

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

张 帆 张 巍 冯 雪 彭江得

(清华大学电子工程系,北京 100084)

摘 要 针对长跨距密集波分复用系统中喇曼放大入纤泵浦功率过大的问题,将遥泵放大器(RP-EDFA)引入到系统中,通过对共纤 RP-EDFA 的噪音性能及其优化设计的研究,在理论上计算比较了 RP-EDFA 系统和后向喇曼放大系统在不同泵浦功率水平下的光信噪比和非线性相移,表明遥泵放大技术有效降低了入纤泵浦的功率水平,更适合长跨距应用. 运用遥泵放大技术,对一个典型的长跨距系统进行系统Q值的模拟,结果表明:在 220 mW 泵浦功率水平下可以实现跨距为 167 km 的 40×11.6 Gbit/s 系统 1000 km 传输, Q 值裕量 4.4 dB.

关键词 遥泵放大;长跨距传输;中继系统;波分复用系统

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

近年来,分布式光纤喇曼放大器(DFRA)以其优异的噪音特性成为长跨距传输中的关键技术^[1],国内也对其特性展开了一系列理论和实验研究^[2~4]. 但是 DFRA 在长跨距系统中的应用需要向传输光纤中注入瓦级泵浦功率,会引入一系列系统安全问题,极大地提升了系统运行和维护成本. 遥泵放大器(RP-EDFA)将一段掺铒光纤(EDF)插入传输光纤中,通过专门的泵浦输送光纤或者传输光纤本身,从远端注入泵浦光入 EDF,将集总增益引入到传输跨段中. 这一技术被普遍应用在无中继的海缆光通信系统中^[5]. 近年来,RP-EDFA 在有光中继的长距离(超长距离)DWDM 系统中的应用逐渐引起重视,相关实验工作^[6~8]表明 RP-EDFA 在延长系统跨距上作用突出. 然而,这些工作中为了追求高的系统传输性能指标,往往采用复杂的遥泵放大结构,并且使用瓦级泵浦功率,而忽略了系统运行和维护方面的实际要求. 本文分析了一种简单的共纤 RP-EDFA 结构及其在低泵浦功率超长跨距 DWDM 系统中的应用.

1 RP-EDFA 的噪音特性和优化设计

共纤 RP-EDFA 如图 1,仅由一段 EDF 和在其输入端的光隔离器构成,光隔离器的作用是抑制二次瑞利散射引起的多径干扰噪音. 泵浦光(1480 nm)通过后段传输光纤后向注入到遥泵放大器中,使 EDF 得到激励. 信号经过一段传输光纤后进入遥

泵放大器放大,进而又在后段传输光纤中得到遥泵泵浦光产生的喇曼放大. 遥泵放大和喇曼放大共同实现了 RP-EDFA 中的放大作用.

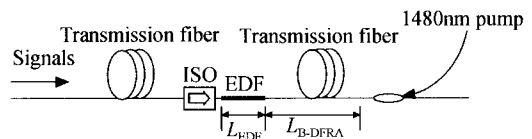


图 1 RP-EDFA 的结构
Fig. 1 Configuration of the RP-EDFA

在传输光纤、掺铒光纤的类型确定后,有三个结构参量影响 RP-EDFA 的性能,图 1 中, L_{EDF} 为遥泵 EDF 的长度, L_{B-DFRA} 为跨段中产生后向喇曼放大的光纤长度,表征了遥泵 EDF 的位置, P_p 为泵浦功率.

衡量 RP-EDFA 噪音特性的指标为等价噪音系数,其定义方式与 DFRA 的相应参量一致,即将 RP-EDFA 等效为位于传输光纤输出端的集总放大器. 此时集总放大器的噪音系数就定义为 RP-EDFA 的等价噪音系数,可以用式(1)计算

$$NF_{\text{equ}} = \frac{P_{\text{ASE,all}}}{h\nu B_0} \times \frac{1}{G_{\text{EDF}} \times G_{\text{Raman}}} \quad (1)$$

式中 $h\nu B_0$ 表示作为参考的等效输入散粒噪音,取 $B_0 = 0.1$ nm. G_{EDF} 和 G_{Raman} 分别表示遥泵 EDF 的增益和 DFRA 的开关增益. $P_{\text{ASE,all}}$ 为光纤输出端总 ASE 功率.

根据图 1 的放大单元结构,搭建了 RP-EDFA 的实验平台来研究它的噪音特性. 实验中,为了模拟不同的 L_{B-DFRA} ,部分传输光纤由两个可变光衰减器(VOAs)代替. RP-EDFA 泵浦管波长为 1475 nm,可以提供最大 320 mW 功率. 遥泵 EDF 长 7.5 m. 噪音测试中采用一个 1552 nm 的光源做为饱和信号,一个波长可调的环腔光纤激光器来做为弱探测

信号. 实验模拟 200 km 跨段下, 40 路信号输入的情况, 信号功率为 0 dBm/Ch. 测试了 300 mW 泵浦功率下三个波长下 RP-EDFA 的等价噪声系数, 结果如图 2.

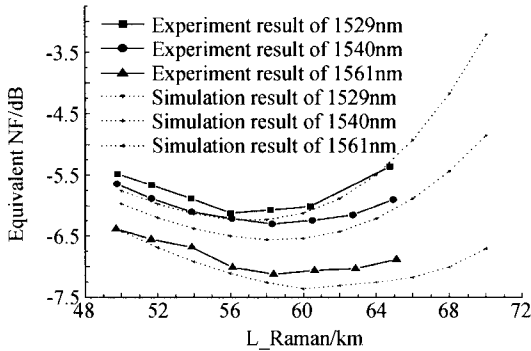


图 2 RP-EDFA 噪声特性的实验和仿真结果
Fig. 2 Experiment and simulation results of noise performances of the RP-EDFA

实验结果表明, 在确定的泵浦功率和 EDF 长度下, 存在最优的 L_{B-DFRA} 使 RP-EDFA 噪声特性最佳.

过长的 L_{B-DFRA} 会导致进入遥泵 EDF 的泵浦功率不足, 过短的 L_{B-DFRA} 则意味着遥泵 EDF 前的光纤长度过长, 使进入遥泵 EDF 的信号功率太小. 两者都会使 RP-EDFA 的噪声特性恶化. 另一方面, 三个不同波长具有相近的最佳 L_{B-DFRA} (偏差在 2 km 以内). 最短波长 (1529 nm) 的等价噪声系数最大, 意味着最差的噪声性能, 这一结论在不同的泵浦功率和遥泵 EDF 长度下普遍成立. 在宽带 DWDM 系统中, RP-EDFA 的噪声特性应考虑最坏信道的情况, 因此, 在本文以后的分析中 RP-EDFA 的噪声特性均以最短波长信道的等价噪声系数来衡量.

对 RP-EDFA 在实验条件下的噪声特性进行数值模拟时, 遥泵 EDF 的特性由 Giles 模型^[9]来计算, 后向喇曼放大部分由耦合波方程来模拟^[10]. 理论计算中用到的光纤参量见表 1. 计算结果如图 2 中虚线, 可以看出实验和仿真很好的符合, 等效噪声系数和最佳距离与实验结果差距分别在 0.4 dB 和 2 km

表 1 光纤参量

	SMF		EDF		DCF
Loss@1480	0.249dB/km	吸收系数@1530	5.81 dB/m	Loss@1550	0.5 dB/km
Loss@1428	0.288dB/km	发射系数@1530	5.55 dB/m	非线性因子 γ	0.0057/W/km
Loss@1453	0.267dB/km	吸收系数@1480	2.54 dB/m	色散因子	-85ps/nm/km
Loss@1550	0.225dB/km	发射系数@1480	0.8 dB/m	——	——
峰值喇曼系数	0.51/W/km	背景损耗	0.006 dB/m	——	——
非线性因子 γ	0.0012/W/km	——	——	——	——
色散因子	17ps/nm/km	——	——	——	——

内, 充分证实了数值模拟程序的可信性.

数值模拟了 200 km 光纤跨段内的 RP-EDFA 在 300 mW 泵浦功率下, 最坏信道等价噪声系数随 L_{B-DFRA} 和 L_{EDF} 的变化关系, 如图 3 等高线图. 可以看出, 在一定的泵浦功率和跨距下, 存在一对最优的 L_{B-DFRA} 和 L_{EDF} (分别为 58 km 和 7 m), 使 RP-EDFA

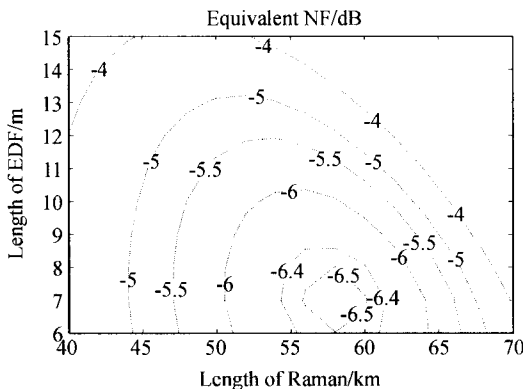


图 3 200 km 光纤跨段内 RP-EDFA 在 300 mW 泵浦下的噪声特性计算结果
Fig. 3 Noise performance of a RP-EDFA under 300 mW pump power in a fiber span of 200 km

噪声特性最佳 (约 -6.5 dB). 这里, 过短的 L_{EDF} 会限制 EDF 的增益, 而过长的 L_{EDF} 则会由于泵浦功率不足导致 EDF 反转下降, 影响增益噪声特性. 结合图 2 中对遥泵 EDF 位置的分析, 则可以很好地理解图 3 等高线图的结果. 值得注意的是, L_{EDF} 在 6~10 m, L_{B-DFRA} 在 51~64 m 范围内, 最坏信道等价噪声系数与最优值相比恶化在 0.5 dB 以内. 这表明 RP-EDFA 的噪声特性对 L_{B-DFRA} 和 L_{EDF} 都不敏感, 这为实际工程应用带来很大便利. 针对超长跨距 DWDM 系统中的低泵浦功率 RP-EDFA 设计往往是要通过给定的跨距和泵浦功率限制来设计 RP-EDFA 的结构参量, 通过计算分析图 3 的等高线图, 则很容易得到相应的最优化结果.

最后, 利用上述优化方法数值计算了不同跨段长度和泵浦功率下, 最佳 L_{B-DFRA} 和 L_{EDF} 的优化结果, 见图 4. 可以看出不同设计条件下两者的变化规律基本一致: 在相同泵浦功率下或相同跨距下, 最佳 L_{B-DFRA} 和 L_{EDF} 都随跨距的增加而增加. 最优点随泵浦功率的变化较缓, 说明 RP-EDFA 的设计对实际泵浦功率的偏差有较大的容限.

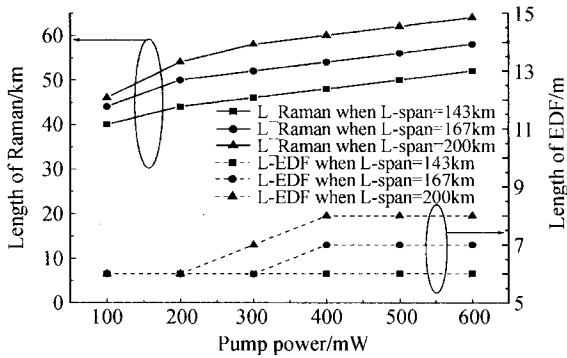


图4 不同跨段长度下最佳 L_{B-DFRA} 和 L_{EDF} 与泵浦功率的关系

Fig. 4 The relation between optimal L_{B-DFRA} , L_{EDF} and pump power in different fiber span

2 RP-EDFA 在超长跨距 DWDM 系统的应用

在系统分析了 RP-EDFA 噪声特性并给出优化设计方法后,重点考察了 RP-EDFA 在 40×11.6 Gb/s DWDM 系统 1000 km 的传输中延长光纤跨距的应用.系统跨段结构如图 5.

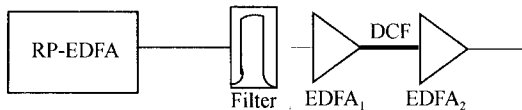


图5 遥泵传输系统的跨段结构

Fig. 5 Span configuration of RP-EDFA system

RP-EDFA 部分与图 1 一致,结构参量与性能由前一节优化方法得到.一个宽带谱形滤波器加在传输光纤后保证进入集总放大器的信号功率谱平坦.集总放大部分为一内置色散补偿光纤(DCF)的两级 EDFA,实现跨段的集总增益补偿和色散补偿.两级集总 EDFA 的增益由跨段总损耗和遥泵部分增益的差得到.考虑到 DCF 非线性系数较大,本文限制输入 DCF 的单信道功率为 -6 dBm,由此确定两级 EDFA 增益的分配.两级 EDFA 的噪声系数均设为 6 dB.计算中采用的光纤参量如表 1.

为了突出 RP-EDFA 的作用,同时对比计算了相同跨距下仅使用反向喇曼放大器(B-DFRA)的系统性能. B-DFRA 的泵浦波长是 1428 nm 和 1453 nm,计算中对两泵浦波长下的光功率配比进行优化,得到最平坦的喇曼增益谱,在传输光纤输出端同样采用宽带滤波器滤平信号功率谱.集总放大部分与图 5 相同.

不同泵浦功率水平下两类跨段的噪声特性如图 6. 等价噪声系数的计算包括了 RP-EDFA 后集总放大部分的噪声贡献.计算中输入信道功率取 3 dBm/Ch. 可以看出,两类跨段的噪声系数都随着泵浦功率的增加而降低.值得注意的是,在相同的

泵浦功率水平下,RP-EDFA 跨段的噪声特性要远好于 B-DFRA 跨段.这是由于在跨段中信号越早经历放大 OSNR 的恶化越少. B-DFRA 的有效放大距离决定于传输光纤对于泵浦光的有效长度,约 $16 \sim 20$ km. 而 RP-EDFA 可以将集总增益延伸至跨段输出端前 $30 \sim 60$ km 处. 换一个角度看,达到相同的噪声系数水平,RP-EDFA 需要的泵浦功率比 B-DFRA 跨段小得多,这为遥泵放大技术节省泵浦功率开销提供了依据.

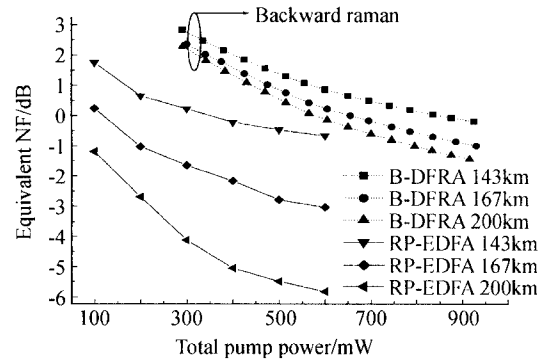


图6 RP-EDFA 和 B-DFRA 跨段的噪声特性比较

Fig. 6 Comparison between noise performance of fiber spans using RP-EDFA and B-DFRA

为了考察两类放大技术对系统的影响,计算和比较了两类光放大系统的 OSNR 值和非线性相移.传输系统的 OSNR 值可以通过式(2)计算

$$OSNR_{\text{system}} = \frac{P_{S,\text{out}}}{P_{\text{ASE},\text{all}}} \quad (2)$$

式中 $P_{S,\text{out}}$ 为信号的输出功率, P_{ASE} 是 ASE 噪声功率 (0.1 nm 带宽).

各信道非线性相移量也被计算用以衡量系统非线性恶化,其定义为

$$\phi_{\text{NL}} = \gamma \times \int_0^{L_{\text{span}}} P_S(z) dz \quad (3)$$

式中 γ 为光纤的非线性因子, $P_S(z)$ 为信号功率沿光纤的分布, L_{span} 为跨段长度.

图 7(a) 是 OSNR 的计算结果. 随着泵浦功率的增加,两类系统的 OSNR 都成上升的趋势. 从图中可以看出在相同的泵浦功率水平下,RP-EDFA 系统的 OSNR 值要远高于 B-DFRA 系统. 要达到相同的 OSNR,遥泵放大系统需要的泵浦功率水平要小得多. 另外,跨距越大,遥泵系统带来的性能提高越加明显,这与单跨段噪声的分析也是一致的. 对于 143 km 的跨段, 200 mW 泵浦的 RP-EDFA 系统即可达到 700 mW 泵浦下 B-DFRA 系统的 OSNR 水平. 而对于 200 km 的跨段,要达到 RP-EDFA 系统同样的传输性能, B-DFRA 系统所需的泵浦功率要达到 1 W 以上,在实际应用中很难实现.

图 7(b) 是非线性相移的计算结果. 随泵浦功

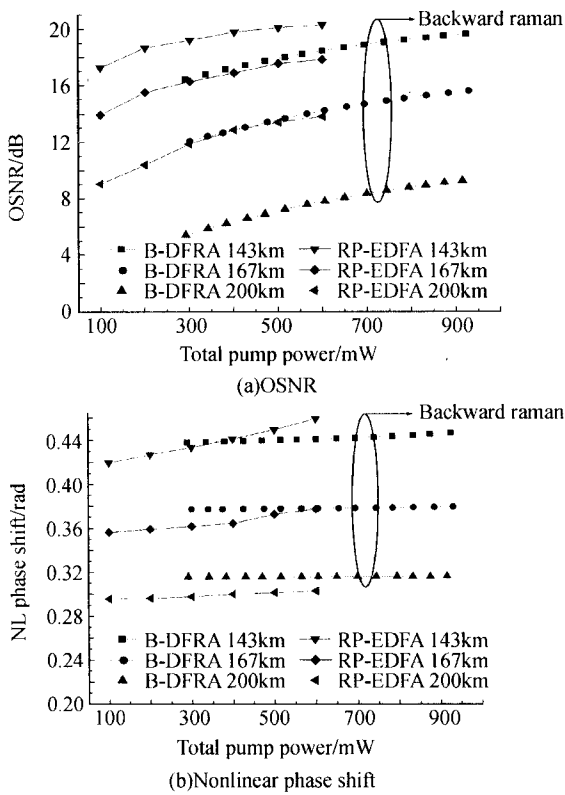


图 7 应用 RP-EDFA 和 B-DFRA 的系统性能比较
Fig. 7 Comparison between system performance using RP-EDFA and B-DFRA

率的增加, RP-EDFA 系统的非线性相移有所增加, 而 B-DFRA 系统的非线性相移几乎不变. 在相同的跨距下, 高泵浦功率水平下 RP-EDFA 系统的非线性相移比 B-DFRA 系统略大, 而低泵浦功率水平下 RP-EDFA 系统的非线性相移比 B-DFRA 系统略低. 总体而言, 在 3 dBm/ch 的输入信号功率下, 两类系统的非线性相移水平均较低. 在相同的泵浦功率下, 两类系统在较长的跨距(对应较少的跨段)下有更小的非线性相移. 因此系统的信号功率水平还可以适当提升, 在不引入较大非线性恶化的条件下进一步提升系统 OSNR.

最后, 数值模拟了采用 RP-EDFA 的 40×11.6 Gb/s DWDM 系统 1000km 的传输. 采用分裂步方法计算光纤中的非线性薛定谔方程, 模拟了 167 km 和 200 km 跨距的传输情况. 考虑系统采用 16.5% 的前向纠错(FEC)编码, 信道码率设为 11.6 Gb/s, 则系统的 Q 值要求为 8.6 dB. 码形为 RZ 码(33% 占空比). 系统采用逐段 100% 的色散补偿, 对后色散补偿进行优化使系统 Q 值最佳. 图 8 是系统平均 Q 值计算结果. 从 200 km 跨距的结果可以看出, 对于给定的输入信号功率, 系统 Q 值随泵浦功率的增加而上升, 但上升的趋势在逐渐变缓. 在固定泵浦功率水平下, 提升输入信号功率可以提高系统 Q 值, 但在信号功率较高时这种改善也变弱, 显示出光

纤中非线性的影响. 图中横虚线表明, 在每信道 0 dBm 信号功率, 泵浦功率大于 220 mW 的时候, 跨距为 167 km(6 个传输跨段)的系统 Q 值可以达到 13 dB 以上, 实现 4.4 dB 的 Q 值裕量. 而对于 200 km 跨距的系统, 在每信道 3 dBm 功率, 400 mW 泵浦功率得条件下可以达到 11 dB 的 Q 值, 实现 2.4 dB 裕量. 计算结果表明, 通过合理设计遥泵放大结构参量和信号功率水平, 完全可以实现 167 km 跨距, 1000 km 的传输, 并将入纤的泵浦功率控制在 220 mW. 值得指出的是, 本文的系统模拟条件较为保守, 可以预见通过选择更适当的遥泵 EDF 和更精细的色散补偿, 系统性能应可以进一步提升.

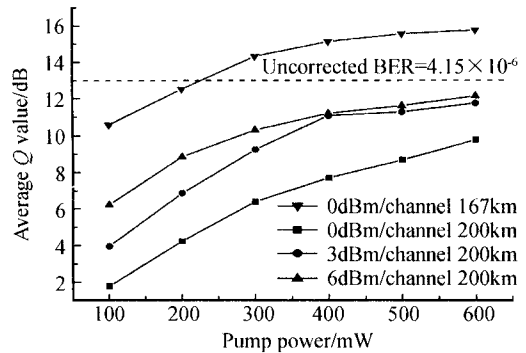


图 8 采用 RP-EDFA 的 40×11.6 Gb/s DWDM 系统 1000 km 传输平均 Q 值
Fig. 8 Average Q value of 40×11.6 Gb/s DWDM system using RP-EDFA 1000km transmission

3 结论

针对喇曼放大技术在长跨距的长距离有光中继传输系统中入纤泵浦功率过大, 影响系统实用性的问题, 将遥泵放大技术引入到系统中. 研究了简单的共纤 RP-EDFA 的噪音性能及其优化设计, 从系统的角度对比了 B-DFRA 系统和 RP-EDFA 系统在超长跨距传输中的特性, 重点展现了遥泵系统在节省泵浦功率和延长传输跨距方面的突出性能. 结果表明遥泵放大技术结合了 DFRA 和 EDFA 的特性, 降低了入纤泵浦的功率水平, 更适合长跨距应用. 文章通过对一个典型的长跨距系统进行的系统 Q 值的模拟, 表明运用遥泵放大技术, 在 220 mW 泵浦功率水平下可以实现跨距为 167 km 的 40×11.6 Gbit/s 系统 1000 km 传输, Q 值裕量 4.4 dB.

参考文献

- Islam M N. Raman amplifiers for telecommunications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, **8**(3): 548~559
- 金尚忠, 周文, 张在宣. 混合型光纤喇曼放大器增益和带宽的研究. *光子学报*, 2004, **33**(4): 428~430

Jin S Z, Zhou W, Zhang Z X. *Acta Photonica Sinica*,

- 2004, **33**(4):428~430
- 3 陶在红,常建华,孙小菡. 一种新颖的宽带光纤喇曼放大器优化设计方法. 光子学报, 2004, **33**(4):435~438
Tao Z H, Chang J H, Sun X H. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):435~438
- 4 姜海明,王亚非. 光纤喇曼增益系数的简捷测量. 光子学报, 2004, **33**(6):666~668
Jiang H M, Wang Y F. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):666~668
- 5 Hansen P B, Eskildsen L. Remote amplification in repeaterless transmission systems. *Optical Fiber Technology*, 1997, **3**:221~237
- 6 Ma M X, Kidorf H D, Rottwitt K, *et al.* 240 km repeater spacing in a 5280 km WDM system experiment using 8×2.5 Gb/s NRZ transmission. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(6):893~895
- 7 Masuda H, Kawakami H, Kuwahara S, *et al.* 1.28 Tbit/s (32×43 Gbit/s) field trial over 528 km (6×88 km) DSF using L-band remotely-pumped EDF/distributed Raman hybrid inline amplifiers. *Electronics Letters*, 2003, **39**(23):1668~1670
- 8 Ito T. Transmission of 1.6Tb/s (40×40 Gb/s) over 1,200 km and three OADM's using 200 km SMF doubled-span with remotely pumped optical amplification. Optical Fiber Communication Conference (OFC), 2004, Postconference Digest, 83~85
- 9 Giles C R, Desurire E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, **9**(2):271~282
- 10 Kidorf H, Rottwitt K, Nissov M, *et al.* Pump interactions in a 100 nm bandwidth Raman amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(9):530~532

Remotely Pumped Erbium Doped Fiber Amplifiers Using Low Power Pump in Ultra-long Span Dense Wavelength Division Multiplexing Systems

Zhang Fan, Zhang Wei, Feng Xue, Peng Jiande

Electronic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084 Received date: 2005-05-11

Abstract To overcome the high pump power of Raman amplification the remotely pumped erbium doped fiber amplifiers (RP-EDFA) are introduced in ultra-long haul dense wavelength division multiplexing (DWDM) systems. Firstly, the noise performance of a simple co-fiber RP-EDFA is investigated experimentally and theoretically, then the design method is discussed. The OSNRs and nonlinear phase shifts of typical systems based on RP-EDFA and backward pumped Raman amplification are compared theoretically, showing that RP-EDFA can efficiently reduce pump power and is appropriate for the ultra-long span application. Finally, Q value of the typical transmission system is simulated. The results show that using RP-EDFA pumped by only 220 mW, 1000 km transmission of a 40×11.6 Gbit/s system with a span distance of 167 km can be achieved, with 4.4 dB margin of Q value.

Keywords Remotely pumped erbium doped fiber amplifiers; Ultra-long span; Dense wavelength division multiplexing system



Zhang Fan was born in 1980, China. He received the B. S. degree from Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China in 2002 and M. S. degree from Tsinghua University, Beijing, China in 2005. His current research interests are in the field of ultra-long span dense wavelength division multiplexing system.