

# 子载波个数对非对称限幅光正交频分复用 误码率的影响

张亚平<sup>1,2</sup> 马秀荣<sup>1,2</sup> 白媛<sup>1,2</sup> 赵健<sup>1,2</sup> 李文丽<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>天津理工大学计算机与通信工程学院通信器件教育部工程研究中心, 天津 300384  
<sup>2</sup>天津理工大学电子信息工程学院薄膜电子与通信器件天津市重点实验室, 天津 300384)

**摘要** 误码率(BER)是非对称限幅光正交频分复用(ACO-OFDM)的一项重要性能指标,子载波个数是影响这一性能指标的重要因素。通过理论推导及仿真证明的方法,分析了子载波个数对光域单边带 ACO-OFDM 信号在单模光纤中传输时系统误码率的影响。结果表明,在总传输速率一定时,改变子载波个数从 128 个到 16384 个,所需要的总带宽改变不超过 0.775%。并在此基础上,通过实验证明了不同的传输速率下 ACO-OFDM 系统均存在使系统误码率最低的最优子载波个数,实验结果表明该最优子载波个数随传输速率的增加而增加。

**关键词** 光通信;光正交频分复用;子载波复用;光单边带

**中图分类号** TN911.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0605001

## Impact of Subcarrier's Number on Bit Error Rate of Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Zhang Yaping<sup>1,2</sup> Ma Xiurong<sup>1,2</sup> Bai Yuan<sup>1,2</sup> Zhao Jian<sup>1,2</sup> Li Wenli<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Engineering Research Center of Communication Devices and Technology, Ministry of Education, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China  
<sup>2</sup>Tianjin Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, School of Electronic Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

**Abstract** Bit error rate (BER) is a key indicator of asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing (ACO-OFDM). The number of subcarriers is an important factor of the indicator. By theoretical deduction and simulation, the impact of subcarriers' number on the BER of ACO-OFDM transmitted in standard single-mode fiber (SSMF) with optical single-sideband (OSSB) modulation is analyzed. Theoretical analysis shows that, when the total transmission rate is constant, changing the number of subcarriers from 128 to 16384, the total bandwidth required changes no more than 0.775%. And based on this, further theoretical analysis and simulation illustrate that, with different transmission rates of ACO-OFDM system, there always exists the optimal number of subcarriers resulting the lowest BER, and the optimal number increases with higher transmission rate.

**Key words** optical communications; optical orthogonal frequency division multiplexing; subcarrier multiplexing; optical single-sideband

**OCIS codes** 060.2330; 060.2430; 060.4510; 040.5160

## 1 引言

正交频分复用(OFDM)是一种特殊的多载波调制技术,因其能够有效解决码间干扰(ISI)及多径衰

落在宽带有线及无线通信中得到了广泛的应用<sup>[1~5]</sup>。光 OFDM 技术结合了 OFDM 技术和光通信技术的优点,它使信道均衡变得简单,有很好的抗

**收稿日期**: 2011-11-04; **收到修改稿日期**: 2012-02-19

**基金项目**: 天津市科技创新专项资金项目(10FDZDGX00400)资助课题。

**作者简介**: 张亚平(1985—),男,硕士研究生,主要从事光正交频分复用方面的研究。E-mail: zhangyp443@163.com

**导师简介**: 马秀荣(1961—),女,博士,教授,主要从事光纤传感、光纤通信及移动通信等方面的研究。

E-mail: maxiurong@eyou.com

色散和突发错误的的能力,是最有潜力的长距离光传输技术的候选方案之一<sup>[6~9]</sup>。

目前 OFDM 技术还没有在光通信系统中商业化,其中的一个重要原因是在使用强度调制的系统中,只能传输单极性的信号,而 OFDM 信号一般为复值的双极性信号,2006 年有学者提出采用非对称限幅光正交频分复用(ACO-OFDM)来解决这一问题<sup>[10]</sup>。该技术通过约束调制[傅里叶逆变换(IFFT)]前的频域数据结构,在牺牲一些频谱利用率的基础上,可以先将 OFDM 信号负极性部分置零而后再进行传输。

有关 ACO-OFDM 光通信的研究主要是针对在加性信道下的系统性能的研究<sup>[11,12]</sup>。然而,高速光通信时信道影响较为复杂,各种非线性因素也应考虑在内。在 ACO-OFDM 性能的影响因素中,子载波个数占据着重要地位。如在按位映射的 ACO-OFDM 系统中<sup>[13]</sup>,子载波个数是映射方案需要考虑的重要参数之一。子载波个数在 ACO-OFDM 中的重要作用需要做进一步的研究。

本文采用 Matlab 与光通信设计软件 Optisystem 相结合的方法,通过子载波个数改变对传输带宽及误码率(BER)的影响分析,得到了传输速率一定时,强度调制直接检测的 ACO-OFDM 单模光纤系统存在使误码率最低的最优子载波个数,并仿真证明了这个结论。

## 2 ACO-OFDM 频域数据结构

设基带的一个 OFDM 符号在无循环保护间隔时的时域抽样  $x(k)$  为

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X_m \exp\left(\frac{j2\pi km}{N}\right), 0 \leq k \leq N-1 \quad (1)$$

式中  $k$  代表时间抽样的序列指数, $N$  代表子载波的个数, $X_m$  代表经过映射后调制到第  $m$  个子载波上的频域数据符号。记  $X = (X_0, X_1, X_2, \dots, X_m, \dots, X_{N-1})$ ,当  $X$  具备 Hermitian 对称结构时,

$$X = (X_0, X_1, X_2, \dots, X_m, \dots, X_{N-1}) = (X_0, X_1, X_2, \dots, X_{N/2-2}, X_{N/2-1}, X_{N/2}, X_{N/2-1}^*, \dots, X_1^*), \quad (2)$$

经 IFFT 后得到的 OFDM 信号为实值信号。 $X$  在这种前提下,如果只选择脚标为奇数(以下简称奇数位)的载波传输调制数据,脚标为偶数(以下简称偶数位)的载波调制数据置零,即

$$X = (0, X_1, 0, \dots, 0, X_{N/2-1}, 0, X_{N/2-1}^*, \dots, 0, X_1^*), \quad (3)$$

经 IFFT 后得到的 OFDM 信号将其小于零的部分置零,即可得到 ACO-OFDM 信号。经非对称限幅后,限幅噪声均落在偶数位的载波上,奇数位上的数据变为原来幅度大小的一半而其他信息不受影响<sup>[10]</sup>,但传输的  $N$  点数据中只有  $N/4$  点是相互独立的。

## 3 子载波个数对系统误码率的影响

在分析子载波个数对系统误码率影响之前,先分析子载波个数改变时所需传输带宽的变化。设传输系统传输速率为  $R$ ,信源编码进行  $M$  进制映射,并假设所有子载波均携带数据,则各子载波的传输速率为

$$R_c = \frac{R}{N \lg M}, \quad (4)$$

由于子载波彼此正交,子载波间隔  $\Delta B = R_c$ ,如图 1 所示,其中  $f_0, \dots, f_{N-1}$  分别为  $N$  个子载波的载波频率,则系统所需的总带宽为

$$B = (N+1) \frac{R}{N \lg M} = \left(1 + \frac{1}{N}\right) \frac{R}{\lg M}. \quad (5)$$

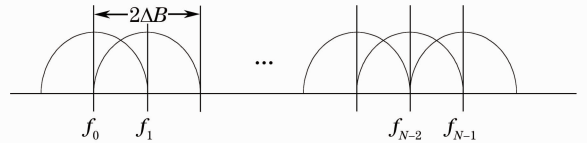


图 1 正交频分复用频谱示意图

Fig. 1 Spectrum diagram of OFDM

当子载波个数变化时,设变化前后子载波的个数分别为  $N_1$  和  $N_2$ ,则所需带宽的变化  $\Delta B'$  为

$$\Delta B' = \left| \left( \frac{1}{N_1} - \frac{1}{N_2} \right) \frac{R}{\lg M} \right| = \frac{R |N_1 - N_2|}{N_1 N_2 \lg M}, \quad (6)$$

带宽变化率为

$$\Delta R' = \frac{\Delta B'}{B_1} = \frac{R |N_1 - N_2|}{N_1 N_2 \lg M} \frac{N_1 \lg M}{R(N_1 + 1)} = \frac{|N_1 - N_2|}{N_2(N_1 + 1)}, \quad (7)$$

当子载波个数从 128 到 16384 变化时,其带宽变化率最大为 0.775%。因此在所研究的 OFDM 通信系统中,当传输速率一定而子载波个数改变时,传输所需的总带宽的改变可忽略不计。

当 OFDM 系统传输总速率一定时,由上可知,改变子载波的个数所需的传输带宽近似不变。若增加子载波的个数,则产生两方面的影响:1) 单个子载波的传输速率变小,即符号周期相对延长;2) 由

于总带宽近似不变,因此相邻子载波的间隔会变小。对于前者,单个子载波传输速率降低,会降低系统对处理速度的要求。因而对系统时钟性能要求降低,由色散引起的码间干扰会大幅度降低,从而降低系统的误码率;对于后者相邻子载波间隔变小,由文献[14~16]可知交叉相位调制(XPM)及四波混频(FWM)等非线性对系统的影响与载波间隔成反比,从这个方面考虑它会增加系统的误码率。这两方面都对误码率有着重要的影响,因此寻找使误码率最低的子载波个数对于改善系统性能至关重要。

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 ACO-OFDM 系统仿真平台

ACO-OFDM 系统仿真原理框图如图 2 所示。电域信号的产生及调制解调均在 Matlab 中完成,光信号的调制解调在 Optisystem 中完成。在电调制阶段,通过 Matlab 产生信号源及导频信号,将串行的数据经过串并转换后再进行正交幅度调制

(4QAM),调整数据结构使其满足(3)式的频域数据结构,在进行 IFFT 后再将数据并串转换为串行的时域 OFDM 信号,而后进行数模转换及非对称限幅,最后将数据送到电光调制器上。通过 Optisystem 来仿真信号经过的光路部分,光纤信道的非线性系数可以通过光纤模块的参数进行设定。为提高频谱利用率及抗差拍干扰能力,采用光域单边带调制<sup>[17,18]</sup>,实现方式是将限幅后的 OFDM 信号均分为两路,其中一路移相 90°,而后用两路信号来驱动双臂的马赫-曾德尔电光调制器(MZM)。在光纤链路上用循环控制器来实现对单模光纤长度的控制,其中每一个循环(跨度)为 80 km,在一个循环中先用掺铒光纤放大器(EDFA)对光信号进行放大,再进行滤波,最终通过光电探测器将光信号转换为电信号。在电解调时,先将电信号经过模数转换后,再进行串并转换,为傅里叶变换(FFT)做准备。利用导频信号对 FFT 后的信号进行信道均衡,而后将信号进行 4QAM 逆映射及并串转换后,最终得到解调的数据。

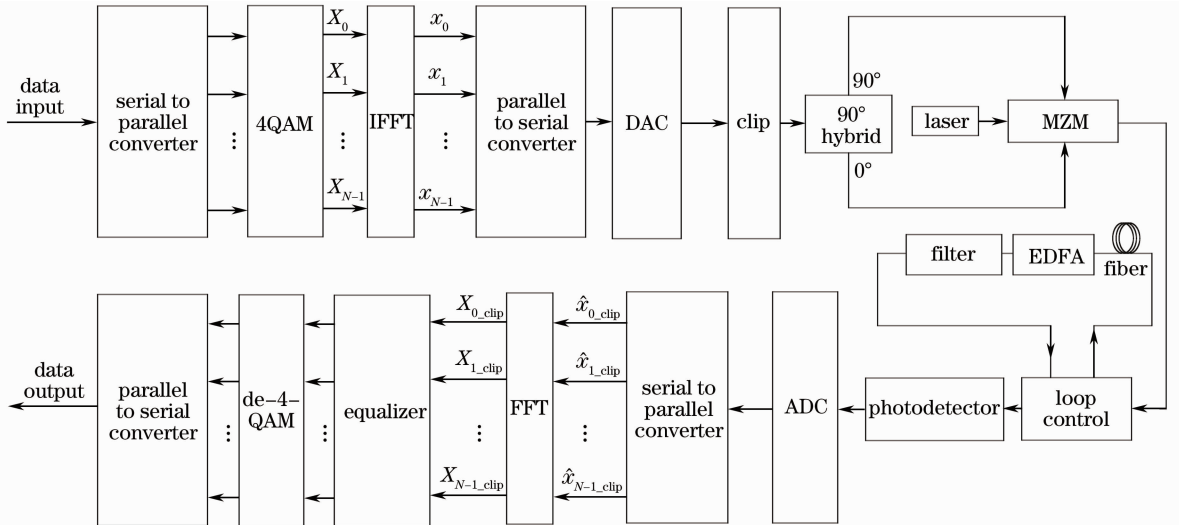


图 2 ACO-OFDM 系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of ACO-OFDM

### 4.2 结果与分析

基于上述平台,分别研究了传输速率在 10、15、20、25、30 Gbit/s 下系统的误码率,并确定了各速率下的最优子载波个数。在确定最优值时,以误码率为主要指标,以系统计算所需的复杂度,主要是傅氏变换复乘所需的计算次数来辅助性地确定最优值。设发送数据量为  $Q$ ,采用  $N$  点,基 2 的 IFFT/FFT,所需复乘计算次数为

$$\frac{4Q}{N} \frac{N}{2} \lg N = 2Q \lg N, \quad (8)$$

式中  $\frac{4Q}{N}$  表示传送数据量  $Q$  时所需 OFDM 符号的个数,因在 ACO-OFDM 系统中,采用  $N$  点 IFFT 时, $N$  个数据中只有  $\frac{N}{4}$  个是相互独立的,所以会有系数 4 存在; $\frac{N}{2} \lg N$  表示  $N$  个数进行基 2 的  $N$  点 IFFT 所需要的复乘次数。从(8)式中可以得出  $N$  值越大,系统所需计算复杂度也越大。在系统实现时,相同硬件条件下,复杂度越大所需的运算时间越长,越不利于系统实时性的实现。当两个子载波个数的值对应的

误码率相差较小时,以复杂度较小为最优的标准。系统采用的主要仿真参数如下:IFFT/FFT 点数从 128 到 16384,激光器谱宽为 10 MHz,光纤采用标准单模光纤,每跨为 80 km,在传输速率较低为 10 Gbit/s,长度为 11 跨,其他传输速率为 8 跨,光电探测器的响应度为 1 A/W,暗电流为 10 nA。仿真结果如图 3 所示。从图 3 中可以得到不同传输速

率下的最优子载波个数如表 1 所示。从图 3 可知子载波个数对误码率的影响较大,如在传输速率 15 Gbit/s 距离为 400 km 时,最优子载波数与次优值(最优值相邻的两个可选值)之间误码率的比较如表 2 所示。从表 2 可知选择合适的子载波个数很重要。图 3(f)是不同传输速率下使误码率最小的子载波个数(最优值)与传输速率的关系。

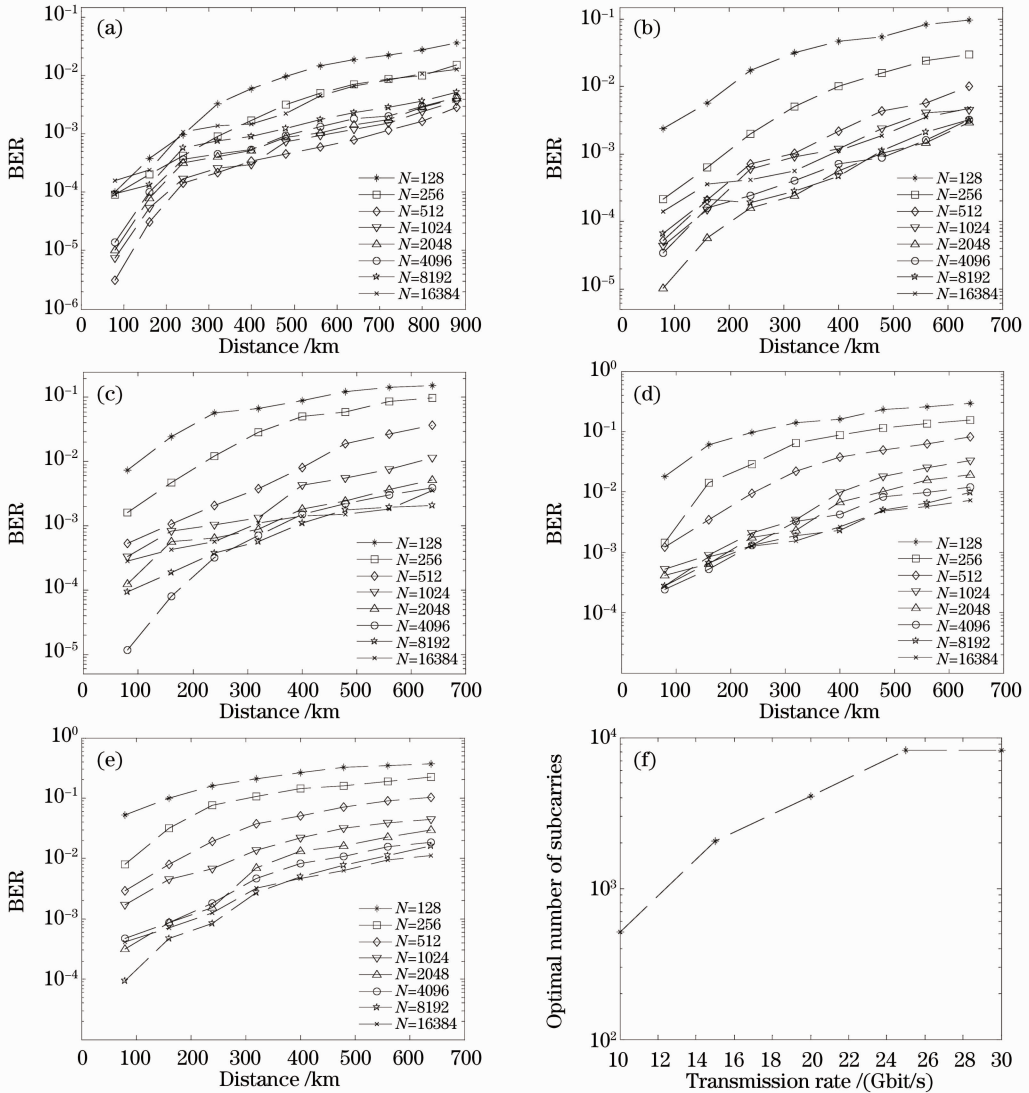


图 3 传输速率不同时子载波个数对应的误码率。(a) 10 Gbit/s; (b) 15 Gbit/s; (c) 20 Gbit/s; (d) 25 Gbit/s; (e) 30 Gbit/s; (f) 传输速率与最优值的关系曲线

Fig. 3 BER of different transmission rates and subcarriers' numbers. (a) 10 Gbit/s; (b) 15 Gbit/s; (c) 20 Gbit/s; (d) 25 Gbit/s; (e) 30 Gbit/s; (f) relationship between transmission rate and optimal numbers

表 1 不同传输速率下的最优子载波个数  
Table 1 Optimal numbers of subcarriers with different transmission rates

Transmission rate / (Gbit/s)	10	15	20	25	30
Optimal number	512	2048	4096	8192	8192

根据以上分析可以得到两个结论:1) 传输速率

和传输距离确定时,若子载波个数变化范围较大,则开始时误码率随子载波个数增加而降低,并且降低速率较快;达到最优值后,误码率随子载波个数增加而增大,但增大速率较慢。2) 在传输距离一定时,最优子载波个数随传输速率的增加而增加且增加的速率随传输速率增大而减小。值得注意的是,此结

论涉及的是 ACO-OFDM 单模光纤系统所具有的一种属性,因此它不受映射方式等因素的影响。

表 2 最优值与次优值之间的误码率比较

Table 2 BER comparison between the optimal and suboptimal numbers

	Number	BER	BER increased to optimal number's
Optimal number	2048	$4.88 \times 10^{-4}$	
Suboptimal number 1	1024	$1.11 \times 10^{-3}$	127%
Suboptimal number 2	4096	$6.19 \times 10^{-4}$	26.8%

## 5 结 论

建立了 ACO-OFDM 在单模光纤中传输的仿真平台,分析了子载波个数对系统误码率的影响,推导得出了子载波个数改变时所需的传输总带宽近似不变,并最终分析且仿真证明了传输速率一定时系统存在最优的子载波个数而且它随传输速率的增加而增加,可为 ACO-OFDM 商业化时子载波个数选择提供理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 J. Armstrong. OFDM for optical communications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3): 189~204
- 2 Chen Lin, Cao Zizheng, Dong Ze *et al.*. Experimental investigation of direct-detection optical orthogonal frequency-division multiplexing transmission system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 554~557  
陈 林, 曹子峥, 董 泽 等. 直接检测的光正交频分复用信号光纤传输系统实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 554~557
- 3 W. Shieh, H. Bao, Y. Tang. Coherent optical OFDM: theory and design[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 841~859
- 4 Xia Minmin, Dong Ze, Cao Zizheng *et al.*. Performance comparison of 40 GHz optical millimeter wave with OFDM signal generated by an optical phase modulator and an optical intensity modulator[J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, **30**(6): 1586~1591  
夏敏敏, 董 泽, 曹子峥 等. 光相位调制器和光强度调制器产生 40 GHz 光载 OFDM 毫米波信号的传输性能比较[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1586~1591
- 5 Wang Xin, Chen Lin, Cao Zizheng. Influence of modulation depth on optical subcarrier OFDM system [J]. *Acta Optical Sinica*, 2011, **31**(5): 0506002  
王 鑫, 陈 林, 曹子峥. 调制深度对副载波正交频分复用光传

- 输系统性能的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0506002
- 6 A. J. Lowery, L. B. Du, J. Armstrong. Performance of optical OFDM in ultralong-haul WDM lightwave systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 131~137
  - 7 A. J. Lowery, J. Armstrong. Orthogonal-frequency-division multiplexing for dispersion compensation of dispersion compensation of long-haul optical systems [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(6): 2079~2084
  - 8 A. J. Lowery. Fiber nonlinearity mitigation in optical links that use OFDM for dispersion compensation [J]. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 2007, **19**(19): 1556~1558
  - 9 Zhou Shumin, Shao Yufeng, Zheng Xi *et al.*. Study on generation of all-optical orthogonal frequency division multiplexing signals based multi-tones modulation [J]. *Acta Optical Sinica*, 2011, **31**(7): 0706004  
邹书敏, 邵宇丰, 郑 曦 等. 基于多边带调制产生全光正交频分复用信号的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0706004
  - 10 J. Armstrong, A. J. Lowery. Power efficient optical OFDM [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(6): 370~372
  - 11 Wang Yong, Cao Jianian. Performance analysis of atmospheric laser communication system basing on asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing intensity modulation and lower density parity check code [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3031~3036  
王 勇, 曹家年. 基于低密度奇偶校验码和非对称限幅光正交频分复用技术的大气激光通信系统性能 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3031~3036
  - 12 J. Armstrong, B. J. C. Schmidt. Comparison of asymmetrically clipped optical OFDM and DC-biased optical OFDM in AWGN [J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, **12**(5): 343~345
  - 13 S. K. Wilson, J. Armstrong. Transmitter and receiver methods for improving asymmetrically-clipped optical OFDM [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, **8**(9): 4561~4567
  - 14 Rongqing Hui. XPM and FWM in OFDM optical system [C]. Proceedings of the Lasers and Electro-Optics Society, 2001. The 14th Annual Meeting of the IEEE, 2001. 281~282
  - 15 Rongqing Hui, K. R. Demarest, C. T. Allen. Cross-phase modulation in multispan WDM optical fiber systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(6): 1018~1026
  - 16 M. Eiselt. Limits on WDM systems due to four-wave mixing: a statistical approach [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(11): 2261~2267
  - 17 Rongqing Hui, Benyuan Zhu, Renxiang Huang *et al.*. Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(3): 417~427
  - 18 M. Sieben, J. Conradi, D. E. Dodds. Optical single sideband transmission at 10 Gb/s using only electrical dispersion compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(10): 1742~1749