先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022081805

远程光纤水听器系统中光学非线性效应研究进展

胡晓阳*，陈　伟，孟　洲，曹春燕

（国防科技大学 气象海洋学院深海科学与技术实验室，长沙 410073）

摘　要： 随着远程光纤水听器系统传输距离的不断扩展，各类光学非线性效应的影响日益凸显，并已成为制约远程光纤水听器系统性能的瓶颈。回顾了远程光纤水听器系统中光学非线性效应研究进展，对系统中存在的光学非线性效应进行分析，并重点介绍了系统中受激布里渊散射与调制不稳定性的产生机理及其对系统相位噪声的影响，并介绍相应的抑制方法。

关键词： 光纤水听器；受激布里渊散射；调制不稳定性

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0738－06

Research Progress of the Optical Nonlinear Effects in Remote Fiber Optic Hydrophone System

HU Xiaoyang, CHEN Wei, MENG Zhou, CAO Chunyan

(College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, CHN)

Abstract: With the further extending of the transmission distance in remote optical fiber hydrophone system, the effects of various optical nonlinear effects are becoming prominent, and have become the bottleneck that limits the performance of the system. This paper reviewed the research progress on the optical nonlinear effects in remote optical fiber hydrophone system, analyzed the main nonlinear effects in remote fiber optic hydrophone system, and focused on the mechanism of stimulated Brillouin scattering and modulation instability. The effects of SBS and MI on the system's phase noise were presented. Finally, the methods to suppress the nonlinear effects were introduced.

Key words: optical fiber hydrophone; stimulated Brillouin scattering; modulation instability

0　引言

自20世纪70年代美国海军研究实验室(NRL)发表第一篇关于光纤水听器的论文以来[1]，光纤水听器技术在近几十年间获得了快速发展，已在水声探测、资源勘探、地震监测等领域得到广泛应用[2-4]。相对于传统的压电水听器，光纤水听器具有灵敏度高、体积小、重量轻、抗电磁干扰、动态范围大等优点。特别是由于光纤水听器具有便于复用的特点，可利用单根低损耗光纤将数十甚至数百个光纤水听器复用成阵列，从而低成本地构建远程大规模探测阵列，显著增强探测能力。在构建远程大规模探测阵列方面，光纤水听器具有传统压电水听器难以比拟的优势[5]。近年来，随着低噪声光放大技术与阵列复用技术的成熟，光纤水听器阵列系统的远程大规模化成为重要发展方向，目前的远程光纤水听器阵列传输距离可扩展至数百甚至上千千米，阵列基元数可达数千个[6]。然而，随着光纤水听器传输距离与阵列规模的不断扩大，系统光功率损耗不断增大，使得到达接收端的功率与信噪比下降。为了提升接收端功率，必须提升系统传输功率，这使得长距离光纤传输过程中各类光学非线性效应更易发生，导致系统相位噪声急剧增大，严重恶化远程光纤水听器系统检测灵敏度。目前，光学非线性效应已经成为制约远程光纤水听器系统性能的关键瓶颈[7]。研究表明，远程光纤水听器系统中主要存在

收稿日期：2022－08－18.

* 通信作者：胡晓阳　E-mail：huxiaoyang@sina.cn

的光学非线性效应包括受激布里渊散射(SBS)、调制不稳定性(MI)、四波混频(FWM)、自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)等。2012 年，陈伟等[8]对远程干涉型光纤传感系统中非线性噪声及其影响进行了详细分析，介绍了远程光纤水听器系统基本结构，指出远程光纤水听器系统中 SPM 及 XPM 给系统性能带来的影响很小，FWM 的影响可以通过选择不等间隔信号及错峰传输等方法有效抑制，而 SBS 与 MI 对系统的影响最为显著，需要进行有效抑制[9]。SBS 是远程光纤中阈值最低的一种光学非线性效应，是远程光纤水听器系统输入功率的首要限制因素。在 SBS 得到有效抑制的情况下，MI 成为目前远程光纤水听器系统最大输入功率的主要限制因素。本文重点对远程光纤水听器系统中 SBS 与 MI 及其对系统的影响进行了分析，讨论了相应的抑制方法。最后，本文对远程光纤水听器系统光学非线性效应研究的发展进行了展望。

1　受激布里渊散射

1.1　受激布里渊散射及其对远程光纤水听器系统的影响

SBS 是由光场与声场的相互作用引起的一种光学非线性效应[10]。其产生过程可描述如下：当激光输入光纤时，电致伸缩效应在光纤中产生声波，引起光纤折射率发生周期性变化，从而产生以声速移动的折射率光栅，该折射率光栅与输入激光作用产生布拉格散射，导致输入激光发生频率下移产生 Stokes 光。当进入光纤的激光功率超过 SBS 阈值时，输入光功率大量向后向 Stokes 光转化，后向散射功率急剧增大，导致 SBS 的发生。这种情况下即使继续增加输入光功率，前向输出功率也不会继续明显增加，故 SBS 限制了系统传输的最大功率。阈值特性是 SBS 的重要特性之一，通常情况下，SBS 阈值可以用下式进行估算[10]：

$$P_{\mathrm{th}} \approx 21 \frac{A_{\mathrm{eff}} K}{g_{\mathrm{p}} L_{\mathrm{eff}}}\left(1+\frac{\Delta \nu}{\Delta \nu_{\mathrm{B}}}\right) \tag{1}$$

式中，g_{p} 为自然布里渊峰值增益，K 为偏振因子，A_{eff} 为光纤有效模场面积，L_{eff} 为光纤有效作用长度，α 为光纤衰减系数，L 为光纤实际长度，$\Delta\nu$ 为输入激光线宽，$\Delta\nu_{\mathrm{B}}$ 为自然布里渊增益带宽。在远程光纤水听器系统中，当传输光纤长度大于 50 km 时，系统 SBS 阈值约为 4.3 mW。SBS 是远程光纤中阈值最低的一种光学非线性效应，是远程光纤水听器系统中最大输入功率的首要限制因素。

陈伟等研究了 SBS 发生时远程光纤水听器系统中强度噪声与相位噪声特性，结果表明 SBS 发生，光纤前向输出光相对强度噪声与相位噪声均急剧增大，使得系统探测性能严重下降，故必须对 SBS 进行抑制[11-12]。

1.2　远程光纤水听器系统中 SBS 的抑制

从 SBS 阈值公式(1)可以看出，增大光纤有效模场面积，减小光纤有效长度，改变偏振特性，增加信号光带宽，减小光纤布里渊峰值增益等都可以抑制 SBS。大量研究者在光纤通信、高功率光纤激光器、光纤放大器等系统中对 SBS 抑制进行了详细研究，提出了包括增大纤芯半径[13]、纤芯掺杂[14]、施加温度与应力变化改变光纤布里渊频移[15-16]、不同布里渊频移光纤级联[17]、声波导涂层[18]、相位调制[19-20]，以及光频调制[21]等方法在内的 SBS 抑制方法。以上各种方法分别在不同的应用领域取得了一定的抑制效果。其中增大纤芯半径、纤芯掺杂、不同频移光纤级联等方法都需要对光纤进行特殊设计，会大大增加光纤传感系统成本；施加温度与应力变化方案难以在实际应用环境中应用。对于远程干涉型光纤传感系统 SBS 抑制，需要成本低、操作简便、稳定性好的方法。相位调制与光频调制方法是比较理想的选择。

1.2.1　相位调制技术

相位调制是在多种光纤系统中广泛使用的一种 SBS 抑制方法。该方法通过相位调制将传输光功率分散到多个频率边带上，降低了每个边带频率的光功率，当调制频率大于布里渊增益带宽(典型值为几十兆赫兹)，SBS 阈值由最大的频率边带功率决定，可以有效提升 SBS 阈值，实现 SBS 的有效抑制。陈伟等[22]首先研究了相位调制对远程光纤水听器系统中 SBS 及相位噪声的抑制作用，发现相位调制在抑制系统 SBS 的同时，会带来额外的相位噪声，使得系统 SBS 抑制效果受限。进一步的分析发现，相位调制产生的额外相位噪声是由于多边带干涉时参数不匹配导致的系统信噪比下降。故提出两种方法对该额外相位噪声进行抑制：一是在传输光纤输出端添加一个相位调制器将输入端相位调制产生的多频光还原为单频光，此时探测信号幅度与未进行相位调制时一致，从而避免了该附加相位噪声，可称为光相位调制与解调方法[23]；二是通过相位调制信号频率与干涉仪光程差之间的匹配，使多边带干涉信

号幅度达到最大，提升系统信噪比，从而有效抑制相位调制带来的相位噪声。称这种方法为参数匹配干涉方法[24]。实验结果表明，以上两种方法均可通过相位调制同时实现远程光纤水听器系统中 SBS 及相位噪声的有效抑制。

相位调制是一种高效的 SBS 抑制技术，通过产生增加等幅边带个数，可以持续提升 SBS 抑制比，在增加系统输入功率的同时保持低噪声性能。如图 1 所示，当对单频光施加 60 MHz 相位调制产生等幅边带时，3 等幅边带与 9 等幅边带调制分别将 SBS 阈值从 4.35 mW 提升至 13.28W 与 37.1 mW。

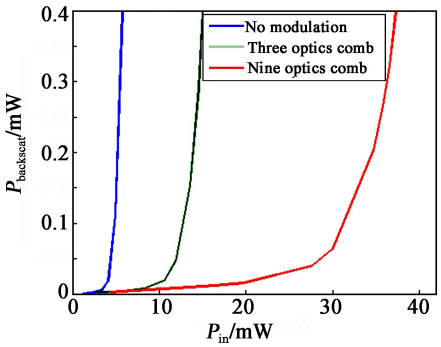


图 1 50 km 光纤相位调制下产生不同数量等幅边带时后向散射功率随输入平均光功率变化

1.2.2 光频调制技术

光频调制方法通过调制光源输出频率，达到抑制 SBS 的目的。该方法不会给系统增加额外器件，不增加系统复杂度。研究表明，远程光纤中光频调制降低了光纤中平均有效布里渊增益，从而实现 SBS 的有效抑制，其抑制效果与光频调制频率和调制幅度都有关[25]。除了抑制 SBS 以外，对激光器施加正弦光频调制还是一种产生 PGC 调制载波的有效方法。

在基于 PGC 技术的干涉型光纤传感系统中，正弦光频调制产生的调制度 C 值可表示为下式：

$$C = 2\pi\Delta\nu\Delta t \tag{2}$$

式中，$\Delta\nu$ 为光频调制幅度，$\Delta\nu$ 的最大值是由激光器的调制性能所决定的，$\Delta\nu$ 越大，光频调制对 SBS 抑制比越大；Δt 为干涉仪两臂传输延时差。由于激光器相位噪声随干涉仪光程差增大而增大，所以在实际应用中应尽量增大 $\Delta\nu$、减小 Δt，以获得较高的 SBS 抑制比与较低的系统相位噪声。

研究表明，光频调制不仅可以方便地施加 PGC 调制载波，而且可以有效抑制远程干涉型光纤传感系统 SBS 及其相位噪声[25]。图 2 对比了利用 PZT 外调制与光频调制两种方式产生 PGC 调制载波时系统相位噪声随输入功率的变化，可以看出，当采用光频调制产生 PGC 调制载波时，系统中 SBS 和相位噪声得到有效抑制，可有效提升系统最大输入功率。

目前的研究结果表明，综合运用相位调制与光频调制技术可实现远程光纤传感系统中 SBS 的充分抑制，使得 SBS 不再是目前远程光纤水听器系统中的主要限制因素[24-25]。

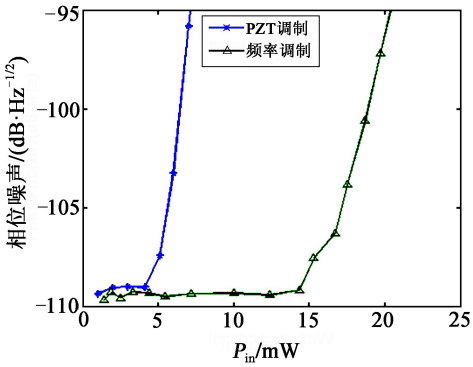


图 2 相位噪声与输入功率的关系

2 调制不稳定性

2.1 调制不稳定性及其对远程光纤水听器系统的影响

在 SBS 得到有效抑制的条件下，MI 逐渐成为远程光纤水听器系统中影响最显著的光学非线性效应。MI 是色散与非线性共同作用导致的一种光学非线性效应[10]，自 1984 年首次在光纤中得到实验观测以来[26]，光纤中 MI 受到研究者的广泛关注。与 SBS 阈值主要与平均功率有关不同，MI 阈值主要与脉冲峰值功率有关，在远程光纤水听器系统中，MI 的阈值约为 200 mW。当输入功率大于 MI 阈值时，MI 放大泵浦光增益带宽内的 ASE 噪声，在输入

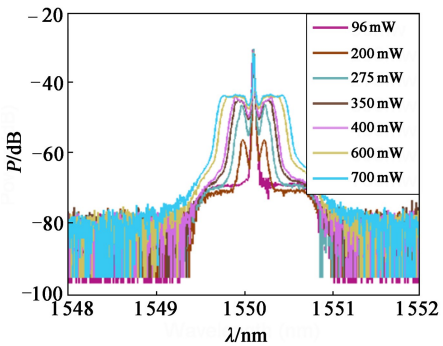


图 3 不同输入功率条件下 50 km 单模光纤对应的前向输出光谱

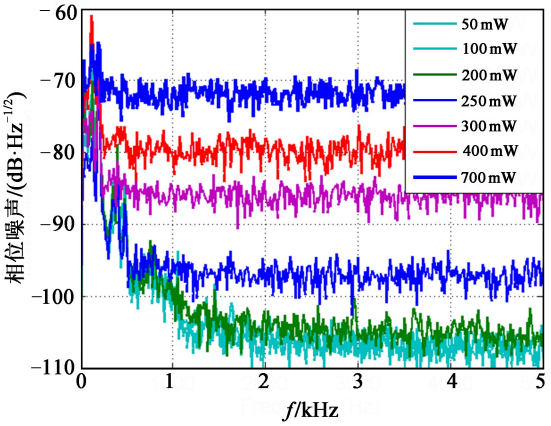


图 4　相位噪声与脉冲峰值功率的关系

光频率两侧产生对称的频谱边带(不同输入功率条件下的前向输出光谱如图 3 所示)[27],且中心频率光与频谱边带之间产生强烈的功率转换,导致远程光纤水听器系统相位噪声迅速增加(系统相位噪声随脉冲峰值功率变化关系如图 4 所示),系统探测灵敏度严重下降[27]。

2.2　远程光纤水听器系统中 MI 的抑制

不少研究者针对光纤传感系统中的 MI 展开了大量研究,并提出了一些 MI 抑制方法,典型的有以下几种:一是采样正常色散光纤。由于 MI 是一种主要发生在反常色散区的光学非线性效应,在正常色散区 MI 只有特殊条件下才会发生。要实现 MI 抑制,最简单的方法就是采样正常色散光纤[28]。二是正交偏振脉冲法。2000 年,Dinda 等[29]利用双频正交偏振泵浦的方法实现了 MI 和 SRS 的同时抑制;2015 年,Luc 教授课题组[30]采用偏振正交法抑制了 BOTDA 系统中的 MI,理论上该方法可以使输入功率提高 3 dB;三是降低 ASE 背景噪声。该方法主要通过对光源进行窄带滤波以降低 ASE 噪声功率来实现[31]。四是时域分离的多频光源法。该方法由瑞士联邦理工学院 Luc 教授课题组于 2015 年提出,利用时域分离的多频光源有效提高了 BOTDA 最大输入功率与信噪比[32]。

但是对远程干涉型光纤传感系统而言,以上四种方法都有其局限性。采样正常色散光纤可以从原理上避免 MI 的发生,但是正常色散光纤的价格比较昂贵,会显著增加系统成本,且在正常色散光纤如色散位移光纤中容易导致 FWM 效率的提升;正交偏振脉冲会引入偏振噪声串扰,导致干涉型光纤传感系统相位噪声的增加;通过窄带滤波降低 ASE 背景噪声的方案适用于单波长系统,但是由于需要对每个波长光源定制窄带滤波器,价格昂贵,对大规模的多波长系统不太适合;时域分离的多频光源法理论上可以将系统输入功率提高 N 倍(N 为光频个数),但是操作过于复杂,且在时域分离与合束过程中容易带来额外的相位噪声。

国防科技大学提出一种相干种子注入方案实现远程光纤水听器系统中自发 MI 及其相位噪声的抑制[33]。通过对单频光施加高频相位调制在频谱两侧对称位置引入相干种子光,以在远程光纤中激发感应 MI。由于相干种子相对于 ASE 噪声具有竞争优势,感应 MI 过程成为远程光传输过程的主要光学非线性效应,自发 MI 被有效抑制,典型光谱对比如图 5 所示。可以看到,未调制时,前向输出光谱能量分散在对称的自发 MI 边带中,而调制情况下下前向输出光谱能量集中于几个分立 MI 边带中,ASE 中产生的自发 MI 边带能量被有效抑制[33]。

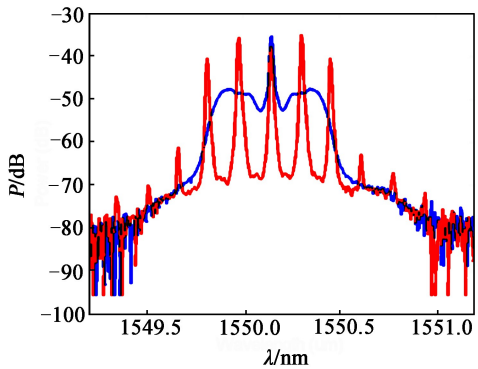


图 5　脉冲峰值功率为 400 mW 时 50 km 光纤输出光谱(蓝线:未调制;红线:调制)

研究结果表明该方法可以有效抑制自发 MI 带来的相位噪声,并提升远程干涉型光纤传感系统最大输入功率与传输距离。利用该方法,远程光纤水听器系统输入光脉冲功率提升至 800 mW 时,系统相位噪声约 −90 dB/$\sqrt{\text{Hz}}$。相比未调制情况,相位

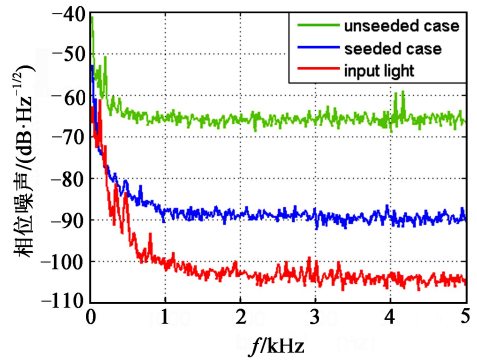


图 6　输入功率为 800 mW 时不同情况相位噪声谱图

噪声抑制幅度超过−20 dB,相位噪声对比结果如图6所示,其中红线为系统输入激光相位噪声,绿线为未调制情况下的系统相位噪声,蓝线为调制情况下的系统相位噪声。

3 讨论与结论

在技术进步与现实需求的双重驱动下,远程光纤水听器技术正在不断推向实际应用,系统中光学非线性效应研究也在不断推进。虽然远程光纤水听器系统中非线性效应及其抑制技术研究取得了一系列进步,但光学非线性效应仍是限制系统传感距离与阵列规模的重要因素。为了进一步提升远程光纤水听器系统探测,还需要继续探究光学非线性效应抑制技术。另一方面,以分布式拉曼放大技术为代表的各类光放大技术也在远程光纤水听器系统中得到广泛研究与应用,分布式放大与遥泵放大技术进一步提升了远程光传输距离,但是,光放大技术的应用使得各类非线性效应的阈值进一步降低[34-35],各类光放大技术与光学非线性效应抑制技术的高效结合将是进一步提升远程光纤水听器系统传输距离与系统规模的重要方向。随着SBS与MI抑制的实现,远程光纤水听器系统中的光功率已提升至新的水平,传输过程中的光学非线性效应变得更加复杂,多种光学非线性效应之间的相互作用问题成为研究者们需要关注的新问题[36]。远程光纤水听器系统中非线性效应的研究仍有许多开放性问题亟待研究。

参考文献:

[1] Bucaro J, Dardy H, Carome E. Fiber-optic hydrophone[J]. J. The Acoustical Society of America, 1977, 62(5): 1302-1304.

[2] Cole J H, Bucaro J A, Kirkendall C K, et al. The origin, history and future of fiber-optic interferometric acoustic sensors for US Navy applications[C]// 21st Inter. Conf. on Optical Fiber Sensors, 2011: 47-50.

[3] Kringlebotn J T, Nakstad H, Eriksrud M. Fibre optic ocean bottom seismic cable system: from innovation to commercial success[J]. Proc. SPIE, 2009: 75037U.

[4] Baldwin C S. Brief history of fiber optic sensing in the oil field industry[C]// Fiber Optic Sensors and Applications Ⅺ, 2014: 909803.

[5] Meng Z, Chen W, Wang J, et al. Recent progress in fiber-optic hydrophones[J]. Photon. Sensors, 2021, 11(1): 109-122.

[6] Liao Y, Austin E, Nash P J, et al. Highly scalable amplified hybrid TDM/DWDM array architecture for interferometric fiber-optic sensor systems[J]. J. Lightwave Technol., 2012, 31(6): 882-888.

[7] 陈 伟. 远程干涉型光纤传感系统非线性效应影响及其抑制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
Chen Wei. Influences and suppression techniques of nonliner effects on long-haul interferometric fiber sensing systems[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.

[8] 陈 伟, 孟 洲, 周会娟, 等. 远程干涉型光纤传感系统的非线性相位噪声分析[J]. 物理学报, 2012, 61(18): 199-205.
Chen Wei, Meng Zhou, Zhou Huijuan, et al. Nonlinear phase noise analysis of long-haul interferometric fiber sensing system [J]. Acta Phys. Sinica, 2012, 61(18): 199-205.

[9] 曹春燕, 胡正良, 徐 攀, 等. 一种基于多波长光脉冲错峰放大的光纤水听器光发射装置[P]. CN. CN110266392A. 2019-09-20.
Cao Chunyan, Hu Zhengliang, Xu Pan, et al. A fiber optic hydrophone optical transmitter based on staggered amplification of multi-wavelength optical pulses[P]. CN. CN110266392A. 2019-09-20.

[10] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics[M]. Springer, 2000: 195-211.

[11] Chen W, Meng Z. Forward and backward intensity noises induced by stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. Chinese Opt. Lett., 2012, 10(2): 020603.

[12] Chen W, Meng Z, Zhou H J, et al. Stimulated brillouin scattering-induced phase noise in an interferometric fiber sensing system[J]. Chinese Phys. B, 2012, 21(3): 034212.

[13] Digiovanni D J, Mermelstein M. Large mode area fiber amplifiers with reduced stimulated Brillouin scattering[P]. US. US7856162 B2. 2010-12-21.

[14] 埃文斯 A F, 特鲁斯德尔 C M. 抑制在光纤中的受激布里渊散射[Z]. 1998.
Evans A F, Trusdale C M. Suppressing stimulated Brillouin scattering in optical fiber[Z]. 1998.

[15] Liu Anping. Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient[J]. Opt. Express, 2007, 15(3): 977-984.

[16] 吴武明, 冷进勇, 许晓军, 等. 一种用于窄带光纤拉曼放大器的受激布里渊散射抑制方法[Z]. 2010.
Wu Wuming, Leng Jinyong, Xu Xiaojun, et al. A stimulated Brillouin scattering suppression method based on narrow-bandwidth fiber Raman amplifier[Z]. 2010.

[17] Oliveira C, Cheng K J, Shang A Z, et al. Stimulated Brillouin scattering in cascaded fibers of different Brillouin frequency shifts[J]. J. the Optical Society of America B, 1993, 10(6): 969-972.

[18] Dragic P D, Liu C H, Papen G C, et al. Optical fiber with an acoustic guiding layer for stimulated Brillouin scattering suppression[C]// Conf. on Lasers & Electro-Optics, 2006:

1984-1986.

[19] Mauro J C, Raghavan S, Ruffin A B. Enhanced stimulated Brillouin scattering threshold through phase control of multitone phase modulation[J]. Opt. Engin., 2010, 49(10): 84-84.

[20] Zeringue C, Dajani I, Naderi S, et al. A theoretical study of transient stimulated Brillouin scattering in optical fibers seeded with phase-modulated light[J]. Opt. Express, 2012, 19: 21196-21213.

[21] White J O, Rogers S D, Mungan C E. Time-dependent modeling of Brillouin scattering in passive optical fibers pumped by a chirped diode laser[R]. 2012: 1-8.

[22] Chen W, Meng Z. Effects of phase modulation used for SBS suppression on phase noise in an optical fibre[J]. Chinese Opt. Lett., 2011, 44(16): 165402.

[23] Hu X, Chen W, Fan L, et al. An optical modulation method to suppress stimulated Brillouin scattering and the phase noise in a remote interferometric fiber sensing system[J]. Optical Fiber Technol., 2014, 20(5): 547-551.

[24] Hu X, Chen W, Tu X, et al. Theoretical and experimental study of suppressing stimulated Brillouin scattering and phase noise in interferometric fiber sensing systems with phase modulation[J]. Appl. Opt., 2015, 54(8): 2018-2022.

[25] Hu X, Chen W, Tu X, et al. A simple model of suppressing stimulated Brillouin scattering in optical fiber with frequency-modulated laser[J]. Chinese Phys. B, 2014, 23(12): 124208.

[26] Simaeys G V, Emplit P, Haelterman M. Observation of modulational instability recurrence in optical fibers[C]// Nonlinear Guided Waves & Their Applications, 2001.

[27] Hu X, Chen W, Sun S, et al. The effect of modulation instability on the interferometric fiber sensing systems[C]// 2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), 2017: 17373510.

[28] Nanii O E, Kuzmenkov A I, Treshchikov V N, et al. Influence of modulation instability on the operation of phase-sensitive optical time domain reflectometers[J]. Laser Phys., 2016, 26(10): 105106.

[29] Dinda P T, Millot G, Louis P. Simultaneous achievement of suppression of modulational instability and reduction of stimulated Raman scattering in optical fibers by orthogonal polarization pumping[J]. J. the Optical Society of America B, 2000, 17(10): 925-928.

[30] Urricelqui J, Alem M, Sagues M, et al. Mitigation of modulation instability in Brillouin distributed fiber sensors by using orthogonal polarization pulses[C]// 24th Inter. Conf. on Optical Fibre Sensors, 2015.

[31] Soto M A, Alem M, Wei C, et al. Mitigating modulation instability in Brillouin distributed fibre sensors[C]// Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors, 2013: 87943J.

[32] Soto M A, Ricchiuti A L, Zhang L, et al. Time and frequency pump-probe multiplexing to enhance the signal response of Brillouin optical time-domain analyzers[J]. Opt. Express, 2014, 22(23): 28584-28595.

[33] Hu X, Meng Z, Chen W, et al. Suppression of modulation instability and the phase noise in the remote interferometric optical fiber sensing systems[C]// Optical Fiber Sensors, 2018: 3642-3645.

[34] Sun S, Hu X, Mo C, et al. Effect of Raman amplification on the modulation instability threshold[J]. Opt. Engin., 2018, 57(3): 036102.1-036102.6.

[35] Zhang Y, Liang Y, Meng Z, et al. A model for the enhancement of the gain saturation power of the forward pumped fiber Raman amplifier with the phase modulation [C]// Asia Communications and Photonics Conf., 2020: 1-3.

[36] Hu X, Chen W, Chen M, et al. Experimental observation of the competition between stimulated Brillouin scattering, modulation instability and stimulated Raman scattering in long single mode fiber[J]. J. Optics, 2016, 18(8): 085501.

作者简介：

胡晓阳(1990—)，男，湖南省衡阳市人，博士，助理研究员，主要研究方向为光纤传感与水声探测。