

基于光纤自相位调制多波长全光再生的色散管理优化*

张 婧[†] 潘 炜 闫连山 罗 斌

(西南交通大学信息光子与通信研究中心, 成都 610031)

(2009 年 8 月 28 日收到; 2010 年 1 月 11 日收到修改稿)

针对基于光纤自相位调制效应的多波长全光再生系统, 分析了光纤平均色散对再生器品质因子改进量的影响, 提出一种色散管理优化方法. 由于波长间色散差异会导致再生系统性能的稳定性的下降, 通过选择色散补偿光纤和单模光纤的长度, 使其合成的色散曲线与各波长分别达到最优再生性能时对应的色散曲线近似拟合, 同时保证该色散曲线落在性能满意度高的色散区域, 然后调整信号输入功率和滤波器的偏移量, 可有效改善多波长再生性能的稳定性的, 实现再生器的色散管理优化.

关键词: 全光再生, 多波长, 色散管理, 品质因子

PACC: 4230Q, 4265, 4281D

1. 引 言

在超高速光纤通信网中, 由于光纤群速度色散, 放大器自发辐射噪声以及各种非线性效应等因素的影响, 光信号在传输过程中将以脉冲展宽、包络畸变和定时抖动等形式恶化. 为保证信号的质量和长距离传输, 需要对恶化后的信号进行补偿或再生. 全光再生技术正是这样一种技术, 它的显著优势是在光域内对信号进行 2R(再放大, 再整形)或 3R(包括再定时)处理, 不仅克服了光-电-光转换的局限, 同时网络的透明性和灵活性也得到充分保证, 因此成为全光通信网中的核心技术之一. 各种全光再生技术已成为研究热点, 诸如利用半导体光放大器^[1,2]、光纤参量放大器^[3]、高非线性光纤^[4]和光波导^[5]等.

随着波分复用技术的发展, 全光再生技术有必要从单波长向多波长方向转换. 2008 年, Southampton 大学研究小组提出用单根光纤双向传输两个信道同时实现全光再生的方案^[6], 多波长全光再生的研究由此展开. 随后, 该小组提出, 利用色

散管理机理通过使用色散补偿光纤加单模光纤实现四波长的全光再生^[7,8], 并且利用偏振复用(PDM)结合双向传输机理实现 10 Gb/s 4 个波长的全光再生^[9]. Texas 大学和香港大学也分别利用周期群延时器件(PGDD)的色散管理^[10]和光子晶体光纤中的四波混频^[11]实现了多波长全光再生.

在光纤色散管理型多波长全光再生的研究中, 由于色散管理可以有效抑制波长间相互作用, 同时具有可控色散补偿量, 因此, 得到广泛关注^[12,13]. 但是, 色散斜率的存在、色散与自相位调制(SPM)的相互作用以及不同光纤长度的选择, 都将对多波长再生系统性能的满意度和稳定性产生影响, 是值得考虑的问题. 本文对色散管理下的多波长全光再生系统进行分析, 得出了使再生系统性能稳定和相对满意的平均色散值. 给出一种多波长色散管理优化方法, 通过对各个波长再生性能达到最优时的色散范围进行曲线拟合, 找出满足或接近拟合曲线的光纤长度搭配, 同时改变输入功率和滤波器偏移量, 改善了再生性能的稳定性的, 为多波长全光再生技术的发展提供方便.

* 四川省应用基础研究计划(批准号: 2008JY0064)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-08-0821)和区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金资助的课题.

[†] E-mail: zj20032152@126.com

2. 色散管理下多波长全光再生的基本原理

光纤色散管理下的多波长全光再生系统结构框图如图 1 所示. 基本原理以单波长 Mamyshev 模型^[14]为基础, 即恶化信号经过高功率掺铒光纤放大器 (EDFA) 注入到高非线性光纤 (HNLf), 由于 SPM 效应导致信号频谱展宽, 噪声频谱变化较小, 采用偏移中心波长的带通滤波器 (Filter) 将噪声滤除实

现再生, 多波长再生系统用色散补偿光纤 (DCF) 加单模光纤 (SMF) 代替 HNLf, DCF 较大的色散值将导致不同波长间产生快速的走离现象以减小它们之间的相互作用; SMF 不仅可以补偿 DCF 引起的光纤色散, 保持信号脉冲不发生畸变, 同时由于信号频谱展宽量与光纤有效长度和非线性系数成正比, 较长的 SMF 产生的 SPM 效应与单波长再生系统中短距离 HNLf 产生的 SPM 效果相同, 经过可调谐偏移滤波器后实现再生.

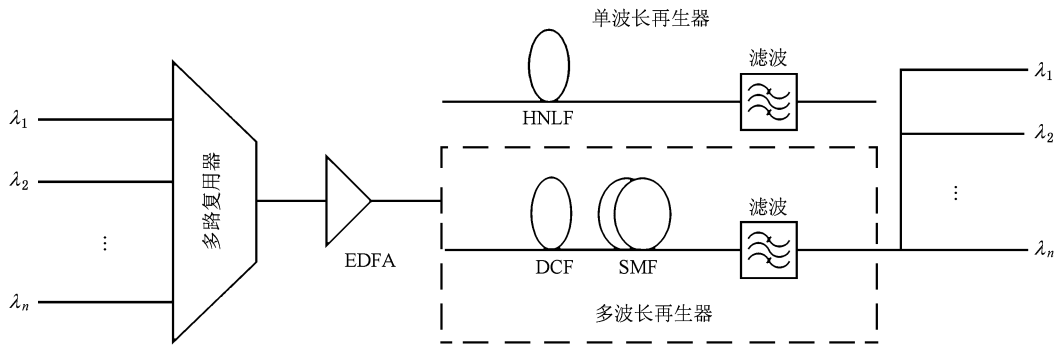


图 1 光纤色散管理型多波长全光再生系统结构框图

多波长信号沿光纤的变化情况可由耦合非线性 Schrödinger 方程表示为^[15]

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_{21}\frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_{31}\frac{\partial^3 A_1}{\partial T^3} + \frac{\alpha}{2} = i\gamma_1(|A_1|^2 + 2\sum_{j=2}^n |A_j|^2)A_1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} + d_j\frac{\partial A_j}{\partial T} + \frac{i}{2}\beta_{2j}\frac{\partial^2 A_j}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_{3j}\frac{\partial^3 A_j}{\partial T^3} + \frac{\alpha}{2} = i\gamma_j(|A_j|^2 + 2\sum_{k=1}^n |A_k|^2)A_j, \quad (2)$$

$$T = t - z/v_{g1},$$

$$d_j = (\nu_{g1} - \nu_{gj})/(\nu_{g1}\nu_{gj}). \quad (3)$$

其中, $j = 2, 3, \dots, n; k = 1, 2, \dots, (j-1), (j+1), \dots, n$, 波长数 n 直接决定了耦合方程的个数, A_j 为第 j 个波长脉冲包络的慢变振幅, ν_{gj} 为第 j 个波长信号的群速度, T 是以 ν_{g1} 运动的脉冲在运动坐标系中的时间变量, 参量 d_j 是第 j 个波长与第一个波长脉冲间群速度失配的度量, β_2, β_3 分别为光纤的二、三阶色散参量, γ 为非线性系数, α 为光纤损耗. (2) 式左边第二项反映了群速度失配效应 (走离效应), 第 j 个波长与第一个波长间的走离量可由 $d_j L$ 来表示, L 为光纤长度; 第三项和第四项体现了群速度色散 (GVD) 效应和三阶色散效应; 第五项代表衰

减效应. 波长间的 SPM 效应和交叉相位调制 (XPM) 效应分别体现在 (2) 式右边的第一项和第二项. 本文在考虑上述各种效应的前提下, 侧重分析色散对多波长再生系统性能的影响.

再生器性能的高低可通过信号眼图直观反应, 其具体的评价指标可由品质因子 Q 的改进量 ΔQ 表示^[16]:

$$\Delta Q = 10\lg(Q_{\text{out}}/Q_{\text{in}}). \quad (4)$$

其中, Q_{in} 为恶化信号的 Q , Q_{out} 为再生信号的 Q . ΔQ 的大小直接反应出再生器性能的优劣. 对于多波长再生系统, 如果各波长同时具有较大的 Q 改进量, 则认为其性能满意度较高. 系统性能稳定性可通过各波长 Q 改进量的波动来衡量, 波动越小则性能稳定性越高.

3. 结果与讨论

3.1. 光纤平均色散对再生器的影响

选取初始信号为 4 列 40 Gb/s 的 $2^7 - 1$ 个伪随机 Gauss 型脉冲序列 (脉冲宽度为 8.4 ps (1 ps = 10^{-12} s)), 信号波长依次为 1544.4, 1549.2, 1554 和

1558.8 nm, 滤波器为 Gauss 型滤波器(带宽为 0.64 nm, 偏移量为 0.6 nm). 为了保证信道间的相互走离和信号脉冲的不变形, 再生器光纤由五部分 DCF 和 SMF 的组合重复排列而成, DCF 和 SMF 所选光纤参量如表 1 所示^[9].

表 1 再生器光纤参量

	色散 /ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹	色散斜率 /ps·nm ⁻² ·km ⁻¹	非线性系数 /W ⁻¹ ·km ⁻¹	光纤损耗 /dB·km ⁻¹
DCF	-120.5	-0.432	5.3	0.45
SMF	16.4	0.058	1.3	0.23

当光纤平均色散为 +1 ps/(nm·km) 时, 令每部

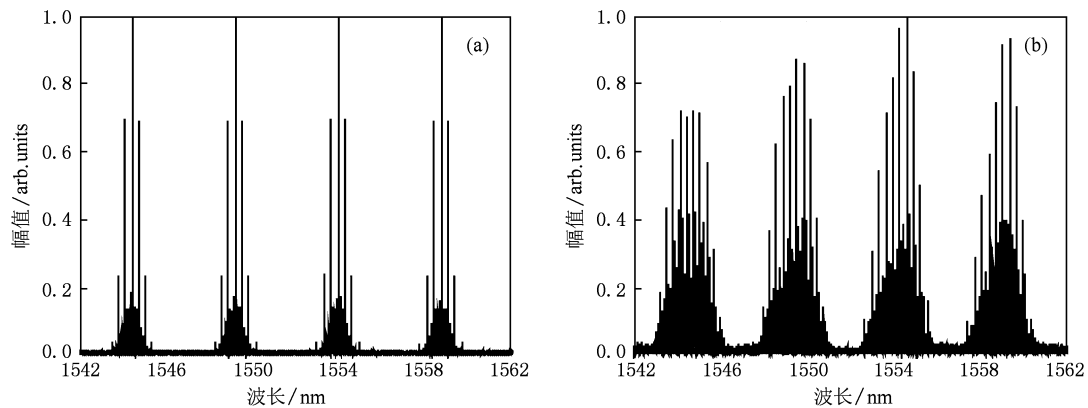


图 2 信号注入光纤前后的频谱图 (a) 注入光纤前, (b) 注入光纤后

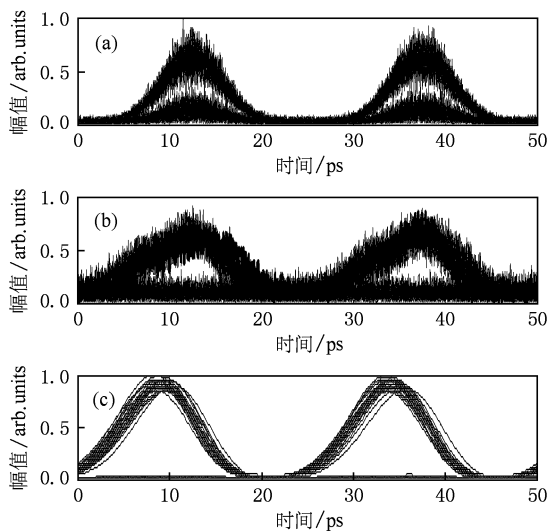


图 3 信号再生前后眼图的比较 (a) 加入噪声的信号眼图, (b) 经过非线性光纤后的信号眼图, (c) 再生后的信号眼图

光纤平均色散的变化可通过改变 DCF 和 SMF 的长度来实现. SMF 较大的长度变化会引起再生器

分光纤中 DCF 长度为 0.134 km, SMF 长度为 1.06 km, 得出 4 个波长信号经过光纤传输前后的频谱如图 2 所示. 可以看出, SPM 效应使信号频谱产生明显的展宽, 由于多波长再生要求信号波长间隔较大, 展宽的频谱并没有相互重叠产生干扰. 同时, XPM 效应使经过光纤传输后的信号频谱呈现不对称性分布. 信号再生前后的眼图比较如图 3 所示. 假设信号受寄生脉冲和 Gauss 型噪声的影响, 这样在信号为“0”和“1”时都存在较大的幅度抖动. 选取其中 1544.4 nm 波长的信号, 经过光纤传输后, 残留色散的影响使信号时域脉冲展宽, 信号的幅度抖动经过再生器后明显减小, 寄生脉冲消除, 实现再生.

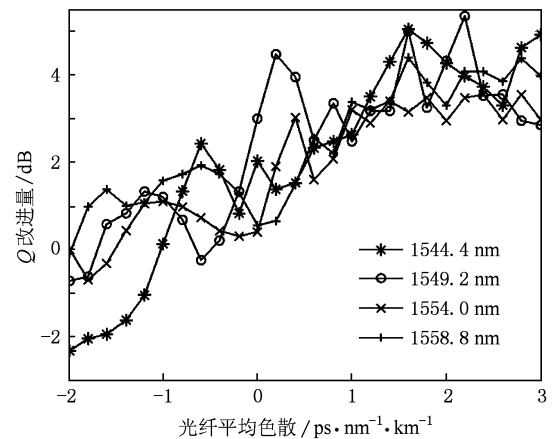


图 4 Q 改进量随光纤平均色散的变化曲线

结构和性能的改变, 因此选择改变 DCF 长度并保持 SMF 长度不变. DCF 长度变化范围小, 可以近似忽略最大非线性相移的变化, 信号输入功率不改变. 由此得到 Q 改进量随光纤平均色散的变化曲线如图 4 所示. 可以看出, 由于 DCF 和 SMF 都存在色散

斜率且不相等,每个波长对应的最佳平均色散值也不同,各信号的 Q 改进量随平均色散的变化都存在峰值. 平均色散为负时,色散与 SPM 所致啁啾符号相同,加速信号的恶化,因此 Q 改进量很小甚至为负时,再生效果较差. 平均色散为正时,色散所致负啁啾与 SPM 所致正啁啾尽可能抵消,使信号质量在峰值对应的平均色散值处达到最佳. 综合 4 个波长 Q 改进量的变化,平均色散取 $+1.6 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 时,再生性能达到相对满意的效果,但波长间 Q 改进量起伏大,不够稳定. 平均色散取 $+1 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 时,波长间再生稳定性较高. 因此在确保信道有略微偏正的平均色散量时,要结合实际,权衡再生性能满意度和稳定性,选择合适长度的 DCF.

3.2. 多波长全光再生的色散管理优化

再生系统中波长间的相互作用很小,可以近似忽略,所以能够找到每个波长所对应的再生性能满意度高的色散区域. 选取 4 个波长的初始信号,设置同上,平均输入功率为 353 mW,再生器参量如表 2 所示. 由于 SPM 在反常色散光纤 ($\beta_2 < 0$) 中频谱呈现的多峰结构波动较大,正常色散光纤 ($\beta_2 > 0$) 频谱波动较小,因而选择有利于再生性能的正常色散光纤^[17]. 4 个波长 Q 改进量与光纤色散的关系如图 5 所示.

表 2 再生器参量

高非线性光纤参量		滤波器参量	
光纤长度/km	0.8	滤波器偏移量/nm	1.20
非线性系数/ $\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$	4.3	滤波器带宽/nm	0.64
光纤损耗/ $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$	0.4		
色散斜率/ $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$	0.075		

由图 5 可见,信号 Q 改进量都存在峰值,表明 SPM 与色散的相互作用存在最佳状态,色散斜率使峰值随着波长减小沿色散减小的方向移动. 不同色散与自相位调制的相互作用将导致各信号再生性能稳定性的下降,一个波长信号达到最优再生性能时对应的色散值,并不能保证其他信号同时达到最优. 当色散在 $-0.8 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ — 0 范围,信号 Q 改进量存在很大波动,尤其在色散为 $-0.4 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 时,波动范围达到 5.5 dB. 光纤色散在 -2 — $-0.8 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 的范围时, Q 改进量波动相对较小,但波动范围最小仍有 0.64 dB. 如果认为 Q 改进量 ΔQ 在 2.26 dB ($Q_{\text{out}} = 13.5$) 以上时再生性能满

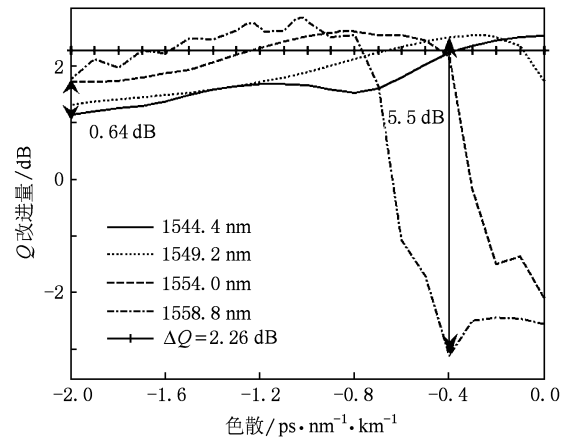


图 5 Q 改进量随光纤色散的变化曲线

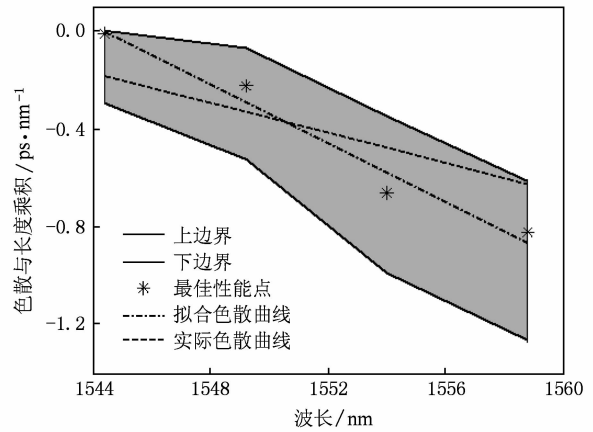


图 6 色散与光纤长度的乘积随波长的变化曲线

意度较高,将得到 4 个波长信号对应的色散范围如图 6 阴影部分所示. 可以看出,色散区域分布随着波长的增加逐渐变宽,且沿着色散增大的方向扩展. 这是因为不同波长的 SPM 效应基本相同,必须有合适的色散容限以保证与 SPM 相互作用的稳定. 色散斜率使色散随波长逐渐增加,因此色散区域也逐渐变宽. 区域中星号表示 4 个波长信号的最优再生性能点. 根据此最优点进行最小二乘拟合,得到最优色散拟合曲线为图 6 中点虚线所示,色散与波长的关系为

$$D = -0.0749\lambda + 115.6696. \quad (5)$$

为使 DCF 和 SMF 合成色散曲线与拟合的最优色散曲线近似相等,需要满足色散关系^[15]

$$DL = D_1L_1 + D_2L_2. \quad (6)$$

其中, $D_{1(2)}$ 和 $L_{1(2)}$ 分别为 DCF (SMF) 的色散和长度. 在此色散关系成立的前提下,得到的 DCF 和 SMF 光纤长度之和要尽量与原光纤长度相近,以减

小因自相位调制的不同而带来的影响. 在严格满足该色散条件的关系下, 选取表 1 中光纤参量解析得出的 DCF 和 SMF 长度为 $L_1 = 10.05$ km, $L_2 = 73.84$ km, 完全不符合长度要求. 选取 DCF 光纤的色散 $D = -80.5$ ps/(nm·km) 时, 得出满足色散条件的精确解 $L_1 = 0.3986$ km, $L_2 = 1.9358$ km. 为了使光纤长度与原光纤长度 $L = 0.8$ km 更加接近, 实际色散曲线只要接近最优色散曲线, 并且落在性能满意度较高的色散区域(阴影区域)内, 就可以实现较好的色散管理优化, 由此得到实际色散曲线如图 6 虚线所示, 此时光纤长度 $L_1 = 0.30$ km, $L_2 = 1.45$ km.

考虑到所选 DCF 和 SMF 的长度之和比原光纤长度长, 因此平均色散将低于原光纤色散, 色散的减小将降低对再生器中 SPM 效应的限制. 为使两段光纤的再生性能与单段光纤的性能近似相等, SPM 效应应当随着色散的减小相应减小, 因此滤波器的偏移量也应减小. 在滤波器偏移量为 0.85 nm 时, 再生器性能基本和单段光纤相同且稳定性最好, 得出 4 个波长信号 Q 改进量随信号输入功率的变化曲线如图 7 所示.

可以看出, 经过色散管理优化, 使每个波长信号尽可能落在最优性能范围内, 信号再生性能的稳定性和明显改善, 即使在 Q 改进量波动最大处(输入平均功率为 177 mW), 波动范围仅为 0.57 dB. 因此系统中如果对再生性能满意度要求较高, 可以选择输入平均功率在峰值附近, 如果对再生性能的稳定性和要求较高, 则可以选择输入平均功率在 250—350 mW 之间. 输入平均功率的选择比原功率值偏小, 也同样反映出由于光纤平均色散变小导致

的 SPM 效应的相应减小, 以保证优化方法前后再生性能的稳定.

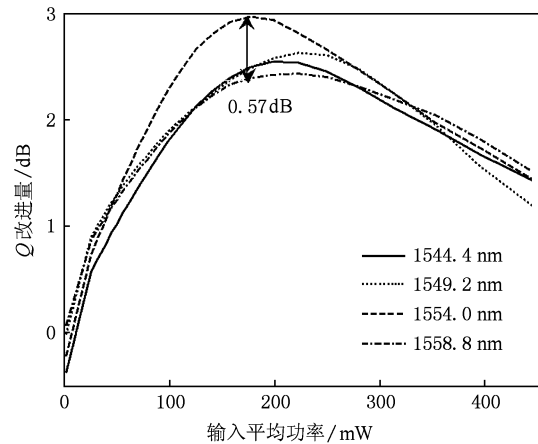


图 7 Q 改进量随信号平均输入功率的变化曲线

4. 结 论

对基于光纤色散管理的多波长全光再生系统进行了研究, 讨论了光纤平均色散对再生系统的影响, 得出光纤平均色散为正值时再生效果较好, 且存在使系统性能满意度较高和相对稳定的平均色散值. 给出了一种多波长全光再生色散管理优化方法, 通过对每个波长再生性能达到最优时的色散范围进行拟合, 找出满足或接近拟合曲线的光纤长度搭配, 保证该光纤组合的色散曲线落在较优色散区域内. 波长间 Q 改进量的波动范围由最低 0.64 dB 优化至最高 0.57 dB, 再生性能的稳定性和明显改善.

- [1] Gavioli G, Thomsen B C, Mikhailov V, Bayvel P 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 2766
- [2] Yu J L, Wang Y T, Zhang A X, Zhang Y D, Zhu L K, Li Y N, Hu H, Wang W R, Wang Z R, Lü J, Wang X B, Zhang L T, Yang E Z 2007 *Acta Optica Sin.* **27** 801 (in Chinese) [于晋龙、王耀天、张爱旭、张艳冬、朱利凯、李亚男、胡浩、王文睿、王卓然、吕捷、王新兵、张立台、杨恩泽 2007 光学学报 **27** 801]
- [3] Bogris A, Syvridis D 2008 *Opt. Fiber Technol.* **14** 63
- [4] Provost L, Finot C, Petropoulos P, Mukasa K, Richardson D J 2007 *Opt. Express* **15** 5100
- [5] Madden S J, Choi D, Bulla D A, Rode A V, Luther-Davies B, Ta'eed V G, Pelusi M D, Eggleton B J 2007 *Opt. Express* **15** 14414
- [6] Provost L, Parmigiani F, Petropoulos P, Richardson D J 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 270
- [7] Kouloumentas C, Vorreau P, Provost L, Petropoulos P, Freude W, Leuthold J, Tomkos I 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1854
- [8] Provost L, Kouloumentas C, Parmigiani F, Tsolakidis S, Tomkos I, Petropoulos P, Richardson D J 2008 *Optical Fiber Communication Conference San Diego, USA, February 24—28, 2008*
- [9] Provost L, Parmigiani F, Petropoulos P, Richardson D J, Mukasa K, Takahashi M, Hiroishi J, Tadokuma M 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1676
- [10] Vasilyev M, Lakoba T I, Patki P G 2008 *Optical Fiber Communication Conference San Diego, USA, February 24—28,*

- 2008
- [11] Cheng A, Shu C, Fok M P 2009 *Optical Fiber Communication Conference* San Diego, USA, March 22—26, 2009
- [12] Xu M, Ji J H 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 781 (in Chinese) [徐铭、吉建华 2007 光学学报 **27** 781]
- [13] Li Q L, Sun L L, Chen J L, Li Q S, Tang X H, Qian S, Lin L B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 805 (in Chinese) [李齐良、孙丽丽、陈均朗、李庆山、唐向宏、钱 胜、林理彬 2007 物理学报 **56** 805]
- [14] Mamyshev P V 1998 *24th European Conference on Optical Communication* Madrid, Spain, September 20—24, 1998 p475
- [15] Govind P A (Translated by Jia D F) 2002 *Nonlinear Fiber Optics and Application of Nonlinear Fiber Optics* (Beijing: Electronics Industry Press) p57, p172 (in Chinese) [Govind P A 著(贾东方译) 2002 非线性光纤光学原理及应用(北京: 电子工业出版社) 第 57, 172 页]
- [16] Finot C, Nguyen T N, Fatome J, Chartier T, Pitois S, Bramerie L, Gay M, Simon J C 2008 *Opt. Commun.* **281** 2252
- [17] Xu Y Z, Zhang X, Wang Z N, Wei Y F, Huang Y Q, Chen X, Ren X M 2007 *J. Optoelectro. Laser* **18** 1191 (in Chinese) [徐永钊、张 霞、王子南、卫艳芬、黄永清、陈 雪、任晓敏 2007 光电子·激光 **18** 1191]

Dispersion management optimization of multi-wavelength all-optical regeneration based on self-phase modulation *

Zhang Jing[†] Pan Wei Yan Lian-Shan Luo Bin

(Center for Information Photonics & Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(Received 28 August 2009; revised manuscript received 11 January 2010)

Abstract

In connection with the multi-wavelength all-optical regeneration system based on self-phase modulation in fibers, the effect of the average fiber dispersion for the quality factor Q improvement of regenerator is analyzed and a dispersion management optimization method is proposed. The stability of performance of the regenerator will degrade because of dispersion discrepancy between different wavelengths. By choosing the fiber length of dispersion compensating fiber and single mode fiber to make the dispersion curve of combination of two kinds of fiber approximately fitting with the dispersion curve corresponding to the best performance of each wavelength respectively, and keeping the compound dispersion curve in the better dispersion region, the stability of performance of the regenerator is effectively improved if the input signal power and offset of the filter are properly adjusted. The optimization of multi-wavelength dispersion management can be realized.

Keywords: all-optical regeneration, multi-wavelength, dispersion management, quality factor

PACC: 4230Q, 4265, 4281D

* Project supported by the Sichuan Provincial Research Foundation for Application Basic Research, China(Grant No. 2008JY0064), the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China(Grant No. NCET-08-0821) and the Opening Foundation of State Key Laboratory of Regional Fiber Communication Network and New Optical Communication System, China.

[†] E-mail: zj20032152@126.com