

光学学报

基于受激布里渊散射的海水温度和盐度同步反演

徐宁^{1,2}, 张博^{1,2}, 罗宁宁^{1,2}, 徐进军^{1,2}, 何兴道^{1,2,3}, 史久林^{1,2,3*}

¹南昌航空大学江西省光电信息科学与技术重点实验室, 江西 南昌 330063;

²南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;

³南昌航空大学无损检测与光电传感技术与应用国家工程实验室, 江西 南昌 330063

摘要 为实现海水温度和盐度的同步测量,理论和实验研究了受激布里渊散射(SBS)频移和线宽相结合的数据反演方法。理论上根据经验公式,拟合了SBS频移、线宽随温度、盐度的变化关系。实验上测量了不同温度、盐度下海水的SBS频移和线宽,并利用理论反演模型反演分析了海水的温度和盐度。研究表明,利用频移和线宽相结合的方法可实现海水温度和盐度的同步反演,温度反演误差的最小值为0.04℃、最大值为0.41℃,盐度反演误差的最小值为0.09‰、最大值为0.65‰。

关键词 散射; 受激布里渊散射; 频移; 线宽; 温度; 盐度

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2429001

Simultaneous Inversion of Seawater Temperature and Salinity Based on Stimulated Brillouin Scattering

Xu Ning^{1,2}, Zhang Bo^{1,2}, Luo Ningning^{1,2}, Xu Jinjun^{1,2}, He Xingdao^{1,2,3}, Shi Jiulin^{1,2,3*}

¹Jiangxi Provincial Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;

²Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;

³National Engineering Laboratory for Nondestructive Testing and Optoelectronic Sensing Technology and Application, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China

Abstract To realize the synchronous measurement of temperature and salinity of seawater, we study a data inversion method by combining frequency shift and line width of stimulated Brillouin scattering (SBS) theoretically and experimentally. Theoretically, the variations of frequency shift and line width of SBS with the changes in temperature and salinity are fitted by empirical formulas. Experimentally, the frequency shift and line width of SBS in seawater with different temperatures and salinity are measured, and then the temperature and salinity of seawater are analyzed by the theoretical inversion model. The results indicate that the simultaneous inversion of seawater temperature and salinity can be realized by the combination of frequency shift and line width of SBS. The minimum and maximum temperature inversion errors are 0.04 °C and 0.41 °C, respectively, and the minimum and maximum salinity inversion errors are 0.09‰ and 0.65‰, respectively.

Key words scattering; stimulated Brillouin scattering; frequency shift; line width; temperature; salinity

1 引言

温度和盐度是海水的两个重要参数,因此对海水温度和盐度的测量在认识和研究海洋环境中具有重要意义。目前,海洋温度和盐度的数据获取主要依靠温

盐深剖面仪、静态浮标、舰船航行和卫星遥感等方法^[1-4],但这些方法无法实现大范围、高精度的实时探测。布里渊散射激光雷达^[5-7]作为一种新的海洋探测手段,可以实时探测上层海水的温度、盐度、声速等水体参数。国内外学者对基于布里渊散射的海水温度和

收稿日期: 2022-03-02; 修回日期: 2022-04-12; 录用日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(41666004, 41776111)、国防基础科研项目(JCKY2019401D002)

通信作者: *jiulinshi@126.com

盐度测量进行了充分研究:1984年,Collins等^[8]综述了利用布里渊散射和拉曼散射测量海洋水下声速、温度、盐度等参数;1984年,Hirschberg等^[9]应用布里渊散射实验测量了海水声速和温度;2002年,刘金涛等^[10]用外差激光雷达借助布里渊散射频移得到0.1℃的温度测量精度;2008年,马泳等^[11]提出通过测量布里渊频移和信号功率,实现海水温度和盐度的同步测量;2014年,刘杰^[12]根据布里渊散射频移、信号能量建立了海水的布里渊散射模型,提出了反演海水温度、盐度的方法;2021年,Bao等^[13]提出布里渊散射频移结合拉曼散射光谱的海水盐度反演方法,盐度的反演误差低于0.47‰。

依据布里渊散射的产生机制,布里渊散射激光雷达可分为自发布里渊散射激光雷达和受激布里渊散射(SBS)激光雷达两类^[14-15]。相较于自发布里渊散射激光雷达,SBS激光雷达具有脉宽压缩、高能量反射率、相位共轭等特性,更有利于散射信号的接收及处理。利用SBS激光雷达可以实现水下目标探测和水体参数(声速、温度、盐度等)的实时反演^[16-23]。频移和线宽作为布里渊散射的两个重要频谱特征参数,与海水的温度、盐度、压强等参数密切相关^[24-25]。在实际海洋环境,同一压强(深度)下海水的布里渊频移和线宽主要受温度和盐度的影响,因此可以通过测量频移和线宽反演出温度和盐度数值^[26-27]。

本文从理论上分别计算出不同温度和盐度下海水的SBS频移和线宽,通过函数拟合得到频移和线宽关于温度和盐度的反演模型。实验上,通过测量不同温度和盐度下海水的SBS频移和线宽数值,将其代入反演模型后得到温度和盐度数值,从而实现海水温度和盐度数据反演。实验测量结果验证了所提理论反演模型的可行性,为实际海洋环境下的海水温度、盐度测量提供支撑。

2 理论模型

布里渊散射是入射光与介质中弹性声波场相互作用而产生的非弹性散射,当激光入射到海水中时,布里渊散射的频移 ν_B 和线宽 Γ_B ^[28]可表示为

$$\nu_B = \frac{2n(S, T, \lambda)}{\lambda} v_s(S, T, P) \sin \frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

$$\rho(T, S) = m_0 + m_1 T + m_2 T^2 + m_3 T^3 + m_4 T^4 + m_5 T^5 + m_6 S + m_7 TS + m_8 T^2 S + m_9 T^3 S + m_{10} T^4 S + m_{11} S^{3/2} + m_{12} TS^{3/2} + m_{13} T^2 S^{3/2} + m_{14} S^2, \quad (6)$$

式中: $m_0 = 999.842594$; $m_1 = 6.793952 \times 10^{-2}$; $m_2 = -9.095290 \times 10^{-3}$; $m_3 = 1.001685 \times 10^{-4}$; $m_4 = -1.120083 \times 10^{-6}$; $m_5 = 6.536332 \times 10^{-9}$; $m_6 = 0.824493$; $m_7 = -4.089900 \times 10^{-3}$; $m_8 = 7.643800 \times 10^{-5}$; $m_9 = -8.246700 \times 10^{-7}$; $m_{10} = 5.387500 \times 10^{-9}$; $m_{11} = -5.724660 \times 10^{-3}$; $m_{12} = 1.027700 \times 10^{-4}$; $m_{13} = -1.654600 \times 10^{-6}$; $m_{14} =$

$$\Gamma_B = \frac{1}{2\pi\rho} \left[\frac{4}{3} \eta_s + \eta_b + \frac{\kappa}{C_p} (\gamma - 1) \right] \left(\frac{4\pi n}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \right)^2, \quad (2)$$

式中: n 为介质的折射率; v_s 为介质中的声速; S 为海水盐度; T 为海水温度; P 为海水压强; λ 为入射光的波长; θ 为散射角(发生SBS时, $\theta=180^\circ$); ρ 为介质的密度; η_s 和 η_b 分别为介质的剪切黏滞系数和体黏滞系数; κ 为热导率; C_p 为定压比热容; $\gamma = C_p/C_v$ 为比热容比, C_v 为定容比热容。对于海水而言,式(2)中的 $\frac{\kappa}{C_p}(\gamma -$

1)通常要比黏滞系数 $\frac{4}{3}\eta_s$ 和 η_b 小两个数量级,因此可以被忽略。从式(1)、(2)可以看出,对于特定的入射光波长,布里渊散射频移主要受折射率 n 、声速 v_s 和散射角 θ 的影响,线宽主要受密度 ρ 、剪切黏滞系数 η_s 、体黏滞系数 η_b 、折射率 n 和散射角 θ 的影响。式(2)中的线宽 Γ_B 为自发布里渊散射线宽,SBS线宽 Γ_{SBS} 相对于自发布里渊散射线宽具有压缩特性,其相互关系^[29]可以表示为

$$\Gamma_B = [1.0894 + 0.5065 \exp(-0.0985T)] 2\pi \Gamma_{SBS}. \quad (3)$$

折射率可表示为海水温度、盐度及入射光波长的函数^[30],即

$$n(S, T, \lambda) = n_0 + (n_1 + n_2 T + n_3 T^2) S + n_4 T^2 + \frac{n_5 + n_6 S + n_7 T}{\lambda} + \frac{n_8}{\lambda^2} + \frac{n_9}{\lambda^3}, \quad (4)$$

式中: $n_0 = 1.31405$; $n_1 = 1.77900 \times 10^{-4}$; $n_2 = -1.05000 \times 10^{-6}$; $n_3 = 1.60000 \times 10^{-8}$; $n_4 = -2.02000 \times 10^{-6}$; $n_5 = 15.86800$; $n_6 = 0.01155$; $n_7 = -0.00423$; $n_8 = -4382$; $n_9 = 1.14550 \times 10^6$ 。

海水声速 v_s 可由Grosso声速计算公式^[31]获得,该公式为

$$v_s(S, T, P) = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 S + c_5 S^2 + c_6 TS + c_7 T^2 S + f(S, T, P), \quad (5)$$

式中: $c_0 = 1402.390000000$; $c_1 = 5.011100000$; $c_2 = -0.055095000$; $c_3 = 0.000221540$; $c_4 = 1.329500000$; $c_5 = 0.000128960$; $c_6 = -0.012756000$; $c_7 = 0.000096840$ 。对于同一深度,压强的水平变化量可忽略不计,因此令 $f(S, T, P) = 0$ 。

海水密度随温度、盐度的变化关系^[32]可表示为

4.831400 $\times 10^{-4}$ 。

海水剪切黏滞系数 η_s 描述海水在受到外部剪切力作用下产生的阻力,它是海水的固有物理属性,与海水的温度和盐度有关^[33],表达式为

$$\eta_s(T, S) = 0.1 \left(\sum_{j=0}^3 Q_j T^j + S \sum_{k=0}^3 R_k T^k \right), \quad (7)$$

式中： $Q_0 = 1.790 \times 10^{-2}$ ； $Q_1 = -6.130 \times 10^{-4}$ ； $Q_2 = 1.447 \times 10^{-5}$ ； $Q_3 = -1.683 \times 10^{-7}$ ； $R_0 = 2.473 \times 10^{-5}$ ； $R_1 = 4.843 \times 10^{-7}$ ； $R_2 = -4.717 \times 10^{-8}$ ； $R_3 = 7.599 \times 10^{-10}$ 。体黏滞系数 η_b 是描述流体压缩或膨胀时产生的阻力与流体压缩或膨胀比例的因子，主要与介质的温度有关。通过实验测量海水布里渊散射的线宽，得到体黏滞系数与温度的相互关系^[34]：

$$\eta_b = 0.0022 + 0.0121 \exp(-0.1522T). \quad (8)$$

由于布里渊散射频移和线宽受海水温度和盐度的影响，因此可以构建出频移和线宽关于温度和盐度的二元方程组：

$$\begin{cases} \nu_B = \nu_B(T, S) \\ \Gamma_{SBS} = \Gamma_{SBS}(T, S) \end{cases} \quad (9)$$

通过联立方程组，可以得到温度和盐度关于频移和线宽的反演模型：

$$\begin{cases} T = T(\nu_B, \Gamma_{SBS}) \\ S = S(\nu_B, \Gamma_{SBS}) \end{cases} \quad (10)$$

通过实验测量获得布里渊散射的频移和线宽后，将它们代入反演模型即可得到海水的温度和盐度信息，从而实现温度和盐度的反演。

基于上述分析，将世界海洋环境数据库(WOA18)中我国南海和东海海域的温度和盐度分布数据作为建立理论反演模型的基础。南海和东海 2017 年的平均温度和盐度分布如图 1 和图 2 所示。

从图 1 和图 2 可以看出，南海和东海两个海域的海表温度和盐度分布有所不同。南海的海表温度为 24.98~29.22 °C，东海的海表温度为 15.20~26.55 °C，南海的温度极差值比东海小，两个海域的温度分布呈现低纬度、高经度处温度值大的规律。南海和东海的海表盐度变化范围为 30‰~35‰，其中，南海的海表盐度为 32.13‰~34.09‰，东海的海表盐度为 30.74‰~34.70‰。南海的海表盐度分布较为均匀，高纬度处盐度较高，盐度极差值 $\leq 2\text{‰}$ ；东海的海表盐度呈现低纬度、高经度处盐度值大的分布规律，盐度极差值 $\leq 4\text{‰}$ 。

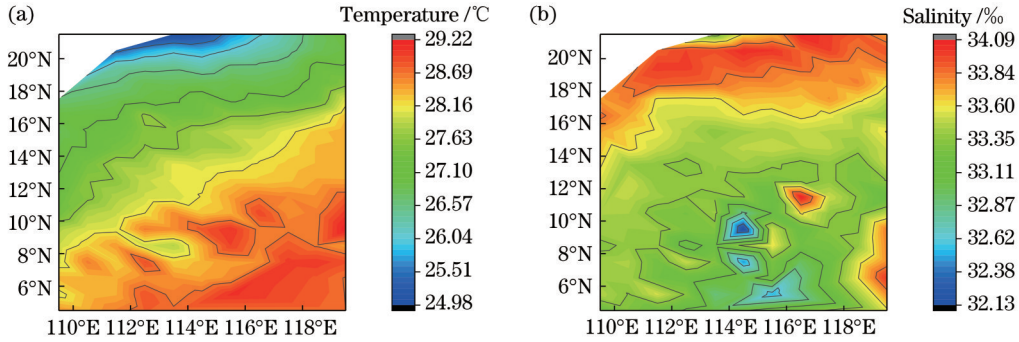


图 1 南海表层温度和盐度图。(a)温度；(b)盐度

Fig. 1 Distribution of surface temperature and salinity of South China Sea. (a) Temperature; (b) salinity

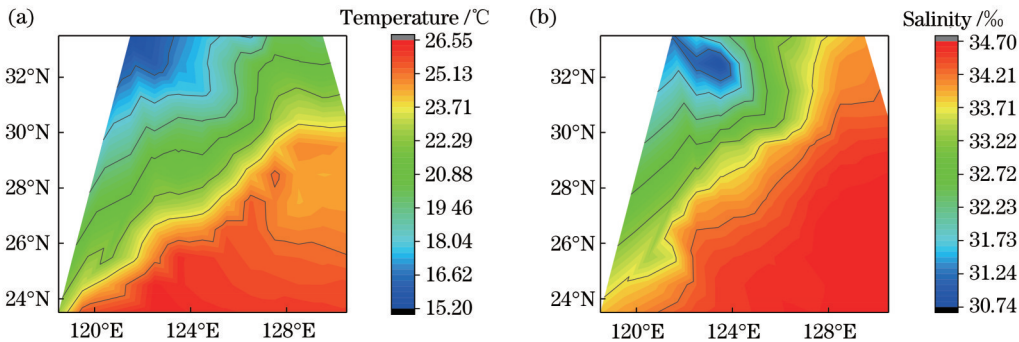


图 2 东海表层温度和盐度分布。(a)温度；(b)盐度

Fig. 2 Distribution of surface temperature and salinity of East China Sea. (a) Temperature; (b) salinity

根据南海和东海的海表温度和盐度数值范围，分别选取温度为 15、18、21、24、27、30 °C，盐度为 30‰、31‰、32‰、33‰、34‰、35‰，代入式(1)~(8)计算出 SBS 的频移和线宽。频移和线宽与温度和盐度的关系如图 3 所示。从图 3 可以看出，在 15~30 °C 温度范围和 30‰~35‰ 盐度范围内，频移变化范围为 7.566~7.787 GHz，线宽变化范围为 0.542~

0.790 GHz。频移随温度和盐度的增加而增大；线宽随温度的增加而减小，随盐度增加而缓慢增大。

针对上述计算获得的频移和线宽值，经过多项式拟合分别得到频移和线宽关于温度、盐度的拟合关系以及拟合公式，如图 4 和式(11)、(12)所示。从图 4 可以看出：计算得到的数据点分布在拟合曲面上，拟合后频移的方均根误差(RMSE)为 3.292×10^{-5} ，线宽的

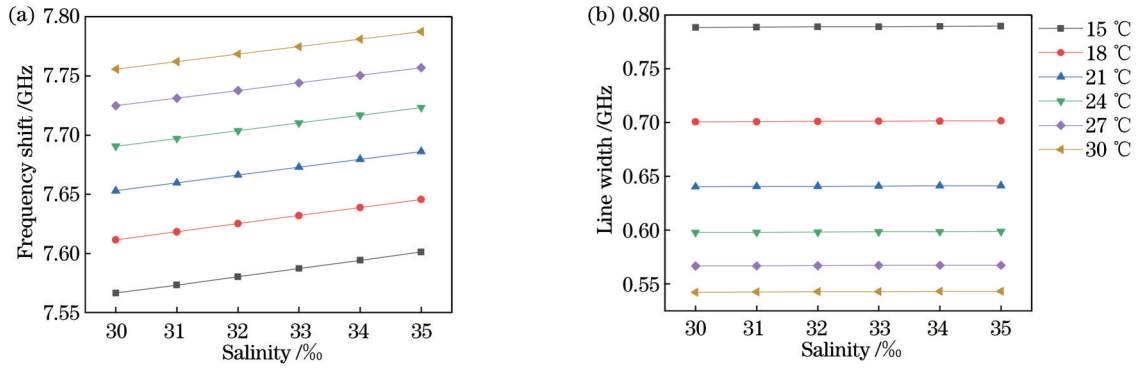


图 3 频移和线宽与温度和盐度关系。(a)频移;(b)线宽

Fig. 3 Changes of frequency shift and line width of SBS with temperature and salinity. (a) Frequency shift; (b) line width

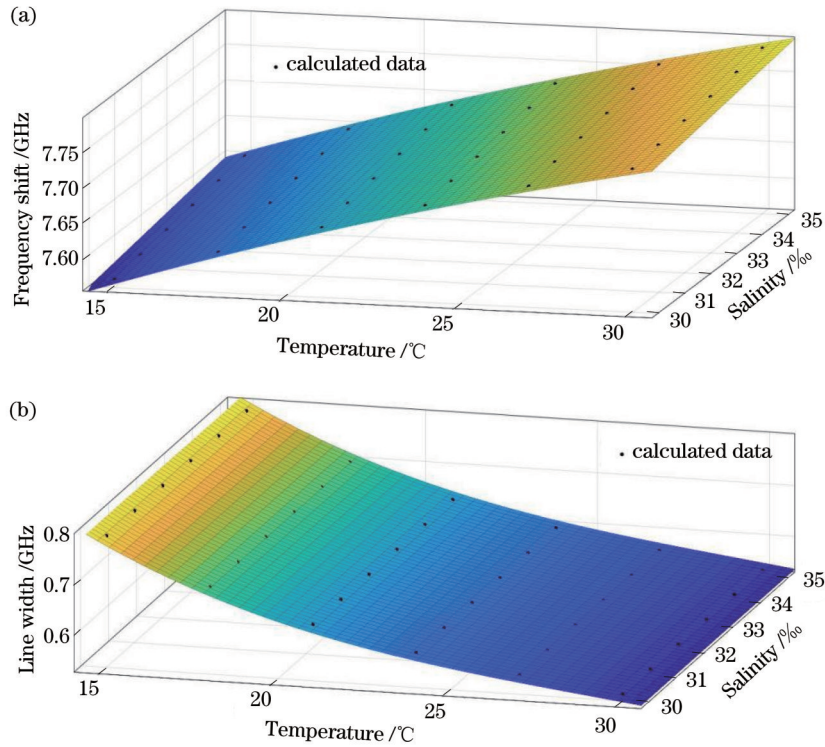


图 4 频移和线宽拟合图。(a)频移;(b)线宽

Fig. 4 Fitting graphs of frequency shift and line width. (a) Frequency shift; (b) line width

方均根误差为 5.243×10^{-4} ; 频移和线宽随温度升高分别呈现增加和减小的趋势, 随盐度升高而缓慢增加。

$$\nu_B(T, S) = p_{00} + p_{10}T + p_{01}S + p_{20}T^2 + p_{11}TS + p_{02}S^2 + p_{30}T^3 + p_{21}T^2S + p_{12}TS^2 + p_{03}S^3, \quad (11)$$

式中: $p_{00} = 7.063$; $p_{10} = 2.566 \times 10^{-2}$; $p_{01} = 5.652 \times 10^{-3}$; $p_{20} = -2.912 \times 10^{-4}$; $p_{11} = -9.554 \times 10^{-5}$; $p_{02} = 7.243 \times 10^{-5}$; $p_{30} = 1.063 \times 10^{-6}$; $p_{21} = 7.143 \times 10^{-7}$; $p_{12} = 3.231 \times 10^{-7}$; $p_{03} = -7.716 \times 10^{-7}$ 。

$$\Gamma_B(T, S) = q_{00} + q_{10}T + q_{01}S + q_{20}T^2 + q_{11}TS + q_{02}S^2 + q_{30}T^3 + q_{21}T^2S + q_{12}TS^2 + q_{03}S^3, \quad (12)$$

式中: $q_{00} = 1.865$; $q_{10} = -1.169 \times 10^{-1}$; $q_{01} = -1.811 \times 10^{-3}$; $q_{20} = 3.704 \times 10^{-3}$; $q_{11} = 6.888 \times$

10^{-6} ; $q_{02} = 6.019 \times 10^{-5}$; $q_{30} = -4.199 \times 10^{-5}$; $q_{21} = -1.984 \times 10^{-7}$; $q_{12} = 9.236 \times 10^{-18}$; $q_{03} = -6.173 \times 10^{-7}$ 。

依据式(11)、(12)得到频移和线宽关于温度、盐度的关系式, 并进一步联立式(11)、(12), 可得到温度和盐度的反演公式。因此, 只要测量出实际环境下的频移和线宽, 代入反演公式求解, 即可得到温度和盐度的数值, 从而达到温度和盐度反演的目的。为验证数据反演模型的可行性, 实验测量不同温度、盐度条件下的频移和线宽来反演温度和盐度。

3 实验测量及数据反演

实验测量系统主要由脉冲激光器、偏振光路、海洋

环境模拟系统、信号采集系统 4 个部分组成,系统结构如图 5 所示。光源是种子注入式 Nd:YAG 脉冲激光器,激光器的输出参数如下:重复频率为 10 Hz,脉冲宽度为 8 ns,光束直径约为 19 mm,发散角约为 0.45 mrad,最大输出能量约为 4 J/pulse,单纵模下的线宽约为 90 MHz。偏振光路由二分之一波片($\lambda/2$)、偏振分束镜(PBS)和四分之一波片($\lambda/4$)组成,能够实现垂直偏振光、水平偏振光与圆偏振光之间的转换。海洋环境模拟系统由一个海洋模拟实验仓和一个控制系统组成,海洋模拟实验仓长为 1 m,控制系统用于控制仓内的温度和压强,可实现海水温度在 0~40 °C 内 0.1 °C 精度的变化,压强在 0~10 MPa 内 0.01 MPa 精度的变化。信号采集系统由法布里-珀罗标准具(FPE)和增强型电荷耦合器件(ICCD)组

成,其中:FPE用于对瑞利散射和SBS信号进行分光,自由光谱范围(FSR)为 20.1 GHz;ICCD用于对散射光信号进行光谱采集,分辨率为 1024 pixel \times 256 pixel,像素尺寸为 26 $\mu\text{m}\times$ 26 μm 。种子注入式 Nd:YAG 脉冲激光器发出波长为 532 nm 的垂直偏振光,经过 $\lambda/2$ 后变为水平偏振光,以布儒斯特角入射并通过 PBS,再经过 $\lambda/4$ 后变成圆偏振光,最后经过聚焦系统聚焦后进入海洋模拟系统。当入射光在焦点位置处的能量密度达到 SBS 的阈值时,后向 SBS 会被激发。散射光以 180° 后向散射,被 PBS 反射并准直、滤波后进入 FPE,后由 ICCD 进行散射信号的采集与分析。入射光强度由光功率计(PM)进行监测,整个实验系统的时序由高精度的脉冲延迟发生器 DG535 进行控制。

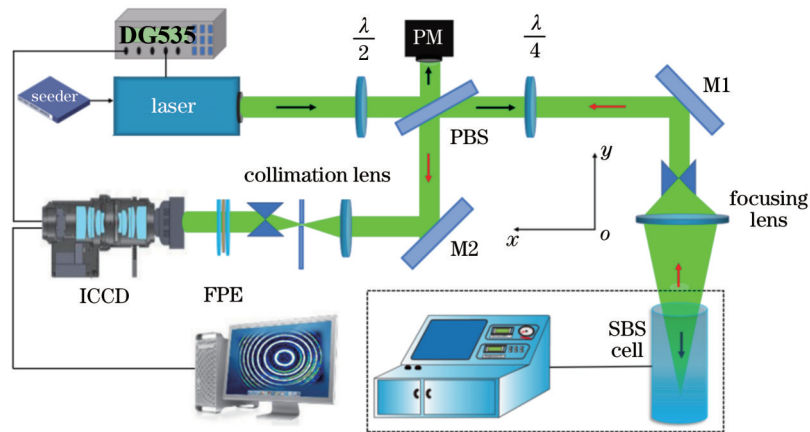


图 5 实验系统结构图

Fig. 5 Schematic of experimental system

基于上述实验系统,实验测量了不同温度和盐度下的 SBS 频移和线宽。实验中,将海盐(Sigma-Aldrich)融入纯净水中配制不同盐度的海水,温度由热电偶温度传感器进行监测,同一温度及盐度条件下

重复测量 20 次,取其平均值作为最终的测量结果。以实际温度 20 °C 和实际盐度 35‰ 为例,图 6 为实验中 ICCD 采集到的圆环光谱图。

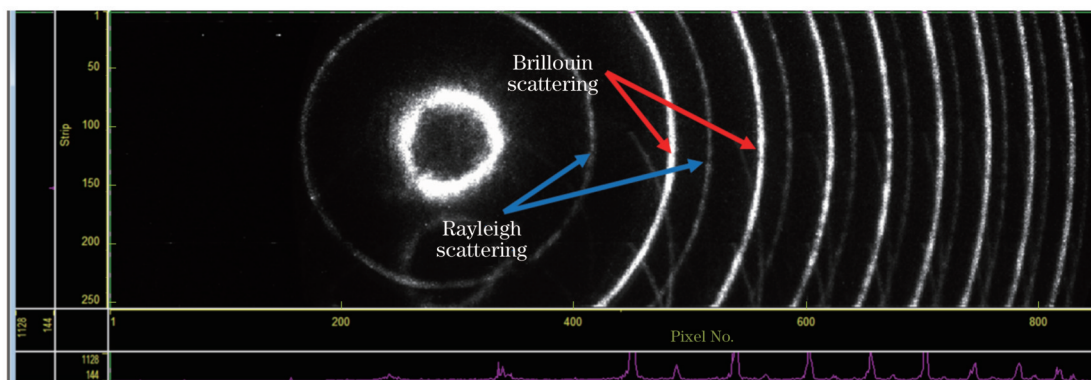


图 6 实际温度 20 °C 和实际盐度 35‰ 下 ICCD 采集的干涉光谱图

Fig. 6 Interference spectrogram collected by ICCD with actual temperature of 20 °C and actual salinity of 35‰

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 7 所示,横坐标表示像素点,纵坐标表

示归一化光强。图 7(a)为利用 ICCD 采集的原始光谱图,其中光谱信号包含噪声信号;图 7(b)为低通滤波后的光谱图;图 7(c)为拟合后的光谱图,用高斯线性

拟合瑞利峰,用洛伦兹线性拟合布里渊峰;图 7(d)所示为对光谱信号进行去卷积处理,消除仪器传递函数对谱线展宽的影响后得到的光谱。图 7 中虚线框内为一组光谱信号,包含同一级的布里渊峰、瑞利峰和下一级的布里渊峰,同一级的布里渊峰和瑞利峰之间的距离为频移,布里渊峰的半峰全宽即为线宽。由于两个相邻布里渊峰之间的距离对应自由光谱范围,通过计算可以得到一个像素点对应的频率,即可实现像素距离与频率之间的转换。由处理后的光谱信号计算得到

SBS 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[式(11)、(12)]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‰。

表 1 展示了 6 组不同温度和盐度下的实验反演结果。从表 1 可以看出,在 6 组实验中温度和盐度的反演值与实际值接近:温度反演误差的最小值为 0.04 °C,最大值为 0.41 °C;盐度反演误差的最小值为 0.09‰,最大值为 0.65‰。

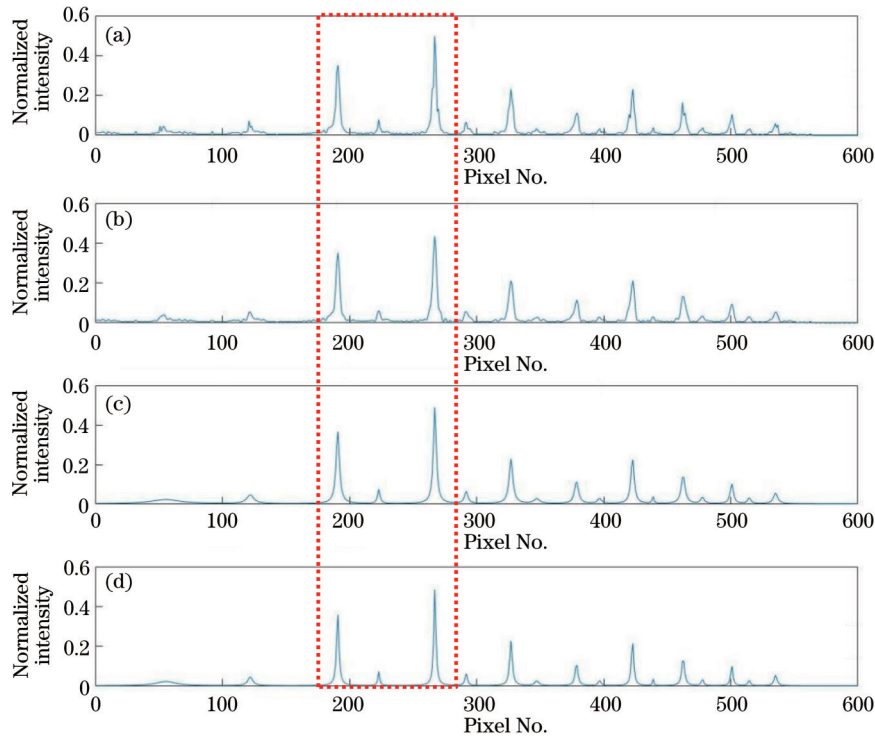


图 7 散射信号的二维光谱。(a)原始光谱;(b)低通滤波后的光谱;(c)拟合后的光谱;(d)去展宽后的光谱

Fig. 7 Two-dimensional spectra of scattering signal. (a) Original spectrum; (b) low-pass filtering spectrum; (c) fitting spectrum; (d) deconvolution spectrum

表 1 不同温度和盐度下的 6 组实验反演结果

Table 1 Six groups of experimental inversion results at different temperatures and salinities

Experiment No.	Frequency shift / GHz	Line width / GHz	Actual temperature / °C	Actual salinity / ‰	Inversion temperature / °C	Inversion salinity / ‰
1	7.605	0.715	17.5	30	17.46	30.29
2	7.637	0.678	19.1	31	19.02	31.65
3	7.708	0.595	24.2	32	24.25	32.32
4	7.734	0.575	26.0	33	26.17	32.91
5	7.756	0.565	27.7	34	27.29	34.42
6	7.682	0.652	20.0	35	20.38	35.62

4 误差分析

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 8 所示。在图 8(a)中,上述 6 组实验的频移和线宽测量误差均在 10 MHz 以内。在图 8(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。因此,进一步提高频移和线宽的测量精度是提高温度和盐度反演精度的关键,频移和线宽的测量精度会是今后研究的重点。

由于温度和盐度的反演是通过求解式(11)、(12)联立的方程组得到的,反演模型的精确性也会直接影

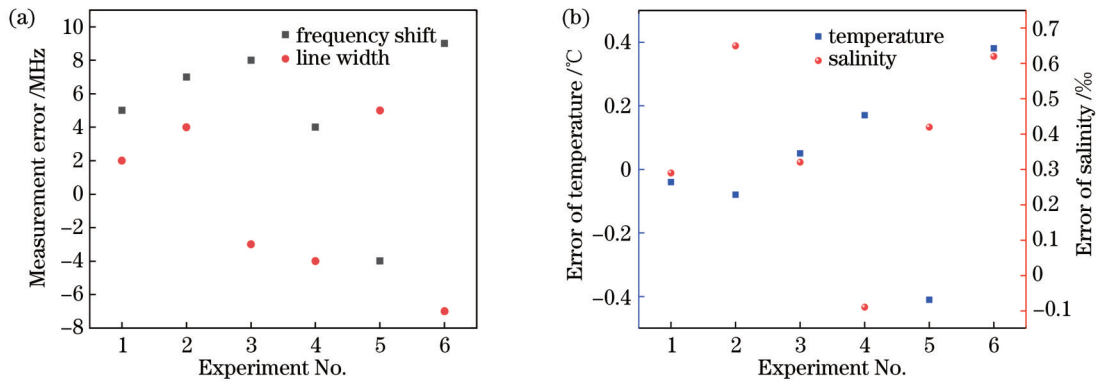


图 8 误差分布图。(a)频移和线宽的测量误差;(b)温度和盐度的反演误差

Fig. 8 Error distribution graphs. (a) Measurement errors of frequency shift and line width; (b) inversion errors of temperature and salinity

响反演结果。以 20 °C 温度、35‰ 盐度为例,对式(11)、(12)求一阶偏导,可得

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial \nu_B}{\partial T} \right)_{T=20^\circ\text{C}, S=35\text{‰}} = 13.3 \\ \left(\frac{\partial \nu_B}{\partial S} \right)_{T=20^\circ\text{C}, S=35\text{‰}} = 6.7 \\ \left(\frac{\partial \Gamma_B}{\partial T} \right)_{T=20^\circ\text{C}, S=35\text{‰}} = -19.2 \\ \left(\frac{\partial \Gamma_B}{\partial S} \right)_{T=20^\circ\text{C}, S=35\text{‰}} = 0.2 \end{cases} \quad (13)$$

从式(13)可以看到,1 °C 的温度变化会引起 13.3 MHz 频移和 19.2 MHz 线宽的变化,1‰ 的盐度变化会引起 6.7 MHz 频移和 0.2 MHz 线宽的变化。在上述实验测量中,温度为 20 °C、盐度为 35‰ 的频移和线宽测量误差分别为 9 MHz 和 -7 MHz,温度和盐度的反演误差分别约为 0.4 °C 和 0.6‰。根据式(13),9 MHz 的频移误差和 -7 MHz 的线宽误差分别会引起约 0.36 °C 和 1.34‰ 的温度和盐度变化。因此在应用该模型进行温度和盐度的反演中,需要进一步完善光谱处理方法,从而尽可能减小频移和线宽的测量误差,提高温度和盐度的同步反演精度。

5 结 论

从理论和实验两方面研究了基于 SBS 频移和线宽的海水温度、盐度同步反演。理论上,分析 SBS 频移和线宽与海水温度和盐度的依赖关系,并将世界海洋环境数据库中我国南海和东海海域的温度和盐度分布作为基础,理论计算了温度为 15~30 °C、盐度为 30‰~35‰ 海水的频移和线宽,从而建立基于频移和线宽的温度、盐度同步反演模型。实验上,测量了 6 组温度和盐度下的 SBS 光谱,经滤波去噪、线性拟合和谱线去展宽等数据处理后获得频移和线宽值,将其代入反演模型后求解得到温度和盐度值,并对实验测量误差和反演误差进行分析。研究表明,基于 SBS 频移和线宽的反演模型可以实现海水温度和盐度的同步反演,最小温度反演误差为 0.04 °C、最小盐度反演

误差为 0.09‰。频移和线宽的测量误差影响反演结果,因此要想提高温度和盐度的反演精度,需要进一步完善数据处理方法,从而减小频移和线宽的测量误差,这是下一步的重点研究工作。

参 考 文 献

- [1] Goto Y, Yasuda I, Nagasawa M, et al. Estimation of Basin-scale turbulence distribution in the North Pacific Ocean using CTD-attached thermistor measurements[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 969.
- [2] Maximenko N, Niiler P, Centurioni L, et al. Mean dynamic topography of the ocean derived from satellite and drifting buoy data using three different techniques[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(9): 1910-1919.
- [3] Robinson I S, Ward N. Comparison between satellite and ship measurements of sea surface temperature in the north-east Atlantic Ocean[J]. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10(4/5): 787-799.
- [4] 杨馥, 陈唐嘉利, 陆彦宇, 等. 基于布里渊散射的海水参数测量反演算法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0404001.
- [5] Yang F, Chen T J L, Lu Y Y, et al. Investigation on inversion algorithm of seawater parameters measurement based on Brillouin scattering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0404001.
- [6] Shi J, Li G, Gong W, et al. A lidar system based on stimulated Brillouin scattering[J]. Applied Physics B, 2007, 86(1): 177-179.
- [7] 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]. Applied Physics B, 2008, 90(3/4): 569-571.
- [8] 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.
- [9] Xu J, Guo Y N, Luo N N, et al. Influence of water temperature on temporal coherence of stimulated Brillouin scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0929001.
- [10] Collins D J, Bell J A, Zaroni R, et al. Recent progress in the measurement of temperature and salinity by optical

- scattering[J]. *Ocean Optics* VII, 1984, 489: 247-269.
- [9] Hirschberg J G, Byrne J D, Wouters A W, et al. Speed of sound and temperature in the ocean by Brillouin scattering[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(15): 2624-2628.
- [10] 刘金涛, 陈卫标, 宋小全, 等. 外差激光雷达测量水体布里渊散射可行性研究[J]. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 2002, 32(1): 139-144.
Liu J T, Chen W B, Song X Q, et al. Potential for measurement of water Brillouin scattering with heterodyne lidar[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(1): 139-144.
- [11] 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.
Ma Y, Liang K, Lin H, et al. Study on simultaneous measurement of temperature and salinity based on Brillouin scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1508-1512.
- [12] 刘杰. 基于布里渊散射的海洋温度和盐度的反演[J]. *鱼雷技术*, 2014, 22(4): 306-310.
Liu J. Inversion of seawater temperature and salinity based on Brillouin scattering[J]. *Torpedo Technology*, 2014, 22(4): 306-310.
- [13] Bao D, Hua D X, Qi H, et al. Method of remotely sensing seawater salinity fine detection based on Raman Brillouin scattering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(22): 229201.
- [14] Liu D H, Shi J W, Chen X D, et al. Brillouin lidar and related basic physics[J]. *Frontiers of Physics in China*, 2010, 5(1): 82-106.
- [15] 吴星亮, 宋盈盈, 张晓程, 等. 布里渊动态光栅的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(7): 0700004.
Wu X L, Song Y Y, Zhang X C, et al. Review of Brillouin dynamic grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(7): 0700004.
- [16] Rudolf A, Walther T. Laboratory demonstration of a Brillouin lidar to remotely measure temperature profiles of the ocean[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 051407.
- [17] Ren X Y, Tian Z S, Zhang Y C, et al. Theoretical and experimental investigations on measuring underwater temperature by the coherent Brillouin scattering method [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(30): 9025-9029.
- [18] Fry E S, Emery Y, Quan X, et al. Accuracy limitations on Brillouin lidar measurements of temperature and sound speed in the ocean[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(27): 6887-6894.
- [19] Emery Y, Fry E S. Laboratory development of a lidar for measurement of sound velocity in the ocean using Brillouin scattering[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 2963: 210-215.
- [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]. *Optics Communications*, 2002, 203(3/4/5/6): 335-340.
- [21] Ouyang M, Shi J, Zhao L, et al. Real time measurement of the attenuation coefficient of water in open ocean based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Applied Physics B*, 2008, 91(2): 381-385.
- [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]. *Optics Communications*, 2012, 285(20): 4120-4124.
- [23] 杨馥, 陈唐嘉利, 陆彦宇, 等. 基于布里渊散射的海水参数测量反演算法研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(4): 0404001.
Yang F, Chen T J L, Lu Y Y, et al. Investigation on inversion algorithm of seawater parameters measurement based on Brillouin scattering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(4): 0404001.
- [24] Xu N, Liu Z Q, Zhang X D, et al. Influence of temperature-salinity-depth structure of the upper-ocean on the frequency shift of Brillouin LiDAR[J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 36442-36452.
- [25] 刘大禾, 汪华英, 周静. 布里渊散射法测量盐度及温度不同的海水中的声速[J]. *中国激光*, 2000, 27(4): 381.
Liu D H, Wang H Y, Zhou J. Measurements of sound speed in sea water with different salinity and temperature by Brillouin scattering method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(4): 381.
- [26] Yu Y, Ma Y, Li H, et al. Simulation of simultaneously obtaining ocean temperature and salinity using dual-wavelength Brillouin lidar[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(3): 036001.
- [27] Liang K, Ma Y, Yu Y, et al. Research on simultaneous measurement of ocean temperature and salinity using Brillouin shift and linewidth[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 066002.
- [28] Zheng Q. On the Rayleigh-Brillouin scattering in air[M]. Durham: University of New Hampshire, 2004.
- [29] 史久林. 基于受激布里渊散射的水体特征参数测量及相关基础研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
Shi J L. Measurement of underwater parameters based on stimulated Brillouin scattering and related basic physics [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [30] Quan X, Fry E S. Empirical equation for the index of refraction of seawater[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(18): 3477-3480.
- [31] Del Grosso V A. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations)[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1974, 56(4): 1084-1091.
- [32] Roquet F, Madec G, McDougall T J, et al. Accurate polynomial expressions for the density and specific volume of seawater using the TEOS-10 standard[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 90: 29-43.
- [33] Richards S D. The effect of temperature, pressure, and salinity on sound attenuation in turbid seawater[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 103(1): 205-211.
- [34] Xu J F, Ren X B, Gong W P, et al. Measurement of the bulk viscosity of liquid by Brillouin scattering[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(33): 6704-6709.