

文章编号 1004-924X(2016)08-1827-07

∞型平坦展宽频谱可调全光时延线

曹继红*, 陈 伟

(北京交通大学 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要:根据全光网交换和高速时分复用技术对时延调节的需求,提出一种新的基于光纤非线性效应的∞型全光再生可调时延线。该时延线由小段高非线性光纤、色散补偿光纤、光纤光栅滤波器和光纤放大器等构成;利用自相位调制、小量群速度色散效应、以及光波分裂效应获得携带近似线性时延的平坦化展宽光谱,并在波长可调谐光纤光栅的配合下实现时延控制,同时具有对工作波长进行适当变换的功能。单皮秒脉冲演变数值分析显示其在 10 nm 的波长范围内的调节量可达 300 ps 以上,在 40 Gbps 脉冲序列仿真传输实验中 Q 值可达 23.6。仿真实验结果表明:设计的时延线在保证输出脉冲质量仍然良好(比特误差率(BER) $\ll 10^{-12}$)的情况下获得了较大的时延调节量,能满足全光网和高速时分复用系统的需求。

关键词:全光时延线;可调时延线;光纤非线性效应;频谱展宽;色散;全光网交换;时分复用

中图分类号:TN929.11; TN915.05 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162408.1827

∞-type tunable all-optical delay line on flat broadened spectrum

CAO Ji-hong*, CHEN Wei

(Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network,
the Minister of Education of China, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

* Corresponding author, E-mail: jhcao@bjtu.edu.cn

Abstract: According to the requirements of all optical networks and high speed optical time division multiplex systems for the time delay adjustment, a novel tunable ∞-type delay line is proposed based on the optical fiber nonlinear effect. The delay line is consist of some all-fiber-type devices, such as special optical fibers, optical fiber gratings, and optical fiber amplifiers. On the self-phase modulation, group-velocity dispersion effect and the light splitting effect, the delay line obtains the flat broadened spectrum with an approximate linear time delay and implements the time delay control with the help of a tunable optical fiber grating. Moreover, it converts the operation wavelength in a certain range under the control. The numerical evolution results of single picosecond pulse indicate that the delay has been up to 300 ps in the wavelength range of 10 nm, and the maximum output Q value up to 23.6 in one 40 Gbps at the simulation experiment system. These experiment results show that the all-optical delay line gets better time delay properties under maintaining a good pulse output(Bit Error Ratio (BER) $\ll 10^{-12}$) and satisfies the requirements of all optical networks and high speed optical time division multiplex systems.

收稿日期:2016-03-02;修订日期:2016-05-04.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2010CB328206)

Key words: all-optical delay line; tunable delay line; optical fiber nonlinear effect; flat broadened spectrum; dispersion; all-optical network; time division multiplexing

1 引言

未来的全光路由器必须支持可变长度的信息包,即可以异步到达分组路由节点。这种路由器需要低信号失真的全光缓存器,通过时延管理解决光包同步或冲突的问题^[1]。时延管理方法有:利用已经报道的慢光光谱共振效应实现延迟^[2-3];基于同一介质中不同波长对应不同色散来实现大时间延迟^[4]。但这两种方法都还处于研究探索阶段,目前常采用光纤时延线(Fiber Delay Line, FDL)^[5]。它通过控制光纤的长度来调节时延大小,不仅调节控制很不方便,而且时延数值是离散的。另外,虽然现在单根光纤承载的波长通道数量已经达到了很高的水平^[6-8],但远不能满足全球用户的需求。所以在全光网络中必然存在波长冲突问题,这要通过变换波长来解决。常见的全光型波长变换主要基于非线性的光光互调制,不但成本高,而且结构复杂^[9-10]。

Hu 等人^[11]利用自相位调制效应(Self-Phase Modulation, SPM)和光纤色散在 10 Gb/s 系统中实现了最大时延为 170 ps 的调节量,而且把脉冲从 25 ps 压缩到了 20 ps。该方法同时使用了 3 种特种光纤:高非线性光纤(High Nonlinear Fiber, HNLF)、色散补偿光纤(Dispersion Compensation Fiber, DCF)和色散位移光纤(Dispersion Shift Fiber, DSF),所以成本较高;此外,所采用的链状装置布局也很复杂。文献^[12]报道了一种波长变换器,原理上也是利用 SPM,其结构简洁,但功能单一。

本文提出了一种全光再生型时延线,其基本原理同样利用了光纤的 SPM 和色散,但结合了文献^[11]和文献^[12]的优点,可同时实现较大延时和适量波长调节。该时延线基于全光纤器件,结构简单、调节方便,能保证光信号的质量和稳定。

2 时延线的基本原理和构成

时延原理是光波在光纤中的群时延量因色散的原因依赖于光脉冲的波长(或频率)。对单模光

纤有:

$$\tau = \frac{d\beta(\omega)}{d\omega}, \text{ 或 } d\tau = \beta_2(\omega)d\omega, \quad (1)$$

其中: τ 是群时延, β 是传播常数, ω 是角频率, β_2 是光纤的群速度色散(Group Velocity Dispersion, GVD)。所以在单模光纤中可以通过调节工作波长来获得不同时延。时延量由光纤的色散大小决定,而时延量随波长值变化的快慢由色散斜率(即三阶色散)决定。为了有较高的调节灵敏度和调节范围,需要选择色散斜率较大的光纤,如 DCF。同时为了让光信号在 DCF 中获得尽可能大的时延差别(即调节量),需要对光信号的频谱进行展宽。信号频谱的展宽采用 HNLF 的 SPM 效应来实现,波长的调节采用可调谐光带通滤波器(Optical BandPass Filter, OBPF)来实现。

本文提出的 ∞ 型时延线如图 1 所示。入射信号光经过掺铒光纤放大器-1(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)放大到 SPM 效应需要的高功率,再经 OBPF-1(采用光纤光栅)滤波后,通过环形器进入 HNLF 中。在这里,高峰值功率下光脉冲会发生 SPM 等非线性效应,使脉冲的频谱展宽。光信号再通过环形器进入光纤环路中,由可调 OBPF-3 选出某波长并在 DCF 作用下获得需要的延时。从 DCF 输出的光信号再经 EDFA-2 放大、及 HNLF 再扩展频谱,最后由 OBPF-2 调整到需要的波长输出。整个过程不但可以调节时延量和波长,还对光脉冲进行了再放大和整形。

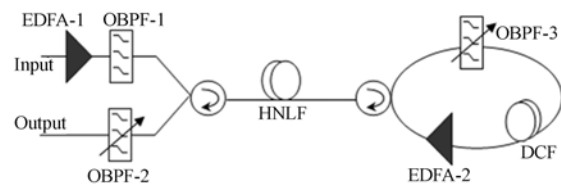


图 1 ∞ 型时延线结构示意图

Fig. 1 Scheme of ∞ -type delay line

3 时延线的性能分析

3.1 描述脉冲演变的方程

在 HNLF 中有多路光脉冲在传输,如来回的高峰值脉冲及它们可能产生的 Raman 散射信号

等,涉及 SPM、XPM、Raman 等多种效应^[13-15]。(Nonlinear Schrödinger equation, NLS) 来描述^[16]。即:

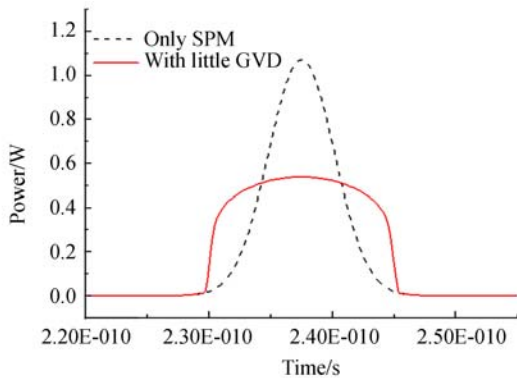
$$\frac{\partial A_j}{\partial z} + \frac{1}{v_{gj}} \frac{\partial A_j}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_j}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_j = i\gamma_j(1 - f_R)(|A_j|^2 + 2|A_m|^2)A_j + i\gamma_j f_R \int_0^\infty h_R(s) \{ [|A_j(z, t-s)|^2 + |A_m(z, t-s)|^2] A_j(z, t) + A_j(z, t-s) A_j^*(z, t-s) \} \exp[i(\omega_j - \omega_m)s] A_m(z, t) \} ds, \quad (2)$$

式中:A 是电场振幅, s 和 t 是时间变量, v_g 是群速度, β_2 是 GVD, γ 是非线性系数, α 是损耗系数, f_R 表示延时 Raman 效应对非线性极化贡献的比例, h_R 是拉曼响应函数, $j=1$ 或 $2, m=3-j$ 。方程左边包含了色散项和损耗项, 右边依次是 SPM 及 XPM 项、分子振动项、能量转移项(由 Raman 放大引起)。在 DCF 中, 因高色散采用忽略非线性效应的基本传输方程来描述脉冲的演变。

3.2 平坦展宽频谱

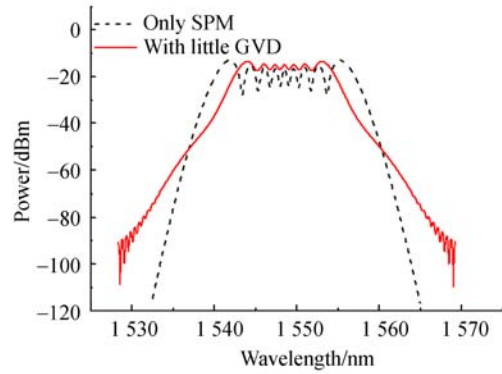
正向进入 HNLF 中的是无啁啾高斯脉冲, 半极大全宽为 6.2 ps, 工作波长为 1 548.5 nm, 经 EDFA-1 放大后峰值功率为 2 W。HNLF 非线性系数 $\gamma=16 \text{ W}^{-1}/\text{km}$, 色散参数 $D=-0.35 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})@1 550 \text{ nm}$ (可以导出 β_2), 损耗系数为 1.5 dB/km, 在长度约 2 km 处达到最宽的 SPM 展宽频谱。因为损耗较大, 不宜通过增长 HNLF 来获得更大的 SPM 频谱展宽。

首先只考虑 HNLF 中 SPM 和 GVD 相互作用的情形, 即式(2)中 $f_R=0$, 此时 SPM 起着决定性作用。但在小量正常色散的作用下, 会出现光波分裂现象^[17]。与纯 SPM 的结果比较, 适度的光波分裂存在两方面的影响: 一个是在时域, 脉冲边沿变陡, 脉冲有较大失真(如图 2(a)所示); 另一个是在频域, 频谱展宽范围稍有减小, 但频谱中



(a) 脉冲边沿变陡

(a) Pulse shape became steeper



(b) 频谱变窄, 但更平坦

(b) Spectrum became narrower, but flatter

图 2 HNLF 中小量正常色散的影响

Fig. 2 Effects of a small amount of dispersion in HNLF

间区域变得更平坦。本文中频谱振荡幅度减小了 5.5 dB, 而且平坦区的平均功率水平提高了 5.2 dB(如图 2(b)所示)。虽然脉冲的失真会产生负面影响, 但是频谱的平坦化有益于时延线输出波长的平滑调谐和最终输出脉冲的稳定性。如果把脉冲的失真控制在比特周期内合理的范围, 光波分裂是可以利用的。所以无需为了获得尽可能大的 SPM 频谱展宽而把输入的工作波长选在 HNLF 的零色散位置, 而且小量色散也有益于抑制四波混频(Four Wave Mixing, FWM)等其它非线性效应。

3.3 最大时延调节量

由∞型时延线原理可知, 其最大时延调节量由 DCF 的色散参数特性和光谱被展宽的范围两个因数决定。DCF 的色散斜率、长度及光谱范围值越大, 获得的最大时延调节量也越大。图 2 的分析结果显示, 本文中进入 DCF 的光谱平坦区是 1 544~1 553 nm。本文采用烽火的一款 DCF 产品, 其参数为: 色散斜率是 $-0.4 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 色散参数 $D=-100 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})@1 545 \text{ nm}$ 。在频谱平坦区内, 由 OBPF-3 滤出所需波长。OBPF-3 是一阶高斯可调滤波器, 带宽是 0.4 nm。

DCF 长度取优化值 300 m, 因为 DCF 长度不

同,色散总量也不同。总色散与输入 DCF 时的反向啁啾相互作用后,净余啁啾的符号和大小将影响脉冲质量,所以 DCF 有一个最佳的长度。这里根据 DCF 输出脉冲的质量选取长度优化值。

图 3 是 OBPF-3 滤波器选出的波长在通过 DCF 后所获得的时延量。时延-波长曲线是一条斜率为 -31.8 ps/nm 的直线(因为 DCF 的色散在 1550 nm 附近是近似线性的)。这表明 ∞ 型时延线的调节量是线性且灵敏的,理论上根据频谱平坦区范围,最大时延调节量达 300 ps 以上。

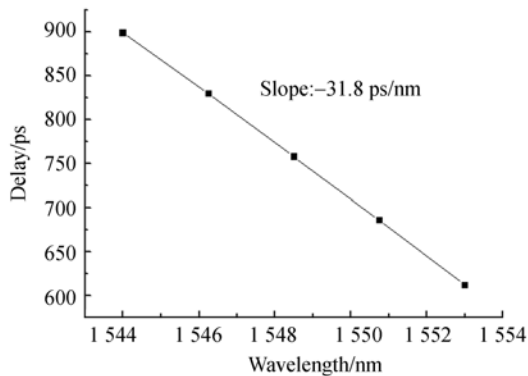


图 3 脉冲时延量与选出波长的关系

Fig. 3 Relationship between delay and selected wavelength

3.4 波长调节范围

全光再生对高速传输系统和全光网络来说是一个非常有益的功能^[18]。 ∞ 型时延线的主要功能是调节光脉冲信号的时延,同时因 2R(Reamplification and Reshaping)再生而具有一定的波长调整功能,所以时延线的波长调节范围分为两种情况。

系统主要作为时延线使用时,中心波长一旦根据所需时延量通过 OBPF-3 选定后,就不再改变。因而波长的调节范围仅限于 OBPF-3 选出的谱再回到 HNLf 展宽后的区域。图 4 为例,OBPF-3 滤出以 1553 nm 为中心的谱,再经 HNLf 展宽,此时能通过 OBPF-2 输出的最终波长是 $1551 \sim 1555 \text{ nm}$ 。在这种情况下,首先需要获得较大的时延量,因而用高功率脉冲进入 HNLf 来获得足够强的 SPM 效应以展宽频谱。其副作用是脉冲反向再次进入 HNLf 前会有较大的啁啾,使得再次展宽的频谱较窄,两侧不够平坦。

另一种是完全用作波长变换器。不考虑时延

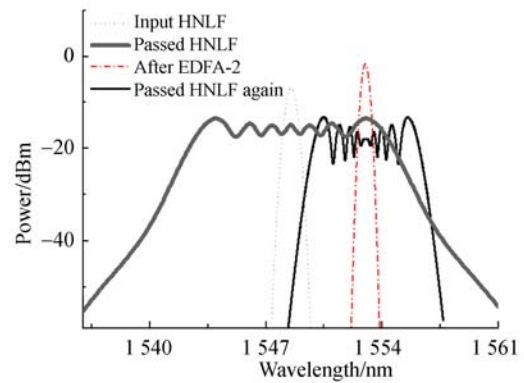


图 4 光脉冲的频谱在时延线中的演变过程

Fig. 4 Evolution of pulse spectrum in delay line

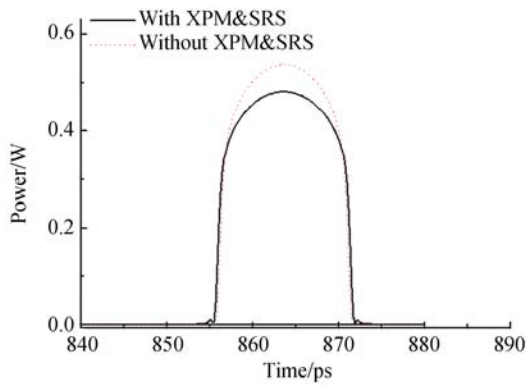
量时,通过 OBPF-2 和 OBPF-3 的配合,波长的最大调节范围是两次 HNLf 展宽的频谱的总和。仍以图 4 为例,OBPF-3 所在的 1553 nm 是 HNLf 第一次展宽频谱的右边缘。再经 HNLf 展宽频谱后,OBPF-2 能达到的右边缘是 1555 nm 。考虑到频谱的对称性,延时器能够调节的最大波长是 $1542 \sim 1555 \text{ nm}$ 。这种情况只有在不得已时使用,因为时延线里面的 DCF 不但多余,而且其大色散还具有负面影响。

3.5 其它非线性影响

在皮秒脉冲下,布里渊效应可以忽略;在有一定量色散的情况下,FWM 也可以不考虑。所以这里主要分析了交叉相位调制(Cross Phase Modulation, XPM)和受激拉曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)效应的影响。

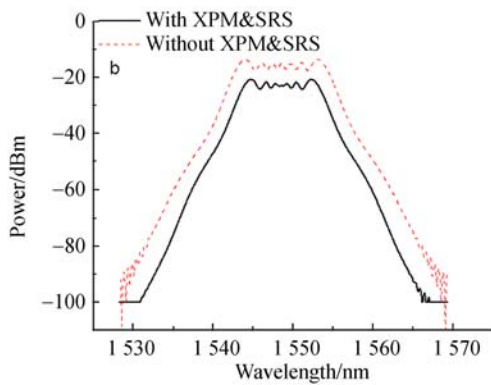
图 5 显示了包含 XPM 和 SRS 效应(但忽略弱散射光产生的效应)的数值分析结果,数据采集于脉冲第一次通过 HNLf 之后。对比有无 XPM 和 SRS 效应时的曲线可知:有 XPM 和 SRS 效应时,在时域脉冲边沿变得更陡,峰值功率下降,但脉宽没有太大变化;在频域,因脉冲峰值功率的降低,SPM 致频谱展宽的范围也减少(本文约有 1 nm 多,比前文平坦区谱宽减少约 10%)。XPM 给往返的脉冲带来了更多的啁啾,致使脉冲分裂现象更强,所以图 5(a)中脉冲边沿底部已经开始出现振荡结构,但没有出现 XPM 效应典型的非对称性,可见 XPM 此时还不是很强,不会转移较多的脉冲能量,所以脉冲峰值功率下降主要来源于 SRS 效应。NLS(式(2))中分子振动项和 Raman 放大项都会产生额外的功率消耗。

显然,在小量色散的影响下,XPM 和 SRS 效



(a) 脉冲变得更陡, 峰值功率下降, 两侧边沿底部出现纹波

(a) Pulse shape became steeper with a ripple at bottom and peak power decline



(b) 频谱变窄

(b) Spectrum became narrower

图 5 XPM 和 SRS 效应对光脉冲的影响
Fig. 5 Effect of XPM and SRS on pulse

应的最大影响是耗散了脉冲的部分功率, 减小了时延线的波长调节范围, 而对脉冲宽度和频谱的平坦度没有显著影响。通过环形腔再次经过 HNLF 后的脉冲, 也存在类似的现象。

4 仿真实验传输

把 ∞ 型时延线背靠背接入 40 Gb/s 的仿真传输系统中, 如图 6 所示。发送机发送的单脉冲参数同前, 序列为 16 位二进制特征码 “1010110011100010”。通过 ∞ 型时延线后, 接收机接收到的传输结果由数值仿真示波器 (Oscilloscope, OSC) 和误码仪 (Bit Error Rate Instrument, BERI) 测量。

图 7 是 OBPF-3 选择不同波长时 OSC 测量

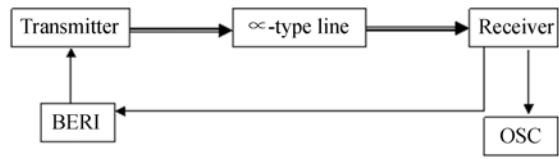


图 6 40 Gb/s 仿真实验系统

Fig. 6 40 Gb/s simulation experiment system

到的时延输出脉冲序列。图中以 1 553 nm 波长对应的时延为参考点, 测得 1 548 nm 脉冲序列延迟 185 ps, 1 544 nm 脉冲序列延迟 316 ps。这些脉冲的半极大全宽介于 5~6 ps, 比初始脉冲 (6.25 ps) 稍窄。

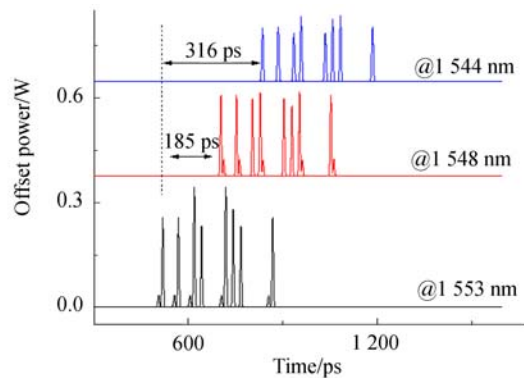
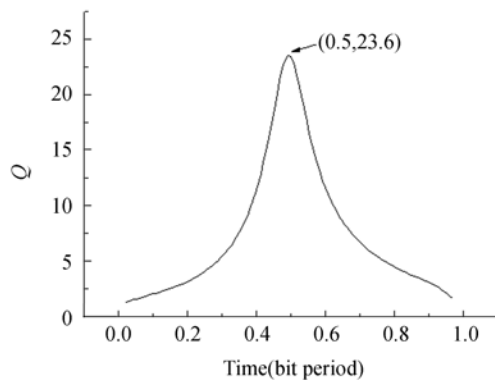


图 7 输出不同时延的脉冲序列

Fig. 7 Pulse sequence outputting different output delays

图 8 是 BERI 检测到的输出脉冲序列的波形质量, 此时 OBPF-3 中心波长置于 1 544 nm, OBPF-2 中心波长置于 1 546.5 nm。图 8(a) 中 Q 最大值是 23.6, 曲线较对称, 峰值位于比特周期的中间, 表明输出序列易于判决。图 8(b) 的眼图直



(a) 最大 Q 值为 23.6

(a) Maximum Q value is 23.6

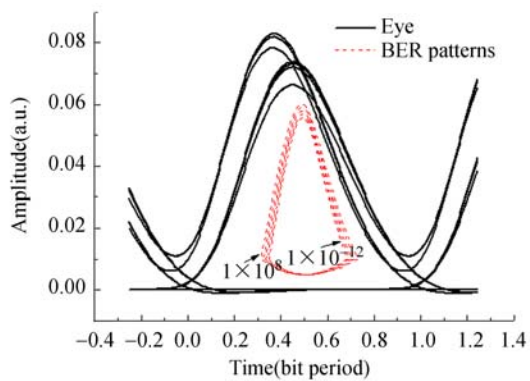
(b) 眼图, $BER \ll 10^{-12}$ (b) Eye pattern, $BER \ll 10^{-12}$

图 8 输出脉冲序列的 Q 值和眼图

Fig. 8 Output Q values of pulse sequence and eye pattern

观显示了通过时延线后脉冲的失真程度,而中间的 BER 模板 (BER patterns) 更好地表明输出脉冲序列的质量很好 ($BER \ll 10^{-12}$)。

参考文献:

- [1] OKAWACHI Y, BIGELOW M S, SHARPING J E, *et al.*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(15): 511-513.
- [2] DAHAN D, EISENSTEIN G. Tunable all optical delay via slow and fast light propagation in a Raman assisted fiber optical parametric amplifier: a route to all optical buffering [J]. *Optics Express*, 2005, 13(16): 6234-6249.
- [3] GAUTHIER D J, GAETA A L, BOYD R W. Slow light: From basics to future prospects [J]. *Photonics Spectra*, 2006, 40(3): 44-50.
- [4] SHARPING J, OKAWACHI Y, van HOWE J, *et al.*. All-optical, wavelength and bandwidth preserving, pulse delay based on parametric wavelength conversion and dispersion [J]. *Optics Express*, 2005, 13(20): 7872-7877.
- [5] ZHANG T, WANG J. Performance of fiber delay-line buffers in asynchronous packet-based optical switching networks with wavelength conversion [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2015, 28(9): 1537-1550.
- [6] 曹继红, 简水生, 陈勇, 等. 基于线性啁啾光纤光栅色散补偿的 2500km-10Gbps 无电中继传输系统 [J]. *光电工程*, 2006, 33(9): 101-105.
- [7] CAO J H, JIAN SH SH, CHEN Y, *et al.*. 2500 km-10 Gbps transmission system based on dispersion compensation CBG on G. 652 fiber without electric regenerator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(9): 101-105. (in Chinese)
- [8] RASHED A. Transmission capacity improvement of ultra wide wavelength division multiplexing (UV-WDM) submarine fibre cable systems for long haul depths [J]. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2013, 42(6): 697-706.
- [9] CAO J H, WANG M G, ZHANG J Y, *et al.*. 40Gbps NRZ transmitting over 500km based on broadband dispersion compensation CFBG [J]. *SPIE*, 2007, 6783: 0A.
- [10] WONG K K Y, GUO-WEI L, KWAN-CHI L, *et al.*. All-optical wavelength conversion and multicasting by cross-gain modulation in a single-stage fiber optical parametric amplifier [C]. *Anaheim, CA: OFC/NFOEC*, 2007: 1-3.
- [11] HYUN-DO J, MONROY I, KOONEN A J, *et al.*. All-optical data vortex node using an MZI-SOA switch array [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2007, 19(22): 1777-1779.
- [12] HU ZH Y, BLUMENTHAL D J. SPM-based 2R regenerative 10Gbps optically linearly controlled

5 结 论

本文根据全光网交换和高速光通信的时分复用技术对时延调节的需求,提出了平坦展宽频谱的易于实现的全光纤 ∞ 型时延线。首先介绍了通过展宽频谱的选择获得不同时延的工作原理,然后研究了时延线的工作性能。在适宜的脉冲峰值功率下,因 HNLF 中小量色散的存在,除 SPM 以外的非线性效应不会对 ∞ 型时延线性能产生严重的影响,利用光波分裂可使展宽频谱平坦化。仿真实验结果证明:40 Gbps 脉冲序列仿真传输系统的 Q 值达 23.6,时延线在保证输出脉冲质量 ($BER \ll 10^{-12}$) 的情况下可以获得较大的时延调节量,能满足全光网和高速时分复用系统的需求。

后续工作将进一步分析初始啁啾、脉宽、脉冲形状和调制码型等对 ∞ 型时延线性能的影响和适用性,并研究解决方案。

- delay line with 0ps to 170ps tuning range [C]. *California: OFC/NFOEC*, 2007:1-3.
- [12] MASAYUKI M, YOSHIYUKI S, HIRONOBU S. Wavelength-shift-free SPM-based 2R regeneration by bidirectional use of a highly nonlinear fiber [C]. *California: OFC/NFOEC*, 2007:1-3.
- [13] 易波, 贾文, 徐军, 等. 非线性偏振旋转被动锁模光纤激光器自动锁模电路 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(12):2994-3000.
- YI B, JIA W, XU J, *et al.*. Automatic mode-lock circuit used in NPR passive mode-locked fiber laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):2994-3000. (in Chinese)
- [14] 蔡托, 桑田, 张小伟. 色散和非线性效应对高斯脉冲综合影响的理论分析 [J]. *光子学报*, 2010, 39(5): 829-833.
- CAI T, SANG T, ZHANG X W, *et al.*. Theoretical analysis on dispersion and non-linearity affecting Gauss pulse propagation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(5): 829-833. (in Chinese)
- [15] 高静, 于峰, 匡鸿深, 等. 纳秒声光调 Q 光纤激光器产生超连续谱 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1138-1142.
- GAO J, YU F, KUANG H SH, *et al.*. Generation of supercontinuum spectra from acousto-optic Q-switched nanosecond fiber lasers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1138-1142. (in Chinese)
- [16] GOVIND P. AGRAWAL. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 第三版. 北京: 电子工业出版社, 2002: 179.
- AGRAWAL G P. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Third Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002:179 (in Chinese)
- [17] NAKATSUKA H A G D. Nonlinear picosecond-pulse propagation through optical fibers with positive group velocity dispersion [Z]. *Phys. Rev. Lett.*, 1981, 47:910-913.
- [18] 武玥, 闫娟娟, 郑铮. 全光再生器对波长路由网络性能改善的研究[J]. *光子学报*, 2011, 40(S1): 60-63.
- WU Y, YAN J J, ZHENG ZH. Improved performance of wavelength routing optical network with all-optical regenerator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(S1): 60-63. (in Chinese)

作者简介:



曹继红(1978—),男,四川邻水人,博士,讲师,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,2007年于北京交通大学获得博士学位,主要从事光通信和光传感方面的研究。E-mail: cjhjohn@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)