中文核心期刊 中国科技核心期刊 Scopus CSCD

OEE | 光电工程 Opto-Electronic Engineering

CN 51-1781/TN ISSN 1003-501X(印刷版) ISSN 2097-4019(网络版)

一种基于激光布里渊光谱的海洋多要素遥感探测系统

孙倩，杨颂，梁琨，张景豪，任明源，李同，张睿哲，沈振民，叶小敏，郑永超

引用本文:

孙倩，杨颂，梁琨 等. 一种基于激光布里渊光谱的海洋多要素遥感探测系统[J]. 光电工程，2026， **53**(6): 250377.

Sun Q, Yang S, Liang K, et al. A marine multi-element remote sensing detection system based on laser Brillouin spectroscopy[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(6): 250377.

https://doi.org/10.12086/oee.2026.250377

收稿日期: 2025-12-04; 修改日期: 2026-04-26; 录用日期: 2026-04-30

相关论文

基于直接散射光谱的海洋多环境要素测量仿真系统

梁梦凡， 陈升， 郭圆新， 等

光电工程 2025, **52**(6): 250066 doi: 10.12086/oee.2025.250066

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， 等

光电工程 2024, **51**(3): 240003 doi: 10.12086/oee.2024.240003

激光雷达创新与应用专题导读

刘博， 赵彬， 蒋赟， 等

光电工程 2024, **51**(3): 240076 doi: 10.12086/oee.2024.240076

集成化多线列激光雷达模拟前端微组件设计

林元琦， 赵毅强， 叶茂， 等

光电工程 2021, **48**(8): 210080 doi: 10.12086/oee.2021.210080

更多相关论文见光电期刊集群网站

Opto-Electronic Journals Group

https://www.oejournal.org

OE_Journal

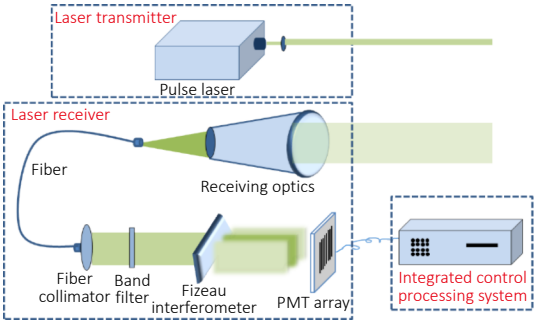
@OptoElectronAdv

OEE | 光电工程 Opto-Electronic Engineering

Article

2026 年 6 月, 第 53 卷, 第 6 期

一种基于激光布里渊光谱的海洋多要素遥感探测系统



孙　倩[1,2*], 杨　颂[1,2], 梁　琨[3], 张景豪[1,2], 任明源[1,2], 李　同[1,2], 张睿哲[1,2], 沈振民[1,2], 叶小敏[4], 郑永超[1,2]

[1]北京空间机电研究所，北京 100094；

[2]中国空间技术研究院空间激光信息感知技术核心专业实验室，北京 100094；

[3]华中科技大学电子信息与通信学院，湖北 武汉 430074；

[4]国家卫星海洋应用中心，北京 100081

摘要：海洋要素剖面立体结构一直是海洋遥感探测的难点，激光雷达具有强穿水、高垂向分辨等技术特点，而海洋激光雷达基于单一回波能量探测无法实现温度、盐度等要素同步测量。针对这一现实需求，文章提出了一种布里渊激光光谱的海洋多要素遥感探测系统。该系统基于激光非弹性散射效应，通过高精度鉴频 Fizeau 干涉仪与高灵敏探测器 PMT 阵列为核心光谱探测模块，获得离散的布里渊光谱，通过双参数反演模型求解得到频移和线宽，从而反演海洋温度和盐度参数，经过仿真分析结合实验室测试，系统的测温精度达到 1 K，盐度精度达到 2 psu。

关键词：激光雷达；温度；盐度；海洋剖面

The English title and abstract appear at the end of the paper.

DOI: 10.12086/oee.2026.250377 | CSTR: 32245.14.oee.2026.250377 | 中图分类号：TN958.98 | 文献标识码：A

孙倩，杨颂，梁琨，等. 一种基于激光布里渊光谱的海洋多要素遥感探测系统 [J]. 光电工程，2026，**53**(6): 250377

Sun Q, Yang S, Liang K, et al. A marine multi-element remote sensing detection system based on laser Brillouin spectroscopy[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(6): 250377

1　引　言

海洋与人类的生存和可持续发展息息相关，海洋环境污染，气候变暖，海洋生物多样化减少，海平面上升，一直以来是亟需解决的共同难题。海洋温度和盐度的变化情况，对整个海洋的气候特征，变化规律，发展趋势有决定性作用，对海洋气象学、海洋渔业、海洋环境、海洋生物信息等学科有着重要意义，因此国内外都在积极发展测量手段，实现全球尺度海洋温度、盐度测量。例如专用的海洋观测卫星利用水温水色扫描仪，温度测量精度优于 0.5 K[1-3]，专用的海洋动力卫星利用微波辐射亮度获得海面温度[4]，测温精度达到 1 K，2024 年 11 月 14 日发射的海洋盐度探测卫星其盐度测量为月均 0.1 psu。现有的海洋遥感技术总体上是二维平面遥感，与海洋业务及科学应用所需的水体剖面或三维探测需求存在巨大的差距。传统的海洋光学遥感 (即水色遥感) 也仅是海洋上层 50 m 以内水体的积分式成像观测；微波、红外遥感器，都只是在二维平面进行海洋水体的皮层遥感，其探测深度在毫米 (微波)、微米 (红外) 量级[5]。

海洋温度和盐度的垂向探测能力依然是海洋观测系

收稿日期：2025-12-04；修回日期：2026-04-26；录用日期：2026-04-30；网络出版日期：2026-06-25

基金项目：国家自然科学基金资助项目 (62175072, 62575108)

*通信作者：孙倩，sunqian2345216@163.com

版权所有©2026 中国科学院光电技术研究所

统的基础，目前主要依赖测量船或者浮标潜标进行现场观测来获得，这决定了获取数据是离散、分时、非全球尺度，难以满足海洋科学、海洋环境、海洋经济和海洋国防等领域要求。因此，考虑获取全球范围的海洋温度盐度剖面信息，亟需发展遥感探测方式。海洋激光雷达作为有望成为海洋剖面立体结构遥感探测的新体制，在航空验证了其获取水下地形的能力，但目前基于单一回波能量探测无法实现温度、盐度等要素同步测量。综上，本文提出了一种新型的基于激光布里渊光谱的海洋多要素遥感探测系统。

2 温盐双参数反演模型

激光与水体相互作用后发生瑞利散射和布里渊散射，瑞利散射的散射波长与入射激光波长一致，布里渊散射与入射光的频率之差为布里渊频移。在低光强条件下，激光与水体发生的布里渊散射为自发布里渊散射，自发布里渊散射存在两个相对入射波长的频移量为$\pm\nu_{\mathrm{B}}$的两个峰，分别是斯托克斯散射峰和非斯托克斯散射峰。瑞利和布里渊散射光谱都符合洛伦兹线型，如图 1 所示，具体谱线线型[6] 可以写为

$$I = I_{\mathrm{r0}}\cdot\frac{2}{\pi}\frac{\Gamma_{\mathrm{R}}}{4(\nu-\nu_{\mathrm{R}})^2+\Gamma_{\mathrm{R}}^2}+I_{\mathrm{b0}}\cdot\frac{2}{\pi}\frac{\Gamma_{\mathrm{B}}}{4(\nu-\nu_{\mathrm{R}}-\nu_{\mathrm{B}})^2+\Gamma_{\mathrm{B}}^2}+I_{\mathrm{b0}}\cdot\frac{2}{\pi}\frac{\Gamma_{\mathrm{B}}}{4(\nu-\nu_{\mathrm{R}}+\nu_{\mathrm{B}})^2+\Gamma_{\mathrm{B}}^2},\tag{1}$$

式中：ν 为散射谱频率；I_{b0}为布里渊散射能量；Γ_{B}表示布里渊散射线宽；ν_{B}表示布里渊散射频移；I_{r0}为瑞利散射峰的强度；Γ_{R}为瑞利峰的半高宽；ν_{R}表示瑞利散射频移。

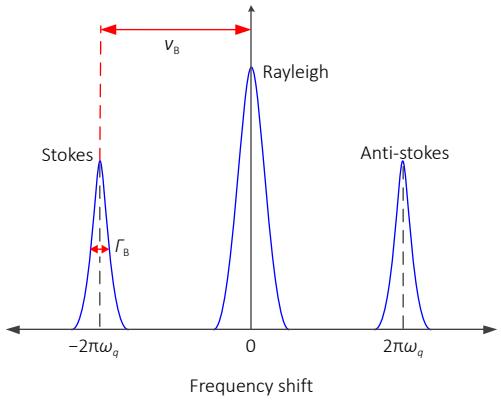


图 1 激光在水中的散射光谱图

Fig. 1 Scattering spectrum of laser in water

布里渊散射从微观角度看，是光子与水中的热声子相互作用而发生的散射，其布里渊频移和布里渊线宽与海洋的声速、折射率、粘滞系数等有直接联系。而这些物理特性参数均受到海水温度和盐度的影响，由此频移和线宽能够与海水的温度和盐度建立联系[7-8]：

$$|\nu_{\mathrm{B}}| = \frac{2n(T,S)V_{\mathrm{s}}(T,S)}{\lambda_i}\sin\frac{\theta}{2},\tag{2}$$

$$\Gamma_{\mathrm{B}} = \frac{1}{2\pi\rho(T,S)}\left[\frac{4}{3}\eta_{\mathrm{s}}(T,S)+\eta_{\mathrm{b}}(T,S)+\frac{\kappa}{C_{\mathrm{p}}}(\gamma-1)\right]\cdot\left(\frac{4\pi n(T,S)}{\lambda_i}\sin\frac{\theta}{2}\right)^2,\tag{3}$$

其中：λ 是激光波长，θ 是散射角，γ=$C_{\mathrm{p}}/C_{\mathrm{v}}$ 是定压比热容 C_{p} 与定容比热容 C_{v} 的比值，κ 是水体热导率。从以上两式可以看出，温度和盐度通过影响折射率 n 和声速 V_{s}来反映到布里渊频移ν_{B}变化上；对于布里渊线宽Γ_{B}，则是通过密度ρ、剪切粘滞系数η_{s}、体粘滞系数η_{b}以及折射率 n 来影响其变化。对于海水这类液体介质，线宽表达式中括号内的第三项$\kappa\cdot(\gamma-1)/C_{\mathrm{p}}$值可以忽略。由此还需要知道温度 T 和盐度 S 与折射率 n、声速V_{s}、密度ρ、剪切粘滞系数η_{s}和体粘滞系数η_{b}之间的关系，才能得到温盐与布里渊频移和线宽之间的联系。

布里渊散射频移ν_{B}和布里渊散射线宽Γ_{B}都是海水温度 T 和盐度 S 的函数，因而可以利用以上两式建立联立的方程组[9]，将该方程组中的布里渊散射频移ν_{B}和布里渊散射线宽Γ_{B}认定为已知量，把海水的温度 T 和盐度 S 认作未知量，通过求解方程组

$$\begin{cases}\nu_{\mathrm{B}} = \nu_{\mathrm{B}}(T,S)\\ \Gamma_{\mathrm{B}} = \Gamma_{\mathrm{B}}(T,S)\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}T = T(\nu_{\mathrm{B}},\Gamma_{\mathrm{B}})\\ S = S(\nu_{\mathrm{B}},\Gamma_{\mathrm{B}})\end{cases},\tag{4}$$

能够得到温度 T 和盐度 S 关于布里渊散射频移ν_{B}和布里渊散射线宽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。

下面采用数据拟合的方式来求数值解[10]。对于数值解的求解方法，首先需要做的是生成以温度 T 和盐度 S 为变量的布里渊频移$\nu_{\mathrm{B}}(T,S)$和布里渊线宽$\Gamma_{\mathrm{B}}(T,S)$，如表 1~2 所示。

表 1~2 中值是在波长为λ_i= 532.29 nm 和散射角 θ = 180°时计算得出，这里λ_i= 532.29 nm 对应于激光雷达系统所采用的窄线宽稳频激光器的输出波长。考虑海洋温盐的典型变化范围，该表中的温度变化范围0 ~30 ℃，盐度变化范围 0~35 psu。综合而言，可得到以布里渊散射频移ν_{B}和布里渊散射线宽Γ_{B}为变量的关于温度和盐度

表 1 以温度 T 和盐度 S 为变量的布里渊频移 $\nu_B(T,S)$

Table 1 Brillouin frequency shift as a function of temperature and salinity

T/℃	S/‰							
	0	5	10	15	20	25	30	35
0	7.0397	7.0784	7.1171	7.1559	7.1949	7.2339	7.2729	7.3121
5	7.1582	7.1953	7.2325	7.2697	7.3070	7.3444	7.3819	7.4195
10	7.2632	7.2988	7.3345	7.3703	7.4061	7.4421	7.4781	7.5141
15	7.3554	7.3897	7.4241	7.4585	7.4930	7.5276	7.5623	7.5970
20	7.4357	7.4688	7.5020	7.5352	7.5685	7.6019	7.6354	7.6689
25	7.5049	7.5369	7.5690	7.6012	7.6335	7.6658	7.6982	7.7306
30	7.5638	7.5949	7.6261	7.6574	7.6887	7.7201	7.7515	7.7831

表 2 以温度 T 和盐度 S 为变量的布里渊线宽 $\Gamma_B(T,S)$

Table 2 Brillouin linewidth as a function of temperature and salinity

T/℃	S/‰							
	0	5	10	15	20	25	30	35
0	1.7623	1.7699	1.7775	1.7852	1.7928	1.8004	1.8080	1.8155
5	1.2370	1.2445	1.2520	1.2594	1.2669	1.2743	1.2817	1.2891
10	0.9091	0.9158	0.9224	0.9290	0.9356	0.9422	0.9488	0.9553
15	0.7085	0.7142	0.7199	0.7256	0.7312	0.7368	0.7424	0.7480
20	0.5881	0.5930	0.5978	0.6027	0.6075	0.6123	0.6171	0.6218
25	0.5158	0.5200	0.5243	0.5285	0.5328	0.5370	0.5412	0.5453
30	0.4681	0.4720	0.4760	0.4799	0.4838	0.4877	0.4916	0.4955

的三维数据值：(ν_B,Γ_B,T) 和 (ν_B,Γ_B,S)，通过回归拟合，可推导出温度 T 和盐度 S 关于布里渊频移 ν_B 和布里渊线宽 Γ_B 的经验拟合公式[11] 如下：

$$T(\nu_B,\Gamma_B)=t_1+t_2\cdot\nu_B+\frac{t_3}{\Gamma_B}+t_4\cdot\nu_B{}^2+\frac{t_5}{\Gamma_B^2}+\frac{t_6\cdot\nu_B}{\Gamma_B}+t_7\cdot\nu_B^3+\frac{t_8}{\Gamma_B^3}+\frac{t_9\cdot\nu_B}{\Gamma_B^2}+\frac{t_{10}\cdot\nu_B^2}{\Gamma_B},\tag{5}$$

$$S(\nu_B,\Gamma_B)=s_1+\frac{s_2}{\nu_B}+\frac{s_3}{\nu_B^2}+\frac{s_4}{\nu_B^3}+\frac{s_5}{\nu_B^4}+\frac{s_6}{\nu_B^5}+s_7\cdot\ln\Gamma_B+s_8\cdot\ln^2\Gamma_B+s_9\cdot\ln^3\Gamma_B+s_{10}\cdot\ln^4\Gamma_B+s_{11}\cdot\ln^5\Gamma_B,\tag{6}$$

式中：布里渊散射频移 ν_B 和布里渊散射线宽 Γ_B 的单位为 GHz； 参数 t_1~ t_{10} 和 s_1 ~ s_{11} 为常数，其值见表 3 和表 4。

表 3 和表 4 中，参数 t_1~ t_{10} 和 s_1 ~ s_{11} 的有效数字位数的保留数目是以最后一位的浮动对温盐反演结果的影响不超过 0.0001 ℃ 和 0.0001 psu 为依据计算得出。将测量得到的布里渊散射频移和布里渊散射线宽带入式 (5) 和式 (6)，即可计算得到海水的温度和盐度。

因此，在已知布里渊频移和线宽的情况下，可以通过将测量得到的布里渊频移和布里渊线宽代入式 (5)、式 (6)，即可计算得到海水的温度和盐度。

利用温盐双参数反演模型计算温度和盐度，需先获取水体的布里渊散射频移与线宽。基于布里渊激光光谱的海洋多要素遥感探测系统，其核心功能正是测量这两个参数。然而，受外界环境波动、背景噪声、系统噪声及激光频率抖动等因素影响，系统实测值与理论值之间难免存在误差。为此，需分析在典型水体条件下，为达

表 3 式 (5) 中参数 t_1~ t_{10} 的值

Table 3 Value of t_1~t_{10} in Eq.(5)

t_1 = 120.197	t_2 = −43.2765
t_3 = 21.2612	t_4 = 3.41143
t_5 = −61.4753	t_6 = 13.7452
t_7 = −5.34905× 10^{-3}	t_8 = 3.73461
t_9 = 6.24268	t_{10} = −1.5917

表 4 式 (6) 中参数 s_1 ~ s_{11} 的值

Table 4 Value of s_1~s_{11} in Eq.(6)

s_1 ~ s_{11}	
s_1 = 7.1812× 10^5	s_2 = −2.7105 × 10^7
s_3 = 4.0964 × 10^8	s_4 = −3.0961 × 10^9
s_5 = 1.1696 × 10^{10}	s_6 = −1.7665× 10^{10}
s_7 = 42.9405	s_8 = −4.776
s_9 = 9.8176	s_{10} = −11.431
s_{11} = 1.4448	

到一定的温盐反演精度，布里渊频移与线宽所需满足的探测不确定度，以作为探测系统设计的依据。

目前，星载微波遥感载荷的海表温度反演精度可达1 K以内，已较好地应用于海气相互作用、海洋动力学及气候变化等研究。本文以此为参考，将温度反演精度目标设为1 K。在此目标下，采用前述温盐双参数反演模型，可同时获得盐度反演结果。

在理想布里渊频移量ν_B和线宽量Γ_B的基础上加入偏置量dν、dΓ，以此模拟探测不确定度。将叠加偏置量后的参量视为激光雷达系统输出的布里渊频移$\nu'_B=\nu_B+\mathrm{d}\nu$和线宽$\Gamma_B'=\Gamma_B+\mathrm{d}\Gamma$，代入温盐双参数反演模型，可计算达到实际反演的温度值$T(\nu'_B,\Gamma'_B)$、盐度值$S(\nu'_B,\Gamma'_B)$。将其与理想的温度反演值$T(\nu_B,\Gamma_B)$、盐度反演值$S(\nu_B,\Gamma_B)$作差并取绝对值，即得到温度反演精度$\delta T=|T(\nu'_B,\Gamma'_B)-T(\nu_B,\Gamma_B)|$和盐度反演精度$\delta S=|S(\nu'_B,\Gamma'_B)-S(\nu_B,\Gamma_B)|$。

考虑布里渊频移和线宽的不确定度在16 MHz时对温度和盐度的反演精度的影响如图2和图3所示，这里分析了四种偏置组合情况：① dν=16 MHz、dΓ=16 MHz，② dν=16 MHz、dΓ=−16 MHz，③ dν=−16 MHz、dΓ=−16 MHz，④ dν=−16 MHz、dΓ=16 MHz。仿真时温度取值范围为0~30 ℃，步长0.1 ℃；盐度取值范围为0~35 psu，步长0.1 psu。在频移与线宽均存在16 MHz偏移的情况下，计算整个温盐范围内每个格点对应的温度反演精度δT，统计其中$\delta T\leqslant 1$ K的点数占总点数的比例。该比例代表了在布里渊频移与线宽的探测不确定度均为16 MHz时，温度反演精度达到1 K以内的概率。同理，可计算相同条件下盐度反演精度$\delta S\leqslant 2$ psu的点数比例，该比例即为盐度反演精度达到2 psu以内的概率。

图2展现了考虑偏置量条件下，温度在0~30 ℃，盐度在0~35 psu范围内各点的温度反演精度δT的变化情况。图中横轴为温度，纵轴则展示了在相同温度下、不同盐度(0~35 psu)所对应的温度反演精度δT的分布。蓝色点代表该点$\delta T\leqslant 1$ K，红色点代表该点$\delta T>1$ K。从图2可以看出，布里渊频移与线宽的偏置量对温度反演精度的影响与水体温度密切相关：温度越低，反演模型对偏置的容忍度越大。在0 ℃至18 ℃的温度区间内，即使频移与线宽的探测不确定度均为16 MHz，温度反演精度仍始终保持在1 K以内，且盐度对反演精度的影响较小。整体而言，在温度0~30 ℃、盐度0~35 psu的全范围内，当布里渊频移与线宽的探测不确定度均为16 MHz时，温度反演精度超过1 K的点数随温度升高而增加，但满足$\delta T\leqslant 1$ K的点仍占总点数的约94%。

图3展现了考虑偏置量条件下，盐度在0~35 psu，温度在0~30 ℃的各点的盐度反演精度δ S的变化情况。

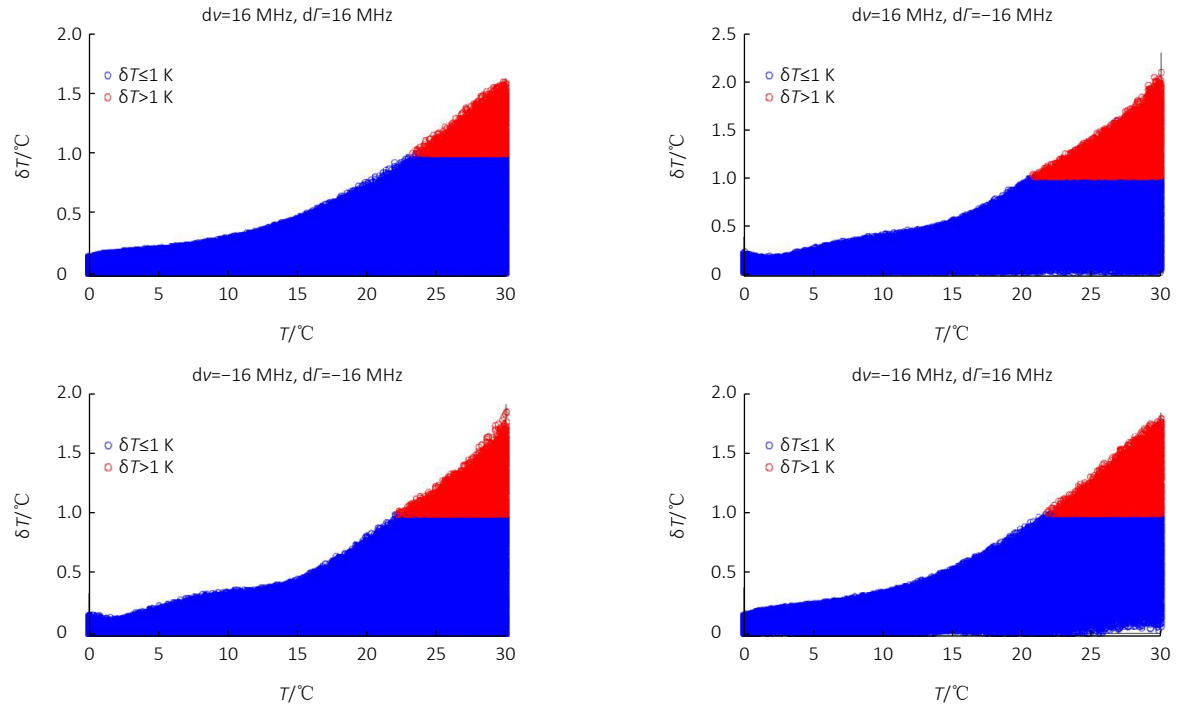


图2 频移和线宽对温度变化的影响

Fig. 2 Effect of frequency shift and linewidth on temperature variation

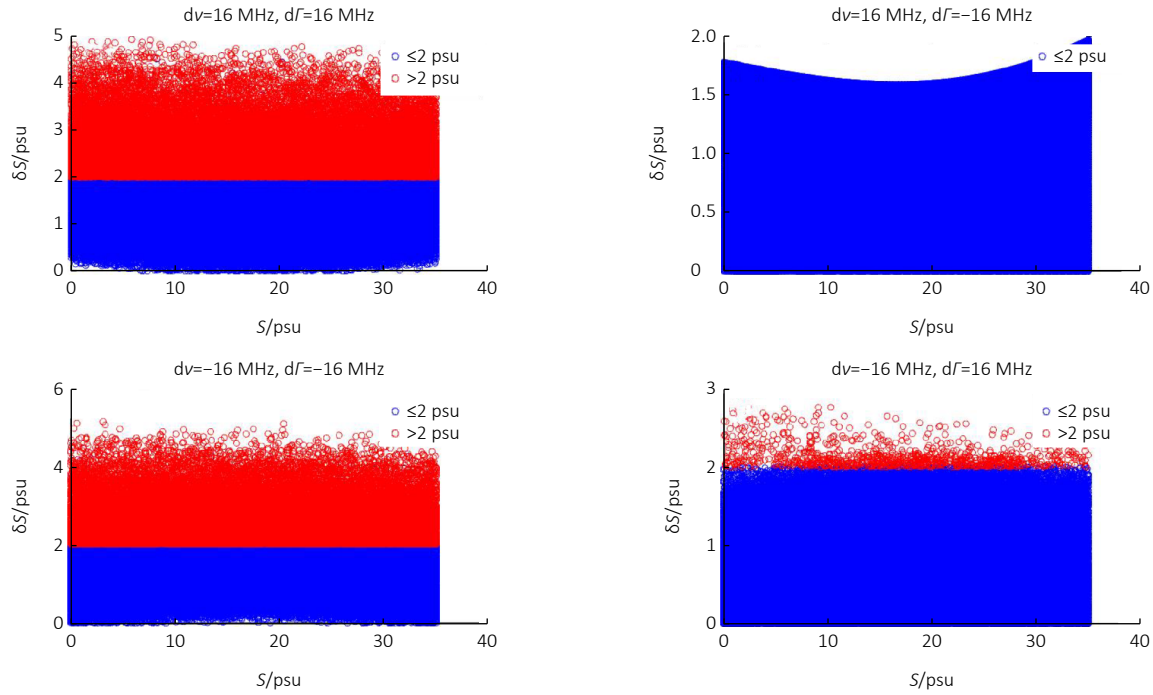


图 3 频移和线宽对盐度变化的影响

Fig. 3 Effect of frequency shift and linewidth on salinity variation

图中横轴代表盐度，纵轴展示了在相同盐度下、不同温度 (0~30 ℃) 所对应的盐度反演精度δS的分布。蓝色点代表$\delta S \leqslant 2$ psu，红色点代表$\delta S > 2$ psu。通过分析不同温度下水体盐度反演精度受偏置量的影响，结果显示：偏置所引起的盐度反演不确定度与频移和线宽偏置的方向密切相关，与水体盐度大小关联较弱。当频移与线宽的探测不确定度均为 16 MHz 时，若两者偏置同向 (即同为+16 MHz 或同为−16 MHz)，盐度反演精度$\delta S > 2$ psu的概率约为 35%；反之，若两者偏置异向 (即一个为+16 MHz，另一个为−16 MHz)，则 ΔS 保持在$\delta S \leqslant 2$ psu的概率可达 99%。在整个温盐范围 (温度 0~30 ℃、盐度 0~35 psu) 内统计，当布里渊频移与线宽的探测不确定度均为 16 MHz 时，盐度反演精度$\delta S \leqslant 2$ psu的概率约为 82%。

整体来说，在设定的温度 (0~30 ℃) 与盐度 (0~35 psu) 范围内，布里渊频移与线宽的探测不确定度控制在 16 MHz 时，可同时实现温度反演精度$\delta T \leqslant 1$ K且盐度反演精度$\delta S \leqslant 2$ psu的概率约为 78%。基于此分析，在后续激光雷达系统设计中，将布里渊频移与线宽的探测不确定度约束在 16 MHz 以内，即可在保证温度反演精度达到 1 K 的同时，使盐度反演精度相应地满足 2 psu 的要求。

3 激光雷达系统及布里渊散射谱探测方法

为了获取高精度的完整的瑞利及布里渊光谱，本文设计了一种高精度鉴频器 Fizeau 干涉仪结合高灵敏 PMT 阵列的海洋多要素遥感探测系统，并搭建了原理验证装置来验证水体温度和盐度测量能力。海洋多要素遥感探测系统包括发射系统、接收系统和综合控制及数据处理系统，如图 4 所示。发射系统的核心是稳频激光器，

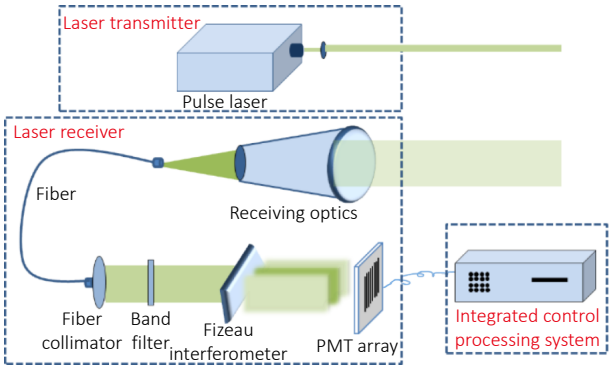


图 4 海洋多要素遥感探测系统组成示意图

Fig. 4 Schematic of a marine multi-element remote sensing detection system

是激光光谱探测所需的窄线宽、高稳频的激光光源，作为频移计算的基准量。接收系统包括接收光学系统、准直光学系统、窄带滤光片、Fizeau 干涉仪、光束整形系统、PMT 阵列，接收光学系统收集水体散射的回波信号，通过准直光学系统将回波信号光调整成准平行光，经窄带滤光片过滤大部分背景杂散光，再通过 Fizeau 干涉仪进行频率分辨，Fizeau 干涉仪输出的干涉条纹通过光束整形系统缩束或扩束使得干涉条纹能够被 PMT 阵列探测器的像面接收、探测，PMT 阵列探测器将电压信号输出至综合控制及数据处理系统。PMT 阵列探测器输出的电压信号经过综合控制及数据处理系统高速采集、信号处理及反演输出布里渊散射谱的频移、线宽测量值，代入温盐双参数反演模型计算得到水体的温度、盐度。

由前一节计算结果，为了满足水体的温度反演精度≤1 K，盐度反演精度≤2 psu，布里渊线宽和频移量探测不确定度需要控制在 16 MHz 以内，下面对稳频激光器、Fizeau 干涉仪和 PMT 阵列器件进行选型和参数设计。

3.1 稳频激光器选型

由于激光器的中心频率的整体漂移对 PMT 的影响能够通过完整谱型的测量来消除，即对频移的反演影响较小，考虑激光器的中心频率稳定性相当于对频谱的展宽，会对线宽的反演有影响，激光器的中心频率漂移控制在 10 MHz 以内。窄线宽激光器[12] 采用种子注入技术实现窄线宽、单纵模的激光输出，采用碘分子稳频技术实现高频率稳定性。原理验证装置选用商业化的窄线宽稳频激光器作为光源，它通过偏频锁定技术将激光器的频率稳定性进行优化，以满足 10 MHz 的要求。

3.2 探测器选型

PMT 探测器的阵列规模 (即通道数) 决定了获取的布里渊光谱分辨率，选取不同数量的通道进行频谱成像得到分辨率成像曲线，如图 5 所示。在高斯曲线的基础上加入泊松噪声后，考虑到不同的频谱分辨率，可选择不同数量的通道进行频谱接收。结合图 5 可知，通道数越多，分辨率也就越高，但是高光谱分辨率导致每个通

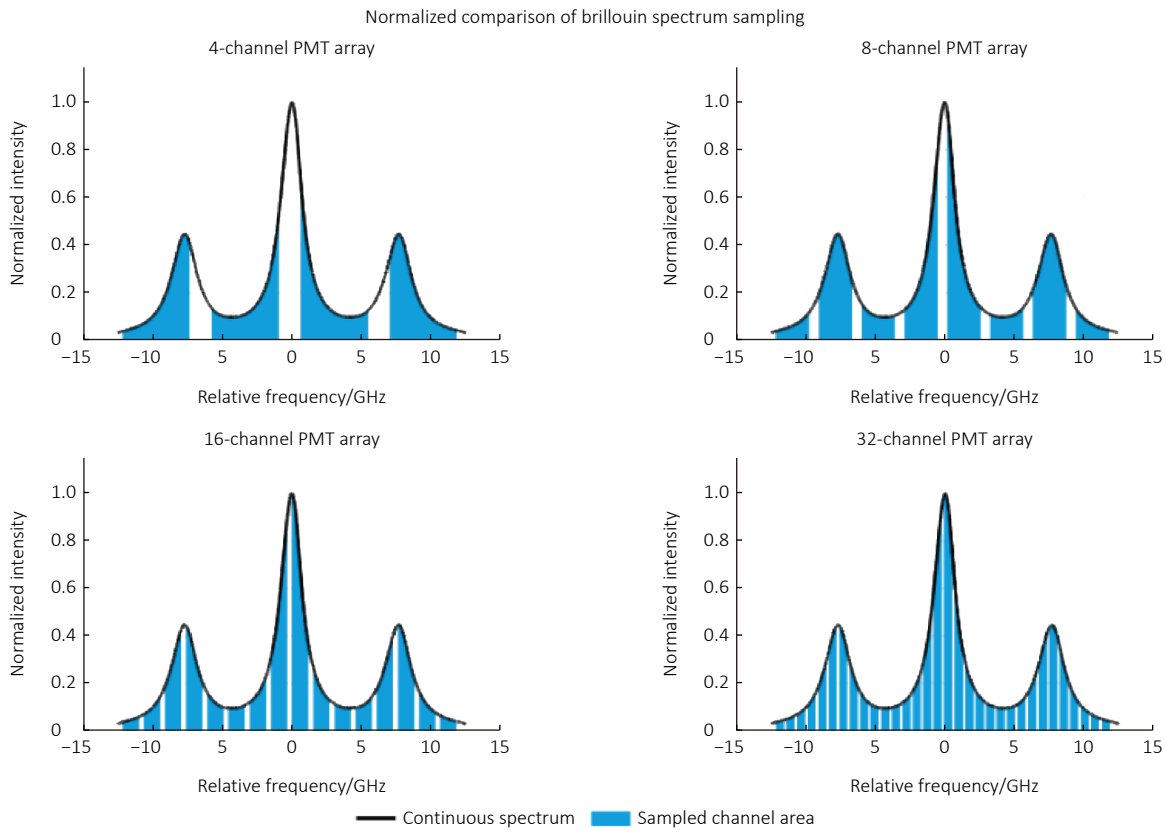


图 5 不同有效通道情况下 PMT 探测器上获得的曲线

Fig. 5 Normalized comparison of spectrum on different types of PMT array

道能量极微弱，容易与噪声混叠，导致误差增大。针对温度为 20 ℃、盐度为 30 psu 的典型的瑞利-布里渊散射光谱，采用器件函数卷积、阵列各通道离散化探测的方法来模拟多通道 PMT 探测到的信号，最后添入高斯分布的白噪声来模拟背景噪声和电噪声，获得了不同通道数量的 PMT 探测到的光谱仿真信号，并对仿真的接收信号进行布里渊散射光谱特征提取，具体方法见文献 [13-15]，结果如图 6 所示。根据仿真计算，8 个通道以上可以满足温盐探测需求，在本文的后续研究中，选取 16 通道 PMT 探测器[5]。

3.3 Fizeau 干涉仪设计

Fizeau 干涉仪是布里渊光谱探测的核心部件。当激光光束通过 Fizeau 干涉仪，在输出端不同频率和不同入射倾角的光会在不同位置发生强透过现象，产生干涉条纹。将激光光束整形成准平行光束，光束光轴沿 Fizeau 干涉仪法线方向穿过干涉仪，光束中的瑞利组分及附近的两个布里渊组分会形成 3 个强透过峰，中间是瑞利峰，两侧是布里渊峰，三个峰分别出现在 Fizeau 干涉仪的不同位置。通过探测透过峰的强度来重构布里渊散射谱，进而提取出布里渊散射频移和线宽。

Fizeau 干涉仪由两个互成 α 角度的反射率很高的平板组成，两个平板间的介质为空气，平板是融石英玻璃材料的镜面，两个平板相对的内侧镀有 532 nm 的高反射率膜，平板外侧镀有增透膜层。

Fizeau 干涉仪平板的反射率、倾角、间距和光束发散角是影响干涉仪能量透过率以及器件函数线宽的重要参数。当携带瑞利及布里渊光谱的激光信号经过 Fizeau 干涉仪，激光信号会被器件函数即透过率函数展宽，其形式可看作一个卷积过程，从而与原信号产生差别。因此，为了探测原信号的光谱信息，Fizeau 干涉仪需要重点关注两个参数：①自由光谱范围 (FSR)，保证瑞利、布里渊谱不重叠；②器件函数线宽，与自由光谱范围相适应。

基于布里渊散射理论，计算了典型海水的温度范围在 15~25 ℃，盐度范围在 30~35 psu 区间时，水体的频移和线宽的理论值，结果是频率的取值范围在 7.562 GHz (T=15 ℃，S=30 psu)~7.791 GHz (T=25 ℃，S=35 psu)，线宽的取值范围在 0.541 GHz (T=25 ℃，S=30 psu)~0.748 GHz (T=15 ℃，S=35 psu) 之间。从海水瑞利散射和布里渊散射结果可以看出，两个布里渊峰之间如果不发生重叠，自由光谱范围应该选择大于 21 GHz，考虑一定冗余量，Fizeau 干涉仪自由光谱范围设置为 25 GHz。自由光谱范围由干涉仪的平板间距决定，计算公式如下：

$$FSR = \frac{c}{2nL}, \tag{7}$$

式中：L 为 Fizeau 干涉仪的平板间距；c 为光速；n 为填充介质折射率 (空气取 1)，计算得到 25 GHz 自由光谱范围对应的平板间距 L 为 6 mm。

Fizeau 干涉仪函数线宽与原始的海水瑞利布里渊散

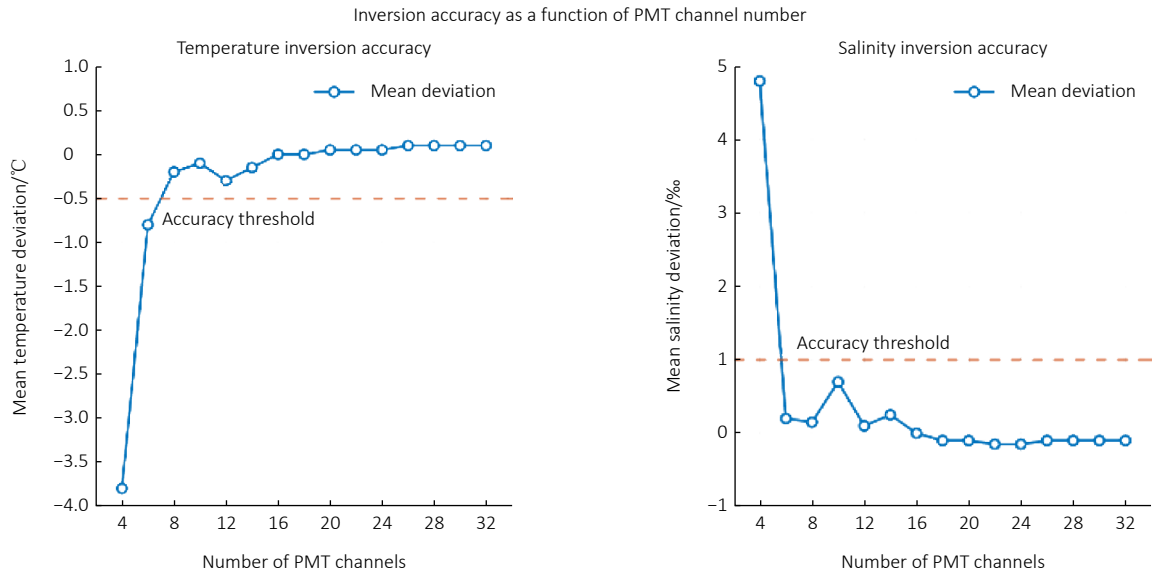


图 6 温盐测量精度与 PMT 通道数的关系

Fig. 6 Inversion accuracy as a function of PMT channel number

射信号卷积，得到输出的干涉条纹。器件函数线宽愈小，原始信号失真愈小，但是干涉仪的能量透过率愈低。器件函数线宽愈大，虽然能量透过率增大，但是瑞利谱和布里渊谱重叠量增加而增大了区分难度。当器件函数线宽在 1.2 GHz 时，原始信号在频移量为±12.5 GHz 时的边带输出功率相对于布里渊峰的输出功率的比值约 2.5%，不影响布里渊峰的获取。Fizeau 干涉仪的器件函数线宽控制在 1.2 GHz 以内。干涉仪函数线宽由 Fizeau 干涉仪的镜面反射率决定。根据多光束干涉的干涉理论，干涉仪透过率函数可以近似看作是爱里 (Airy) 函数，具体形式为

$$T_{\mathrm{FI}}=\left(1-\frac{A}{1-R}\right)^2\frac{1}{1+\dfrac{4R}{(1-R)^2}\sin\left(\dfrac{\pi\nu}{F}\right)^2}, \tag{8}$$

式中：T_{FI} 为干涉仪透过率函数，F 表示自由光谱范围，A 代表光被干涉仪平板膜层吸收掉的比例，一般取 0.01~0.02。

设干涉仪的器件函数线宽为$\Delta\upsilon$，线宽与自由光谱范围 F 和平板反射率 R 相关，R 的计算公式为

$$R=\left(\frac{\sqrt{1+\left(\dfrac{2}{\pi}\dfrac{F}{\Delta\upsilon}\right)^2}-1}{\dfrac{2}{\pi}\dfrac{F}{\Delta\upsilon}}\right)^2. \tag{9}$$

当 Fizeau 干涉仪的器件函数线宽为 1.2 GHz，自由光谱范围为 25 GHz 时，平板反射率 R 为 0.86。

干涉仪的倾角会使得在较高反射率情况下，Fizeau 干涉仪的传输曲线出现多个自由光谱范围，使得透射曲线变得不对称，影响对后续散射谱的处理。干涉仪的倾角α，即两个平板间的夹角，与干涉仪的通光直径大小 D 有关。其关系可以表示为

$$\alpha=\frac{\lambda}{2D}. \tag{10}$$

当 Fizeau 干涉仪的通光直径 D 取 40 mm 时，干涉仪的平板 6.65×10^{-6} rad。Fizeau 干涉仪的设计要求如表 5 所示。

表 5　Fizeau 干涉仪设计要求

Table 5　Design requirement of Fizeau interferometer

参数名称	指标
平板间距	6 mm
加工口径	40 mm
平板夹角	6.65 μrad
平板镜面反射率	优于0.86

3.4　原理验证装置

基于上述分析，为实现高精度的海水温盐反演，并依据稳频激光器、探测器及 Fizeau 干涉仪等关键部件的设计要求，课题组研制了一套原理验证装置。该装置主要由发射系统、接收系统以及综合控制与数据处理系统三部分组成，其主要技术参数如表 6 所示。

表 6　原理验证装置主要参数汇总

Table 6　Key parameters of the proof of concept setup

系统组成	参数名称	指标
发射系统	中心波长	532.29 nm
	单脉冲能量及脉宽	1 mJ@7.6 ns
	频率稳定性	6 MHz
接收系统	接收光学口径	50 mm
	Fizeau平板间距	6 mm
	Fizeau口径	40 mm
	Fizeau平板夹角	6.65 μrad
	Fizeau平板镜面反射率	0.87
	PMT探测器通道数	16
综合控制及数据处理系统	波形采样率	500 MHz

3.5　布里渊散射谱提取方法

瑞利布里渊散射光谱经 PMT 阵列探测后生成多通道 PMT 信号，综合控制及数据处理系统将信号进行放大、高速采集，输出多通道波形。将多通道波形进行时间切片，相同时间切片的多通道信号作为一组频率域的剖面信号，能够完整体现三个峰，中间是瑞利峰，两侧是布里渊峰。对该剖面信号进行异常信号剔除、噪声抑制，得到的实际输出功率的去噪后信号为P'_N。

布里渊散射谱提取需要依据目标特性和 Fizeau 干涉仪系统参数来构建瑞利布里渊散射模拟谱。首先，水体散射回波为瑞利布里渊散射信号，它在频率域的特性用 3 个洛仑兹曲线表示，见式 (1)。将 Fizeau 干涉仪对水体散射的回波的作用看作是一个卷积过程，输出的信号为 $I\otimes FI$。PMT 阵列由 N×1 个相同的长条像元组成的阵列，每个像元对应不同的频率区间，像元的窄边方向对应频率的大小属于线性变化，并且 PMT 阵列探测的整个频率范围不超过一个自由光谱范围。设像元的感光面覆盖的频率变化量为ν_{d}，像元的空隙覆盖的频率变化量为ν_{g}，那么第 N 个像元覆盖的激光光谱频率范围为 $[\nu_0+(N-1)(\nu_{\mathrm{d}}+\nu_{\mathrm{g}}),\nu_0+N\nu_{\mathrm{d}}+(N-1)\nu_{\mathrm{g}}]$，其中 ν_0 是第一个像元所覆盖的频率域的低端值。PMT 阵列每个像元对信号

的探测看作是频谱域的剖面信号随频率的积分[16-17]，可以写为

$$P_N = \int_{\nu_0+(N-1)(\nu_d+\nu_g)}^{\nu_0+N\nu_d+(N-1)\nu_g} I(\nu)\otimes FI(\nu)\mathrm{d}\nu\,. \tag{11}$$

式中：ν_d和ν_g作为已知量，可以通过对 Fizeau 干涉仪的标定来获取。瑞利布里渊散射模拟谱型由 N 个像元的探测功率的最大值归一化曲线来表征$\{P_N\}$。将 PMT 探测器实际数据的多像元剖面信号峰值归一化曲线$\{P'_N\}$与瑞利布里渊散射模拟谱型$\{P_N\}$联立，将$\nu_{i=0,d,R,B}$和$\Gamma_{i=R,B}$作为待拟合值，采用非线性最小二乘拟合可获取布里渊散射谱的频移ν_B、线宽Γ_R，最后代入温盐反演模型获取温度、盐度值。

4 原理验证实验

在实验室水槽环境下，对自研原理验证装置的分层水体温盐剖面探测功能进行验证。采用两个水槽来模拟两个待测的水体切片，两个水槽可以分别进行温度、盐度的调控。水槽的温度通过冰袋和加热棒进行降温或升温，水槽的盐度通过在水体中加入 99.6% 纯度的 NaCl 粉末来配制，用搅拌的方法加速水体温度、盐度的均匀化。水槽长度设置为 1 m 来保证激光脉冲 (脉宽 7.6 ns) 能完整进入水体切片。

自研原理验证装置发射激光，依次穿过两个水槽，两个水槽的散射回波先后进入原理验证装置的接收机。采用 16 通道 PMT 探测器，输出的 16 个回波信号曲线进行异常信号滤除、去噪，从时间序列上，每条回波信号会出现先后两个峰，分别代表两个水槽的回波信号。本文测量对象是两个水槽内的水体的温盐信息，水槽一内水体的设置参数为温度 23.1 ℃、盐度 33.8 psu，水槽二内水体的设置参数为温度 23.4 ℃、盐度 34.8 psu。在测量过程中，两个水槽的温度、盐度均保持不变。本实验在对水体探测时，为了提升信噪比，会对激光回波进行预处理，并采用多次脉冲回波累积的方式提升信号信噪比，并采用 3.5 节提到的布里渊散射谱提取方法来进行激光布里渊散射的频移量、线宽量的探测。

本实验采集的原始回波廓线如图 7 所示。原始回波廓线中包含了由探测器暗电流、电路热噪声以及环境杂散光引入的背景噪声。此外，由于仪器长时间运行可能导致的温度变化，信号基线会呈现慢速的随机漂移。为消除这些影响，设计了一种基线校正方法，通过对背景噪声和电路暗噪声基底的实时监测和相关去除来完成信号的基线校正。

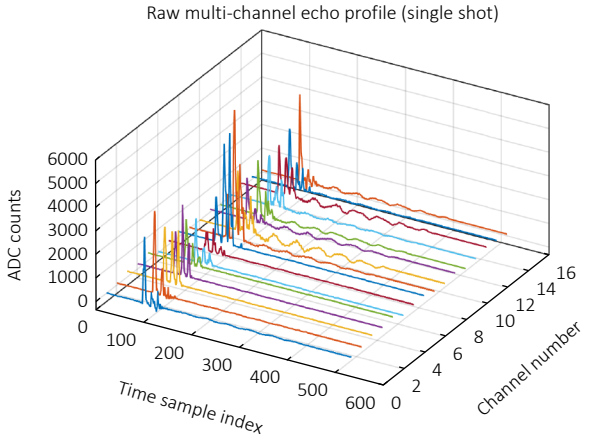


图 7 原始采集回波信号

Fig. 7 Raw multi-channel echo profile (single shot)

信号采集前，在激光不出光的条件下采集一段背景噪声和电路暗噪声的数据。将该噪声波形的平均值作为静态背景模板，从每一次激光触发的信号中逐点扣除。针对单次触发事件的基线漂移，选取了每次触发前回波信号尚未到达的时间窗口 (前 40 个采样点)，计算此窗口内的计数值平均值，并将其作为该次触发事件的动态基线，从整个时间序列中扣除，完成信号的基线校正，结果如图 8 所示。

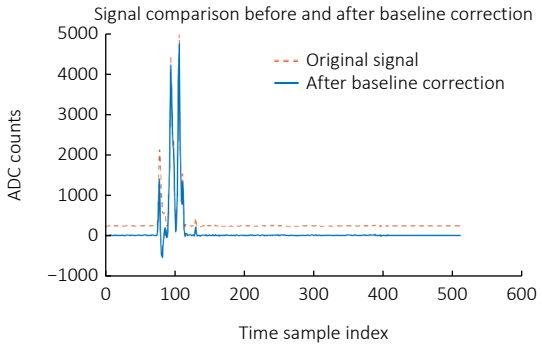


图 8 基线校正结果

Fig. 8 Signal comparison before and after baseline correction

通过上述处理，信号基线被校正至零点附近，有效抑制了静态和动态的噪声基底。除了噪声影响外，在长时间的数据采集中，部分激光触发事件可能因激光器能量波动、水体环境变化等特殊因素而产生异常的回波信号。这些无效数据如果参与平均，将会严重降低最终信号的信噪比。为此，本文设计了一套基于能量阈值的有

效数据筛选算法。

首先，识别所有通道中在多次触发事件中平均信号积分能量最强的通道，将该通道作为信号质量判定的参考通道。之后，计算每次触发事件在参考通道上的总积分能量，设定一个能量阈值 (如所有触发事件中最大能量的 15%)，任何积分能量低于此阈值的触发事件将被标记为无效数据，并从后续的数据处理流程中剔除。图 9 是经过本算法筛选后 10555 组数据求和平均后的结果。

经过上述校正与清洗后，所有有效的触发事件数据被进行累加平均。最终得到如图 10 所示高信噪比、平滑稳定的信号廓线图。

从平均后的信号中，精确地提取出分属于两个水槽的回波信号。定位出时间序列上的两个峰值包络的核心区域，在每个峰值区域内定义一个积分窗口，如图 11 所示；对窗口内的信号进行积分，从而得到两个 16 通道的光谱能量向量。这两个向量分别代表了从第一个和第二个水槽回波中提取出的离散布里渊-瑞利散射光谱，如图 12 所示。

获取两水槽切片对应的 16 通道离散光谱能量向量后，采用基于非线性最小二乘法的迭代优化算法进行光谱重构。图 13 显示了目标信号在水槽 1、水槽 2 的两个切片的光谱重构的结果。光谱重构采用由三个洛仑兹线型组成的瑞利-布里渊散射光谱理论模型，如式 (1)，并以布里渊频移ν_{B}、线宽 Γ_{B} 为迭代寻优的主要目标。在此过程中，三个散射峰 (一个瑞利峰和两个布里渊峰) 的强度参数I_{r0}、I_{b0} (左)、I_{b0} (右)，以及瑞利散射的频移ν_{R}、线宽Γ_{R}也作为附带优化参数。光谱重构算法优化的目标是最小化理论模型 (式 (1)) 在光电倍增管 PMT 各通道对应频率区间内的等效积分值与实际 16 通道实测数据 (经峰值归一化处理后的探测器输出曲线) 之间的残差平方和。当迭代收敛后，由最优参数重建出的连续瑞利-布里渊散射光谱即对应图 13 中的拟合曲线 (fit curve)。将该连续曲线在 PMT 阵列各像元的频率覆盖区间内进行等效积分，得到离散化的拟合数据，即为图 13 中橙色直方

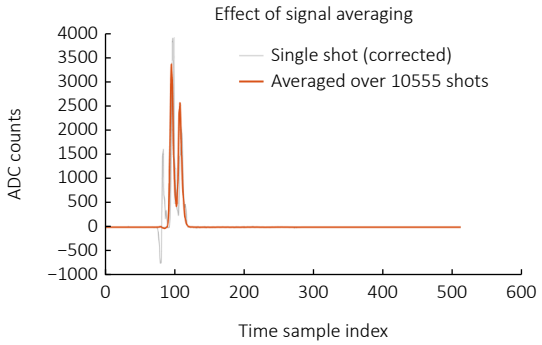


图 9 算法筛选后数据求和平均结果

Fig. 9 Effect of signal averaging after algorithmic filtering

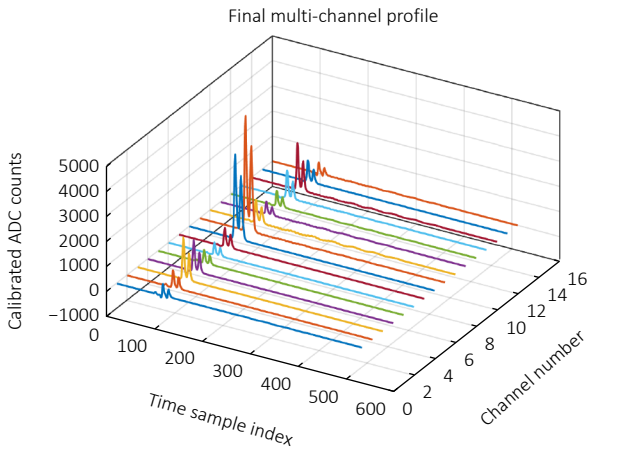


图 10 去噪校正后的回波廓线

Fig. 10 Signal profile after denoising and correction

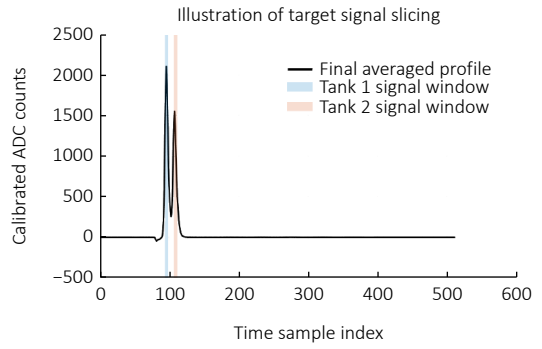


图 11 目标信号切片区域示意图

Fig. 11 Illustration of target signal slicing

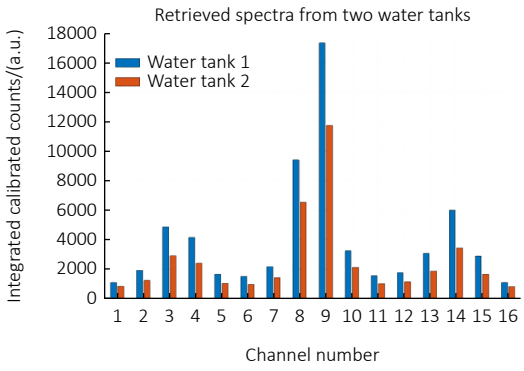


图 12 目标信号切片结果

Fig. 12 Retrieved spectra from two water tanks

图所示拟合数据 (fitted data)。实际 16 通道测量数据如图 13 中蓝色直方图的实验数据 (experiment data) 所示。

将从拟合曲线中获得的布里渊频移ν_B与线宽Γ_B输入至温盐双参数反演模型中，即可分别反演出两个水槽对应的温度 T 与盐度 S 的测量结果。

本文展示了对双水槽的一种温盐状态进行五次重复测量的反演结果，如表 7 所示。每次测量结果实际上是对 8000 次激光发射脉冲的数据进行筛选、累加平均的结果。图 12 和图 13 均显示了表 7 中第一次测量的对应结果。针对图 12 中水槽 1 的信号回波切片，其光谱重构结果如图 13 (a) 所示，光谱重构的均方根误差 (RMSE) 为 0.0045。针对图 12 中水槽 2 的信号回波切片，其重构结果如图 13 (b) 所示，光谱重构的均方根误差 (RMSE) 为 0.0041。

由表 7 实验结果可知，本系统在五次测量中的最大测温误差为 0.72 ℃，最大测盐误差为 1.52 psu；将五次实验的平均测温/盐误差作为测温/盐精度，因此，本系统的测温精度为 0.37 ℃，测盐精度为 0.79 psu。

温盐的反演精度与数据的累积次数 (即积分次数) 密切相关。图 14 展示了第一次测量数据的积分次数与温盐反演结果的关系。通过调整用于求和平均的回波数量，控制积分次数从 1000 逐步增加至 10000 (步长 1000)，并分别对各积分次数下的温盐信息。分析表明，在本次实验的第一次测量数据中，当脉冲累积次数仅为 1000 次时，形成的激光光谱谱形尚不稳定，基于该数据提取的光谱线宽量Γ_B呈负偏置状态 (即小于实际值)。随着累积次数逐渐增加，信号信噪比提升，光谱谱形趋于稳定，Γ_B的探测值随之增大。结合表 2 中温盐参数随Γ_B的变化趋势，温度 T 的反演值呈减小趋势，而盐度 S 的反演值呈增大趋势。这证实了足够的积分次数对于获得稳定、准确的光谱参数及后续温盐反演结果至关重要。在实际测量中，更高的积分次数虽有助于获得更高信噪比的信号，从而提升反演精度，但同时也会延长采集时间并增加存储负荷。因此，在实际应用中，建议积分次数至少

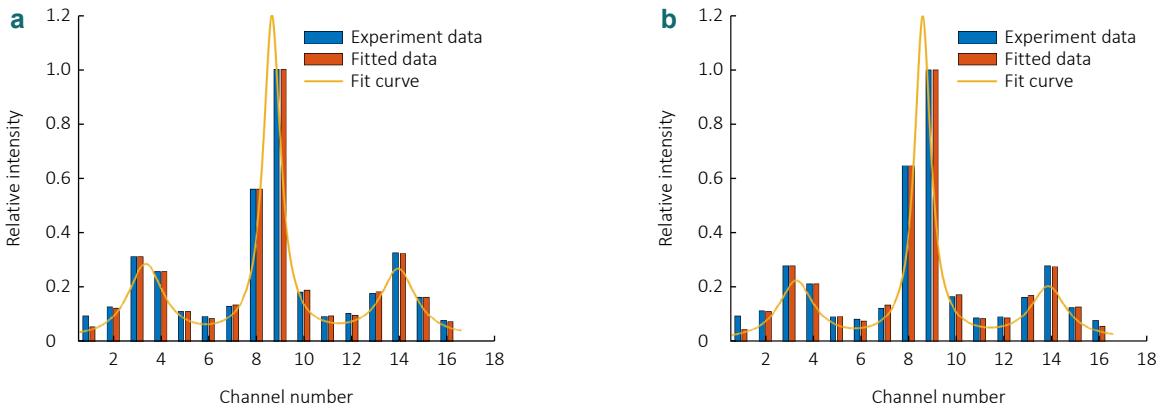


图 13 两水槽切片光谱重构结果。(a) 水槽 1；(b) 水槽 2

Fig. 13 Spectral reconstruction results from spectral slices in two tanks. (a) Water tank 1; (b) Water tank 2

表 7 五次测量实验结果

Table 7 Test results of five measurements

序号	水槽编号	频移/GHz	线宽/GHz	温度/℃	盐度/psu	理论温度/℃	理论盐度/psu	温度误差/K	盐度误差/psu
1	1	7.6964	0.5718	22.90	33.58	23.1	33.8	0.20	0.22
	2	7.7082	0.5769	22.68	35.80	23.4	34.8	0.72	1.00
2	1	7.6988	0.5688	23.58	34.32	23.1	33.8	0.48	0.52
	2	7.6912	0.5705	23.02	34.12	23.4	34.8	0.38	0.68
3	1	7.7020	0.5793	22.49	35.21	23.1	33.8	0.61	1.41
	2	7.7118	0.5602	23.76	34.33	23.4	34.8	0.36	0.47
4	1	7.6926	0.5690	23.04	32.74	23.1	33.8	0.06	1.06
	2	7.7100	0.5599	23.77	34.04	23.4	34.8	0.37	0.76
5	1	7.6964	0.5763	22.63	34.10	23.1	33.8	0.47	0.30
	2	7.7203	0.5671	23.38	36.32	23.4	34.8	0.02	1.52

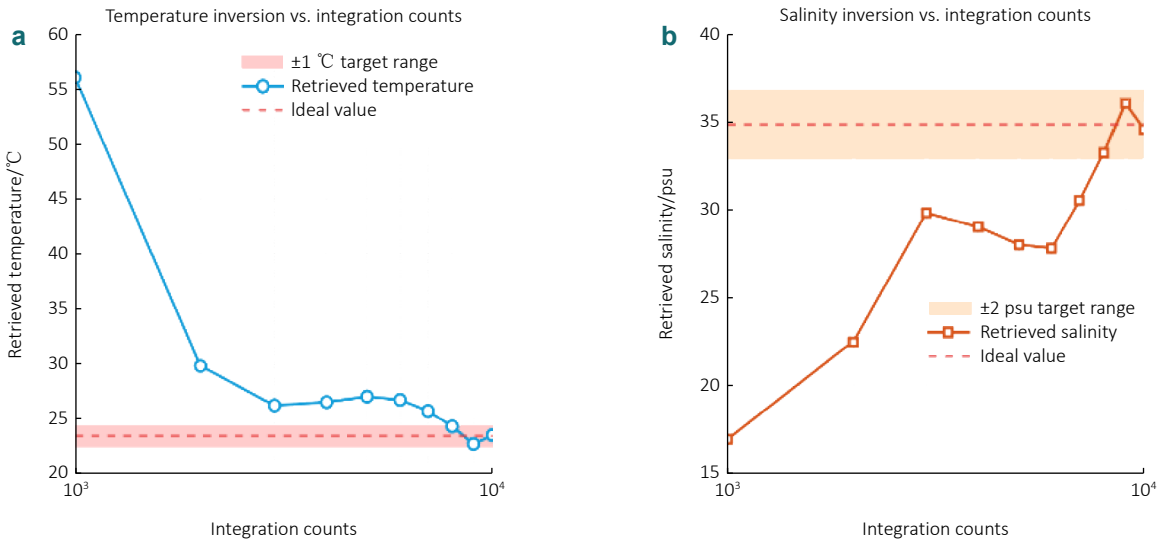


图 14 不同积分次数对光谱反演结果的影响。(a) 积分次数对温度反演精度影响；(b) 积分次数对盐度反演精度影响

Fig. 14 Effect of temperature and salinity inversion on the integration counts. (a) Temperature inversion vs. integration counts; (b) Salinity inversion vs. integration counts

设为 8000 次，在保证精度的前提下，兼顾时间效率与数据成本，获取稳定可靠的反演结果。需说明，图 14 显示的温度下降与盐度上升的现象仅为该次特定测量数据中观察到的现象，但随着积分次数累积温盐反演精度提升是趋势。

5 结 论

本文基于布里渊光谱线宽、频移与海水温度、盐度的双参数反演模型，研究了在不同海水条件下，布里渊频移与线宽的测量偏置对温盐反演精度的影响。研究表明，在水体温度 0~30 ℃、盐度 0~35 psu 范围内，布里渊线宽与频移的探测不确定度若控制在 16 MHz 以内，能够同时实现温度反演精度优于 1 K 且盐度反演精度优于 2 psu。基于此线宽与频移的探测不确定度要求，本研究设计了一套以高精度鉴频 Fizeau 干涉仪与高灵敏度 PMT 阵列为核心的海洋多要素遥感探测系统。所研制的 Fizeau 干涉仪口径为 40 mm，平板间距 6 mm，镜面反射率 0.87，平板夹角 6.65 μrad，其自由光谱范围为 25 GHz，器件函数线宽为 1.1 GHz。基于该干涉仪搭建的双水槽原理验证系统，不仅能够实现对水体温度与盐度的同步探测，还因其双水槽可独立进行温、盐调控，具备了分层水体剖面探测的功能验证能力。此外，本文分析了脉冲累积次数对反演精度的影响。实验表明，在实验室条件下，经 8000 次脉冲累积后，系统测温精度可达 0.37 ℃，测盐精度可达 0.79 psu。本工作为后续将激光布里渊光谱技术应用于船载、机载等移动平台的海洋多要素遥感探测提供了重要的技术依据和实验参考。

作者贡献

孙倩：论文编写和方案设计； 杨颂：反演模型分析；梁琨：光谱反演算法；张景豪：电子学分析；任明源：理论分析；李同：光学设计；张睿哲：实验研究；沈振民：温度反演算法；叶小敏：应用分析；郑永超：方案总体指导。

利益冲突

所有作者声明无利益冲突

参考文献

1. Wang L L, Zhao H Z, Zhang K L. Current status and developing trends of ocean color satellites[J]. *Spacecr Eng*, 2021, **30**(6): 44−51.
王丽丽, 赵鸿志, 张可立. 海洋水色卫星的发展现状及趋势[J]. 航天器工程, 2021, **30**(6): 44−51.
2. Lin M S, He X Q, Jia Y J, et al. Advances in marine satellite remote sensing technology in China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, **41**(10): 99−112.
林明森, 何贤强, 贾永君, 等. 中国海洋卫星遥感技术进展[J]. 海洋学报, 2019, **41**(10): 99−112.
3. Yang T, Xu P M, Fu Z H, et al. Design and implementation of new generation ocean color and temperature scanner system[J]. *Spacecr Recovery Remote Sens*, 2025, **46**(2): 49−62.
杨亭, 徐彭梅, 付智红, 等. 新一代海洋水色水温扫描仪系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2025, **46**(2): 49−62.
4. Chen W, Shao Q L, Zhou X, et al. Algorithm design and system application of HY-1 satellite observation mission planning[J]. *Chin*

Space Sci Technol, 2024, **44**(2): 145−153.
陈旺, 邵庆龙, 周晓, 等. 海洋一号卫星观测任务规划算法设计及系统应用[J]. 中国空间科学技术 (中英文), 2024, **44**(2): 145−153.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Yu Y. Research on high-accuracy remote sensing of ocean temperature and salinity based on Brillouin lidar[D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
余寅. 基于布里渊激光雷达的高精度海洋温盐遥感研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
https://doi.org/10.7666/d.D01078447.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
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.
14. Liang M F, Chen S, Guo Y X, et al. Simulation system for measuring multiple environmental elements in the ocean based on direct scattering spectrum[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(6): 250066.
梁梦凡, 陈升, 郭圆新, 等. 基于直接散射光谱的海洋多环境要素测量仿真系统[J]. 光电工程, 2025, **52**(6): 250066.
15. 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]. *Micro Opt Techno Lett*, 2022, **64**(4): 650−654.
16. Zhao Y P, Wang Y Q, Liang K, et al. Underwater temperature and salinity measurement by Rayleigh–Brillouin spectroscopy using Fizeau interferometer and PMT array[J]. *Remote Sens*, 2024, **16**(12): 2214.
17. 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.

A marine multi-element remote sensing detection system based on laser Brillouin spectroscopy

Sun Qian[1,2*], Yang Song[1,2], Liang Kun[3], Zhang Jinghao[1,2], Ren Mingyuan[1,2], Li Tong[1,2], Zhang Ruizhe[1,2], Shen Zhenmin[1,2], Ye Xiaomin[4], Zheng Yongchao[1,2]

[1] Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;
[2] Core Professional Laboratory of Laser Information Perception Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;
[3] School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;
[4] National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China

Abstract

Objective The three-dimensional structure of oceanographic parameter profiles, particularly temperature and salinity, has persistently posed a significant challenge in remote sensing detection. While traditional ocean color satellites and microwave radiometers can achieve sea surface temperature measurements with accuracies better than 0.5 K and salinity measurements with monthly averages of 0.1 psu, these techniques are fundamentally limited to two-dimensional planar observations. In situ measurements from ships and buoys, though capable of vertical profiling, yield discrete, asynchronous, and non-global data that cannot satisfy the requirements of ocean science, environmental monitoring, marine economy, and national defense. Conventional oceanographic lidar systems, which rely solely on echo intensity detection, are unable to simultaneously measure multiple parameters like temperature and salinity. To address this critical gap, this paper proposes a novel remote sensing system for multi-parameter oceanographic detection based on Brillouin laser spectroscopy.

Methods The proposed system leverages the laser non-elastic scattering effect, specifically spontaneous Brillouin scattering, which occurs

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62175072, 62575108)
*Correspondence: Sun Q, E-mail: sunqian2345216@163.com

when photons interact with thermal acoustic phonons in seawater. The Brillouin frequency shift and linewidth are functions of seawater temperature and salinity, as they depend on physical properties including sound velocity, refractive index, density, and viscosity coefficients. A two-parameter inversion model is established by solving coupled equations that relate Brillouin shift and linewidth to temperature and salinity. Through regression fitting of numerical data generated across temperature ranges of 0–30 °C and salinity ranges of 0–35 ‰, empirical formulas are derived to directly calculate temperature and salinity from measured Brillouin parameters.

The detection system comprises a transmitter system, a receiver system, and an integrated control and data processing system. A frequency-stabilized narrow-linewidth laser employing injection seeding and iodine molecular frequency stabilization technology serves as the light source, with a center frequency stability of 6 MHz, wavelength output at 532.29 nm, single pulse energy of 1 mJ, and pulse width of 7.6 ns. The core spectroscopic detection module consists of a high-precision Fizeau interferometer coupled with a highly sensitive 16-channel photomultiplier tube (PMT) array. The Fizeau interferometer is designed with a plate spacing of 6 mm to achieve a free spectral range of 25 GHz, a mirror reflectivity of 0.873 to yield an instrumental function linewidth of 1.079 GHz, and a plate angle of 6.65 μrad with a clear aperture of 40 mm. When the laser beam passes through the Fizeau interferometer, the Rayleigh and two Brillouin components form three distinct transmission peaks at different positions on the PMT array. The multi-channel signals are processed through baseline correction, abnormal signal rejection, noise suppression, and cumulative averaging. A nonlinear least-squares fitting algorithm is then employed to reconstruct the discrete Brillouin spectrum, extracting the frequency shift and linewidth from the measured data.

Results and Discussions Simulation analyses reveal that to achieve temperature retrieval accuracy ≤1 K and salinity accuracy ≤2 psu for typical seawater conditions (temperature 10-25 °C, salinity 30-35 psu), the measurement uncertainty of both Brillouin shift and linewidth must be controlled within 20 MHz. This requirement drives the stringent design specifications of the system components. The PMT channel number selection is optimized based on simulation results showing that 8 or more channels satisfy the detection requirements, with 16 channels selected for the actual system implementation.

Laboratory experiments were conducted in a controlled water tank environment using two separate tanks to simulate layered water body slices, with independently controllable temperature and salinity conditions. Tank 1 was maintained at 23.1 °C and 33.8 psu, while Tank 2 was maintained at 23.4 °C and 34.8 psu. The laser pulses sequentially passed through both tanks, and the backscattered signals were received and processed. After data accumulation of 8000 pulses, the system achieved temperature measurement accuracy of 0.37 °C and salinity accuracy of 0.79 psu, with maximum errors of 0.72 °C and 1.52 psu respectively over five repeated measurements. The relationship between accumulation counts and measurement accuracy was investigated, showing that accuracy improves with increasing accumulation counts and converges to the system's optimal performance at approximately 8000 accumulations.

Conclusions This paper successfully demonstrates a Brillouin spectroscopy-based remote sensing system capable of simultaneous temperature and salinity profiling in seawater. The system combines a frequency-stabilized laser, a custom-designed Fizeau interferometer with optimized parameters, and a multi-channel PMT array for high-resolution spectral detection. The two-parameter inversion model effectively derives temperature and salinity from measured Brillouin shift and linewidth. Laboratory validation confirms that the system achieves temperature accuracy of 0.37 °C and salinity accuracy of 0.79 psu, exceeding the design targets of 1 K and 2 psu respectively. These results establish the feasibility of using Brillouin lidar for remote sensing of oceanographic vertical profiles, providing a promising new approach to address the long-standing challenge of three-dimensional ocean parameter measurement. Future work will focus on field deployment and validation under real oceanic conditions.

Keywords: lidar; temperature; salinity; oceanographic profile

Sun Q, Yang S, Liang K, et al. A marine multi-element remote sensing detection system based on laser Brillouin spectroscopy[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(6): 250377; DOI: 10.12086/oee.2026.250377

Opto-Electronic Journals Group
www.oejournal.org

扫描二维码，获取 PDF 全文