

文章编号: 0258-7025(2004)07-0833-05

分布拉曼光纤放大的实验研究

迟荣华¹, 吕可诚¹, 运 鹏¹, 李乙钢¹, 董孝义¹, 陈文钊², 杨光明², 刘兆兵²

(¹ 南开大学光子技术中心, 天津 300071; ² 深圳飞通光电股份有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要 采用符合 ITU-T 标准的 C-波段 40 信道波分复用(WDM)光源对分布式拉曼放大器(DRA)的特性进行了实验研究。对不同抽运方式及不同光纤长度的分布式拉曼放大器性能作了较为详细的报道。在抽运功率相同的条件下,选用 50 km 单模光纤对比研究了不同抽运方式的拉曼放大器增益和噪声。通过对不同光纤长度的分布式拉曼放大器的实验研究发现,在较低抽运功率且输入信号功率较低的情况下,随着光纤长度增加,拉曼增益也增加,有效噪声系数减小。研究了分布式拉曼放大器对波分复用通信系统信噪比的改善,实验发现不同抽运功率下,拉曼放大器对系统信噪比的改善随抽运功率增加而增加,但是不成线性关系,而且最终会出现饱和。

关键词 光电子学;分布式拉曼放大器;开关增益;等效噪声系数;光信噪比

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Experimental Study of Fiber Distributed Raman Amplifiers

CHI Rong-hua¹, LÜ Ke-cheng¹, YUN Peng¹, LI Yi-gang¹,

DONG Xiao-yi¹, CHEN Wen-zhao², YANG Guang-ming², LIU Zhao-bing²

(¹ Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China
² Photon Optoelectrical Co. LTD., Shenzhen, Guangdong 518057, China)

Abstract In this paper, the performance of distributed Raman fiber amplifiers (DRA) with 40-channel wavelength division multiplexing (WDM) signals has been investigated. And the Raman fiber amplifiers with different pumping schemes and different fiber lengths have been reported. The gain and noise figures of the Raman fiber amplifier with 50 km of G. 652 fiber have been compared at different pumping schemes. When the pump power and the signal power are not high enough, the Raman gain increases with the fiber length and the noise figure (NF) decreases with the fiber length. The optical signal to noise ration (OSNR) has also been investigated. It is found that the OSNR increases with the pump power, until saturated.

Key words optoelectronics; distributed Raman fiber amplifiers; on-off gain; equivalent noise figure; optical signal to noise ration

1 引 言

随着通信业务需求的飞速增长,对光纤传输系统的容量和无中继传输距离的要求越来越高。密集波分复用(DWDM)通信系统的速率和带宽不断提升,以 10 Gbit/s 甚至更高速率为基础的密集波分复用系统必然成为主流的光传输系统。掺铒光纤放大器(EDFA)由于其本身的局限性,已经不能完全

满足光通信系统发展的要求。掺铒光纤放大器属于集总式光纤放大器,经过掺铒光纤放大器放大后,各个信道的入纤光功率如果过高,容易引起四波混频和受激布里渊散射等非线性效应,对 10 Gbit/s 以上速率为基础的密集波分复用系统而言,会严重影响系统的性能。近年来,分布式拉曼放大器(DRA)越来越受到人们的重视^[1~3],由于 DRA 采用传输光纤作增益介质,从而避免了输入信号功率过高引起

收稿日期:2003-01-08;收到修改稿日期:2003-05-08

基金项目:国家自然科学基金(60137010)和天津市自然科学基金(013602311)资助项目。

作者简介:迟荣华(1973—),女,山东省莱阳人,南开大学博士研究生,主要从事光电子与光通信方面的研究。E-mail: chironghua@sina.com

的非线性效应^[4]。其次,掺铒光纤放大器的带宽由掺铒光纤的特性决定,C-波段和L-波段的掺铒光纤放大器带宽均在40 nm以内,不足以发挥密集波分复用系统的优势;拉曼放大器通过选择抽运波长和对抽运功率的控制,可以控制放大器带宽(超过100 nm)和增益平坦度^[5~8],而且低噪声系数分布式拉曼放大器可以有效克服四波混频等非线性效应的影响,并改善系统的光信噪比(OSNR)^[2,9]。抽运激光器技术的发展为全拉曼放大器提供了有利条件,而且其成本核算低于掺铒光纤放大器^[10]。本文采用40信道的C-波段掺铒光纤放大器信号源研究了不同抽运方式和不同光纤长度分布式拉曼放大器的性能,并且实验研究了分布式拉曼放大器对系统信噪比的改善。

2 实验装置

与掺铒光纤放大器一样,分布式拉曼放大器也有三种抽运方式:反向抽运、同向抽运和双向抽运。实验所用抽运光是波长分别为1435 nm和1455 nm

的半导体激光器(LD),半导体激光器的激励电流可以分别独立控制,最大输出功率均为250 mW。为了比较不同光纤长度的分布式拉曼放大器特性,实验中采用了10 km,25 km,50 km不同长度的标准商用单模光纤作为增益光纤。实验所用的光谱仪型号为:ANDO AQ6317B,最小分辨率为0.01 nm。

3 结果与分析

3.1 不同抽运方式对分布式拉曼放大器特性的影响

在抽运功率相同的条件下,选用50 km单模光纤对比研究了不同抽运方式的拉曼放大器增益和噪声。信号光源为符合ITU-T标准的C-波段40信道的波分复用(WDM)光源,信号波长范围为1528.513~1560.501 nm,信号输入总功率为8.0 dBm。三种抽运方式下,测得信号经过光纤的全程损耗为12.59 dBm(其中包括各个接头的连接损耗)。表1给出了三种抽运方式的抽运功率配置。表中各功率都是指入纤抽运功率。

表1 三种抽运方式抽运功率配置

Table 1 Pump power of three pumping schemes

Wavelength /nm	Co-pumping /mW	Counter-pumping /mW	Bi-direction pumping /mW	
			Co-pumping	Counter-pumping
1435	165	165	74	84
1455	180	180	90	94

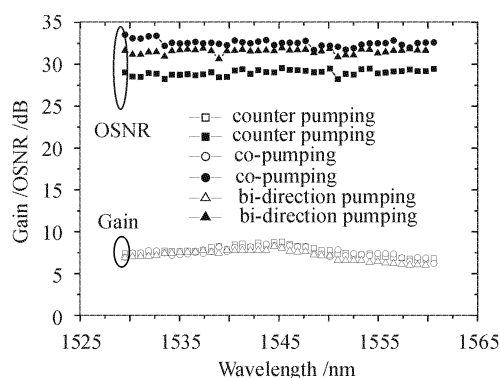


图1 不同抽运方式的增益和光信噪比曲线

Fig.1 Raman gain and OSNR of different pumping schemes with WDM signal input ($L = 50$ km)

图1给出三种抽运方式下的增益和信噪比。从图1可以看出,相同抽运功率下,三种抽运方式增益差别不大。但是从噪声特性角度看,三种抽运方式

还是有差别的:同向抽运时信噪比最好,双向抽运次之,反向抽运方式最差。这是因为,同向抽运在信号刚输入时即进行放大,使得信号功率一直处于比较高的水平,因此具有更好的信噪比,但也意味着更大的非线性。双向抽运信噪比正好介于反向抽运和同向抽运之间。长期以来,拉曼放大器通常采用反向抽运方式的原因,是受到抽运激光器水平的制约。一般情况下,对于一段标准单模光纤(SMF)构成的分布式拉曼放大器来说,同向抽运的相对强度噪声(RIN)低于 -110 dB/Hz时,对系统Q值的损伤小于0.1 dB;反向抽运时,在相同损伤的情况下对相对强度噪声的要求只有 -60 dB/Hz^[11]。如果抽运激光器的相对强度噪声比较低的话,仍然可以利用同向抽运和双向抽运以得到更好的噪声特性。目前,已有相对强度噪声 < -150 dB/Hz的大功率拉曼抽运源商品面世,使得利用双向抽运得到宽而低的噪声谱成为可能^[12,13]。随着抽运激光器技术的

进一步成熟,激光器的相对强度噪声越来越低,双向抽运甚至同向抽运由于其较好的噪声特性将会代替反向抽运方式。

实验还研究了增益和噪声随抽运功率变化的情况。采用单一信号光,其波长为 1550.1 nm,功率为 -7 dBm,光纤仍然采用 50 km 商用单模光纤,抽运光采用 1455 nm 单波长反向抽运。拉曼放大器的开关增益(on-off gain)和等效噪声系数(equivalent noise figure)随抽运功率的变化关系见图 2。从图中可以看出,小信号情况下,抽运光的消耗可以忽略时,增益随抽运功率增加呈线性增加的趋势,噪声系数随抽运功率增加呈线性减小的趋势。当抽运光功率为 220 mW 时,增益为 4.75 dB,噪声系数为 -0.27 dB,没有出现拉曼增益饱和现象。

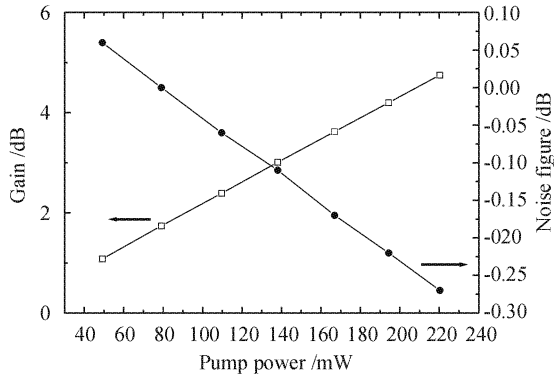


图 2 反向抽运时增益和噪声随抽运功率的变化关系
Fig. 2 Gain and effective noise figure as a function of pump power by counter-pumping scheme (L = 50 km, $P_s = -7$ dBm)

3.2 不同光纤长度对分布式拉曼放大器特性的影响

为了比较不同光纤长度的分布式拉曼放大器的性能,实验选用 10 km, 25 km 和 50 km 光纤作测试光纤。抽运方式为反向抽运。仍然采用 40 信道波分复用光源作信号源,输入信号功率为 8.0 dBm。实验测得信号光在 1550 nm 波长处 10, 25 和 50 km 光纤拉曼放大器的总损耗分别为: 3.82, 6.46 和 12.46 dB。双波长抽运的抽运功率为 165 mW (1435 nm) 和 183 mW (1455 nm) 时,不同光纤长度的拉曼放大器的增益和噪声谱如图 3 所示。由图可见,较低抽运功率而且输入信号功率较低的情况下,随着光纤长度增加,拉曼增益增加,有效噪声系数减小。一定光纤长度下,信号功率较小时,增益随抽运功率线性增加,但是抽运功率一般根据光纤长度和

增益要求而定,原则上以光纤末端抽运功率剩余得较少为宜。

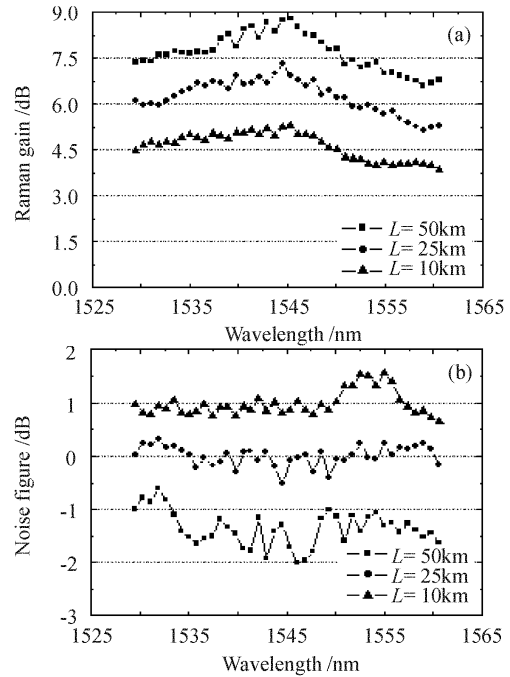


图 3 不同长度光纤拉曼放大器的增益谱(a)和噪声谱(b)

Fig. 3 Raman gain (a) and noise figure (b) spectrum of different fiber lengths by counter-pumping scheme

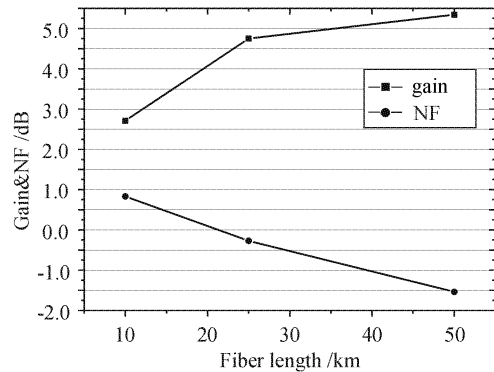


图 4 增益和噪声随光纤长度的变化
Fig. 4 Gain and NF versus fiber length ($P_p = 220$ mW, $P_s = 0$ dBm, $\lambda_s = 1550.1$ nm)

图 4 给出了单信道(1550.1 nm),输入信号功率 0 dBm,抽运功率 220 mW 时不同光纤长度对应的增益和噪声。从图 4 可以很明显看出,光纤长度增加,拉曼增益增加,有效噪声系数减小,但是并不呈线性变化。

3.3 饱和功率的研究

对于一个掺铒光纤放大器产品而言,通常只有在给定的输入信号功率附近,增益谱才能达到预期

的效果,输入信号功率高于或低于给定输入功率,都将导致增益谱的平坦性变坏。对一个分布式拉曼放大器而言,输入信号功率对增益谱影响不大,允许的输入信号功率范围一般很宽,所以通常拉曼放大器的衡量指标中并不给出输入信号功率,但是实验研究发现,拉曼放大器的输入信号功率也有一定的范围要求,输入信号功率太小,那么输出光的信噪比势必降低;而输入信号功率太大,会出现增益饱和现象。

图 5 给出 $L = 50 \text{ km}$ 光纤不同输入信号功率的增益谱。从图 5 可以看出,当输入信号功率低于 15 dBm 时,增益大小及增益谱的形状都变化不大,但是当输入功率超过 15 dBm 时,拉曼增益随着输入信号功率增加而出现增益饱和的情况。插图给出图 5 主图中某一信道 ($\lambda = 1550.1 \text{ nm}$) 功率从 -24 dBm 增加到 3.3 dBm 时,增益从 9.56 dB 下降到 7.87 dB,说明随着信号输入功率增加,超出了线性区,拉曼放大器也会出现增益饱和的情况。

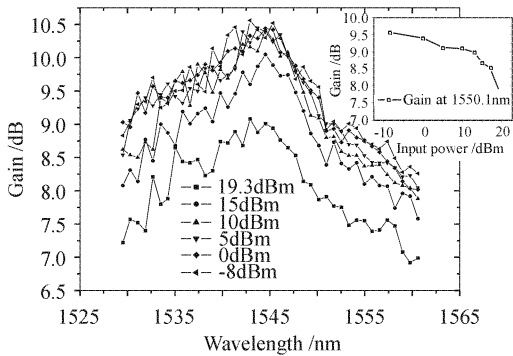


图 5 不同输入功率的增益谱(插图:1550.1 nm 信道)
Fig. 5 Gain spectrum of different input signal power (inset:1550.1 nm single channel) ($L = 50 \text{ km}$)

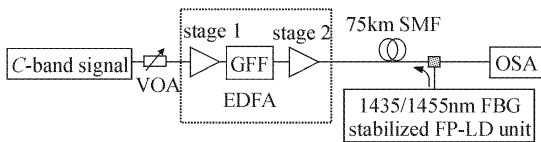


图 6 测试信噪比改善的实验装置图
Fig. 6 Experimental setup for testing OSNR improvement

3.4 分布式拉曼放大器对波分复用系统信噪比的改善

采用如图 6 所示的实验装置测试了拉曼放大器对系统信噪比的改善情况。传输光纤为 75 km 单模光纤,整个线路的传输损耗为 18.38 dB。前置放大器由两段掺铒光纤构成,两段铒光纤都采用 980

nm 半导体激光器前向抽运。为了使掺铒光纤放大器增益平坦,波分复用信号先经过可调衰减器 (VOA) 衰减至 -9 dBm。输入信号经过两级掺铒光纤放大器放大后总输出功率为 19 dBm,然后进入单模光纤,当拉曼抽运光分别打开和关闭时,用光谱仪测得有无拉曼放大器时的输出信噪比(图 7)。分布式拉曼放大器采用反向抽运方式,拉曼抽运功率为 200 mW(1435 nm)和 220 mW(1455 nm)。从图 7 可以看出,有分布式拉曼放大器较无分布式拉曼放大器时信噪比提高了近 5 dB。可见,在波分复用系统中使用分布式拉曼放大器能够明显提高信噪比,延长传输距离。

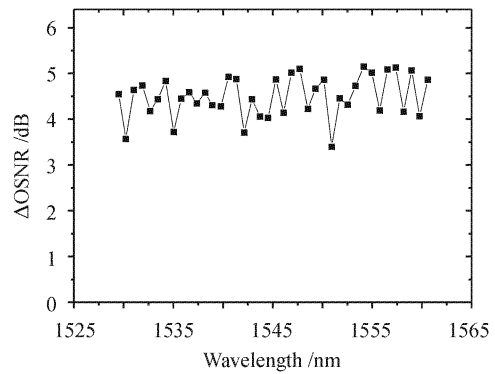


图 7 有无分布式拉曼放大器时系统信噪比的对比
Fig. 7 OSNR improvement in WDM system with DRA compared with that without DRA ($L = 75 \text{ km}, P_p = 420 \text{ mW}$)

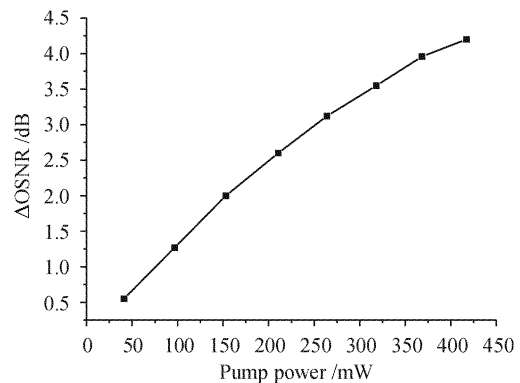


图 8 不同抽运功率下分布式拉曼放大器对系统信噪比的改善情况
Fig. 8 OSNR improvement of DRA versus pump power ($L = 75 \text{ km}$)

实验选用波长为 1550.1 nm 的单一信道研究了不同抽运功率下,拉曼放大器对系统信噪比的改善,结果如图 8 所示。实验结果表明,随着拉曼抽运功率增加,增益增加,信噪比的改善量(ΔOSNR)增

加,开始时呈线性增加趋势,随着抽运功率增加, ΔOSNR 增加速度减慢,理论预计随着抽运功率增加, ΔOSNR 最终会出现饱和^[14],但是实验中抽运功率比较低,没有观察到饱和现象。

4 结 论

实验采用 40 信道的波分复用光源作信号源对不同抽运方式和不同长度光纤的拉曼放大器的增益和噪声性能进行了较为详细的研究。在波分复用系统中,分布式拉曼放大器的使用能够提高系统信噪比,使传输跨距得以延长。

参 考 文 献

- 1 Wang Sihai, Fan Chongcheng. Analytical investigation on noise characteristics of distributed fiber Raman amplifiers under complex conditions [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(7):635~638
王四海,范崇澄. 复杂条件下分布光纤拉曼放大器噪声特性的解析表达式[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(7):635~638
- 2 Zhang Wei, Peng Jiangde, Liu Xiaoming *et al.*. Improvement of transmission performances of optical communication system by distributed fiber Raman amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):729~734
张巍,彭江得,刘小明等. 分布光纤拉曼放大器对光通信系统传输性能的改善[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):729~734
- 3 Mei Jinjie, Liu Deming, Huang Dexiu. Two novel methods for analysing multipath interference in distributed fiber Raman amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):537~540
梅进杰,刘备明,黄德修. 分布光纤拉曼放大器多路干涉的两种新分析方法[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6):537~540
- 4 H. Nakamoto, T. Tanaka, N. Shimojoh *et al.*. 1.05 Tbit/s WDM transmission over 8186 km using Distributed Raman amplifier Repeaters [C]. OFC'2001, **2**:TuF6-1~2
- 5 Y. Emori, K. Tanaka, S. Namiki. 100 nm bandwidth flat-gain Raman amplifiers pumped and gain-equalised by 12-wavelength-channel WDM laser diode unit [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(16):1355~1356
- 6 F. Boubal, E. Brandon, L. Buet *et al.*. 4.16 Tbit/s (104×40 Gbit/s) unrepeated transmission over 135 km in S+C+L bands with 104 nm total bandwidth [C]. ECOC'2001, 257
- 7 Fu Chengpeng, Yin Xinda, He Wanhui *et al.*. Relation between amplified spontaneous Raman scattering and Raman on-off gain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10):1211~1215
付成鹏,印新达,何万辉等. 拉曼放大器中放大的自发拉曼散射与拉曼开-关增益关系的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10):1211~1215
- 8 Yang Taotao, Yin Xinda, He Wanhui *et al.*. Gain spectrum of Raman fiber amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11):1336~1339
杨滔滔,印新达,何万辉等. 拉曼光纤放大器增益谱特性研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11):1336~1339
- 9 Chen Jian, Zhang Jin, Peng Jiangde *et al.*. Fiber Raman amplifier's gain coefficient and noise figure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11):1021~1023
陈健,张晋,彭江得等. 光纤拉曼放大器增益系数与噪声系数的实验研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11):1021~1023
- 10 K. Ishida, J. Abe, N. Suzuki *et al.*. 1.28 Tbit/s (64×20 Gbit/s) transmission over 4200 km with 100 km repeater spacing consisting of Raman/EDF hybrid amplifiers [C]. ECOC'2001,**3**:242~243
- 11 C. R. S. Fludger, V. Handerek, R. J. Mears. Pump to signal RIN transfer in Raman fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(8):1140~1148
- 12 S. Kado, Y. Emori, S. Namiki *et al.*. Broadband flat-noise Raman amplifier using low-noise bi-directionally pumping sources [C]. ECOC'2001, **6**:38~39
- 13 Lu Fengleng. Raman amplification in terrestrial DWDM systems [C]. *SPIE*, 2002, **4906**:61~67
- 14 Sihai Wang, Chongcheng Fan. Distributed fiber Raman amplifiers; analytical expression of noise characteristics under complex conditions [J]. *Opt. Commun.*, 20001, **198**:65~70