

文章编号:1004-4213(2011)09-1292-5

基于光纤光参量放大的光脉冲压窄技术的研究

张晓媛,于晋龙,罗俊,王文睿,吴波,郭精忠,杨恩泽

(天津大学 电子信息工程学院 光纤通信实验室,天津 300072)

摘 要:在高重复频率的光窄脉冲源中,为了获得更窄的脉冲,需要增加泵浦功率;但泵浦功率的提高会使光放大器的增益趋于饱和,放大的自发辐射噪声增强,脉冲光信噪比下降.为此,提出了利用啁啾管理和光纤光参量放大相结合的脉冲压窄方案.将强度调制后的泵浦光通过相位调制引入线性负啁啾,由于经参量过程后在新的闲频光上调啾会加倍,从而进一步增大了信号的谱宽,并通过色散补偿介质实现了光脉冲压缩.实验给出了 10 GHz 速率下的结果,通过泵浦光的相位调制在 0.5 W 平均泵浦光功率条件下得到了脉宽 19 ps 的光脉冲,结果与理论分析基本吻合.

关键词:光通信;光脉冲压窄;光参量放大;相位调制;频率啁啾

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114009.1292

0 引言

可靠的低抖动、高重复频率的光窄脉冲源在光纤通信的很多领域都有着重要的应用^[1-2],如光归零码产生、光时分复用(Optical Time-Division Multiplexing, OTDM)技术,高速光信号处理以及光取样等.常见的产生光窄脉冲的技术有:增益开关分布反馈(Gain-Switched Distributed Feedback, GS-DFB)激光器^[3]、锁模半导体激光器^[4]或光纤环形激光器^[5]、孤子效应压缩技术^[6]、连续光通过相位调制后压缩啁啾产生光脉冲^[7]以及光纤光参量放大器(Fiber Optical Parametric Amplifier, FOPA)^[8-9]等.相比较而言,基于 FOPA 产生的光窄脉冲源由于在波长上大范围可调,且输出功率高,还可以生成可用于波分复用系统的多波长光脉冲,使其具有很好的应用潜力,成为近年来研究的热点.在这种方案中,注入的信号光一般为连续光(Continuous Wave, CW),而泵浦光为脉冲或正弦型强度调制光.利用参量过程中信号增益随泵浦功率成指数变化的特点,在信号光和闲频光上可以生成一个占空比更小的脉冲.要想获得更窄的脉冲,可以增加泵浦功率.但是,随着泵浦功率的提高,光放大器的增益逐渐趋于饱和,放大的自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)噪声增强,脉冲光信噪比(Optical Signal Noise Ratio, OSNR)下降.因此,在不提高泵

浦功率的条件下获得更高质量的光脉冲是一项很有意义的工作.

基于此,本文提出了在 FOPA 基础上实现脉冲进一步压窄的新方案,即将 FOPA 技术与啁啾管理技术相结合,利用相位调制将泵浦光引入线性负啁啾,参量过程后在所生成的闲频光上调啾加倍,光谱进一步展宽,通过色散补偿介质实现脉冲的进一步压缩.

1 原理分析

在单泵浦光纤光参量放大过程中,假设泵浦功率远大于信号功率,且在参量过程中泵浦功率没有消耗,此时若相位严格匹配($\kappa=0$, κ 为相位失配量),且 $gL \gg 1$ (参量增益 $g = \sqrt{(\gamma P_p)^2 - (\kappa/2)}$, 其中, γ 为非线性系数, P_p 为泵浦光功率, L 为光纤长度),依据四波混频的线性耦合振幅方程,可以得出信号光最大增益的近似解^[10]

$$G_s \approx \frac{1}{4} \exp(2\gamma P_p L) \quad (1)$$

若泵浦光被一频率为 f_m 的正弦微波信号强度调制,即 $P_p(t) = P_0(1 + \sin 2\pi f_m t)$ (P_0 为泵浦光平均功率),这时信号光增益

$$G_s \approx \frac{1}{4} \exp[2\gamma P_0(1 + \sin 2\pi f_m t)L] \quad (2)$$

又因为 $G_i = G_s - 1$ ^[11],所以在闲频光上

基金项目:国家自然科学基金(No. 60736035, No. 60977053)资助

第一作者:张晓媛(1981-),女,博士研究生,主要研究方向为高速光纤通信系统. Email: zh_xiao_yuan@126.com

导师(通讯作者):于晋龙(1969-),男,教授,主要研究方向为高速光纤通信系统和全光信息处理. Email: yujinlong@tju.edu.cn

收稿日期:2011-05-09;修回日期:2011-06-07

$$G_i \approx \frac{1}{4} \exp [2\gamma P_0 (1 + \sin 2\pi f_m t) L] - 1 \quad (3)$$

图 1 给出了由式(3)所决定的泵浦功率与增益的关系(假设调制频率为 10 GHz,非线性系数为 $10 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$,光纤长 500 m).从图 1 和式(3)可以看出,增益与泵浦功率近似成指数关系,在非饱和情况下,泵浦光功率越大,增益调制曲线会越窄,因此所生成的脉冲也越窄.

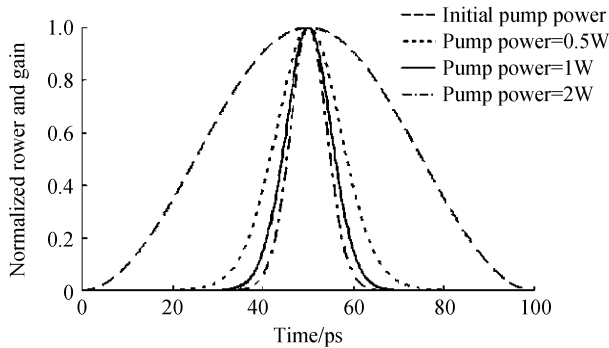


图 1 归一化的泵浦功率与增益

Fig. 1 Normalized pump power and gain

若泵浦光被正弦信号强度调制后,再被同频的正弦信号相位调制,这时泵浦光光场可以表示为

$$E(t) = E_0 \sqrt{1 + \sin(2\pi f_m t)} \times \exp \{-j[\omega_p t + \Delta\theta \sin(2\pi f_m t + \Delta\varphi)]\} \quad (4)$$

式中: ω_p 为泵浦光角频率, $\Delta\theta$ 为相位调制度, $\Delta\varphi$ 为泵浦光强度调制与相位调制之间的相位差,这时泵浦光的瞬时频率可以表示为

$$v_p(t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_p(t)}{dt} = \frac{\omega_p}{2\pi} + f_m \Delta\theta \cos(2\pi f_m t + \Delta\varphi) \quad (5)$$

光频率啁啾则为

$$\frac{\partial v_p(t)}{\partial t} = -2\pi f_m^2 \Delta\theta \sin(2\pi f_m t + \Delta\varphi) \quad (6)$$

可以看出,当 $\Delta\varphi = 2m\pi$ 时,相位调制引入的啁啾变化与强度调制引起的光功率变化保持同步,即在光强最高点与相位调制引入的最大负啁啾相对应,在光强最低点与最大正啁啾相对应,且在这两点附近,光频啁啾几乎保持线性.

图 2 给出了泵浦光功率与瞬时频率关系的示意图.适当的调整相对时延,使得相位调制引入的线性负啁啾部分与输入时钟信号的能量最高点相对应.从图上可以看出,相位调制引入线性负啁啾的同时也引入了部分非线性啁啾和正啁啾,而色散补偿光纤(Dispersion Compensation Fiber, DCF)只能补偿线性负啁啾,因此非线性啁啾和正啁啾将成为逸散光而形成基座和旁瓣.计算可以得出,此时泵浦光引入负啁啾和正啁啾部分能量比约为 4.5 : 1.调制后

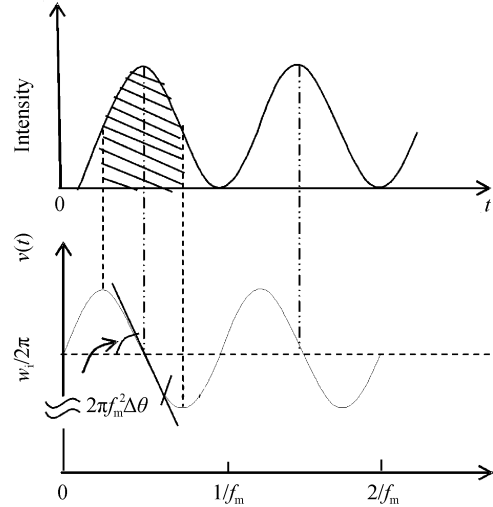


图 2 泵浦功率与瞬时频率的关系

Fig. 2 Relationship between the pump power and the instant frequency

泵浦光的最大负啁啾为 $\partial v_p(t) / \partial t = -2\pi f_m^2 \Delta\theta$.经参量放大后,在闲频光频率上啁啾加倍^[11],对应的最大啁啾率为

$$(\partial v(t) / \partial t)_{\max} = -4\pi f_m^2 \Delta\theta \quad (7)$$

当这个带啁啾的闲频光通过适当的色散介质后(如 DCF),脉冲将被压窄.色散对带啁啾光场的压窄作用可以用参量 B 表示为^[12]

$$B = -(\text{频率啁啾}) \times (\text{群延时色散}) = -(\partial v / \partial t) \times (\partial \tau / \partial v) = -4\pi f_m^2 \Delta\theta (\partial \tau / \partial v) \quad (8)$$

可以看出,当 $(\partial \tau / \partial v) \approx -1 / (\partial v / \partial t)_{\max}$ 时,闲频光的频率啁啾可以得到最佳补偿,对应的脉冲宽度最窄.又由 $c = \lambda v$ (c 表示真空中的光速, λ 表示光的波长, v 表示光在介质中的频率),可以得出频率变化与波长变化的关系 $\Delta v = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda$,所以最佳补偿时应满足

$$(\partial \tau / \partial v) = -\frac{\lambda^2}{c} \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} \approx -1 / (\partial v / \partial t)_{\max} \quad (9)$$

由此可以计算出所需最佳的色散量

$$L \cdot D \approx \frac{c}{\lambda^2} \frac{1}{(\partial v / \partial t)_{\max}} = -\frac{c}{4\pi \lambda^2 f_m^2 \Delta\theta} \quad (10)$$

实验中,微波源输出频率为 10 GHz,相位调制度约为 1π ,式(10)可计算出实现脉冲最窄压缩所需要的色散值为 -32 ps/nm .由于理论计算只考虑啁啾为线性啁啾的情况而忽略了非线性啁啾部分,所以实验需要的最佳色散量与理论计算结果可能会相差较多.因此,采用仿真软件 optisystem 进行仿真分析,依据仿真结果来进一步指导实验.仿真结果如图 3,仿真中实现最窄压缩需要的色散值为 -60 ps/nm ,对应的窄脉冲宽度约为 10 ps.

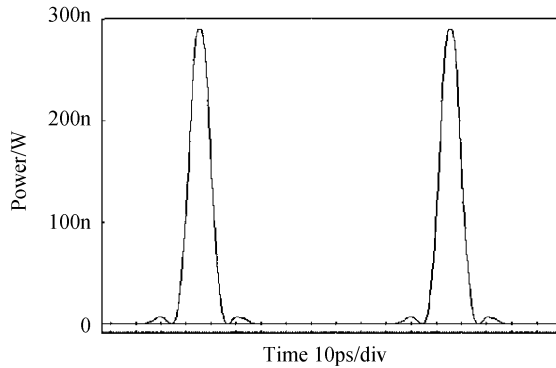
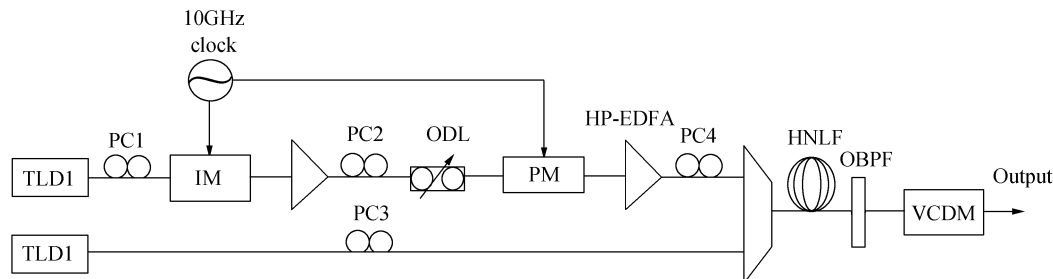


图3 仿真输出波形
Fig. 3 Simulated output of the waveform

2 系统实验与结果讨论

实验结构如图4. 实验中泵浦光源与信号光源均选用可调激光器(Agilent81640A).

调制信号经微波放大器将功率放大至20 dBm, 直接驱动强度调制器, 产生10 GHz的时钟光信号, 如图5(c), 泵浦光波长 $\lambda_p = 1547.7$ nm. 该时钟光信号经过掺铒光纤放大器、可变光延时线和偏振控制器后, 进入铌酸锂(LiNbO₃)相位调制器进行相位调制, 所施加的电调制信号频率为10 GHz, 功率为18.5 dBm, 所使用的相位调制器的 $V_\pi = 5$ V, 此时



TLD: Tunable laser diode; PC: Polarization controller; IM: Intensity modulator; ODL: Optical delay line; PM: Phase modulator; HP-EDFA: High power Erbium-doped fiber amplifier; WDM: Wavelength division multiplexer; HNLF: High nonlinear fiber; OBPF: Optical band-pass filter; VCDM: Variable chroma dispersion module

图4 基于光纤光参量放大的脉冲压窄实验原理图
Fig. 4 Schematic diagram of optical pulse compression based on FOPA

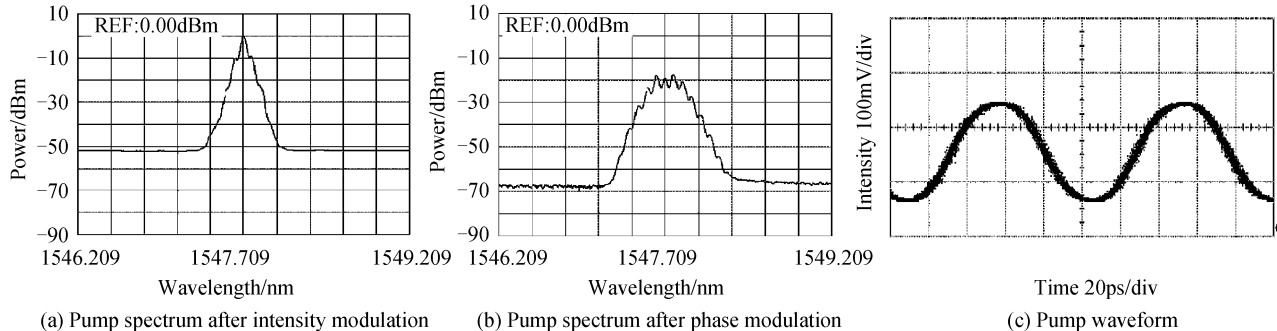


图5 泵浦光光谱和波形
Fig. 5 Pump spectra and waveforms

所得调制度约为 1π . 适当调整可变光延时线, 使调制产生的线性负啁啾部分与输入时钟泵浦光的能量最高点相对应, 以引入最大的线性负啁啾. 泵浦光经正弦强度调制和相位调制后的光谱分别如图5(a)和(b), 可以清楚地看到相位调制后泵浦光的光谱得到了一定程度的展宽.

相位调制后的泵浦光脉冲进入大功率光放大器进行放大, 输出平均光功率为27 dBm. 然后与连续信号光(波长 $\lambda_s = 1549.3$ nm, 功率1.5 dBm)一起耦合注入到高非线性光纤(Highly Nonlinear Fiber, HNLF)中. 实验中使用的HNLF长500 m, 非线性系数 $\gamma = 11$ W⁻¹/km, 零色散波长为1545 nm, 色散斜率为0.03 ps/nm² km. 在参量放大的输出端

用带宽1 nm的光带通滤波器滤出闲频光(波长 $\lambda_i = 1546.1$ nm).

首先, 在相位调制器上不加调制信号, 观测FOPA之后的闲频光波形, 如图6(a). 此时的脉冲宽度大约为36 ps, 这相对于时钟泵浦光信号已有一定程度的压窄. 然后, 在相位调制器上加上10 GHz的正弦调制信号, 此时得到的闲频光光谱的半极大全宽为0.475 nm, 如图6(c). 由于这时的闲频光脉冲带有线性负啁啾, 因此可以利用可调的色散色散模块(Variable Chroma Dispersion Module, VCDM)对其进行啁啾补偿, 从而实现脉冲的进一步压窄. 调节VCDM, 同时用示波器观测输出脉冲波形, 可以看到当VCDM的色散值为-58 ps/nm时

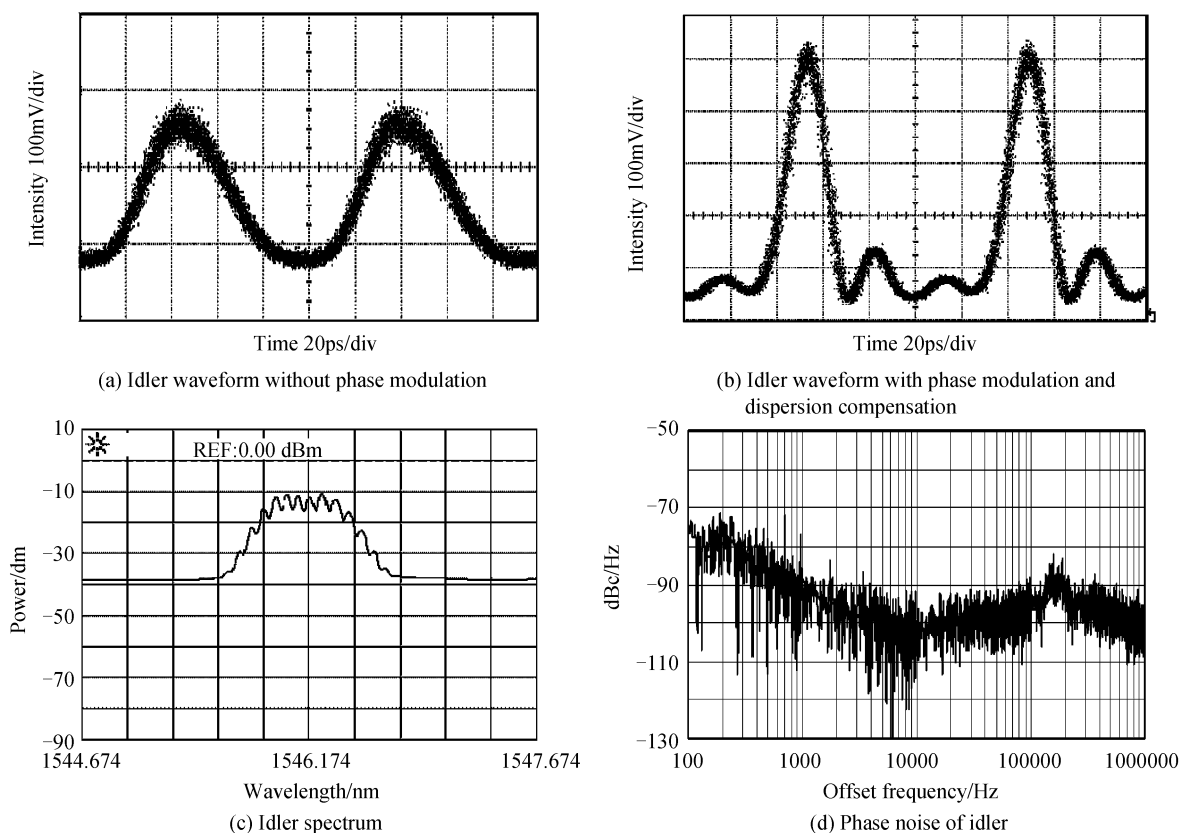


图6 闲频光波形,光谱和相位噪音

Fig. 6 Idler waveform, spectrum and phase noise

得到的脉冲最窄,脉宽约 19 ps,与不加相调的情况相比压窄了近 17 ps. 而与仿真得到的光脉冲相比,实验观测到的脉冲较宽,这主要是由于受示波器带宽的限制,本文所使用的示波器带宽为 40 GHz.

为了进一步检测窄脉冲的质量,本文采用电谱分析仪(HP 8563E)测量频偏从 100 Hz 到 1 MHz 的相位噪音,如图 6(d). 该 10 GHz 光脉冲的相位噪音为 0.017 RADIANS,对应的瞬时抖动为 271 fs. 同时从图 6(b)可以看出脉冲消光比约为 20 dB,脉冲源的质量很好,可以满足 OTDM 等实际系统的应用.

3 结论

理论分析了基于光纤参量放大光脉冲源的光场特性,并提出了基于该结构实现光脉冲进一步压缩的方法,得出了利用相位调制和啁啾补偿可以在不提高泵浦功率的条件下获得更窄的脉冲的结论. 实验中,在 0.5 W 平均泵浦功率条件下将重复频率为 10 GHz 的光脉冲压窄了 17 ps,得到的结果与理论分析基本吻合. 如果要得到更窄的光脉冲,还可以通过增强相位调制器的调制电压,从而增强调制深度来实现.

参考文献

[1] YU C, YAN L S, LUO T, *et al.* Width-tunable optical RZ

pulse train generation based on four-wave mixing in highly nonlinear fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(3): 636-638.

- [2] GUPTA G C, FUKUCHI K, OGATAT T. Highly efficient 1 Tb/s (50ch × 20 Gb/s)-2000 km RZ transmission experiment by suppressing XPM with optimized pulsewidth[C]. *Optical Fiber Communication Conference 2000*, **1**: 152-154.
- [3] CONSOLI A, ESQUIVIAS I, HERNANDEZ F J L, *et al.* Characterization of gain-switched pulses from 1.55 μm VCSEL [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(11): 772-774.
- [4] LATKOWSKI S, MALDONADO-BASILIO R, LANDAIS P. Short pulse generation with 40 GHz passively-mode locked Q-dashed fabry-pérot Laser[C]. *Transparent Optical Networks, 2009. ICTON '09. 11th International Conference on*, 2009: 1-4.
- [5] CHEN Zhe, SUN Hong-zhi, MA Shao-zhen, *et al.* Dual-wavelength mode-locked erbium-doped fiber ring laser using highly nonlinear fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(24): 2066-2068.
- [6] MURPHY T E. 10-GHz 1.3-ps pulse generation using chirped soliton compression in a raman gain medium [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(10): 1424-1426.
- [7] KOMUKAI T, YAMAMOTO T, KAWANISHI S. Optical pulse generator using phase modulator and linearly chirped fiber bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(8): 1746-1748.
- [8] CLAUSEN A T, OXENLOWE L, PEUCHERET C, *et al.* 10-GHz return-to-zero pulse source tunable in wavelength with a single- or multiwavelength output based on four-wave mixing in a newly developed highly nonlinear fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(1): 70-72.
- [9] TOROUNIDIS T, SUNNERUD H, HEDEKVIST P O, *et al.*

- 40-Gb/s transmission using RZ-pulse source based on fiber optical parametric amplification [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(8): 1159-1161.
- [10] GOVIND P A. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010: 288-298.
- [11] HANSRYD J, ANDREKSON P A, WESTLUND M, *et al.* Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, **8**(3): 506-520.
- [12] KOBAYASHI T, YAO H, AMANO K, *et al.* Optical pulse compression using high-frequency electrooptic phase modulation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1988, **24**(2): 382-387.

Optical Pulses Compression Based on Fiber-optical Parametric Amplifier

ZHANG Xiao-yuan, YU Jin-long, LUO Jun, WANG Wen-ru, WU Bo, GUO Jing-zhong, YANG En-ze
(Optical Fiber Communication Laboratory, School of Electronic and Information Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For optical short pulse with high frequency, it is needed to improve the pump power to obtain more shorter pulse; but, as increasing of the pump power, the gain of the amplifier is becoming saturated, and amplified spontaneous emission noise (ASE) is increasing, so signal to noise ratio (SNR) is decreased. A scheme of pulse compression through fiber-optical parametric amplifier and chirp management is proposed. First the pump light is phase modulated after intensity modulation to introduce linear positive chirps, after the parametric process the frequency chirps of the idler are doubled, so its spectral width is increased, the pulse can be compressed through dispersion compensation medium. The experimental results of 10GHz operation is demonstrated, with 0.5W average pump power and phase modulated pump power, idler pulse is observed with 19ps pulse width.

Key words: Optical communication; Optical pulse compression; Optical Parametric Amplifier (OPA); Phase Modulation (PM); Frequency chirp