

文章编号: 1001-3806(2017)02-0265-05

基于混合抽运喇曼放大的准无损传输系统研究

苏渤力

(防灾科技学院 防灾仪器系, 北京 101601)

摘要: 为了实现信号光在光纤链路上的准无损传输, 采用在光纤两端对称注入 1 阶和 2 阶喇曼抽运的高阶喇曼放大方法, 对该结构下的光纤准无损传输系统建立了理论仿真模型, 并对该系统进行了仿真优化, 研究了在不同的 1 阶和 2 阶抽运功率组合方案下, 系统总功率消耗和信号沿光纤功率平坦度的变化, 以及信号光功率和光纤长度对系统性能指标的影响。结果表明, 采用过高功率(大于 1mW)的入射信号光, 会恶化系统整体性能; 当光纤的长度过长时(大于 60km), 系统的平坦度指标恶化明显。采用该方案能够实现 60km 的准无损传输, 并且可以通过系统所需能耗和信号平坦度的实际需求, 设计出不同的抽运功率组合方案。

关键词: 光通信; 无损传输; 光放大; 高阶喇曼放大

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.02.024

Investigation on quasi-lossless transmission system based on hybrid pumping Raman amplification

SU Boli

(Department of Disaster Prevention Apparatus, Institute of Disaster Prevention, Beijing 101601, China)

Abstract: In order to realize quasi lossless transmission of signal light on optical fiber link, by using high-order Raman amplification method of injecting the first order and the second order Raman pumping into both ends of fiber symmetrically, the numerical model of fiber optical quasi-lossless transmission system was built and the optimization of the system was carried out. The total power consumption and signal power variation with different pump power combinations of the first order and the second order Raman pump were investigated. The influence of signal power and fiber length on system performance index was studied. The results indicate that, system performance will be worse when signal power is higher than 1mW. And system flatness will be worse obviously when fiber length is longer than 60km. Quasi-lossless transmission can be realized along 60km fiber by utilizing this scheme and different pumping power combination schemes can be designed according to the actual demand of energy consumption and signal flatness.

Key words: optical communication; lossless transmission; optical amplification; high-order Raman amplification

引言

光纤通信在几十年来得到迅猛发展, 成为了信息传输的重要手段。随着光纤制备工艺的提升、波分复用技术、光放大以及光编码等多方面的技术突破, 光纤通信已实现超过 10000km 的超长链路 10Tbit/s 的传输容量^[1]。作为光放大技术中的一种, 分布式喇曼放大在近些年来得到了广泛的研究, 并被大量应用于长距离光传输系统中^[2-3]。分布式喇曼放大器基于光纤中的受激喇曼散射(stimulated Raman scattering, SRS), 以传输光纤作为增益介质, 可以通过合适的抽

运选择提供任意波段的光放大^[4], 通过多波长抽运实现超宽带平坦增益^[5-6], 并且其噪声指数(noise figure, NF)及非线性损伤更低^[7], 是实现超长跨距光传输的重要手段之一。此外, 随着高功率抽运激光器的技术提高, 高阶喇曼放大也逐渐普及^[8-12]。

准无损传输, 即信号光在光纤每一点得到的增益和光纤损耗相近, 信号光在光纤传输时功率波动很小。研究表明, 在相同的非线性影响下, 信号光的功率分布更均匀, 系统能获得更为优良的光信噪比(optical signal-to-noise ratio, OSNR)性能^[13]。利用对称抽运的喇曼放大可以实现准无损光纤传输系统。英国阿斯顿大学 ANIA-CASTAÑÓN 等人率先提出了一种基于超长距离光纤激光器喇曼放大的准无损传输系统^[14-15], 其采用对称注入的 1365nm 抽运源, 在光纤两端熔接一对 1455nm 的光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating,

作者简介: 苏渤力(1989-), 女, 硕士, 助教, 主要研究领域为光纤通信技术、光放大技术、光电检测技术。

E-mail: bolisue@foxmail.com

收稿日期: 2016-03-09; 收到修改稿日期: 2016-04-07

FBG),从而形成分布于光纤中的 1455nm 激光,该激光进而可作为 1550nm 信号光的 2 阶分布式抽运,可有效控制信号光沿光纤的增益起伏。实验中取得了 75km 光纤链路上信号起伏 1.35dB 的准无损传输,抽运总功率为 1322mW,但该方案需要特殊波长的 FBG。JIA 等人提出并数值仿真了一种基于超长喇曼激光器的 3 阶喇曼放大光纤准无损传输系统,可进一步地延伸传输距离,降低信号光功率波动^[16]。

本文中研究了一种在光纤两端对称注入 1 阶和 2 阶抽运以实现信号准无损传输的方案。在该结构下,可以通过对 1 阶和 2 阶抽运功率的不同组合,实现对系统所需总功率和信号平坦度的调控,从而满足不同系统设计的实际要求。此外,研究结果表明,该结构下,注入信号光功率不宜过大,光纤长度不应过长,否则会导致系统性能恶化,可为准无损光传输系统的实际设计提供有益的参考。

1 仿真模型的建立

基于高阶喇曼放大的准无损光传输系统示意图如图 1 所示。信号光为 1550nm,对应的 1 阶和 2 阶喇曼抽运的波长分别为 1455nm 和 1365nm,抽运从光纤两端通过波分复用器(wavelength division multiplexing, WDM)对称注入长光纤中,信号光从光纤一端注入,经过长光纤内的分布式喇曼放大后从光纤另一端输出。

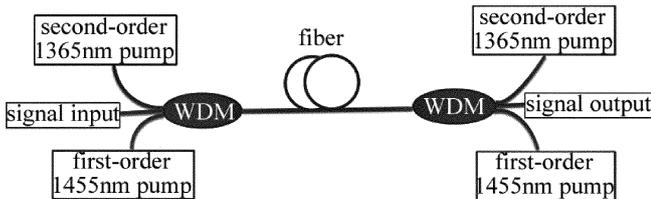


Fig. 1 Schematic of quasi-lossless optical transmission system based on high-order Raman amplification

采用如图 1 所示的稳态光传输方程对该系统的抽运光及信号光的功率分布特性进行数值仿真分析,模型中考虑了光纤损耗、喇曼增益、瑞利散射、自发喇曼散射噪声项的作用。

$$\frac{dP_2^\pm}{dz} = \mp \alpha_2 P_2^\pm \mp$$

$$g_2 \frac{f_2}{f_1} P_2^\pm (P_1^+ + P_1^- + \Gamma_1) \pm \varepsilon_2 P_2^\mp \quad (1)$$

$$\frac{dP_1^\pm}{dz} = \mp \alpha_1 P_1^\pm \pm g_2 (P_1^\pm + 0.5\Gamma_1) (P_2^+ + P_2^-) \mp$$

$$g_1 \frac{f_1}{f_0} P_1^\pm P_0 \pm \varepsilon_1 P_1^\mp \quad (2)$$

$$\frac{dP_0}{dz} = -\alpha_0 P_0 + g_1 P_0 (P_1^+ + P_1^-) \quad (3)$$

$$\Gamma_i =$$

$$4hf_i \Delta f_i \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[h(f_{i-1} - f_i)/(K_B T)] - 1} \right\} \quad (4)$$

式中,下标 i 取 2,1,0 时分别对应 2 阶抽运、1 阶抽运和信号光;上标 + 和 - 表示前向波和后向波; P_2 和 P_1 分别表示 2 阶抽运光功率和 1 阶抽运光功率, P_0 代表信号光功率; z 表示光传输方向坐标; f_2 和 f_1 分别表示 2 阶抽运光频率和 1 阶抽运光频率, f_0 表示信号光频率; Γ_i 表示光子数; $\Delta f_i = \Delta f_0 = 0.25\text{THz}$ 表示辐射带宽; $T = 298\text{K}$ 表示绝对温度; K_B 表示玻尔兹曼常数; h 表示普朗克常量; α_2, α_1 和 α_0 分别表示 2 阶抽运、1 阶抽运和信号光的光纤损耗; g_2 为 1365nm 光 2 阶抽运对 1455nm 光 1 阶抽运的喇曼增益系数, g_1 为 1455nm 光 1 阶抽运对 1550nm 信号光的喇曼增益系数; $\varepsilon_2, \varepsilon_1$ 和 ε_0 分别表示 2 阶抽运、1 阶抽运和信号光的瑞利后向散射系数。仿真时,采用如下边界条件: $P_{0,1,2}^+(0) = P_{in}^+, P_{0,1,2}^-(L) = P_{in}^-$,其中 P_{in}^+ 为光纤前端注入的抽运光和信号光功率, P_{in}^- 为光纤尾端注入的抽运光功率,通过迭代法对上述方程求数值解。仿真中所采用的参量如表 1 所示^[17]。

Table 1 Parameters used in simulation

wavelength/nm	$\alpha/(\text{dB} \cdot \text{km}^{-1})$	$\varepsilon/\text{km}^{-1}$	$g/(\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$
1365	0.38	1×10^{-4}	0.53
1455	0.27	6×10^{-5}	0.43
1550	0.2	4.5×10^{-5}	—

2 仿真结果及讨论

在仿真中,选定光纤长度为 60km,信号光的输入功率为 1mW。通过选定合适的 1 阶和 2 阶抽运功率,使得信号光在光纤中实现透明传输(即信号光输出功率等于输入功率)。图 2 为单端 1 阶抽运(1455nm)功率为 0.0228W、单端 2 阶抽运(1365nm)功率为 0.728W 时,1 阶、2 阶抽运以及信号光在光纤中的功率分布情况。可以看出,1365nm 抽运光沿光纤的功率分布波动较大,在光纤两端(即抽运注入端)功率最大,之后其功率由于光纤损耗和对 1455nm 光喇曼放大引起的抽运消耗而逐渐减小,在光纤中部为最低值。对于 1455nm 光 1 阶抽运而言,其从光纤两端注入后,前向(和信号光同向)和后向传输的 1455nm 抽运光均能在光纤两端受到 1365nm 抽运光的喇曼放大作用。可以看出,相比于 1365nm 抽运光,在喇曼放大的作用下,1455nm 抽运光的功率更深入于光纤内部,功率分布更为平坦,其功率波动值为 1.1dB。经过 1 阶喇曼放大后的 1455nm 抽运光作为 1550nm 信号光的直接抽运源,为信号光提供喇曼增益。由图 2 看出,相比于

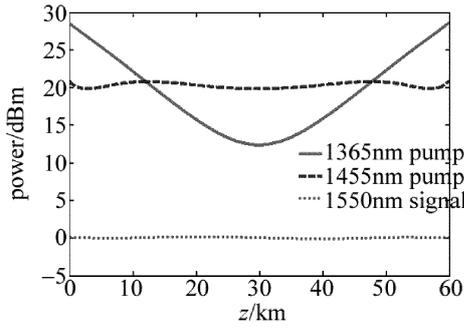


Fig. 2 Distribution of pump power and signal power vs. fiber length

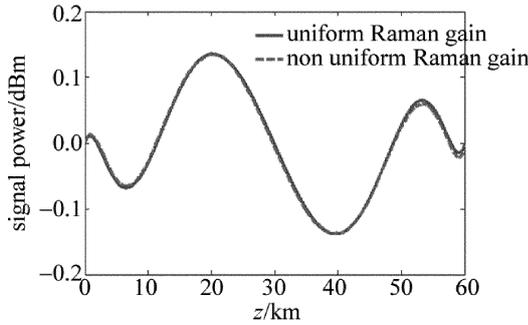


Fig. 3 Magnification of relationship between signal power and fiber length
 抽运光, 信号光在 60km 光纤链路上的功率分布十分平坦, 可见, 喇曼增益随光纤的波动随着喇曼放大的阶数的升高而减小。图 3 是 1550nm 信号光功率分布的放大图, 可以读出信号光在 60km 光纤链路上的功率波动值仅为 0.27dB。在上述仿真中, 对喇曼增益的取值沿光纤为一个统一值, 而在实际应用中, 所用光纤由于掺杂浓度和纤芯直径沿径向的不均匀会导致喇曼增益系数沿光纤长度的不均匀性, 因此进一步在仿真中将光纤长度上不同点的喇曼增益系数设为表 1 中数值的正负 10% 内随机分布, 得到的 1550nm 信号光的功率分布如图 3 中的虚线所示。可以看出, 考虑到喇曼增益系数沿光纤的不均匀性后, 1550nm 信号光的功率分布和之前的仿真结果基本一致。在下面的仿真中, 对光纤参量的设定均为表 1 中的固定值。

在实际无损光传输系统设计时, 需要综合考虑系统消耗抽运总功率和信号沿光纤的功率波动值。因此, 通过改变 1 阶和 2 阶抽运的功率, 研究不同的抽运功率组合对系统功率消耗和信号平坦度的影响。表 2 中列出了当单端 1365nm 抽运分别为 0W, 0.2W, 0.4W, 0.6W 和 0.8W 时, 实现 60km 透明传输时单端 1455nm 抽运的功率值。可以看出, 增加 1365nm 抽运的功率值, 所需 1455nm 抽运功率值下降。图 4 反映了系统所需总光功率值和信号光功率波动值随混合抽运中 1365nm 抽运功率值的变化。随着 1365nm 抽运的功率值的增加, 为实现信号光透明传输, 所需的总功率(即两端的 1365nm 和 1455nm 抽运功率之和)提升, 但信号光功率沿光纤的波动逐渐减小。可以看出, 当

Table 2 System parameters with different pump power combinations

power(1365nm)/W	0	0.2	0.4	0.6	0.8
power(1455nm)/W	0.207	0.126	0.0685	0.0349	0.0182
ratio(1365nm)/%	0	61.3	85.4	94.5	97.8

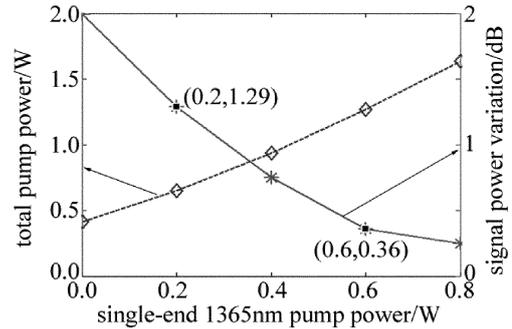


Fig. 4 Total pump power and signal power variation as a function of single-end 1365nm pump power

1365nm 抽运光功率为 0W 时, 对应于 1 阶喇曼放大, 此时所需总功率值最小(0.414W), 而信号光的功率波动值最大, 为 1.99dB。随着 1365nm 抽运光功率的增加, 2 阶喇曼放大的作用愈发显著, 信号光的功率波动也逐渐减小, 并在 1365nm 抽运光功率为 0.8W 时能达到 0.3dB 以下(0.25dB), 实现了很好的无损传输效果。但与此同时, 随着 1365nm 抽运光功率的提升, 系统实现透明光传输时所需要的抽运总功率值也线性增长。因此, 在实际无损传输系统设计中, 需要针对系统对抽运功率的承受情况以及所要求的信号平坦度权衡考虑, 设计 1365nm 光 2 阶抽运和 1455nm 光 1 阶抽运的功率比例分配。

为了进一步研究信号平坦度随 1365nm 光抽运功

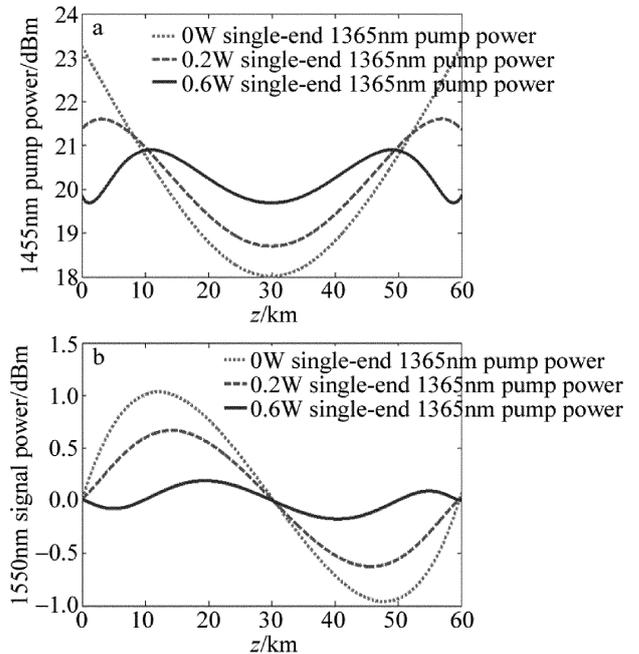


Fig. 5 Pump power and signal power distribution vs. fiber length with different pump combinations
 a—1455nm pump b—1550nm signal

率的变化,考察在不同抽运组合下 1455nm 抽运光和 1550nm 信号光沿光纤的功率分布,如图 5 所示。可以看出,随着混合抽运中 1365nm 抽运功率的增加,为达到信号透明传输,从光纤两端注入的 1455nm 抽运功率可以变小,1455nm 抽运光沿光纤功率分布更深入于光纤内部,功率平坦度也更好。而 1455nm 抽运光是信号光的直接喇曼放大源,因此,从图 5b 可以得出,随着混合抽运中 1365nm 抽运光功率的增加,1455nm 抽运光的功率分布变化导致信号光的功率分布更为平坦,信号的功率分布更趋近于无损传输。

接下来仿真了信号光功率对系统所需抽运功率和信号沿光纤功率平坦度的影响,光纤长度为 60km,结果如图 6 所示。仿真中固定单端 1455nm 抽运光功率为 0.0228W,改变信号光功率,计算能使信号透明传输的 1365nm 抽运光功率值。可以看出,当信号光功率较低时(小于 0dBm),系统所需抽运功率和信号光沿光纤分布的平坦度基本不变;而继续增大信号光功率后,由于信号光对抽运的抽运消耗效应,为实现透明传输,系统所需的抽运功率迅速增加,同时,信号光沿光纤的功率波动值也迅速增大。因此,在实际准无损光传输系统设计中,应尽量使用较低功率的信号光,过高功率的输入信号光会导致系统成本的增加以及性能的恶化。

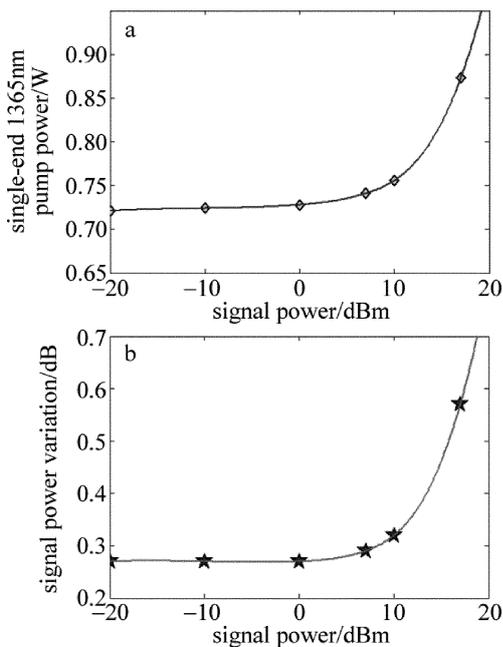


Fig. 6 System performance when single-end 1455nm pump power is fixed at 0.0228W
 a—single-end 1365nm pump power vs. signal power b—signal power variation vs. signal power

最后,仿真了光纤长度对系统所需抽运功率和信号沿光纤功率平坦度的影响,如图 7 所示。仿真中固定单端 1455nm 抽运光功率为 0.0228W,信号光功率

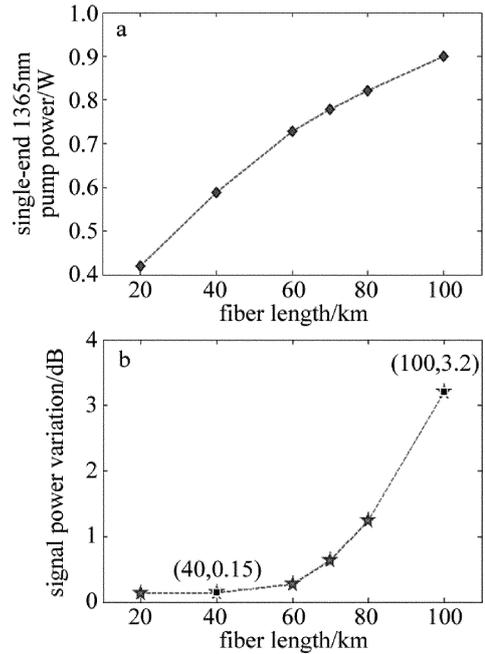


Fig. 7 System performance when single-end 1455nm pump power is fixed at 0.0228W and signal power is 1mW
 a—single-end 1365nm pump power vs. fiber length b—signal power variation vs. fiber length

为 1mW,计算实现透明传输时所需的单端 1365nm 抽运光的功率以及此时的信号光沿光纤的功率波动值。结果表明,随着光纤长度从 20km 增加到 100km,所需的 1365nm 光功率值增加了 1 倍多。当光纤长度小于 60km 时,信号光沿光纤的分布非常平坦,功率波动值小于 0.2dB;当光纤长度超过 60km 后,信号光沿光纤的平坦度迅速恶化;光纤长度为 100km 时,功率波动值超过 3dB。对于 100km 以上的光纤长度,需要通过引入 3 阶或更高阶的喇曼放大来实现准无损传输^[16]。

3 结 论

针对基于 1 阶和 2 阶混合抽运喇曼放大的光纤准无损光传输系统进行数值仿真及优化。仿真结果表明,在混合抽运高阶喇曼放大作用下,信号光可实现沿 60km 光纤的准无损传输,其沿光纤长度的功率波动值可小于 0.3dB。在不同的 1 阶和 2 阶抽运功率分配下,随着 2 阶抽运功率的提高,实现准无损传输所需的总功率值增大,但信号光沿光纤的功率波动更小。实际系统设计时,可以根据对系统成本和性能指标的需求,选择合适的抽运组合方案。此外,随着入射信号光功率的增加,实现准无损传输系统所需的总功率增大,信号功率沿光纤的波动也增大。因此,在实际应用中,要尽量避免使用过高功率的信号光。当光纤长度小于 60km 时,信号的平坦度很好,功率沿光纤的波动值在 0.3dB 以下,随着光纤长度的进一步增长,信号平坦度逐渐恶化,系统所需总功率也随之增加。本文中的工

作为无损传输系统的设计提供了重要的分析依据。

参 考 文 献

- [1] WINZER P J, ESSIAMBRE R J. Advanced modulation formats for high-capacity optical transport networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4711-4728.
- [2] HEADLEY C, AGRAWAL G P. Raman amplification in fiber optical communication systems [M]. San Diego, USA: Academic Press, 2005:13-366.
- [3] ZHOU W J, WANG R B, LI Z R. Experiment study of distributed fiber Raman amplifiers[J]. *Laser Technology*, 2010,34(3): 373-376 (in Chinese).
- [4] ZHANG Z X, WANG J F, LI Ch X, *et al.* Experimental research of S-band distributed fiber Raman amplifier[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(5):557-560(in Chinese).
- [5] XUE F, QIU K. A design method of broadband fiber Raman amplifiers[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(4):372-375 (in Chinese).
- [6] ZHOU W J, LI Z R, WANG R B. Numerical simulation and analysis of C + L bandwidth fiber Raman amplifier using multi-wavelength pumps[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(6): 778-780 (in Chinese).
- [7] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. San Diego, USA: Academic Press, 2001:355-388.
- [8] TONG Zh, WEI H, JIAN Sh Sh. High-power lasers for pumping Raman amplifiers [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, 12(5): 545-548(in Chinese).
- [9] FARALLI S, BOLOGNINI G, ANDRADE M A, *et al.* Unrepeated WDM transmission systems based on advanced first-order and higher order Raman-copumping technologies [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(11): 3519-3527.
- [10] LONG Q Y, DENG H Q, CUI D L. Effect of pump power deployment on bi-directional pumping fibre Raman amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2013,37(2): 216-218 (in Chinese).
- [11] ZHOU W J, LI Z R, WANG R B. Analysis of gain characteristics of forward and backward pumped Raman amplifiers[J]. *Laser Technology*, 2009,33(4): 406-408(in Chinese).
- [12] FARALLI S, BOLOGNINI G, SACCHI G, *et al.* Bidirectional higher order cascaded Raman amplification benefits for 10-Gb/s WDM unrepeated transmission systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(8):2427-2433.
- [13] PERLIN V E, WINFUL H G. On trade-off between noise and non-linearity in WDM systems with distributed Raman amplification [C]//Optical Fiber Communication Conference & Exhibit. New York, USA; IEEE, 2002:178-180.
- [14] ANIA-CASTAÑÓN J D. Quasi-lossless transmission using second-order Raman amplification and fibre Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2004,12(19): 4372-4377.
- [15] ANIA-CASTAÑÓN J D, ELLINGHAM T J, IBBOTSON R, *et al.* Ultralong Raman fiber lasers as virtually lossless optical media [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(2):023902.
- [16] JIA X H, RAO Y J, WANG Z N, *et al.* Detailed theoretical investigation on improved quasi-lossless transmission using third-order Raman amplification based on ultra-long fiber lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2012, B29(4):847-854.
- [17] ZHU J M, ZHANG W L, RAO Y J, *et al.* Output characteristics of low-threshold random distributed feedback fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 0302007(in Chinese).