

光纤水听器远程系统非线性串扰抑制

曹春燕^{1,2}, 胡宁涛¹, 侯庆凯^{1,2}, 熊水东^{1,2*}¹国防科技大学气象海洋学院, 湖南长沙 410073;²海洋探测技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 在采用密集波分复用(DWDM)与时分复用(TDM)结构的光纤水听器(OFH)远程传输系统中,非线性波长串扰是制约其传输距离和探测性能的关键因素之一。理论及仿真研究了多波长高峰值功率注入条件下,远程光纤中受激拉曼散射(SRS)导致的波长功率转移及非线性串扰问题,并提出一种基于波长错峰发射的串扰抑制结构。16DWDM×8TDM的OFH远程传输对比实验结果表明,经错峰后的100 km传输系统中,各波长光功率不均衡性相比未错峰前降低9.7 dB;受串扰影响最大的波长1和波长16对应OFH通道的相位噪声分别下降20.0 dB和10.5 dB,达到-97.0 dB和-96.5 dB的低噪声水平,由此验证了错峰光发射结构的有效性。该研究可为光纤水听器远程传输系统的光发射及链路设计提供重要参考。

关键词 光纤光学; 光纤水听器; 远程传输; 非线性波长串扰; 相位噪声抑制

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1606005

Suppression of Nonlinear-Crosstalk in Remotely Interrogated Optical Fiber Hydrophone Systems

Cao Chunyan^{1,2}, Hu Ningtao¹, Hou Qingkai^{1,2}, Xiong Shuidong^{1,2*}¹College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;²Hunan Provincial Key Laboratory of Ocean Exploration Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract Nonlinear wavelength crosstalk is one of the key factors which restrict transmission distance and detection performance of remotely interrogated optical fiber hydrophone (OFH) systems with dense wavelength division multiplexed (DWDM) and time division multiplexed (TDM) structures. In this paper, wavelength power conversion and nonlinear crosstalk problems caused by stimulated Raman scattering (SRS) under the condition of multi-wavelength and high peak power injection are analyzed theoretically and simulated. And a crosstalk suppression structure based on wavelength-staggered emission is proposed. Experimental results of the remotely interrogated 16DWDM×8TDM OFH system show that with this wavelength-staggered scheme, the wavelength optical power imbalance after 100 km transmission is reduced by 9.7 dB compared with the original scheme, and phase noises of the hydrophone channels associated with the wavelength 1 and wavelength 16, which are most affected by the crosstalk, are reduced by 20.0 dB and 10.5 dB, respectively, to the level of -97.0 dB and -96.5 dB. So the results verify the validity of the wavelength-staggered structure. The study can provide an important reference for the design of the optical emission and transmission links of remotely interrogated OFH systems.

Key words fiber optics; optical fiber hydrophone; remote transmission; nonlinear wavelength crosstalk; phase noise suppression

1 引言

光纤水听器^[1-2]广泛应用于海洋声学探测、海底地震勘探和周界安防等领域,其中海底固定式阵列^[3]系统以其远离舰船自噪声、可长期值守等优点成为了水听器的重要应用。固定式水听器系统通常由大规模密

收稿日期: 2021-12-24; 修回日期: 2022-03-09; 录用日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(61905283, 61605244)

通信作者: *nudtxsd@163.com

集波分复用(DWDM)与时分复用(TDM)阵列组成,并采用全光纤无中继传输模式以实现探测距离的低成本、高可靠性有效拓展。为补偿远程传输及大规模阵列带来的巨大光学损耗,密集复用光发射机的输出光功率需要达到较高阈值。但高功率的多波长脉冲光在远程光纤中传输时极易产生各类非线性效应,导致系统传输距离受限和探测性能降低。

针对光纤水听器远程传输系统非线性噪声问题,已有研究基于程差匹配相位调制^[4]、倾斜光纤布拉格光栅滤波^[5-6]等方法实现了受激布里渊散射(SBS)的抑制,基于相干种子光注入相位调制^[7]方法提高了调制不稳定性(MI)阈值,采用控制注入光功率、增大波分复用间隔^[8]等手段将四波混频(FWM)降至一定水平。以上效应得到控制后,多波长高功率传输下 SRS 引入的波长串扰及噪声问题逐步凸显。针对 DWDM 系统的 SRS 串扰问题,光通信领域研究人员已有较多研究。文献[9]分析了 SRS 串扰导致的光强度噪声及其对品质因子 Q 值的影响;文献[10]给出了放大自发辐射(ASE)噪声和拉曼放大串扰对误码率的影响;文献[11-12]分析了窄带和宽带 DWDM 光通信系统中 SRS 引起的功率消耗及波长倾斜问题。另有文献采用具有负增益斜率的集中式拉曼光放大器^[13]在 1.571~1.591 μm 波段实现了拉曼串扰补偿,还有研究采用波长变换技术^[14]实现了 DWDM 通信系统中 SRS 串扰的抑制。对于高灵敏相位检测的光纤水听器远程系统,其 SRS 串扰特性及噪声抑制方法与光通

信系统有本质区别,但未见相关报道。

本文首先理论及仿真分析了密集复用的光纤水听器远程传输系统中,非线性波长串扰的产生机理及传输特性,然后提出一种基于对称梯形结构的延时匹配错峰光发射方案,对其结构参数及串扰抑制进行阐述。最后通过 16DWDM×8TDM (16W×8T) 的 100 km 传输系统的对比实验,验证了错峰结构对 SRS、FWM 等非线性波长串扰以及水听器相位噪声抑制的有效性。

2 串扰特性分析

2.1 理论分析

N 重波分与 M 重时分混合复用的光纤水听器远程传输系统典型结构如图 1 所示。图中 N 路等间隔的超窄线宽激光器($\text{laser}_1 \sim \text{laser}_N$)经波分复用器(MUX)合波后接入相位调制器(PM),声光调制器(AOM)将连续光斩波为脉冲光序列。根据光纤水听器检测带宽及 TDM 复用需求,脉冲序列占空比小于等于 $1/M$,重复频率通常在几百 kHz,脉冲宽度为几百 ns。为补偿后续远程传输及大规模复用阵列带来的巨大光学损耗,掺铒光纤放大器(EDFA)输出高功率的复用脉冲光并将其注入下行传输光纤。 $N \times M$ 重复用阵列传感后的干涉脉冲光由上行光纤传输至光接收机,依次经解波分复用(DMUX)、光电转化($D_1 \sim D_N$)、模数转换($A/D_1 \sim A/D_N$)及阵列相位解调后,可获得水下声场或地震场的阵列传感信息。

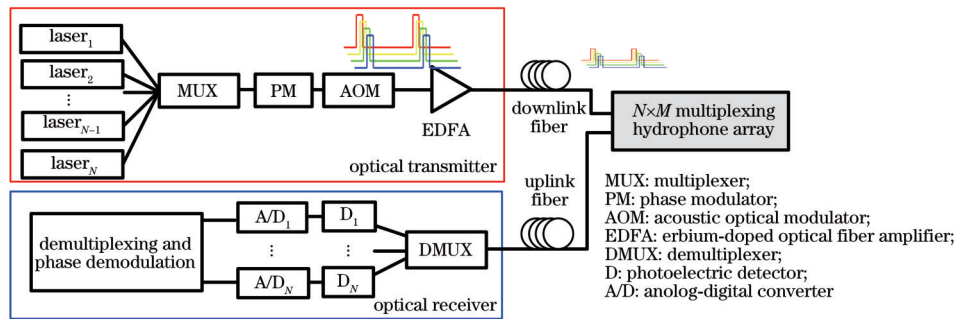


图 1 密集复用光纤水听器远程传输系统典型结构

Fig. 1 Typical structure of densely multiplexed and remotely intergraded OFH system

上述结构中,通过相位调制、控制注入光功率等方式可将 SBS 和 MI 控制在阈值之下。由于各超窄线宽复用光源之间很难做到完全等间距, FWM 产生的拍频噪声大部分也可被探测器滤除,因此 SRS 成为系统最主要的非线性噪声来源。考虑 SRS 最严重的情形,令 C 波段内有同偏振的 N 波长脉冲光同步在长度为 L 的下行光纤中传输,相邻波长间隔为 Δf ,发生光功率交换的短波长 λ_i (i 的取值范围为 $1 \sim N-1$) 与长波长 λ_j (j 的取值范围为 $2 \sim N$) 之间的频率间隔为 $\Delta f_{ij} = \Delta f(j-i)$, $j > i$ 且 $\Delta f_{ij} > 0$ 。在稳态条件下,准连续脉冲光沿光纤的功率分布包络可等效为平均功率为脉冲峰值功率时连续光的功率分布,并可用连续光的模型去近似脉冲光的情形^[15]。因此各波长脉冲光的拉曼增益及损耗

可以用以下耦合模方程^[11]表示为

$$\begin{cases} \frac{dI_j(z)}{dz} = \sum_{i=1}^{j-1} g_{ij} I_i I_j - \alpha_j I_j \\ \frac{dI_i(z)}{dz} = -\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \sum_{j=i+1}^N g_{ij} I_j I_i - \alpha_i I_i \end{cases}, \quad (1)$$

式中: g_{ij} 为由泵浦光(λ_i)引起斯托克斯光(λ_j)的增益系数; I_i 和 I_j 分别为 λ_i 和 λ_j 的光强; α_i 和 α_j 为光纤传输损耗,可统一为 α 。令 g_r 为单模光纤传输的拉曼峰值增益系数, g_{shift} 为拉曼峰值增益频移,由于 $\Delta f_{ij} \ll g_{\text{shift}}$, 可用拉曼散射增益谱的三角近似将 g_{ij} 表示为随 Δf_{ij} 线性变化的量^[12]:

$$g_{ij} = \frac{\Delta f_{ij} g_r}{g_{\text{shift}}}. \quad (2)$$

式(2)中 $g_{ij} \ll g_r$, 因此式(1)可近似为小信号增益, 忽略泵浦消耗后, 第 i 波长向第 j 波长的拉曼串扰增益为

$$G_{ij} = \exp\left(\frac{g_{ij} P_j L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}}\right), \quad (3)$$

式中: $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$ 为光纤传输的有效长度; A_{eff} 为光纤截面积; P_j 为第 j 波长的光功率。考虑 SRS 过程泵浦光和斯托克斯光束中光子总数不变, 发生拉曼串扰且第 i 波长向第 j 波长功率转移时, 第 i 波长的光损耗可近似为

$$\eta_{ij} = \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \exp\left(\frac{g_{ij} P_i L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}}\right), \quad (4)$$

式中: P_i 为第 i 波长的光功率。综合考虑 N 波长复用的远程传输系统中 λ_i 和 λ_j 间级联的拉曼增益及光功率转移效应, 经传输 L (单位 km) 距离后第 k (k 的取值范围为 $1 \sim N$) 波长的损耗可表示为

$$\eta_k = \left\{ \begin{array}{l} \prod_{j=k+1}^N \eta_{kj} e^{-\alpha L}, \quad k=1 \\ \left[1 + \sum_{i=1}^{k-1} (G_{ik} - 1) \right] \prod_{j=k+1}^N \eta_{kj} e^{-\alpha L}, \quad k=2 \sim N-1 \\ \left[1 + \sum_{i=1}^{k-1} (G_{ik} - 1) \right] e^{-\alpha L}, \quad k=N \end{array} \right. \quad (5)$$

2.2 仿真分析

根据 2.1 节理论, 对 $16\text{W} \times 8\text{T}$ 复用的光纤水听器远程传输系统进行仿真分析。为使 DWDM 覆盖 C 波段且间距尽可能大以降低 FWM, 激光器中心波长 ($\lambda_1 \sim \lambda_{16}$) 分布在 $1530 \sim 1560 \text{ nm}$ 之间, 单波长峰值功率控制在 100 mW 以下, AOM 输出脉冲占空比为 $1:10$ 。传输光纤折射率 $n_0 = 1.456$, $\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$, $A_{\text{eff}} = 83 \mu\text{m}^2$, 拉曼增益系数 $g_r = 6.5 \times 10^{-14} \text{ m/W}$, $g_{\text{shift}} = 13.2 \text{ THz}$ 。选择 $\lambda_1 = 1534.25 \text{ nm}$, 对应的国际电信联盟 (ITU) 频率 $f_1 = 195.4 \text{ THz}$, 其余 $\lambda_2 \sim \lambda_{16}$ 波长在 λ_1 基础上依次递增 $\Delta\lambda$, 频率则在 f_1 基础上依次递减 Δf 。第 k ($k=1 \sim 16$) 波长对应的频率为 $f_1 - (k-1) \times \Delta f$ 。

根据以上参数及限定条件, 令 $P_i = 75 \text{ mW}$ ($i=1 \sim 16$), Δf 分别为 50 GHz 、 100 GHz 、 200 GHz , 由式(2)~(5)仿真得到 $\lambda_1 \sim \lambda_{16}$ 的 100 km 传输损耗变化情况如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 由于信号间级联 SRS 的光功率转移效应的存在, $\lambda_1 \sim \lambda_{16}$ 的传输损耗随波长的增加而递减, 50 GHz 、 100 GHz 和 200 GHz 三个频率间距下的 16 个波长的传输损耗差异分别为 4.37 dB 、 8.16 dB 和 14.93 dB 。尤其是在 200 GHz 时, λ_1 和 λ_{16} 的损耗分别为 29.44 dB 和 14.51 dB , 严重偏离了 20 dB 的 100 km 传输损耗设定值。分析其原因为: Δf 的增加加大了信号间拉曼增益系数 g_{ij} , 由此导致更大的波长不均衡性。此外, 仿真得到 $50 \sim 200 \text{ GHz}$ 的 16 个波长的平均传输损耗分别为 20.07 dB 、 20.29 dB 和

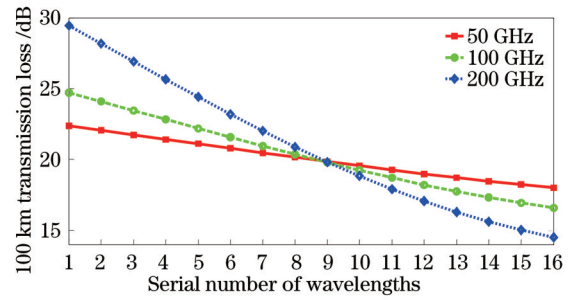


图 2 不同 Δf 条件下传输损耗随波长 $\lambda_1 \sim \lambda_{16}$ 的变化
Fig. 2 Transmission loss varying with wavelengths $\lambda_1 \sim \lambda_{16}$ under different Δf

20.98 dB , 均超过了 20 dB , 分析其原因为 SRS 发生时小部分光能量向光纤介质转移。

其次, 选择图 2 中 SRS 最严重的条件 $\Delta f = 200 \text{ GHz}$, 仿真分析了 $P_i = 75 \text{ mW}$ 、 L 在 $25 \sim 100 \text{ km}$ 之间变化, 以及 $L = 100 \text{ km}$ 、 P_i 在 $50 \sim 100 \text{ mW}$ 之间变化时, 16 个波长的传输损耗变化情况, 结果分别如图 3 和图 4 所示。

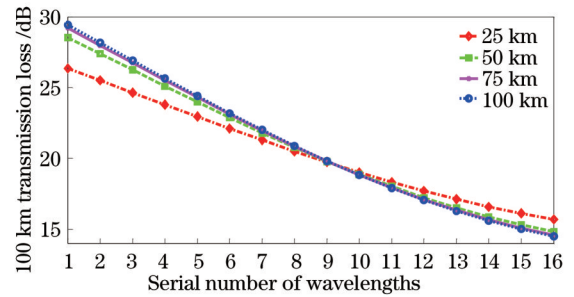


图 3 不同 L 条件下传输损耗随波长 $\lambda_1 \sim \lambda_{16}$ 的变化
Fig. 3 Transmission loss varying with wavelengths $\lambda_1 \sim \lambda_{16}$ under different L

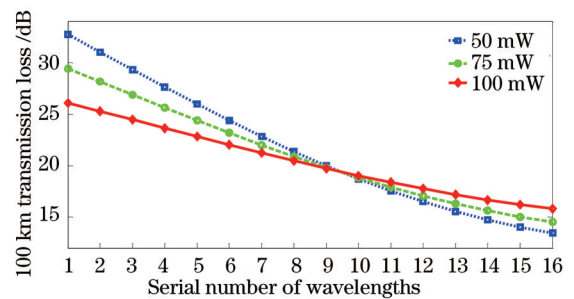


图 4 不同 P_i 条件下传输损耗随波长 $\lambda_1 \sim \lambda_{16}$ 的变化
Fig. 4 Transmission loss varying with wavelengths $\lambda_1 \sim \lambda_{16}$ under different P_i

图 3 中当 L 小于 50 km 时, 随着传输距离的增加, SRS 导致的波长损耗差异逐渐加大。但当距离超过 50 km 后, 由于非线性长度 L_{eff} 变化趋缓, 波长不均衡性随距离增加的趋势也逐渐放缓, 并稳定在约 15 dB 。图 4 中当 P_i 分别为 50 mW 、 75 mW 和 100 mW 时, 波长不均衡性依次为 10.33 dB 、 14.93 dB 以及 19.30 dB , SRS 导致的光功率转移随注入功率的增大而逐渐增

加,这与理论分析一致。

以上结果表明,光纤水听器远程传输系统的多波长高功率信号光同时传输时,随着传输距离的增加和注入光功率的增加,级联 SRS 导致的波长损耗差异逐渐加剧,这将给水听器传输链路及阵列均衡设计带来困难。此外,远程传输后短波长的信号光较弱、信噪比高将导致相位噪声激增;而长波长信号光较强,容易超过 SBS、MI 等阈值而产生附加的非线性噪声,进而恶

化系统探测性能。

3 串扰抑制及验证

3.1 系统结构

针对以上问题,在图 1 中光发射部分加入波长错峰单元(WSU)以对 SRS 等非线性波长串扰进行抑制,结构如图 5 所示。

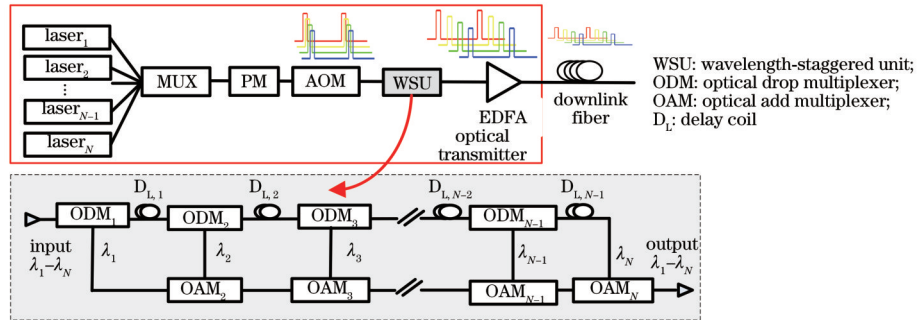


图 5 基于波长错峰的光发射改进结构

Fig. 5 Improved optical transmitter based on wavelength-staggered scheme

图 5 中 WSU 由中心波长为 $\lambda_1 \sim \lambda_{N-1}$ 的光波长下载器件 ($ODM_1 \sim ODM_{N-1}$)、 $\lambda_2 \sim \lambda_N$ 的光波长上载器件 ($OAM_2 \sim OAM_N$) 以及延迟光纤 ($D_{L,1} \sim D_{L,N-1}$) 等器件组成,并且 $D_{L,1} \sim D_{L,N-1}$ 长度与 TDM 脉冲重复频率、脉冲宽度等参数相关。经过 WSU 的时延匹配后,同时输入的多波长高峰值功率脉冲光将依次等间隔延迟至 TDM 占空比的空余部分,从而输出近似的多波长准连续光。该准连续光在经过 EDFA 的高功率放大时,可充分利用全时段的反转粒子,实现高增益分波放大并降低放大自发辐射噪声。更重要的是,错峰后的高功率复用脉冲光注入远程光纤后,由于各波长重叠度大幅降低,SRS、FWM 等波长相关的非线性效应可得到有效抑制。

除具备上述功能外,图 5 所示的 WSU 还有以下特点:1) 波长下载支路从光输入端开始, $ODM_1 \sim ODM_{N-1}$ 将波长 $\lambda_1 \sim \lambda_{N-1}$ 依次下载并延时,下载顺序为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_{N-1}$; 上载支路从光输出端开始, $OAM_2 \sim OAM_N$ 将波长 $\lambda_2 \sim \lambda_N$ 反向串行上载,上载顺序为 $\lambda_N, \lambda_{N-1}, \lambda_{N-2}, \dots, \lambda_2$, 经上下载支路的正反向组合后,WSU 内 $\lambda_1 \sim \lambda_N$ 经过的 OAM 和 ODM 器件总数相同,且光纤熔接点数目相等,这可充分保证各波长插损的均衡性;2) $D_{L,1} \sim D_{L,N-1}$ 串接在 $ODM_1 \sim ODM_N$ 内,仅使用 $N-1$ 个长度为 L_D 的延迟光纤,即可实现 N 波长脉冲的依次等间隔延迟输出,实际产生的总延迟距离为 $N(N-1)L_D/2$,将延迟光纤利用率提升 $N/2$ 倍,由此减小了 WSU 的体积及成本。

在 WSU 实际应用中:若 $N \leq M$,通过 L_D 长度与 TDM 脉冲周期的匹配设计,可将 N 波长光脉冲完全错峰输出;若 $N > M$,将 N 波长分组延时,也可大幅降低波长重叠度。以 2.2 节中 $N=16, M=8$ 的 200 GHz 间隔复用系统为例,将 16 个波长分为两组(即 $\lambda_1 \sim \lambda_8$ 和

$\lambda_9 \sim \lambda_{16}$),每组 8 波长分别依次延迟至 8 重 TDM 的空余时段,所需 L_D 共 14 个,延时与 TDM 相邻通道延迟一致。经过上述分组错峰后,16 个波长的最大重叠间隔由 200 GHz 改变为 1.6 THz,最大重叠波长数由 16 降低至 2。

3.2 实验及结果分析

为验证 WSU 对非线性波长串扰的抑制效果,搭建了如图 1 和图 5 所示的光纤水听器 100 km 无中继传输系统,对错峰前后的系统性能进行对比测试。测试系统的 $N=16, M=8$,波长间隔为 200 GHz,脉冲占空比为 1:10,重复频率为 200 kHz,EDFA 输出总功率为 118 mW,单波长平均峰值功率为 73.75 mW。首先测试了未错峰系统 100 km 传输前后的光谱,结果如图 6 所示。由于未错峰光发射端的输出光峰值功率过高,图 6(a) 为经过了约 20 dB 衰减的输入光谱测试结果。受 16 个波长激光器原始功率不一致以及 EDFA 增益不平坦性等因素的影响,未错峰的输入光功率不均衡性最大约 6.3 dB,并且高功率放大下各波长之间发生了 FWM,最大串扰与信号的比值 (MFSR) 为 -33.96 dB。如图 6(b) 所示,经 100 km 传输后,由 SRS 导致的波长不均衡性明显加剧,波长为 λ_1 的信号光功率最小,为 -37.29 dBm,波长为 λ_{16} 的信号光功率最大,为 -24.47 dBm,两者相差 12.82 dB;受 SRS 的影响 FWM 串扰曲线发生倾斜,最大串扰位于 λ_{16} 右侧且 MFSR 增至 -26.97 dB。将上述输入及输出信号光的 16 个波长分别用波分复用器解出,并用光功率计测得各波长的输入和输出功率如图 7 所示,由此得到 16 个波长的 100 km 传输损耗如图 8 所示。图 8 同时也给出了 2.2 节对应条件下的仿真结果。

图 8 所示实验结果中, λ_1 波长信号光的损耗最大,约为 28.81 dB, λ_{16} 波长信号光的损耗最小,约为

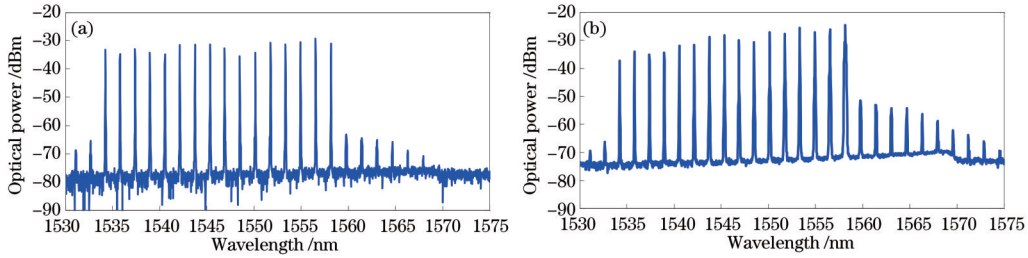


图 6 未错峰 100 km 传输系统的光谱。(a)输入光谱;(b)输出光谱

Fig. 6 Spectra of 100 km transmission system without WSU. (a) Input spectrum; (b) output spectrum

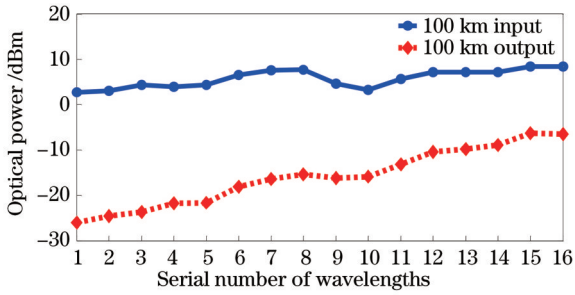


图 7 16 个波长信号光经 100 km 光纤传输后的输入、输出光功率
Fig. 7 Input and output optical powers after 100 km fiber transmission of signals of λ_1 to λ_{16}

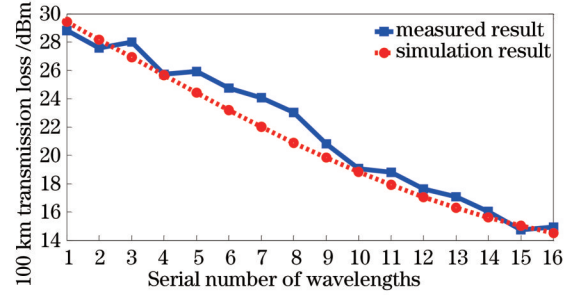


图 8 16 个波长信号光的 100 km 传输损耗仿真与测试值比较
Fig. 8 Comparison of simulation and measured results of 100 km transmission loss of signals of λ_1 to λ_{16}

14.93 dB, 两者相差 13.88 dB, 且 16 个波长信号光的平均损耗为 21.68 dB。图中实验和仿真曲线基本吻合, 验证了水听器 DWDM×TDM 系统级联的 SRS 串扰理论模型及仿真结果。部分波长的测试值偏离

仿真值约 1~2 dB, 这主要由解波分测试误差等因素导致。

对相同条件下加入 WSU 后系统性能的改善情况进行了测试, 100 km 输入及输出光谱如图 9 所示。

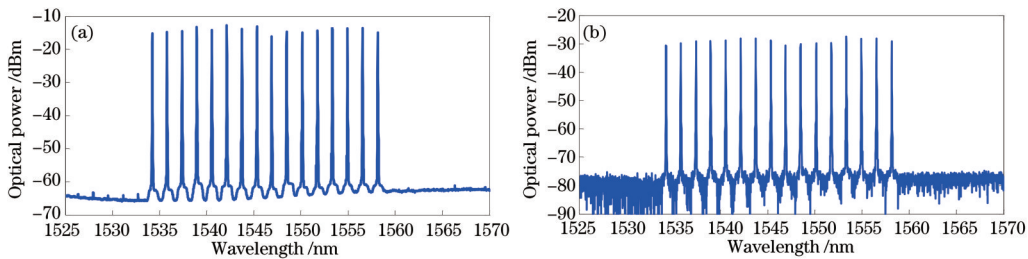


图 9 错峰后 100 km 传输系统的光谱。(a)输入光谱;(b)输出光谱

Fig. 9 Spectra of 100 km transmission system with WSU. (a) Input spectrum; (b) output spectrum

图 9 的输入及输出光谱中均未见明显的 FWM 光谱, 因此高功率光放大及 100 km 传输产生的 FWM 串扰均得到很好的抑制。图 9(a) 中 16 个波长的光功率均衡性为 3.4 dB, 相比未错峰系统降低 2.9 dB, 分析其原因为波长错峰放大改善了 EDFA 的增益平坦度。图 9(b) 中 100 km 输出光谱的 16 个波长的均衡性为 3.1 dB, 相比未错峰系统降低 9.7 dB, 并且未见明显的 SRS 串扰及光功率转移。由此可得, 经错峰后 SRS、FWM 等非线性波长串扰得到有效抑制。

转移影响最大的波长为 λ_1 和 λ_{16} 的信号光的相位噪声结果如图 10 所示。

最后, 将 100 km 输出端接入光纤水听器 16W×8T 复用模拟阵列, 进行错峰前后的远程系统相位噪声对比测试, 模拟阵列放置在声/振动屏蔽罐内以降低外界环境干扰对噪声测试的影响。实测得到 16 个波长信号光经 100 km 传输及时分复用干涉后, 受 SRS 功率

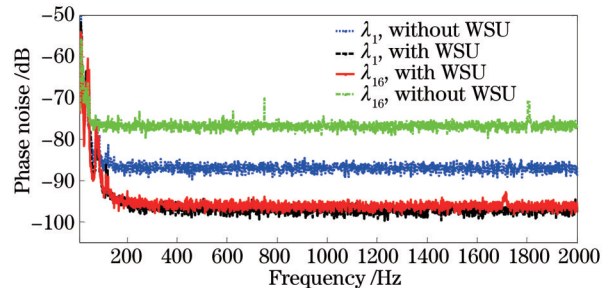


图 10 100 km 传输错峰前后 λ_1 和 λ_{16} 的相位噪声对比
Fig. 10 Comparison of phase noises of signals with wavelengths of λ_1 and λ_{16} before and after 100 km WSU

图 10 结果中,未错峰 100 km 传输系统在 λ_1 和 λ_{16} 的相位噪声分别为 -77 dB 和 -87 dB,远高于常规系统噪声。分析其原因为:1)SRS 串扰使波长为 λ_1 的信号光的 100 km 传输损耗急剧增加 8.8 dB,探测端干涉光信噪比不足导致较强的散粒噪声^[1];2)SRS 串扰使波长为 λ_{16} 的信号光的光功率提高 5.1 dB,该波长的峰值功率超出 MI 阈值,MI 谱线展宽导致了较强的相位噪声;3)部分 SRS 和 FWM 串扰光作为强度噪声叠加在干涉光场中,经解调后转化为系统相位噪声。经错峰后,波长为 λ_1 和 λ_{16} 的信号的相位噪声分别降低 20 dB 和 10.5 dB,即分别为 -97 dB 和 -96.5 dB,达到了基本一致的低噪声水平,此时系统噪声主要由光源频率噪声、光放大自发辐射噪声等线性噪声带来。以上结果表明,经 WSU 后光纤水听器远程传输系统的非线性波长串扰引入的相位噪声得到了有效抑制。

4 结 论

研究了密集波分与时分复用的光纤水听器远程传输系统中,非线性波长串扰的基本特性及其对系统的影响,并提出了一种基于延迟错峰的多波长光发射结构。16 W \times 8 T 的 100 km 传输对比实验结果表明,经过延迟错峰后级联 SRS 导致的波长功率转移现象得到明显改善,FWM 串扰完全消失,水听器系统的相位噪声抑制效果显著。所提出的波长错峰系统结构简单、成本低、串扰噪声抑制效果好。该研究可为光纤水听器远程无中继传输系统设计提供理论及实验参考。

参 考 文 献

- [1] Kirkendall C K, Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(18): R197-R216.
- [2] 孟洲, 陈伟, 王建飞, 等. 光纤水听器技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306009.
Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Research progress of fiber optic hydrophone technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306009.
- [3] Cranch G A, Kirkendall C K, Daley K, et al. Large-scale remotely pumped and interrogated fiber-optic interferometric sensor array[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(11): 1579-1581.
- [4] Hu X Y, Chen W, Tu X B, et al. Theoretical and experimental study of suppressing stimulated Brillouin scattering and phase noise in interferometric fiber sensing systems with phase modulation[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(8): 2018-2022.
- [5] 田鑫, 赵晓帆, 王蒙, 等. 基于倾斜 FBG 的光纤受激布里渊散射抑制[J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1706001.
Tian X, Zhao X F, Wang M, et al. Suppression of

stimulated Brillouin scattering in fiber using the tilted fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1706001.

- [6] 田鑫, 王蒙, 王泽锋. 基于倾斜光纤 Bragg 光栅的受激布里渊散射滤波器[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1006002.
Tian X, Wang M, Wang Z F. Stimulated Brillouin scattering filters based on tilted fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1006002.
- [7] Hu X Y, Chen W, Lu Y, et al. Suppression of spontaneous modulation instability and phase noise with a coherent seed in the interferometric fiber sensing systems[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3642-3645.
- [8] Chen W, Meng Z, Zhou H J. Phase-matching analysis of four-wave mixing induced by modulation instability in a single-mode fiber[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(9): 094215.
- [9] Zhou X, Birk M. Performance limitation due to statistical Raman crosstalk in a WDM system with multiple-wavelength bidirectionally pumped Raman amplification[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(10): 2194-2202.
- [10] Tithi F H, Majumder S P. Performance limitations due to combined influence of ASE and Raman amplifier induced crosstalk in a WDM system with direct detection receiver[C]//2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), December 20-22, 2016, Dhaka, Bangladesh. New York: IEEE Press, 2016: 566-569.
- [11] Vanholsbeeck F, Coen S, Emplit P, et al. Raman-induced power tilt in arbitrarily large wavelength-division-multiplexed systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(1): 88-90.
- [12] Christodoulides D N, Jander R B. Evolution of stimulated Raman crosstalk in wavelength division multiplexed systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(12): 1722-1724.
- [13] Seo H S, Oh K, Shin W, et al. Compensation of Raman-induced crosstalk using a lumped germanosilicate fiber Raman amplifier in the 1.571-1.591- μ m region[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(1): 28-30.
- [14] Grandpierre A G, Christodoulides D N, Toulouse J. Theory of stimulated Raman scattering cancellation in wavelength-division-multiplexed systems via spectral inversion[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(10): 1271-1273.
- [15] 孙世林. 远程大规模光纤水听器系统光纤拉曼放大技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018: 29-37.
Sun S L. Fiber Raman amplification technology for remote large-scale optical fiber hydrophone system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018: 29-37.