

文章编号: 0258-7025(2010)12-3031-06

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

王 勇 曹家年

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 研究了一种光功率效率高的非对称限幅光正交频分复用(OFDM)调制技术,通过对信号的非对称削减,将 OFDM 调制技术运用到光通信领域。将这种非对称限幅光 OFDM 技术运用到大气激光通信系统中,分析了采用非对称限幅光 OFDM 技术大气激光通信系统在大气湍流信道下的性能。在此基础上,将低密度奇偶校验(LDPC)码和置信传播迭代译码算法应用到大气激光通信系统中,并结合非对称限幅光 OFDM 强度调制方案,在大气湍流信道中进行了仿真。仿真结果表明,LDPC 码具有优越的纠错能力并获得了较大的编码增益,该方案可以满足大气激光通信系统的需要。

关键词 光通信;大气激光通信;非对称限幅光正交频分复用;大气湍流

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103712.3031

Performance Analysis of Atmospheric Laser Communication System Basing on Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing Intensity Modulation and Lower Density Parity Check Code

Wang Yong Cao Jianian

(College of Information & Communication Engineering, Harbin Engineering University,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) modulation technique is investigated. It is a new technique for using OFDM in optical system. Asymmetrically clipped OFDM is derived from a bipolar OFDM waveform by setting the negative values to zero. The asymmetrically clipped OFDM technique is applied to atmospheric communication system in this paper, and the performance of atmospheric communication system using asymmetrically clipped OFDM technique through atmospheric turbulence channels is analyzed. On this basis, the low density parity check (LDPC) codes and belief propagation (BP) iterative decoding algorithm are applied into the atmospheric communication system, and it is simulated in the atmospheric turbulence channel with combination of asymmetrically clipped optical OFDM intensity modulation. The simulation results show that LDPC codes have excellent error correction capabilities and access to a larger coding gain, and the above scheme can satisfy the need of atmospheric laser communication system.

Key words optical communications; atmospheric laser communication; asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing; atmospheric turbulence

1 引 言

正交频分复用(OFDM)是一种多载波宽带数字

调制技术,它支持数据的高速传输,允许多个调制后
子载波的合成信号在频谱上相互重叠,与传统频分

收稿日期:2010-05-20;收到修改稿日期:2010-07-02

基金项目:国家自然科学基金(60602007)资助课题。

作者简介:王 勇(1974—),男,博士研究生,讲师,主要从事光通信、光纤传感器等方面的研究。

E-mail: wangyong@hrbeu.edu.cn

导师简介:曹家年(1948—),男,研究员,博士生导师,主要从事光通信、光纤传感器等方面的研究。

E-mail: caojianian@hrbeu.edu.cn

复用各子载波之间的频谱互不重叠相比,大大提高了频谱利用率。此外,OFDM提高了抗多径衰落性能,极大地减小了码间干扰对系统性能的影响。目前,已有学者将OFDM技术运用到光纤通信^[1~3]中,以解决光纤色散问题。他们通常采取的方法是在OFDM符号上增加一个很大的直流偏移量,以确保对光源进行强度调制的信号是非负的。但是这样就会要求一个很高的平均光功率,但信号的调制深度却很低,因此它是一种功率效率低的方法,不适用于大气激光通信。本文采用了一种光功率效率高的非对称限幅光OFDM调制技术,把它运用到大气激光通信中。在此基础上,将电子通信领域中研究较热的低密度奇偶校验(LDPC)码作为信道编码技术应用到大气激光通信系统中,提出了将非对称限幅光OFDM强度调制和LDPC码相结合的系统方案,并在大气湍流信道中对该方案进行了仿真研究。

2 大气激光通信信道模型

当激光通过大气层时,部分光会被吸收,部分光会被散射,这样传输链路的光能量就损失很大。大气层是由各种不同的分子和小的悬浮微粒组成的,它们与光相互作用会产生频率选择性衰减、吸收、散射和闪烁等现象。

其中大气闪烁^[4,5]对大气激光通信系统性能影响较大。大气闪烁又称光强闪烁,是指激光传输一段距离后,光束强度忽大忽小、光斑忽明忽暗的现象。大气闪烁会使接收信号光强随机起伏,从而对大气激光通信系统性能产生很大的损害。一般用闪烁指数^[6]来表示光强起伏的情况,闪烁指数定义为

$$\sigma_{sc}^2 = \frac{E[I^2]}{E^2[I]} - 1, \quad (1)$$

式中 I 代表光强度, $E[\cdot]$ 表示统计平均。根据闪烁指数大小,可以把大气湍流分为弱湍流和强湍流两种。弱湍流的闪烁指数在 $0 \sim 0.75$ 范围内,而强湍流的闪烁指数大于等于 1。

目前普遍接受的单光束通过弱起伏湍流大气后的大气闪烁概率分布是对数正态分布。弱起伏大气湍流条件下,接收信号光强的概率密度函数为

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}I} \exp\left[-\frac{(\ln I - m_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad I \geq 0 \quad (2)$$

式中 m_i 和 σ_i 分别表示 $\ln I$ 的均值和标准方差。

对数正态分布仅适合于弱湍流起伏区域,对于 $\sigma_{sc}^2 \geq 1$ 或传输距离比较长时,光强起伏不再服从对

数正态分布,而是指数分布

$$f_I(I) = \frac{1}{I_0} \exp\left(-\frac{I}{I_0}\right), \quad (3)$$

式中 $I_0 = E(I)$ 。

3 信道编码

LDPC码在加性高斯白噪声(AWGN)信道下是接近香农限的好码,其性能甚至可以超过Turbo,且因为其校验矩阵是稀疏的,LDPC码的译码复杂度低,还能实现完全的并行操作,适合硬件实现,具有高速译码的潜力。所以采用LDPC码作为信道编码。

LDPC码的译码可以使用置信传播(BP)迭代译码算法^[7],比特节点和校验节点之间的消息传递都是以对数似然比(LLR)的形式进行的。对于第 i 次迭代译码,定义标示为:

$l_{mn}^{(i)}$:由校验节点 m 传递给比特节点 n 的 LLR;

$z_{mn}^{(i)}$:由比特节点 n 传递给校验比特节点 m 的 LLR;

$z_n^{(i)}$:比特节点 n 的后验 LLR 信息;

$M(n)$:表示与比特节点 n 相连的校验节点的集合;

$N(m)$:表示与校验比特 m 相连的变量节点的集合。

对于第 i 次迭代译码,LLR BP 译码算法主要包括以下 4 个步骤:

1) 初始化。从接收信号序列计算出对应每一个比特节点的置信信息

$$z_{mn}^{(0)} = \lambda_n = 2y_n / \sigma^2, \quad (4)$$

式中 y_n 为经干扰后直接解调的信号, σ^2 为高斯白噪声方差。

2) 校验节点消息处理。按照

$$l_{mn}^{(i)} = 2 \tanh^{-1} \left[\prod_{n' \in N(m) \setminus n} \tanh\left(\frac{z_{mn'}^{(i-1)}}{2}\right) \right] \quad (5)$$

计算校验节点传向比特节点的消息,式中 $N(m) \setminus n$ 表示除 n 外与校验节点 m 相连的变量节点的集合。

3) 比特节点消息处理。按照

$$z_{mn}^{(i)} = \lambda_n + \sum_{m' \in M(n) \setminus m_i} l_{m'n}^{(i)} \quad (6)$$

计算比特节点传向校验节点的消息,式中 $M(n) \setminus m_i$ 表示除 m_i 外与变量节点 n 相连的校验节点的集合。

4) 译码判决。对所有变量节点计算硬判决消息 $z_n^{(i)} = \lambda_n + \sum_{m \in M(n)} l_{mn}^{(i)}$,并检验临时判决值是否满足校验矩阵的要求,即是否有 $\mathbf{H}\mathbf{c}^T = 0$, \mathbf{H} 为校验矩阵, \mathbf{c} 为根据临时判决值得到的译码向量, \mathbf{T} 为向量转置。如果是,则停止迭代,返回有效的译码结果;否则回到步骤 2) 继续迭代,直到迭代次数超过规定的最大

次数。

上述译码算法计算初始化比特 LLR 是在二元移相键控(BPSK)调制情况下进行的,它不能直接运用到采用多电平调制[如多进制数字相位调制(MPSK)和 M 进制正交幅度调制(MQAM)]的 OFDM 系统中。设 r_I 为同项解调器样本点, r_Q 为正交解调器样本点,则该符号的 LLR 为

$$\lambda[s = (s_I, s_Q)] = -\frac{(r_I - s_I)^2}{2\sigma^2} - \frac{(r_Q - s_Q)^2}{2\sigma^2}, \quad (7)$$

式中 s_I 和 s_Q 为传输信号星座图点的坐标。对于多电平调制,送给 LDPC 迭代译码器的初始化比特 LLR 可以计算为

$$L(s_j) = \log \frac{\sum_{s_i, s_j=0} \exp[\lambda(s)]}{\sum_{s_i, s_j=1} \exp[\lambda(s)]}. \quad (8)$$

4 非对称限幅光 OFDM 系统模型

目前有一些文章描述了 OFDM 技术在光无线通信系统中的运用,所采用的方法都是给 OFDM 符号增加直流偏移量,以保证对光源进行调制的信号是单极性的^[8,9]。对于一个固定的直流偏移量,OFDM 符号偶尔会出现较大的负值峰值,这些负值峰值将被削减掉,引起对信号的噪声。此外,对于直流偏移的 OFDM 光强调制系统,它的平均发射光功率大约等于直流偏移值,因此它是一种功率效率低

的系统。这里采用了一种非对称限幅光 OFDM 调制技术^[10],它不需要添加直流偏移量,在对光源进行强度调制之前,调制信号的所有负值都被归零。通过载波频率的正确选择,传输数据完全可以从这种非对称限幅的信号中恢复出来,并且不会产生信号频带内的限幅噪声。

图 1 给出了采用非对称限幅光 OFDM 调制技术的大气激光通信系统原理方框图。要传输的数据首先映射为复数星座值,把这些复数再映射为向量 $\mathbf{S}; \mathbf{S} = [s(0), \dots, s(N-1)]$,式中 N 为逆快速傅里叶变换(IFFT)的点数。因为系统采用的是光强度调制,所以对光源进行调制的时域信号必须是实信号,并且信号值要大于等于 0。因此,这个星座向量有两个突出的特点:首先这个向量是 Hermitian 对称的,即向量 \mathbf{S} 为

$$\mathbf{S} = (0 \quad s_1 \quad 0 \quad s_2 \quad 0 \quad \dots \quad s_{N/2-1} \quad 0 \quad s_{N/2-1}^* \quad 0 \quad s_{N/2-3}^* \quad 0 \quad \dots \quad s_1^*)',$$

这样可以保证传输的信号是实信号;只有奇数载波传输数据,即 $\mathbf{S}(k) = 0(k$ 为偶数时)。添加完循环前缀后,数据从并行的转化为串行的。在对光源强度调制前,对调制信号要进行限幅,把负数的样值变为 0,这样可以保证调制信号是一个单极性信号。因为只有奇数载波传输数据,所以时域信号是关于中心点反对称的,即 $x(n + N/2) = -x(n)$,这样可以确保削减负值不会使奇载波传输的数据失真,只会使它的幅度减小一半。

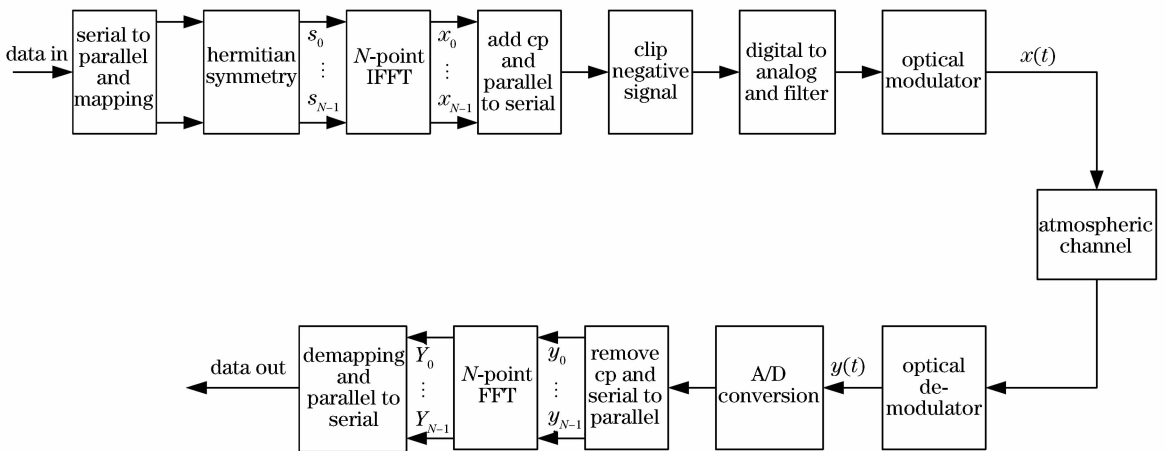


图 1 非对称限幅光 OFDM 系统框图

Fig. 1 Block diagram of an asymmetrically clipped optical OFDM system

在非对称限幅光 OFDM 调制系统中,光发射机发出的光强为

$$s(t) = [s_{\text{OFDM}}(t)]_{\text{clipping}}, \quad (9)$$

式中

$$s_{\text{OFDM}}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} w(t - kT) \times \sum_{i=1}^N B_{i,k} \exp[j2\pi f_i(t - kt)] \right\}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (10)$$

(9), (10) 式中 $B_{i,k}$ 为第 k 个 OFDM 符号的第 i 个子载波的调制信号, T 为 OFDM 符号间隔, $w(t)$ 为窗函数。 $[\]_{\text{clipping}}$ 表示对信号的非对称限幅, 把信号值为负的点都归零。

在接收端, 经 PIN 或 APD 光电二极管转换后, 输出电信号为

$$r(t) = RA(t)s(t) + n(t), \quad (11)$$

式中 $A(t)$ 为由大气湍流引起的光强度波动, R 为 PIN 光电二极管的响应度, $n(t)$ 为接收机的电子噪声, 其概率服从高斯分布。

图 2 (a) 给出了仅有奇数载波传输数据的 OFDM 时域信号波形, 图 2 (b) 给出了图 2 (a) OFDM 时域信号波形经过非对称限幅(把所有负值归零)后的时域波形, 采用的调制方式为正交相移键控(QPSK), N 设为 128。

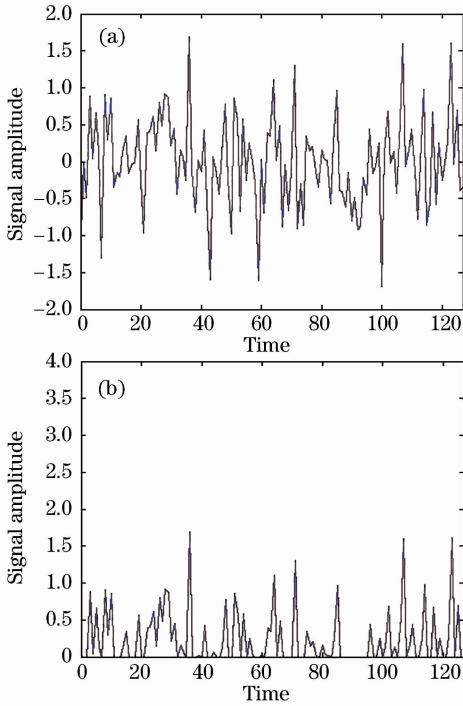


图 2 OFDM 时域信号。(a) 仅包含奇数载波的 OFDM 时域信号, (b) 非对称限幅的 OFDM 时域信号
Fig.2 OFDM time domain signal. (a) only odd subcarriers modulated OFDM time domain signal, (b) clipped OFDM time domain signal

5 系统仿真

在 Matlab 仿真软件环境下, 对采用 LDPC 编码的非对称限幅光 OFDM 调制方案的点对点大气激光通信系统进行了仿真研究。

仿真系统参数设置: 信道编码采用码率为 1/2 的 LDPC(1280, 3, 6), 译码算法采用的是 LLR BP

译码算法, 最大迭代次数设为 50 次。非对称限幅光 OFDM 大气激光通信系统采用子载波总数 $N=16$; 子载波调制方式为 BPSK, QPSK 和 16QAM; IFFT 或 FFT 计算点数为 64; 系统平均发射光功率为 1 mW; 窗函数采用的是 hamming 窗; 并用函数 lognrnd 和 exprnd 来模拟大气湍流信道。图 3 给出了系统仿真流程框图。

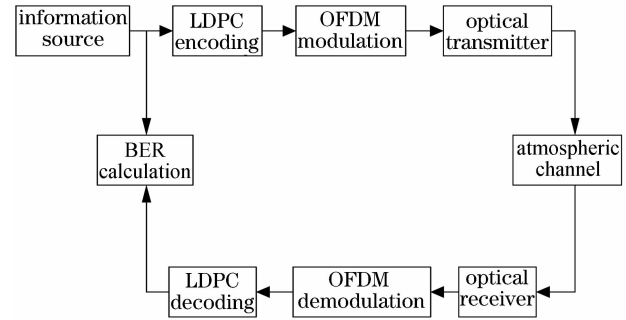


图 3 大气湍流信道下大气激光通信系统仿真框图
Fig.3 Simulation block diagram of atmosphere laser communication system through atmospheric turbulence channels

在弱湍流环境下, 图 4 分别给出了非对称限幅光 OFDM 强度调制系统和 LDPC 编码的非对称限幅光 OFDM 强度调制系统误码率 (BER, f_{BER}) 曲线。子载波的调制方式为 BPSK, 大气湍流强度分别为 $\sigma_{\text{sc}}^2 = 0.1, 0.3$ 和 0.5 。此外, 图中还给出了传统开关键控(OOK)强度调制系统和 LDPC 编码的 OOK 强度调制系统误码率曲线。在大气湍流强度 $\sigma_{\text{sc}}^2 = 0.1$ 下, OOK 强度调制系统性能随着信噪比 E_b/N_o 增加而呈现出非常缓慢的变化趋势, 在相同的大气

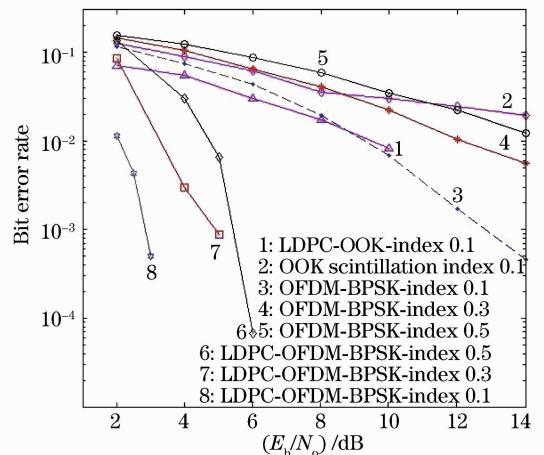


图 4 弱湍流环境下 LDPC 编码的非对称限幅光 OFDM (子载波采用 BPSK 调制) 误码率性能
Fig.4 BER performance of LDPC-coded asymmetrically clipped OFDM communication systems employing subcarrier BPSK under the weak turbulence

湍流强度下,非对称限幅光 OFDM 强度调制系统比传统 OOK 系统性能至少提高 4 dB,LDPC 编码的非对称限幅光 OFDM 强度调制系统比 LDPC 编码的 OOK 系统性能至少提高 8 dB。从图中还可以清楚地看出,随着湍流强度的增大,系统性能在不断地恶化。当大气湍流强度 $\sigma_{sc}^2 = 0.1$ 时,采用非对称限幅光 OFDM 强度调制的大气激光通信系统要达到误码率 $f_{BER} = 4.6 \times 10^{-4}$,要求信噪比 $E_b/N_0 = 14$ 。而采用 LDPC 编码的非对称削光 OFDM 强度调制大气激光通信系统在相同误码率下,则需要信噪比 $E_b/N_0 = 3$ dB,可以获得 11 dB 的编码增益。

图 5 给出了在弱湍流环境下($\sigma_{sc}^2 = 0.3$),调制方式采用 QPSK 的 LDPC 编码的非对称限幅光 OFDM 强度调制系统误码率曲线。在 QPSK 调制方式中采取了 gray 和自然两种映射方式。从仿真图中,可清楚地看到采用 gray 映射的 LDPC 编码系统性能比采用自然映射的 LDPC 编码系统性能好大约 1 dB。这主要是因为采用 gray 映射的相邻符号间的汉明距离要小于采用自然映射。此外,LDPC 码可获得近 14 dB 的编码增益。

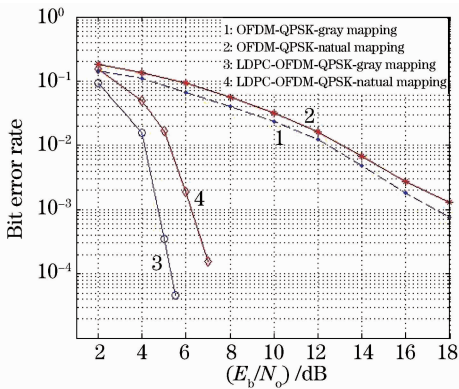


图 5 弱湍流环境下 LDPC 编码的非对称限幅光 OFDM (子载波采用 QPSK 调制)误码率性能

Fig. 5 BER performance of LDPC-coded asymmetrically clipped OFDM communication systems employing subcarrier QPSK under the weak turbulence

图 6 给出了 LDPC 编码的非对称限幅光 OFDM 强度调制大气激光通信系统在强湍流($\sigma_{sc}^2 = 1$)环境下的性能曲线。与图 4,5 比较中可以发现,在相同信噪比条件下,图 6 中的系统性能逊色于图 4,5。这主要是因为强湍流对大气激光通信系统的影响更大,要想保持高质量的通信,除了增加好的差错控制编码技术外,还需要加大光源的发射光功率(在保证人眼和皮肤安全的前提下)。从图中还可以清楚地看出,采用 16QAM 调制方式的非对称限幅

光 OFDM 系统不适用于强湍流大气环境,LDPC 码没有给该系统性能带来任何改善,但在其他调制方式下,LDPC 码仍然可以获得 12 dB 的编码增益。

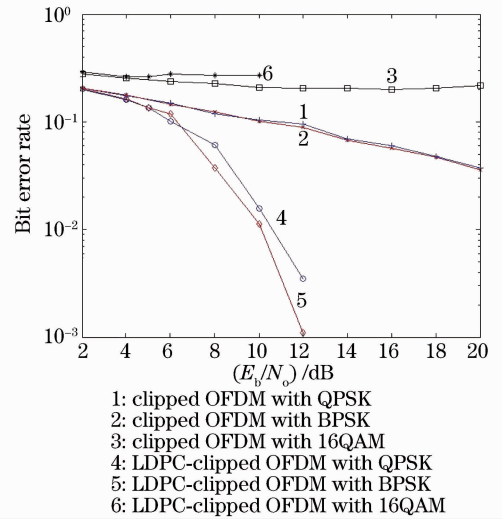


图 6 强湍流环境下 LDPC 编码的非对称限幅光 OFDM 误码率性能

Fig. 6 BER performance of LDPC-coded asymmetrically clipped OFDM communication systems under the strong turbulence

6 结 论

分析了非对称限幅光 OFDM 调制技术的基本原理及其在大气激光通信系统中的应用,将 LDPC 码作为信道编码技术应用到大气激光通信系统中,并且提出了将非对称限幅光 OFDM 强度调制技术和 LDPC 码相结合的系统方案。仿真结果表明 LDPC 码具有优越的纠错性能,该方案对系统中的光强闪烁有很好的抗干扰作用,可以满足大气激光通信系统的要求。

参 考 文 献

- 1 B. J. Dixon, R. D. Pollard, S. Iezekiel. Orthogonal frequency-division multiplexing in wireless communication systems with multimode fiber feeds [J]. *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, 2001, **49**(8):1404~1409
- 2 A. J. Lowery, L. Du, J. Armstrong. Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long haul WDM systems [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2006, **1-6**:2753~2755
- 3 Q. Pan, R. J. Green. Bit-error-rate performance of lightwave hybrid AM/OFDM systems with comparison with AM/QAM systems in the presence of clipping impulse noise [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(2):278~280
- 4 Zhu Xiaoming, J. M. Kahn. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2002, **50**(8):1293~1300

- 5 Ruizhong Rao. Genetal optical scintillation in turbulent atmosphere [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8):547~549
- 6 K. Kiasaleh. Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2005, **53**(9):1455~1461
- 7 A. Ohhashi, T. Ohtsuki. Regular low-density parity-check (LDPC) code with normalized and UMP BP-based algorithms on fast Rayleigh fading channel [C]. Vehicular Technology Conference, 2004, **4**:2520~2524
- 8 O. Gonzalez, R. Perez-Jimenez, S. Rodriguez *et al.*. OFDM over indoor wireless optical channel [J]. *IEE Proc. Optoelectron.*, 2005, **152**(4):199~204
- 9 Wang Wenpei, Chen Lin, Dong Ze *et al.*. Performance comparsion between on-off keying and orthogonal frequency division multiplexing signals in 40 GHz radio-over-fiber systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2):465~470
王文沛,陈 林,董 泽 等. 40 GHz 光纤无线通信系统中开关键控与正交频分复用信号传输性能的比较[J]. 中国激光, 2010, **37**(2):465~470
- 10 J. Armstrong, A. J. Lowery. Power efficient optical OFDM [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(6):370~372