

遥泵放大对远程大规模光纤水听器系统性能的影响

林兆培, 江 镭, 吴建成

(中国电子科技集团公司 第二十三研究所, 上海 200000)

摘要: 针对远程大规模光纤水听器系统存在的阵列损耗和传输链路损耗难以被分布式光纤喇曼放大器(DFRA)有效补偿, 以及高增益放大时产生的较强泵浦光相对强度噪声问题, 提出了将远程遥泵放大(ROPA)与 DFRA 相结合的混合放大技术方案。通过建立系统光信噪比(OSNR)与解调相位噪声的关联模型, 分析了 ROPA 对系统 OSNR 和解调相位噪声的影响。实验结果表明: 在 16 波长×8 时分复用的 100 km 远程相位生成载波(PGC)解调系统中, ROPA 的运用使系统解调相位噪声降低了 7.7 dB, 达到 -100.4 dB@1 kHz; 对遥泵增益单元(RGU)光路结构进行优化后, 系统解调相位噪声达到 -101.5 dB@1 kHz。

关键词: 光纤水听器; 遥泵放大; 无中继传输

中图分类号: TN253; TB566 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)06-0056-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.06.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Impact of remote pumped amplification on the performance of long-distance large-scale optical fiber hydrophone systems

LIN Zhaopei, JIANG Lei, WU Jiancheng

(The 23th Research Institute of CETC, Shanghai 200000, China)

Abstract: To address the challenges of array loss and transmission link loss in long-distance large-scale optical fiber hydrophone systems, which are difficult to effectively compensate using distributed fiber raman amplifiers (DFRA), as well as the strong pump light relative intensity noise (RIN) generated during high-gain amplification, a hybrid amplification technique combining remote optical pumped amplification (ROPA) with DFRA is proposed. By establishing a correlation model between the system optical signal-to-noise ratio (OSNR) and demodulated phase noise, the impact of ROPA on system OSNR and demodulated phase noise is analyzed. The experimental results show that in a 16-wavelength×8 time-division multiplexing (TDM) 100 km long-range phase-generated carrier (PGC) demodulation system, the application of ROPA reduces the system demodulated phase noise by 7.7 dB, achieving -100.4 dB@1 kHz. After optimizing the optical path structure of the remote gain unit (RGU), the system demodulated phase noise reaches -101.5 dB@1 kHz.

Key words: optical fiber hydrophone, remote pump amplification, no-relay transmission

0 引言

光纤水听器以其高灵敏度、大动态范围和抗电磁干扰等特性, 已成为水声探测领域的一个重要研究方向。近年来, 随着光纤水听器在国民经济和国防军事

等领域的广泛应用, 推动了光纤水听器阵列规模的持续扩展, 传输距离也从几十千米扩展到了数百千米, 使得远程大规模光纤水听器阵列成为了该领域发展的关键趋势之一^[1-8]。基于光纤放大的远距离传输技术是实现远程大规模光纤水听器阵列的应用和发展的关键技术之一。特别是分布式光纤喇曼放大器(DFRA), 由于其高增益、大带宽、低噪声和在线放大的优势, 在光纤水听器阵列的无中继传输中得到了广泛应用^[3,9-11]。2010年, 王科研等人^[9]研究了 DFRA 对 25 km 远程光纤水听器解调系统相位噪声的影响, 首次证明了 DFRA 在远程光纤水听器系统中的应用潜力。2013年, 曹春燕

收稿日期: 2024-09-19。

作者简介: 林兆培(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为光纤传感探测、光纤远距离传输和特种光纤激光产生, 主持了多项国家级和省部级科研项目。



等人^[9]在 100 km 远程解调系统中使用 DFRA,成功将系统相位噪声优化了 72 dB,达到了-104 dB@1 kHz 的水平。2017 年,汪樟海等人^[10]同样在 100 km 远程解调系统中采用了 DFRA 的无中继传输策略,并通过相位调制技术进一步将系统相位噪声降低至-95.5 dB@1 kHz。尽管如此,现有的光纤水听器阵列规模仍不足以满足实际应用的需求。在实际部署中,远程大规模光纤水听器系统作为模拟信号传输的极限传感系统,其阵列损耗通常可达十几至二十几 dB,有时甚至高达 30 dB。DFRA 虽然能有效放大信号,但在高增益放大的情况下,泵浦光的相对强度噪声问题显著,这会导致系统相位噪声的急剧恶化。

为了解决这些问题,本文提出一种结合遥泵放大(ROPA)与分布式光纤喇曼放大(DFRA)的混合放大技术,应用于 100 km 远程解调系统中。该技术旨在克服 16 波长×8 时分复用(16λ×8T)光纤水听器阵列(阵列损耗为 22 dB)在解调过程中遇到的挑战。

1 系统设置及理论分析

1.1 系统设置

100 km 远程光纤水听器相位生成载波 (PGC)解调系统的示意图如图 1 所示。该系统采用了 ROPA 和 DFRA 相结合的无中继传输链路,而 ROPA 由远程增益单元(RGU)和遥泵功率单元(RPU)组成。其工作原理如下:

多波长发射光源(WLS)发出的调制信号首先通过掺铒光纤放大器(EDFA)进行功率增强,随后通过下行链路传输至 16λ×8T 的光纤水听器阵列。阵列产生的干涉信号经过 RGU 和 RPU 在线放大后,再通过上行链路中的 DFRA 进行进一步放大。之后,这些信号被密集波分复用(DWDM)解复用器分解成 16 个独立的通道。最后,经过光电探测器(PD)处理后,信号被送

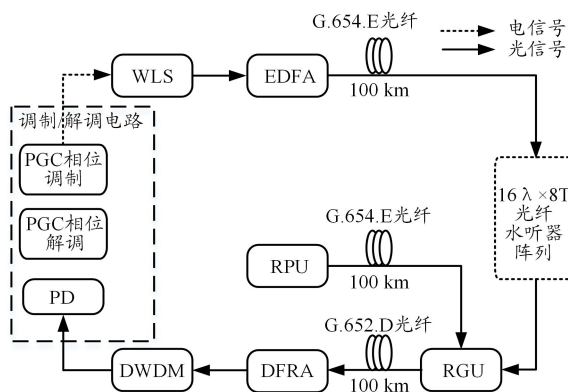


图 1 100 km 远程光纤水听器 PGC 解调系统示意图

入 PGC 解调模块,从而获得水声目标的相位信息。

1.2 噪声分析

光纤水听器系统的噪声主要包括强度噪声和相位噪声,而强度噪声在干涉后会转化为等效的相位噪声。上述远程水听器传输系统主要强度噪声来源于传输链路中 EDFA、RGU、DFRA 的放大自发辐射(ASE)噪声与信号光的拍频噪声,以及 ASE 与 ASE 之间的拍频噪声,两者^[12]可以分别表示为

$$N_{S-ASE} = 2P_S P_{ASE} \quad (1)$$

$$N_{ASE-ASE} = (KP_{ASE})^2 B_0 \quad (2)$$

其中, N_{S-ASE} 为 ASE 与信号光的拍频噪声, P_S 为信号光功率, P_{ASE} 为 ASE 光功率, $N_{ASE-ASE}$ 为 ASE 与 ASE 的拍频噪声, K 为偏振因子, B_0 为光学带宽。

2 种拍频强度噪声随 PGC 解调后转化为相位噪声,可分别表示为

$$N_{\phi_{S-ASE}} = \sqrt{\eta N_{S-ASE} / P_S^2} \quad (3)$$

$$N_{\phi_{ASE-ASE}} = \sqrt{\eta N_{ASE-ASE} / P_S^2} \quad (4)$$

其中, $N_{\phi_{S-ASE}}$ 为 ASE 与信号光的拍频相位噪声, $N_{\phi_{ASE-ASE}}$ 为 ASE 与 ASE 的拍频相位噪声; η 为强度噪声经解调后转换为相位噪声的转换系数,与 PGC 解调算法相关。

将式(1)、式(2)分别代入式(3)、式(4),得出

$$N_{\phi_{S-ASE}} = \sqrt{2\eta P_{ASE} / P_S} = \sqrt{2\eta / X_{OSNR}} \quad (5)$$

$$N_{\phi_{ASE-ASE}} = \sqrt{\eta (KP_{ASE})^2 B_0 P_S^2} = \sqrt{\eta K^2 B_0 / X_{OSNR}^2} \quad (6)$$

从式(5)、式(6)中可以看出,提高系统光信噪比(OSNR) X_{OSNR} ,是降低系统 ASE 拍频相位噪声影响最有效的手段。且通过合理配置信号功率、放大链路结构、OSNR 等参数,放大链路引入的相位噪声将由信号光与 ASE 拍频相位噪声占主导位置^[12]。

图 1 中的无中继传输链路可以看作是 EDFA、RGU、DFRA 级联放大传输链路。根据放大器级联噪声模型^[13],系统噪声系数 N_{sys} 可表示为

$$N_{sys} = N_E + \frac{N_R - L_{DN} L_{Array}}{G_E L_{DN} L_{Array}} + \frac{N_{RA} - L_{UP}}{G_E L_{DN} L_{Array} G_R L_{UP}} \quad (7)$$

其中, N_E 、 N_R 分别为 EDFA、RGU 的噪声系数, N_{RA} 为 DFRA 的等效噪声系数, G_E 、 G_R 分别为 EDFA、RGU 的增益, G_{RA} 为 DFRA 的开关增益, L_{DN} 、 L_{UP} 分别为信号下行链路、上行链路的传输损耗, L_{Array} 为阵列插入损耗。

根据 G.692 标准可知,系统 OSNR 的计算式为

$$X_{OSNR} = 58 + P_{IN} - N_{sys} \quad (8)$$

其中, P_{IN} 为 EDFA 输入光功率。

林兆培,江镭,吴建成: 遥泵放大对远程大规模光纤水听器系统性能的影响

从上述分析可知,系统 OSNR 是衡量传输放大链路对远程光纤水听器系统相位噪声影响的重要参数。对于相同的输入光功率,如何提高远程传输系统的 OSNR,对降低系统相位噪声意义重大。

1.3 RGU 影响分析

基于 1.2 节的噪声分析,当链路中 EDFA、RGU 和 DFRA 的相关参数如表 1 所示时,可以测得有无 RGU 时系统的 OSNR 分别为 23.3 dB 和 11.7 dB。这意味着,加入 RGU 后,系统 OSNR 提升了大约 11.6 dB。这一结果表明,在远程大规模光纤水听器无中继传输系统中,ROPA 在提高系统 OSNR 方面具有显著效果。这是因为受激布里渊散射(SBS)及其它非线性效应的存在,使得作为功率放大器的 EDFA 难以有效地补偿下行链路和大规模阵列的传输损耗,进而导致上行光功率过低,进入 DFRA 的光功率也相应减少。而经过喇曼放大后的 ASE 噪声水平几乎与输入光功率成反比,因此,较低的输入光功率会导致较高的 ASE 噪声水平,最终引起系统 OSNR 的显著下降。通过引入 RGU,可以有效改善这一状况,从而显著提升系统的 OSNR。

表 1 链路中 EDFA、RGU、DFRA 参数设置表

参数	值	参数	值
P_{in}/dBm	-15	G_p/dB	21
N_F/dB	5.5	L_{in}/dB	-19.8
G_E/dB	25	G_R/dB	13
L_{out}/dB	-16.5	N_{RA}/dB	-2
L_{Ampl}/dB	-22	N_{sp}/dB	19.7
N_F/dB	5.5	P_{out}/dBm	-14.3

2 实验及结果分析

为了验证 ROPA 对 PGC 系统解调相位噪声的影响,本文构建了一个 100 km 远程 PGC 解调系统,系统具体配置和参数设定如下:

◆WLS 光源的线宽小于 3 kHz,波长范围覆盖 I-TU C28~C44(其中 C36 未使用)。

◆经过调制和延时处理后,信号进入 EDFA 的合波功率约为 0 dBm。

◆通过应用相位调制和交错发射等技术,成功抑制了 SBS 和四波混频(FWM)等非线性效应^[10,14-15],使得 EDFA 输出的合波功率能够提升到 22 dBm,每个波长的功率约为 10 dBm。

◆下行链路采用了 G.654.E 光纤,这种光纤具有较大的模场直径和较低的衰减系数,能有效减少 SBS 及其它非线性效应,同时减少传输过程中的损耗。

◆上行链路则选择了 G.652.D 光纤,其衰减系数为 0.198 dB/km @1 550 nm。

◆RPU 采用了半导体激光器的偏振波分复用技术,总输出功率可达 2 W。RPU 的下行链路同样使用 G.654.E 光纤,衰减系数为 0.196 dB/km @1 480 nm,这有助于减轻 1 480 nm 波段高功率泵浦光引发的 SRS 效应,从而提高 RGU 的有效泵浦功率。

◆湿端阵列采用 16λ×8T 时分复用的方式模拟,等效光路的插入损耗为 22 dB。

◆上、下行链路长度均为 100 km,RGU 安装在模拟阵列输出端,即 0 km 位置,以即时补偿阵列损耗,从而优化增益和信噪比。

为了全面评估 ROPA 的效果,本文首先测试了未配置 ROPA 情况下系统的相位噪声,测试结果如图 2 所示。可以看出,相位噪声范围为-96 至-90 dB@1 kHz,平均相位噪声为-92.7 dB@1 kHz。造成不同波长解调相位噪声差异的主要因素包括:各窄线宽激光器的线宽和相位噪声特性、传输链路上各波长的增益一致性、解调电路中各通道的底噪差异等。

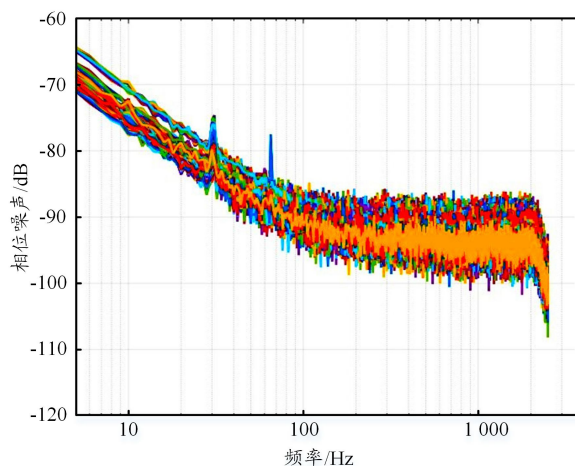


图 2 未配置 ROPA 时 100 km 远程系统相位噪声

随后,本文在系统中加入了 ROPA,并重新测量了相位噪声,结果如图 3 所示。此时,相位噪声范围为-98.5 至-101.9 dB@1 kHz,平均相位噪声为-100.4 dB@1 kHz。对比图 2 可知,ROPA 的应用使得系统的相位噪声降低了 7.7 dB。此外,图 2 和图 3 中低频区域出现了一些特征线谱,这些现象可能是由于测试环境中的干扰所导致的。

ROPA 对系统相位噪声的改善效果很大程度上取决于 RGU 的性能表现。在远程光纤水听器系统中,RGU 的性能受到远程泵浦光传输后功率下降和阵列输出信号功率不足的限制。因此,在低功率泵浦条件

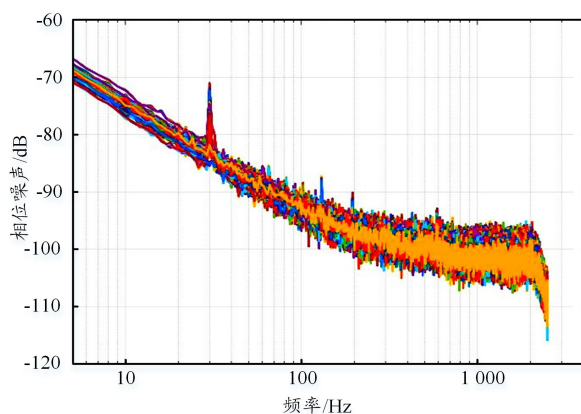


图3 配置 ROPA 时 100 km 远程系统相位噪声

下, 如何使 RGU 实现更高的小信号增益并保持较低的 ASE 噪声成为关键。为此, 本文对图 1 所示系统中的 RGU 光路设计进行了优化, 优化光路结构示意图如图 4 所示。优化后的 RGU 结构在输出隔离器(ISO)前引入了泵浦光反射通道, 该通道由 1 480/1 550 nm 波分解复用器(FWDM)和 1 480 nm 法拉第旋转镜(FRM)构成。在小信号放大的场景下, 尤其是当泵浦功率较低时, 使用低掺杂浓度的掺铒光纤(EDF)可以达到更低的噪声水平。未被 EDF 完全吸收的剩余泵浦光通过泵浦光反射通道被再次引入 EDF 中, 从而提供了更多的有效泵浦能量, 进而提高了 RGU 的整体增益。

为了减少低频段环境干扰对测试结果的影响, 本文专注于比较系统在 200~2 000 Hz 频率区间内的相位噪声表现, 结果如图 5 所示。可以看出, 采用优化后

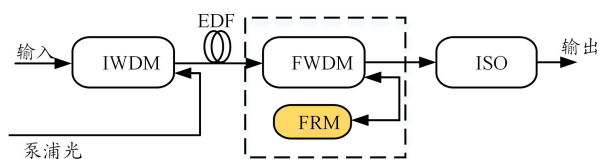
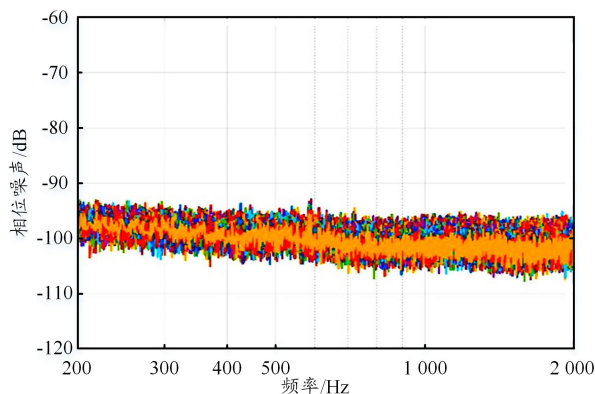
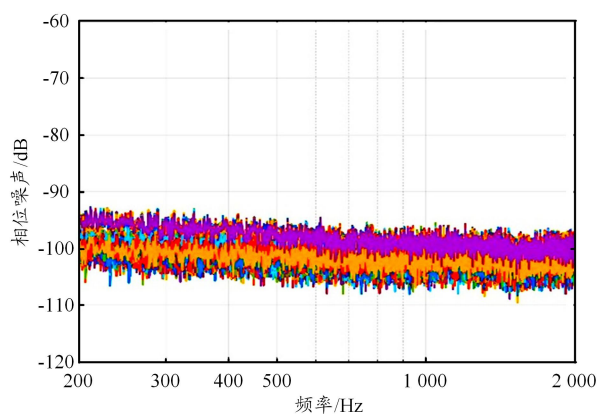


图4 RGU 优化光路结构示意图



(a) 优化前



(b) 优化后

图5 RGU 优化前后系统相位噪声

的 RGU 结构后, 系统的相位噪声得到了进一步的降低, 尤其在 1 kHz 频率点处, 相位噪声减少了大约 1 dB, 达到了 -101.5 dB@1 kHz。

3 结束语

本文研究了基于无中继传输的远程大规模水听器系统中的噪声特性, 构建了系统 OSNR 与解调相位噪声之间的关联模型, 明确了 OSNR 是影响系统解调相位噪声水平的关键因素。通过采用 ROPA 与 DFRA 相结合的混合放大技术, 成功解决了光纤水听器系统在 100 km 远程解调中面临的挑战。实验结果对比分析了 ROPA 对系统解调相位噪声的具体影响, 发现 ROPA 能够显著降低系统相位噪声达 7.7 dB, 使得相位噪声水平达到了 -100.4 dB@1 kHz。在此基础上, 进一步对 RGU 进行了结构上的优化, 通过引入泵浦光反射通道等措施, 使得系统的相位噪声进一步降低到了 -101.5 dB@1 kHz, 显著提升了系统的整体性能。本研究不仅验证了所提出技术方案的有效性, 还为远程大规模光纤水听器系统的设计和工程化应用提供了强有力的技术支持。

参考文献:

- [1] CRANCH G A, NASH P J, KIRKENDALL C K. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3(1): 19–30.
- [2] AUSTIN E, ZHANG Q, ALAM S, et al. 500 km remote interrogation of optical sensor arrays[C]//SPIE. Proceedings of 21st International Conference on Optical Fiber Sensors. Ottawa: SPIE, 2011:77532M-1–77532M-4.
- [3] 曹春燕, 熊水东, 胡正良, 等. 光纤水听器 200 km 无中继传输系统噪声研究[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 46–52.
- [4] LAVROV V S, PLOTNIKOV M Y, AKSARIN S M, et al. Experimental investigation of the thin fiber-optic hydrophone array based on fiber Bragg

林兆培,江镭,吴建成: 遥泵放大对远程大规模光纤水听器系统性能的影响

gratings[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 34: 47–51.

[5] 郝小柱,张汉泉,韦成龙,等. 光纤水听器阵列应用于海洋地震勘探的试验[J]. 热带海洋学报,2018,37(3):93–98.

[6] 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):123–143.

[7] 顾雪峰,胡平,张博,等. 基于参数均衡的大规模光纤水听器阵列设计[J]. 海军工程大学学报, 2021,33(3):27–32.

[8] LI Z, WANG C, GUI X, et al. A high-performance fiber-optic hydrophone for large scale arrays[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 41(13): 4201–4210.

[9] 王科研, 孟洲. 分布式光纤喇曼放大对远程光纤水听器系统噪声特性的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 1990–1995.

[10] 汪樟海,张红,王巍,等. 光纤水听器无电中继远程解调系统噪声优

化[J]. 中国激光, 2017, 11(44): 196–202.

[11] 孙世林. 远程大规模光纤水听器系统光纤喇曼放大技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2018.

[12] KIRDENDALL C K, DANDRIDGE A. Overview of high performance fiber-optic sensing[J]. Applied Physics, 2004(37): R197–R216.

[13] 杨宁,杨铸,漆启年,等. DWDM 系统中级联 EDFA 光信噪比计算[J]. 通信学报,2003,24(1):75–82.

[14] CHEN W, MENG Z, ZHOU H J et al. Stimulated Brillouin scattering-induced phase noise in an interferometric fiber sensing system[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(3): 256–261.

[15] 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.