

文章编号: 0258-7025(2007)09-1241-04

10 GHz 超低抖动光短脉冲源

胡 浩¹, 于晋龙¹, 张立台¹, 李 岩², 江 阳¹, 杨恩泽¹

(天津大学¹ 电子信息工程学院光纤通信实验室, 光电信息技术科学教育部重点实验室,)
² 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 报道了一种新型的重复频率为 10 GHz, 脉宽为 5.3 ps, 抖动为 184 fs 的高稳定光短脉冲源。将大信号调制半导体激光器产生的 10 GHz 光脉冲, 先送入 LiNbO₃ 电光相位调制器增强负啁啾, 并使光谱进一步展宽, 再通过色散补偿光纤 (DCF) 压缩脉冲啁啾, 可得到光短脉冲。由于大信号调制激光器输出的光脉冲本身具有负啁啾, 而通过相位调制器的光脉冲在不同的时间间隔内既有正啁啾也有负啁啾, 通过适当调整进入相位调制器的光脉冲时延, 使其通过相位调制器后累加产生更大的负啁啾, 再利用正色散光纤压缩啁啾, 从而得到低抖动且无基座的光短脉冲。

关键词 光纤通信; 超低抖动光脉冲; 光脉冲压缩; 直调激光器; 相位调制; 色散补偿光纤

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

10 GHz Short Optical Pulses Source with Ultra-Low Jitter

HU Hao¹, YU Jin-long¹, ZHANG Li-tai¹, LI Yan², JIANG Yang¹, YANG En-ze¹

¹Laboratory of Optical Fiber Communication, Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, School of Electronic Information Engineering,

²College of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The highly stable 5.3 ps wide optical pulse source with a repetition rate of 10 GHz, and 184 fs timing jitter is reported. 10 GHz optical pulses generated by a deeply directly modulated laser (DML) enter a LiNbO₃ electrooptic phase modulator to enhance the negative chirp and enlarge pulse width, and pass through dispersion compensation fibers (DCF) to compress chirps. The optical pulses generated by DML have negative chirp, and phase modulation can generate both positive and negative chirp at different timing intervals. By appropriately tuning optical time delay before optical pulses enter the phase modulator, the output optical pulses can have more negative chirp. Then, the chirped optical pulses can be compressed into low timing-jitter short pulses without pedestal by positive dispersion fiber.

Key words optical fiber communication; ultra-low jitter optical pulse; optical pulse compression; directly modulated laser; phase modulation; dispersion compensation fiber

1 引言

可靠的低抖动, 高重复频率的光短脉冲源在光纤通信的很多领域, 如光归零码产生, 光时分复用 (OTDM) 技术, 光分组交换以及高速光信号处理等

都有着重要应用^[1,2]。常用的产生光短脉冲的技术有: 锁模半导体和光纤环激光器、增益开关分布反馈布拉格 (DFB) 激光器、大信号调制激光器、连续光通过相位调制后压缩啁啾产生光脉冲。锁模激光器可以产生高重复频率的短脉冲, 但需要复杂的腔长稳

收稿日期: 2006-12-04; 收到修改稿日期: 2007-04-03

基金项目: 国家自然科学基金 (60572013), 高等学校博士学科点专项科研基金 (20030056047) 以及天津市自然科学基金 (06YFJMJC01400) 资助项目。

作者简介: 胡 浩 (1980—), 男, 黑龙江人, 博士研究生, 主要从事光纤通信系统、光短脉冲产生、光分组交换、偏振模色散补偿方面的研究。E-mail: huhaotju@yahoo.com.cn

导师简介: 于晋龙 (1969—), 男, 山西人, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光纤通信系统和高速全光信号处理方面的研究。E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

定装置^[3~5];增益开关半导体激光器具有结构简单,重复频率易于调整的优点,但同时也有输出脉冲抖动较大的缺点^[6,7];大信号调制激光器产生的光脉冲抖动较小,但脉冲宽度较宽^[8];连续光通过LiNbO₃ 相位调制后,既产生正啁啾也产生负啁啾,压缩一部分啁啾得到脉冲的同时,另一部分啁啾将成为逸散光而形成很大的基座^[9,10]。

本文报道了一种将大信号调制激光器与LiNbO₃ 电光相位调制器级联,以得到具有更大负啁啾的光脉冲,再用正色散光纤(如色散补偿光纤(DCF))消啁啾,从而产生光短脉冲的方法。一方面,相位调制器可以增强大信号调制激光器输出光脉冲的负啁啾,使输出的光谱得到展宽;另一方面,大信号调制激光器产生的光脉冲由于宽度较窄,可以形成比较理想的开关窗口,能够完全消除相位调制器产生的正啁啾部分,从而消除脉冲基座。

2 理论分析

为便于理论分析,可将直调激光器(DML)输出的脉冲作为带负啁啾的高斯脉冲进行分析,其电场可表示为

$$E(t) = E_0 \exp\left(\frac{1 + jCt^2}{2T_0^2}\right) \exp(-j\omega_0 t), \quad (1)$$

式中 E_0 为电场强度, ω_0 为角频率, C 为啁啾参量, T_0 为脉冲幅值 $1/e$ 处的半宽度。当这个啁啾高斯脉冲受到调制频率为 f_m 的相位调制后,电场变为

$$E(t) = E_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right) \times \exp\left\{-j\left[\frac{Ct^2}{2T_0^2} + \omega_0 t + \Delta\theta \sin(2\pi f_m t)\right]\right\}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\theta$ 为调制指数,调制光的瞬时频率可表示为

$$\nu(t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{Ct}{2\pi T_0^2} + \frac{\omega_0}{2\pi} + f_m \Delta\theta \cos(2\pi f_m t), \quad (3)$$

光频率啁啾则为

$$\frac{\partial \nu}{\partial t} = \frac{C}{2\pi T_0^2} - 2\pi f_m^2 \Delta\theta \sin(2\pi f_m t), \quad (4)$$

式中 $C < 0$, 当 $f_m t = n + 1/4$ (n 取整数) 和 $f_m t = n + 3/4$ 时,啁啾近似为线性且啁啾的绝对值分别为最大值和最小值。如图 1 所示,通过适当调整光延时,保证大信号调制光脉冲产生的开关窗口,恰好使得相位调制器产生的负啁啾通过,同时滤除相位调制器产生的正啁啾。这样,大信号调制光脉冲的负啁啾得到增强,光谱宽度得以进一步展宽,通过合适

长度的色散补偿光纤(DCF)后,可以得到更窄的光脉冲。

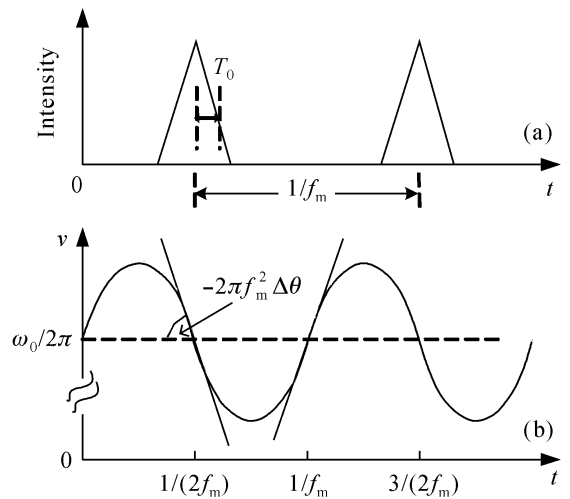


图 1 具有负啁啾的大信号调制光脉冲通过相位调制器后,负啁啾得到增强的示意图

(a) 大信号调制光脉冲的幅度变化;(b) 相位调制器的频率变化
Fig.1 Negative chirps of pulses are enhanced after the deeply directly modulated optical pulses with negative chirps pass through phase modulator
(a) amplitude change of the modulated optical pulses;
(b) frequency change of the phase modulator

3 实验装置与结果

低抖动光短脉冲源的实验装置如图 2 所示。10 GHz 的正弦射频(RF)信号直调在多量子阱分布反馈布拉格(MQW-DFB)半导体激光器上,使其工作在大信号调制状态 ($I_{rf} = 63$ mA, $I_{bias} = 50$ mA, $I_{threshold} = 18$ mA),当调制信号继续增大时,激光器进入增益开关状态,虽然可以输出更窄的光脉冲,但抖动也随之增大,不利于传输。大信号直调激光器产生具有负啁啾的光脉冲,波长为 1553 nm,脉冲的波形及光谱如图 3 所示,脉冲宽度为 28 ps,抖动为 184 fs,光谱的半峰全宽(FWHM)为 0.494 nm。光脉冲经过可变光延时线(ODL)及偏振控制器(PC)后,进入 LiNbO₃ 相位调制器进行相调,相调指数为 2.8 π 。调制信号是经过微波放大器

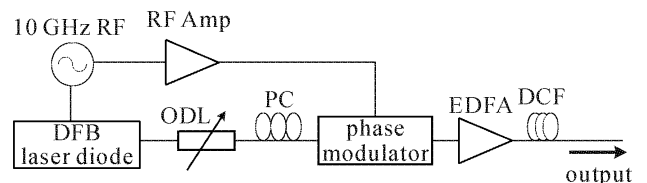


图 2 低抖动光短脉冲源的实验装置

Fig.2 Experimental setup for short optical pulses source with low-jitter

放大后的 10 GHz 正弦射频信号, 输出功率为 23.6 dBm。适当调整可变光延时线, 使大信号调制光脉冲与相调产生的负啁啾对应, 这样输出的光脉冲具有更大的负啁啾, 可引起光谱的进一步展宽, 如图 4 所示, 光谱的半峰全宽为 0.921 nm。由于大信号调制多量子阱分布反馈布拉格半导体激光器所产生的光脉冲同时带有非线性啁啾, 而色散补偿光纤只能补偿线性啁啾, 因此最终输出的光脉冲仍有非线性啁啾成分, 光谱也未能呈现理想的高斯型。若要进一步改善传输特性, 可以利用带通滤波器滤除非线性啁啾后得到的变换极限脉冲。输出光脉冲经过掺铒光纤放大器(EDFA)后, 用 281 m 长的色散补

偿光纤 ($D = -87.8 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$) 补偿光脉冲的负啁啾, 最终输出 5.3 ps 的光脉冲, 如图 5 自相关曲线所示。由于大信号调制光脉冲产生的开关窗口只能通过相调产生的负啁啾, 而滤除了相调产生的正啁啾, 因而最终输出的光脉冲有很高的基座抑制比, 达 20.5 dB, 如图 6 所示可从示波器示值计算得出。

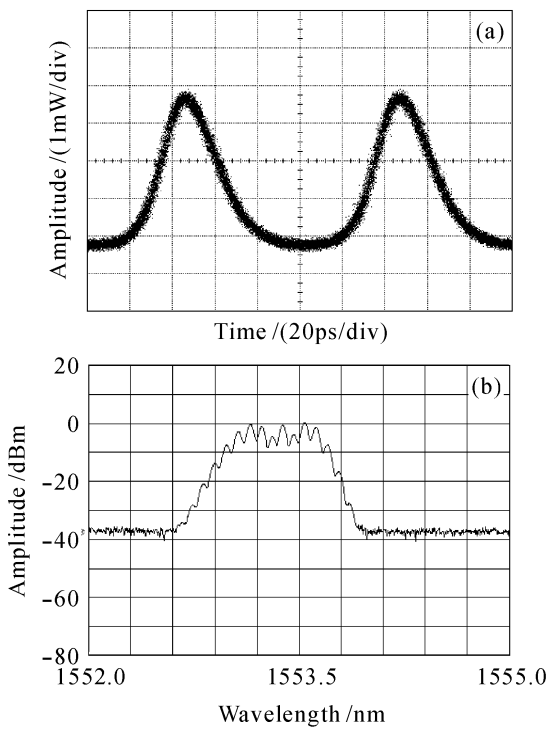


图 3 大信号调制光脉冲
(a) 波形图; (b) 光谱图

Fig. 3 Deeply directly modulated optical pulse pulses
(a) waveform; (b) spectrum

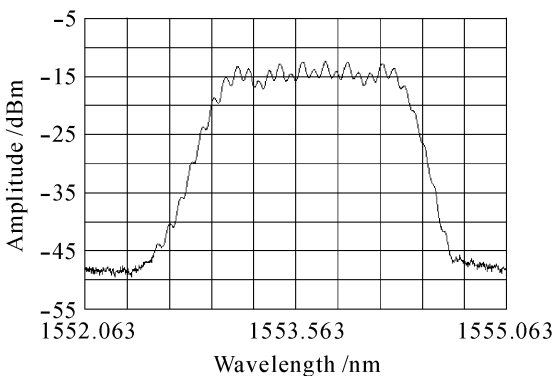


图 4 经过相位调制后大信号调制光脉冲的光谱
Fig. 4 Spectrum of deeply directly modulated optical pulse after phase modulation

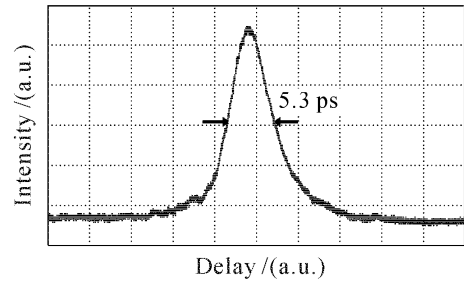


图 5 10 GHz 短脉冲的自相关曲线
Fig. 5 Autocorrelation trace of 10 GHz short pulse

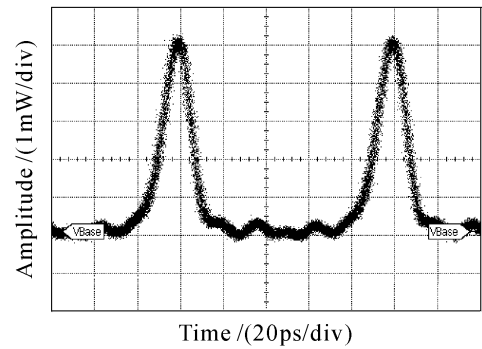


图 6 由示波器测量出的基座抑制
Fig. 6 Pedestal suppression measured by oscilloscope

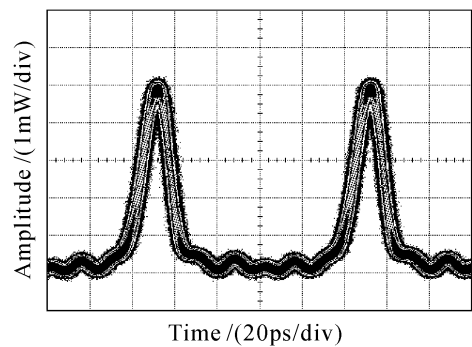


图 7 短脉冲的眼图测量
Fig. 7 Eye diagram of short pulses

衡量光脉冲质量的两个指标包括: 长时间稳定性以及瞬时抖动。实验用示波器(Agilent 86100A)眼图模式记录输出光脉冲 5 min, 如图 7 所示。从图中可以看出, 由于环境和温度变化, 脉冲波形略微变粗, 但相位没有明显变化, 幅度没有明显起伏。由于示波器自身抖动较大(约 1 ps), 采用电谱分析仪(HP 8563E)测量频偏从 100 Hz 到 1 MHz 的相位噪声, 如图 8 所示, 10 GHz 光脉冲的相位噪声为

0.0115 RADIANS,对应的瞬时抖动为184 fs;而10 GHz信号源(HP 83732A)的相位噪声为0.01 RADIANS,对应的瞬时抖动为160 fs。从图8以及计算出的抖动可知,10 GHz光脉冲的抖动已经十分接近信号源的抖动。

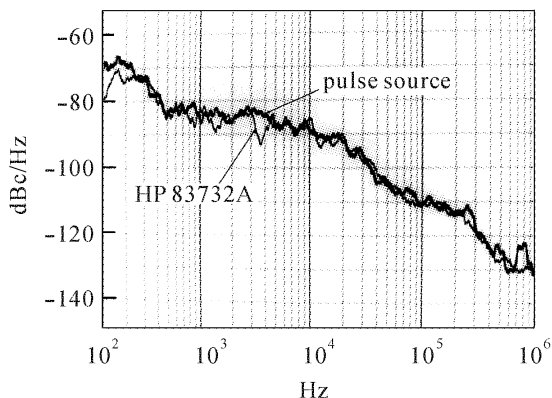


图8 HP 83732A 信号发生器与短脉冲源的相位噪声比较

Fig. 8 Comparison of phase noise between HP 83732A signal generator and the proposed short pulses source

4 结 论

从实验和理论上验证了利用LiNbO₃相位调制器增强大信号调制产生的光脉冲的负啁啾,再通过适当长度的色散补偿光纤补偿负啁啾,从而得到光短脉冲的方法。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或者级联相位调制器,从而增强调制深度来实现。另一方面,如果能采用合适的带通滤波器滤除输出脉冲的非线性啁啾,则可得到变换极限的光脉冲。

本短脉冲源还具有重复频率和脉冲宽度易于调整的特点。只需改变调制信号的发射频率,并相应调节色散补偿光纤的长度,就可以得到不同重复频率的光脉冲;当调制频率一定时,只需调整加在相位调制器上的电信号功率,从而改变调制深度,再相应

调整色散补偿光纤的长度,便可得到不同脉冲宽度的光脉冲。

参 考 文 献

- 1 G. C. Gupta, K. Fukuchi, T. Ogata. Highly efficient 1 Tb/s (50 ch × 20 Gb/s)-2000 km RZ transmission experiment by suppressing XPM with optimized pulsewidth [C]. *OFC 2000*, 2000, (1):152~154
- 2 C. Yu, L.-S. Yan, T. Luo *et al.*. Width-tunable optical RZ pulse train generation based on four-wave mixing in highly nonlinear fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3):636~638
- 3 B. Bakhshi, P. A. Andrekson. 40 GHz actively modelocked, polarisation maintaining erbium fibre ring laser [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(5):411~413
- 4 Yu Jinlong, Ma Xiaohong, Feng Enbo *et al.*. Mode locked fiber ring laser stabilization with a large dispersion cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12):1474~1477
于晋龙,马晓红,冯恩波等.大色散稳定腔长的光纤锁模激光器的锁模特性研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12):1474~1477
- 5 Zhu Likai, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. Wavelength stabilization of mode-locked fiber laser via continuous wave-injection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):149~152
朱利凯,于晋龙,王耀天等.注入连续光实现锁模光纤激光器的波长稳定[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):149~152
- 6 P. Gunning, J. K. Lucek, D. G. Moodie *et al.*. Gainswitched DFB laser diode pulse source using continuous wave light injection for jitter suppression and an electroabsorption modulator for pedestal suppression [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(11):1010~1011
- 7 Zhu Depeng, Wang Zhuoran, Yu Jinlong *et al.*. Extraction of the parameters of 2.5 GHz DFB-LD based on the measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):486~488
朱德鹏,王卓然,于晋龙等.2.5 GHz分布反馈激光器内部参数的实验测量[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6):486~488
- 8 S. Iezekiel, C. M. Snowden, M. J. Howes. Generation of ultrashort optical pulses by microwave modulation of laser diodes [C]. *IEE Colloquium on Applications of Ultrashort Pulses for Optoelectronics*, 1989. 9/1~9/7
- 9 Tetsuro Komukai, Takashi Yamamoto, Satoki Kawanishi. Optical pulse generator using phase modulator and linearly chirped fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(8):1746~1748
- 10 T. Kobayashi, H. Yao, K. Amano *et al.*. Optical pulse compression using high-frequency electrooptic phase modulation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(2):382~387