased and primarily displayed in two aspects: 1) Spectral characteristic research: Utilizing spectral characteristic information for the detection of multiple environmental elements necessitates in-depth research on the relationship between underwater temperature, salinity, atmospheric temperature, pressure, and other environmental parameters with scattering spectra. This includes a thorough investigation of the spectral characteristics of direct scattering under various temperature, salinity, or pressure conditions, and the establishment of inversion models for multiple environmental elements based on the coupling relationship between direct scattering spectrum and environmental parameters. 2) Spectrum detection methods: As DSSL directly utilizes spectral dimension characteristic information, it places higher demands on the precise detection of scattering spectra. During spectral detection, attention should be paid to the system's sensitivity and accuracy, while considering real-time measurement continuity, vertical profile measurement, and the integrity of spectral detection. Acquiring more accurate scattering spectra is necessary to enhance the accuracy of the final detection results for multiple environmental elements. In this paper, we focus on the development of the inversion theory and various spectral detection methods for direct scattering spectral detection in underwater and atmospheric environments, providing an outlook on its future development.

Guo Y X, Liang K, Xu Y R, et al. Multiple environmental elements laser remote sensing method based on direct scattering spectrum[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 240003; DOI: 10.12086/oe.2024.240003

Foundation item: Project supported by Pre-research Project on Civil Aerospace Technologies (D040107)

¹School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China; ²National Key Laboratory of Multispectral Information Intelligent Processing Technology, Wuhan, Hubei 430074, China; ³School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430205, China

* E-mail: liangkun@hust.edu.cn