

doi: 10.3788/gzxb20154410.1006007

随路遥泵系统二阶泵浦方式泵浦性能分析与优化

徐健^{1,2}, 黄丽艳^{1,2}, 喻杰奎^{1,2}, 胡毅^{1,2}, 贾小铁³, 雷学义³

(1 光纤通信技术和网络国家重点实验室, 武汉 430074)

(2 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430205)

(3 国家电网公司信息通信分公司, 北京 100761)

摘 要:为了解决随路遥泵系统采用传统二阶泵浦方式时出现自激的问题,提出了基于滤波隔离技术的降低多径干扰方案和基于混合型光纤技术的降低非线性系数方案.滤波隔离技术通过将滤波隔离单元放置于光纤线路中来有效改善多径干扰现象;混合型光纤技术通过采用大的有效面积光纤和普通光纤混合结构降低非线性效应.理论分析表明减少泵浦光的多次反射可减弱多径干涉;增加光纤有效面积可以降低非线性系数.实验结果表明:采用由波分复用器和隔离器组成的滤波隔离单元,进入远程增益单元的泵浦功率可提高 1.2 dB;采用 20 km EX2000 和 80 km G.652 混合型光纤结构,进入远程增益单元的泵浦功率可提高 1 dB.该研究对降低自激影响的随路二阶泵浦的研制和应用具有一定意义.

关键词:光纤通信技术;随路遥泵系统;二阶泵浦;滤波隔离;混合型光纤;光谱;多径干扰

中图分类号:TN914

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)10-1006007-5

Analysis and Optimization of Pump Performance of ROPA System with Channel Associated Structure Using the 2nd-order Pump

XU Jian^{1,2}, HUANG Li-yan^{1,2}, YU Jie-kui^{1,2}, HU Yi^{1,2}, JIA Xiao-tie³, LEI Xue-yi³

(1 State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan 430074, China)

(2 Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

(3 State Grid Information and Telecommunication Branch, Beijing 100761, China)

Abstract: The scheme of multipath interference reduction based on filter and isolation technology and the scheme of nonlinear coefficient reduction based on hybrid-type optical fiber technology were proposed, which can overcome self-excited phenomenon of remote pumped optical amplifier system with channel associated structure using the traditional 2nd-order pump. Filter and isolation technology can improve multipath interference by placing the filter and isolation unit in the fiber lines. Hybrid structures of ordinary fiber and large effective area fiber can reduce the nonlinear effect when using hybrid-type optical fiber. Theoretical analysis draw a conclusion that multipath interference can be reduced by decreasing multiple reflections of the pump, and nonlinear coefficient can be reduced by increasing the effective area of fiber. The experimental results show that unit the pump power accessed to the remote gain unit is increased by 1.2 dB using filter and isolation unit, and 1 dB using hybrid-type fiber structure with 20 km EX2000 fiber and 80 km G.652 fiber. The research contributes to the realization and application of reducing the effects of self-excited of second-order pump with channel associated structure.

Key words: Optical fiber communication technology; Remote pumped optical amplifier system with channel associated structure; 2nd-order pump; Filter and isolator; Hybrid fiber; Optical spectrum; Multipath interference

OCIS Codes: 060.4510; 060.2330; 230.2285; 190.4370

基金项目:湖北省重大科技创新计划项目(No. 2013AAC007)资助

第一作者:徐健(1985-),男,工程师,硕士,主要研究方向为光通信系统和光器件. Email: jian_xu2@accelink.com

收稿日期:2015-03-09;录用日期:2015-07-16

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着计算机网络及新型数据传输业务的飞速发展,长距离光纤传输系统对通信容量和系统扩容的需求日益增大.超长单跨距光传输系统有别于传统通信系统,其单跨距的光缆长度一般要求几百公里,线路中间不能有任何的中继设备,因此在采用前向纠错(Forward Error Correction, FEC)技术^[1]、调制码型技术^[2]、掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)技术^[3]、喇曼光纤放大器(Raman Fiber Amplifier, RFA)技术^[4]、色散管理技术^[5-6]、新型光纤技术^[7]以及非线性效应抑制技术^[8]等常规技术之外,远程泵浦光放大器技术(Remotely Optically Pumped Amplifier, ROPA)能进一步扩大单跨距系统传输距离,目前 ROPA 技术已被用于无中继海底光缆系统,其作为无源中继器的使用也明显增加.

远程泵浦光放大器简称遥泵放大器,主要应用于超长距无中继系统中,类似线路中的小增益线路放大器,可提高系统功率预算,延长传输跨距^[9-11].在遥泵系统单跨传输链路中引入一个远程泵浦的光放大器,将掺铒光纤(Erbium Doped Fiber, EDF)与相关无源器件放置在接头盒内,接入传输光纤特定位置,泵浦源放置在终端.

为了最大限度优化遥泵系统的传输性能,本文提出了一种后向随路的遥泵系统,并且采用二阶泵浦方式产生远程泵浦光,用于提供远程增益单元的泵浦光.通过研究双泵浦光的二阶喇曼放大特性^[12],在传统随路遥泵系统的二阶泵浦方式基础上,搭建了采用隔离滤波方式和混合型光纤方式的两种二阶随路泵浦方式的系统平台,通过多组不同形式试验对输出泵浦性能进行比较,实现二阶泵浦方式输出泵浦的最优化.与传统方式相比,滤波隔离方式和混合型光纤方式均能有效提高一阶泵浦光功率和系统的功率预算.

1 随路遥泵系统结构及参量

随路遥泵系统的基本结构如图 1.发射机发送不同速率、不同类型的业务信号光,经过功率放大器(Booster Amplifier, BA)放大后进入传输光纤,通过长距离的传输光纤后,信号光进入传输链路中的远程增益单元(Remote Gain Unite, RGU).RGU 包含增益介质 EDF 和隔离器(Isolator, ISO)、波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)等无源器件.通过远程增益单元,信号光得到放大,然后经过第二段传输光纤继续传送业务信号光,在第二段传输光纤中,信号光能得到接收端远程泵浦单元(Remote Pump Unite, RPU)产生的喇曼放大.在系统接收端通过前置放大器(Preamplifier, PA)放大后,信号光进入

接收机,从而实现业务信号的超长跨距传输.

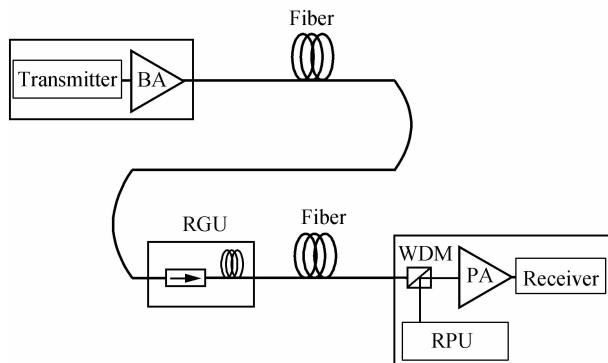


图 1 采用二阶泵浦方式的遥泵系统结构图

Fig. 1 The structure diagram of ROPA system with 2nd-order pump

通常 EDFA 设计中所用的泵浦波长为 980 nm 和 1 480 nm,依据对噪声指数及增益的要求进行选择配置.但在 ROPA 系统中,由于 980 nm 光在单模光纤中的衰减达到 1.15 dB/km^[13],而 1 480 nm 光损耗仅为 0.24 dB/km 左右,泵浦波长通常为 1 480 nm.由于第一段传输光纤较长,因此远程增益单元的输入信号光较弱,且进入 RGU 的泵浦光在 10 dBm 左右,为了能够在低泵浦功率情况下实现较大增益和较低噪声指数,选择低浓度的掺铒光纤^[14].遥泵系统中位于接收端的远程泵浦单元(Remote Pump Unite, RPU)提供高功率泵浦源,二阶遥泵系统的 RPU 输出泵浦功率通常有数瓦,为了避免因受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)和受激喇曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)引起的非线性效应和功率转移,泵浦源可采用多波长泵浦组合而成,从而最大限度地提高泵浦光使用效率.另外在石英硅光纤中喇曼增益带宽约为 40 THz,可用峰值带宽为 13.2 THz,因遥泵系统采用泵浦波长为 1 480 nm,所以二阶泵浦源的波长与一阶泵浦波长相差 13.2 THz 左右比较合适^[15].

衡量随路遥泵系统的重要性能参量是光信噪比(Optical Signal Noise Ratio, OSNR),参考 ITU-T Rec G.692 规范^[16],通过理论分析可得出单跨距系统的输出光信噪比公式为

$$\text{OSNR}_{\text{out}}(\text{dB}) = 58 + P_{\text{in}}(\text{dB}) - F_{\text{sys}}(\text{dB}) \quad (1)$$

式中 P_{in} 为信号输入光功率, F_{sys} 为系统总噪声指数,即

$$F_{\text{sys}} = \text{NF}_B + \frac{T_1 - 1}{G_B} + \frac{\text{NF} - 1}{G_B} \frac{1}{T_1} + \frac{T_2 - 1}{G_B} \frac{1}{T_1} G + \frac{\text{NF}_R - 1}{G_B} \frac{1}{T_1} G \frac{1}{T_2} + \frac{\text{NF}_P - 1}{G_B} \frac{1}{T_1} G \frac{1}{T_2} G_R \quad (2)$$

式中 G_B 为功率放大器的增益; T_1 为 RGU 前端光纤线路 L_1 的传输损耗; G 为远程增益单元的增益; T_2 为

RGU 后端光纤线路 L_2 的传输损耗; G_R 为远程泵浦单元的增益; G_P 为前置放大器的增益; NF_B 、 NF 、 NF_R 、 NF_P 分别是功率放大器、远程增益单元、远程泵浦单元和前置放大器的噪声指数. 通过式(1)、(2)计算可以得出,第二段光纤传输损耗对系统的 OSNR 影响较小,但第二段传输光纤较长时,为保证进入 RGU 足够的泵浦光已满足其增益和噪声指数, RPU 需提供较高泵浦光,但过高泵浦光会产生自激现象影响泵浦性能. 因此,有必要研究光纤中的泵浦传输特性,从而提高随路系统的 OSNR.

2 遥泵系统二阶泵浦方式实验研究

2.1 传统方式的实验装置及结果分析

采用传统二阶泵浦方式的随路遥泵系统如图 2,业务信号光和泵浦光在相同纤芯传输,接收端的远程泵浦单元包含一阶泵浦激光器和二阶泵浦激光器,二者通过波分复用器与业务信号光合分波,一阶泵浦光和二阶泵浦光由接收端发送进入第二段传输光纤,通过二阶泵浦光的线路喇曼放大,提高进入链路中远程增益单元的一阶泵浦光功率,从而有效改善进入远程增益单元信号光的增益和噪声指数特性.

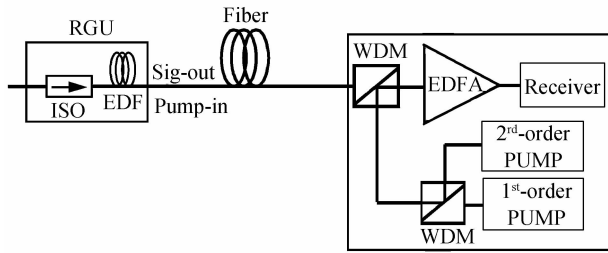


图 2 传统二阶泵浦方式的遥泵原理图

Fig. 2 The schematic diagram of ROPA with traditional 2nd-order pump

结合传统二阶泵浦方式的遥泵原理图搭建了实验平台,将 RGU 的输出端口对应的光纤端口接入到光谱分析仪中,观察经过 100 km G. 652D 光纤线路传输后的二阶泵浦光和一阶泵浦光的光谱特性. 经过 100 km

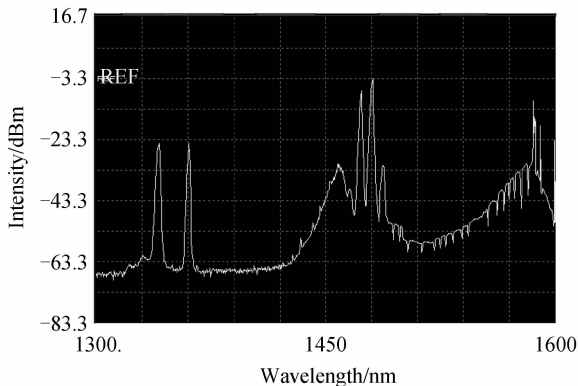


图 3 传统二阶泵浦方式的光谱图

Fig. 3 The spectrogram of traditional 2nd-order pump

G. 652D 光纤传输,二阶泵浦光可实现对一阶泵浦光的喇曼放大,同时在 1 580 nm 附近出现了自发喇曼散射光. 当一阶泵浦光功率增大至 28. 5 dBm,光纤输出端光谱出现了自激振动现象,如图 3,过高的一阶泵浦光导致 1 480 nm 和 1 580 nm 附近的光谱出现了多径干扰 (Multipath Interference, MPI).

2.2 滤波隔离方式的实验装置及结果分析

对于传统的二阶泵浦方式,当一阶泵浦光偏高时会出现自激振动现象,从而引起光谱的 MPI,引起自激的原因主要是接头之间或光纤线路中放大的一阶泵浦光会产生反射光,该反射光传输被同时放大,产生二次反射光,与一阶泵浦光同频同向,容易产生 MPI. 因此如果能阻止二次反射光的产生即可避免 MPI,在分析实验结果后提出一种提高泵浦性能的改进型方法,如图 4,在第二段传输光纤中引入一无源滤波隔离单元(图中虚线方框部分),包含第一波分复用器 WDM_1 、隔离器和第二波分复用器 WDM_2 . 信号光依次经过第一波分复用器 WDM_1 、隔离器和第二波分复用器 WDM_2 ,实现信号光的正向传输;泵浦光依次经过第二波分复用器 WDM_2 和第一波分复用器 WDM_1 ,通过旁路方式实现泵浦光的反向传输,无源滤波隔离单元放置在距离接收端 20~30 km 位置.

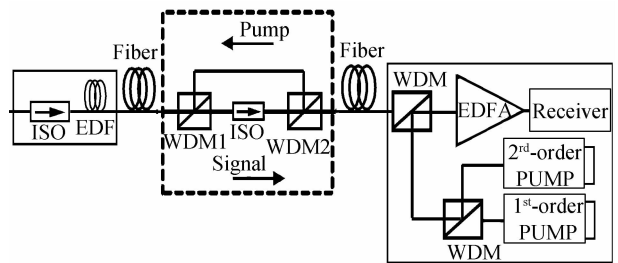


图 4 采用滤波隔离方式的二阶遥泵原理图

Fig. 4 The schematic diagram of 2nd-order ROPA with filter and isolator

在第二段光纤线路中引入滤波隔离单元后,通过观察 100 km G. 652D 光纤传输后的二阶泵浦光和一阶

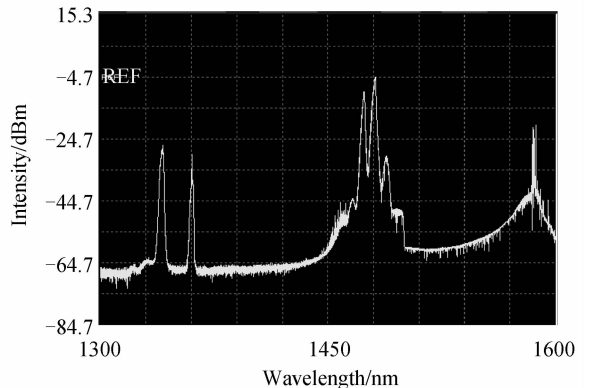


图 5 采用滤波隔离方式的二阶遥泵光谱图

Fig. 5 The spectrogram of 2nd-order ROPA with filter and isolator

泵浦光的光谱特性. 当一阶泵浦光功率增大至 30.6 dBm, 光纤输出端光谱才出现了自激振动现象, 如图 5, 过高的一阶泵浦光导致 1 480 nm 和 1 580 nm 附近的光谱出现了 MPI, 将一阶泵浦功率调至合适值后, 通过功率计测试发现, 与传统二阶泵浦方式相比, 进入 RGU 的一阶泵浦光功率提高了 1.2 dB, 线路的功率预算提高了 1 dB.

2.3 混合型光纤方式实验装置及结果分析

光在光纤中传输时会产生 SBS、SRS 等非线性效应, 非线性效应的重要参量是非线性系数 ν , 即

$$\nu = 2\pi n_2 / \lambda A_{\text{eff}} \quad (3)$$

可以看出, 光纤的有效面积决定了非线性效应的强弱, 为了避免过高一阶泵浦光与二阶泵浦光在传输光纤近端产生的非线性现象, 提出了另一种提高泵浦性能的改进型方法. 如图 6, 在第二段传输光纤中引入两种不同类型的光纤, 光纤 1 为 80 km 普通 G. 652D 光纤; 光纤 2 为具有大有效面积的 G. 654 光纤 (EX2000, $A_{\text{eff}} = 112 \mu\text{m}^2$), EX2000 光纤的长度为 20 km, 可有效降低高泵浦功率引起的自激现象和非线性效应. 两光纤采用 LC 接头连接, 其余部分均采用熔接方式连接.

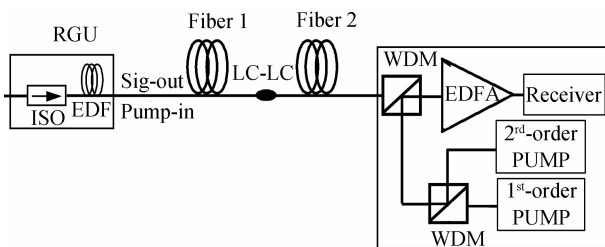


图 6 采用混合型光纤方式的二阶遥泵原理

Fig. 6 The schematic diagram of 2nd-order ROPA with hybrid fiber

在第二段光纤线路中采用两种不同有效截面积的传输光纤后, 观察 20 km EX2000 光纤和 80 km G. 652D 光纤传输后的二阶泵浦光和一阶泵浦光的光谱特性, 如图 7, 当一阶泵浦光功率增大至 30.1 dBm, 光

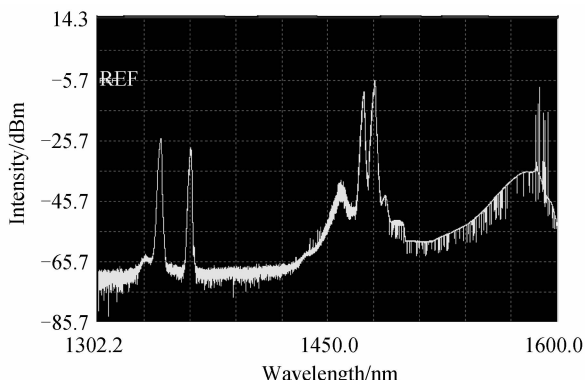


图 7 采用混合型光纤方式的二阶遥泵光谱图

Fig. 7 The spectrogram of 2nd-order ROPA with hybrid fiber

纤输出端光谱才出现了自激振动现象, 过高的一阶泵浦光导致 1 480 nm 和 1 580 nm 附近的光谱出现了 MPI, 将一阶泵浦功率调至合适值后, 通过功率计测试发现, 与传统二阶泵浦方式相比, 进入 RGU 的一阶泵浦光功率提高了 1 dB, 线路的功率预算提高了 0.7 dB.

3 结论

提出了采用滤波隔离方式和混合型光纤方式两种能够改善二阶随路遥泵系统的输出泵浦性能方法, 并对两种方法进行了实验研究和分析, 将实验结果与传统二阶泵浦随路遥泵系统进行对比, 发现这两种方法均可有效地提高进入远程增益单元的一阶泵浦光功率, 进而有效改善二阶随路遥泵系统的功率预算. 采用滤波隔离方式与传统的方式相比, RGU 的一阶泵浦光功率提高了 1.2 dB, 系统的功率预算提高了 1 dB; 采用混合型光纤方式时 RGU 的一阶泵浦光功率提高了 1 dB, 系统的功率预算提高了 0.7 dB.

参考文献

- [1] ONOHARA K, SUGIHARA T, MIYATA Y, *et al.* Soft-decision forward error correction for 100 Gb/s digital coherent systems [J]. *Optical Fiber Technology*, 2011, **17**(5): 452-455.
- [2] STEVEN S, SORIN T. Experimental study of cross-phase modulation reduction in hybrid systems with co-propagating 100G PM-QPSK and 10G OOK [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(25): 31483-31491.
- [3] HASAN S Z M, KALAVALLY V, PARTHIBAN R, *et al.* Economic and system impact of hybrid Raman-EDFA amplification in a 40 × 40Gbps optical transmission network with DPSK modulation [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(1): 10-15.
- [4] GONG Jia-min, ZUO Xu, YUAN Xin-yi, *et al.* Gain spectrum flatness in raman fiber amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1408-1413.
- [5] 巩稼民, 左旭, 袁心易, 等. 喇曼光纤放大器的增益谱平坦技术 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(12): 1408-1413.
- [6] ZHANG Hu, CHEN Jian. Investigation of residual chromatic dispersion equalizer in high-speed optical coherent communication systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 33-37.
- [7] 张虎, 陈健. 高速相干光通信系统中残留色散均衡器研究 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 33-37.
- [8] XU Meng-ran, FANG Xiao-zhi, CUI Sheng. Fast and accurate adaptive chromatic dispersion compensation method utilizing pilot tones for digital coherent single carrier systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(7): 90-94.
- [9] 徐梦然, 方晓之, 崔晟. 单载波数字相干接收系统中基于导频的自适应色散补偿技术 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(7): 90-94.
- [10] PERRIER P, FEVRIER H, XIA T J, *et al.* Unrepeated 100G transmission over 520.6 km of G. 652 fiber and 556.7 km of G. 654 fiber with commercial raman DWDM system and enhanced ROPA [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(3): 631-638.
- [11] PECHENKIN V, FAIR I J. On four-wave mixing suppression in dispersion-managed fiber-optic OFDM systems with an optical phase conjugation module [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(11): 1678-1691.

- [9] XIA T J, PETERSON D L, WELLBROCK G A, *et al.* 557-km unrepeatereed 100G transmission with commercial raman DWDM system, enhanced ROPA, and cabled large Aeff ultra-low loss fiber in OSP environment [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2014, Th5A.7:1-3.
- [10] ZHU B Y, BOREL P, CARLSON K, *et al.* Unrepeatereed transmission of 6.3 Tb/s ($63 \times 128\text{Gb/s}$) over 402-km fiber link [J]. *Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(17): 1711-1714.
- [11] DOWNIE J D, HURLEY J, ROUDAS I, *et al.* Unrepeatereed 256 Gb/s PM-16QAM transmission over up to 304 km with simple system configurations [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(9): 10256-10261.
- [12] FARALLI S, BOLOGNINI G, ANDRADE M A, *et al.* Unrepeatereed WDM transmission systems based on advanced first-order and higher order raman-copumping technology [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(11): 3519-3527.
- [13] GOVIND P A. Nonlinear fiber optics[M]. New York: U. S. Academic press, 2006:6.
- [14] BECKER P C, OLSSON N A, SIMPSON J R. Erbium doped fiber amplifiers fundamentals and technology [M]. CA: U. S. Academic press, 1999:263-265.
- [15] LCLIFFORD H, GOVIND P A. Raman amplification in fiber optical communication systems [M]. California: U. S. Academic Press , 2005:39.
- [16] ITU-T Rec. G692(10/98)Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers[S].