

# 基于波长选择开关的 OCDMA 编解码系统实验研究

武为江 蒲涛 朱华涛 方涛\* 郑吉林 苏国瑞

中国人民解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

**摘要** 提出了一种基于波长选择开关(WSS)和光纤时延线结构的动态可重构、高码片速率的二维跳频-扩时(WH/TS)编解码器实现方案,阐述了其工作原理并进行了系统实验验证与仿真研究。设计实现了数据速率为2.5 Gbit/s的光码分多址(OCDMA)实验系统,完成了40 km的传输实验,并实际测得编码器的群时延和插损特性,利用VPI软件仿真验证了编解码器的码片速率可达500 GChip/s。实验结果表明:基于WSS和光纤时延线的编解码器不仅能够正确完成脉冲信号的编码和解码,而且传输系统实验的误码率(BER)优于 $1.00 \times 10^{-9}$ 。

**关键词** 光通信; 光学码分多址; 跳频-扩时; 编解码器

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0105004

## Experimental Research of OCDMA System Using Wavelength Selective Switch

Wu Weijiang Pu Tao Zhu Huatao Fang Tao Zheng Jilin Su Guorui

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

**Abstract** A novel structural en/decoder using wavelength selective switch and optical delay line is proposed to reconfigure and achieve high chip rate in two-dimensional wavelength-hopping/time-spreading (2-D WH/TS) optical code division multiple access (OCDMA) system. This study expounds the operation principle, presents experimental results from a network tested with user operating at 2.5 Gbit/s, and realizes the experiment of 40 km transmission. Features of group delay and insertion loss about en/decoder are measured and performance of 500 GChip/s rate en/decoder is reached with VPI simulation software. The experimental results demonstrate that the novel method can recover the waveform, and moreover, the bit error rate of the system can be less than  $1.00 \times 10^{-9}$ .

**Key words** optical communications; optical code division multiple access; wavelength-hopping/time-spreading; en/decoder

**OCIS codes** 060.2330; 060.1155

## 1 引言

光码分多址技术(OCDMA)是无线通信中的码分多址(CDMA)技术和光通信技术的结合,既具有CDMA的抗干扰和提高系统容量的优点,又具备光通信丰富的带宽资源的优势,尤其是OCDMA在光网络信息的安全和抗截获方面可提供一种有效的解决手段<sup>[1-3]</sup>。

二维OCDMA采用跳频-扩时(WH/TS)编码。与一维编码相比,不仅可以提高码字容量和用户数,还可以减小多址干扰。有关二维码字的研究多种多样<sup>[4-6]</sup>,例如,Agus等<sup>[4]</sup>通过改进修正素数序列(MPS)生成广义修正素数序列码字(GMPS),提高了系统的误码率(BER,  $R_{BE}$ )性能。扩展多级素数码拥有灵活的码长,自相关峰值为零<sup>[5]</sup>。天津大学的吉喆等<sup>[7]</sup>基于耦合双环阵列提出了一种新型的光编解码器,该编解码器的体积小、成本

收稿日期: 2015-07-22; 收到修改稿日期: 2015-08-17

作者简介: 武为江(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail: by\_wwj@163.com

导师简介: 蒲涛(1974—),男,博士,教授,主要从事光纤通信系统、微波光子学等方面的研究。

E-mail: nj\_putao@163.com

\*通信联系人。E-mail: juence@163.com

低,对 OCDMA 系统的集成化有重要意义。日本大阪大学的 Ryosuke Matsumoto 等<sup>[8]</sup>使用超结构光纤光栅 (SSFBG)实现了 40 G-OCDMA 系统实验,但是光纤光栅的损耗较大,导致系统中采用了多个掺铒光纤放大器 (EDFA),使系统结构变得更加复杂。

本文基于波长选择开关(WSS)和光纤时延线构造二维编解码器,分析了 WSS 编码器的基本原理和结构特点,搭建了 OCDMA 二维动态可重构编解码系统实验平台,利用半实物仿真的方法验证了该编解码器能够达到 500 GChip/s 的码片速率。实验实现了背靠背(B2B)和 40 km 无误码传输,对码重分别为 17 和 6、码长为 50 的码字进行传输性能测试,实验结果表明文中采用的动态可重构的结构可以实现优于  $10^{-9}$  的误码率性能。

## 2 工作原理

基于 WSS 和光纤时延线的二维编码器原理见图 1。该编码器由 WSS、光纤时延线、光耦合器和单模光纤 (SMF) 组成。结构中 WSS 将宽谱光源分成多个波道,通过程控装置实现不同的波道从 4 个不同的端口输出。不同中心波长的子脉冲注入到时延线再进入耦合器。从图中可以看出,在时域上,不同端口的脉冲从耦合器输出叠加在一起;在频域上,光源被分成 9 个波道,送入标准单模光纤,然后在时域上同一端口的波道被分开,此时编码完成。耦合器和 WSS 的端口时延差不同,通过时延线的设计实现端口间的固定时延差。编解码器的码片速率由系统参数决定,码片速率  $T_c = 1/(B \times N \times M)$ , 其中  $B$  为数据信号的速率,  $N$  为选择的端口数,  $M$  是使用的波长数。单模光纤的作用是代替色散器件,它的长度与码片速率、色散系数和波道间隔有关,对于非归零码,单模光纤长度  $L = T_c / (D \times W)$ , 其中  $T_c$  为码片速率,  $D$  为光纤色散系数,  $W$  为波道间隔。本实验中所采用的 WSS(型号为 Capella CR50 Wavelength Selective Switch)波长范围为 1529.16~1567.13 nm, 共有 96 个波道、1 个输入端口和 9 个输出端口。每个波道的间隔为 0.4 nm, 即 50 GHz, 通过程控装置不仅可以实现不同波道从不同的端口输出,而且可对不同波道信号的功率进行控制, WSS 典型的重构时间为 0.5 s。

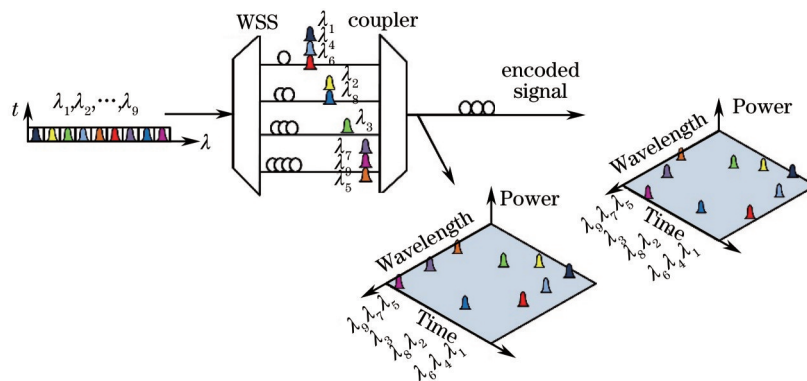


图 1 编码器原理图

Fig.1 Principle of encoder

采用 WSS 作为编解码器,虽然 WSS 编码原理与传统的编码器原理一致,但是由于其独特的结构特性,所以在码字组合数空间、码字构造上与传统的编解码器区别较大。通过分析 WSS 的编码原理,得出此编码器结构主要有以下三大特点:

- 1) 一个波道只能从一个端口输出,多个波道可从同一端口输出;
- 2) 同一端口输出的波道通过单模光纤的群时延展宽;
- 3) 波道的输出端口确定,它所占有的时间片及码字的分布即可确定。

通过以上对 WSS 编码器结构的分析可知,如果 WSS 的 96 个波道和 9 个端口输出全部使用,则组合数空间为  $9^6$ 。实际操作中,波道和端口都不能完全使用,假设在频域上选择的波道数为  $m(0 < m < 97)$ ,选择的端口数为  $n(0 < n < 10)$ ,则编码器的输出矩阵为

$$R = PQ = (\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \cdots \quad \lambda_m) \begin{pmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1n} \\ \vdots & q_{ij} & \vdots \\ q_{m1} & \cdots & q_{mn} \end{pmatrix} = (r_1 \quad r_2 \quad \cdots \quad r_n),$$

其中  $q_{ij} = \begin{cases} 0, & i \leq m, j \leq n \\ 1 \end{cases}$ ,  $P$  为输入光源矩阵,是一个行向量,  $Q$  为编解码器传输矩阵,每一列表示一个端口,由

此可计算出码字组合数空间为  $n^m$ 。实验中可以根据设计选择端口数和波道数。

解码器的结构与编码器的结构相似,唯一不同的是光纤时延线的差别,可以通过时延线的设计实现解码自相关峰值的位置改变。当编码码字与解码码字相匹配时,解码输出自相关峰值,否则输出码字的互相关值,形成多址干扰<sup>[9]</sup>。

### 3 实验装置与结构

二维 OCDMA 编解码系统实验结构如图 2 所示。与非相干光源相比<sup>[10]</sup>,本实验采用短脉冲超连续谱(SC)相干光源。使用中心波长为 1544 nm 的分布反馈半导体激光器(DFB-LD)作为种子光源,将脉冲序列信号发生器(PPG)的 2.5 G 时钟(clk)注入 DFB-LD 形成增益开关激光器(GS-LD)作为信号光源<sup>[11]</sup>,调制信号为 PPG 产生的重复周期为 2.5 GHz、长度为  $2^7-1$  的伪随机序列,送入马赫-曾德尔调制器(MZM),经输出功率为 23 dBm 的功率放大器后注入长度为 800 m 的高非线性光纤(HNLF)中,产生 70 nm 平坦的超连续谱。

SC 光源注入被编程的 WSS,实现不同波长从 4 个端口输出并注入时延呈差值为 100 ps 的等差数列的时延线,然后送入耦合器和长度为 294 m 的标准单模光纤,光纤的色散系数  $D=17$  ps/(nm·km)。由于 294 m 的标准单模光纤的群时延为 5 ps/nm,而每个波道的间隔为 0.4 nm,所以得到的码片速率为 500 GChip/s。解码器的结构同样采用 WSS 和时延线,解码器与编码器的区别是时延线改变<sup>[12]</sup>。编码信号经过 40 km 传输和色散补偿模块送入解码器和光检测模块,接收端采用与编码器 WSS1 相匹配的解码器 WSS2,解码后的信号经过小信号放大器放大后,送入带宽为 10 GHz 的光探测器(PD),检测后的信号经过时钟数据恢复模块(CDR),恢复出时钟和数据信号,最后送入误码率测试仪进行传输性能测试。

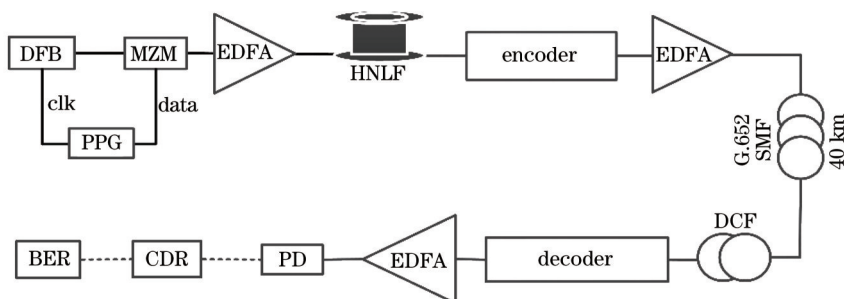


图 2 实验装置框图

Fig.2 Experimental setup of the scheme

本实验的码片速率达到 500 GChip/s,需要精度为 2 ps 的示波器。结合实验室的器件,采用 VPI 对该编解码器结构进行半实物仿真,即采用光矢量网络分析仪(OVA)对编码器的插入损耗和时延特性进行实测,将实测数据带入 VPI 搭建的仿真平台,如图 3 所示。仿真中编解码器都是实际测得的数据,利用软件理想的宽谱光源注入到编码器再通过长度为 294 m 的标准单模光纤得到不同的波道在时域上的分布图,用软件中的示波器显示(见图 4)。从图中可以看出,由于单模光纤的色散特性,在时域上可以清晰看出码片的速率为 500 GChip/s,码片个数为 44 个。

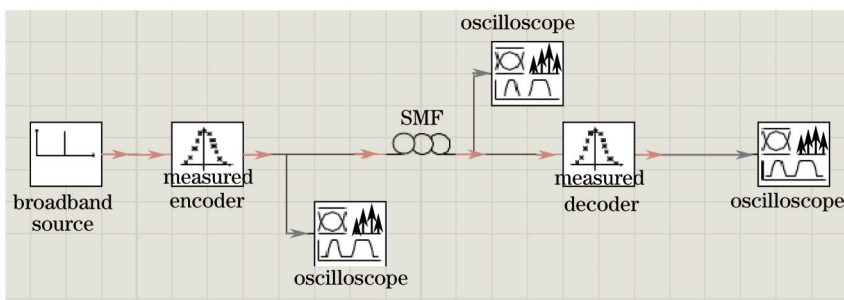


图 3 仿真原理图

Fig.3 Principle scheme of VPI simulation software

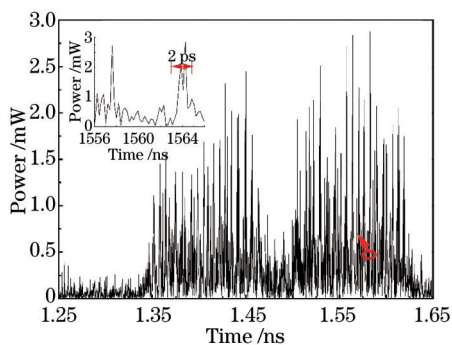


图4 仿真波形图

Fig.4 Simulation waveform

在 WH/TS 编解码系统中,残余色散将光谱展宽数倍,增大了功率代价,对误码率的影响比较大,因此需要精确的色散补偿<sup>[13-14]</sup>。为了精确补偿传输中的色散,本实验使用色散分析仪器(型号为 CHROMOS11),精确匹配 40 km 的标准单模光纤,并且测量得出色散补偿模块的群时延为 676 ps/nm。

#### 4 实验结果

GS-LD 激光器光谱如图 5(a)所示,光谱的中心波长为 1544 nm,20 dB 带宽约为 1.6 nm,GS-LD 经过 HNLf 和 EDFA 之后的超连续谱和经过 WSS 均衡后的频谱如图 5(b)所示。由于种子光源的影响,超连续谱光源在中心波长处光源会出现尖峰,导致光谱的平坦度约为 12 dB,利用 WSS 的均衡功能,测得频谱图的平坦度减小到 2 dB。DFB 激光器的 20 dB 带宽由 1.6 nm 增加到 79.1 nm,谱宽增加了数十倍。图 6 是码重  $w$  分别为 6 和 17 的编解码频谱图。图 6(a)为编码频谱图,从图中可以看出编码后的频谱图的平坦度约为 2 dB,经过 WSS 均衡后在 1544 nm 附近出现一个尖峰,比信号源的峰值低 7 dB。解码频谱图如图 6(b),解码输出与编码的频谱图相似,表明编码码字与解码码字之间相互匹配,解码器能够顺利解码。由于解码器端口损耗不同导致解码的频谱的幅值抖动比较大。图 7(a)、(b)分别为光源的频谱和眼图,眼图中眼皮略薄,上下眼皮分的较开。图 7(c)、(d)为解码后的波形图和眼图,解码输出波形与高非线性光纤的输入波形相同,眼图的眼皮稍厚,这

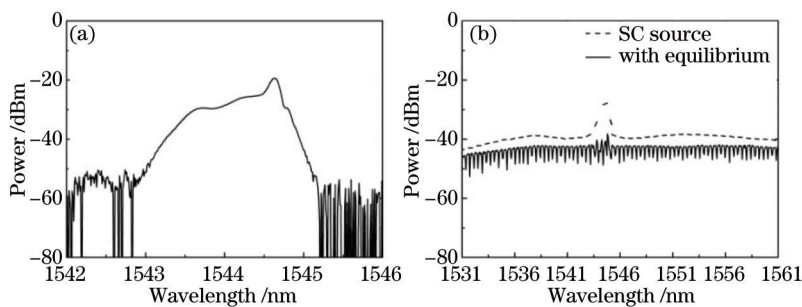


图5 (a) GS-LD 光谱图; (b) WSS 输入输出频谱图

Fig.5 (a) Spectra of GS-LD; (b) spectra with and without equilibrium by WSS

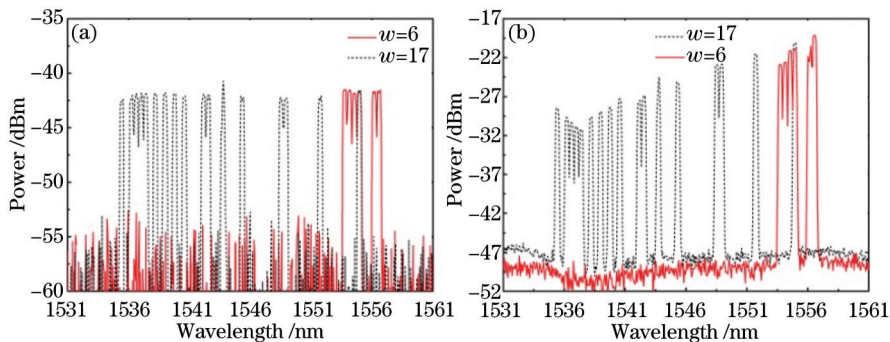


图6 (a) 编码信号频谱图; (b) 解码信号频谱图

Fig.6 (a) Spectra of encoded signal; (b) spectra of decoded signal



主要是由于系统噪声的存在和光纤的非线性抖动。解码器不仅在频域上能够恢复出编码的频谱图,在时域上也能够恢复出编码信号。

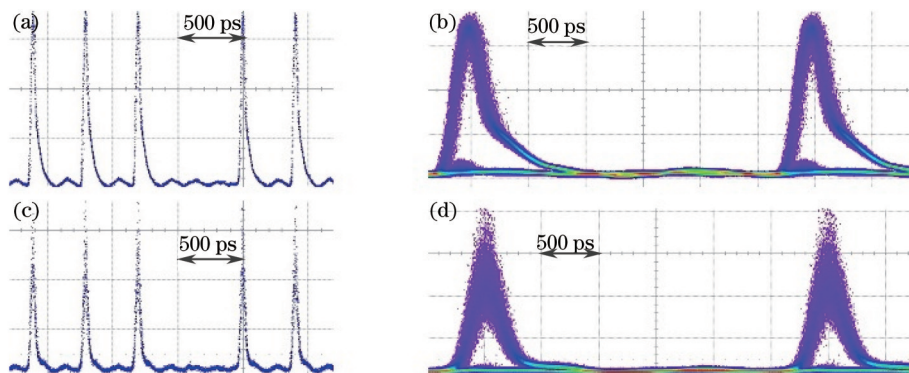


图 7 实验波形图和眼图。(a) 光源波形图; (b) 光源眼图; (c) 解码波形图; (d) 解码眼图

Fig.7 Experimental waveform and eye diagram. (a) Optical source spectrum; (b) optical source eye diagram;

(c) waveform from decoder; (d) eye diagram from decoder

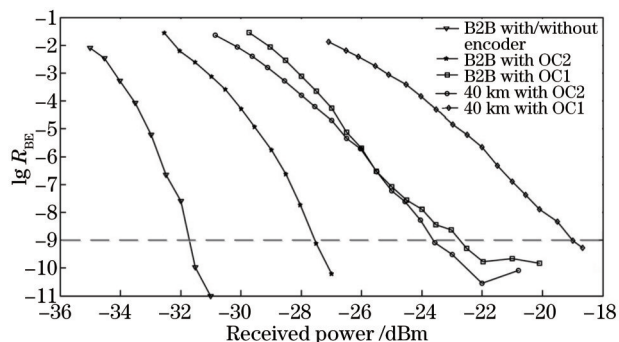


图 8 实验误码率曲线

Fig.8 BER curves in the experiment

基于上面的结构,进行了 B2B 和 40 km 传输实验,误码率结果见图 8。从图中可以看出,相比较没有编码的 B2B 传输,编码方式 2(OC2),即码长为 50、码重为 17 的编码,在 40 km 传输和 B2B 传输时的功率代价分别为 8.2 dB 和 4.1 dB,误码率分别达到  $1.51 \times 10^{-10}$  和  $6.16 \times 10^{-11}$ 。编码方式 1(OC1),即码长为 50、码重为 6 的编码,在 40 km 和 B2B 传输时的误码率分别达到  $5.2 \times 10^{-10}$  和  $8.3 \times 10^{-11}$ ,而且本实验采用 WSS 作为编解码器,通过程控装置快速切换码字,变址灵活性得到很大改善。从图中还可以看出,随着码重的增加接收功率会降低,灵敏度平均提高了约 3 dB,系统性能得到改善。

## 5 结 论

为提高码片速率进而实现二维光学码分多址动态可重构编解码,采用 WSS 和光纤时延线作为跳频-扩时编解码器,设计实现了单用户、数据速率为 2.5 Gbit/s 和码片速率为 500 GChip/s 的系统实验。此外,利用单模光纤的色散将码片在时域上分隔开,从仿真的结果可以清晰地看见 2 ps 的码片间隔。虽然分析了 WSS 编解码器的结构特点,但是在分析与此结构相匹配的码字方面略显薄弱。接下来需要进行现有码字的分析,从中找出适合此编解码器结构的码字。

## 参 考 文 献

1 Zhu Yingxun, Wang Rong, Pu Tao. Fiber Bragg grating based time phase en-decoder with multiple wavelength channels[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(11): 1522-1526.  
 朱英勋,王 荣,蒲 涛. 具有多个波长通道的光纤光栅相位编/解码器[J]. 中国激光, 2007, 34(11): 1522-1526.  
 2 Huatao Zhu, Rong Wang, Tao Pu, et al.. Complementary coding optical stealth transmission based on amplified spontaneous emission light source[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 342-345.

- 3 Zhu Huatao, Pu Tao, Fang Tao, *et al.*. Experiment of optical stealth communication system based on code shift keying-optical code division multiple access technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0906001.  
朱华涛, 蒲涛, 方涛, 等. 基于码移键控-光码分多址技术的光隐藏隐匿通信系统实验[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0906001.
- 4 Agus Susilo, Tomoko K Matsushima, Yasuaki Teramachi. Two-dimensional optical CDMA systems based on MWOOC with generalized MPS codes[C]. *IEEE Conference Publications*, 2010: 378-383.
- 5 Cho-Cheng Sun, Guu-Chang Yang. Extended multilevel prime codes for optical CDMA[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 28(5): 1344-1350.
- 6 Maw-Yang Liu, Yi-Kai Hsu, Chien-Hsien Chiang. Time-spreading wavelength-hopping OCDMA system using LDPC code[C]. *IEEE Conference Publications*, 2013: 95-99.
- 7 Ji Zhe, Jia Dagong, Zhang Haiwei, *et al.*. Two-Dimensioncoherent optical en/decoder based on parallel-cascaded coupled micro-ring reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0506002.  
吉喆, 贾大功, 张海伟, 等. 基于耦合双环阵列的二维相干光码分多址编解码器[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0506002.
- 8 Ryosuke Matsumoto, Takahiro Kodama, Satoshi Shimizu, *et al.*. 40 G-OCDMA-PON system with an asymmetric structure using a single multi-port and sampled SSFBG encoder/decoders[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(6): 1132-1143.
- 9 Tolulope B Osadola, Siti K Idris, Ivan Glesk. Improving multi access interference suppression in optical CDMA by using all-optical signal processing[J]. *Telfor Journal*, 2013, 5(1): 48-53.
- 10 Varghese Baby, Ivan Glesk, Robert J Runser, *et al.*. Experimental demonstration and scalability analysis of a four-node 102-GChip/s fast frequency-hopping time-spreading optical CDMA network[J]. *Photonics Technology Letters*, 2005, 17(1): 253-255.
- 11 Zhu Huatao, Pu Tao, Fang Tao, *et al.*. Experimental demonstration of security-improved optical CDMA system based on polarization modulator[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(2): 227-232.  
朱华涛, 蒲涛, 方涛, 等. 基于偏振调制器的光学OCDMA系统安全性改进研究[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(2): 227-232.
- 12 Hongxi Yin, David J Richardson. *Optical Code Division Multiple Access Communication Networks*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 176-180.
- 13 Lin Chuanyi, Yu Xiangyang. Effects of third order dispersion on the BER of OCDMA system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(5): 050602.  
林传亿, 余向阳. 三阶色散效应对光码分多址系统误码率的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(5): 050602.
- 14 Jilin Zheng, Rong Wang, Tao Pu, *et al.*. Dispersion-compensating en/decoder for a time-spreading/wavelength-hopping optical code-division multiplexing (OCDM) system[J]. *Optica Applicata*, 2013, 43(3): 485-495.

栏目编辑: 王晓琰