

文章编号: 1001-3806(2011)06-0808-05

海洋探测布里渊雷达的关键技术及发展概况

任秀云, 崔子浩, 田兆硕, 杨君国, 刘立宝, 付石友
(哈尔滨工业大学(威海)信息光电子研究所, 威海 264209)

摘要: 海洋探测布里渊雷达结合了布里渊散射、激光雷达和遥感技术, 是一种新颖的频率探测激光雷达, 可以抵御幅度噪声, 具有相当高的信噪比, 抗干扰性强、测量精度高。分析了布里渊散射雷达系统的关键技术, 概要地介绍了国内外布里渊雷达关键技术的发展状况, 并讨论了布里渊雷达技术在海洋探测领域的实用化进程及应用前景。

关键词: 大气与海洋光学; 激光雷达; 布里渊散射; 频率探测

中图分类号: TN958. 98 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3969/j. issn. 1001-3806. 2011. 06. 023

Key technologies and development of Brillouin LIDAR in ocean telemetry

REN Xiu-yun, CUI Zi-hao, TIAN Zhao-shuo, YANG Jun-guo, LIU Li-bao, FU Shi-you
(Institute of Optoelectronic Technology Information, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Brillouin light detection and ranging (LIDAR) in ocean telemetry is a novel frequency detection LIDAR technology, involves Brillouin scattering, LIDAR and remote sensing technology. For this detection mode can resist amplitude noise, so it has high signal-to-noise ratio, strong anti-interference and high accuracy of measurement. Firstly, key technologies of Brillouin LIDAR were analyzed, and the development progress was introduced. Finally, a few of applications of Brillouin LIDAR in ocean telemetry and the development trend were discussed.

Key words: atmospheric and ocean optics; LIDAR; Brillouin scattering; frequency detection

引言

在 21 世纪海洋“权益、资源、环境、减灾”四位一体大目标下, 利用遥感等高新技术手段发展海洋科学成为极具战略意义的前沿课题^[1-3], 其研究范围主要包括激光雷达海洋环境监测、海洋水文勘察、水下目标探测和水下激光通信等众多领域。

与微波雷达一样, 激光雷达基本都是通过探测回波信号的幅度来获取有用信息的。这种幅度探测工作方式最为简单, 但容易受背景噪声的影响。而近年发展起来的布里渊雷达可以通过测量布里渊散射频移量达到监测海洋参量的目的, 是一种频率探测激光雷达, 可以抵御幅度噪声, 具有相当高的信噪比, 抗干扰性强、测量精度高。

海洋探测布里渊雷达技术结合了布里渊散射、激

光雷达和遥感技术, 探测方式新颖, 探测范围较广, 既可以探测海水的温度、盐度、声速等海况^[4], 也可以用于目标识别, 判别水下是否有水雷、隐形潜艇等物体^[5-6], 对于进一步了解海洋、发展经济和巩固国防有重大意义。

应用布里渊散射测量海洋水下声速、温度和盐度等参量的设想始于 20 世纪 70 年代^[4]。尽管布里渊雷达测量系统的优点和重要意义毋庸置疑, 经过了近 40 年的探索性研究, 布里渊雷达系统至今还未进入实用阶段。作者根据对已有研究文献的调研, 力图客观分析该系统的关键技术与主要困难, 全面概要地介绍这项技术的国内外发展现况及应用前景。

1 海洋探测布里渊雷达的关键技术研究进展

海洋探测布里渊雷达是通过测量海水的布里渊散射频谱来监测海水相关参量的。典型海洋探测布里渊雷达系统应包括激光光源、收发系统、鉴频器、光电转换、数据采集与处理和数据显示几部分, 如图 1 所示。利用布里渊雷达进行海洋探测的关键技术就是布里渊散射频移的高精度实时测量, 而激光光源和鉴频器的性能决定了该频移的测量精度。下面分别进行说明。

基金项目: 山东省科技发展计划资助项目 (2009GG10005006); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (HIT. BRETL. 2010014); 威海市科技发展计划资助项目 (2009-3-93)

作者简介: 任秀云 (1978-), 女, 讲师, 主要从事激光技术与激光雷达等方面的研究工作。

E-mail: renxiuyun_78@163.com

收稿日期: 2011-01-29; 收到修改稿日期: 2011-04-13

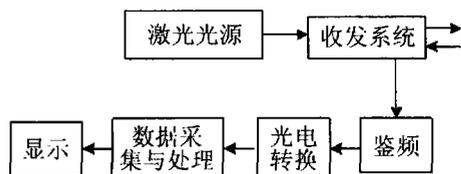


图1 海洋探测布里渊雷达系统结构框图

1.1 激光光源

激光器自发明以来,因其单色性好、亮度高和方向性好等特性成为布里渊散射和喇曼散射研究的理想光源。20世纪70年代末、80年代初,海洋探测布里渊雷达多使用连续激光器作为光源^[4,7],其较低的激光功率严重限制了雷达的探测深度。1980年,美国海军海洋研究所的GUAGLIARDO等人改用氮气抽运的脉冲染料激光器对海水温度进行了实验测量^[8]。脉冲方式的采用提高了激光器的峰值功率,同时根据回波信号与发射信号的时间延迟可定位探测深度。20世纪90年代初,美国海军海洋与大气研究所的HICKMAN等人应用高功率倍频调 Q 的Nd:YAG激光器,验证了应用布里渊散射测量海水中声速等参量的方法的可行性^[9]。由于海水的布里渊散射频移非常小,约为7.2GHz~7.8GHz,而普通脉冲激光器的增益线宽高达几十吉赫兹,致使布里渊散射峰与瑞利散射峰不能完全分开,达不到测量精度要求;同时激光功率仍较低,限制了布里渊雷达海洋探测技术的实际应用。

随着激光技术的发展,快速扫描共振检测种子注入式的倍频调 Q 稳频Nd:YAG激光器实现了输出线宽的压缩和频率锁定,成为布里渊雷达海洋探测的理想光源。如美国的Powerlite Precision II 9000系列脉冲固体激光器,倍频532nm激光输出的单脉冲能量最大可达1000mJ,脉宽均小于10ns,线宽约为90MHz。自20世纪90年代后期开始,很多海洋布里渊雷达研究都采用此类激光器^[10-11]。

与此同时,光纤放大技术发展也很迅速。由于种子注入稳频Nd:YAG激光器的重复频率较低,一般为10Hz,限制了布里渊散射频谱的测量速度和精度。为了更好地满足实际布里渊雷达实时测量和机载的要求,2004年,德国应用物理研究所的POPESCU等人设计了一种新的高重频光纤放大器作为海洋布里渊雷达的光源^[12]。经过几年的实验研究,2008年,该光纤放大器在1kHz的重复频率下,532nm光波单脉冲能量为35.2 μ J;当重复频率增加至4.5kHz时,532nm光波单脉冲能量为17.7 μ J,激光带宽约79.9MHz,可用于实际的水温测量^[13]。2009年,这种新型的高重频光纤放大器在重复频率为5kHz、脉冲宽度7.7ns时,532nm单脉冲能量可达36.9 μ J^[14],较好地满足了布里渊雷达快速测量的要求。

1.2 鉴频器

由于布里渊散射频移与入射光频率的比值小于 10^{-5} ,而且散射光信号的强度很弱,因此,要实现布里渊散射谱的测量,还需要高灵敏度、高精度的鉴频器。

法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉仪是一种高灵敏度、高精度的光谱测量仪器。除了美国迈阿密大学的HIRSCHBERG等人在1984年提出的一种使用双F-P干涉仪和迈克耳逊干涉仪的非扫描方法外^[7],很多布里渊散射光谱都是应用扫描F-P干涉仪测得的^[4,8,9]。虽然扫描F-P干涉仪可以精确测量布里渊散射光谱^[14-16],但由于目前能够实际使用的大功率脉冲激光器的重复频率很低,导致干涉仪的扫描周期必须足够长(100s左右),无法实现散射光谱的实时探测。另外,扫描F-P干涉仪要求入射光高度平行,且易受震动影响,很难满足实际遥测的需要。20世纪90年代,美国海军迫于建立海洋声场预测模型的需要,加强了对激光布里渊散射海洋探测研究的支持。1997年,美国A&M大学的EMERY和FRY将大气风速测量中使用的边缘探测新技术应用于布里渊散射海洋参量探测中^[10-11],解决了布里渊散射频移的实时测量问题。

基于分子吸收池的边缘探测技术对散射光的平行度没有要求,可解决F-P干涉仪接收立体角小和扫描时间长、抗震能力差的问题,具有很高的测量精度和灵敏度^[10-11,17-18]。但它也有明显的不足,如抑制太阳光能力差,且由于布里渊散射峰线宽与海水温度和盐度有关,海水温度从0℃到30℃变化,对应布里渊散射峰线宽从1.5GHz减小到0.41GHz,从而影响分子吸收池吸收峰与布里渊散射峰的交叠程度,因此,用于实际遥测前还有大量工作需要做^[15,19]。为了解决上述问题,2004年,德国应用物理研究所的POPESCU等人提出采用法拉第反常色散光学滤波器(Faraday anomalous dispersion optical filter, FADOF)代替分子吸收池^[12]。2005年,POPESCU等人对基于Rb的 $^5s_{1/2} \rightarrow ^5p_{3/2}$ 跃迁线的激发态FADOF进行了详细的理论和实验研究,验证了其边缘滤波特性^[20]。2006年,POPESCU等人进一步研究了基于Rb的 $^5P_{3/2} \rightarrow ^8D_{5/2}$ 跃迁线的激发态FADOF的光谱透过率与磁场强度和分子蒸气池温等的关系,结果表明,调节磁场强度可以改变边缘滤波器透射峰位置^[21]。2010年,POPESCU等人再次研究了抽运光强较高时激发态FADOF的透射光谱与Rb蒸气密度的关系。与参考文献[21]中的实验结果相比较,激发态FADOF的透射峰的峰值,结构和宽度有了很大提高^[22]。

边缘探测技术是利用被测信号的强度随频率的变化而改变来测量频率的,因此,对激光器的单频性和频率稳定性都提出了非常苛刻的要求。另外,边缘探测技

术无法得到布里渊散射光谱,所以,很大程度上限制了布里渊雷达海洋探测的应用。2005年,美国加利福尼亚大学的 KOSKI 等人研制了一种应用固体 F-P 标准具和 CCD 的布里渊成像光谱仪,测量了聚苯乙烯样品的 2 维布里渊散射光谱信息^[23]。同年,南昌航空工业学院的 LI 等人在水的布里渊散射谱测量中,应用了结合固体 F-P 标准具和像增强 CCD 的鉴频方法^[24]。这种鉴频器对散射光的平行度和激光器的稳频特性均没有严格的要求,将布里渊散射激光雷达的实用化推进了一大步。遗憾的是,目前像增强 CCD 的像素较大,且帧频较低,对布里渊散射谱的测量误差和测量速度还有较大限制。

提高海洋布里渊雷达探测深度的传统方法是提高激光输出功率和探测器灵敏度,并通过滤波提高信噪比。如果能分别放大布里渊散射信号并减弱噪声信号无疑是最好的。2007年,北京师范大学的 SHI 等人改进了以往的布里渊雷达系统^[25],应用了受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)的信号放大作用。由于 SBS 的发生导致光在水中的衰减系数随抽运光强增大而增大,所以在采用聚焦等方法降低光的衰减系数的同时^[25],利用抽运放大作用来提高 SBS 的信号强度是必要的^[26]。另外,土耳其的 KILICASLAN 和德国的 ESEN 等人提出的利用外部超声波调制水中声子,增强水的布里渊散射峰值功率的放大技术也是一种有效放大方式^[27]。

2 布里渊雷达在海洋遥感中的应用进展

海洋是地球的一个重要组成部分。海水的温度、盐度、声速等海况是海洋监测的重要内容。机载海洋布里渊雷达作为一种主动遥测手段,具有机动性强、高效、实时,测量精度高等优点,是快速进行大面积现场海洋调查、探测最有前途的技术之一,在军事和民用领域都有广泛应用。

2.1 海水声速的测量

声波是海洋中信息远距离传递的唯一有效载体。目前已有的各种水声设备可用于水下探测,目标的定位和识别,船舶和水中航行器的导航,水下通讯等各个方面。海洋环境复杂多变,声波在海洋信道中的传播十分复杂。声速在海洋中的空间(垂直和水平)分布的精确测量对改善和提高水声设备的工作性能,研究和认识海洋内部的变化规律,发展国民经济和巩固国防具有重要意义,是海洋监测中的重要参量。

海水的布里渊散射频移量与海水中声速直接相关,因此,通过测量海水的布里渊散射频移量可以实现声速 3 维空间分布的大范围高精度快速测量。1984年,美国迈阿密大学的 HIRSCHBERG 等人提出可以通

过测量海水的布里渊散射频移来测量海水温度,进而根据海水温度与水中声速的关系求得海水中声速值^[7]。1991年,美国海军海洋与大气研究实验室的 HICKMAN 等人设计了一种用于 0m~100m 海水中声速遥感的机载激光布里渊散射雷达,采用重复频率为 10Hz、脉宽 10ns、单脉冲能量 500mJ 的稳频脉冲激光器作为光源,深度分辨率为 1m,声速测量精度为 1m/s^[9]。

1997年,美国 A&M 大学的 EMERY 等人测量海水中声速的布里渊雷达系统中采用了边缘探测技术。图 2 是采用 ¹²⁷I₂ 分子吸收池和 ⁷⁹Br₂ 分子吸收池作为边缘探测滤波器的布里渊雷达系统结构图^[10]。很小的布里渊散射频移变化会引起边缘滤波器透过率的很大变化,从而影响光电探测器 S₁ 和 S₂ 的比值。同时,美国 A&M 大学的 FRY 等人还分析了利用边缘探测技术测量海水中声速的测量精度,发现声速的测量不确定度由盐度和布里渊散射频移的测量误差决定,在 $\delta\nu_B = 1\text{MHz}$ 时,声速的测量不确定度小于 0.25m/s^[11]。

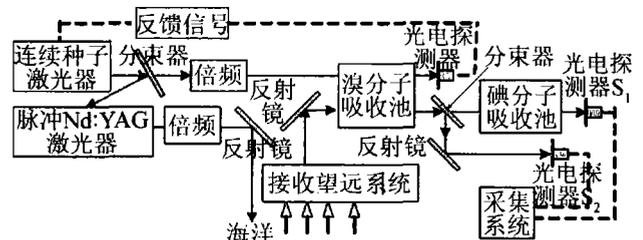


图2 测量海水中声速的布里渊雷达收发系统

2002年,北京师范大学的 LIU 等人测量了盐度为 35‰ 的人造海水随温度变化所对应的水中声速变化情况,并将测量结果与常规测量方法所测结果做了对比,图 3a 和图 3b 中分别给出了实验装置和实验结果^[16]。图 3b 中实线是布里渊散射方法的测量结果,虚线是常

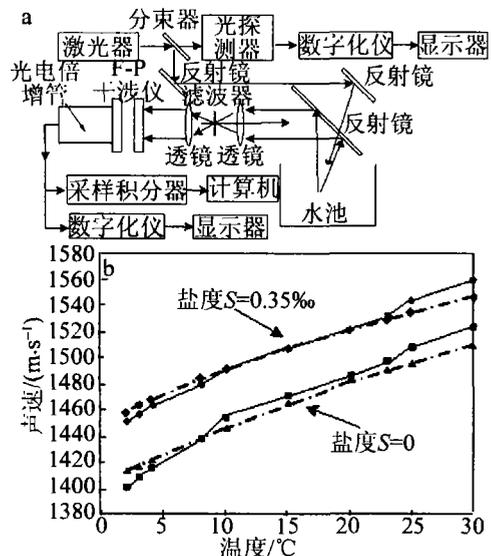


图3 布里渊散射方法测量水中声速的实验系统及实验结果
a—测量水中声速的实验系统 b—常规方法与布里渊方法实验结果对照

规方法的测量结果,其中最大测量误差为 13m/s,最小测量误差 0.1m/s,其相对误差均小于 0.9%。

2010年,日本的 ASAHARA 等人应用布里渊散射技术测量了 900K 高温、25GPa 高压水中的声速值^[28],显示了布里渊散射测量声速技术在深海和地幔状况下的应用前景。

2.2 次表层海水温度 3 维分布遥测

次表层海水温度是认识海洋、研究海洋对气候的影响、准确预测天气和气候变化的基础,对研究海-空交互作用模型、海洋中尺度系统特性、海浪以及其它层流的动态具有重要意义。然而,准确、快速、低费用地获取海水次表层温度始终是个难题。测量船虽然测量精度高,却耗时太大;消耗性深水热力计测量速度快,但是价格昂贵。机载或星载红外辐射计虽然具有实时、快速的优点,但由于红外光在海水中透过率特别低,只能测得表层 0.01mm 厚度海水的温度。相比较应用喇曼散射测量海水温度的方法,布里渊散射光谱很窄,不易受荧光、太阳光以及选择性吸收的影响,且频移量小,可以使入射光和散射光同处海水窗口,探测能力高。更重要的是,布里渊雷达是一种频率探测方式,信噪比高、抗干扰性强,可以高精度、快速地遥测海水温度的水平和垂直分布。

国内外学者在应用布里渊散射遥感次表层海水温度方面进行了大量的研究工作。1977年,美国迈阿密大学的 HIRSCHBERG 等人测量了佛罗里达州迈阿密附近一码头 2m 深处海水的布里渊散射图样,数据处理后推得温度为 $34^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ ^[4]。用于对照的热敏电阻测量的温度值为 29°C 。虽然测量精度有待于提高,该实验验证了应用布里渊散射测量海水温度的可行性。1984年,HIRSCHBERG 等人改进了试验系统进行了第 2 次实验,实验系统见图 4a^[7]。实验中测得光电倍增管 B 和光电倍增管 C 的信号强度之比 $I_{s,B}/I_{s,C}$ 与温度之间的关系见图 4b^[7]。 s_B/s_C 值波动约为 1%,对应温度测量精度为 0.5°C 。1997年~1998年,美国 A&M 大学的 EMERY 和 FRY 等人提出应用边缘探测技术测量海水布里渊散射频移的新方法,不但对可以作为边缘探测滤波器的 Br_2 和 I_2 的很多组合吸收谱线作了详细的理论和实验研究,而且对利用该方法测量海水温度的测量精度作了理论分析。研究表明,海水温度测量精度由盐度和布里渊频移的测量精度决定,约为 0.2°C ^[11]。

2006年,北京师范大学 GONG 等人和美国 A&M 大学 KATZ 等合作,对边缘探测技术中布里渊散射频移量随 Br_2 吸收池后探测器 S_2 和 I_2 分子吸收池后探测器 S_1 测得的归一化信号比值变化的情况进行了校准^[19]。

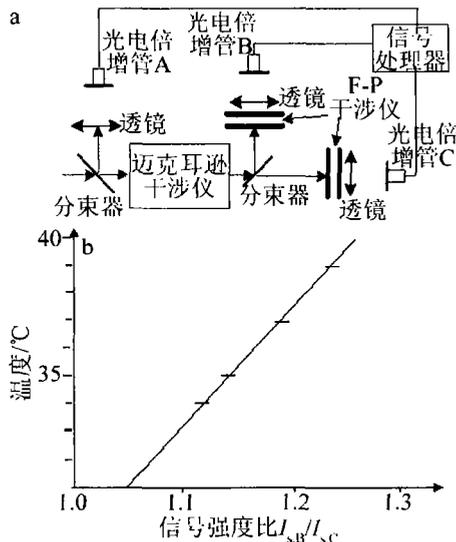


图4 应用布里渊散射测量海水温度的双 F-P 方法实验装置及实验结果
a—布里渊雷达光电系统布置 b—双 F-P 方法测得的实验结果

2008年,德国应用物理研究所的 SCHORSTEIN 等人应用新研制的高重频光纤放大器,对水的布里渊散射频移与温度的对应关系进行了实验研究^[13],测温精度约为 0.57°C 。

2009年,SCHORSTEIN 等人在实验室用分段温度控制的水槽,首次测量出随空间分布的水温变化曲线,见图 5^[14],其中点实线是布里渊散射方法测量结果,虚线是水槽顶部两个热电偶测得的温度,圆圈处布里渊频移量测量精度达 $\pm 0.009\text{GHz}$,对应测温误差为 0.6°C 。

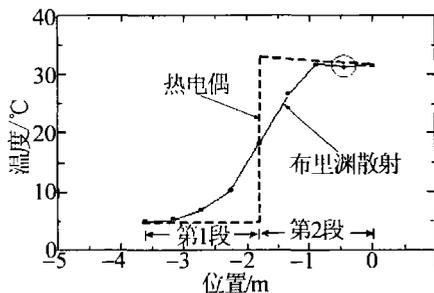


图5 水槽内的温度分布曲线

2.3 其它应用

利用海水的布里渊散射光谱除了可以监测海水的声速、温度的水平和垂直分布外,还有很多其它的应用。例如,2002年,美国 A&M 大学的 FRY 等人在美国海军部的资助下,研制出基于布里渊散射的水下物体探测激光雷达系统,并获专利授权^[5]。该探测系统在军事领域中可以实时探测隐形潜艇、水雷等目标,对战争及平时国防建设具有重要意义;在民用领域中可以探测水下动植物,绘制水底地形图等,具有重要经济价值。布里渊雷达水下物体探测系统结构图见图 6a,激光由发射系统入射到水中物体上,背向散射信号经分子吸收池滤波由光电探测器接收。激光器选用倍

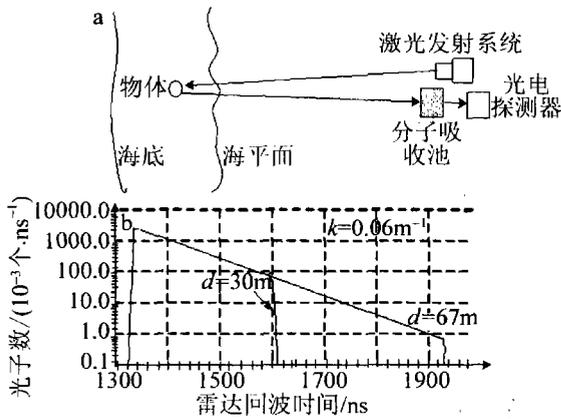


图6 基于布里渊散射的水下探测系统原理图

a—水下物体探测系统装置图 b—散射信号与雷达回波延迟时间的关系曲线

频的种子注入稳频 Nd:YAG 激光器,分子吸收池选用碘分子池,目的是滤除瑞利散射光信号,提高布里渊散射信号的信噪比。该车载探测系统离水面高度约 200m,激光器单脉冲能量 5mJ,脉冲宽度 6ns,探测器接收面积约 0.33m²,水的衰减系数为 0.06m⁻¹。该系统不仅能根据海水布里渊散射光谱的有无判别水下物体的存在与否,而且还可以根据布里渊散射信号相对于激光器发射信号的时间差来定位水下物体的位置。图 6b 是布里渊散射信号随雷达回波时间变化的曲线。此后国内部分学者进一步研究了利用布里渊散射信号探测水下物体的技术^[6]。

海洋布里渊散射雷达技术还可用于海水盐度分布遥感^[29],可以克服其它盐度测量方法的水下设备易腐蚀、污浊等缺点,解决微波雷达只能测量海水表面盐度的问题。另外,海洋布里渊散射雷达技术在海洋污染监测和赤潮等自然灾害的预报^[30],水的体粘滞系数测量等众多领域都有应用,已发展为海洋科学领域新的研究热点。

3 结论

分析了布里渊散射雷达系统的关键技术,介绍了国内外布里渊雷达关键技术的发展状况,讨论了布里渊雷达技术在海洋探测领域的实用化进程及应用前景。总体来说,海洋探测布里渊雷达是一种新颖的频率探测主动激光雷达,可以广泛应用于海洋温度、盐度、声速等水平和垂直分布曲线的遥感,以及水雷、隐形潜艇等水下目标的识别等很多领域。但其实际应用中还存在一些需要克服的困难,在很多领域的应用研究还不够充分,发展空间比较大。

参考文献

[1] COSTA B M, BATTISTA T A, PITTMAN S J. Comparative evaluation of airborne LIDAR and ship-based multibeam sonar bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems[J]. Remote Sensing

of Environment, 2009, 113(5):1082-1100.

- [2] MA Y, JI H, LIANG K, *et al.* Application of modulated LIDAR on optical carrier for ocean exploration[J]. Laser Technology, 2008, 32(4):346-349 (in Chinese).
- [3] YAN D, XUE Q J. Atmosphere-ocean laser communication channel simulation and modeling[C]//International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, 2009. Sanya: CCCM, 2009:554-557.
- [4] HIRSCHBERG J G. The use of Brillouin and Raman scattering to measure temperature and salinity below the water surface[C]//Proceedings of Waste Heat Management and Utilization Conference. New York, USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1977:389-410.
- [5] FRY E S, KATTAWAR G W, WALTHER T, *et al.* System and method for detecting underwater objects having a shifted frequency: US,6388246B1[P]. 2002-05-14.
- [6] GONG W, DAI R, SUN Z, *et al.* Detecting submerged objects by Brillouin scattering[J]. Applied Physics, 2004, B79(5): 635-638.
- [7] 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.
- [8] GUAGLIARDO J L, DUFILHO H L. Range resolved Brillouin scattering using a pulsed laser[J]. Review of Scientific Instruments, 1980, 51(1): 79-81.
- [9] HICKMAN G D, HARDING J M, CAMES M, *et al.* Aircraft laser sensing of sound velocity in water: Brillouin scattering[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 36(3): 165-178.
- [10] EMERY Y E, FRY E S. Laboratory development of a LIDAR for measurement of sound velocity[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 2963: 210-215.
- [11] FRY E S, EMERY Y E, 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.
- [12] POPESCU A, SCHORSTEIN K, WALTHER T. A novel approach to a Brillouin LIDAR for remote sensing of the ocean temperature[J]. Applied Physics, 2004, B79(8):955-961.
- [13] 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.
- [14] SCHORSTEIN K. Depth-resolved temperature measurements of water using the Brillouin LIDAR technique[J]. Applied Physics, 2009, B97(4): 931-934.
- [15] FRY E S, KATZ J, LIU D H, *et al.* Temperature dependence of the Brillouin linewidth in water[J]. Journal of Modern Optics, 2002, 49(3/4):411-418.
- [16] LIU D H, XU J F, LI R Sh, *et al.* Measurements of sound speed in the water by Brillouin scattering using pulsed Nd: YAG laser[J]. Optics Communications, 2002, 203(3/6):335-340.
- [17] DAI R, GONG W, XU J, *et al.* The edge technique as used in Brillouin LIDAR for remote sensing of the ocean[J]. Applied Physics, 2004, B79(2): 245-248.
- [18] LIN H, DONG T L, MA Y, *et al.* The measure error analysis of Brillouin scattering based on edge detecting technology[J]. Laser Technology, 2008, 32(1):346-349 (in Chinese).
- [19] GONG W, SHI J, LI G, *et al.* Calibration of edge technique considering variation of Brillouin line width at different temperatures of water[J]. Applied Physics, 2006, B83(2):319-322.

(下转第 816 页)

- photorefractive media[J]. *Physical Review Letters*, 1992, 68(7): 923-926.
- [2] DUREE G C, SHULTZ J L, SALAMO G J, *et al.* Observation of self-trapping of an optical beam due to the photorefractive effect[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(4): 533-536.
- [3] CHRISTODOULIDES D N, CARVALHO M I. Bright, dark and gray spatial soliton states in photorefractive media[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1995, B12(9): 1628-1633.
- [4] SEGEV M, VALLEY G C, BASHAW M C, *et al.* Photovoltaic spatial solitons[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1997, B14(7): 1772-1781.
- [5] ZHANG G Y, LIU J S. Self-deflection characteristics of dark photovoltaic spatial solitons in closed circuit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(10): 1559-1561 (in Chinese).
- [6] LIU J S, LU K Q. Spatial solitaire wave in biased photovoltaic-photorefractive crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, 47(9): 1509-1515 (in Chinese).
- [7] LIU J S, LU K Q. Screening-photorefractive spatial solitons in biased photovoltaic-photorefractive crystals and their self-deflection [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1999, B16(4): 550-555.
- [8] CASTRO-CAMUS E, MAGANA L F. Prediction of the physical response for the two-photon photorefractive effect[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(13): 1129-1131.
- [9] HOU Ch F, PEI Y B, ZHOU Z X, *et al.* Spatial solitons in two-photon photorefractive media[J]. *Physical Review*, 2005, A71(5): 053817.
- [10] HOU Ch F, ZHANG Y, JIANG Y Y, *et al.* Photovoltaic solitons in two-photon photorefractive materials under open-circuit conditions [J]. *Optics Communications*, 2007, 273(2): 544-548.
- [11] ZHANG G Y, LIU J S. Screening-photovoltaic spatial solitons in biased two-photon photovoltaic photorefractive crystals[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2009, B26(1): 113-120.
- [12] JI X M, JIANG Q Ch, LIU J S. Screening-photovoltaic spatial soliton in two-photon photorefractive media[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6): 816-818 (in Chinese).
- [13] CARVALHO M I, SINGH S R, CHRUSTODOULIDES D N. Modulational instability of quasi-plane-wave optical beams biased in photorefractive crystals[J]. *Optics Communications*, 1996, 126(1/3): 167-174.
- [14] LU K Q, ZHAO W, YANG Y L, *et al.* Modulation instability in biased photorefractive-photovoltaic crystals[J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, 21(6): 1086-1088.
- [15] WANG H C, SHE W L. Modulation instability of broad optical beams in nonlinear media with general nonlinearity[J]. *Chinese Optics Letters*, 2006, 4(2): 108-110.
- [16] WANG H C, SHE W L. Modulation instability and interaction of non-paraxial beams in self-focusing Kerr media[J]. *Optics Communications*, 2005, 254(1/3): 145-151.
- [17] HONG W P, SHWETANSHUMALA S, KONAR S. Modulational instability of optical beams in photovoltaic and photorefractive media due to two-photon photorefractive effect under open circuit condition [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(23): 5864-5869.
- [18] LI J P, LU K Q, ZHAO W, *et al.* Screening solitons in biased centrosymmetric photorefractive media [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(2): 257-260 (in Chinese).
- [19] ZHAN K Y, HOU Ch F, TAIN H, *et al.* Spatial solitons in centrosymmetric photorefractive crystals due to the two-photon photorefractive effect[J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(1): 015203.
- [20] ZHAN K Y, HOU Ch F. Separate spatial soliton pairs in a biased series centrosymmetric photorefractive crystal circuit[J]. *Optik—International Journal for Light and Electron Optics*, 2011, 122(7): 563-568.
- [21] JI X M, JIANG Q Ch, LIU J S. Incoherently coupled spatial soliton pairs in biased centrosymmetric photorefractive media with a resistance[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(1): 70-73 (in Chinese).

(上接第812页)

- [20] POPESCU A, WALTHER T. On the potential of Faraday anomalous dispersion optical filter as high-resolution edge filters [J]. *Laser Physics*, 2005, 15(1): 55-60.
- [21] POPESCU A, WALLDORF D, SCHORSTEIN K, *et al.* On an excited state faraday anomalous dispersion optical filter at moderate pump powers for a Brillouin-LIDAR receiver system[J]. *Optics Communications*, 2006, 264(2): 475-481.
- [22] POPESCU A, WALTHER T. On an ESFADOF edge-filter for a range resolved Brillouin-LIDAR; the high vapor density and high pump intensity regime[J]. *Applied Physics*, 2010, B98(4): 667-675.
- [23] KOSKI K J, YARGER J L. Brillouin imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(6): 061903.
- [24] LI Sh J, SHI J W, LIU D H, *et al.* Real-time detecting of Brillouin scattering in water with ICCD [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 6028: 60281J.
- [25] SHI J, LI G, GONG W, *et al.* A LIDAR system based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Applied Physics*, 2007, B86(1): 177-179.
- [26] SHI J W, CHEN X D, OUYANG M, *et al.* Amplification of stimulated Brillouin scattering of two collinear pulsed laser beams with orthogonal polarizations [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(17): 3232-3236.
- [27] KILICASLAN I, ESEN C, SCHWEIGER G. Ultrasonic enhanced Brillouin light scattering in water[J]. *Optics Communications*, 2006, 265(2): 441-445.
- [28] ASAHARA Y, MURAKAMI M, OHISHI Y, *et al.* Sound velocity measurement in liquid water up to 25 GPa and 900 K: implications for densities of water at lower mantle conditions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 289(3/4): 479-485.
- [29] 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 (in Chinese).
- [30] LIN H, WANG X M, LIANG K. Study of ocean red tide multi-parameter monitoring technology based on double-wavelength airborne LIDAR system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7656: 765608.