

# 光码分多址系统 10 Gb/s 多用户系统实验

郑吉林<sup>1</sup> 王 荣<sup>1</sup> 蒲 涛<sup>1</sup> 卢 麟<sup>1</sup> 方 涛<sup>1</sup> 苏 洋<sup>1</sup> 朱 磊<sup>1</sup> 项 鹏<sup>1</sup> 魏志虎<sup>1</sup> 陈向飞<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)  
(<sup>2</sup>南京大学微结构国家实验室, 江苏 南京 210093)

**摘要** 立足现有的商用接收机组件实现解码信号的判决恢复是光码分多址(OCDMA)系统往实用化发展的一个重要方向。具有高功率对比度(PCR)的编解码器有助于在窄带接收条件下形成具有较高信噪比(SNR)的判决电信号。实验中基于商用窄带接收机组件即 10 G PIN+TIA 和 10 G 时钟数据恢复(CDR)模块,利用自主设计制作的具有高功率对比度的光纤光栅(FBG)编解码器实现了双用户 10 Gb/s 60 km 无误码传输实验,并初步实现了三用户 10 Gb/s 背靠背无误码实验。实验中测试了不同用户数情况下背靠背和 60 km 传输时的误码率(BER)曲线,分析了引起功率代价的系统损伤原因和进一步改进系统性能的思路。

**关键词** 光通信;光码分多址;光纤光栅;功率对比度

**中图分类号** TN914.53 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s105007

## Multi-User 10 Gb/s Optical Code Division Multiple Access Experiment

Zheng Jilin<sup>1</sup> Wang Rong<sup>1</sup> Pu Tao<sup>1</sup> Lu Lin<sup>1</sup> Fang Tao<sup>1</sup> Su Yang<sup>1</sup> Zhu Lei<sup>1</sup>  
Xiang Peng<sup>1</sup> Wei Zhihu<sup>1</sup> Chen Xiangfei<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>*Institute of Communication Engineering, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*)  
(<sup>2</sup>*National Laboratory of Microstructures, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China*)

**Abstract** To recover the decoded signals based on the existing commercial receiver modules is an important practical developing direction of optical code division multiple access (OCDMA) systems. The en/decoders with high power-contrast-ratio (PCR) can help to form the electrical decision signals with high signal-noise-ratio (SNR) under the narrow-band receiver condition. Based on the commercial narrow-band receiver, i.e., 10 G PIN+TIA and 10 G clock data recovery (CDR), two-user 10 Gb/s 60 km error-free transmission experiment is implemented with the self-designed fiber-Bragg-grating (FBG)-based en/decoders with high PCR. The three-user 10 Gb/s back-to-back (BTB) error-free experiment is also achieved. In the experiment, different bit-error-rate (BER) curves are tested with different users and w/o transmission. Both the impairing factors which cause the power punishment and the approaches to improve system performance are analyzed.

**Key words** optical communications; optical code-division multiple-access; fiber Bragg grating; power contrast ratio

**OCIS codes** 060.2340; 060.3735

## 1 引 言

光码分多址(OCDMA)技术与传统的光波分复用(WDM)和光时分复用(OTDM)技术不同,在时间维和频率维外增加码字维,可以在现有系统上进行拓展,增大系统容量。OCDMA 技术具有支持异步通信和突发业务、软切换和软容量、抗干扰和保密

性好等优点<sup>[1~5]</sup>,在未来高速全光接入网和光链路物理层安全领域具有重要的应用前景。随着相关器件制造工艺的不断发展,国外的研究报道已进行了现场网络级的测试<sup>[6~9]</sup>,这预示着 OCDMA 技术已接近实用化的边缘。

OCDMA 作为一种扩频机制,编解码需要纳米

收稿日期: 2011-08-02; 收到修改稿日期: 2011-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(61032005,60871075)资助课题。

作者简介: 郑吉林(1982—),男,博士,讲师,主要从事光通信及光信息技术等方面的研究。

E-mail: zhengjilins@126.com

级的编码带宽,如果要实现码片级接收,接收机的带宽在百吉赫兹以上,这种接收方案既不现实也不经济。目前国际上的高速多用户系统实验大多采用了较为复杂的处理手段,包括光时间门<sup>[10]</sup>、光阈值器件<sup>[11~14]</sup>、前向纠错编码(FEC)<sup>[15~17]</sup>、差分相移键控(DPSK)<sup>[18]</sup>和超长编解码器<sup>[19,20]</sup>等。这些先进的技术能够明显改善系统性能,进而提高用户数。但是这些措施的采取也往往伴随着成本的上升和复杂性的提高,有的甚至还要牺牲 OCDMA 与生俱来的优点。比如,光时间门可以显著抑制判决时刻以外的干扰噪声,但是无法用于随机异步接入;光阈值通过非线性效应实现码片级判决,但都需要高功率放大器和高非线性器件;FEC 和 DPSK 需要高速特定用途集成电路(ASIC)和特殊结构的铌酸锂调制器;采用编码长度大于 100 的超长编解码器能够提供高自互相关峰值对比度(P/C)抑制干扰,但是随着编码器长度的增加,工作在高用户速率时会产生严重的码间串扰。有研究表明<sup>[20]</sup>,即使在没有码间串扰的情况下,采用当前最高水平的 511 位时域相位编码器(提供高达 27 dB 扩频增益)在码片级接收情况下,也无法支持超过 10 个用户的同时传输。使 OCDMA 系统配置更加实用化有两种选择,1) 继续完善前面提到的各种先进的处理手段,降低其复杂性,降低成本,提高效率和稳定性;2) 立足于现有的商用接收机组件,在编解码等关键器件上进行改进,探索适合于目前窄带接收条件下的编解码信号的特点,主要是编解码方式和编解码器的具体实现。

立足于 OCDMA 系统实用化,针对 2.5 Gb/s 的 OCDMA 系统,优化应用半边带编码方案和过采样数字判决窄带接收机方案,已经成功实现了 2.5 Gb/s 双用户 100 km 无误码传输实验<sup>[21]</sup>。在此基础上,本文基于 10 GHz 带宽接收机,采用适合窄带接收条件具有高功率对比度(PCR)的编解码器,实现了双用户 10 Gb/s 60 km 无误码传输实验,以及三用户 10 Gb/s 背靠背无误码实验。这些实验的成功对于 OCDMA 系统的实际应用具有较为重要的指导作用。

## 2 适合窄带接收条件下的编解码器

在窄带接收条件下,接收机的判决变量是解码信号在光电探测器带宽所决定的时间里的积分,由于接收机带宽低于码片速率,积分的结果就是自相关峰与互相关值对比度的下降,具有较高 P/C 的光信号不能转化成具有较高信噪比的判决电信号,除非在前面使用光域的阈值器件实现光域的码片级判决。针对码片级接收而定义的自互相关性能参数(P/C)不再适合于窄带接收,而自互相关信号的 PCR 是适合窄带接收的一个参数。文献[15]认为扩频增益不仅取决于 P/C,还取决于自互相关信号的 PCR,他们设计出具有高 PCR 的多端口编解码器能够提供 29 dB 扩频增益(其中约 17 dB 来自 PCR,仅 12 dB 来自码长),基于该编解码器,无需光阈值器件就实现了 12 个 10.71 Gb/s 用户的背靠背无误码实验。

根据文献[15],在相干系统中,干扰水平参数  $\xi$  可表示为

$$\xi \approx 1/(NR_{PC}), \quad (1)$$

式中  $N$  为码片个数,  $R_{PC}$  为自互相关信号的功率对比度。根据文献[20]的研究结果,相干系统要同时支持 10 个用户数,  $\xi$  必须要低于 -27 dB。由此对于采用高 P/C 的时域相位系统( $R_{PC} \approx 0$  dB)必须要采用大于 500 chip 的超长编解码器,但是如此高的码片速率(数百吉码片每秒)必须要采用非线性光阈值器件实施码片级判决才能将高 P/C 转换成高扩频增益。而如果采用高 PCR 的编解码器,对码片长度的要求将会降低,那么码片速率的下降又将会缓解对接收机带宽的要求。因此高 PCR 编解码器适合窄带接收方案。如果要同时支持 10 个用户数,根据(1)式,当 PCR 为 18 dB 时,码片长度仅为 8,当 PCR 为 14 dB 时,码片长度也才增至 20。

本文基于采样光栅设计出了具有高 PCR 值的编解码器。这种编解码器属于频谱幅度编解码器(SAE),编解码器的参数如表 1 所示,仿真出来的编码谱如图 1 所示。

表 1 高 PCR 值编解码器的参数

Table 1 Parameters of en/decoders with high PCR

Code	Spacing	Bandwidth	Apodize	Chip rate	Length
# 1: 01000100010001000100010001000100	0.12 nm	0.1 nm	1 <sup>st</sup> order Gauss	93 Gchip/s	8.6 mm
# 2: 10001000100010001000100010001000					

将这种高 PCR 值的编解码器与具有高 P/C 的等效相移(EPS)时域相位编解码器进行比较,考察

两者在窄带接收前后匹配解码与非匹配解码波形的变化。这里的窄带接收机假设为带宽 10 GHz 的光

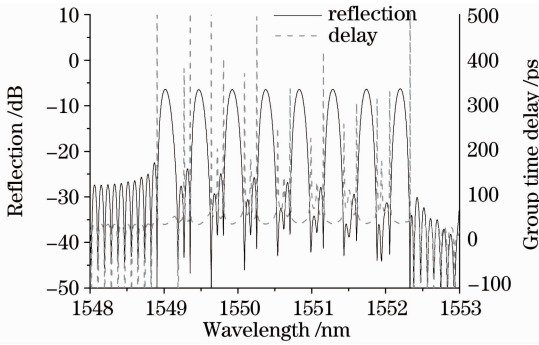


图1 具有高 PCR 编码器的反射谱

Fig. 1 Reflectance spectrum of encoder with high PCR

电探测器,时域相位编解码器码长为 63,码片速率为 300 Gchip/s。仿真的结果如图 2 和图 3 所示。经计算,该时域相位编解码器的 PCR 为 2.2 dB,而新设计的编解码器的 PCR 为 14 dB。从图中可以发现,在窄带接收之前,两者的光信号 P/C 值均在 24 左右,而在 10 GHz 窄带接收之后,由于积分平滑作用,时域相位解码电信号的自互相关对比度陡然下降为 8.5,但是新设计的编解码器依然能够维持较高的自互相关对比度,电信号的 P/C 为 30.7。可见,具有较高 PCR 值的编解码器有利于在窄带接收条件下确保较高的自互相关对比度,进而形成具有较高信噪比(SNR)的判决电信号。

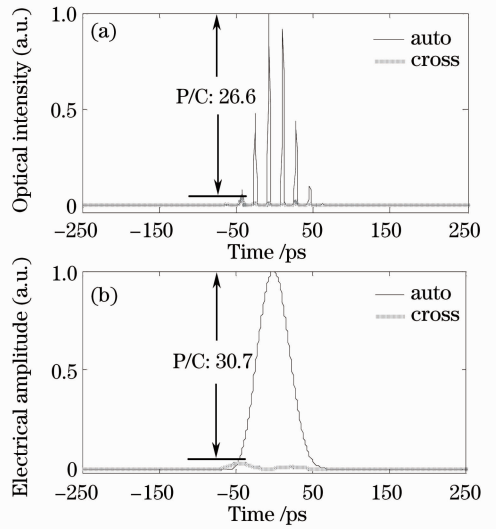

 图3 PCR 为 14 dB 的频谱幅度解码波形。(a)光信号;  
(b)窄带接收后的电信号

 Fig. 3 Decoded waveform of SAE with PCR of 14 dB.  
(a) Optical signal; (b) electrical signal after narrow-band receiver

户系统实验,实验配置如图 4 所示。脉冲图案发生器(PPG,MP1763C)产生的 10 GHz 时钟信号经微波放大器放大后驱动半导体锁模激光器(MLLD,TMLL1550),锁模激光器产生的脉宽约 2 ps 的窄脉冲光源经铌酸锂强度调制器(LN-IM,JDSU10024180)加载  $2^7-1$  PRBS 数据后进入掺铒光纤放大器(EDFA),放大的信号经 50:50 的耦合器分别进入两个不同的编码器,编码器 1 后面的光衰减器用来调节两路编码信号的功率之比,当两者功率值一致时便产生出 2 个用户同时在线的情况,当编码器 1 的编码信号功率调节至编码信号 2 的功率值的一半时,便模拟出 2 个干扰用户的情况,即等效于 3 个用户同时在线。编码器 2 后面的 2 km 光纤用来解除两路数据之间的相关性和两路光脉冲之间的相干性。编码信号经过 60 km G.652 光纤传输以后通过色散补偿模块(DCM)实施色散补偿,然后再次经过掺铒光纤放大器放大之后送入解码器。解码信号在进行光电检测之前先经过一个可调衰减器以便测试不同接收功率下的误码率(BER)曲线。解码信号通过耦合器分出一路给光采样示波器(OSO,NRO9000)的光口(30 GHz 带宽)观察波形和眼图,另一路送给 10 Gb/s 接收机测试误码率。接收机由 10 GHz 的 PIN+TIA 组件和 10 Gb/s 的门限可调整的时钟数据恢复(CDR)模块组成。由 PIN+TIA 组件光电转换的电信号为差分输出,一路送给示波器观察电信号波形,另一路送给 CDR 模块实施数据恢复和时钟提取,最终送入

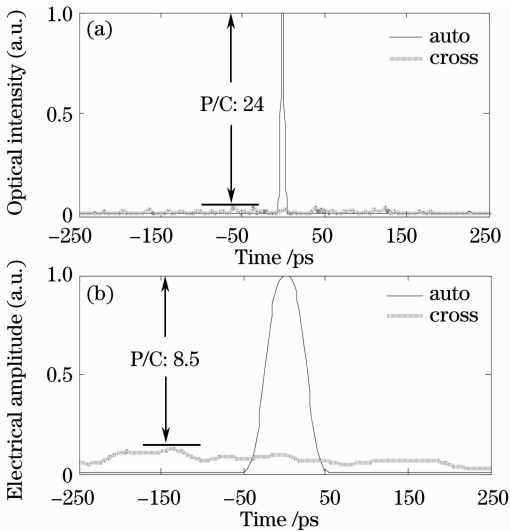

 图2 PCR 为 2.2 dB 的时域相位解码波形。(a)光信号;  
(b)窄带接收后的电信号

 Fig. 2 Decoded waveform of EPS with PCR of 2.2 dB.  
(a) Optical signal; (b) electrical signal after narrow-band receiver

### 3 实验配置及结果

基于这种高 PCR 的编解码器展开 10 Gb/s 多用

误码仪(MP1764C)测试误码。

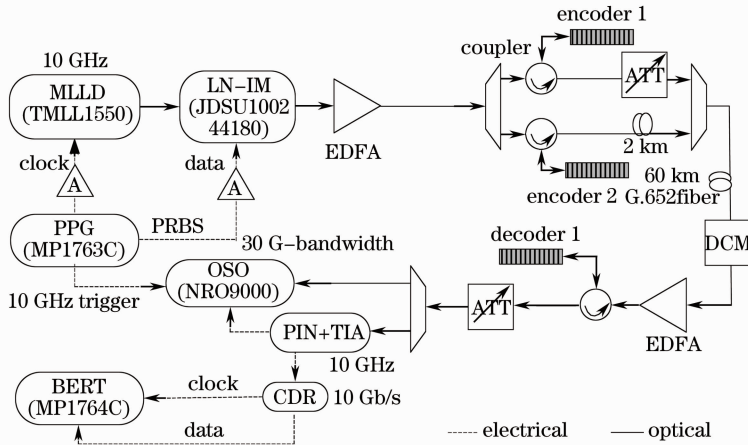


图 4 10 Gb/s 系统实验配置

Fig. 4 Experimental setup of 10 Gb/s system

依照仿真中所采用的参数实验制作这种编解码器。由光矢量分析仪(OVA)测得的编码器 1 和编码器 2 的频谱数据如图 5 所示。实测数据与仿真数据较为吻合,不过对由于切趾而带来的直流分量不平衡进行补偿时有一定的误差,导致了直流分量补偿不彻底,反射峰存在少量的旁瓣,这会在一定程度

上降低自互相关的功率对比度。这种制作上的误差主要来源于光纤的折射率改变量与曝光时间不完全线性和光纤材料本身的非均匀性。这种误差的影响可以进一步通过设计高带抑制制度的切趾包络和精确测定折射改变量来得到抑制。

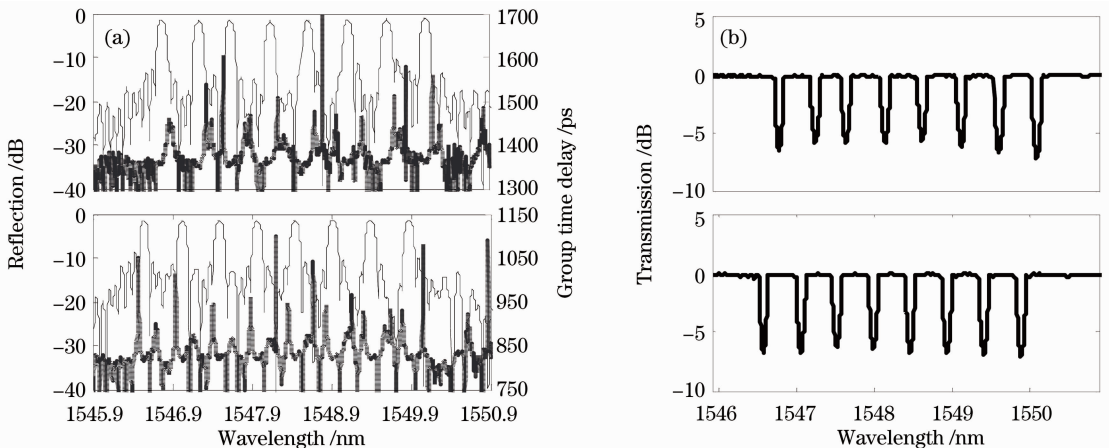


图 5 实测编码器频谱特性。(a)反射谱,上部分为码字 1,下部分为码字 2,实线为幅度谱,点线为群时延谱;  
(b)透射谱,上部分为码字 1,下部分为码字 2

Fig. 5 Measured spectrum of encoders. (a) Reflective spectrum, the upper is code1, the lower is code2, the solid line represents amplitude, the dashed line represents group time delay; (b) transmission spectrum, the upper is code1, the lower is code2

图 6 分别为经过调制的窄脉冲数据、单用户编码和双用户编码的光口波形和眼图的对比。可以看到,经过调制的光脉冲源消光比很好,时间抖动较小,由于光口带宽为 30 GHz,无法识别约 2 ps 的脉冲。可以看到单用户编码波形仍然清晰地显示出数据图案,眼图也比较清晰,而双用户的编码波形就显得比较杂乱,眼图很模糊,这从实验上说明,OCDMA 系统在

单用户状态下不存在安全性,用一个简单的能量积分器就能轻而易举地将数据恢复出来,而在多用户状态下,干扰用户的信号能够将所需的信号进行掩盖,除非使用匹配的解码器,否则很难恢复出具有一定信噪比的数据信号。

图 7 为背靠背时匹配解码与非匹配解码在光口波形和 PIN+TIA 转换的电信号的对比。这时由

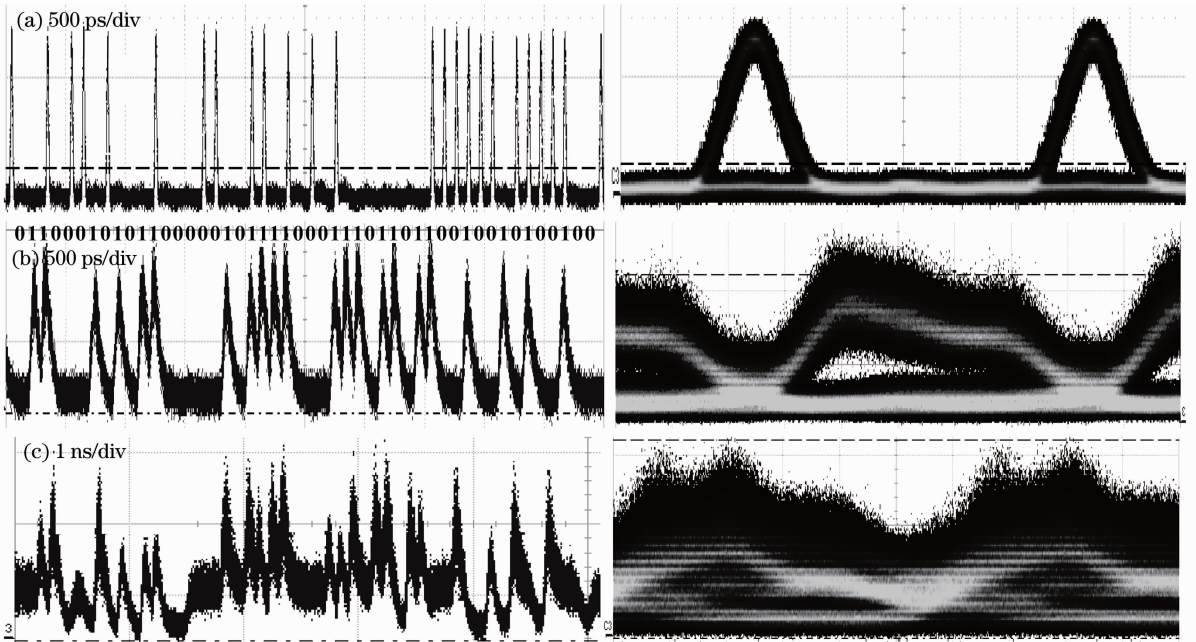


图 6 光口波形和眼图。(a)窄脉冲数据;(b)单用户编码;(c)双用户编码

Fig. 6 Optical waveforms and eye diagrams. (a) Modulated ultra-short pulses; (b) encoded signals of 1-user; (c) encoded signals of 2-user

光功率计测量的编码信号功率为 5.25 dBm,匹配解码信号的功率为-4.35 dBm,非匹配解码信号的功率为-12.17 dBm,这说明制作出的解码器自互相关的功率对比度为 7.82 dB。PIN+TIA 转换的电信号要作为判决电信号送入 CDR 模块,经测量其自互相关的峰值对比度 P/C 为 7.63。无论是光 PCR

值还是电 P/C 值,实验测试数据都是仿真值的约 1/4。其原因主要有两个:1)光栅切趾时直流补偿存在误差;2)由于 EDFA 的使用引入了宽谱噪声,降低了解码信噪比。然而,即使是在没有补偿这两个不利因素的情况下,仍然成功地进行了 2 用户 60 km 无误码传输和 3 用户背靠背无误码实验。

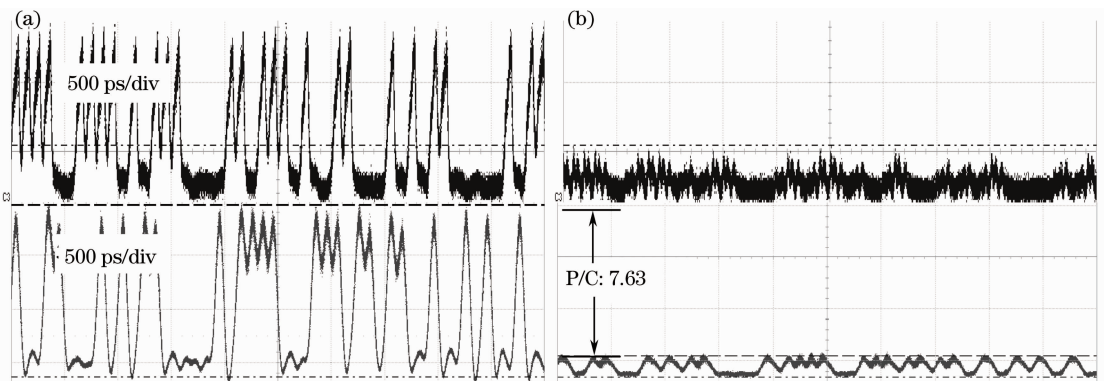


图 7 解码的光口波形(上)和 PIN+TIA 电信号(下)。(a)匹配解码;(b)非匹配解码

Fig. 7 Decoded optical signals (upper) and electrical signals after PIN+TIA (lower).

(a) Matched decoding; (b) unmatched decoding

单用户背靠背解码的眼图如图 8 所示,从光口眼图可以看到,这种编解码方案的解码输出不是一个窄脉冲,而是具有一定宽度的(约 80 ps),接近非归零码信号。由于目前的商用接收机系统大多是基于非归零码设计的,因此解码信号的这个特点有利于采用商用的接收机系统。10 GHz PIN+TIA 的眼图显示,窄带接收以后的眼图质量与光口相比没

有下降。

图 9 为单用户 60 km 传输后经色散补偿的解码波形和眼图。可以看到,与背靠背情况相比,传输后解码波形的噪声基底增厚,眼图变窄,这主要由色散残留、偏振模色散及 EDFA 噪声累积造成的。仍然可以发现,窄带接收的电信号质量没有下降,其眼图甚至比光口眼图质量还要好。

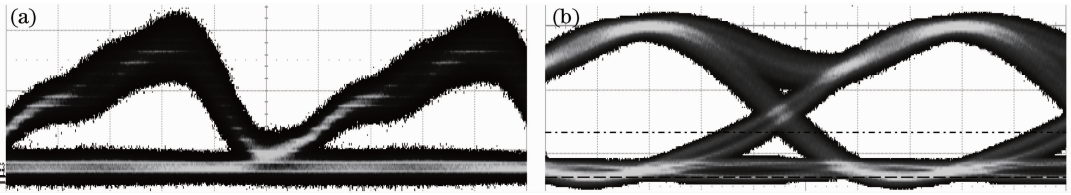


图 8 单用户背靠背解码眼图。(a)光口信号;(b) PIN+TIA 电信号

Fig. 8 Decoded eye diagrams of 1-user back-to-back. (a) Optical signal; (b) electrical signal after PIN+TIA

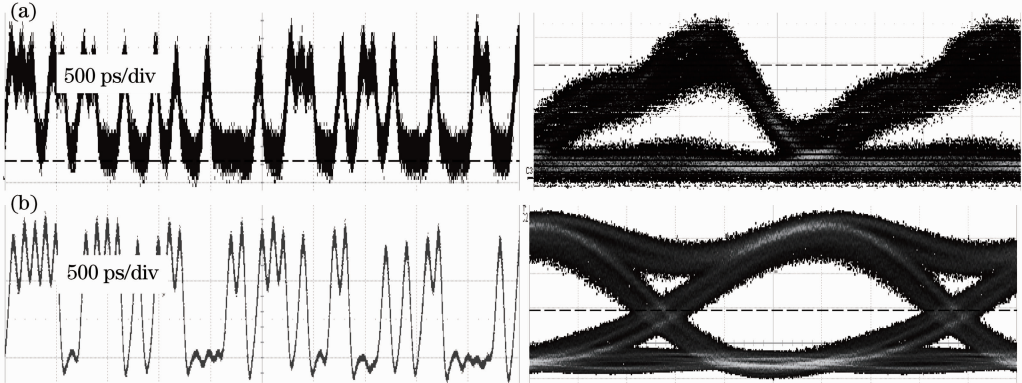


图 9 单用户 60 km 传输解码波形和眼图。(a)光口信号;(b) PIN+TIA 电信号

Fig. 9 Decoded waveforms and eye diagrams of 1-user 60 km transmission. (a) Optical signal;

(b) electrical signal after PIN+TIA

当编码信号 1 的功率调节至与编码信号 2 功率一致时,进行双用户的系统实验。双用户的背靠背解码波形和眼图如图 10 所示。与单用户背靠背情况相比,双用户的波形质量有一定的下降,上下眼皮

增厚,眼图变窄。这主要由多址干扰(MUI)和差拍噪声(BN)的恶化所致。但是,由于解码信号中干扰成分的功率要比匹配解码信号功率低 7.82 dB,因此其影响毕竟有限,PIN+TIA 眼图质量仍然不错。

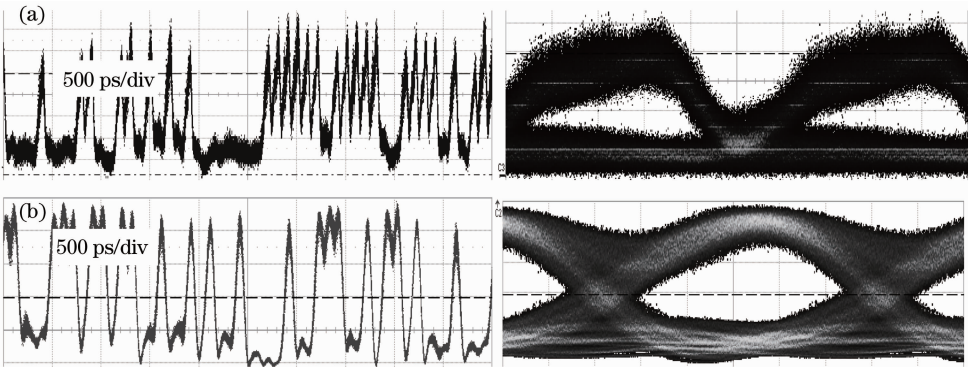


图 10 双用户背靠背解码波形和眼图。(a)光口信号;(b) PIN+TIA 电信号

Fig. 10 Decoded waveforms and eye diagrams of 2-user back-to-back. (a) Optical signal;

(b) electrical signal after PIN+TIA

图 11 为双用户 60 km 传输经过色散补偿后的解码波形和眼图。与单用户 60 km 传输和双用户背靠背相比,眼图进一步变窄,信号幅度的抖动较为严重。恶化的因素主要包括:色散残留、偏振模色散、EDFA 噪声累积、多用户干扰和差拍噪声。但是 PIN+TIA 眼图仍然清晰,最终仍能够进行无误码接收。不过信号质量的恶化将会带来较大的功率代价。

当通过衰减器将编码信号 1 的功率衰减至编码信号 2 功率的一半时,便模拟出 2 个干扰用户的情形,等效于进行 3 个用户的系统实验。3 用户背靠背的解码波形和眼图如图 12 所示。可以看到,在背靠背情况下,3 用户的解码质量比双用户和单用户下降的较多,这主要由 MUI 和 BN 的恶化所致,尤其是 BN 的影响,由于实验中采用的是窄脉冲相干光源,BN 较为严重。要想抑制 BN 的影响,1)可以

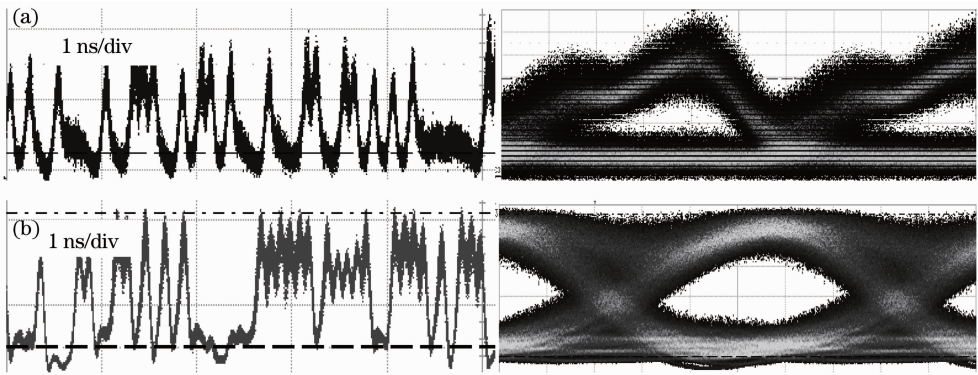


图 11 双用户 60 km 传输解码波形和眼图。(a)光口信号;(b) PIN+TIA 电信号  
Fig. 11 Decoded waveforms and eye diagrams of 2-user 60 km transmission. (a) Optical signal;  
(b) electrical signal after PIN+TIA

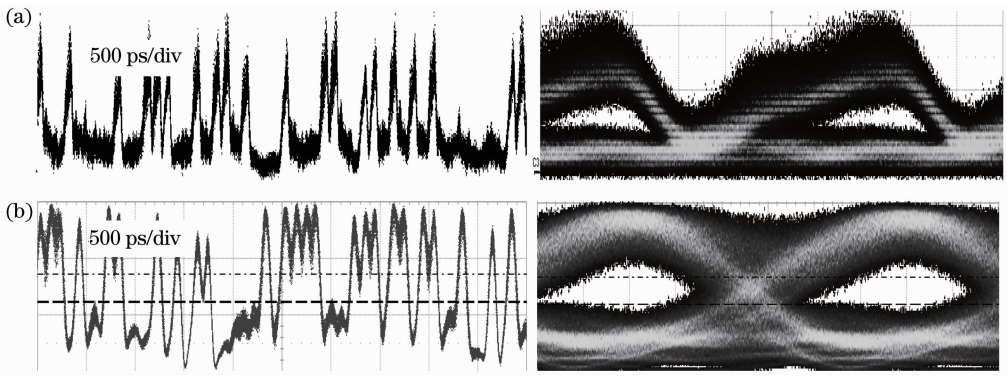


图 12 3 用户背靠背解码波形和眼图。(a)光口信号;(b) PIN+TIA 电信号  
Fig. 12 Decoded waveforms and eye diagrams of 3-user back-to-back. (a) Optical signal;  
(b) electrical signal after PIN+TIA

采用极化复用的方式即对不同用户信号的偏振态分别进行控制;2)可以采用啁啾编码方式<sup>[22]</sup>,使编解码器本身具备抑制 BN 功能;3)可以采用非相干的宽谱光源。实验中,通过调节 CDR 的判决门限最终还是取得了无误码的接收效果。

对 3 用户的 60 km 传输也作了测试,解码波形

和眼图如图 13 所示。在 MUI、BN、色散累积和放大器噪声累积的共同作用下,解码波形抖动的相当严重,光口眼图和 PIN+TIA 电信号的眼图都几乎已经闭合。这是在接收光功率为 -4.85 dBm 时测得的波形,继续增大接收光功率不能明显改善眼图质量。

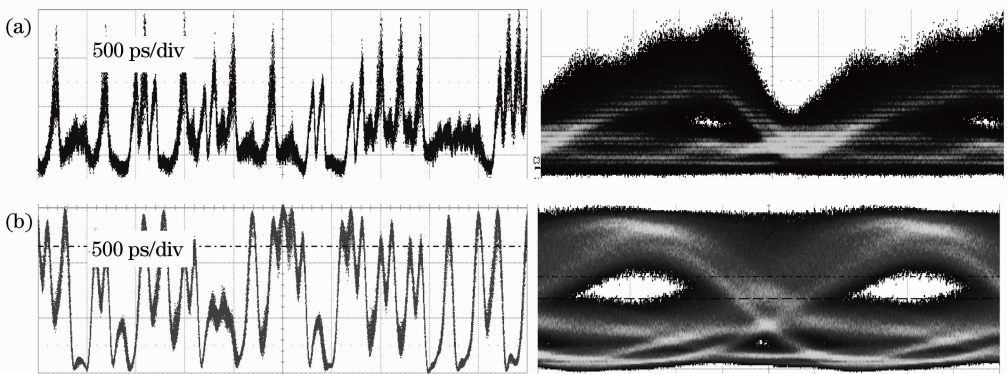


图 13 3 用户 60 km 传输解码波形和眼图。(a)光口信号;(b) PIN+TIA 电信号  
Fig. 13 Decoded waveforms and eye diagrams of 3-user 60 km transmission. (a) Optical signal;  
(b) electrical signal after PIN+TIA

图 14 是在背靠背和 60 km 传输情况下不同用户数时测得的误码率曲线。每次测试都是通过调整 CDR 的判决门限而得出的最佳值。经测试,在误码率为  $10^{-9}$  时,背靠背情况下的单用户、双用户和 3 用户的灵敏度分别为  $-15.2$ 、 $-12.7$ 、 $-8.8$  dBm,多用户的功率代价分别为 2.5 dBm 和 6.4 dBm,而且随着用户数的增多,功率代价的增幅也就越大。背靠背多用户的功率代价主要是由 MUI 和 BN 导致的。60 km 传输情况下的单用户和双用户的灵敏度分别为  $-13.2$  dBm 和  $-8.4$  dBm,双用户的功率代价为 4.8 dBm。相比背靠背而言,60 km 传输的双用户功率代价额外增加了约 2.3 dBm,这说明,用户数越多,传输所带来的功率代价越大。图 15 分别为单用

户和双用户时背靠背与 60 km 传输的误码率曲线对比。可以看到,单用户时 60 km 传输的功率代价为 2 dBm,双用户时 60 km 传输的功率代价为 4.3 dBm。由于传输而引入的功率代价主要由色散残留、偏振模色散、EDFA 噪声累积和非线性损伤造成。用户数越多,对传输损伤的容忍度越低,本实验中,3 用户传输 60 km 后测得的误码率无法达到  $10^{-9}$ ,在接收功率为  $-4.85$  dBm 时测得的误码率为  $10^{-4}$ ,继续增大接收光功率已不能改善误码率,这是由于随着输入功率进一步增加而超过  $-4.85$  dBm 之后,自相关峰值进入非线性饱和和限幅放大区,而各类噪声旁瓣仍然在线性放大,信号的信噪比不会改善。

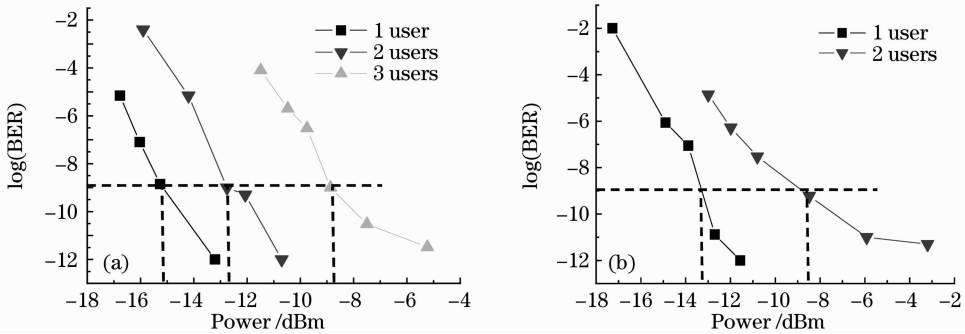


图 14 不同用户数下的误码率测试曲线对比。(a)背靠背;(b) 60 km 传输

Fig. 14 Comparison of BER curves with different users. (a) Back-to-back; (b) 60 km transmission

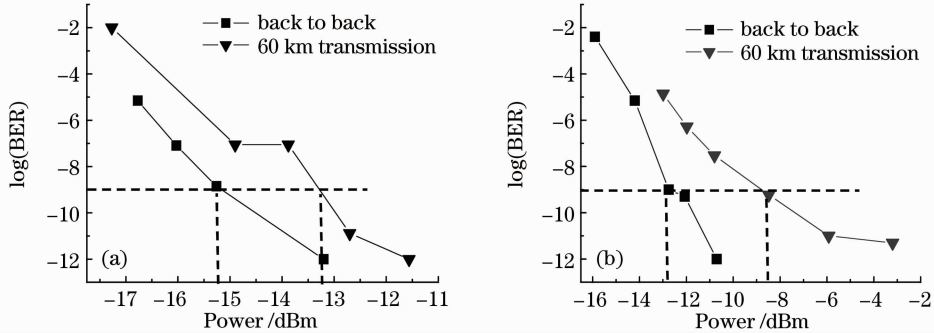


图 15 背靠背和 60 km 传输实验的误码率测试曲线对比。(a)单用户;(b)双用户

Fig. 15 BER curves comparison between back-to-back and 60 km transmission. (a) 1-user; (b) 2-user

## 4 结 论

保持较高的 PCR 值是关键。本实验测得的 PCR 值是仿真值的 1/4,进一步提高 PCR 值有如下两种途径:1) 设计具有较高理论 PCR 值的光栅,对光栅制作进行合理改进,包括设计高边带抑制度的切趾包络和直流分量的精确补偿;2) 提高光信号的信噪比,减少 EDFA 引入的带外宽谱噪声,可以使用光滤波器滤除带外噪声来抑制 EDFA 噪声累积的影响。码片长度也是降低干扰水平的一个重要参

数,码片长度的增加需要每个反射信道做得更窄,这可以通过设计超窄带的反射峰<sup>[23]</sup>来实现。

综上,基于具有高 PCR 值的编解码器,在没有使用阈值器件的情况下采用商用的窄带接收机方案即 10 G PIN+TIA 组件和 10 G CDR 模块,成功实现了双用户 10 Gb/s 60 km 无误码传输系统实验和 3 用户 10 Gb/s 背靠背无误码编解码实验。实验结果证明:在缺乏光阈值器件而不能进行码片级接收的情况下,具有高 PCR 值的编解码器有助于采用现



有成熟的窄带接收机实现高速多用户系统。

### 参 考 文 献

- 1 Wei Huang, Mohamed H. M. Nizam, Ivan Andonovic *et al.*. Coherent optical CDMA (OCDMA) systems used for high-capacity optical fiber networks-system description, OTDM comparison, and OCDMA/WDMA networking [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6): 765~778
- 2 Jawad A. Salehi. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks-Part I: fundamental principles[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1989, **37**(8): 824~833
- 3 Jawad A. Salehi. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks-Part II: system performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1989, **37**(8): 834~842
- 4 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
- 5 Yang Shuwen, Pu Tao, Xu Ming *et al.*. Research of algebraic congruent codes used in two-dimensional code division multiaddress system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 225~229  
杨淑雯, 蒲涛, 徐铭等. 用于二维光址多分址系统的代数同余码研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 225~229
- 6 Richer W. Rischler, A. Buchwieser *et al.*. Field trial of a ASON in the metropolitan area[C]. OFC2002, ThH3
- 7 X. Wang, N. Wada, T. Miyazaki. Field trial of 3-WDM×10-OCDMA×10.71-Gb/s asynchronous DM/DPSK-OCDMA using hybrid E/D without FEC and optical thresholding [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 207~215
- 8 V. J. Hernandez, R. P. Scott, N. K. Fontaine *et al.*. SPECTS O-CDMA 80.8-km BOSSNET Field Trial using a Compact, Fully Integrated, AWG-Based Encoder/Decoder[C]. OFC2007, 2007, OMO7
- 9 Hideaki Tamai, Masahiro Sarashina, Hideyuki Iwamura *et al.*. First demonstration of coexistence of standard gigabit TDM-PON and code division multiplexed PON architectures toward next generation access network[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3): 292~298
- 10 C.-S. Br'es, I. Glesk, P. R. Prucnal. Demonstration of an eight-user 115-Gchip/s incoherent OCDMA system using supercontinuum generation and optical time gating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(7): 889~891
- 11 Xu Wang, Naoya Wada. Inter-symbol interference and beat noise in flexible data-rate coherent OCDMA and the BER improvement by using optical thresholding[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(26): 10469~10474
- 12 Z. Jiang, D. S. Seo, S. D. Yang *et al.*. Four user 10 Gb/s spectrally phase-coded O-CDMA system operating at ~30 fJ/bit [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 705~707
- 13 H. P. Sardesai, A. M. Weiner. Nonlinear fibre-optic receiver for ultrashort pulse code division multiple access communications [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(7): 610~611
- 14 J. H. Lee, P. C. Teh, Z. Yusoff *et al.*. A holey fiber-based nonlinear thresholding device for optical CDMA receiver performance enhancement [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(6): 876~878
- 15 Xu Wang, Naoya Wada, Gabriella Cincotti *et al.*. Demonstration of over 128-Gb/s-capacity 12user 10.71 Gb/s/user asynchronous OCDMA using FEC and AWG-based multiport optical encoder/decoders [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(15): 1603~1605
- 16 P. Toliver, A. Angarwal, T. Banwell *et al.*. Demonstration of high spectral efficiency coherent OCDM using DQPSK, FEC and integrated ring resonator-based spectral phase encoder/decoder [C]. OFC'07 postdeadline, PDP7, 2007
- 17 V. J. Hernandez, W. Cong, J. Hu *et al.*. A 320-Gb/s capacity (32-user×10 Gb/s) SPECTS O-CDMA network testbed with enhanced spectral efficiency through forward error correction[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 79~86
- 18 N. Kataoka, N. Wada, X. Wang *et al.*. Duplex, Fully-asynchronous, 10Gbps x 8-user DPSK-OCDMA field trial using a multi-port en/decoder and SSFBG en/decoders [C]. OFC'08 postdeadline, 2008. PDP27
- 19 T. M. Bazan, D. Harle, I. Andonovic. Performance analysis of 2-D time-wavelength OCDMA systems with coherent light sources; code design considerations[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(10): 3583~3589
- 20 X. Wang, K. Kitayama. Analysis of beat noise in coherent and incoherent time-spreading OCDMA[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(10): 2226~2235
- 21 Lu Lin, Pu Tao, Yu Luocheng *et al.*. Two-user 2.5 Gb/s 100 km optical code division multiple access transmission experiment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2087~2093  
卢麟, 蒲涛, 余罗陈等. 双用户 2.5 Gb/s 100 km 光码分多址传输实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2087~2093
- 22 Jilin Zheng, Rong Wang, Tao Pu *et al.*. A novel beat-noise-reducing en/decoding technology for a coherent 2-D OCDMA system[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 19264~19277
- 23 Chen Peng, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Direct design of super-narrowband fiber grating filter with discrete layer-peeling algorithm[C]. APOC2008, 2008, 71343M-1

栏目编辑:殷建芳