

基于光参量放大的高速实时光取样技术*

王文睿^{1)†} 于晋龙¹⁾ 罗俊¹⁾ 韩丙辰¹⁾²⁾ 吴波¹⁾ 郭精忠¹⁾ 王菊¹⁾ 杨恩泽¹⁾

1) (天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072)

2) (山西大同大学物理与电子科学学院, 大同 037009)

(2010 年 11 月 21 日收到; 2011 年 1 月 6 日收到修改稿)

提出了一种基于光参量放大的高速实时光取样方案. 利用色散介质对光纤锁模激光器产生的窄脉冲源进行色散展宽, 从而产生线性啁啾光信号. 将该信号和被取样信号同时送入高非线性光纤, 利用高非线性光纤中的参量放大效应, 将被取样信号的强度信息调制到线性啁啾光信号上. 在接收端利用不同中心波长的滤波器即可滤出不同时间点的取样信号, 从而在光域同时完成了高速实时光取样和取样信号的串—并转换. 是实现高速实时取样技术的一种极具竞争力的实现方案. 实验中, 实现了对 10 Gb/s 非归零码 OOK 信号的 40 GS/s 的高速实时取样系统, 并转换为 4 路 10 GS/s 取样信号输出. 在接收端成功根据 4 路取样信号恢复出被取样信号波形, 验证了该实时光取样方案的可行性.

关键词: 光信号处理, 光取样, 参量放大, 高非线性光纤

PACS: 42.81.-i, 52.35.Mw

1. 引言

高速率是光、电通信发展的永恒主题. 随着通信速率的不断提升, 对于高速信号质量的检测已经成为了通信技术发展中的关键问题^[1,2]. 目前传统的电子仪器已经无法满足速率越来越高的超高速信号的测量要求. 在高速通信系统中, 大都采用等效取样的方式, 用低重复频率的取样脉冲把被测信号在不同周期中取样得到的数据进行重组, 从而重建原始的信号波形. 在超高速等效取样中, 则普遍采用光窄脉冲代替电脉冲对被测信号进行取样, 从而突破电子瓶颈的限制, 实现皮秒量级的时间分辨率^[3-5].

但是等效取样仅适用于重复信号的检测, 在高速突发信号检测、先进调制格式的光通信系统、宽带雷达、高端嵌入式系统和高能物理等许多应用场合, 等效取样已经无法满足越来越精确的信号完整性测量要求^[6]. 寻求一种更高速、有效的实时取样技术成为了亟待解决的技术难题. 从理论上讲, 将光取样技术应用于实时取样领域, 同样可以提高取样的时间分辨率, 但是每个取样点的取样、量化、存

储必须在小于取样间隔的时间内完成. 随着取样速率的提升, 光电转换、模数转换和信号存储的速率都成为了制约实时光取样技术的瓶颈所在. 而突破这一障碍的切实有效的方案之一就是在光域实现串并转换, 将串行的高速光取样信号转换为多路并行的相对低速的光取样信号.

本文提出了一种新型的实时高速光取样方案, 利用高非线性光纤 (HNLF) 中的参量放大 (OPA) 效应同时实现高速光取样和高速光串—并转换. 取样脉冲采用了预啁啾的低重复频率脉冲, 该脉冲与被测信号同时被送入 HNLF, 由于 OPA 效应, 被测信号的幅度信息被调制到预啁啾脉冲上. 在 HNLF 的输出端, 用滤波器滤出不同波长的光信号, 这样不同时刻的取样信号将被分配到不同的取样波长上, 从而同时实现了高速光取样和高速光串—并转换, 突破了高速实时取样的最大技术壁垒. 实验中, 实现了取样率为 40 GS/s 的实时取样系统, 并转换为 4 路 10 GS/s 的并行光取样信号. 该方案具有结构简单, 可扩展性好的优点, 并且由于 HNLF 的 OPA 效应的速率可达 THz 量级, 而且串并转换也完全可以扩展至数十乃至上百路, 该方案完全具有扩展至百 G 乃至上 THz 实时光取样系统的潜力.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60736035, 60977053) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327603) 资助的课题.

† E-mail: wwr_blue@163.com

2. 工作原理和分析

简并情况下(单抽运光)的光纤 OPA 以其高增益(小信号增益与抽运光功率成指数关系)、宽带宽(可以覆盖整个光通信带宽)、超快的作用速度(THz 以上)等显著优点成为光取样的理想实现方式之一.

在单抽运光参量放大过程中,当抽运功率远大于信号功率时,可以合理的假设在参量过程中抽运功率没有消耗,此时参量增益 g 取决于抽运光功率,定义为

$$g = \sqrt{(\gamma P_p)^2 - (\kappa/2)}, \quad (1)$$

式中, γ 为非线性系数, P_p 表示抽运功率, κ 为净相位失配,定义为

$$\kappa = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_i) - 2\beta(\omega_p) + \gamma P_p, \quad (2)$$

式中, β 代表传输常数, $\omega_s, \omega_i, \omega_p$ 分别为信号光、闲频光和抽运光的角频率. 此时,信号光所得到的增益 G 与闲频光的转换效率 η 可以表示为^[7]

$$G_s = 1 + \left[\frac{\gamma P_p \sinh(gL)}{g} \right]^2, \quad (3)$$

$$\eta = \left[\frac{\gamma P_p \sinh(gL)}{g} \right]^2,$$

式中, L 为 HNLF 的长度. 理想的相位匹配条件为 $\kappa = 0$, 而 γ 和 P_p 都是正数, 因此要求抽运光波长在 HNLF 零色散波长的长波长一侧. 当相位严格匹配 ($\kappa = 0$), 且有 $gL \gg 1$ 时, 信号光增益可以简化为

$$\begin{aligned} G_s &\approx \sinh(gL) = \sinh(\gamma P_p L) \\ &= \frac{[\exp(\gamma P_p L) - \exp(-\gamma P_p L)]^2}{4} \\ &= \frac{1}{4} \exp(2\gamma P_p L). \end{aligned} \quad (4)$$

可见,在 OPA 过程中,信号增益成指数形式增长. 输出光功率与输入光功率之间存在一一对应的映射关系. 因此,OPA 可应用于光取样系统,由 OPA 得到的输出光功率可以反推出被测的抽运光信号功率. 而 OPA 的超快的作用速度,则保证了光取样系统的取样速率和时间分辨率.

如前言所述,实时光取样系统的另一个关键技术为高速光串—并转换. 从本质上来说,高速光串—并转换需要实现光信号从时间域至空间域的变换. 随着波分复用(WDM)技术的不断成熟,将高速串行信号转换到波长域上,然后用 WDM 实现不同波长信号

的分离成为高速光串—并转换的热点方案.

在高速光串—并转换方案中,波-时分光脉冲方案最为引人注目. 波-时分光脉冲是指不同波长的光脉冲等时间间隔出现的脉冲序列. 研究人员提出了一系列基于波-时分光脉冲的实现方案,但整体而言,大部分方案存在结构较为复杂或者波长数目受限的缺点. 此外,在光-光开关中,尤其是基于 HNLF 的光-光开关中,波-时分光脉冲存在严重的自相位调制效应,将导致光谱展宽、混叠从而限制了取样脉冲宽度的减小,进而限制取样带宽,影响取样结果. 为此,我们提出了一种替代的优化方案.

如图 1 所示,如果能够产生一个线性啁啾的光信号,即一个幅度变化较小,而频率随时间线性变化的光信号作为探测光. 当该探测光与被测信号同时经过光-光调制器(如 HNLF 中的 OPA),被测信号的幅度信号被调制到线性啁啾的探测光上. 此时,被测信号在不同时间点上的幅度信息被调制到不同的波长上. 这样,在输出端加入不同中心波长的光窄带滤波器(OBPF),或者一个合适波长间隔的波分解复用器(WDM),不同波长的输出端就可以得到不同时刻的取样信号,从而同时完成光取样和高速-串并转换,进而实现高速实时取样.

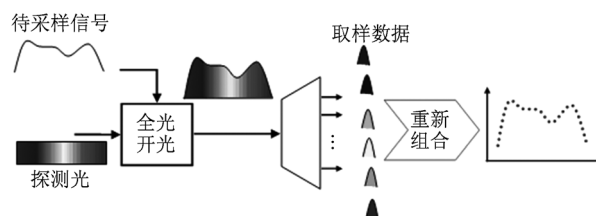


图1 高速光实时取样原理图

该方案的关键在于用一个简单、低成本方案实现大线性啁啾光信号. 本文中采用色散介质中实现窄脉冲光源频-时变换的方法来得到线性啁啾光信号.

窄带光脉冲在色散介质中的冲激响应可以表示为^[8]

$$h(t_R) = h_{\text{time}} \exp\left(-j \frac{1}{2\ddot{\Phi}_0} t_R^2\right), \quad (5)$$

式中, $t_R = t - \dot{\Phi}_0$, $h_{\text{time}} = H_0(j\dot{\Phi}_0) \exp\left(\frac{1}{\sqrt{j2\pi\ddot{\Phi}_0}}\right)$,

$\Phi_0 = \Phi(\omega_0)$ 为光相位, $\dot{\Phi}_0 = \partial\Phi/\partial\omega$ 为群时延, $\ddot{\Phi}_0 = \partial^2\Phi/\partial\omega^2$, 表征了传输介质的一阶色散.

事实上,研究人员早已指出,窄带光脉冲在色散介质中的传输方程,与旁轴光束在空间传播时在夫琅禾费近似(一种远场近似)条件的传输方程间存在相似性.这种相似性可被应用于高速光信号处理上.

在空间光传播中,当距离 d 足够大, $z = d$ 平面上的旁轴上得到的光场强度为 $z = 0$ 平面上光场强度的二维傅里叶变换.由窄脉冲光信号在色散介质中传播与旁轴光束在空间中传播之间的相似性,利用色散介质同样可以实现光信号从频谱到时间的傅里叶变换.输出可以表达为

$$\begin{aligned}\hat{a}_2(t_R) &= h_{\text{time}} \exp\left(j \frac{1}{2\ddot{\Phi}_0} t_R^2\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{a}_1(t') \\ &\quad \times \exp\left(-j \frac{1}{\ddot{\Phi}_0} t_R t'\right) dt' \\ &= h_{\text{time}} \exp\left(j \frac{1}{2\ddot{\Phi}_0} t_R^2\right) [\hat{A}_1(\omega)]_{\omega=t_R/\ddot{\Phi}_0}, \quad (6)\end{aligned}$$

$$\hat{A}_1(\omega) = F(\hat{a}_1(t)).$$

由此可见, $\hat{a}_2(t_R)$ 与输入波形的傅里叶变换成正比.如此,对宽谱的窄脉冲源通过色散介质实现傅里叶变换,就可以得到需要的线性啁啾光信号.在本文中,我们采用的方案是将光纤锁模激光器产生的窄脉冲光通过一段线性色散介质.这样,窄脉冲光源的不同频谱分量在色散介质中走离,从而形成我们需要的大线性啁啾的光信号.

理想情况下,假设重复周期为 T ,谱宽为 $\Delta\omega_L$ 的窄脉冲,经频-时变换为理想单位幅度恒幅啁啾脉冲.则(6)式可以简化表示为

$$A_L(t) = \exp\left[j\left(\omega_0 + \frac{t'}{T}\Delta\omega_L\right)t\right], \quad (7)$$

式中, $t' = t - kT$, k 为整数,且满足 $-T/2 < t' \leq T/2$. ω_0 为光载波中心频率.

该脉冲在高非线性光纤中被信号 $a(t)$ 进行理想的光-光调制,则调制后的信号为

$$A_S(t) = a(t) \cdot \exp\left[j\left(\omega_0 + \frac{t'}{T}\Delta\omega_L\right)t\right]. \quad (8)$$

当该信号通过一个中心波长 ω_i ,带宽为 ω_{BPF} ,传输函数为 $H(\omega)$ 的光滤波器,则输出波形为

$$\begin{aligned}A_i(t) &= \left\{ a(t) \right. \\ &\quad \times \exp\left[j\left(\omega_0 + \frac{t'}{T}\Delta\omega_L\right)t\right] \left. \right\} \otimes h(t), \quad (9)\end{aligned}$$

式中, $h(t)$ 为 $H(\omega)$ 的傅里叶逆变换.

考虑到被取样信号的频率远小于光载波频率

ω_0 ,则有

$$\begin{aligned}A_i(t) &\approx a(t) \cdot \left\{ \exp\left[j\left(\omega_0 + \frac{t'}{T}\Delta\omega_L\right)t\right] \otimes h(t) \right\} \\ &= a(t) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[j\left(\omega_0 + \frac{t'}{T}\Delta\omega_L\right)(t-\tau)\right] \cdot h(\tau) d\tau \\ &= a(t) \cdot \exp\left[j\left(\omega_0 + \frac{t'}{T}\Delta\omega_L\right)t\right] \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-j\left(\omega_0 + \frac{t'}{T}\Delta\omega_L\right)\tau\right] \cdot h(\tau) d\tau \\ &= a(t) \cdot H\left(\omega_0 + \frac{t'}{T}\Delta\omega_L\right) \\ &\quad \times \exp\left[j\left(\omega_0 + \frac{t'}{T}\Delta\omega_L\right)t\right]. \quad (10)\end{aligned}$$

过 PIN 后,忽略光载波分量,则信号的包络为

$$A_i(t) = a(t) \cdot H\left(\omega_0 + \frac{t'}{T}\Delta\omega_L\right). \quad (11)$$

由(11)式可见,该实时取样系统的时间分辨率为 $\frac{\omega_{\text{BPF}}}{\Delta\omega_L} \cdot T$,同时,取样系统时间间隔则由相邻的光滤波器

波器的中心波长间隔决定,即 $\frac{\Delta\omega_{\text{BPF}}}{\Delta\omega_L} \cdot T$.注意到,

$\frac{\Delta\omega_L}{T}$ 即为色散介质展宽后的光信号的啁啾.可见,

在 OBPF(或 WDM) 波长间隔一定的条件下,啁啾的大小就决定了相邻取样点的时间间隔.同时在 OBPF(或 WDM) 的带宽一定的条件下,啁啾的大小也决定了取样的时间分辨率.同时光信号应为恒幅或接近恒幅,从而保证不同取样点的信号质量的一致性.

本系统中另一个关键参数为 $\frac{\Delta\omega_L}{\Delta\omega_{\text{BPF}}}$,该参数事实上为系统串—并转换比.在实时取样系统中,通常实时光取样系统希望有较小的取样间隔,同时为了信号存储、处理的方便,要求较大的周期 T .因此,一个实用的高速实时取样系统要求 $\frac{\Delta\omega_L}{\Delta\omega_{\text{BPF}}}$ 具有良好的可扩展性.事实上,在现有技术手段下,已经可以实现脉宽在数十 nm 以上的窄脉冲源,而目前 25 GHz 标准的 DWDM 的带宽为 0.2 nm,因此,采用本文方案完全有潜力实现上百路串—并转换比的光实时取样系统.

3. 实验及结果分析

如图 2 所示为高速实时光取样实验装置图.被

测光由可调光源 (Agilent 8167) 产生, 波长为 1548.5 nm. 该连续光在马赫-曾德型的 LiNbO₃ 光强度调制器 (MZM) 中被伪随机码型发生器产生的 $2^{23}-1$ 的伪随机序列 (PRBS) 码调制产生 NRZ 码型的信号.

此后, 被测光由大功率掺铒光纤放大器 (HP-EDFA) 放大至 25 dBm. EDFA 前后的 1 nm 带宽的光滤波器主要用于滤除被测光中的 ASE 噪声, 尽可能提高 OPA 的信噪比.

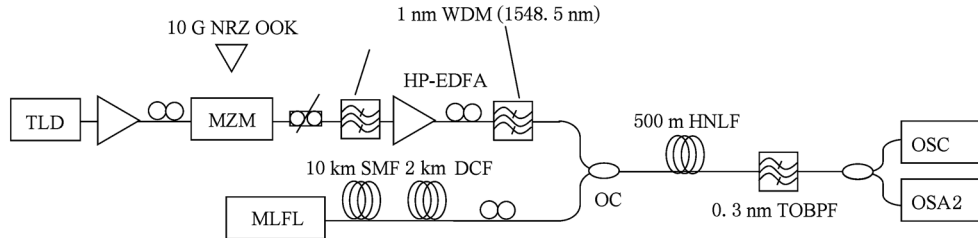


图2 高速实时光取样实验结构图 (TLD: 可调激光器; PC: 偏振控制器; MZM: 马赫曾德强度调制器; OC: 光耦合器; SMF: 单模光纤; DCF: 色散补偿光纤; HNLF: 高非线性光纤; HP-EDFA: 大功率掺铒光纤放大器; OSA: 光谱分析仪; OSC: 光示波器)

另一方面, 探测光则由 10 GHz 的光纤锁模激光器产生, 中心波长为 1542.5 nm, 3 dB 带宽为 2.04 nm. 光纤锁模激光器产生的光信号光谱和波形图分别如图 3(a) 和 (b) 所示. 实验中用 10.6 km 色散系数 $D = -17$ ps/nm·km 的普通单模光纤 (SMF) 和 2 km 色散量为 132 ps/nm 的色散补偿光

纤 (DCF) 级联实现总色散量为 -48.2 ps/nm 的近似线性色散介质. 经过色散后的探测光信号的波形图如图 4(a) 所示. 可见时域波形则从图 3(b) 所示的窄脉冲信号展宽为如图 4(a) 所示的幅度接近恒定的啁啾信号. 为了更好观测色散展宽的影响, 将窄脉冲源的重复速率降低为 2.5 GHz, 通过同样色散

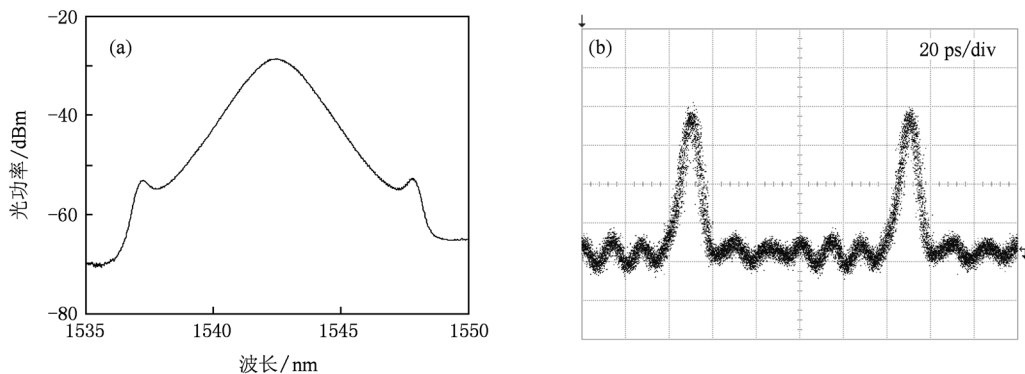


图3 光纤锁模激光器输出 (a) 光谱图; (b) 波形图

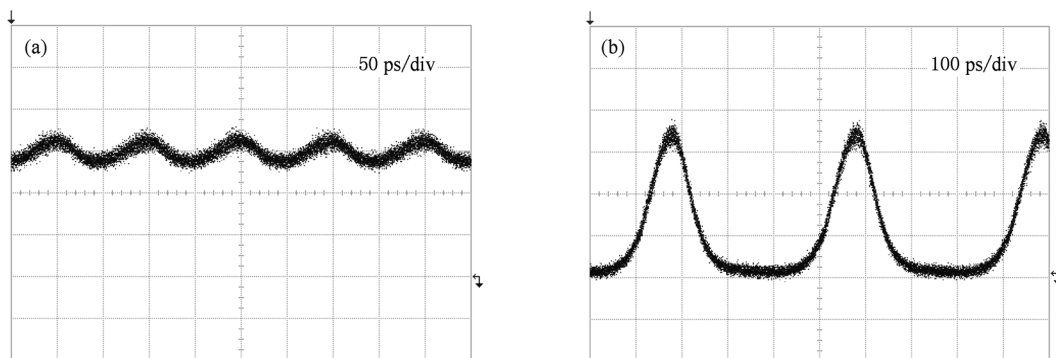


图4 色散展宽后的线性啁啾光信号 (a) 脉冲重复速率 10 GHz; (b) 脉冲重复速率 2.5 GHz

介质后的波形如图 4(b) 所示, 从示波器上测得此时的脉冲的半高全宽 (FWHM) 为 97.9 ps, 基本上覆盖了 100 ps 的重复周期.

事实上, 可以用较小正常色散的高非线性光纤对锁模激光器产生的脉冲信号进行谱展宽, 再通过色散介质, 从而提高串-并转换的转换比. 此外, 用啁啾光纤光栅代替光纤, 也可以有效降低系统复杂度, 并且可以进一步对光谱进行整形, 得到更为理想的接近恒幅的线性啁啾光信号. 由于实验条件所

限, 未能演示相关实验, 但相关文献已经证明此方案的可行性^[9].

此后, 探测光和被测光通过 3 dB 耦合器耦合后共同进入 HNLF. 实验中采用的 HNLF 长度为 500 m, 非线性系数 $\gamma = 11 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, 零色散波长为 1545 nm. HNLF 的输出信号的光谱图如图 5(a) 所示, 可见在 OPA 作用下, 在 1554.5 nm 附近产生与信号光对称的闲频光.

在输出端, 实际系统中需要多个不同中心波长

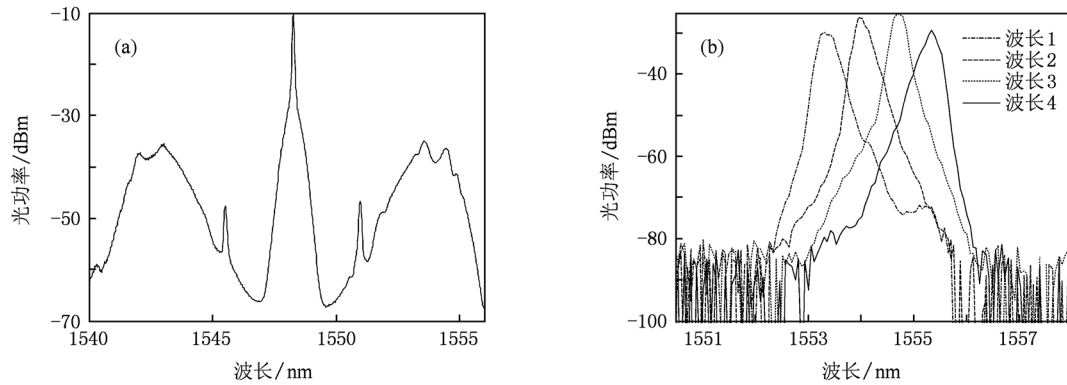


图 5 (a) 光参量放大输出光谱图; (b) 可调光滤波器滤出的四个不同波长的光谱图

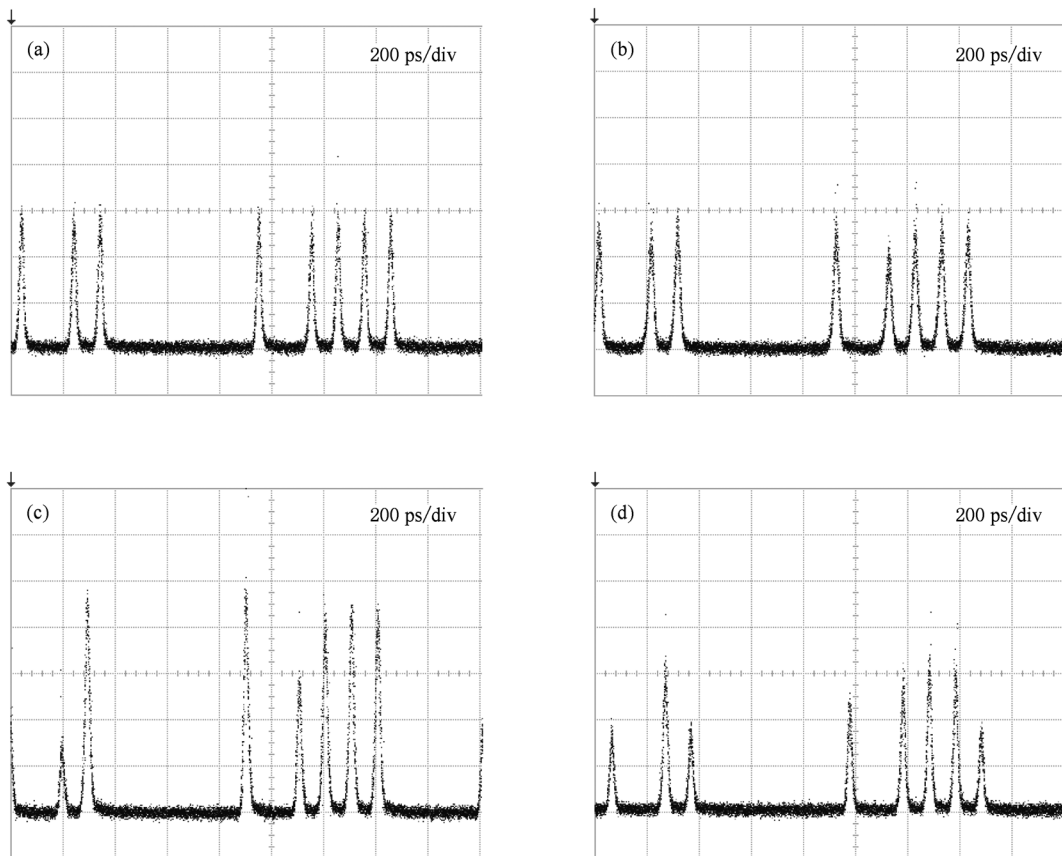


图 6 取样信号波形图 (a) 1553.3 nm; (b) 1553.96 nm; (c) 1554.68 nm; (d) 1555.34 nm

的滤波器(或 WDM)滤出不同时刻的取样信号. 实验中,条件所限,等效地用一个 3 dB 带宽 0.3 nm 的可调谐滤波器滤出不同时刻的光信号. 首先关闭被测光的调制,使得被测光为直流光,调节滤波器中心波长以保证选择的四个波长的时间间隔为 25 ps. 最终滤出的 4 个波长的光谱图如图 5(b)所示,中心波长分别为 1553.3, 1553.96, 1554.68, 1555.34 nm. 由于窄脉冲源谱宽为 2.04 nm,理论上中心波长间隔为 0.68 nm. 实测四个波长之间间隔分别为 0.66, 0.72 和 0.66 nm. 考虑到光谱仪的分辨率带宽为 0.05 nm,可以认为实验结果与理论完全符合.

被取样信号的波形在图 7(a)给出. 滤波器滤出的四个波长的信号分别为如图 6(a)–(d)所示,

每个波长的取样间隔为 100 ps. 将取样点数据按 25 ps 时间间隔重新排列后如图 7(b)所示. 与原波形相比失真较大,这主要由于探测光并非恒幅,有一定功率起伏,因此不同波长分量的强度也有所不同. 此外,滤波器在不同波长处的插损也有所差别,也进一步加剧了不同波长之间的幅度差异. 将被测光固定为恒幅直流光,测量四个波长的信号输出幅度,如图 7(c)所示. 在图 7(b)基础上,以此功率值对四路波长信号进行归一化处理,恢复得到的信号如图 7(d)所示,基本上恢复出了被取样信号的信息. 这样,完成了 40 GS/s 的实时取样系统,同时将输出取样信号串并转换至 4 路 10 GS/s 取样信号上,从而有效降低了后续信号处理和存储的难度.

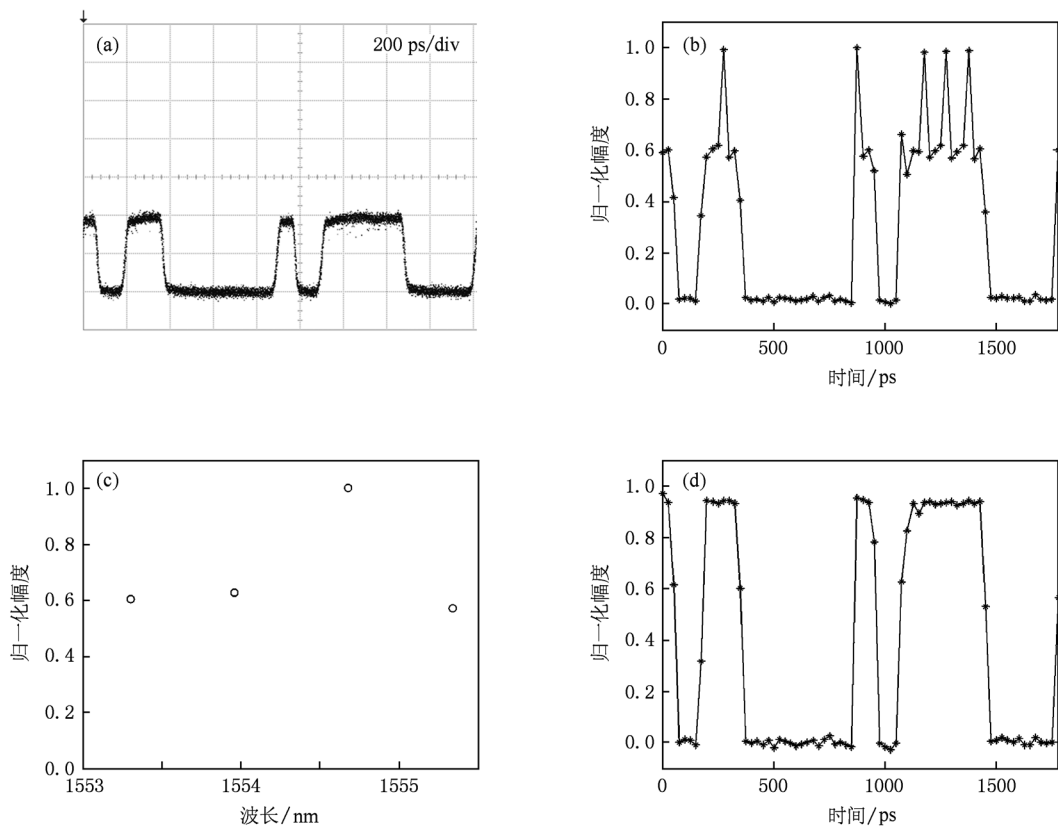


图 7 (a)被取样信号波形图;(b)恢复得到的取样信号波形;(c)恒幅待取样信号四个波长输出幅度比较;(d)四波长幅度均衡后的取样波形

4. 结 论

本文提出了一种新型高速实时取样方案,对该方案的原理进行了分析,并进行了实验验证和测试. 利用色散介质将光纤锁模激光器输出的窄脉冲展宽

为近似恒幅的线性啁啾光信号. 并用该光信号通过 HNLf 中参量放大过程实现高速光取样. 这输出端用光滤波器滤出不同波长的光信号,在完成高速光取样同时将取样信号串并转换为多路相对低速的取样信号. 从而突破高速光实时取样技术的瓶颈所在. 实验中完成了 40 GS/s 的实时取样系统,同时

将输出取样信号串并转换至 4 路 10 GS/s 取样信号上,验证了方案的可行性. 值得指出的是,方案中采用的 OPA 技术的作用速度在 THz 以上,而且如果进

一步采用窄脉冲谱展宽技术和带宽更小的光滤波器,可以实现更大的串并转换比,从而实现更高取样率的实时光取样系统.

- [1] Westlund M, Andrekson P A, Sunnerud H 2005 *31st European Conference on Optical Communication (ECOC 2005)* **4** 937
- [2] Kung-Li Deng, Runser R J, Glesk I, Prucnal P R 1998 *Photonics Technology Letters, IEEE* **10** 397
- [3] Jungerman R L, Lee G, Buccafusca O, Kaneko Y, Itagaki N, Shioda R, Harada A, Nihei Y, Sucha G 2002 *Photonics Technology Letters, IEEE* **14** 1148
- [4] Kawanishi S, Yamamoto T, Nakazawa T, Fejer M M 2001 *Electronic Letters* **37** 842
- [5] Li J, Hansryd J, Hedekvist P O, Andrekson P A, Knudsen S N 2001 *IEEE Photonic Technology Letters* **13** 987
- [6] Skold M, Westlund M, Sunnerud H, Andrekson P A 2009 *Journal of Lightwave Technology* **27** 3662
- [7] Yang J, Yu J, Hu H, Zhang A, Zhang L, Wang W, Yang E 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4667 (in Chinese) [江 阳、于晋龙、胡 浩、张爱旭、张立台、王文睿、杨恩泽 2008 物理学报 **57** 2994]
- [8] Azana J, Muriel M A 2000 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **36** 517
- [9] Almeida P J, Petropoulos P, Parmigiani F, Ibsen M, Richardson D J 2006 *Journal of Lightwave Technology* **24** 2720

High speed real-time optical sampling system based on optical parametric amplification^{*}

Wang Wen-Rui^{1)†} Yu Jin-Long¹⁾ Luo Jun¹⁾ Han Bing-Chen¹⁾²⁾ Wu Bo¹⁾
Guo Jing-Zhong¹⁾ Wang Ju¹⁾ Yang En-Ze¹⁾

1) (School of Electronic & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

(Received 21 November 2010; revised manuscript received 9 January 2011)

Abstract

We propose a novel technique to achieve a high speed real-time optical sampling system based on optical parametric amplification in high nonlinear fiber (HNLF). Linearly chirped pulses are obtained by the dispersive propagation of short pulses emitted by a mode-locked fiber laser. The pulses are then fed into an HNLF together with signal under sampling. Thanks to the optical parametric amplification effect in the HNLF, the amplitude information will be modulated onto the linearly chirped pulses. By employing optical band-pass filters or wavelength division multiplexing (WDM) technology before the receivers, simultaneous high speed optical sampling and optical serial-to-parallel conversion are achieved. We demonstrate the feasibility of the scheme by optical sampling a 10 Gb/s on-off keying (OOK) signal at a sampling rate of 40GS/s and simultaneously converting it into four 10 GS/s sampling outputs. And the 10 Gb/s OOK signal is reconstructed later by the four sampling outputs. The scheme is simple and of low cost, which makes it a good candidate in high speed real-time sampling system.

Keywords: optical communication, optical sampling, optical parametric amplification, high nonlinear fiber (HNLF)

PACS: 42.81.-i, 52.35.Mw

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60736035, 60977053) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB327603).

[†] E-mail: wwr_blue@163.com