

文章编号: 0253-2239(2009)08-2087-06

双用户 2.5 Gb/s 100 km 光码分多址传输实验

卢麟 蒲涛 余罗陈 郑吉林 方涛 李玉权

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 稳定性高、低成本的窄脉冲光源、高性能编解码器和具有旁瓣/噪声抑制功能的接收机是光码分多址系统实用化的 3 个关键模块。实验中利用增益开关脉冲光源和 63 chip 等效相移超结构布拉格光纤光栅相位编解码器的半边带应用, 判决门限调整与宽带判决相结合的接收机实现了双用户、2.5 Gb/s 100 km 传输。实验中测量了误码率与判决时刻和判决门限的关系曲线, 系统在 10 ps 的判决时刻容限内和 17% 的幅度判决容限内实现了无误码传输。

关键词 光通信; 光码分多址; 超结构光纤布拉格光栅; 等效相移

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2087

Two-User 2.5 Gb/s 100 km Optical Code Division Multiple Access Transmission Experiment

Lu Lin Pu Tao Yu Luo Cheng Zheng Jilin Fang Tao Li Yuquan

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract There are three key modules in coherent optical code division multiple access (OCDMA) system: source of ultra-short optical pulse, en/decoder and receiver. Two-user 2.5 Gb/s OCDMA experiment is shown to achieve 100 km transmission using single-band application between gain switch laser diode and 63-chip equivalent phase shift superstructured fiber Bragg grating (EPS-SSFBG) phase en/decoder, and threshold adjustable receiver with broadband decision. Relations between bit error rate (BER) and decision level and time are observed in the experiment, error-free transmission is achieved in the range of 10 ps decision time and 17% decision level.

Key words optical communication; optical code division multiple access (OCDMA); superstructured fiber Bragg grating; equivalent phase shift

1 引 言

相干 OCDMA 系统因其集成化的编解码器、高速、长码长、大容量以及较高的安全性能成为当前的研究热点^[1~7], 其中窄脉冲相干光源、高性能编解码器和具有旁瓣/噪声抑制功能的接收机及三者之间的相互匹配是系统性能的关键。代表这一领域最高水平的是基于真实相移超结构光纤光栅(RPS-SSFBG)的时域相位编解码器, 该类编解码器由纳米级工艺的光栅设备制作而成, 采用金(Gold)序列作为地址码, 码长为 511, 码片速率可达到 640 Gchip/s, 采用该类编解码方案的实验系统可实现 10 个左右用户, 10 Gb/s 的速率的 OCDMA 系统^[1~3]。RPS-SSFBG 编解码器制作工艺要求高, 实验系统中一般采用脉

冲锁模激光器作为系统光源, 并且往往需要非线性阈值器件来抑制互相关旁瓣, 上述模块的高成本、复杂度和稳定性限制了 OCDMA 系统的实用化发展。等效相移超结构光纤光栅编解码器(EPS-SSFBG), 通过对取样光栅周期进行啁啾, 采用亚微米精度的制作工艺可以达到与 RPS-SSFBG 相当的相位编解码器性能^[7~11]。本文报道的实验在分别自主设计增益开关光源、63 chip EPS-SSFBG 编解码器和具备电域旁瓣/噪声抑制功能窄脉冲接收机的基础上, 通过模块间的匹配设计和配置应用, 成功实现了双用户、2.5 Gb/s 100 km 无误码传输, 从而使实用化的少用户 OCDMA 系统成为可能。

收稿日期: 2008-10-06; 收到修改稿日期: 2008-11-25

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z274)和国家自然科学基金(60472007)资助课题。

作者简介: 卢麟(1975-), 男, 讲师, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: goodlulin_163@163.com

2 双用户传输实验系统设计

增益开关半导体激光器(G-SLD)是使分布反馈式(DFB)激光器在高速正弦电信号调制下工作在增益开关状态,从而产生与输入电信号频率相同的光脉冲,其特点是重复速率可调范围大,易于实现与通信系统中其他设备的同步操作,稳定性和可集成性强。图 1(a)是实验中自主设计的增益开关光源的光谱,其 20 dB 带宽约为 2 nm,6 dB 带宽约为 0.9 nm,由于啁啾效应其光谱顶部并不平坦。图 1(b)是该光源输出脉冲的眼图(图中单位宽度为 100ps),其半极大全宽约为 25~30 ps,与其谱宽相比并不满足高斯变换极限,这也是由于增益开关工作方式的啁啾所致。输出脉冲的消光比约为 11 dB,并存在一定的抖动。因此,虽然 G-SLD 易于实用化,但也存在谱宽有限、瞬时时间抖动等问题。本实验的目的之一就是

通过系统模块间的匹配设计弥补上述不足,提高增益开关激光器用于少用户 OCDMA 系统的可行性。

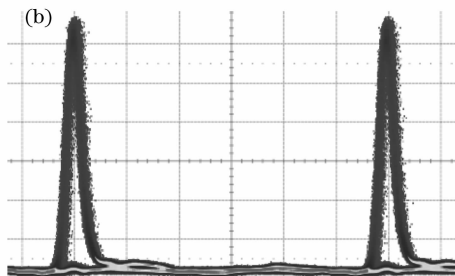
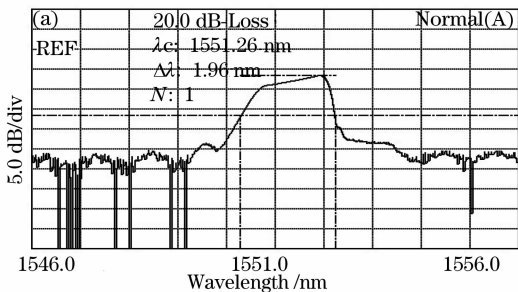


图 1 增益开关光源的(a)光谱(b)脉冲波形眼图

Fig. 1 (a) Spectrums, (b) eye diagram of G-SLD

OCDMA 编解码器的实质是在光域实施信号映射(编码)和相关运算(解码)的物理器件。一般可将其等效为一个线性时不变系统,其冲击响应由编解码器的物理结构和折射率分布等参数决定。图 2 是自主设计制作用于本实验的两个 63 chip EPS-SSFBG 编解码器的反射谱(左侧峰为 0 级,右侧峰为-2 级),0 级中心波长约为 1549.1 nm。等效相移光栅通常用其+1 级或-1 级反射谱实施编解码,图中所示为-1 级编码谱,编码谱中心约为 1551.3 nm。为控制编码长度,抑制码间串扰,编解码器的长度约为 2.3 cm,对应 63 chip 码长的编码带宽约为 4.95 nm。由于解码器是编码器的匹配滤波器,即解码器是编码器的空间反向应用,因此解码器与编码器的幅度反射谱相同,但具有完全共轭的相位谱。

相位敏感器件,在系统设计时必须考虑两个重要问题:1) 必须抑制光源的频率和相位啁啾,同并减少传输中色散及非线性效应的影响,因此传输系统应控制发送光功率,并对链路实施色散完全补偿。2)光源与编解码器的匹配问题。EPS-SSFBG 的编解码谱是其反射谱的一部分,传统应用中都要求光源谱完全覆盖编码谱,以保证编解码效率^[12]。但增益开关光源的带宽有限,其 20 dB 带宽还不到实验所用编解码器带宽的一半,为缓解编码效率与编码长度之间矛盾,实验中采用了半边带的应用方案,即对于物理实器件的编解码器而言,编码谱的幅度是偶对称函数而相位谱为奇对称函数。因此,无论编解码器采用什么方式的折射率变化结构,其反射谱的半边带中已包含了编解码器的所有结构信息。理论上,光源的谱只要覆盖原编解码带宽的一半就能完成编解码功能。由于编解码

应用于相干 OCDMA 系统的编解码器是频率和

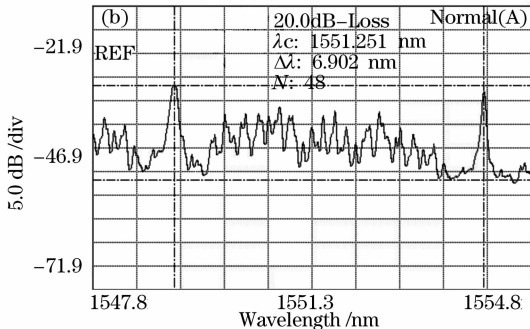
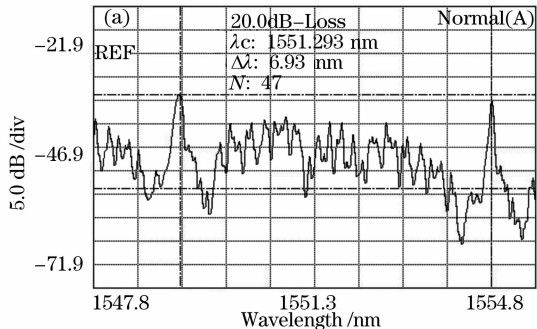


图 2 63 chip EPS-SSFBG 的(a)编码器 1 反射谱(b)编码器 2 反射谱

Fig. 2 (a) Encoder 1 spectrums, (b) encoder 2 spectrums of 63 chip EPS-SSFBG

带宽内反射谱的幅度随偏向旁级反射峰而降低,半边带应用条件下的插损要大于中心对准方式,综合考虑编解码性能, EPS-SSFBG 编解码器的半边带应用应选择偏向 0 级的一半编解码谱,既保证编解码的自互相关性又尽量减少了插损。

OCDMA 系统解码后的光信号中不但有与编码序列相对应的自相关峰,也有基底噪声和旁瓣干扰。同时,由于 OCDMA 编解码需要纳米级的编码带宽,其对应的时域脉冲宽度约为皮秒级。如果要码片级接收,接收机的带宽在百吉赫兹以上,所以实用化的 OCDMA 接收机的核心任务是窄带接收条件下抑制噪声和多用户干扰,实际条件下的窄带接收有两个不利因素:1)光电转换过程中积分时间增加导致的光/电噪声量的增加,2)积分速度跟不上自相关峰的变化速度而导致的自相关峰值能量的部分接收。设计具有旁瓣和底噪抑制功能的窄脉冲接收机,可以从光域和电域两方面入手。光域处理的基本思路是利用有源光器件的非线性效应产生时间/幅度的“门限”效应^[13,14]分别抑制上述两个不利因素,但一般需要瓦级的光放大器和较为复杂的非线性光学控制和处理手段;电域抑制旁瓣和噪声的措施包括:恒包络调制,接收机门限调整,即:提高“1”码的判决门限电平,减少因旁瓣引起的误判以及高速纠错码、电域均衡等。文献[7]中采用门限调整技术的码元级接收成功实现了单用户的无误码传输实验,本实验中为抑制多用户干扰采用了宽带判决和判决门限调整相结合的接收机方案,此处的“宽带”指实施高于码元速率等级所决定带宽的判决。由于码片级接收才能完全获得时域相位编解码的扩频增益,因此待判决电信号带宽越宽,积分时间就越短,积分区间内增加的光电噪声就越小^[15],自相关峰的能量接收效率就越高,接收机的误码性能越好,实验中所采用的宽带判决门限调整接收

机的结构见后续实验配置。

3 实验配置及实验结果

图 3 为系统实验配置:误码仪伪随机序列产生单元(MP1763C)产生的 2.488 GHz 时钟信号经微波放大后驱动增益开关脉冲激光器产生相应速率的光窄脉冲。MP1763C 产生的伪随机数据经驱动放大后,通过强度调制器对光脉冲序列进行外调制得到与数据相对应的光窄脉冲序列,经分路器和时延控制送入图中所示的两用户的 63 chip EPS-SSFBG 编码器,编解码器的插损在 12 dB 左右。其中时延控制是通过引入足够的时延使两路编码信号之间光源不相干,数据不相关。耦合器输出的混合编码信号经光放大器(EDFA)放大后送入 100 km G.652 光纤传输并在解码前实施色散完全补偿。色散补偿输出光信号经接收光放大后送入某一用户的解码器,解码输出信号经可调衰减器后由 10 GHz 带宽的光电接收组件实施光电转换。实验中所采用接收机方案有两个特点:一是由于 RZ 码中具有较强的时钟频率分量,因此实验中采用时钟滤波法提取线路 2.488 GHz 线路时钟,即将 PIN+TIA 输出的一路电信号送入窄带滤波器并实施低噪声放大从而得到同步时钟。二是采用 10 GHz 带宽的限幅放大器对光电转换信号实施放大,产生 10 GHz 带宽的接收数据,送入误码仪进行幅度门限和时钟判决点查找,实施误码测试,本质上该接收方案等效为具备门限调整功能的 10 GHz 宽带数字判决而非 2.488 Gb/s 的码元级判决。实验中应用光采样示波器 Lecroy NR9000(具备 30 GHz 带宽光探测器和 20 GHz 带宽电检测器)在图中所示的 A-E 观测点上监测波形和眼图。利用光谱分析仪(Anritsu MP9710C)观测各点光谱。

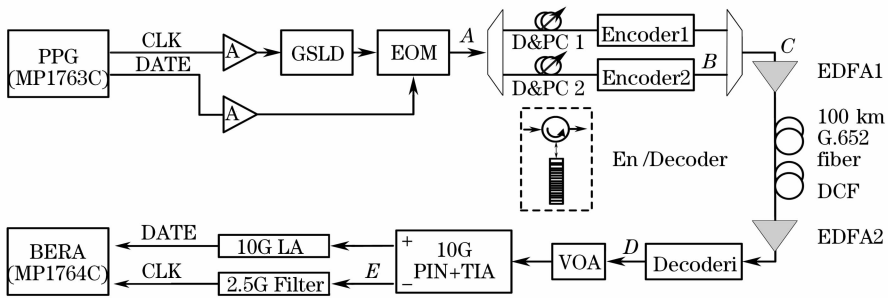


图 3 传输实验框图

Fig. 3 Experimental setup

图 4(a)是光源与编解码谱的对应关系和相应的单用户编码波形(波形图中 1 格对应 1 ns),为提

高编解码系统性能,采用了偏向 0 级的半边带应用方式,最佳位置在 -1 级编码中心向 0 级偏移约

0.3 nm。编码光栅长度约为 2.3 cm, 对应编码信号约为 230 ps, 小于 400 ps 的码元周期, 所以单用户编码信号本身无码间串扰。图 4(b) 是双用户的混合编码光信号波形和眼图, 实验中通过衰减控制使两路用户的编码功率约为 -22.5 dBm, 图中混合编码信号中的上冲是由于两路开关键控(OOK)编码信号重叠所致。图 4(c) 是背靠背实验中双用户解码输出的波形和眼图, 解码自相关峰和旁瓣都十分明显, 自互相关峰值比(P/C)约为 5。图 4(d) 是背靠背实验中, 双用户解码信号经 10 GHz 带宽的光电探测器和跨阻放大器(10 GPIN+TIA)输出的电信号波形和眼图。由于窄带接收作用, 自相关峰被展宽到

110 ps 左右, 同时 P/C 下降到 4 左右。图 4(e) 是双用户 100 km 传输后解码光信号的波形和眼图, 由于传输过程中信噪比下降和色散补偿残留, 与背靠背实验相比较解码信号质量有所下降, 体现在波形上解码自相关峰由于噪声差拍的作用而波动加剧, P/C 下降到 4.5 左右, 眼图中自相关峰由于色散残留出现分裂。图 4(f) 是双用户 100 km 传输后经 10 GPIN+TIA 输出的电信号波形和眼图。同样由于窄带接收和掺铒光纤放大器(EDFA)宽带噪声的影响, 与背靠背输出的电信号相比, P/C 下降到 3.5 左右。眼图中的自相关峰进一步展宽, 抖动加剧。

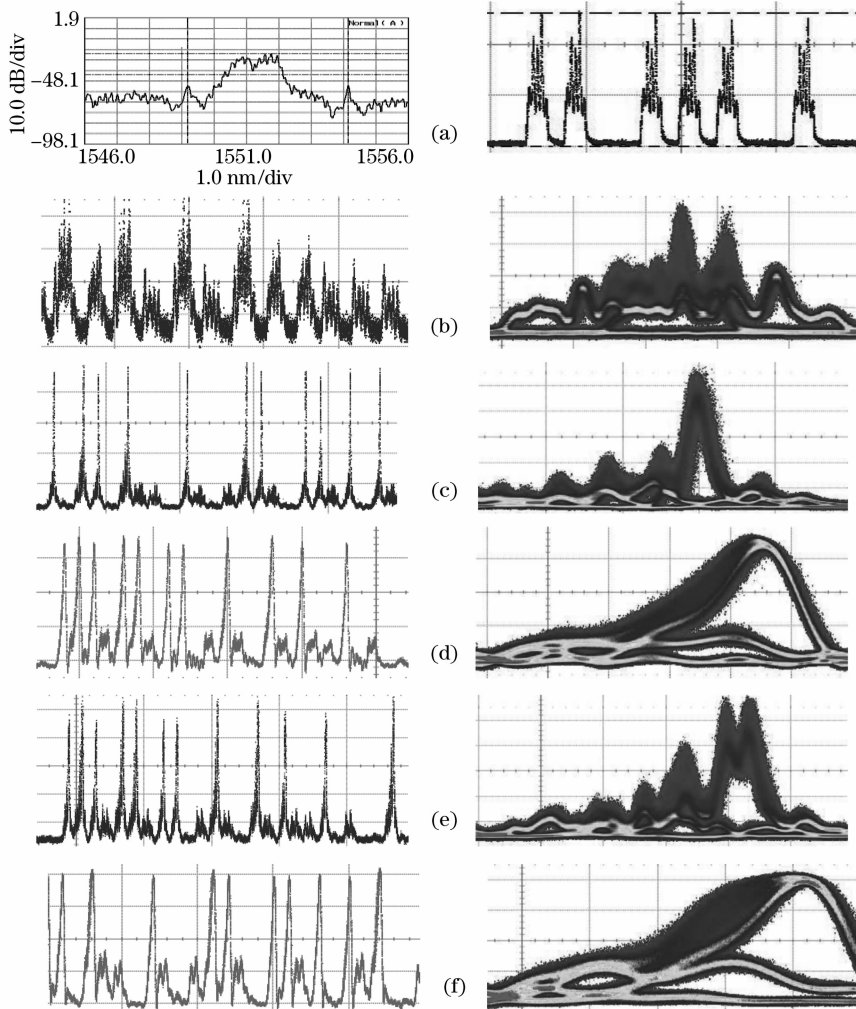


图 4 双用户实验的波形和眼图。(a) 编码谱和单用户编码波形; (b) 双用户编码波形和眼图; (c) 双用户背靠背解码输出波形和眼图; (d) 双用户背靠背解码信号经 10 GPIN+TIA 输出波形和眼图; (e) 双用户 100 km 解码输出波形和眼图; (f) 双用户 100 km 解码信号经 10 GPIN+TIA 波形和眼图

Fig. 4 2 user experimental waveforms and eye diagrams. (a) 1 user encode spectrum and waveform; (b) 2 user encode waveform and eye diagram; (c) 2 user back to back (BTB) decode waveform and eye diagram; (d) 2 user BTB O/E waveform and eye diagram through 10 GPIN+TIA; (e) 2 user decode waveform and eye diagram after 100 km transmission; (f) 2 user O/E waveform and eye diagram after 100 km transmission through 10 GPIN+TIA

由于 OCDMA 系统本质上是一个干扰受限系统，并且任何一种接收机总存在限幅放大的过载功率点，因此对于一个实际的 OCDMA 系统而言，想通过提高接收光功率的方法来提高多用户 OCDMA 系统的性能是不可行的，必须综合使用前述的光/电域处理手段来克服多用户和窄带接收带来的接收性能劣化问题。实验中对系统性能进行了误码性能测试，即在给定输入功率的条件下，通过调整判决时刻和判决门限来观测接收性能。针对双用户背靠背和双用户 100 km 传输两种情况，均调整其接收功率为 -7 dBm，此时 10 GPIN+TIA 的输出峰峰值约在 400 mV，直流电位约在 -500 mV，避免自相关峰值信号幅度进入饱和放大区。实验中测试了上述两种实验条件下判决幅度的浴盆曲线和判决时刻的误码性能曲线。由如图 5 所示的误码率与判决幅度的关系曲线可以看出：背靠背的双用户解码 10^{-9} 误码以下的判决范围约为 150 mV，而 10^{-12} 误码以下的判决范围约为 100 mV，互相关旁瓣范围附近对门限比较敏感(如图 5 左侧的曲线所示)，因此曲线较陡，而自相关峰值受旁瓣的影响相对弱，因此曲线较为平滑。100 km 传输后的双用户解码性能在 10^{-9} 以下的判决范围约为 100 mV，而 10^{-12} 误码以下的判决范围约为 70 mV，这是由于 EDFA 噪声和色散残留导致的互相关性能下降所致，其中 10^{-9} 误码判决门限上限比无传输实验中的门限高 50 mV，可以通过增加接收光滤波器和改善编解码系统性能来进一步提高系统容量。由如图 6 所示的误码率与判决时刻的关系曲线可以看出：判决时刻误码曲线与两类实验电输出波形十分类似，背靠背实验的误码性能曲线对称度要优于传输实验中误码性能曲线。两类实验中的能达到 10^{-9} 判决时刻范围约为 20 ps，而能达到 10^{-12} 以下误码性能的判决范围约在

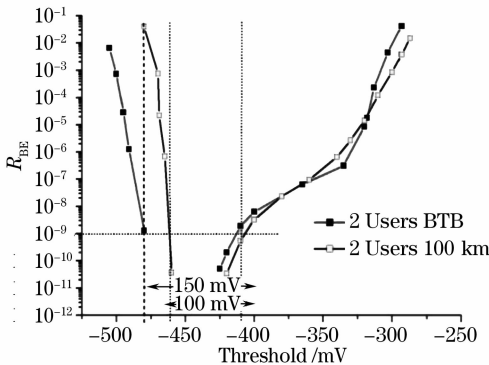


图 5 误码率与判决幅度的关系曲线

Fig. 5 Bit error rate (BER) versus decision level

10 ps,说明100 km传输的噪声累计和色散残留还不会导致判决时刻性能的显著劣化,但同时说明增益开关光源的抖动性能不理想,10 ps 的判决余量还不足以满足真正数字光传输链路的要求,光源和接收系统仍然需要进一步改进。

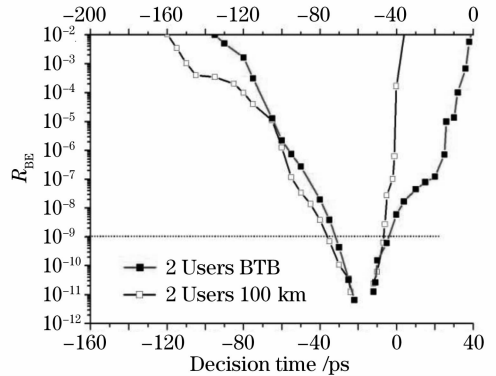


图 6 误码率与判决时刻的关系曲线

Fig. 6 BER versus decision time

4 结 论

对于一个 OCDMA 系统而言，窄脉冲光源、编解码器、具备噪声/旁瓣抑制功能的窄脉冲接收机及上述模块间的匹配设计是保证系统有效性、可靠性和稳定性的关键。实验中利用自主设计制作的增益开关脉冲光源和 EPS-SSFBG 编解码器的单边带应用提高了编码效率。利用宽带判决和门限调整接收机抑制噪声，提高自相关峰值的接收效率。实验中实现了一定判决门限范围内的双用户、2.5 Gb/s、100 km 无误码传输。实验证明：利用上述关键模块和系统设计可以实现低成本、稳定性高的少用户 OCDMA 系统。本文对 OCDMA 系统的实用化具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 Taro Hamanaka, Xu Wang, Naoya Wada *et al.*. 511-chip SSFBG and DFG-based optical threshold enabled compound data rate (10 Gb/s~622 Mb/s) OCDMA experiment for multiple service provisioning platform[C]. *OFC 2006*, California, 2006
- 2 X. Wang, N. Wada, Tetsuya Miyazaki *et al.*. Field trial of 3-WDM×10-OCDMA×10.71 Gb/s, truly asynchronous, WDM/DPSK-OCDMA using hybrid E/D without FEC and optical threshold[C]. *OFC 2006*, PDP 44
- 3 Xu Wang, Nobuyuki Kataoka, Naoya Wada *et al.*. Flexible 10 Gb/s, 8-user DPSK-OCDMA system with 16×16 ports encoder and 16-level phase-shifted SSFBG decoders [C]. *OFC 2008*, OMR2
- 4 A. Agarwal, P. Toliver, T. Banwell *et al.*. Impact of coherent crosstalk on DQPSK in a coherent OCDM system [C]. *OFC 2008*, OMR5
- 5 W. Cong, C. Yang, R. P. Scott *et al.*. Demonstration of 160~

- 320 Gb/s SPECTS O-CDMA network testbed[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(15): 1567~1569
- 6 Pu Tao, Wang Rong, Li Yuquan. Non-Gaussian approximation method for phase encoding optical code division multi-access system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 10~14
- 蒲 涛,王 荣,李玉权. 相位编码光码分多址系统中的非高斯分析方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 10~14
- 7 Lin Lu, Weilei Wu, Tao Fang *et al.*. 2.5 Gb/s 60 km OCDMA transmission experiment using EPS-SSFBG en/decoder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 418~421
- 卢 麟,吴伟磊,方 涛 等. 基于等效相移光栅编解码期的 2.5 Gb/s 60 km 光码分多址传输实验[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 418~421
- 8 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Shizhong Xie. Equivalent phase shift in a fiber Bragg grating achieved by changing the sampling period [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10): 2284~2286
- 9 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Yu Yao *et al.*. 511-chip, 500 Gchip/s OCDMA En/Decoders based on equivalent phase-shift method [C]. OFC2006, OFF2
- 10 Zhu Yingxun, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Orthogonal quaternary phase OCDMA en/decoder based on super structured fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 653~658
- 朱英勋,王 荣,陈 鹏 等. 基于超结构光纤光栅的正交四相光码分多址编/解码器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 653~658
- 11 Chen Xiaogang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua *et al.*. 2×40 Gb/s OCDM using superstructure fiber Bragg gratings en/decoder[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 69~71
- 12 Fang Tao, Li Yuquan, Wang Rong. Study of pulse width effect on performance of optical code-division multiple - access en/decoder[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1939~1944
- 方 涛,李玉权,王 荣. 脉宽对光码分多址编解码器性能的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1939~1944
- 13 H. Sotobayashi, W. Chujo, K. Kitayama. Highly spectral-efficient optical code-division multiplexing transmission system [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **10**(2): 250~258
- 14 Yanfu Yang, Caiyun Lou, Yizhi Gao. Demonstration of a 16×10 Gb/s OTDM system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5): 264~266
- 15 Xu Wang, Naoya Wada, Kenichi Kitayama. Performance degradation in coherent OCDMA due to receivers's bandwidth limit and improvement by using optical threshold [C]. *LEOS 2005*, WW2