

基于拉曼组合放大的长距离光纤传输系统^{*}

饶云江^{1)2)†} 李 立¹⁾ 贾新鸿¹⁾ 冉曾令¹⁾ 张田虎¹⁾

1) (电子科技大学宽带光纤传输和通信网技术教育部重点实验室, 成都 610054)

2) (重庆大学光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

(2009 年 7 月 10 日收到; 2009 年 9 月 29 日收到修改稿)

本文改进了一种实现长距离自适应补偿光纤传输的方法. 在利用光纤光栅形成的谐振腔产生激光对信号光进行拉曼放大的基础上, 再利用双抽运光对信号光进行拉曼放大, 从而获得更高的拉曼增益以实现更长距离的自适应补偿光纤传输. 使实验自适应补偿传输距离达 125 km (为目前国际上已报道的最长自适应补偿光纤传输距离). 实验测量并理论分析了该长距离光纤传输系统的开关增益、放大的自发辐射噪声、噪声指数和光功率分布的特性, 实验结果与理论模型符合很好.

关键词: 光纤通信系统, 自适应补偿光纤传输, 受激拉曼放大, 光纤激光器

PACC: 4265, 4230Q

1. 引 言

随着计算机网络和数据传输业务的飞速发展, 人们对光纤通信系统的传输距离要求越来越高, 光网络对密集波分复用系统的设计也提出了新的挑战. 基于掺铒光纤放大器的波分复用技术已经成熟并在放大带宽方面逐步耗尽其潜力, C 波段约 35 nm 带宽已不能满足光通信日益发展的要求. 为了应对大容量通信系统的要求, 目前采用了扩展通信带宽的方法, 即光纤通信频带由目前的 C 波段向 L 波段甚至 U 波段扩展, 几乎覆盖整个 1200—1675 nm 波段, 这样可以更加有效地利用光纤的整个低损耗波段. 随着全波光纤的出现以及大功率抽运激光器技术的成熟, 拉曼光纤放大器由于其能够灵活控制增益带宽和增益波段而引起人们广泛的重视^[1], 并在长距离大容量传输系统中得到广泛应用^[2-6]. 为了实现长距离自适应补偿光纤传输, Ania-Castanon 等^[7,8]提出了利用光纤光栅对形成的谐振腔产生的激光作为抽运光对信号光进行拉曼放大, 在抽运光功率为 1.3 W 的条件下, 实现了 75 km 的自适应补偿光纤传输距离.

本文改进了基于拉曼组合放大的光纤光栅拉曼光纤激光器长距离传输系统, 即利用两级抽运光

产生的拉曼效应, 对信号光进行拉曼组合放大, 就是在光纤光栅对形成的谐振腔产生的激射光对信号光拉曼放大的同时, 再利用双抽运光对信号光拉曼放大, 能更有效地利用抽运光来获得更高的拉曼增益以实现更长距离自适应补偿光纤传输.

2. 拉曼组合放大

研究发现, 拉曼增益最重要的优点是它的增益功率谱依赖于抽运波长, 峰值增益处的频移约为 100 nm. 石英光纤有很宽的受激拉曼散射增益谱, 并在 13—16 THz 附近有一较宽的主峰^[9,10] (如图 1 所示). 由于拉曼效应有着相当宽的增益谱, 只要抽运光功率在受激拉曼散射的阈值以上, 就可以在很长的波长范围内为下一级信号光提供拉曼增益补偿.

本系统中, 双向抽运光的波长为 1480 nm, 一对布拉格光纤光栅的中心波长被设计在抽运的 1 级斯托克斯光附近 (1560 nm), 光栅和光纤在这个波长上形成了一个谐振腔并最终形成激光.

从增益的角度来说, 在距离抽运光 1480 nm 的 13.2—16 THz 频段内, 抽运光形成的拉曼增益有一个较宽的峰, 并且由光纤光栅对形成的谐振腔产生的 1560 nm 激射光也能对此频段内的信号光进行拉曼增益补偿. 因此我们提出对信号光进行拉曼的组

^{*} 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA01Z245) 资助的课题.

[†] E-mail: yjrao@uestc.edu.cn

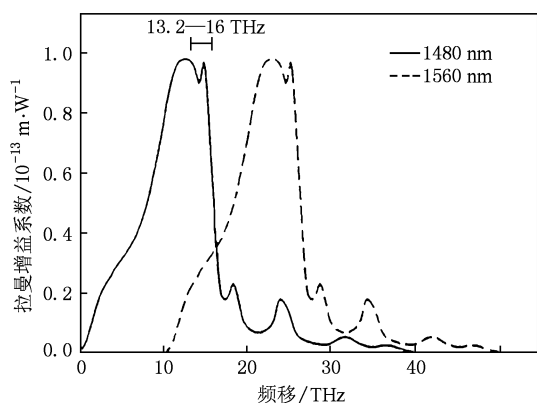


图1 两级抽运光拉曼增益系数谱

合放大,即在光纤光栅形成的谐振腔产生激光对信号光进行拉曼放大的基础上,再利用抽运光对信号光进行拉曼放大,这样将比只利用激光对信号光进行拉曼放大能更有效地利用抽运光,获得更高的拉曼增益以实现更长距离的带增益钳制的光传输。

此长距离光纤传输系统模型如下^[5,11]:

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_p^\pm}{dz} = & -\alpha_p P_p^\pm + \varepsilon_p P_p^\mp \\ & - \sum_{\mu=1,s} \frac{\nu_p}{\nu_\mu} g_R(p,\mu) P_p^\pm [P_\mu^+ + P_\mu^-] \\ & - \sum_{\mu=1,s} \frac{\nu_p}{\nu_\mu} g_R(p,\mu) P_p^\pm 4h\nu_\mu \Delta\nu_\mu \\ & \times [1 + \Theta(\nu_p - \nu_\mu, T)], \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_l^\pm}{dz} = & -\alpha_l P_l^\pm + \varepsilon_l P_l^\mp + g_R(p,l) P_l^\pm [P_p^+ + P_p^-] \\ & + g_R(p,l) [P_p^+ + P_p^-] 2h\nu_l \Delta\nu_l \\ & \times [1 + \Theta(\nu_p - \nu_l, T)] \\ & - \frac{\nu_l}{\nu_s} g_R(l,s) P_l^\pm \times [P_s^+ + P_s^-] \\ & - \frac{\nu_l}{\nu_s} g_R(l,s) P_l^\pm 4h\nu_s \Delta\nu_s \\ & \times [1 + \Theta(\nu_l - \nu_s, T)], \end{aligned} \quad (2)$$

式中的上标+和-分别指前向和后向。

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_s^\pm}{dz} = & -\alpha_s P_s^\pm + \varepsilon_s P_s^\mp \\ & + \sum_{\mu=p,l} g_R(\mu,s) P_s^\pm [P_\mu^+ + P_\mu^-] \\ & + \sum_{\mu=p,l} g_R(\mu,s) [P_\mu^+ + P_\mu^-] 2h\nu_s \Delta\nu_s \\ & \times [1 + \Theta(\nu_\mu - \nu_s, T)], \end{aligned} \quad (3)$$

式中下标的 p, l 和 s 分别指抽运光、激光光和信号光, α_μ ($\mu = p, l, s$) 分别是光纤在抽运光、激光光和信号光波长处的损耗, P_μ 和 ν_μ 分别指光功率和频率, ε_μ 是瑞利后向散射系数, $g_R(i, j)$ 分别是抽运光频率处 ν_j 和激光光 ν_i 的拉曼增益系数, h 是普朗克常数, T 是温度, k 是玻尔兹曼常数, $\Theta(\nu_i - \nu_j, T)$ 是指在热平衡温度 T 的条件下声子集居占有数的平均值。

抽运光、激光光和信号光的边界条件由下式给出:

$$P_p^+(0) = \beta P_{p,in}, \quad P_p^-(L) = (1 - \beta) P_{p,in}, \quad (4a)$$

$$P_l^+(0) = R_{eff} P_l^-(0), \quad P_l^-(L) = R_{eff} P_l^+(0), \quad (4b)$$

$$P_s^+(0) = P_{s,in}, \quad P_s^-(L) = 0, \quad (4c)$$

式中 R_{eff} 是光纤光栅的反射率, L 是光纤长度, β 是抽运光的前向功率所占的比率, P_{iin} ($i = p, s$) 分别是输入的抽运光和信号光功率。

我们采用 Matlab 软件, 利用迭代法计算光功率的空间分布. 具体步骤如下: 首先假定后向波的光功率为 0, 利用龙格-库塔法对 (1) — (3) 式积分, 得出前向波的初始近似空间分布; 然后由边界条件 (4a) — (4c) 式计算 $z = L$ 处的后向波功率; 以当前得出的前、后向波近似功率为基础, 重新对 (1) — (3) 式积分, 得出新的光功率近似分布. 重复以上步骤, 经过若干次迭代, 即可得出稳定的光功率分布。

3. 实验系统装置

实验系统装置如图 2 所示. 两个功率和波长相同的抽运光源 (Keypsys-OI-RFL-1480-20FA) 的中心波长为 1480 nm, 一对布拉格光栅 (FBG) 的中心波长被设置在 1560 nm, 反射率为 93%. 增益介质为 G652 标准单模光纤 (SMF-28), 在 1600 nm 附近的损耗系数约为 0.2 dB/km. 信号源为波长可调谐的光纤激光器 (Agilent-81642A), 信号光与抽运光经过波分复用器 (WDM) 一起进入光纤, 通过放置在末端的光谱仪 (ANDO-AQ6317B, 分辨率为 0.01 nm, 光谱范围为 870—1670 nm) 来测量系统的开关增益、自发辐射噪声和噪声指数。

而光纤长度上的信号光功率分布由图 3 的装置测得. 可调激光器发出的连续光经过声光调制器调制后进入系统, 其后向瑞利散射光经过滤波器滤波后进入示波器, 后向的瑞利散射光通过示波器测得。

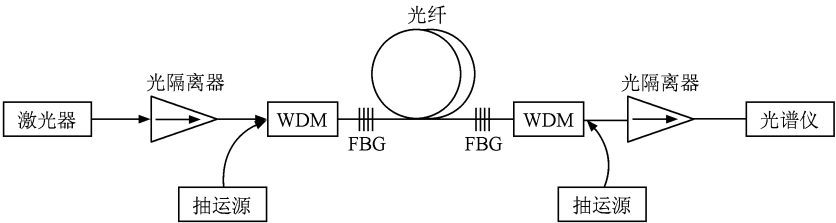


图2 传输系统装置图

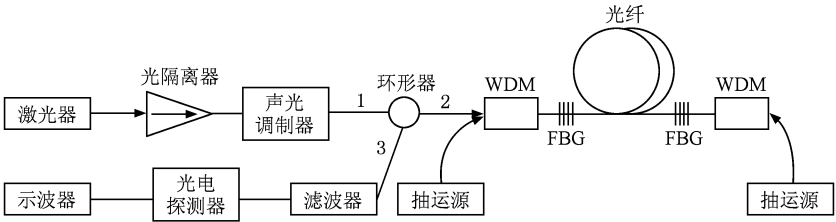


图3 信号光功率分布测试图

4. 实验结果及分析

传输系统的开关增益、自发辐射噪声测量结果如图4所示. 从图4(c)可以看出在抽运光功率为

1.38 W,输入信号光功率为 - 4 dBm 的条件下, 1602 nm处的信号光损耗被完全补偿. 图4 (a) 和 (b) 分别是光纤长度 $L = 100$ km 时系统开关增益和自发辐射噪声的理论和实验结果的比较,实线是理论仿真结果,点线是实验结果,其中 R_0 为光纤光栅

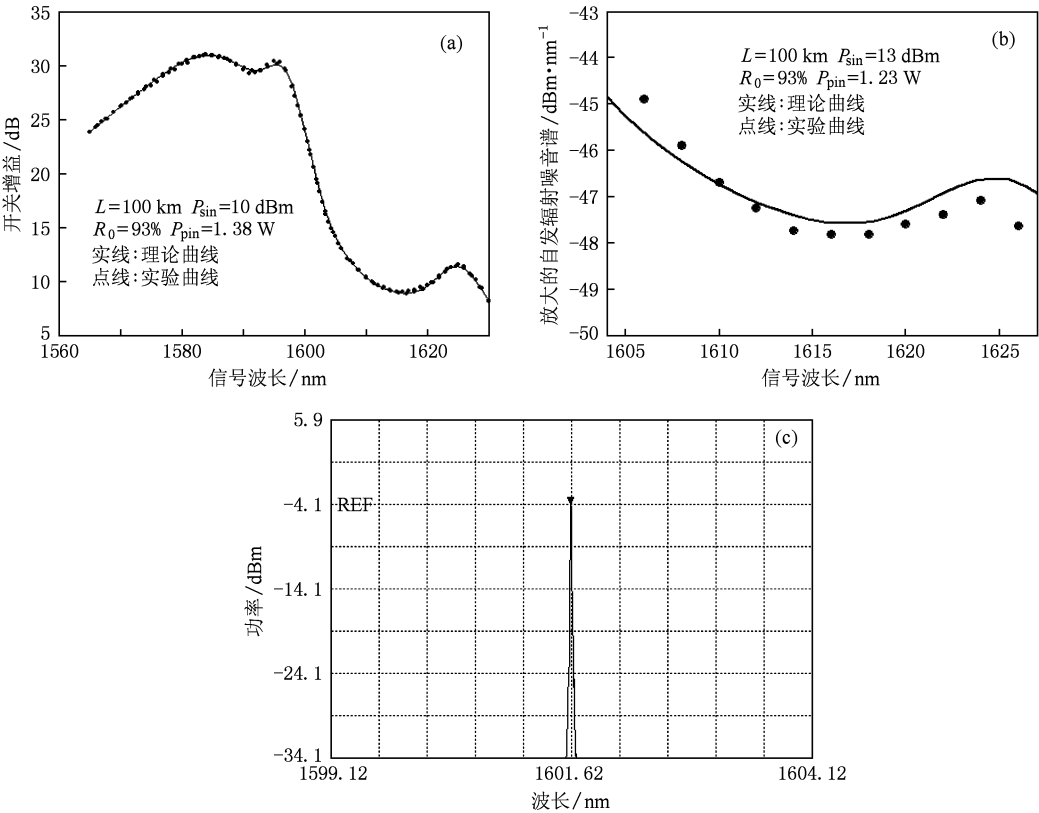
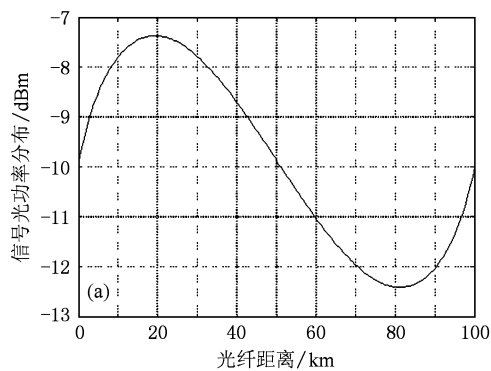


图4 传输系统的开关增益和自发辐射噪声测量结果 (a)拉曼开关增益谱,(b)自发辐射噪声谱,(c)125 km 时系统输出功率谱

的反射率, P_{sin} 为信号光输入功率, P_{pin} 为抽运光输入功率. 可以看出系统的自发噪声比较低, 最大的开关增益出现在一阶斯托克斯光的峰值 1585 nm 处, 约为 31 dB. 从图 4(c) 可以看出, 在抽运光功率为 1.38 W 的条件下, 实现了该系统在 1602 nm 处 125 km 的自适应补偿传输, 为目前国际上报道的最长自适应补偿光纤传输距离.



按照图 3 的设置, 当信号光波长为 1600 nm, 抽运光功率为 1.38 W 时, 对 100 km 光纤长度上的信号光功率分布曲线进行了仿真及实验测试, 结果如图 5 所示.

图 5(b) 中实线为实验结果, 虚线为趋势线. 可以看出实验结果与理论模型符合. 信号光功率在整个光纤长度上的最高处和最低处相差约 5 dB.

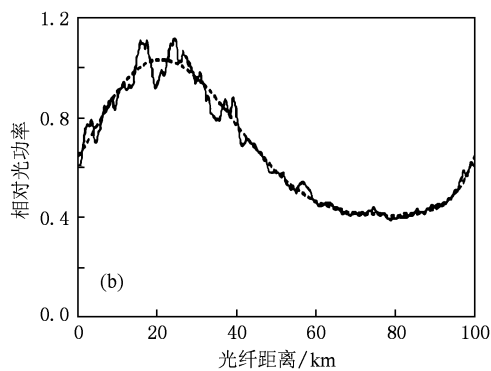


图 5 100 km 光纤长度上光功率分布图 (a) 理论模拟, (b) 实验结果

通过 Agilent 公司的 86140 光谱仪, 测得 100 km 此系统在输入信号光功率为 -10 dBm, 抽运光功率为 1.38 W 时的噪声指数为 18.364 dB, 因为整段光纤加上连接头的损耗约为 20 dB, 因此系统等效的噪声指数为 -1.636 dB, 对于拉曼放大器来说, 这个噪声指数属于正常范围内.

为了更深入地考察基于拉曼组合放大的光纤传输系统性能, 我们进行了眼图测试. 图 6 所示为传输速率为 1 Gbit/s 时信号源及经放大后的眼图. 其中输入功率为 -13 dBm, 抽运功率为 1.38 W. 可以看出, 信号波形无明显畸变, 说明基于拉曼组合放大的长距离光纤传输系统有较好的传输质量.

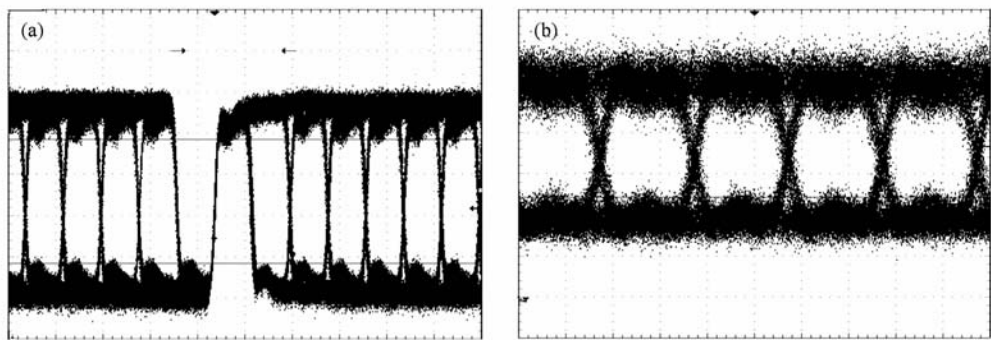


图 6 1 Gbit/s 的信号源和经拉曼组合放大后的眼图 (a) 信号源, (b) 放大后的眼图

在密集波分复用(DWDM)系统中, 过高的输入光功率以及光功率的波动等将对系统造成不良影响; 这种不良影响可以通过增益控制来消除, 其中光自动增益控制技术是通过谐振腔产生激光, 通过激光的自动调节作用来维持增益的稳定. 此系统由于引入了由光纤光栅对形成的谐振腔, 因此具有增益控制的功能; 并且在我们的系统中, 信号光在光

纤长度上比较平坦的分布使得可以用较低的输入光功率实现长距离的光纤传输.

5. 结 论

本文改进了基于拉曼组合放大的长距离光纤传输系统, 从理论和实验两方面对其进行了研究,

实验测得的系统增益、自发辐射噪声及光功率分布曲线的结果与理论模型符合得很好. 实验实现了该系统在 1602 nm 处 125 km 的自适应补偿光传输, 为目前国际上报道的最长自适应补偿光纤传输距离.

该系统较低的噪声、比较平坦的光功率分布和自带的增益控制功能对长距离光纤通信的研究具有重要意义.

- [1] Islam M N 2002 *IEEE J. Select Topics Quantum Electron* **8** 548
- [2] Gupta G C, Wang L L, Mizuhara O 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 996
- [3] Rasmussen C, Fjelde T, Bennike J 2004 *Lightwave Technol.* **22** 203
- [4] Ma Y H, Xie S Z, Chen M H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 123 (in Chinese) [马永红、谢世钟、陈明华 2005 物理学报 **54** 123]
- [5] Tong Z, Wei H, Jian S S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1873 (in Chinese) [童 治、魏 淮、简水生 2006 物理学报 **55** 1873]
- [6] Yun P, Chi R H, Li Y G, Lü K C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4229 (in Chinese) [运 鹏、迟荣华、李乙钢、吕可诚 2004 物理学报 **53** 4229]
- [7] Ania-Castanon J D, Ellingham T J, Ibbotson R, Chen X 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 023902
- [8] Ania-Castanon J D 2004 *Opt. Express* **12** 4372
- [9] Stolen R H, Ippen E P 1973 *Appl. Phys. Lett.* **22** 276
- [10] Stolen R H, Clinton L, Jain R K 1984 *J. Opt. Soc. Am. B* **1** 652
- [11] Rao Y J, Jia X H, Li L, Ran Z L 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 7

Long-distance optical fiber transmission system based on hybrid Raman amplification *

Rao Yun-Jiang^{1)2)†} Li Li¹⁾ Jia Xin-Hong¹⁾ Ran Zeng-Ling¹⁾ Zhang Tian-Hu¹⁾

1) (Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks of Ministry of Education, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

2) (Key Laboratory of Opto-Electronic Technology & Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(Received 10 July 2009; revised manuscript received 29 September 2009)

Abstract

A novel modified method for realizing long-distance self-adaptive compensation optical fiber transmission is proposed. Based on the hybrid Raman amplification achieved by combining the original bi-directional Raman pump with a second Raman amplification generated by a fiber laser formed by a fiber Bragg grating pair with high reflectivity, the signal light is amplified effectively and the longest self-adaptive compensation optical fiber transmission distance of 125 km is achieved in experiment for the first time, to the best of our knowledge. In addition, the ON/OFF gain, amplified spontaneous emission noise, noise figure and the signal power distribution characteristics of the system are studied experimentally and theoretically. The experimental results are in good agreement with the theoretical analysis.

Keywords: optical fiber communication, self-adaptive compensation optical fiber transmission, stimulated Raman amplification, optical fiber laser

PACC: 4265, 4230Q

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA01Z245).

† E-mail: yjrao@uestc.edu.cn