

文章编号:1004-4213(2011)04-0487-18

研制超宽带全光取样示波器设备

张建国, 刘元山

(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, 西安 710119)

摘 要:全光取样示波器是研究与开发超高速光通信系统和光子交换网络的关键性测试仪器设备。本文简介了我们自行设计和研制出的超宽带全光取样示波器设备的实验样机系统, 并报道了我们已取得的初步实验结果。采用自主研发的高稳定性被动锁模飞秒光纤激光器作为该光学示波器的光脉冲取样源, 我们通过利用高度非线性光纤中的四波混频效应, 成功地实现了对脉宽为 1.8ps、重复频率分别为 10GHz 和 40GHz 的光脉冲信号的全光取样。然后通过数字信号处理和计算机图形处理, 得到了再现后的超短光脉冲信号波形, 并测出了其脉冲宽度值为 2.3ps。借助于该光学取样示波器实验样机, 我们还成功地完成了对脉宽为 1.8ps、经过伪随机数据序列调制后的 10Gbit/s 和 40Gbit/s 光数据信号眼图的精确测量。这是我国首次报道有关超宽带全光取样示波器设备的实际研制工作及其相应的实验测试结果。所得到的有关超短光脉冲信号波形的测试结果也与用 70GHz 宽带电子示波器和超快光电探测器组成的常规光电测量系统所获得的结果进行了比较, 清楚地表明了我们研制出的全光取样示波器实验样机比后者具有更高的时间分辨率和更大的测量带宽。

关键词:全光取样; 光示波器; 被动锁模光纤激光器; 四波混频

中图分类号: TN2; TN91

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114004.0487

0 引言

超高速、大容量全光通信技术是实现下一代通信网络的核心技术, 亦是构建未来高度信息化社会的关键技术之一。基于超快全光信号处理的时分复用 (Optical Time Division Multiplexing, OTDM) 技术则为超高速单波长光纤通信系统与网络的实现提供了重要的技术保障^[1], 因为它能确保单波长信道的 Terabit-per-second (Tbit/s) 光数字信号传输与处理速度^[2-5]。近年来, 国际上许多知名的电讯公司和光通信技术研发机构已经利用实际铺设的电讯光纤线路相继开展了速率为 160 Gbit/s 的 OTDM 光纤通信系统的现场传输实验, 为将来超高速 OTDM 技术的商业化应用奠定了基础。例如, 德国的 HHI 研究所与朗讯公司德国分部和 T-

Nova 公司合作于 2001 年在国际上首次报道了利用城市间实际铺设的 G. 652 常规单模光纤将 160 Gbit/s 的 OTDM 数据信号成功传输 116 km 的现场实验^[6]; 并且阿尔卡特公司德国分部还与 HHI 研究所合作首次在 160 Gbit/s 的 OTDM 光纤现场传输系统上通过对 OTDM 信号解复用完成了电子眼图的监测实验^[7]。两年后, 西门子公司、荷兰 Eindhoven 理工大学的 COBRA 研究所和英国电讯公司共同合作使用英国电讯公司实际铺设的长度为 275 km 的 G. 652 单模光纤, 在国际上首次实现了具有 160 Gbit/s 传输和交换功能、带有时域分插复用器的 OTDM 现场试验网络^[8-9], 随后将其 160 Gbit/s 的 OTDM 光纤传输系统的现场试验距离增加到 550 km^[10]。另外, 德国、法国、日本的有关公司和研究机构等已经分别利用德国电讯公

基金项目: 中国科学院重大科研设备研制项目 (No. YZ200759) 资助

第一作者: 张建国 (1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 2007 年以前的研究工作主要集中在全光码分多址/码分复用技术、光子交换网络、光纤航空数据总线或机载局域网、光纤一毫米波综合通信与高速光纤通信系统, 并在这些研究领域发表国际刊物论文 70 余篇, 曾获得 1995 年 URSI/IEEE 国际信号、系统和电子学会议青年科学家奖, 1996 年 URSI (国际无线电科学联盟) 青年科学家奖, 2000 年第二届国际通信系统、网络和数字信号处理学术会议最佳论文奖, 于 2003 年当选为英国物理学会的会士 (FIInstP)。自 2007 年起, 他的研究工作已转向研发超宽带光学测量仪器设备, 研究兴趣为超快全光信号处理技术。Email: zhangjg@opt.ac.cn

通讯作者: 刘元山 (1975-), 男, 助理研究员, 博士, 自 2005 年起, 开展超短光脉冲产生技术、光纤射频信号传输 (ROF) 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的研发工作, 曾荣获大恒光学特别奖、西部学子奖学金一等奖等。Email: bull-0601@opt.ac.cn

收稿日期: 2011-01-07; **修回日期:** 2011-03-30

司^[11-12]和法国电讯公司^[13]实际运行的光纤网络上所铺设的部分常规单模光纤路段和日本国内实际安装的城市间常规单模光纤链路^[14-15],实验研究了如何使用自适应偏振模色散补偿器分别改进单波长和多波长 160 Gbit/s 的 OTDM 光纤现场传输试验系统的误码性能和工作稳定性,并取得了良好的试验效果.例如,日本的 KDDI 公司和 NICT 研究所于 2005 年在国际上首次演示了利用连接三个城市之间总长度达 200 km 的常规单模光纤链路,成功实现总容量为 1.28 Tbit/s 且工作稳定的单偏振 8 波长 OTDM(单路波长信道速率为 160 Gbit/s)现场传输试验系统^[14].同时,德国电讯公司、阿尔卡特公司德国分部和法国电讯公司已分别合作在商业运行的光纤网络上成功地开展了有关具有 8 路波长信道且单路信号速率为 170 Gbit/s(即总容量达 1.36 Tbit/s)的 OTDM 光纤现场传输实验^[12-13],通过使用自适应偏振模色散补偿技术,使其光纤传输距离超过了 400 km.特别是日本的科研人员在超高速 OTDM 系统的研发和现场试验方面都已取得了许多重大的进展或技术突破^[1-2, 14-22].自 2004 年 NICT 研究所和 KDDI 公司合作完成了日本首次 160 Gbit/s 的 OTDM 现场传输试验系统以来^[14],这方面的实验演示工作近年来已经受到了重视.例如,日本的 Oki 公司、KDDI 公司、NICT 研究所、Tohoku 大学、Anritsu 公司已分别使用它们各自开发的基于电吸收调制器(Electro Absorption Modulator, EAM)方案的 OTDM 复用器和解复用器^[17]、各种偏振模色散补偿器^[14-16, 18-19]和光学取样示波器^[20],先后在 Tokyo、Kashiwa、Tsukuba、Kyoto、Osaka 等地铺设的常规单模光纤链路上完成了 160 Gbit/s 的 OTDM 传输系统现场演示和测试工作,并且其最长传输距离可达 635 km^[17].其中 Oki 公司已经成功地开发出了采用 OTDM 技术的 160 Gbit/s 工程化光发射机-接收机模块^[21],并在 2004 年的国际光电展览会上实地演示了用此工程化光发射机-接收机模块构成的 160 Gbit/s 光纤 OTDM 传输系统^[21].据 Oki 公司报道它已具有将这种 160 Gbit/s 光发射机-接收机模块推向全球电讯市场的能力.另外,该公司还成功地报道了世界上首次利用 160 Gbit/s 的 OTDM 光纤传输系统传送高清视频信号和其它数据信息的现场实验.最近,Oki 公司又在国际上首次完成了使用 160 Gbit/s 全光 3R 信号再生器的 OTDM 现场光纤传输试验,并使得 3R 再生器的间隔距离达到 380 km^[22].因此,该 3R 再生器的应用将为实现未来超长距离的超高速光纤传输系统提供了可能性^[23].另外,欧洲

的四家光通信研发机构共同合作,于 2007 年成功地报道了利用铺设在荷兰 Eindhoven 市里的实际单模光纤环路演示了 160 Gbit/s 超高速全光数据包交换的现场实验系统^[24],其传输距离达到 110 km.而且在该常规单模光纤链路上,荷兰 Eindhoven 理工大学的 COBRA 研究所还开展了将速率为 320 Gbit/s 的 OTDM 信号通过光纤传输 54.3 km 的现场试验工作^[25].

在超高速网络的工程化设计与应用方面,当前国际上知名的电讯公司和研究机构正在加紧 100 Gigabit 光纤以太网的产品开发工作,而且朝着商业化应用方向迅速迈进.近期的研发工作重点是通过利用成熟的电子和光子器件以及可行的工程设计方案,将单波长光纤以太网的数据传输速率从现有的 10 Gbit/s 提升到 100 Gbit/s.例如,美国的贝尔(Bell)实验室于 2005 年在国际上首次报道了采用电时分复用(Electrical Time Division Multiplexing, ETDM)方式实现的 107 Gbit/s 光发射机^[26],以便支持 100 Gigabit 以太网(100GbE)数据在光纤网络中的传输,并于 2006 年首次报道了使用波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)方式将 10 路 107 Gbit/s 数据信号经过 400 km 非零色散光纤进行传输的实验^[27].德国的 HHI 研究所、西门子公司和 MICRAM 公司共同研制出了 100 Gbit/s 集成化的 ETDM 接收机,为 100GbE 的实现提供一种可行的技术方案^[28],并且他们还首次在 107 Gbit/s 光纤传输实验中成功地演示了该单片集成的 ETDM 接收机.在 2007 年,阿尔卡特-朗讯公司与德国的 HHI 研究所和 u2t 公司共同合作研制出了可工作于 107 Gbit/s 数据率、采用了将光电探测器与电子解复用器进行混合集成技术的新型光接收机^[29],为生产出适用于 100GbE 的商用化光接收机提供了一种有效的技术保障.另外,日本的 KDDI 公司和 NICT 研究所合作,报道了借助于商用化的成熟电子和光电器件实现采用 DQPSK 调制方式的 100 Gbit/s 光发射机和接收机,并用于 50 km 的常规单模光纤传输实验^[30],以验证其支持 100GbE 应用的可能性.最近,美国的 Verizon 公司与 Bell 实验室和日本的 NICT 研究所等合作,使用佛罗里达州(Florida)的一条长度为 504 km 的商用化光纤链路,成功地将实况播送的高清晰度电视信号通过 100 Gigabit 设备在实际运行的密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)光纤系统上进行了现场传输实验^[31],从而验证了将现有的 10 Gigabit 和 40 Gigabit 系统升级到 100 Gigabit 系统的技术可行性.另外,阿尔卡

特-朗讯公司与西班牙电信公司合作在一条电信业务繁忙的长度为 1 088 km 的 G. 652 单模光纤链路上演示了载有 112 Gbit/s 偏振复用 QPSK 数据信道和其它 43 Gbit/s 信道及 10 Gbit/s 信道业务的现场传输试验, 证明了目前运行的光纤传输系统能够升级支持 100 Gbit/s 信道数据的应用^[32]. 同时, 美国的 AT&T 实验室、Opnext 公司和 Cisco 公司共同合作, 最近在 AT&T 公司位于佛罗里达州和路易斯安那州(Louisiana)的网络上演示了用一个实时、单波长、相干 100 Gbit/s 偏振复用 QPSK 系统对一个具有 10G/40G 数据信道的光纤链路进行网络升级的现场传输试验^[33]. 2009 年, 以 Cisco、Alcatel-Lucent、Juniper 为首的电讯设备制造商已经宣布推出了它们各自生产的 100 Gigabit 以太网接口卡等产品, 并在 2010 年得到推广和应用. 这一切已清楚地表明超高速光纤通信系统及网络的商用化时代即将来临.

随着 100GbE 的即将应用, 国际知名的电讯公司和光纤通信研究机构现正在探索实现更高速率的下一代光以太网的可行性. 这主要反映在对单波长的超高速光纤传输系统^[3-5]以及多波长的 100 Gbit/s 和 160 Gbit/s 光纤传输系统的研究工作方面^[12-14, 16, 19, 25, 27, 34-37]. 例如, Alcatel-Lucent 公司于 2008 年演示了 164 路 100 Gbit/s 的大容量 DWDM 传输系统实验, 采用的信号调制制式为 PM-QPSK, 其传输距离达到 2 550 km^[34]. 另外, 美国的 AT&T 实验室最近还与 NEC 公司位于美国的实验室、Corning 公司、OFS 公司合作成功地实现了总容量分别为 32 Tbit/s 和 64 Tbit/s 的光纤传输系统, 分别将 320 路和 640 路 100 Gbit/s 数据信号通过单模光纤进行传输^[35-36]. 日本的 NTT 实验室也刚报道了目前具有世界最大传输总容量 (69.1 Tbit/s = 432x171 Gbit/s) 的 432 路波分复用光纤传输系统实验, 采用的调制制式为偏振复用 16-QAM 且传输距离为 240 km^[37].

近年来, 有关单波长 640 Gbit/s 或更高速率的 OTDM 系统的研究工作也逐渐受到了国际主要光纤通信研究机构的重视^[3-5, 25]. 例如, 在 2005 年, 德国的 HHI 研究所与日本的 Fujitsu 实验室合作完成了基于单波长 OTDM 技术的距离为 240 km、速率为 1.28 Tbit/s 和距离为 160 km、速率为 2.56 Tbit/s 光纤传输系统实验^[3], 并且 HHI 研究所最近还成功地产生出了速率高达 5.1 Tbit/s、采用 8-PSK 和 16-QAM 调制制式的单波长 OTDM 信号并进行了相应的光时域解复用实验等^[38]. 另外, 丹麦理工大学、荷兰的 Eindhoven 理工大学、澳大利

亚的三家研究单位等已分别开展了速率为 640 Gbit/s、1.28 Tbit/s 和 2.56 Tbit/s 的单波长 OTDM 信号产生、传输和时间解复用等方面的实验研究工作^[5, 25, 39-41].

随着传输速率的不断提高, 光通信系统和网络所使用的光数据脉冲信号的宽度就会变得越来越窄. 例如, 单波长 160 Gbit/s 系统的光脉冲宽度约为 1.6~3 ps, 而 320 Gbit/s 光数据脉冲的宽度将被减小到 640 fs~1.5 ps. 当单波长 OTDM 传输速率提高到 640 Gbit/s 时, 光数据信号的脉冲宽度将缩短为 350~730 fs. 如果 OTDM 速率进一步增加到 1.28 Tbit/s 时, 光信号脉冲的宽度将为 330~420 fs. 当使用了偏振复用方式时, 2.56 Tbit/s 的单波长 OTDM 系统也需要使用脉宽为 410 fs 的光数据脉冲信号. 即使采用了多进制调制方式(例如, DQPSK、8-PSK 和 16-QAM), 传输速率为 1.28 Tbit/s 至 5.1 Tbit/s 的单波长 OTDM 系统所使用的光信号脉冲宽度大约为 420~850 fs(这已考虑了偏振复用方式的情况). 由此可见, 先进的超宽带光脉冲信号波形与参量测量仪器设备对研制超高速 OTDM 系统来讲是必不可少的. 也就是说, 基于超短光脉冲信号的单波长超高速光通信系统和网络(例如, 未来的单波长 400GbE/1TbE 以太网等)研发成功的关键将取决于是否有足够大带宽的高性能光数据脉冲信号波形与系统参量测量设备可供使用.

超宽带全光取样示波器是伴随着超高速光通信技术的发展而出现的一种新型测量设备. 它是集飞秒激光技术、超快非线性光学、高精度模-数转换、数字信号处理、计算机图形显示技术于一体的尖端仪器设备, 是研究超高速 OTDM 系统必不可少的测试手段. 超宽带光学取样示波器技术是全光信号处理在超高速光通信技术领域的最新应用趋势, 当前它是属于一个前沿性的研究课题. 可是, 目前国内在超宽带全光取样示波器的研究领域还基本上处于空白状态. 虽然我们最近刚在国内报道了成功开发超宽带全光取样示波器实验样机的简讯^[42]及部分初始实验结果^[43], 但是仍然缺乏系统性的或全面的实验研究工作介绍. 目前, 国内除本课题组之外, 还没有其它单位报道过关于超宽带全光取样示波器的实验性研究工作. 因此, 本文将首先简要介绍超宽带全光取样示波器的发展历程和国际研究现状. 然后重点针对我们自己近期完成的研究项目, 围绕着超宽带全光取样示波器设备的实验设计和样机系统的开发与测试工作进行报道, 期望能为国内从事超宽带全光取样示波器技术研究的相关人员提

供一些重要的工程设计经验和有关超短光脉冲信号的波形取样与再现实验的测试结果以作参考;同时也期望能为我国在制定超宽带全光取样示波器产业化标准方面提供有效的技术支持. 这也是国内首次报道有关超宽带全光取样示波器设备的实际研制工作.

1 超短光脉冲波形测量系统和全光取样示波器

本文将首先针对常用的超短光脉冲波形测量系统进行简单概述. 然后将重点介绍超宽带全光取样示波器的作用、功能特性、基本工作原理和发展过程.

1.1 常用的超短光脉冲波形测量系统

一般来讲, 常用的超短光脉冲波形测量系统有三种, 它们分别为条纹相机(Streak Camera)、自相关仪(Autocorrelator)和具有光信号输入端口的宽带示波器. 目前, 最快的条纹相机之分辨率已能达到亚皮秒级, 但是该仪器在光纤电讯波长范围内使用时存在着检测灵敏度不高的问题^[44]. 由于条纹相机需要对信号波形进行平均, 故它无法显示光信号眼图, 也不能分析“Q”因子. 在超宽带全光取样示波器被研制出来以前, 条纹相机在 90 年代初期常被用来观测 OTDM 光纤传输实验中速率达 100 Gbit/s 的 OTDM 光数据脉冲信号波形^[45-46]. 众所周知, 自相关仪具有很高的时间分辨率($<5\text{fs}$), 故常被用于精确测量超短光脉冲的自相关曲线和脉冲宽度. 可是, 由于自相关仪具有对称的响应函数, 因此它不能用于研究脉冲的上升和下降时间, 也不能用于研究伪随机数据信号序列的波形特征^[44], 即无法研究光信号的眼图和“Q”因子.

在通信工程领域, 示波器是一种常用的测量仪器设备, 被广泛用来观测信号波形和测量信号参量或系统参量, 因此它现已成为用于研发数字通信系统与网络的标准配置仪器设备之一. 对于光纤通信来讲, 数据率高达 40 Gbit/s 的 SDH 光纤系统已获得商业应用, 而 10 Gbit/s 光纤以太网已经成为了数据通信市场的主要产品. 随着高清晰度电视(High Definition Television, HDTV)的普及应用和全球电讯市场对超高速数据通信业务需求量的不断增长, 100GbE 光以太网技术现正成为新一代的电讯组网标准, 并且其相应的超高速通信产品已在 2010 年获得正式商业应用. 因此, 这就需要使用具有光信号输入端口/接口的宽带示波器, 以满足工程设计与应用的要求. 下面, 我们将针对高速或超高速光通信用的宽带示波器设备进行论述.

1.2 高速/超高速光通信用的宽带示波器

在数字通信技术方面, 宽带示波器常被用来测量高速数据脉冲信号的上升和下降沿、脉冲宽度、信号波形、码间干扰、定时抖动、眼图形状及其张开度等等. 一般来讲, 适用于高速或超高速光通信的宽带示波器设备可以分为两类: 第一类可被称为常规的光-电混合型宽带示波器; 而第二类则被称之为超宽带全光取样示波器.

常规的光-电混合型宽带示波器是通过将超快光电探测器与商用化的宽带电子取样示波器进行级联而得以实现的, 如图 1. 其特点是技术成熟、易于实现、工作可靠、测量方便. 但是, 光-电混合型宽带示波器的一个主要缺点是其测量带宽受限, 即它取决于所使用的光电探测器和电子取样示波器的工作带宽.

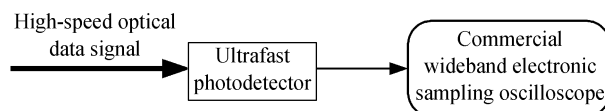


图 1 常规的光-电混合型宽带示波器工作原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of a conventional hybrid optical and electronic wideband oscilloscope

目前, 国际上只有美国的 Agilent Technologies 公司和 Tektronix 公司能生产出供高速光通信用的、基于电信号处理方式的宽带数字采样示波器, 其电子通道的最大带宽已达到 70~90 GHz 的水平, 但该类光-电混合型宽带示波器的可用工作带宽将低于这个水平. 为了便于说明问题, 本文进行了一个有关 100 Gbit/s 的 OTDM 光脉冲信号波形的测量实验. 将 50 GHz 光电探测器(用作为一个光信号输入接口部件)直接与 70 GHz 电子取样示波器进行级联, 从而构成了一台光-电混合型宽带示波器. 然后将经过光时分复用后的、速率为 100 Gbit/s 的光脉冲信号输入到该光-电混合型宽带示波器中进行信号波形测量, 如图 2. 由于测量系统的工作带宽不足, 可以很容易地观察到该示波器所显示的 100 Gbit/s 脉冲信号波形已严重失真, 从图 2 上面已无法分辨出四个相邻的 OTDM 脉冲信号. 因此, 光-电混合型宽带示波器已不能胜任对二进制的 100 Gbit/s 以太网数据信号和 160 Gbit/s 的 OTDM 光数据信号或更高速率的光脉冲信号进行准确测量的任务. 另外, 90 GHz 的系统带宽已基本达到了当前电子技术的工作极限水平. 由此可见, 依靠进一步提高电信号处理速度的方式增加光-电混合型示波器的可用工作带宽, 其作用是非常有限的, 而且目前的改进程度也是不明显的. 在实际应用中, 由于无法在一个很宽的工

作频率范围内确保超快光电探测器的输出端与宽带电子取样示波器的输入端之间的阻抗匹配条件, 这也会造成被测信号波形的畸变和失真。

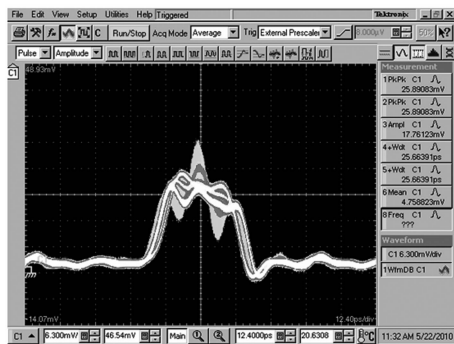


图2 用 50 GHz 光电探测器与 70 GHz 电子取样示波器构成的光-电混合型示波器测量 100 Gbit/s 光信号的 4 个相邻脉冲(已无法分辨波形)

Fig. 2 Measurement of 4 consecutive pulses (unrecognizable signal waveform) for 100 Gbit/s optical signal by using a hybrid optical and electronic oscilloscope consisting of a 50 GHz photodetector and a 70 GHz electronic sampling oscilloscope

示波器工作带宽的大小将会直接影响到被测脉冲信号波形的重现精度, 并会对被观测的数据脉冲信号的最高数据比特率加以限制。因此, 若要对超短光脉冲波形和超高速光数据信号序列的精确观测以及对超高速光通信系统有关参量的准确测量, 人们就必须采用超快全光信号处理技术取代传统的电信号处理以克服光电/电光转换过程、电子器件和线路所造成的瓶颈效应问题, 从而确保所开发出来的示波器具有几百 GHz 至数 THz 的工作带宽。这就促成了超宽带全光取样示波器技术领域的建立和发展。概括地讲, 超宽带全光取样示波器是集中了飞秒激光技术、超快非线性光学、高精度模-数转换、数字信号处理、计算机图形显示技术于一体的尖端仪器设备, 它是研究和开发单波长超高速光纤通信系统与网络必不可少的测试设备。同时, 超宽带全光取样示波器的实际应用又有力地推进了超高速 OTDM 技术的向前发展。例如, 借助于该先进的光学示波器, 近年来德国、日本、丹麦、荷兰和澳大利亚的有关研究机构已成功演示了速率为 640 Gbit/s 至 5.1 Tbit/s 的单波长 OTDM 实验^[3-5, 25, 38-41]。

2 超宽带全光取样示波器

本文将首先概述超宽带全光取样示波器的发展历程和国际研究现状, 然后将介绍超宽带全光取样示波器的工作原理和设计考虑。同时, 本文还将结合本课题组研发国内首台超宽带全光取样示波器实验样机系统的工程经验, 指出光学取样与波形显示

系统和全光取样示波器在测试功能方面的主要差异。

2.1 超宽带光学取样与波形显示系统和全光取样示波器的国际研发概况

利用光纤的非线性效应实现全光取样示波器的研究工作大约始于 90 年代初期^[47-49]。但是, 当时所报道的全光取样示波器系统的工作带宽有限, 使其时间分辨率受限于几个皮秒的水平, 故无法满足对超高速光数据信号进行精确测量的要求。其实早期研制出的全光取样示波器从严格意义上讲只能被称为光学脉冲信号波形取样与测量以及波形显示系统(为方便起见, 简称为光学取样与波形显示系统), 因为它只能完成简单的光脉冲信号参量测量(例如, 脉冲宽度和上升/下降时间), 在功能上与现代电子取样示波器相比还存在着明显的差距。日本的 NTT 实验室基于其当时研发 100 Gbit/s 或更高速 OTDM 传输系统的需求, 于 90 年代中期通过使用亚皮秒取样光脉冲源和 KTiOPO_4 (KTP) 晶体的“和频产生”(Sum Frequency Generation, SFG) 效应, 率先在国际上开发出了时间分辨率为亚皮秒级的超宽带光学取样与波形显示系统^[50], 并由此开创了超宽带全光取样示波器技术这一新兴研究领域。借助于该先进测试设备, NTT 实验室在 1995 年至 1998 年期间, 成功地报道了速率为 200 Gbit/s、400 Gbit/s、500 Gbit/s 和 640 Gbit/s 的 OTDM 实验系统^[51-55], 从而使得 NTT 实验室在 OTDM 技术领域的研究工作在 90 年代居于世界领先水平, 并于 2000 年在国际上首次完成了 1.28 Tbit/s 的 OTDM 传输系统实验^[2]。因此, 可以概括地讲超宽带全光取样示波器是伴随着超高速光通信技术的发展而出现的一种新型测量设备, 而前者的实际应用又有力地推进了超高速 OTDM 技术的向前发展。

在 NTT 实验室开发出了首台超宽带光学取样与波形显示系统以后, 这一新研究领域的工作很快就在国际上受到了高度重视。自 90 年代中期以来, 许多国际知名的设备制造公司、光通信技术研究机构 and 实验室, 例如日本的 Yokogawa 公司、美国的贝尔实验室、普林斯顿大学和 Agilent 公司、德国的 HHI 研究所、瑞典的 Chalmers 理工大学等, 已先后报道了采用不同方式实现超宽带光学取样与波形显示系统或全光取样示波器的工作。在表 1 中, 本文专门总结了在这个技术领域具有代表性或典型性的实验研究工作, 详情见参考文献^[50, 56-83]的报道。

表 1 具有代表性的超宽带光学取样与波形显示系统或全光取样示波器的研发工作简介
 Table 1 Summary of Representative R&D Work for Ultra-wide Bandwidth Optical Sampling and Waveform Display Systems or All-optical Sampling Oscilloscopes

研制单位及时间	主要性能参量	关键技术与器件	备注
日本 NTT 实验室 1、1994 年 2、1996 年 3、2000 年 4、2001 年 5、2009 年	0.55 ps 光取样脉冲、0.63 ps 时间分辨率、100 Gbit/s 光信号波形测量。 0.4 ps 光取样脉冲、0.9 ps 时间分辨率、100 Gbit/s 光信号眼图测量。 10 Gbit/s 至 160 Gbit/s 光信号眼图质量监测和 Q 因子估算。 0.8 ps 光取样脉冲、3.6 ps 时间分辨率、60 nm 波长带宽、160 Gbit/s 光信号波形测量。 0.1 ps 光取样脉冲、160 Gbit/s 光信号眼图和频率啁啾测量。	锁模光纤激光器 (ML-EDFL)、KTP 晶体、和频产生 (SFG)。 ML-EDFL、有机晶体 (AANP)、SFG。 增益开关半导体激光器 (GS-LD)、SFG 晶体。 ML-EDFL、PPLN 晶体、准相位匹配 (QPM)。 锁模光纤激光器、双通道线性光学取样、相干检测。	异步取样 高灵敏度 强度和相位可测
日本 TERATEC 公司 1、1997 年 2、2000 年 3、2000 年	4 ps 光取样脉冲、0.7 ps 定时抖动、4 ps 时间分辨率、110 GHz 带宽、10 Gbit/s 光信号眼图测量。 0.97 ps 光取样脉冲、160 fs 定时抖动、310 GHz 带宽、1.25 ps 时间分辨率、200 Gbit/s 光信号眼图测量。 0.98 ps 光取样脉冲、160 fs 定时抖动、时间分辨率 < 1 ps、22.5 nm 波长带宽、160 Gbit/s 光信号眼图测量。	GS-LD、KTiOPO ₄ (KTP) 晶体、SFG。 同上。 GS-LD、PPLN 晶体、SFG。	高灵敏度
日本 ANDO 公司 1、2001 年 2、2002 年	480 fs 光取样脉冲、700 fs 时间分辨率、80 fs 定时抖动、320 Gbit/s 光信号眼图测量。 157 fs 光取样脉冲、670 fs 时间分辨率、300 fs 定时抖动、超过 100 nm 的系统波长带宽。	ML-EDFL、KTP 晶体、SFG。 ML-EDFL、PPLN 晶体、SFG、使用波长可调谐的孤子脉冲取样。	波长范围宽
日本 Yokogawa 公司 2004 年	210 fs 光取样脉冲、280 fs 时间分辨率、80 fs 定时抖动、640 Gbit/s 光信号眼图测量。	ML-EDFL、PPLN 晶体、SFG、使用波长可调谐的孤子脉冲取样。	该技术已商用化
日本 NEC 公司 2000 年	2 ps 光取样脉冲、2.1 ps 时间分辨率、0.5 ps 定时抖动、160 Gbit/s 光信号眼图测量。	结构紧凑的外腔锁模半导体激光器、半导体光放大器 (SOA)、四波混频 (FWM)	
日本 Anritsu 公司 1、2001 年 2、2004 年	0.5 ps 光取样脉冲、80 nm 的波长带宽 (覆盖 C 和 L 波段)。 0.5 ps 光取样脉冲、1 ps 时间分辨率、0.2 ps 定时抖动、160 Gbit/s 光信号眼图测量。	基于 AANP 晶体为全光取样门的光学取样示波器。 基于包络检波方式的光学取样示波器，不需要传统的触发技术。	高灵敏度
美国 Princeton 大学 1、1998 年 2、2000 年	1 ps 光取样脉冲、10 ps 时间分辨率、100 GHz 带宽。 2.8 ps 光取样脉冲、160 Gbit/s 光信号波形测量。	锁模 Nd : YLF 激光器、基于 SOA 的“太赫兹光学非对称解复用器”(TOAD)。 ML-EDFL、基于 SOA 的 TOAD。	可测单脉冲 系统简单

研制单位及时间	主要性能参量	关键技术与器件	备注
美国贝尔实验室 1、2002 年 2、2003 年 3、2004 年	300 fs 光取样脉冲、80 Gbit/s 光信号眼图测量. 750 fs 光取样脉冲、1.3 ps 时间分辨率、350 GHz 带宽、320 Gbit/s 光信号眼图测量. 70 fs 定时抖动、640 Gbit/s 光信号眼图测量.	ML-EDFL、线性光学取样、相干检测. 基于电吸收调制器(EAM)的取样光源、高非线性光纤(HNLF)、SOA 超快非线性干涉仪(UND). ML-EDFL、线性光学取样、相干检测.	高灵敏度 可测相位
美国 Agilent 公司 2002 年	100 fs 光取样脉冲、时间分辨率 < 700 fs、超过 1 THz 带宽.	ML-EDFL、PPMgLN 晶体、SFG.	覆盖 C 和 L 波段
德国 HHI 研究所 1、1999 年 2、2002 年 3、2002 年 4、2005 年	1.7 ps 时间分辨率、160 Gbit/s 光信号波形测量. 1.5 ps 光取样脉冲、0.3 ps 定时抖动、160 Gbit/s 光信号眼图测量和 Q 因子监测. 1.5 ps 光取样脉冲、0.2 ps 定时抖动、320 Gbit/s 光信号眼图测量. 730 fs 光取样脉冲、0.24 ps 定时抖动、1.0 ps 时间分辨率、440 GHz 带宽、320 Gbit/s 光信号眼图测量.	锁模半导体激光器、SOA、增益透明 FWM. 锁模半导体激光器、非线性光纤环路镜”(NOLM)、HNLF. 锁模半导体激光器、SOA、增益透明 UNI、保偏光纤. ML-EDFL、HNLF、光学 Kerr 门.	光学时钟恢复
瑞典 Chalmers 理工大学 1、2001 年 2、2003 年 3、2004 年 4、2005 年 5、2009 年	1.6 ps 光取样脉冲、定时抖动 < 0.1 ps、1.6 ps 时间分辨率、300 Gbit/s 光信号眼图测量. 1.6 ps 光取样脉冲、160 Gbit/s 光信号眼图测量. 1.1 ps 光取样脉冲、0.7 ps 时间分辨率、500 Gbit/s 光信号眼图测量、可工作在 1 535 至 1 569 nm 的波长范围. 1.3 ps 光取样脉冲、0.93 ps 时间分辨率、60 nm 的波长带宽. 0.8 ps 时间分辨率、170.4 Gbit/s 光信号平衡眼图测量.	ML-EDFL、HNLF、FWM. FWM、软件同步全光取样技术. ML-EDFL、HNLF、交叉相位调制(XPM). ML-EDFL、HNLF、FWM. HNLF、FWM、全光平衡检测、软件同步.	技术已商用化 高灵敏度 DPSK 光信号测量

此外,国际上最近报道的有关超宽带光学取样与波形显示系统的研究工作也主要反映在新型超快全光取样器的开发方面,例如,使用硅纳米线或纳米波导(Nanowire 或者 Nanowaveguide)、As₂S₃ 光子线(Photonic Wire)等实现超快全光取样器^[40, 84-85].

2.2 超宽带光学取样与波形显示系统和全光取样示波器的基本工作原理

在本文中,只考虑利用超快光学非线性效应实现的全光取样器及其相应的超短光脉冲信号/超高速光数据信号测量系统.一般来讲,超宽带光学取样与波形显示系统和超宽带全光取样示波器系统在硬件结构组成方面是相同的.但是,根据本课题组对该系统的工程研发经验和理解,本文认为这两者在系统测试功能方面还存在着较明显的差距,主要

是因为这两种系统对软件功能的要求和数字信号处理技术的需求不同所导致的.例如,一台常规的超宽带光学取样与波形显示系统可以被用来显示超短光脉冲信号波形和超高速光数据信号的眼图,同时还能测量光脉冲信号的上升时间/下降时间、脉冲宽度、占空比、相邻脉冲的时间间隔等“直接参量”.对于超宽带全光取样示波器来讲,由于安装了功能强的软件分析与处理程序和使用数字信号处理技术对被采集到的有关光脉冲信号波形的原始数据进行后端加工处理,因此这种全光取样示波器不仅能完成超高速光数据脉冲的信号波形和眼图显示以及“直接参量”的测量工作,而且还能通过后端数据分析和数字信号处理方式得到或估算出超高速光数据信号的“间接参量”(例如,“Q”因子、定时抖动、码间干扰、信噪比等;若有需要,也可以估算出周期性

光信号的重复频率和超高速光数据信号的数据率)和使用软件算法提取出超高速光数据信号的同步信息等.由此可见,高性能的超宽带全光取样示波器可以被看成为是一种测量功能很强的先进光学取样与波形显示系统.简单地讲,一台超宽带光学取样与波形显示系统主要是由四部分功能单元组成:1)

供全光取样用的高稳定性超短光脉冲源;2)超快光学取样器;3)光电探测和模-数转换(A/D)单元;4)数据处理和计算机成像单元,如图3.其中前两项是实现超宽带光学取样与波形显示系统的核心技术,将在本文的第四部分加以重点说明.

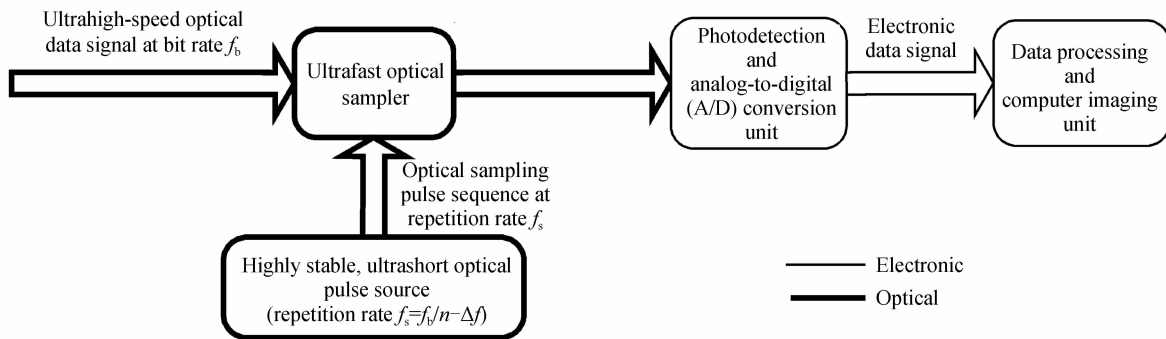


图3 超宽带光学取样与波形显示系统的功能结构示意图

Fig. 3 Illustration of functional blocks for an ultra-wide bandwidth optical sampling and waveform display system

当数据率为 f_b 的超高速光数据信号(图4(a))被送入超宽带光学取样与波形显示系统进行光脉冲信号波形和眼图测量时,首先应当确定光学取样脉冲源的重复频率 f_s , 即

$$f_s = \frac{f_b}{n} - \Delta f \quad (1)$$

式中 n 为一个正整数, Δf 为频率偏移量,在实际应用中它们的数值将分别取决于电子模-数转换器的工作速度、用于显示一个完整脉冲波形/眼图所需要的光学取样点的数目及其获取时间.然后驱动光学取样脉冲源生成重复频率为 f_s 的周期性超短光脉冲序列,如图4(b).再将该取样用的超短光脉冲序列和速率为 f_b 的超高速光数据信号一起输入到超快光学取样器中,利用非线性光学晶体或半导体光放大器或光纤中的超快光学非线性效应,在周期性光取样脉冲序列的控制下,形成一个具有超短开通时间功能的光学时域门控单元.由于每个取样光脉冲的宽度都明显地小于超高速光数据信号的单个脉冲宽度,这就能确保单个光数据脉冲波形在光学取样器的一个特定开通时间段里面只有很窄的一部分光信号能通过它,从而获得了超高速光数据信号在取样时间点上的强度.一般来讲,取样率 f_s 应该选择得较低(即 n 值较大),约为 100 MHz 至 300 MHz 左右,以便充分利用目前市场上已有的高性能电子模-数(A/D)转换器,同时又能将执行一个完整的光信号波形取样过程所需的时间保持在一个较合理的水平.相对于待测的超高速光数据信号而言,由于对取样用的超短光脉冲序列引入了一个小的频率偏移量 Δf , 这在对一个具有较长持续时间的光数据脉冲序列进行测量时,就能确保当前的

取样点与下一个取样点反映到一个周期性的光脉冲波形上将总是出现在不同的取样时刻上,如图4(c).因此,在超快光学取样器的输出端,我们就得到了被取样后的光脉冲序列,它携带了为重现和观测各个超高速光数据脉冲所需要的光信号强度信息.为了得到良好的信号波形显示效果, Δf 值一般都选择得较小.此时,取样后所获得的光数据信号强度信息还需要经过光电转换(具有低的带宽)之后

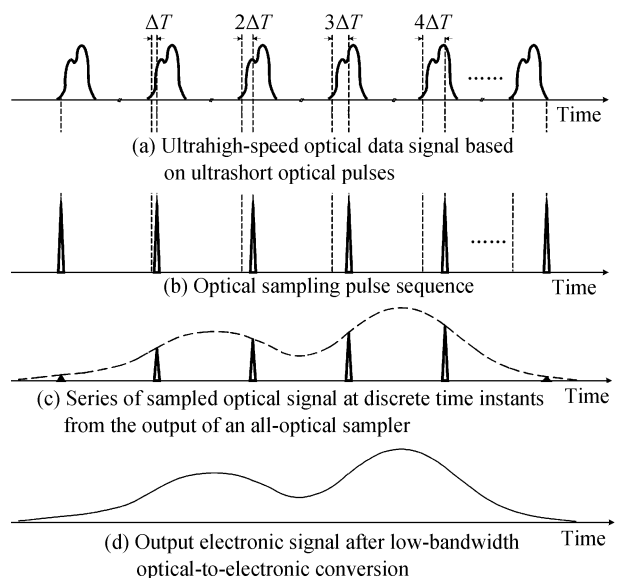


图4 超宽带全光取样示波器的输入光数据信号、光取样脉冲序列、被取样后的离散光信号序列和经过低带宽光电转化后得到的电信号示意图

Fig. 4 Illustration of input optical data signal, optical sampling pulse sequence, the series of sampled optical signal at discrete time instants, and the obtained electronic signal after low-bandwidth optical-to-electronic conversion in an ultra-wide bandwidth all-optical sampling oscilloscope, respectively

才能变成电子模拟信号(图 4(d)), 然后将它输入到一个电子 A/D 转换器中产生出数字信号, 以供下一步的信号波形参量分析和测量之用. 最后经过有关的计算机数据分析与图形处理后(如果需要的话, 还将包括后端的高级数字信号处理), 在计算机屏幕上显示出该超高速光信号的脉冲波形或眼图.

根据实际使用情况, 超宽带光学取样与波形显示系统或超宽带全光取样示波器的工作方式可以大致分为异步取样、硬件同步取样和软件同步取样三种方式, 它们各有其优缺点. 例如, 硬件同步取样系统能提供准确的“Q”因子数值和实时眼图监测^[80], 但它需要从超高速光数据流中提取出时钟信号. 当待测光数据信号的速率很高时, 实现时钟恢复电路的难度变大, 成本增高^[80]. 而且使用时钟恢复电路的结果还将导致硬件同步取样系统对输入光数据信号的比特率和调制制式有一定的要求. 异步取样系统不需要使用时钟恢复电路, 故它具有比特率和调制制式透明的优点^[57, 74, 80], 并且是一种简单可行的“Q”因子监测方法. 但是, 异步取样方式却存在着不能检测光信号定时抖动的问题^[80]. 软件同步取样方式是由瑞典学者于 2003 年提出的一种有关超宽带全光取样示波器设计的新方法^[80], 它不需要使用传统的时钟恢复电路就能获得同步信息. 该方法的一个显著优点就是使用基于傅里叶变换的软件算法取代硬件时钟恢复电路, 以便获得所需要的同步信息. 因此, 软件同步取样系统具有对输入光数据信号调制制式透明和比特率较为灵活的工作特点^[80], 并且该系统与硬件同步取样系统相比还具有硬件结构较简单的特点. 但是这些是以增加软件处理功能和大量计算为代价换取的.

随着通信速率的不断提高, 超宽带全光取样示波器现已成为研究与开发超高速光通信系统和光子交换网络的一种关键性测试仪器设备. 对于工程应用来讲, 目前还没有可工作于 100 Gbit/s 或更高速率的误码测试仪. 因此, 我们可以将超宽带全光取样示波器用于监测经光纤传输后的超高速光数据信号的实际眼图, 以便对超高速光纤通信系统的性能做出实时的评估, 并且还能够对采用光纤色散/偏振模色散补偿方案后的光数据信号传输质量的改进效果做出及时的评价. 这将是一种快速、可行的监测超高速光信号传输质量的手段. 因此, 超宽带全光取样示波器可望成为未来超高速光通信系统与网络开发的标准配置测试设备.

3 超宽带全光取样示波器设备的实验样机设计与实现

下面将介绍我们自行设计和研制出的首台超宽带全光取样示波器设备的样机系统, 并报道我们已取得的部分初步实验结果. 我们将重点讨论该系统的工程化设计问题及其有关的光子器件实际选择考虑, 以便为将来超宽带全光取样示波器设备的国产化奠定技术基础.

3.1 超宽带全光取样示波器设备的工程设计考虑

我们研制出的超宽带全光取样示波器实验样机系统的工作原理与图 3 所示的是非常相似的, 即它是由四部分主要功能单元所组成: 1) 高稳定性飞秒脉冲激光器; 2) 易于工程化的超快光学取样器; 3) 低噪光电探测单元和高精度电子模-数转换(A/D)单元; 4) 数字信号处理、光信号参量测量和计算机成像单元. 其中前两项是实现全光取样示波器的核心硬件技术, 而最后一项则决定了该示波器测量功能的强弱. 我们根据开发实验样机系统的经验得知, 光脉冲取样源和全光取样器的工作稳定性、带宽、结构复杂性和成本将会直接影响到超宽带全光取样示波器的时间分辨率、整机系统的体积、工作可靠性和生产成本. 对此, 我们将加以重点讨论.

一般来讲, 增益开关激光器和锁模激光器是两种常用的皮秒和飞秒级脉冲光源. 半导体激光器的增益开关工作模式是一种公认的简单且可靠的皮秒光脉冲产生技术. 它可以方便地应用于现有的商用化半导体激光器中, 并能够灵活地输出可变重复频率的皮秒光脉冲信号, 但是增益开关激光器存在着定时抖动和频率啁啾大的问题. 我们在全光取样示波器实验样机系统的前期开发阶段, 已采用了增益开关激光器作为本系统的光取样脉冲源, 然后通过使用光注入锁定和简单的光纤压缩器方案, 获得了低定时抖动(500 fs)、高稳定性的飞秒光脉冲序列, 并成功地应用于我们早期的光学取样与波形显示系统中^[86]. 但是, 我们的研究表明采用增益开关激光器和简单光纤压缩器的方案是难于产生出定时抖动低于 500 fs、脉冲宽度小于 400 fs 的光取样脉冲序列^[86], 否则需要使用复杂的光脉冲压缩器, 但这将会导致光脉冲取样源的体积变大、结构复杂性增高、成本增加而稳定性降低. 为了有效地研制超宽带全光取样示波器设备, 我们设计出了一种新型的重复频率可调、高稳定性的被动锁模光纤激光器,

它可以用于产生脉宽小于 170 fs、抖动低于 75 fs 的光取样脉冲序列,并且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^[87].该被动锁模光纤激光器由于具有结构简单、体积小、全商用化器件实现和可靠性高的优点^[87],已经被用在我们的首台超宽带全光取样示波器设备样机系统中有一年多的时间了,目前仍能稳定地工作.

为了实现超快光学取样器,我们可以分别使用非线性光学晶体(例如, KTP 晶体和周期极化铌酸锂(PPLN)晶体)的 SFG 效应或光纤中的四波混频和交叉相位调制效应.当常规 KTP 晶体被用于实现超快光学取样器时,其 SFG 转换效率低.这就需要使用光放大器对超高速光数据信号和超短光取样脉冲信号进行放大,以便该超快光学取样器能输出有效的 SFG 信号用于后续处理.因此,使用 KTP 晶体将不便于观测超高速光数据信号的眼图^[56].为了解决这个问题,具有高 SFG 转换效率的 PPLN 晶体可以取代 KTP 晶体,用于实现高灵敏度和时间分辨率的超宽带全光取样示波器^[58, 62, 64-65].但是,基于非线性光学晶体的超快光学取样器在实际应用中也存在着光纤与非线性晶体的耦合问题,它需要器件间的精确对准和确保长期的耦合可靠性.因此,这将会增加超宽带全光取样示波器系统制作的难度.另外,使用 PPLN 晶体的超快光学取样器还存在着工作温度控制的问题.我们曾将 PPLN 晶体应用于我们早期研制的超宽带全光取样与波形显示系统

中^[86],但结果发现系统实现的难度较大和不易于小型化,因而我们转向采用一种更易于工程实现、结构紧凑和有助于未来批量生产的设计方案,详情将报道如下.

3.2 超宽带全光取样示波器设备的样机系统实验装置图与测试结果

图 5 为我们研制的全光取样示波器设备的样机系统实验装置图.飞秒脉冲激光器和超快光学取样器是实现该光学取样示波器设备的核心硬件技术.为了满足工程化设计和设备小型化的要求以及考虑到将来全光取样示波器的国产化问题,我们采用了一种完全基于商用化光子器件实现全光取样示波器的有效设计方法.对此,我们研制出了一种新型的重复频率可调、被动锁模飞秒光纤激光器^[87],并且成功地将它用作为本示波器样机系统的高稳定性光取样脉冲源.该光纤激光器具有如下特点:1)能够确保在被动锁模状态下,根据实际需要在 49.65 MHz 到 50.47 MHz 的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;2)能够在 1.55 μm 波长范围产生出脉宽小于 170 fs 的高稳定性光脉冲序列;3)光取样脉冲序列的定时抖动低于 75 fs;4)自启动锁模,并能够在锁模状态下连续工作超过 10 个小时而不需要调节激光器腔内的任何光学器件;5)具有结构简单和体积小的优点,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,可靠性高、重复性好,有利于工程应用.

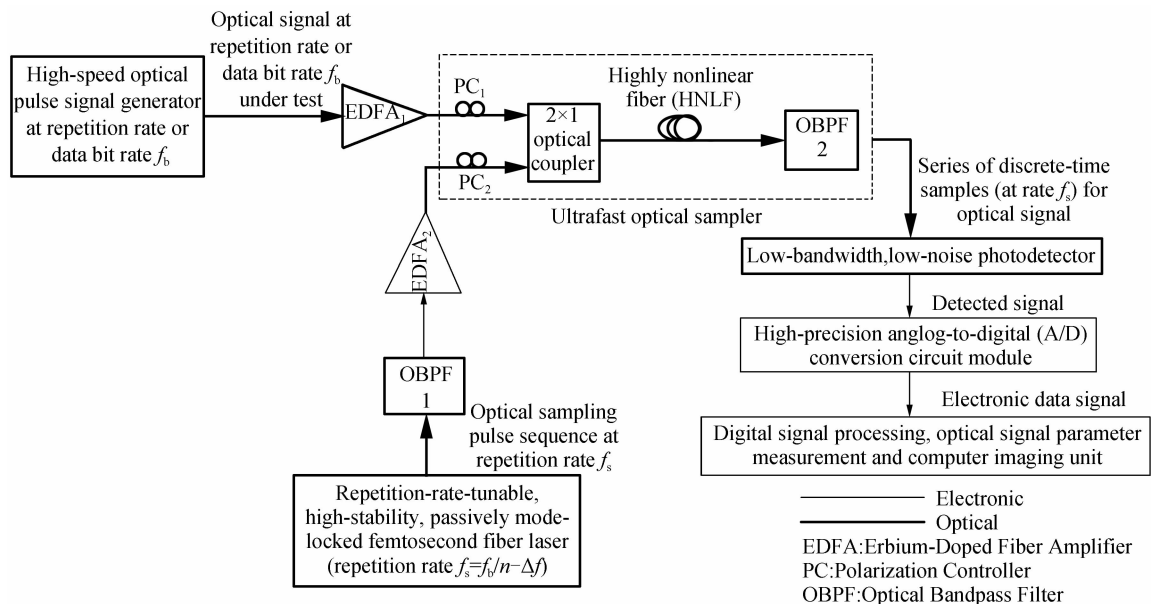


Fig. 5 Experimental set-up of a prototype system for ultra-wide bandwidth all-optical sampling oscilloscope

由该取样脉冲源所产生的重复频率 f_s 大约为 50 MHz 的飞秒光脉冲序列首先通过一个光学带通

滤波器进行滤波,减小其光谱宽度,从而降低了它与数据脉冲信号光谱之间的重叠,有利于缩短这两

束光的中心波长间隔和满足它们在光纤中的相位匹配条件. 经过滤波后, 光取样脉冲的中心波长为 1 543 nm, 其脉冲宽度被展宽到约为 1 ps, 但这仍然能满足对光数据脉冲信号进行高时间分辨率取样的要求(见下面的说明). 然后光取样脉冲序列和待检测的高重复频率或高数据率光脉冲信号分别经过光放大之后输入到一个全光取样器中, 利用其超快光学非线性效应实现被测光脉冲信号波形的光学取样. 在实验中, 我们使用了一台高速光脉冲信号发生器产生重复频率或数据率为 f_b 的待检测光脉冲信号. 其中 f_b 和 f_s 的关系是由式(1)确定的. 因此, 使用我们新设计出的重复频率可调、被动锁模飞秒光纤激光器^[87], 有助于按照式(1)的要求在实际应用中灵活地选取 f_s 数值, 以便优化频率偏移量 Δf , 获得最佳的脉冲信号波形显示效果. 另外, 该锁模光纤激光器所产生的光取样脉冲序列具有低定时抖动和高稳定性, 这将有利于提高光学信号波形取样的时间精度.

高速光脉冲信号发生器是由一个重复频率为 10 GHz、输出脉冲宽度为 1.8 ps、中心波长为 1 554 nm 的主动锁模半导体激光器和一个基于常规光学分路、延时与合路原理的 OTDM 器所组成, 以产生出高重复频率 f_b 的光脉冲信号序列供波形测量之用. 如果我们要对高速光数据信号的眼图进行监测的话, 这就需要在主动锁模半导体激光器的输出端和 OTDM 复用器的输入端之间插入一只铌酸锂电-光强度调制器. 在经过伪随机电子数据序列调制之后, 铌酸锂调制器输出的信号就是基于超短光脉冲的、数据率为 10 Gbit/s 伪随机数据信号. 然后将此光信号输入到 OTDM 复用器中, 就得到了数据率为 f_b 的高速光数据信号, 用于模拟实际通信系统中的高速光数据信号流. 但是, 当被测光脉冲信号的重复频率或数据率 f_b 为 10 GHz 或 10 Gbit/s 时, 高速光脉冲信号发生器就不需要包含有 OTDM 复用器了.

在本实验中, 所用的超快光学取样器是由一段长度为 100 m 的高度非线性光纤 (Highly-Nonlinear Fiber, HNLF)、一个带宽为 1 nm 的可调谐光学带通滤波器、两个偏振控制器和一个 2×1 光纤耦合器构成, 如图 5. 由于利用了高度非线性光纤中的超快四波混频效应 (Four-Wave Mixing, FWM), 我们就需要在光学取样器的输入端使用两个偏振控制器分别对输入的光取样脉冲序列和被测光数据脉冲信号的偏振态进行调节, 以便优化 FWM 的转换效率, 得到满意的光学信号波形取样效果. 然后将光取样脉冲序列与被测光数据脉冲信

号经过一个 2×1 光纤耦合器结合后输入到一根高度非线性光纤. 在满足相位匹配的条件下, 光纤中就会出现四波混频效应, 产生出所需要的波长为 1 533 nm 的 FWM 分量(图 6), 从而实现了重复频率或数据率为 f_b 的被测光脉冲信号波形的全光取样. 通过调节光学带通滤波器的中心波长到该 FWM 分量所在的 1 533 nm 波长位置, 即可滤出所需光频信号分量. 此时, 只需要将该光频信号分量输入到一只低带宽的光电探测器中进行光电转换, 即可获得相应的电信号; 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(A/D)转换. 最后将所得到的电数字信号送入到后端的“数字信号处理、光信号参量测量和计算机成像单元”, 通过使用计算机软件和相关的数字信号处理算法对所采集到的数据进行分析 and 处理, 获得被测光脉冲信号的有关参量, 并在显示器上准确再现被测高速光信号的脉冲波形或眼图.

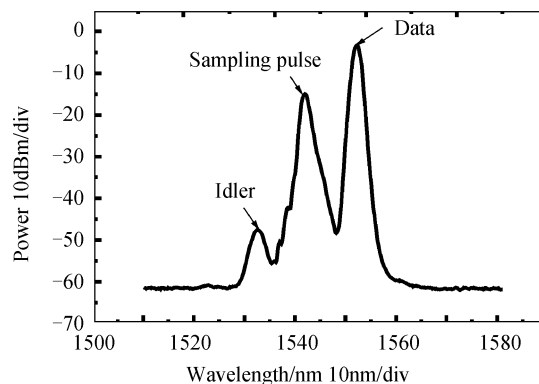


图 6 在经过了 FWM 效应后, 超快光学取样器内部的高度非线性光纤所输出的光谱

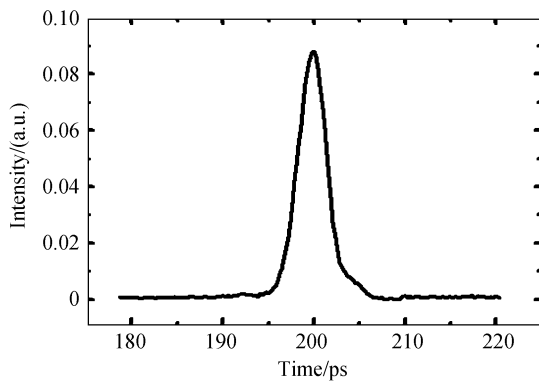
Fig. 6 Optical spectrum at the output of a highly nonlinear fiber in an ultrafast optical sampler after the FWM effect takes place

我们研制的全光取样示波器设备的样机系统没有使用任何的时钟恢复电路(图 5). 因此, 它具有对输入光数据信号调制制式透明和比特率较为灵活的特点, 并且它与硬件同步取样系统相比还具有硬件结构较简单、易于实现的优点. 为了能够正确地显示所测光数据信号的脉冲波形或眼图, 我们在本样机系统中使用了一种软件同步取样方法^[80], 并且开发了我们的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以及光数据脉冲信号的波形或眼图测量, 有关结果将在后续论文中加以报道.

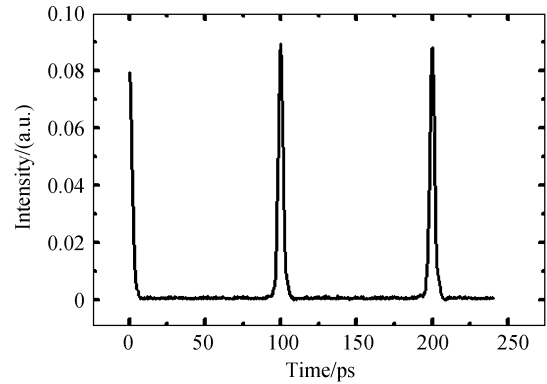
由图 5 可知, 我们设计的全光取样示波器设备样机完全是由商用化的成熟光子和电子器件所构成, 其中飞秒脉冲激光器和超快光学取样器主要是基于电讯用的光纤. 因此, 所开发出的全光取样示

波器样机系统具有技术成熟、结构较简单、系统可靠性高、易于小型化设计和工程化实现以及降低未来的生产成本等优点。另外，我们自主研发出的重复频率可调被动锁模飞秒光纤激光器具有开机自启动锁模、低定时抖动和高工作稳定性的特点，并且它输出的光取样脉冲序列的重复频率值可以根据实际需要在 49.65 MHz 到 50.47 MHz 的范围内灵活地选取而且可重复性高。因此，使用该锁模光纤激光器和基于光纤的超快光学取样器能够确保我们开发的全光取样示波器设备具有高的时间分辨率和大的系统带宽，以满足超短光脉冲信号测量和超高速光通信应用的要求。

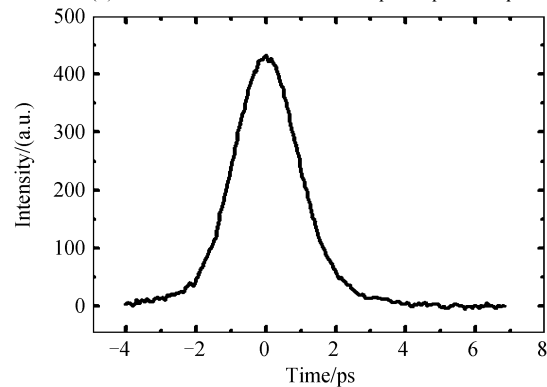
图 6 是在超快光学取样器内部的高度非线性光纤输出端通过使用一台光谱分析仪测得的、经过了 FWM 效应后的光谱。我们可以看到由于实际使用的光取样脉冲的光谱较窄(经过了滤波后)，故它与光数据脉冲信号在光谱图上是明显分开的。产生出的所需 FWM 光谱分量位于 1 533 nm 波长，并已清楚地显示在图 6 上。由于光数据脉冲信号的光谱与所需 FWM 光谱分量较好地分开了，这将有利于使用一只光学带通滤波器将该 FWM 分量提取出来并输入到一只低带宽的光电探测器中进行光电转换。再将所获得的相应电模拟信号输入到数据采集卡中进行 A/D 转换。然后使用数字信号处理技术对所采集到的数据进行分析处理，并在显示器上准确再现被测光脉冲信号的波形。图 7(a)和(b)是对重复频率为 10 GHz、脉宽为 1.8 ps 的周期性超短光脉冲信号序列进行全光波形取样后的再现结果，并测得其脉冲宽度值为 2.3 ps(图 7(a))。同时，我们还使用了一台自相关仪对该超短光脉冲信号进行了准确的测量，所得到的脉冲宽度值为 1.8 ps。因此，我们研制出的全光取样示波器实验样机系统具有一个 $1.43 \text{ ps} (= \sqrt{2.3^2 - 1.8^2})$ 的时间分辨率。我们还使用这台超宽带全光取样示波器实验样机系统分别对重复频率为 10 GHz 的周期性



(a) The displayed single optical pulse



(b) The measured waveform for optical pulse sequence



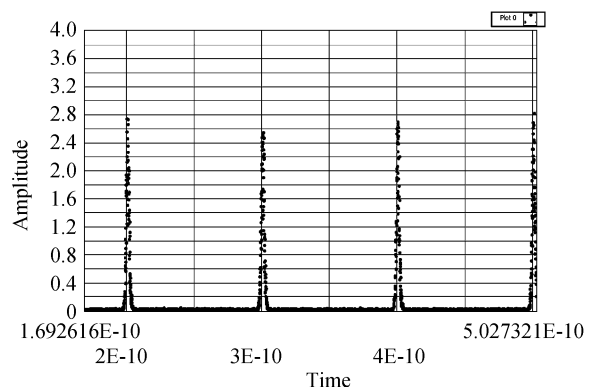
(c) The autocorrelation trace of an optical pulse measured by an autocorrelator

图 7 使用研制出的示波器实验样机系统对重复频率为 10 GHz 的周期性超短光脉冲信号序列进行测试的结果

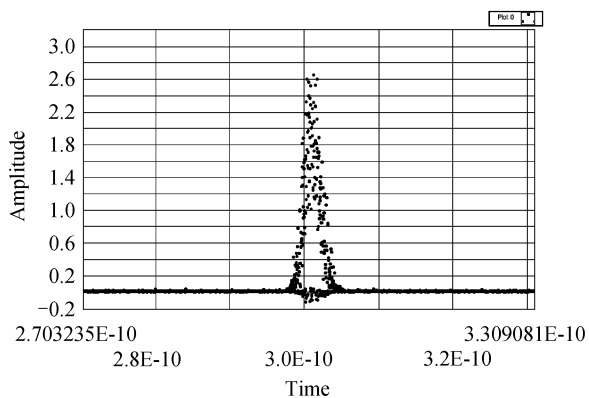
Fig. 7 The use of our developed oscilloscope prototype system to measure a periodic optical short-pulse sequence at the repetition rate of 10 GHz

超短光脉冲信号序列进行动态波形测量和对数据率为 10 Gbit/s 但脉宽仅为 1.8 ps 的光数据信号的眼图进行监测，其测试结果如图 8。

当被测光脉冲信号的重复频率或数据率增加到 40 GHz 或 40 Gbit/s 时，这就需要在高速光脉冲信号发生器内部使用一只 OTDM 复用器，将原始重复频率为 10 GHz 或数据率为 10 Gbit/s 的光脉冲信号(脉宽为 1.8 ps)进行速率提升。然后我们使用研制出的超宽带全光取样示波器实验样机系统对该



(a) The dynamic waveform of 10GHz periodic optical short-pulse sequence

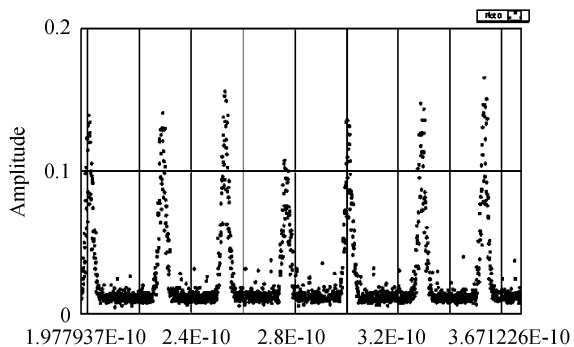


(b) The eye diagram of 10 Gbit/s optical data signal (of 1.8ps pulse width) modulated with a pseudorandom bit seque

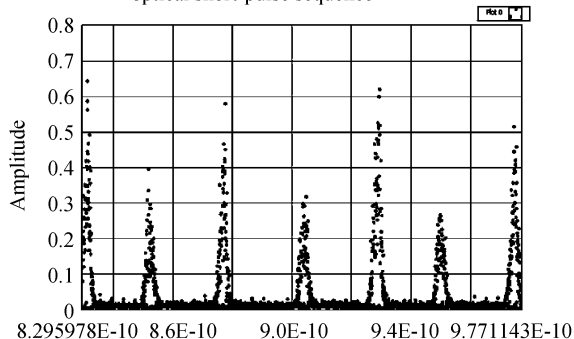
图 8 使用研制出的超宽带全光取样示波器实验样机系统分别测量 10 GHz 周期性超短光脉冲序列和基于超短光脉冲的 10 Gbit/s 光数据信号

Fig. 8 The use of the developed ultra-wide bandwidth all-optical sampling oscilloscope prototype system to measure dynamic waveform of 10 GHz periodic optical short-pulse sequence and eye diagram of 10 Gbit/s optical data signal (of 1.8 ps pulse width) modulated with a pseudorandom bit sequence, respectively

高速光脉冲信号发生器输出的 40 GHz 周期性超短光脉冲信号序列的动态波形或者经过伪随机数据调制的 40 Gbit/s 光数据信号的眼图进行实时监测, 所得到的测量结果如图 9. 为了便于与光-电混



(a) The dynamic waveform of 40GHz periodic optical short-pulse sequence



(b) The eye diagram of 40Gbit/s optical data signal

图 9 使用研制出的超宽带全光取样示波器实验样机系统对高速光脉冲信号发生器输出的光脉冲信号进行测量

Fig. 9 The use of the developed ultra-wide bandwidth all-optical sampling oscilloscope prototype system to measure the output of a high-speed optical pulse

signal generator

合型宽带示波器的测试结果进行比较, 我们将 50 GHz 光电探测器直接与 70 GHz 电子取样示波器进行级联. 然后我们使用该光-电混合型宽带示波器对高速光脉冲信号发生器输出的 40 GHz 周期性超短光脉冲信号序列的动态波形进行观测, 结果如图 10. 由于测量系统的带宽限制, 我们可以很容易地观察到该光-电混合型宽带示波器所显示的 40 GHz 周期性脉冲信号波形存在着明显的波形失真, 已不能够较为准确地观测脉冲宽度、上升/下降沿和脉冲信号的占空比等重要参量. 通过对比实测结果, 我们可以很容易地观察到使用我们研制出的超宽带全光取样示波器实验样机系统不仅能够实现高时间精度的光脉冲信号波形再现, 而且还能够精确地测量这些重要的脉冲信号参量. 由于在本实验中, OTDM 复用器没有使用任何的保偏光纤和保偏型光学分路器/合路器, 故使得 OTDM 复用器的工作特性不理想, 导致了被测高速光脉冲信号序列的幅度不均等(图 9(a)). 在将来的实验中, 我们希望能够采用保偏光纤和其它的保偏型光学器件实现 OTDM 复用器, 以便解决这一问题.

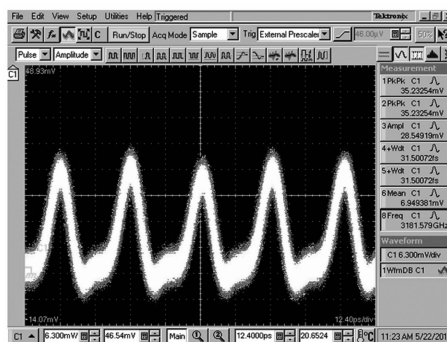


图 10 使用 50 GHz 光电探测器与 70 GHz 电子取样示波器构成的光-电混合型宽带示波器观测 40 GHz 周期性超短光脉冲信号序列

Fig. 10 Observation of 40 GHz periodic optical short-pulse sequence by using a hybrid optical and electronic wideband oscilloscope consisting of a 50 GHz photodetector and a 70 GHz electronic sampling oscilloscope

图 11 为我们研制出的首台超宽带全光取样示波器实验样机系统照片. 另外, 我们也编制了相应的计算机界面显示软件, 以便使得该实验样机系统测得的光脉冲波形曲线在计算机屏幕上显示出的界面效果能比较接近使用常规示波器的情况. 图 12 为采用我们编制的计算机界面显示软件所得到的其中一个光脉冲波形曲线显示例子. 我们已对该全光取样示波器实验样机系统进行了一年多的运行测试和性能优化, 并改进了其计算机界面显示软件. 因此, 与前期得到的实验测试结果相比, 我们最近使

用该实验样机系统已获得了更高的时间分辨率和更好的计算机界面显示效果, 其中的一个实测例子如图 13. 详情将在我们的其它论文中加以报道.



图 11 研制出的超宽带全光取样示波器实验样机系统照片
Fig. 11 Photograph of the developed ultra-wide bandwidth all-optical sampling oscilloscope prototype system

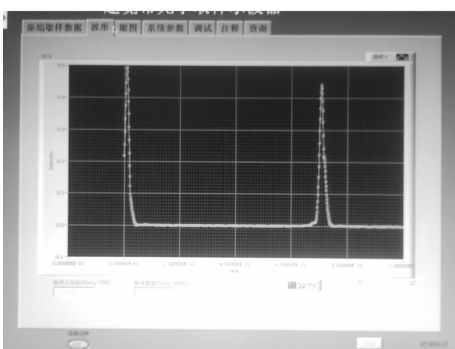


图 12 超宽带全光取样示波器实验样机系统的计算机界面所显示的光脉冲信号序列

Fig. 12 The displayed optical pulse sequence on the computer screen of an ultra-wide bandwidth all-optical sampling oscilloscope prototype system

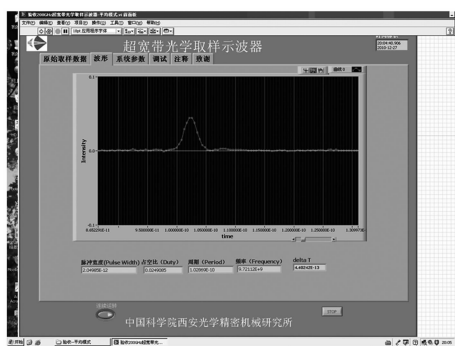


图 13 使用改进了计算机界面显示软件的超宽带全光取样示波器实验样机系统测量光脉冲波形

Fig. 13 The optical pulse waveform measured by the developed ultra-wide bandwidth all-optical sampling oscilloscope prototype system using an improved computer algorithm for waveform measurement

4 结论

本文针对我们前期研制出的超宽带全光取样示波器设备的实验样机系统进行了概括性的介绍, 并报道了该系统的工程化设计方案及我们在过去两年里已取得的一些初步实验结果. 由于脉冲激光器和

超快光学取样器是实现该光学取样示波器设备的核心硬件技术, 我们采用自主研发的一种重复频率可调、高稳定性被动锁模飞秒光纤激光器作为该光学示波器实验样机系统的光脉冲取样源, 并利用高度非线性光纤中的四波混频效应实现了超快光学取样器; 同时还开发了一种用于软件同步的计算机算法取代了硬件时钟恢复电路, 从而简化了系统的硬件结构并节省了成本. 我们成功地使用研制出的超宽带全光取样示波器实验样机系统完成了对脉宽为 1.8 ps、重复频率分别为 10 GHz 和 40 GHz 的光脉冲信号序列的全光取样. 然后通过数字信号处理和计算机图形处理, 得到了再现后的超短光脉冲信号波形, 并测出了其脉冲宽度值为 2.3 ps. 结果表明我们研制出的首台实验样机系统具有 1.43 ps 的时间分辨率. 借助于该实验样机系统, 我们还完成了对脉宽为 1.8 ps、经过伪随机数据序列调制后的 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s 光数据信号眼图的精确测量. 这是我国首次报道有关超宽带全光取样示波器设备的实际研制工作及其实验测试结果.

由于我们设计的全光取样示波器设备样机完全是由商用化的成熟光子和电子器件所构成, 其中飞秒脉冲激光器和超快光学取样器主要是基于电讯用的光纤, 因此该光学取样示波器实验样机系统具有技术成熟、结构较简单、系统可靠性高、易于小型化设计和工程化实现以及降低未来的生产成本等优点. 另外, 我们还使用了光子晶体光纤替代高度非线性光纤实现超快光学取样器, 获得了亚皮秒级的高时间分辨率和更大的工作带宽. 使用研制出的超宽带全光取样示波器实验样机系统, 我们最近已成功地完成了对数据率高达 320 Gbit/s 的光数据信号眼图之测量工作, 详情将另行报道.

超宽带全光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. 我们期望针对有关超宽带全光取样示波器设备的实验设计和样机系统的开发与测试工作的报道, 能为国内从事超宽带全光取样示波器技术研究的相关人员提供一些重要的工程设计经验和有关的工程化实现方案供参考或借鉴, 以推动这一新兴的技术研究工作在我国的发展. 同时, 我们也期望能为我国在制定超宽带全光取样示波器产业化标准方面提供有效的技术支持.

致谢: 我们对中国科学院给予本项目的经费支持(中国科学院重大科研设备研制项目 YZ200759; 2007 年至 2009 年)表示衷心的感谢, 因为这是本科研项目唯一的经费来源, 并且是确保我们研制成功超宽带全光取样示波器实验样机系统的支柱. 同

时, 我们感谢西安光机所赵卫所长对本项目课题组的大力支持和帮助, 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我们的大力支持和鼓励。我们对本课题组成员-唐定康的科研合作和帮助表示非常感谢。

参考文献

- [1] SARUWATARI M. All-optical signal processing for terabit/second optical transmission[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(6): 1363-1374.
- [2] NAKAZAWA M, YAMAMOTO T, TAMURA K R. 1. 28Tbit/s-70km OTDM transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator[J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(24): 2027-2029.
- [3] WEBER H G, FERBER S, KROH M, *et al.* Single channel 1. 28 Tbit/s and 2. 56 Tbit/s DQPSK transmission [J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(3): 178-179.
- [4] SCHMIDT-LANGHORST C, LUDWIG R, HU H, *et al.* Single-channel 1-Tb/s transmission over 480 km DMF for future terabit Ethernet systems [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2009: OTuN5.
- [5] HANSEN MULVAD H C, OXENLOWE L K, GALILI M, *et al.* 1. 28 Tbit/s single-polarisation serial OOK optical data generation and demultiplexing[J]. *Electronics Letters*, 2009, **45**(5): 280-281.
- [6] FEISTE U, LUDWIG R, SCHUBERT C, *et al.* 160Gbit/s transmission over 116 km field-installed fibre using 160Gbit/s OTDM and 40Gbit/s ETDM[J]. *Electronics Letters*, 2001, **37**(7): 443-445.
- [7] BUCHALI F, BAUMERT W, BULOW H, *et al.* Eye monitoring in a 160 Gbit/s RZ field transmission system[C]. Proc 27th Eur Conf on Opt Comm, 30 Sept.-4 Oct. 2001, Amsterdam, The Netherlands, 2001: 288-289.
- [8] TURKIEWICZ J P, TANGDIONGGA E, KHOE G D, *et al.* Field trial of 160Gbit/s OTDM add/drop node in a link of 275 km deployed fiber[C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2004, Los Angeles, CA, 2004: PDP1.
- [9] TURKIEWICZ J P, TANGDIONGGA E, LEHMANN G, *et al.* 160 Gb/s OTDM networking using deployed fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(1): 225-235.
- [10] LEHMANN G, SCHAIRER W, ROHDE H, *et al.* 160 Gbit/s OTDM transmission field trial over 550 km of legacy SSMF[C]. Proc Eur Conf on Opt Comm, Sept. 2004, Stockholm, Sweden.
- [11] KIECKBUSCH S, FERBER S, ROSENFELDT H, *et al.* Adaptive PMD compensator in 160Gb/s DPSK transmission over installed fiber[C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2004: PDP31.
- [12] VORBECK S, SCHMIDT M, LEPPLA R, *et al.* Long haul field transmission experiment of 8X170 Gbit/s over 421 km installed legacy SSMF fiber infrastructure[C]. Proc Eur Conf on Opt Comm, 2005: 433-435.
- [13] LEPPLA R, VORBECK S, SCHMIDT M, *et al.* PMD tolerance of 8X170 Gbit/s field transmission experiment over 430 km SSMF with and without PMDC[C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2005: OFF2.
- [14] DAIKOKU M, MIYAZAKI T, MORITA I, *et al.* 160 Gbit/s-based field transmission experiments with single-polarization RZ-DPSK signals and simple PMD compensator [C]. Proc Eur Conf on Opt Comm, 2005: 375-378.
- [15] KANDA Y, MURAI H, KAGAWA M, *et al.* Highly stable 160-Gb/s field transmission employing adaptive PMD compensator with ultra high time-resolution variable DGD generator[C]. Eur Conf on Opt Comm, 21-25 September 2008, Brussels, Belgium, 2008, 3:207-208.
- [16] MIYAZAKI T. Ultrafast 160 Gb/s-based transmission experiment on JGNII [J]. *J National Inst Inform & Commun Technol*, 2005, **52**: 31-36.
- [17] MURAI H, KAGAWA M, TSUJI H, *et al.* EA-modulator-based optical time division multiplexing/demultiplexing techniques for 160-Gb/s optical signal transmission [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13**(1): 70-78.
- [18] OKAZAKI M, GUAN P, HIROOKA T, *et al.* 160-Gb/s 200-km field transmission experiment with large PMD using a time-domain optical Fourier transformation technique [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, **20**(24): 2192-2194.
- [19] DAIKOKU M, MIYAZAKI T, MORITA I, *et al.* 160 Gb/s-based field transmission experiments using polarizer-based PMD compensator with optical power Monitor[J]. *J Lightwave Technol*, 2009, **27**(5): 451-461.
- [20] OTANI Y, TSUDA K, IGAWA F, *et al.* Demonstration of far-end 160-Gb/s waveform measurement after 508-km transmission in field trial without traditional clock recovery [C]. Proc Eur Conf on Opt Commun, 24-28 Sept. 2006: 1-2.
- [21] FUJII K. Development of an ultra high-speed optical signal processing technology[J]. *Oki Technical Review*, 2005, **72** (4): 70-75.
- [22] MURAI H, KANDA Y, KAGAWA M, *et al.* Field demonstration of 160-Gb/s all-optical 3R regeneration[R]. *Technical Report of IEICE*, Jan. **26**, 2009: 91-96.
- [23] MURAI H, KANDA Y, KAGAWA M, *et al.* Regenerative SPM-based wavelength conversion and field demonstration of 160-Gb/s all-optical 3R operation[J]. *J Lightwave Technol*, 2010, **28**(6): 910-921.
- [24] DORREN H J S, HERRERA J, RAZ O, *et al.* All-optical devices for ultrafast packet switching[C]. Proc 20th Annual Meeting of IEEE LEOS, 21-25 Oct. 2007: 729-730.
- [25] HANSEN MULVAD H C, TANGDIONGGA E, RAZ O, *et al.* 640 Gbit/s OTDM lab-transmission and 320 Gbit/s field-transmission with SOA-based clock recovery [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2008: OWS2.
- [26] WINZER P J, RAYBON G, DUELK M. 107-Gb/s optical ETDM transmitter for 100G Ethernet transport[C]. Proc Eur Conf on Opt Commun, 25-29 Sept. 2005, 6: Th4.1.1.
- [27] RAYBON G, WINZER P J, DOERR C R. 10 x 107-Gbit/s electronically multiplexed and optically equalized NRZ transmission over 400 km[C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2006: PDP32.
- [28] SCHUBERT C, DERKSEN R H, MOLLER M, *et al.* Integrated 100-Gb/s ETDM receiver [J]. *J Lightwave Technol*, 2007, **25**(1): 122-130.
- [29] SINSKY J H, ADAMIECKI A, BUHL L, *et al.* A 107-Gbit/s optoelectronic receiver utilizing hybrid integration of a photodetector and electronic demultiplexer[J]. *J Lightwave Technol*, 2008, **26**(1): 114-119.
- [30] DAIKOKU M, MORITA I, TAGA H, *et al.* 100-Gb/s DQPSK transmission experiment without OTDM for 100G Ethernet transport[J]. *J Lightwave Technol*, 2007, **25**(1): 139-145.
- [31] WELLBROCK G, XIA T J, LEE W, *et al.* Field trial of 107-Gb/s channel carrying live video traffic over 504 km in-service DWDM route[C]. Proc IEEE LEOS 2008: 477-478.
- [32] FAURE J P, LAVIGNE B, BRESSON C, *et al.* 40G and

- 100G deployment on 10G infrastructure: market overview and trends, coherent versus conventional technology [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2010; OThE3.
- [33] BIRK M, GERARD P, CURTO R, *et al.* Field trial of a real-time, single wavelength, coherent 100 Gbit/s PM-QPSK channel upgrade of an installed 1800km link [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2010; PDPD1.
- [34] CHARLET G, RENAUDIER J, MARDOYAN H, *et al.* Transmission of 16.4 Tbit/s capacity over 2,550 km using PDM QPSK modulation format and coherent receiver [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2008; PDP3.
- [35] ZHOU X, YU J, HUANG M F, *et al.* Transmission of 32-Tb/s capacity over 580 km using RZ-shaped PDM-8QAM modulation format and cascaded multimodulus blind equalization algorithm [J]. *J Lightwave Technol*, 2010, **28**(4): 456-465.
- [36] ZHOU X, YU J, HUANG M F, *et al.* 64-Tb/s (640x107-Gb/s) PDM-36QAM transmission over 320 km using both pre- and post-transmission digital equalization [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2010; PDPB9.
- [37] SANO A, MASUDA H, KOBAYASHI T, *et al.* 69.1-Tb/s (432 x 171-Gb/s) C- and Extended L-band transmission over 240 km using PDM-16-QAM modulation and digital coherent detection [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2010; PDPB7.
- [38] SCHMIDT-LANGHORST C, LUDWIG R, GROB D D, *et al.* Generation and coherent time-division demultiplexing of up to 5.1 Tb/s single-channel 8-PSK and 16-QAM signals [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2009; PDPC6.
- [39] GALILI M, HANSEN MULVAD H C, OXENLOWE L K, *et al.* Generation and detection of 2.56 Tbit/s OTDM data using DPSK and polarization multiplexing [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2010; OThV2.
- [40] JI H, HU H, GALILI M, *et al.* Optical waveform sampling and error-free demultiplexing of 1.28 Tbit/s serial data in a silicon nanowire [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2010; PDPC7.
- [41] VO T D, HU H, GALILI M, *et al.* Photonic chip based 1.28 Tbaud transmitter optimization and receiver OTDM demultiplexing [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2010; PDPC5.
- [42] LIU Yuan-shan, ZHANG Jian-Guo, TANG Ding-kang, *et al.* Brief report on prototype of an ultra-wideband optical sampling oscilloscope [J]. *Chinese Journal of 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实验样机报道 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2744.
- [43] TANG Ding-kang, ZHANG Jian-Guo, LIU Yuan-shan, *et al.* Ultrashort optical pulse monitoring using asynchronous optical sampling technique in highly nonlinear fiber [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(7): 630-633.
- [44] WESTLUND M, ANDREKSON P A, SUNNERUD H, *et al.* High-performance optical-fiber-nonlinearity-based optical waveform monitoring [J]. *J Lightwave Technol*, 2005, **23**(6): 2012-2022.
- [45] KAWANISHI S, TAKARA H, UCHIYAMA K, *et al.* Fully time-division-multiplexed 100 Gbit/s optical transmission experiment [J]. *Electronics Letters*, 1993, **29**(25): 2211-2212.
- [46] KAWANISHI S, TAKARA H, UCHIYAMA K, *et al.* 100 Gbit/s, 50 km, and nonrepeated optical transmission employing all-optical multi/demultiplexing and PLL timing extraction [J]. *Electronics Letters*, 1993, **29**(12): 1075-1077.
- [47] NELSON B P, DORAN N J. Optical sampling oscilloscope using nonlinear fibre loop mirror [J]. *Electronics Letters*, 1991, **27**(3): 204-205.
- [48] ANDREKSON P A. Picosecond optical sampling using four-wave mixing in fibre [J]. *Electronics Letters*, 1991, **27**(16): 1440-1441.
- [49] NOSKE D U, TAYLOR J R. Picosecond optical fibre sampling oscilloscope [J]. *Electronics Letters*, 1991, **27**(19): 1739-1741.
- [50] TAKARA H, KAWANISHI S, MORIOKA T, *et al.* 100Gbit/s optical waveform measurement with 0.6 ps resolution optical sampling using subpicosecond supercontinuum pulses [J]. *Electronics Letters*, 1994, **30**(14): 1152-1153.
- [51] KAWANISHI S, TAKARA H, MORIOKA T, *et al.* 200Gbit/s, 100km time-division-multiplexed optical transmission using supercontinuum pulses with prescaled PLL timing extraction and all-optical demultiplexing [J]. *Electronics Letters*, 1995, **31**(10): 816-817.
- [52] KAWANISHI S, TAKARA H, MORIOKA T, *et al.* Single channel 400 Gbit/s time-division-multiplexed transmission of 0.98 ps pulses over 40 km employing dispersion slope compensation [J]. *Electronics Letters*, 1996, **32**(10): 916-918.
- [53] MORIOKA T, TAKARA H, KAWANISHI S, *et al.* Error-free 500Gbit/s all-optical demultiplexing using low-noise, low-jitter supercontinuum short pulses [J]. *Electronics Letters*, 1996, **32**(9): 833-834.
- [54] NAKAZAWA M, YOSHIDA E, YAMAMOTO T, *et al.* TDM single channel 640Gbit/s transmission experiment over 60km using 400fs pulse train and walk-off free, dispersion flattened nonlinear optical loop mirror [J]. *Electronics Letters*, 1998, **34**(9): 907-908.
- [55] YAMAMOTO T, YOSHIDA E, NAKAZAWA M. Ultrafast nonlinear optical loop mirror for demultiplexing 640Gbit/s TDM signals [J]. *Electronics Letters*, 1998, **34**(10): 1013-1014.
- [56] TAKARA H, KAWANISHI S, YOKOO A, *et al.* 100Gbit/s optical signal eye-diagram measurement with optical sampling using organic nonlinear optical crystal [J]. *Electronics Letters*, 1996, **32**(24): 2256-2258.
- [57] SHAKE I, OTANI E, TAKARA H, *et al.* Bit rate flexible quality monitoring of 10 to 160 Gbit/s optical signals based on optical sampling technique [J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(25): 2087-2088.
- [58] KAWANISHI S, YAMAMOTO T, NAKAZAWA M, *et al.* High sensitivity waveform measurement of 160 Gbit/s signal with optical sampling using quasi-phasematched mixing in LiNbO₃ waveguide [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2001; WY6-1-WY6-3.
- [59] OKAMOTO K, ITO F. Dual-channel linear optical sampling for simultaneously monitoring ultrafast intensity and phase modulation [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, **27**(12): 2169-2175.
- [60] OHTA H, NOGIWA S, ODA N, *et al.* Highly sensitive optical sampling system using timing-jitter-reduced gain-switched optical pulse [J]. *Electronics Letters*, 1997, **33**(25): 2142-2144.
- [61] OHTA H, NOGIWA S, KAWAGUCHI Y, *et al.* Measurement of 200Gbit/s optical eye diagram by optical sampling with gain-switched optical pulse [J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(8): 737-739.

- [62] NOGIWA S, KAWAGUCHI Y, OHTA H, *et al.* Highly sensitive and time-resolving optical sampling system using thin PPLN crystal[J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(20): 1727-1728.
- [63] OHTA H, BANJO N, YAMADA N, *et al.* Measuring eye diagram of 320 Gbit/s optical signal by optical sampling using passively modelocked fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 2000, **37**(25): 1541-1542.
- [64] NOGIWA S, YAMADA N, OHTA H. Broad wavelength-bandwidth optical sampling system using wavelength-tunable soliton pulses[C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2002: 533-534.
- [65] YAMADA N, NOGIWA S, OHTA H. 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.
- [66] SHIRANE M, HASHIMOTO Y, YAMADA H, *et al.* A compact optical sampling measurement system using mode-locked laser-diode modules[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, **12**(11): 1537-1539.
- [67] IGAWA K, OTANI A, TSUDA Y. Novel optical sampling oscilloscope without traditional trigger technique and measurement of optical short pulse modulated PRBS pattern [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2004: MF73.
- [68] DENG K L, RUNSER R J, GLESK I, *et al.* Single-shot optical sampling oscilloscope for ultrafast optical waveforms [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, **10**(3): 397-399.
- [69] RUNSER R J, COLDWELL C, TOLIVER P, *et al.* A practical all-optical sampling technique for high bandwidth, low energy optical communication signals [C]. Proc 13th Annual Meeting of IEEE LEOS, 13-16 Nov. 2000: 770-771.
- [70] DORRER C, KILPER D C, STUART H R, *et al.* Ultra-sensitive optical sampling by coherent-linear detection [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2002: FD5-1—FD5-3.
- [71] KANG I, DREYER K F. Sensitive 320 Gbit/s eye diagram measurements via optical sampling with semiconductor optical amplifier-ultrafast nonlinear interferometer[J]. *Electronics Letters*, 2003, **39**(14): 1081-1083.
- [72] DORRER C, DOERR C R, KANG I, *et al.* High-sensitivity high-resolution linear sampling up to 640 Gb/s using 90°-waveguide optical hybrid [C]. Technical Digest of Conf Lasers and Electro-Optics, 16-21 May 2004: CThQ5.
- [73] DORRER C, DOERR C R, KANG I, *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.
- [74] JUNGEMAN R L, LEE G, BUCCAFUSCA O, *et al.* 1-TThe bandwidth C- and L-band optical sampling with a bit rate agile timebase[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, **14**(8): 1148-1150.
- [75] DIEZ S, LUDWIG R, SCHMIDT C, *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.
- [76] SCHMIDT C, SCHUBERT C, BERGER J, *et al.* Optical Q-factor monitoring at 160 Gb/s using an optical sampling system in an 80 km transmission experiment[C]. Technical Digest of Conf Lasers and Electro-Optics, 19-24 May 2002: 579-580.
- [77] SCHMIDT C, SCHUBERT C, WATANABE S, *et al.* 320 Gb/s all-optical eye diagram sampling using gain-transparent ultrafast-nonlinear interferometer (GT-UNI)[C]. Proc 28th Eur Conf Optical Commun, 8-12 September 2002: 1-2.
- [78] SCHMIDT-LANGHORST C, SCHUBERT C, BOERNER C, *et al.* Optical sampling system including clock recovery for 320 Gbit/s DPSK and OOK data signals[C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2005: OWJ6.
- [79] LI J, HANSRYD J, HEDEKVIST P O, *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.
- [80] WESTLUND M, SUNNERUD H, KARLSSON M, *et al.* Software-synchronized all-optical sampling[C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2003: 409-410.
- [81] LI J, WESTLUND M, SUNNERUD H, *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.
- [82] WESTLUND M, SUNNERUD H, ANDREKSON P A. Fiber-based all-optical sampling system with simultaneous -17 dBm sensitivity, 1 ps temporal resolution and 60 nm optical bandwidth [C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 6-11 March 2005: OWJ3.
- [83] SUNNERUD H, WESTLUND M, SKOLD M, *et al.* All-optical balanced detection system with sub-ps resolution[C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2009: OThF4.
- [84] SALEM R, FOSTER M A, GERAGHTY D F, *et al.* High-speed optical signal sampling via temporal magnification[C]. Proc Optical Fiber Commun Conf, 2009: OThH4.
- [85] LUAN F, van ERPS J, PELUSI M D, *et al.* High-resolution optical sampling of 640 Gbit/s data using dispersion-engineered chalcogenide photonic wire [J]. *Electronics Letters*, 2010, **46**(3): 231-232.
- [86] LIU Yuan-shan. Research on key techniques and implementation of high-speed optical short-pulse sources and ultrawide-bandwidth optical oscilloscope[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.
刘元山. 超高速通信光源和宽带光取样示波器设计与关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2008.
- [87] LIU Yuan-shan, ZHANG Jian-guo, CHEN Guo-fu, *et al.* Low-timing-jitter, stretched-pulse passively mode-locked fiber laser with tunable repetition rate and high operation stability[J]. *Journal of Optics*, 2010, **12**(9): 5204.

Development of Ultra-wide Bandwidth All-optical Sampling Oscilloscope Equipment

ZHANG Jian-guo, LIU Yuan-shan

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

Abstract: All-optical sampling oscilloscopes are key measurement equipment for research and development of ultrahigh-speed optical communication systems and photonic switching networks. This paper briefly reports our experimental work on the design and implementation of a prototype system for ultra-wide bandwidth all-optical sampling oscilloscopes, and it also presents the preliminary results obtained from our experiment on the development of such an oscilloscope prototype system. Using our developed passively mode-locked fiber laser of high stability as an optical sampling pulse source, we successfully demonstrate the all-optical sampling of optical pulse sequences with pulse width of 1.8 ps at the repetition rates of 10 GHz and 40 GHz, respectively, by means of the four-wave mixing (FWM) in a highly nonlinear fiber. Then the waveforms of ultrashort optical pulse signals are reproduced by using digital signal processing and computer image processing, respectively, in our prototype system which displays the measured optical pulses with a width of 2.3 ps. With our developed optical sampling oscilloscope prototype, we also successfully perform the accurate measurement of optical eye diagrams for 10Gbit/s and 40 Gbit/s optical data signals (of 1.8 ps pulse width) which are modulated with a pseudorandom bit sequence, respectively. This is the first report in China about the practical development work on ultra-wide bandwidth all-optical sampling oscilloscope equipment and the associated experimental test results. The obtained results on all-optical waveform measurement of ultrashort optical pulse signals are also compared with those measured by the conventional optoelectronic measurement system consisting of a 70 GHz wideband electronic oscilloscope and an ultrafast photodetector. It is shown clearly that our developed all-optical sampling oscilloscope prototype has much higher temporal resolution and larger system bandwidth than a conventional optoelectronic measurement system does.

Key words: All-optical sampling; Optical oscilloscope; Passively mode-locked fiber laser; Four-Wave Mixing (FWM)