

亚皮秒级时间分辨率的光取样示波器实验样机

刘元山 张建国 唐定康 赵 卫

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘要 利用自行开发的高稳定、低抖动和重复频率可调的“ σ ”型被动锁模光纤激光器作为高性能光学取样源,与待测的 80 Gb/s 光脉冲信号同时输入到 100 m 高非线性光纤中,通过四波混频效应实现了对被测光信号的全光采样。然后利用自行开发的数字信号处理与计算机图形显示软件,精确地重现了被测试的基于 RZ 码型的 80 Gb/s 光脉冲信号波形图。同时,还利用该光学取样示波器实验样机系统对重复频率为 10 GHz、脉宽为 1.8 ps 的商用半导体主动锁模激光器的输出波形进行测量,所显示的脉冲宽度值为 2.0 ps。这表明开发出的实验样机系统的时间分辨率优于 900 fs。

关键词 光学器件;全光取样;非线性;超短脉冲;锁模激光器

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0107002

Prototype of an Optical Sampling Oscilloscope with Subpicosecond Temporal Resolution

Liu Yuanshan Zhang Jianguo Tang Dingkang Zhao Wei

(State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract Low timing-jitter, “ σ ”-type passively mode-locked fiber laser is used as a high-performance optical sampling pulse source, of which the operation stability is high and the repetition frequency is tunable. Then the generated sequence of ultrashort optical sampling pulses is launched together with a 80 Gb/s optical pulse signal under test into a 100 m-long highly nonlinear fiber (HNLF). The all-optical sampling of an optical signal under test is realized by utilizing the four-wave mixing (FWM) in a HNLF. Consequently, the waveform of a 80 Gb/s optical pulse signal with RZ format is precisely reproduced by a computer and is displayed on its screen by employing our developed software for digital signal processing and computer image processing, respectively. Moreover, the optical sampling oscilloscope prototype is used to measure the pulse waveform and pulse width at the output of a commercially available, actively mode-locked semiconductor laser which produces optical pulses of 1.8 ps width (measured by an autocorrelator) at the 10 GHz repetition frequency. In the experiment, the pulse width measured by this oscilloscope prototype system is 2.0 ps. It is clearly shown that our developed optical sampling oscilloscope prototype has a temporal resolution better than 900 fs.

Key words optical devices; all-optical sampling; nonlinearity; ultrashort pulse; mode-locked laser

OCIS codes 070.4340; 060.7140; 140.4340

1 引 言

随着多媒体通信技术的广泛应用和宽带接入服务的不断普及推广,超高速、大容量光通信系统与网络已成为当今电讯技术领域的重要发展方向。互联

网业务量的迅速增长已促使 100 Gb/s 光以太网产品于 2010 年获得了正式商业应用,并且速率高达 400 Gb/s 和 1 Tb/s 的下一代光以太网标准制定工作现已受到国际电讯业界的关注,预计该标准将于

收稿日期: 2011-07-11; **收到修改稿日期**: 2011-08-11

基金项目: 中国科学院重大科研设备研制项目(YZ200759)和中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划资助课题。

作者简介: 刘元山(1975—),男,博士,副研究员,主要从事超短光脉冲产生技术、光纤射频信号传输系统、高稳定性被动锁模飞秒光纤激光器、超快全光取样技术和超宽带光学测量仪器设备等方面的研究。E-mail: bull-0601@opt.ac.cn

2017 年左右制定完成。因此,如何开发出与新一代超高速光通信系统与网络相匹配的先进光学测试仪器设备目前已成为国际光通信技术和仪器设备制造领域里的一个研究热点。现有电子示波器由于存在着“电子瓶颈效应”问题,使其最大测量带宽目前被限制到约 90 GHz 的水平。以此为基础,通过级联超快光电探测器的方式所构成的“光-电混合型”宽带示波器已无法满足研究与开发超高速光通信系统与网络的实际需要。为了有效解决这一问题,就必须转向考虑采用基于超快全光信号处理技术的新系统结构和新的实现方法。

利用全光采样技术监测超高速光通信数据信号是目前克服因电子系统带宽受限而导致无法精确测量超高速光信号波形与参数的最有效办法之一^[1~7]。该技术是保证下一代超高速光子网络、物联网、超级计算机光互联、超高速军事通信网与光卫星通信网得以研制成功和稳定运行的关键技术。近十多年来,基于全光采样技术的超高速光信号波形/眼图与参数的精确测量一直是国际研究重点工作。尤其是最近 5 年,一些先进的调制格式不断地被光通信系统与网络所采用,能检测相位信息的线性取样技术和相干检测手段也正在被广泛研究^[4,8,9]。

基于光学非线性效应的全光采样技术是使用超短光取样脉冲和被测超高速光数据信号(或超短光脉冲信号)在光学取样器中发生超快非线性光学效应,使得超高速光信号的信息转移到被采样后形成的低速光信号中,再经过低速光-电转换和电子模-数转换,把低速光信号所包含的有关被采样超高速光信号的信息变换成电数字信号,送到计算机中进行软件数据处理和计算机图形显示。这样就可以把高达几百 Gb/s、甚至 Tb/s 的光数据信号准确地测量和显示出来^[3,6]。目前已经报道的有关非线性超快光学取样器,一般利用非线性光学晶体[例如, KTP 晶体和周期极化铌酸锂(PPLN)晶体]的和频效应(SFG)^[3,11,12],高度非线性光纤^[13,14]或波导^[15,16]的四波混频或交叉相位调制效应,半导体光放大器或非线性放大环境的交叉相位调制以及增益透明的超快非线性干涉仪^[17,18]来实现超快的全光信号波形取样。该非线性光学采样技术具有非常大的测量带宽和很高的时间分辨率,能准确检测幅度调制的光信号,可对光通信系统所传输的光数据信号进行眼图测量、误码率分析、抖动分析和信噪比测量等。

本文主要介绍基于自行开发的高稳定、低抖动

和重复频率可调“ σ ”型被动锁模光纤激光器作为高性能光学取样源和利用高非线性光纤作为超快光学取样器所构成的光学取样示波器实验样机系统以及使用该系统所获得的有关光信号波形采样的实验测试结果。通过将低重复频率的飞秒光脉冲取样序列与 80 Gb/s 被测光脉冲信号同时输入到一根 100 m 长的高非线性光纤中,产生出四波混频效应,其结果使得超高速光信号的信息转移到被采样后形成的低速光信号中^[19,20]。最后利用计算机数据处理和计算机图形处理技术,成功地将 80 Gb/s 的光信号波形图再现出来。同时,还利用该实验样机系统对重复频率为 10 GHz、脉宽为 1.8 ps 的商用主动锁模激光器的输出波形进行测量,所显示的脉冲宽度值为 2.0 ps。这表明开发出的光学取样示波器实验样机系统的时间分辨率小于 900 fs。

2 实验系统创建

图 1 为自行研制的光学取样示波器的样机系统测试装置图。它包含两个部分,即光学取样示波器实验样机系统和用作测试用途的高速光信号发生器(如图 1 上面部分所示)。高时间分辨率光学取样示波器主要包括超短光脉冲取样源、超快光学取样门、光学滤波器系统、低噪声光电探测子系统、电子数据采集与处理单元和计算机显示子系统。其中最为核心的硬件部分就是低抖动、高稳定性的超短光脉冲取样源^[19,20]。概括地讲,它的主要作用就是为被测光数据信号的全光采样提供高质量的皮秒级或飞秒级周期性光脉冲取样序列。然后该取样光脉冲序列和待测试的高速光数据信号同时被输入到光学取样门中,当满足一定的工作条件时,就会产生出所需要的超快非线性光学效应,从而实现把高速光数据信号中的有用信息转移到与低重复频率取样光脉冲序列相关的、经由非线性光学效应产生出的低速光信号上。这将有利于后端的低速光电探测(PD)、电子模-数(A/D)转换和电子数据处理。由于文献[20]已对超宽带光学取样示波器的工作原理进行了详细阐述,故本文对此不再重复。通过研制光学取样示波器实验样机系统,发现光脉冲取样源的好坏将直接影响到整个全光取样系统性能的优劣。为了满足工程化设计和设备小型化的需求,采用非线性光放大环境和半导体饱和吸收体相结合,在腔内插入一个高精度光延迟线,实现重复频率可调、低抖动、高稳定性和飞秒光脉冲输出,满足了光学取样示波器对光脉冲取样源的特殊要求。最近文献[19]对这种

新型的被动锁模光纤激光器做了详细的介绍说明。工作特点可概括如下：

- 1) 工作在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长范围, 输出高稳定性飞秒级光脉冲序列;
- 2) 所产生的光取样脉冲序列的定时抖动低于 75 fs 、脉冲宽度小于 170 fs ;
- 3) 自启动锁模, 并能够在锁模状态下连续工作超过 10 h 而不需要调节激光器腔内的任何光学器件;

4) 能确保在被动锁模状态下, 根据全光信号波形采样的实际需要在 $49.65 \sim 50.47 \text{ MHz}$ 的频率范围内连续调节激光器输出脉冲的重复频率直至所需要的数值;

5) 由于全部采用商用化的并且主要是光纤通信系统普遍使用的光子器件实现被动锁模光纤激光器, 因此具有可靠性高、重复性好、结构简单和体积小的优点。这将有利于开发出的被动锁模光纤激光器的工程应用和降低将来的生产成本。

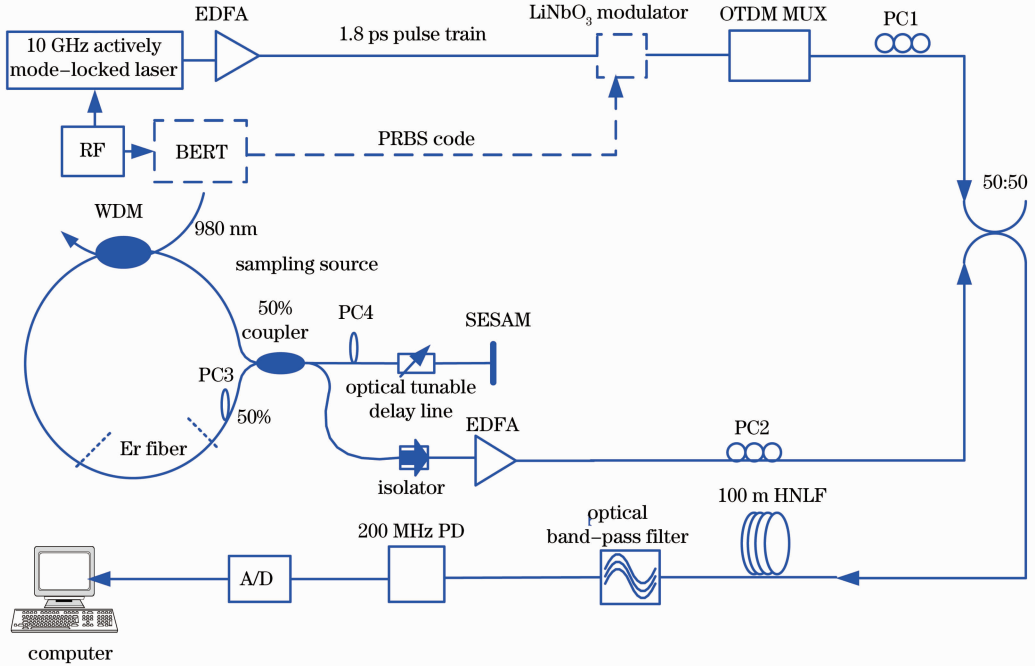


图 1 光学取样示波器实验样机系统的测试装置示意图

Fig. 1 Test setup diagram for prototype of an optical sampling oscilloscope

高质量的被检测光信号是标定全光取样示波器系统参数的重要条件。从图 1 可知, 首先需要使用一台受到射频(RF)信号驱动的商用化主动锁模半导体激光器产生出一个脉冲宽度为 1.8 ps 、重复频率为 10 GHz 的周期性光脉冲序列。随后将该周期性光脉冲序列输入到一个基于常规光学分路、延时与合路原理的光时分复用(OTDM)器, 即可获得 80 Gb/s 的高速光脉冲信号序列。如果还需要检测经过数据调制和 OTDM 之后所形成的超高速光数据信号的眼图, 可以在光时分复用器(OTDM MUX)与主动锁模激光器之间插入一个带宽约为 10 GHz 的铌酸锂强度调制器, 以便把误码仪(BERT)产生的 10 Gb/s 伪随机数据码(PRBS code)加载到周期性光脉冲序列中, 如图 1 中虚线部分所示。这样就能在 OTDM 复用器输出端得到 80 Gb/s 的光数据信号。可是, 如果被测光脉冲信号

的重复频率为 10 GHz 或者被测光数据脉冲信号的比特率为 10 Gb/s 时, 就不需要使用 OTDM 复用器了。在此情况下, 光学取样示波器实验样机系统的测试装置示意图上即可省去 OTDM 复用器。

被检测的高速光信号和取样光脉冲序列通过一个 $50:50$ 的光纤耦合器合二为一, 注入到 100 m 高非线性光纤中, 当输入的两路光满足相位匹配条件时, 就会在高非线性光纤中发生四波混频效应, 从而实现超快光学取样门的功能^[6]。图 1 中的偏振控制器 PC1 和 PC2 是为了优化高速光脉冲信号和取样光脉冲序列的偏振态, 提高在非线性光纤中四波混频的转化效率。然后在高非线性光纤的输出端级联一个中心波长可调、带宽为 1 nm 的光学带通滤波器, 就能提取出所需要的四波混频分量^[20]。滤波后得到的四波混频分量再经过低噪声光电探测器(带宽为 200 MHz)转换为电子模拟信号, 随后经过一个

模数(A/D)转换器被转换为数字信号。将该数字信号输入到计算机中进行数字信号处理和计算机图形显示,就能够在计算机屏幕上观察到重现的被测光信号波形及其相应的脉冲信号参数。

3 实验数据分析与系统展示

当主动锁模半导体激光器的中心波长调节到 1554 nm 时,在该激光器的输出端使用自相关仪(分辨率小于 5 fs)对 10 GHz 周期性光脉冲信号的脉冲宽度进行精确测量,所测得的脉宽值为 1.8 ps。而自主开发的被动锁模光纤激光器(即光脉冲取样源)的中心波长位于 1544 nm。在 100 m 高非线性光纤的输入端,通过调节高速光信号和取样光脉冲序列的偏振态,可获得很明显的四波混频现象。此时,把高非线性光纤输出的光注入进一台光谱仪中,就可以从光谱仪上明显地观察到在取样脉冲光谱和高速光信号光谱两侧出现了三个明显的四波混频分量,其中心波长在 1534 nm 处的四波混频分量最强,如图 2 所示。根据四波混频理论,所产生的四波混频分量应等间距的分布在注入光谱的两侧。改变偏振控制器 PC1 和 PC2 的偏振状态,观测到四波混频分量的功率发生明显的变化。这说明已获得了正确的四波混频分量。在高非线性光纤的输出端,联接了一个带宽为 1 nm、中心波长可调的光学带通滤波器。通过调节该滤波器的中心波长到大约 1534 nm 处,即可选择出位于取样脉冲光谱左侧的第一个四波混频分量信号。滤波后得到的光谱在图 2 中用虚线标出。

经过光学带通滤波器滤出的四波混频分量信号需要输入到一只窄带宽的低噪光电探测器中进行光

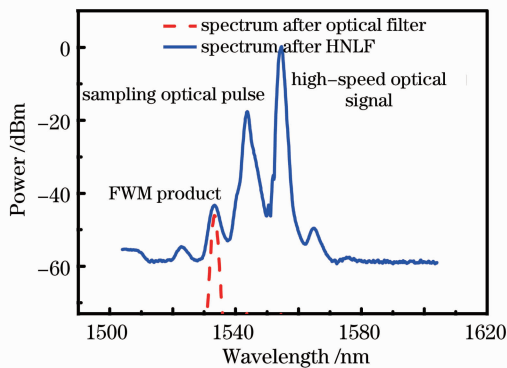


图 2 实验测得的高非线性光纤的输出光谱图和经过光学滤波后的光谱

Fig. 2 Output optical spectra of a high nonlinear fiber and spectra after optical filtering

电转换,获得相应的电信号。然后再将它输入到一个高精度的电子数据采集卡中进行模-数转换。最后将数据采集卡产生的电数字信号送入到后端的计算机中,通过使用 Labview 中自行开发的数字信号处理与计算机图形显示软件对所采集到的数据信号进行分析和处理,获得被测光脉冲信号的有关参数,同时在显示器上准确再现被测高速光信号的脉冲波形或眼图。图 3 是为本实验样机系统专门开发的数字信号处理和计算机图形显示程序流程图。从图 1 显示的实验装置示意图可看出,研制出的光学取样示波器实验样机没有使用任何时钟恢复电路,所以它具有硬件结构较简单、系统复杂度低和易于工程实现的优点,这有利于降低该光学取样示波器未来的制造成本。在实际测试应用中,为了能够正确地显示所测光数据信号的脉冲波形或眼图,在本实验样机系统中使用了一种被称为“软件同步取样”的方法^[21]。然后根据图 3 所示的程序流程图,开发出了计算机软件算法用于获取所需要的同步信息和正确重现数据信号,实现光数据脉冲信号的波形或眼图测量以及光脉冲信号的有关参数测量。

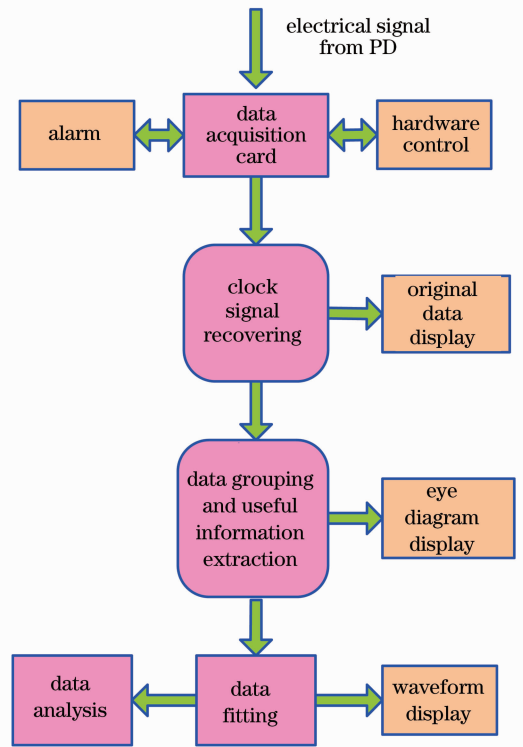


图 3 软件流程示意图

Fig. 3 Software flow chart

开发出的光学取样示波器实验样机系统具有高的时间分辨率,将重复频率为 10 GHz、脉宽为 1.8 ps 的光脉冲信号输入到自行搭建的 OTDM 复用器之

后,获得了 80 Gb/s 的光脉冲信号。由于该复用器的光功率损耗较大,需要先将被检测的 80 Gb/s 光信号放大到 10 dBm 后,再输入到光学取样示波器实验样机中。此时测得的 4 个相邻光脉冲信号波形如图 4(a)所示(时间轴标尺刻度为 20 ps/div)。可以清楚地观测到 4 个相邻的归零(RZ)码光脉冲波形,并且光脉冲之间无码间干扰,两个相邻脉冲的时间间隔约为 12.5 ps。另外,还能通过增大光学取样示波器实验样机的显示时间范围,以便在显示器上观测到更多的光脉冲。图 4(b)是在该示波器实验样机的时间轴标尺刻度值被增大之后的情况下(即 40 ps/div),在显示器上观测到的“111100001111”RZ 码光脉冲模式波形图。为了便于比较本光学取样示波器实验样机和常规“光-电混合型”宽带示波器的测量效果,将 80 Gb/s 的光信号输入到由 70 GHz 光电探测器(XPDV3120R)与 70 GHz 电取样示波器(Tektronic TDS8200)所组成的“光-电混合型”宽带示波器。所测得的 80 Gb/s 光脉冲信号波形如图 5 所示。从该图上可以很容易地发现使用常规的“光-电混合型”宽带示波器已很难准确地显示 80 Gb/s 的脉冲信号波形,其测量系统的带宽限制导致了被测信号脉冲与脉冲之间的重叠部分十分明显。实际上,这是由于“光-电混合型”宽带示波器的使用所造成的码间干扰。该问题可以通过使用具有高时间分辨率的光学取样示波器加以有效解决,如图 4 所示的测量结果。经过进一步的仔细观察,不难发现无论是使用标准的“光-电混合型”宽带示波器,还是使用作者自己开发的光学取样示波器实验样机,所测得的 4 个相邻光脉冲波形中的第一个和第三个脉冲的高度要低于其余两个脉冲的高度,而第三个脉冲的高度最低,如图 4 和图 5 所示。这说明所搭建的 OTDM 复用器中有关分路的损耗不一致。通过对比图 4 和图 5,可以清楚地看出本光学取样示波器实验样机系统对于被测超高速光脉冲信号幅度来讲具有高的保真度。因此,使用作者自行开发的高时间分辨率光学取样示波器实验样机将有助于超高速 OTDM 复用器的优化设计与实现。

将 OTDM 复用器从光学取样示波器实验样机的测试系统装置中去掉后,使用一台 10 Gb/s 的误码仪产生伪随机数据码,用于控制铌酸锂强度调制器。然后在铌酸锂调制器的输出端,就能得到速率为 10 Gb/s、基于超短光脉冲的伪随机数据码光信号。再将该光信号输入到光学取样示波器实验样机系统中,即可在其显示器上观测到 10 Gb/s 光数据

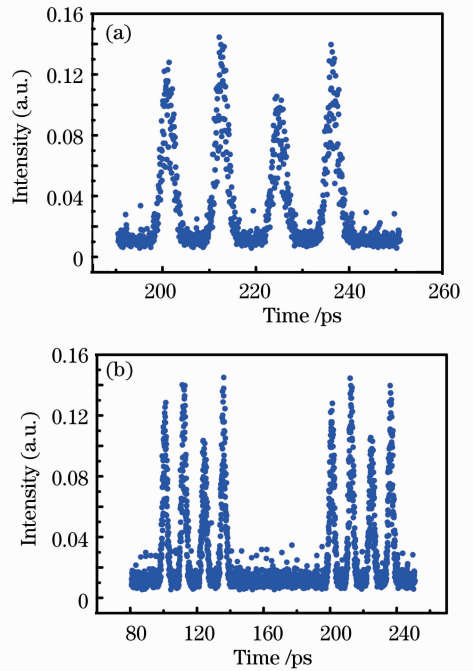


图 4 光学取样示波器实验样机显示的光脉冲信号波形图。(a) 4 个相邻光脉冲信号;(b) “111100001111”光脉冲模式

Fig. 4 Waveforms of optical pulse signals measured by the prototype of an optical sampling oscilloscope. (a) 4 adjacent pulses; (b) “111100001111” pulse pattern

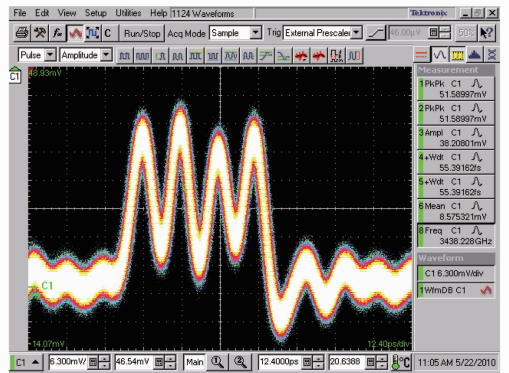


图 5 使用常规“光-电混合型”宽带示波器测量具有 4 个相邻光脉冲的信号波形

Fig. 5 Signal waveform with 4 adjacent optical pulses measured by a hybrid optical and electronic wideband oscilloscope

信号的眼图,如图 6(a)所示。为了便于估算光学取样示波器实验样机系统的时间分辨率,再将误码仪和铌酸锂强度调制器从光学取样示波器实验样机的测试系统装置中去掉。此时,在显示器上,即可观察到重复频率为 10 GHz 的单个光脉冲波形,如图 6(b)所示。用本光学取样示波器实验样机所测

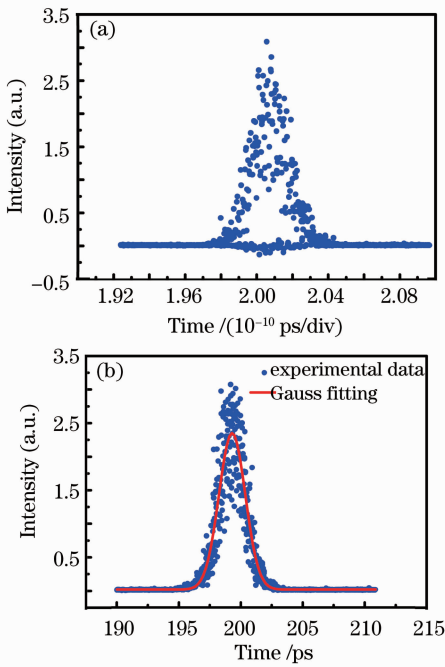


图 6 使用光学取样示波器实验样机测量光脉冲信号。
(a) 经过伪随机数据调制后的光信号眼图; (b) 单个光脉冲波形图

Fig. 6 Optical pulse signals measured by the prototype of an optical sampling oscilloscope. (a) Eye diagram of a PRBS signal; (b) single pulse waveform
出的脉冲宽度约为 2.0 ps; 而使用自相关仪测出的该脉冲宽度值为 1.8 ps。使用国际上公认的光学取样系统/示波器时间分辨率计算公式^[6,12,14], 可知自行开发的光学取样示波器实验样机系统的时间分辨率为 $\sqrt{2.0^2 - 1.8^2} = 0.87$ ps。

图 7 为开发出的首台高分辨率光学取样示波器实验样机系统照片。为了使得该实验样机系统测得的光脉冲波形曲线在显示器上呈现出的界面效果比较接近使用常规示波器的情况, 编制了相应的计算

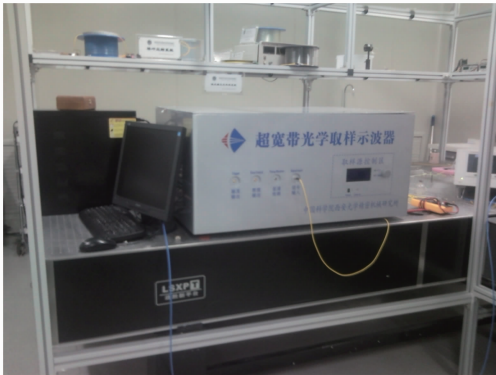


图 7 实验样机系统

Fig. 7 Developed prototype for an optical sampling oscilloscope

机界面显示软件。图 8 为开发系统的测量结果显示界面, 它可以显示测试的光脉冲宽度、频率和占空比, 也可以显示光数据信号的眼图等。

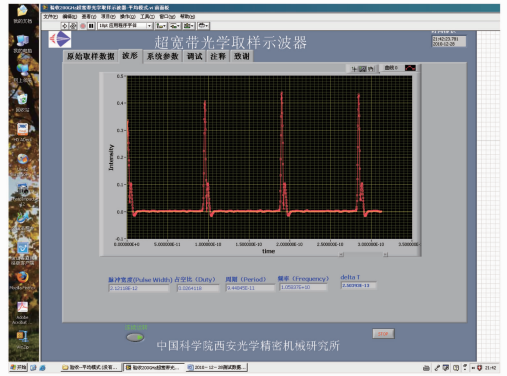


图 8 测试显示界面

Fig. 8 Display of the tested optical pulses on a computer screen

4 结 论

介绍了自行开发出的具有高时间分辨率光学取样示波器实验样机系统的实验进展和部分系统测试结果。实验数据表明该实验样机系统能准确地显示 80 Gb/s 光脉冲信号波形图。通过测试 10 GHz 主动锁模半导体激光器的输出脉冲, 标定了该光学取样示波器实验样机系统的时间分辨率优于 900 fs。高时间分辨率光学取样示波器实验样机系统的研制成功填补了国内在该研究领域的空白。预计具有亚皮秒级时间分辨率的超宽带光学取样示波器在超高速光通信技术和超短光脉冲测量领域有着非常重要的应用和广泛的需求。

致谢 感谢瞬态光学与光子技术国家重点实验室孙传东副主任和陈国夫教授对本课题组的大力支持和鼓励。

参 考 文 献

- 1 Nicolas K. Fontaine, Ryan P. Scott, Linjie Zhou *et al.*. Real-time full-field arbitrary optical waveform measurement [J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(4): 248~254
- 2 Mark Pelusi, Feng Luan, Trung D. Vo *et al.*. Photonic-chip-based radio-frequency spectrum analyser with terahertz bandwidth [J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(3): 139~143
- 3 R. L. Jungerman, G. Lee, O. Buccafusca *et al.*. 1-THz bandwidth C- and L-band optical sampling with a bit rate agile timebase [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8): 1148~1150
- 4 Mars Skold, Mathias Westlund, Henrik Sunnerud *et al.*. All-optical waveform sampling in high-speed optical communication systems using advanced modulation formats [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(16): 3662~3671

- 5 C. Dorrer, C. R. Doerr, I. Kang *et al.*. Measurement of eye diagrams and constellation diagrams of optical sources using linear optics and waveguide technology [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(1): 178~186
- 6 Mathias Westlund, Peter A. Andrekson, Henrik Sunnerud *et al.*. High-performance optical-fiber-nonlinearity-based optical waveform monitoring [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(6): 2012~2021
- 7 G. Klatt, M. Nagel, T. Dekorsy *et al.*. Rapid and precise read-out of terahertz sensor by high-speed asynchronous optical sampling [J]. *Electron. Lett.*, 2009, **45**(6): 310~311
- 8 C. Dorrer. High-speed measurements for optical telecommunication system [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **12**(4): 843~857
- 9 Michael G. Taylor. Phase estimation methods for optical coherent detection using digital signal processing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(7): 901~914
- 10 D. S. Ly-Gagnon, S. Tsukamoto, K. Katoh *et al.*. Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 12~21
- 11 H. Ohta, N. Banjo, N. Yamada *et al.*. Measuring eye diagram of 320 Gb/s optical signal by optical sampling using passively modelocked fiber laser [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(25): 1541~1542
- 12 Nobuhide Yamada, Seiji Nogiwa, Hiroshi Ohta. 640-Gb/s OTDM signal measurement with high-resolution optical sampling system using wavelength-tunable soliton pulses [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1125~1127
- 13 J. Li, J. Hansryd, P. O. Hedekvist *et al.*. 300-Gb/s eye-diagram measurement by optical sampling using fiber based parametric amplification [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(9): 987~989
- 14 Jie Li, Mathias Westlund, Henrik Sunnerud *et al.*. 0.5-Tb/s eye-diagram measurement by optical sampling using XPM-induced wavelength shifting in highly nonlinear fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 566~568
- 15 Reza Salem, Mark A. Foster, David F. Geraghty *et al.*. High-speed optical signal sampling via temporal magnification [C]. Proc. Optical Fiber Communication (OFC) (California, USA) 2009, OTTh4
- 16 Hua Ji, Michael Galili, Minhao Pu *et al.*. Silicon waveguide based 320 Gb/s optical sampling [C]. CLEO/QELS 2010, 2010, CMA2
- 17 S. Diez, R. Ludwig, C. Schmidt *et al.*. 160-Gb/s optical sampling by gain-transparent four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(11): 1402~1404
- 18 C. Schmidt, C. Schubert, S. Watanabe *et al.*. 320 Gb/s all-optical eye diagram sampling using gain-transparent ultrafast-nonlinear interferometer (GT-UNI) [C]. Proc. 28th European Conf. Opt. Commun., 2002, 1~2
- 19 Yuanshan Liu, Jianguo Zhang, Guofu Chen *et al.*. Low-timing-jitter, stretched-pulse passively mode-locked fiber laser with tunable repetition rate and high operation stability [J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(9): 095204
- 20 Zhang Jianguo, Liu Yuanshan. Development of Ultra-wide Bandwidth all-optical sampling oscilloscope equipment [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **12**(4): 487~504
张建国, 刘元山. 研制超宽带全光取样示波器设备 [J]. *光子学报*, 2011, **12**(4): 487~504
- 21 M. Westlund, H. Sunnerud, M. Karlsson *et al.*. Software-synchronized all-optical sampling [C]. Proc. Optical Fiber Commun. Conf., 2003, 409~410
- 22 Liu Yuanshan, Zhang Jianguo, Tang Dingkan *et al.*. Brief report on prototype of an ultra-wideband optical sampling oscilloscope [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2744
刘元山, 张建国, 唐定康等. 超宽带光学取样示波器的试验样机报道 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2744
- 23 Dingkan Tang, Jianguo Zhang, Yuanshan Liu *et al.*. Ultrashort optical pulse monitoring using asynchronous optical sampling technique in highly nonlinear fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(7): 630~633

栏目编辑: 韩峰