

双向抽运拉曼放大器在 $100 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 超长距传输系统中的应用

迟荣华^{1,2,3}, 袁渊³, 王飞³, 吕涛², 孙小茜^{2*}

¹无锡科技职业学院物联网与软件学院, 江苏 无锡 214068;

²东南大学国家大学科技园, 光传感/通信综合网络国家(地方)联合工程研究中心, 江苏 南京 210096;

³无锡市德科立光电子技术有限公司, 江苏 无锡 214068

摘要 利用双向抽运拉曼放大器实现了 $4 \times 100 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 光网络传输 295 km(68.85 dB)的应用,测试了系统的光学信噪比、传输余量及长期误码特性,仿真了双向抽运拉曼放大器在 $4 \times 100 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 传输系统中的功率演化过程。研究表明,双向抽运拉曼放大器的应用需综合考虑信号输入功率、前后向拉曼增益及经济成本等。

关键词 光通信; 无中继传输; 超长距传输系统; 双向抽运拉曼放大器; 掺铒光纤放大器

中图分类号 TN365

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.060601

Application of Bi-Directionally Pumped Raman Amplifier in $100 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ Ultra-Long Distance Transmission System

Chi Ronghua^{1,2,3}, Yuan Yuan³, Wang Fei³, Lü Tao², Sun Xiaohan^{2*}

¹ School of Internet of Things and Software Technology, Wuxi Vocational College of Science and Technology, Wuxi, Jiangsu 214068, China;

² National Research Center for Optical Sensing/Communications Integrated Networking, Southeast University Science Park, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

³ Wuxi Taclink Optoelectronics Technology Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214068, China

Abstract An unrepeatable transmission system of $4 \times 100 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ over a span loss of 68.85 dB is realized by the bi-directionally pumped Raman amplifier (BDPRA) scheme. The optical signal to noise ratio, transmission margin, and bit error ratio of this system are tested. The power evolution of this BDPRA in the $4 \times 100 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ transmission system is simulated. The research results show that the signal input power, forward/backward Raman gain distribution and cost should be comprehensively considered in the applications of the BDPRA scheme.

Key words optical communications; unrepeatable transmission; ultra-long distance transmission system; bi-directionally pumped Raman amplifier; erbium-doped fiber amplifier

OCIS codes 060.2320; 060.2330; 060.2360; 060.4256

1 引言

超长跨距无中继光传输线路不需要中继供电,不仅可以降低光中继站的建设成本,还可以减少通信网络的维护成本,提高传输系统的可靠性和传输质量,特别适用于海底以及跨越恶劣地形等一些不

便进行供电中继的长距离通信场合,在超高压、特高压输电线路的建设和发展中有着不可替代的重要作用。超低损耗大有效面积光纤^[1-2]、超级编码技术^[3]、非线性抑制技术^[4]、高功率拉曼激光器^[5]、分布式拉曼放大器^[6-8]以及远程遥泵放大器^[9-11]等技术被广泛应用于传输系统中提高传输跨距。

收稿日期: 2018-08-13; 修回日期: 2018-09-13; 录用日期: 2018-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(61271206)、江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2015081)、2018年江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修计划

* E-mail: xhsun@seu.edu.cn

与掺铒光纤放大器(EDFA)集总式放大器相比,分布式拉曼放大器的分布式放大的特点可以有效抑制噪声功率,提高输出信号的光学信噪比(OSNR, R_{OSNR})。双向抽运拉曼放大配置方案能使信号在光纤中均匀分布,并且可以提供更好的噪声性能^[12-16]。与遥泵放大或拉曼遥泵组合放大的配置方案相比,双向抽运拉曼放大方案可以省掉遥泵系统光源模块的挂杆或减小地理的施工时间和施工费用,同时又具有相对安全可靠的特性,是一种非常理想的放大器配置解决方案。

在四川电力骨干层光传送网(OTN)传输项目菩提-洪沟段,传输实际距离为 295 km,但是光缆衰耗比较大,如果按 $0.23 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 计算,线路总衰耗值达到 67.85 dB。由于该段落线路衰耗较大,如果采用传统 EDFA 或单向抽运拉曼放大器方案,指标上无法满足系统长期稳定运行的技术要求。因此,采用双向抽运拉曼放大器以解决该骨干层 OTN 传输问题。

本文运用双向抽运拉曼放大器,实现了 $4 \times 100 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光网络传输 295 km(68.85 dB)的应用,并留有 7 dB 设计余量。同时验证了 OTN 网络在超长跨距环境下 OTN 设备多种客户业务接入、业务生存性,及系统长期稳定性和可靠性。

2 $4 \times 100 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ OTN 系统传输实验与仿真

2.1 传输系统结构

本项目中,发送端 OTU 采用 $100 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 板

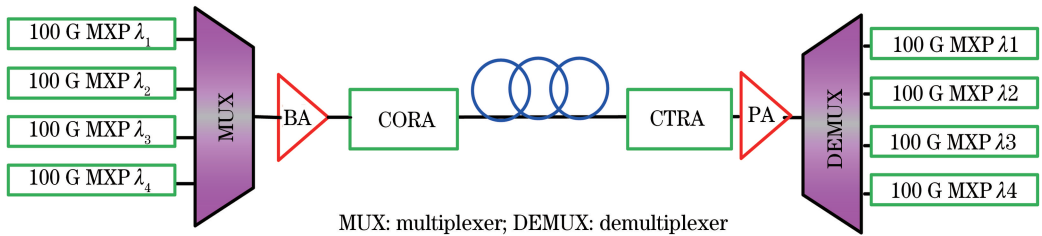


图 1 系统传输结构图

Fig. 1 Structural diagram of transmission system

2.2 单向抽运拉曼放大器和双向抽运拉曼放大器

用波长范围为 1529~1562 nm 的多波光源对单向抽运拉曼放大器和双向抽运拉曼放大器的开关增益和噪声进行测试。首先,测试只有反向拉曼放大的情形,关闭同向拉曼的抽运光而打开反向拉曼抽运光,此时反向拉曼的 3 个抽运波长 1425, 1439, 1457 nm 的功率分别为 250, 210, 450 mW, 反向拉

卡(100 G MXP), 4 个 $100 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 信号波长分别为: $\lambda_1 = 1547.32$, $\lambda_2 = 1548.11$, $\lambda_3 = 1548.91$, $\lambda_4 = 1549.72 \text{ nm}$ (100 GHz 间隔)。该板卡的编码方式为软判决编码(SD-FEC), 可以充分利用信道输出波形里的统计信息, 获得比硬判决译码更大的编码增益。软判决强大的带内前向纠错功能, 可获得的净编码增益达 11.2 dB, 从而降低了对光信噪比的要求, 增加了系统传输距离, 比硬判决纠错编码技术(HD-FEC)所能提供的净编码增益高 2 dB~3 dB。在两个局端线路一侧采用外置双向拉曼放大方式, 即发射端机房配置同向拉曼放大器(CORA), 接收端机房配置反向拉曼放大器(CTRA)。同/反向拉曼放大器的抽运波长为 1425, 1439, 1457 nm, 其相应的最大抽运功率分别为 250, 300, 500 mW。拉曼放大器中的各个激光器的抽运功率可通过上位机软件进行远程控制, 放大器控制方式包括功率控制、电流控制和增益控制 3 种方式。拉曼放大器具有安全告警保护功能, 对抽运电流、模块温度、信号功率和反射功率等参数都作了阈值设置, 能够实现软硬件双重告警保护功能。同时, 拉曼放大器具有眼保功能, 符合激光安全等级 1M。另外在局端机房还需要分别配置外置掺铒光纤放大器: 发射端配置功率放大器(BA), 接收端配置预放大器(PA), 以解决跨段传输损耗问题。EDFA 一般设置为输出功率控制模式, 输出功率在 15 dBm~27 dBm 可调。本项目系统传输结构见图 1, 设备参数如表 1 所示。

曼放大器的平均增益为 27.4 dB。反向抽运拉曼放大器和双向抽运拉曼放大器的性能比较如图 2 所示。从图 2 中可以看到, 虽然此时拉曼增益小于 30 dB, 但是噪声谱线上 1550 nm 波长附近存在凸起(图中已标注), 表明双程瑞利散射(DRS)对噪声系数(NF)存在影响, 因此, 在此增益下双程瑞利散射噪声已经不能忽略。接着, 打开同向拉曼放大器

表1 系统设备参数

Table 1 Parameters of system equipment

No.	Parameter	Value
1	Signalrate /($\text{Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$)	100
2	Span length /km	295
3	Fiber loss /dB	67.85
4	Margin /dB	1
5	Total loss /dB	68.85
8	Minimum power /dBm	-3
9	Receiver sensitivity /dBm	-11
10	Maximum BA power /dBm	27
11	Forward Raman gain /dB	7
12	Backward Raman gain /dB	25

的各个抽运激光器,并对正反向抽运功率都进行相应配置,获得与前述反向拉曼放大器相近的平均增益值27.3 dB。从图中可以看出,同单纯反向拉曼放大相比,在获得相近的平均增益的情况下,双向抽运拉曼放大器配置噪声系数更低,平均噪声系数降低2.39 dB,而且双向抽运拉曼放大情况下,噪声系数谱是平滑的,在1550 nm附近并没有凸起的小峰,说明双程瑞利散射噪声不明显,其影响可以忽略。这说明单向抽运拉曼放大器的增益一般不宜超过25 dB,超过25 dB会有比较明显的双程瑞利散射,引起信号劣化,带来传输损伤。而双向抽运拉曼放大器可以将传输系统的等效拉曼增益提高到25 dB以上而无明显的非线性效应。从反向抽运拉曼放大器和双向抽运拉曼放大器的增益和噪声的对比结果来看,双向抽运拉曼配置方案可以提供更为平坦的信号增益光谱和更低的噪声指数,预计可以在信号传输系统中获得更好的传输结果。

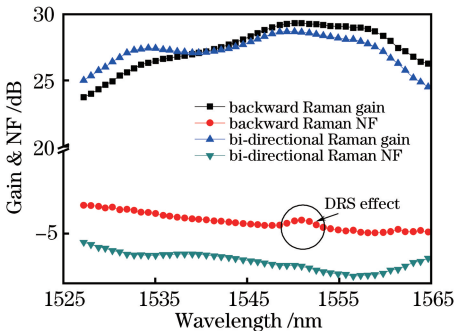


图2 反向抽运拉曼放大器和双向抽运拉曼放大器的性能比较

Fig. 2 Performance comparison between backward pumped Raman amplifier and bi-directionally pumped amplifier

2.3 系统传输结果

按照图1所示的结构图对各个设备进行连接。实验所用的同向抽运拉曼放大器及反向抽运拉曼放

大器分别位于菩提机房和洪沟机房,其抽运波长分别为1425,1439,1457 nm,每个波长的最大输出功率分别通过上位机网管设置为250,210,450 mW。

在上述传输系统中,接入100 Gbit/s板卡。为了避免光纤中的受激布里渊散射等非线性现象,BA输出功率不能过大,实验优化发射端BA输出的单波信号功率为15 dBm。启动100 Gbit·s⁻¹信号测试系统,开通4个波长的情况下,当系统实际衰减为66.5 dB时,系统传输无误码(误码指标小于10⁻¹²), $R_{\text{OSNR}} > 12.65$ dB。当线路总损耗68 dB的情况下,最多可开通4个波长,此时系统纠错前误码为10⁻⁵,系统纠错后无误码, $R_{\text{OSNR}} > 12.01$ dB。将系统在此状态下进行长期挂误码测试,测试时间大于24 h,未出现误码,故在此状态下系统能够长时间稳定运行。图3为传输损耗分别为61 dB和68 dB时系统的输出信噪比。系统传输损耗61 dB时候的信噪比大于14.5 dB,系统传输损耗68 dB时候的光信噪比大于12 dB。

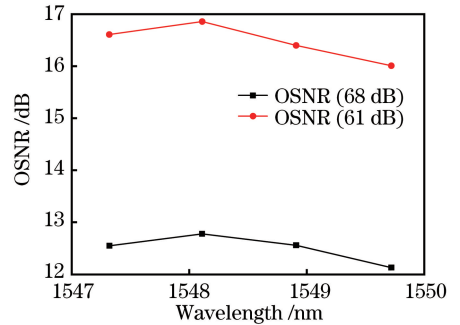


图3 传输损耗分别为61 dB和68 dB时系统的输出信噪比
Fig. 3 OSNR of system for span losses of 61 dB and 68 dB

按照上述实验参数进行系统仿真,模拟计算双向抽运的拉曼放大器的正向和反向抽运激光器的功率演化过程。抽运功率和信号功率在光纤中的分布如图4所示。图中为双向抽运拉曼放大的情况下,信号功率在光纤中的功率分布。传输信号首先经过功率放大器放大,经放大后的信号功率为15.04 dBm,与同向传输的拉曼抽运光一同导入到传输光纤中,在光纤中,信号首先被同向传播的抽运激光器放大,功率在10.65 km处达到最大。经计算,同向拉曼放大的等效增益为7.0 dB,等效入纤功率达到22.04 dBm。经过长跨距传输,信号功率不断衰减,从图中可以看到,信号功率在320 km附近已经非常小,接近-40 dBm,而后功率突然增大,这正是反向抽运的激光器的放大作用所致,其提供的信号开关增益达到25.1 dB。从仿真结果可以看出,

在无中继传输系统中,同向拉曼放大的作用是提高等效入纤功率,进而提高信号的非线性阈值,最终可以提高接收端的光信噪比。反向抽运拉曼放大器的作用是提供高增益和降低接收端信号噪声,最终提高信号接收灵敏度。同向抽运拉曼器和反向抽运拉曼器二者共同作用可以有效延长无中继系统的传输距离。

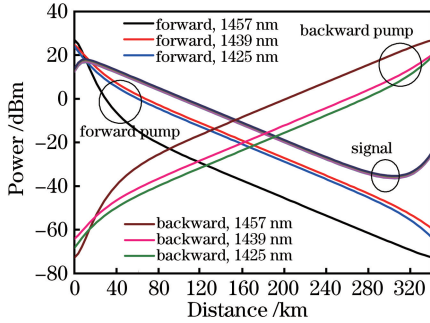


图4 抽运功率和信号功率在光纤中的分布
Fig. 4 Evolutions of pump power and signal power in fiber link

在实际工程中,运用双向抽运拉曼放大器需要综合考虑各种因素。在光纤输入端,如果信号功率过高,克尔(Kerr)非线性和受激布里渊散射(SBS)效应会引起信号失真^[4]。如果降低信号功率而增加同向拉曼的增益,光纤中过高的拉曼增益会导致反向双程瑞利散射显著积累,从而引起多路径干扰噪声(MPI)。在光纤输出端,过高的反向拉曼增益会引起高的双程瑞利散射,带来系统传输损伤,所以实际实施过程中,需要均衡考虑同向拉曼增益和反向拉曼增益从而发挥双向抽运拉曼放大的最大优势。实践表明:适当的同向拉曼增益可以有效提高光纤的等效入纤功率,使输出信号获得高的信噪比;适当的反向拉曼增益可以提供较高的小信号增益进而提高系统接收灵敏度。

表2为不同放大器配置方式下系统的性能指标及经济成本。方案A是运用EDFA加双向抽运拉曼配置方案,方案B是运用EDFA加遥泵放大配置方案,方案C是运用EDFA,同向拉曼放大加遥泵的配置方案,方案D是运用EDFA,反向拉曼放大加遥泵的配置方案。从表中可以看出,方案B遥泵放大器方案是最省钱的方案,双向抽运拉曼放大器成本次之。用户在选用放大器组合方案的时候需要多方位多角度进行考虑。实际工程运用时,综合考虑传输距离(功率预算),经济成本、激光安全、地理环境及施工条件等因素,双向抽运拉曼放大器仍然

是一种优选的方案。

表2 不同放大器配置方式下系统的性能指标及经济成本
Table 2 Performance factors and costs of system under different amplifier combination schemes

Scheme	Amplifier configuration	Power budget /dB	Cost / USD
A	BA+CORA+CTRA+PA	68.85	5200
B	BA+ROPA+PA	72	4500
C	BA+CTRA+ROPA+PA	73.5	6100
D	BA+CORA+ROPA+PA	77.5	6100

3 结 论

双向抽运拉曼放大配置方案中的同向拉曼放大器的运用可以有效降低入纤功率,同时保持较高的输出信噪比;反向拉曼放大器可以提供较高增益并有效降低噪声系数,提高系统的接收灵敏度,故双向抽运拉曼放大配置方案可以有效提升系统传输距离。运用双向抽运拉曼配置方案实现菩提-洪沟段 $4 \times 100 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的光网络传输 295 km(68.85 dB)的应用,同时系统留有 7 dB 设计余量。验证了OTN网络在超长跨距环境下,OTN设备多种客户业务接入、业务生存性,及系统长期稳定性和可靠性。系统输入端如果采用具有SBS抑制功能的发射模块^[4],可以进一步提高入纤功率,进而获得更高的输出信噪比和更远的传输距离。

参 考 文 献

- [1] Zhu B, Borel P, Carlson K, *et al.* Unrepeated transmission of 3.2 Tb/s ($32 \times 120 \text{ Gb/s}$) over 445 km fiber link[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 25(19):1863-1866.
- [2] Gainov V, Gurkin N, Lukin S, *et al.* Record 500 km unrepeated 1 Tbit/s ($10 \times 100 \text{ G}$) transmission over an ultra-low loss fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 22308-22313.
- [3] Bissessur H, Etienne S, Bousselet P, *et al.* 6 Tb/s unrepeated transmission of $60 \times 100 \text{ Gb/s}$ PDM-RZ-QPSK channels with 40 GHz spacing over 437 km[C]// European Conference and Exhibition on Optical Communications, September 16 - 20, Amsterdam, Netherlands. Washington: OSA Publishing. 2012: Mo. 1.C.3.
- [4] Chi R H, Li L E, Li X Q, *et al.* Stimulated Brillouin

- Scattering suppressed EDFA in a long-haul optical fiber link system [C] // 2015 14th International Conference on Optical Communications and Networks, July 3-5, Nanjing, China. New York: IEEE, 2015: 150-152.
- [5] Feng Y, Jiang H W, Zhang L. Advances in high power Raman fiber laser technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201005.
冯衍, 姜华卫, 张磊. 高功率拉曼光纤激光器技术研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201005.
- [6] Zhu B Y, Borel P, Carlson K, *et al.* Unrepeated transmission of 6.3 Tb/s (63×128 Gb/s) over 402-km fiber link [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(17): 1711-1714.
- [7] Chen J, Zhou Q X, Lin Y T, *et al.* Optimization design of multi-pump Raman fiber amplifiers based on artificial bee colony algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0606002.
陈静, 周清旭, 林雅婷, 等. 基于人工蜂群算法的多抽运拉曼光纤放大器优化设计[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0606002.
- [8] Long Q Y, Wu T W, Hu S M, *et al.* Threshold characteristics of forward-pumped fiber Raman amplifier [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 030603.
龙青云, 吴庭万, 胡素梅, 等. 同向抽运光纤拉曼放大器的阈值特性[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 030603.
- [9] Zhang F, Zhang W, Feng X, *et al.* Remotely pumped erbium doped fiber amplifiers using low power pump in ultra-long span dense wavelength division multiplexing systems [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(9): 1358-1362.
张帆, 张巍, 冯雪, 等. 低泵浦功率的遥泵放大在超长跨距密集波分复用系统中的应用[J]. 光子学报, 2006, 35(9): 1358-1362.
- [10] Zhu Y, Fludger C R S, Lee W S, *et al.* Experimental comparison of all-Raman vs. Raman/EDFA hybrid amplification with 40 Gb/s-based ETDM/DWDM transmissions over 400 km TW-RS fibre[C] // Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, March 17-22, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE, 2002: 552-554.
- [11] Do-il C, Wayne P, Pallavi P, *et al.* 8×120 Gb/s unrepeated transmission over 444 km (76.6 dB) using distributed Raman amplification and ROPA without discrete amplification [J]. Optics Express, 2011, 19(26): B971-B977.
- [12] Raupach S M F, Koczwara A, Grosche G, *et al.* Bi-directional optical amplifiers for long-distance fibre links[C] // European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium, July 21-25, Prague, Czech Republic. New York: IEEE, 2013: 883-884.
- [13] Yuan W G, Li Y T, Xiang M, *et al.* Research on power OTN ultra-long haul transmission scheme based on bidirectional Raman [J]. Electric Power Information Technology, 2016, 14(4): 108-111.
袁卫国, 李垠韬, 项旻, 等. 基于双向拉曼的电力超长距传输方案研究[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(4): 108-111.
- [14] Bromage J, Bouteiller J C, Thiele H J, *et al.* WDM transmission over multiple long spans with bidirectional Raman pumping [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 225-232.
- [15] Mizuochi T, Kinjo K, Kajiya S, *et al.* Bidirectional unrepeated 43 Gb/s WDM transmission with C/L band-separated Raman amplification [J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(12): 2079-2085.
- [16] Chi R H, Li X Q, Sun X H. Optimized amplification scheme in unrepeated DWDM system over 325 km G.652 fiber[C] // 2015 14th International Conference on Optical Communications and Networks, July 3-5, Nanjing, China. New York: IEEE, 2015: 1-3.
- [17] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. San Diego: Academic Press, 1989.