

# Gamma-Gamma 大气湍流下 FSO-OFDM 调制系统 误码率分析

王涵<sup>1</sup> 张涛<sup>1</sup> 李莎<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>海南大学信息科学技术学院, 海南 海口 570228  
<sup>2</sup>北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

**摘要** 大气湍流效应会导致自由空间光通信(FSO)系统链路性能恶化。研究了在自由空间光通信中采用正交频分复用(OFDM)调制技术,分析了采用 OFDM 调制的自由空间光通信系统在 Gamma-Gamma 大气湍流信道下的误码率性能。比较了不同大气湍流强度下,采用开关键控(OOK)调制系统和 OFDM 调制系统的误码率。仿真结果表明,随着湍流强度加强,OOK 调制系统和 OFDM 调制系统性能都在不断恶化,不同湍流强度下,16QAM-OFDM 系统比 4QAM-OFDM 系统误码率更大,4QAM-OFDM 系统性能优于 OOK 调制系统。

**关键词** 自由空间光通信;大气湍流;正交频分复用;误码率

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.110102

## Bit-Error-Rate Analysis of FSO-OFDM Modulation System over Gamma-Gamma Atmospheric Turbulence

Wang Han<sup>1</sup> Zhang Tao<sup>1</sup> Li Sha<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>College of Information Science and Technology, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China  
<sup>2</sup>State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** The effect of the atmospheric turbulence can deteriorate the performance of the free-space optical (FSO) communication system. A technique for using orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) modulation in FSO is studied, the bit error rate (BER) performance of FSO-OFDM modulation system over Gamma-Gamma atmospheric turbulence is analyzed. Under different atmospheric turbulence intensity, the BER of OFDM modulation system is compared with on/off keying (OOK) modulation system. The simulation results show that OOK modulation system and OFDM modulation system are deteriorating with the strengthening of turbulence intensity, under different atmospheric turbulence intensity, the BER performance of 4QAM-OFDM modulation system is better than 16QAM-OFDM modulation system and OOK modulation system.

**Key words** free-space optical communications; atmospheric turbulence; orthogonal frequency division multiplexing; bit error rate

**OCIS codes** 010.1290; 010.1330; 010.3310; 060.2605

## 1 引言

自由空间光通信(FSO)<sup>[1]</sup>被视为一种新型的宽带接入方式,特别是在不便铺设光纤和不适合使用微波的地方。它具有比较灵活的无线接入方式,在短距离内,获得光纤传送的容量大,抗干扰能力强,特别是无需向主管部门申请频率和许可证等优点,被认为是最后 1 km 问题切实可行的解决方案。然而,自由空间光通信性能容易受大气湍流的影响,大气湍流效应会导致传输光束的光斑漂移、光强度起伏等<sup>[2]</sup>。正交频分复用(OFDM)<sup>[3]</sup>是一种特殊多载波调制技术,它被广泛应用在宽带无线通信系统中,具有抗窄带干扰能力强、高

收稿日期: 2012-08-01; 收到修改稿日期: 2012-08-07; 网络出版日期: 2012-09-10

作者简介: 王涵(1986—),男,硕士研究生,主要从事自由空间光通信方面的研究。E-mail: hanwang1214@126.com

导师简介: 张涛(1971—),男,副教授,硕士生导师,主要从事海域自由空间光通信、千兆比无源光网络媒质接入控制协议等方面的研究。E-mail: awgcn@163.com

频谱效率和高速率等优点。目前,国内对自由空间光通信正交频分复用技术的研究主要有西安理工大学的赵黎等<sup>[4]</sup>的散射衰落信道下 FSO-OFDM 调制系统研究,还有哈尔滨工程大学王勇等<sup>[5]</sup>的针对弱湍流环境下 FSO-OFDM 调制系统研究。

本文提出把 OFDM 调制技术应用到自由空间光通信中,主要思想是通过使用 OFDM 技术降低符号速率,获得对信道深度衰落较高的高容性;分析了在不同大气湍流强度下 FSO-OFDM 调制的误码率(BER)性能,并和传统 IM/DD 制式的调制技术进行了性能比较。

## 2 系统模型

### 2.1 Gamma-Gamma 分布信道模型

自由空间光通信信道中,由于太阳加热和风造成温度和压力的不均匀,进而导致传输介质的折射率变化引起大气湍流,而大气湍流又会导致光强起伏(闪烁)、光束漂移等。目前,提出了很多不同统计模型用来描述大气湍流强度,针对弱湍流情况,光强起伏的概率密度函数(PDF)被定义为对数正态分布<sup>[6]</sup>,但它不适合中强湍流情况。文献<sup>[7]</sup>中提出 Gamma-Gamma 分布适用所有湍流情况。

Gamma-Gamma 模型描述了包括内尺度和外尺度下的大气起伏现象,它将辐照度分解为两个独立随机过程的乘积,其中每个都具有伽马 PDF。因此,光强起伏的 PDF 为

$$f(X) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} X^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta X}), \quad X > 0 \quad (1)$$

式中  $X$  为信号强度, $\alpha$  和  $\beta$  为 PDF 的参数, $\Gamma$  为伽马函数, $K_{\alpha-\beta}$  为修正的第二类贝塞尔函数,阶次为  $\alpha - \beta$ 。考虑在零内尺度情况下,利用平面波来预测闪烁的 PDF 的参数  $\alpha$  和  $\beta$  可以表示为

$$\alpha = \left\{ \exp \left[ \frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (2)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[ \frac{0.51\sigma_R^2}{(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (3)$$

式中 Rytov 方差  $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  为波数, $\lambda$  为波长, $L$  为传输距离, $C_n^2$  为折射率结构常数。

### 2.2 OFDM 信号在自由空间光通信链路上传输

OFDM 是多载波调制的一种,通过将信道分成若干正交子信道,将高速数据流转换成并行的低速子数据流,调制到每个子信道上进行传输,子载波的调制可以使用相移键控(PSK)调制或正交振幅调制(QAM)。应用快速傅里叶变换(FFT)和快速逆傅里叶变换(IFFT)可以解决产生多个相互正交的子载波和从子载波中恢复原信号的问题。自由空间光通信链路传输 OFDM 信号的基本结构如图 1 所示,其中 S/P 为串并变

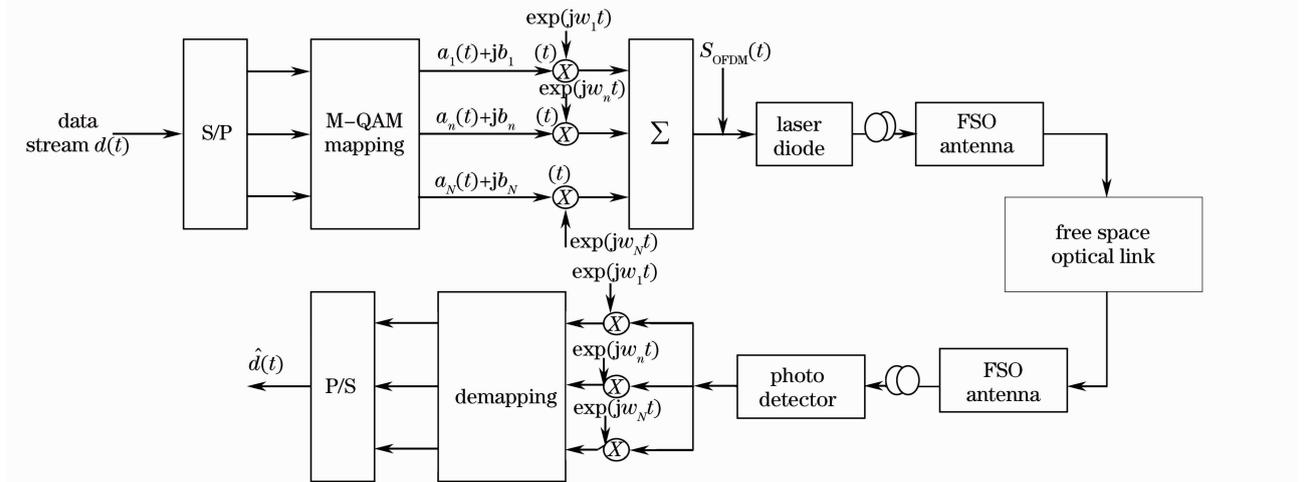


图 1 自由空间光通信链路传输 OFDM 信号的基本结构

Fig. 1 Basic structure of OFDM signal transmission over FSO link

换, P/S 是并串变换。

包含  $N$  个子载波的 OFDM 信号, 通过上变频到载波频率  $f_c$  上, 公式表示为

$$S_{\text{OFDM}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} S_n(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp[j(\omega_n + 2\pi f_c)t], \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (4)$$

式中  $\{\omega_n = (2\pi n/T_s), n = 0, 1, \dots, N-1\}$  为组正交载波频率,  $T_s$  为 OFDM 符号持续时间,  $X_n = a_n + jb_n$  为第  $n$  个载波的数据符号,  $a_n$  和  $b_n$  分别为同相和正交调制符号, 这个过程是通过使用 IFFT 来保证子载波间的正交性, 避免符号间干扰。假定保护间隔为 0, OFDM 符号持续时间  $T_s$  等于傅里叶运算窗口时间。因为采用的是光强度直接调制, 所以对光源进行调制的信号必须为实信号<sup>[8]</sup>,  $S_{\text{OFDM}}(t)$  的实信号是通过 IFFT 输入矢量的厄密共轭对称性得到,  $X_{N-k} = X_k^*, k = 1, \dots, N/2, X_0 = 0$ , 要求 IFFT 长度为  $2N$ 。用  $S_{\text{OFDM}}(t)$  信号来调制激光二极管(LD) 光强度, 调制信号经过小段光纤传输到发射天线, 最后在自由空间中传输, 不考虑由激光器带来的非线性影响, 只考虑由内调制产生的影响, LD 光输出功率可以表示为

$$P(t) = P_t \left[ 1 + \sum_{n=0}^{N-1} m_n S_n(t) \right], \quad (5)$$

式中  $P_t$  为激光平均发射功率,  $m_n$  为单个子载波的光调制系数。光电检测器接收光功率表示为

$$P_{r,\text{FSO}}(t) = P(t) L_a L_{\text{scint}} L_{\text{atm}} X + n_{\text{FSO}}(t), \quad (6)$$

式中  $P(t)$  为激光二极管输出功率,  $L_{\text{scint}}$  为大气湍流造成的损耗,  $L_{\text{atm}}$  为雨雾造成的大气衰落,  $L_a$  表示 FSO 几何衰落和瞄准误差, 不考虑 FSO 发射端的光纤非线性影响。  $n_{\text{FSO}}(t)$  为自由空间光通信中的噪声, 为方便研究采用加性高斯白噪声(AWGN)来分析,  $X$  为由于大气湍流效应造成信号的衰落变化强度, 它的 PDF  $f(X)$  如(1)式所示。把(5)式代入(6)式中, 假设在光电检测端可以通过滤波器滤除 FSO 背景噪声, 不考虑探测器的暗电流噪声, 光电转换输出电流表示为

$$i(t, X) = I_{\text{ph}} \left[ 1 + \sum_{n=0}^{N-1} m_n S_n(t) \right] + n_{\text{opt}}(t), \quad (7)$$

$$I_{\text{ph}} = \rho L_a L_{\text{scint}} L_{\text{atm}} P_t X, \quad (8)$$

式中  $I_{\text{ph}}$  为接收光电流,  $\rho$  为光电检测器的响应度,  $n_{\text{opt}}(t)$  表示双边功率谱密度为  $N_0/2$  的加性高斯白噪声。自由空间光通信中的噪声主要有激光器的相对强度噪声  $i_{\text{RIN}}^2$ 、光电检测器的量子噪声  $i_q^2$ 、均方噪声电流  $i_T^2$ 。相对强度噪声(RIN)是激光器谐振腔内载流子和光子密度随机起伏产生的噪声, 均方噪声电流是由激光器的折合到输入端的放大器噪声产生的。因此, 把总的噪声功率定义为

$$N_0 = i_{\text{RIN}}^2 + i_q^2 + i_T^2 = R_{\text{RIN}} I_{\text{ph}}^2 + 2qI_{\text{ph}} + \frac{4K_B T_{\text{abs}} F}{R_L}, \quad (9)$$

式中  $K_B$  为波尔兹曼常量,  $T_{\text{abs}}$  为绝对温度,  $F$  为接收电子噪声系数,  $R_L$  为光电检测器负载阻抗,  $q$  为单位电量, 这里接收电流  $I_{\text{ph}}$  为跟电流强度  $X$  成比例, 所以具有相同统计值。

### 2.3 载波噪声比分析

为简单起见, 假设所有调制系数相同, 那么单个子载波光调制系数  $m_n$  为

$$m_n = \frac{m_{\text{total}}}{\sqrt{N}}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

式中  $m_{\text{total}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} m_n^2}$  是总的光调制系数。子载波  $\omega_n$  上的信号功率为

$$C = \frac{1}{2} m_n^2 I_{\text{ph}}^2. \quad (11)$$

因此, 在接收端的载波噪声比(CNR)可以通过定义为关于信号功率  $C$  和每个子载波光噪声功率  $N_0/T_s$  的函数

$$R_{\text{CNR}}(X) = \frac{C}{N_0 T_s^{-1}}. \quad (12)$$

### 2.4 误码率分析

用  $P_{s,n}$  表示接收的 QAM-OFDM 信号的第  $n$  个子载波误码率<sup>[9]</sup>

$$P_{s,n}(X) = 2(1 - \sqrt{M^{-1}}) \operatorname{erfc}[\sqrt{AR_{\text{CNR}}(X)}], \quad (13)$$

式中  $A = 3/[2(M-1)]$ ,  $\operatorname{erfc}$  为互补误差函数,  $M = 2^k$ ,  $k$  是偶数。

激光信号在 Gamma-Gamma 信道模型中传输的第  $n$  个子载波误码率公式表示为<sup>[10]</sup>

$$\langle P_{s,n}(X) \rangle = \int_0^{\infty} P_{s,n}(X) f(X) dX = 2(1 - \sqrt{M^{-1}}) \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \sqrt{AR_{\text{CNR}}(X)} f(X) dX. \quad (14)$$

总的平均误码率为  $R_{\text{SER}} = \frac{1}{N} \sum_{N=0}^{N-1} \langle P_{s,n}(X) \rangle$ , 那么 OFDM 系统的误码率就可以表示为

$$R_{\text{BER}} = \frac{R_{\text{SER}}}{\log M}. \quad (15)$$

在 AWGN 信道中, 采用 OOK 调制的误码率表达式为<sup>[11]</sup>  $p_{\text{OOK}} = Q(\sqrt{X^2 \gamma/2})$ , 在 Gamma-Gamma 信道传输的误码率公式为

$$P_e = \int_0^{\infty} P(X^2 \gamma) f(X) dX. \quad (16)$$

式中  $P(X^2 \gamma)$  为光信号在 AWGN 信道中的误码率,  $Q(x) = (1/2) \operatorname{erfc}(x/\sqrt{2})$ ,  $X$  为信号强度,  $\gamma$  是信噪比。

### 3 仿真结果及分析

图 2 给出了不同大气湍流强度下光 4QAM-OFDM 强度调制系统误码率曲线。当  $\sigma_R^2 < 1$  时, 为弱湍流强度;  $\sigma_R^2 = 1$  时, 为中湍流强度;  $\sigma_R^2 > 1$  时, 为强湍流强度。仿真参数中  $\sigma_R^2 = 3.9$  表示强湍流强度, 其中  $\alpha = 4.34, \beta = 1.31$ ;  $\sigma_R^2 = 1.4$  表示中湍流强度, 其中  $\alpha = 4.11, \beta = 2.08$ ;  $\sigma_R^2 = 0.16$  表示弱湍流强度, 其中  $\alpha = 14.11, \beta = 12.52$ ; 子载波采用 4QAM 调制。不采用前向纠错编码技术情况下, 把  $R_{\text{BER}} = 10^{-3}$  作为基准误码率水平, 在湍流强度  $\sigma_R^2 = 0.16$  时, 当通信系统要达到误码率  $R_{\text{BER}} = 10^{-3}$ , 载噪比  $R_{\text{CNR}} = 15$  dB; 在湍流强度  $\sigma_R^2 = 1.4$  时, 要满足基准误码率,  $R_{\text{CNR}} = 34$  dB; 湍流强度  $\sigma_R^2 = 3.9$  时,  $R_{\text{CNR}} = 45$  dB 时才能满足基准误码率要求。随着湍流强度加强, 4QAM-OFDM 系统性能不断恶化, 在达到中湍流强度后, 载噪比的增大对系统性能的改善相比弱湍流强度下呈现更缓慢。

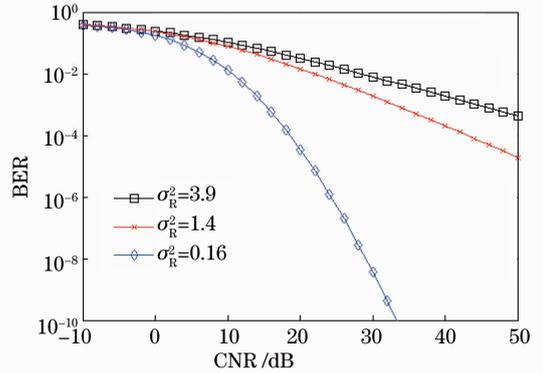


图 2 不同湍流强度下 4QAM-OFDM 系统误码率  
Fig. 2 BER for 4QAM-OFDM system under different atmospheric-turbulence intensity

图 3 为不同大气湍流强度下光 16QAM-OFDM 强度调制系统误码率曲线。子载波采用 16QAM 调制, 在大气湍流强度  $\sigma_R^2 = 0.16$ , 系统误码率要求为  $10^{-3}$  时,  $R_{\text{CNR}} = 22$  dB, 而 4QAM-OFDM 系统要达到相同的误码率, 只要  $R_{\text{CNR}} = 15$  dB, 系统性能提升了 7 dB; 在中、强湍流强度情况下, 4QAM-OFDM 系统性能相对 16QAM-OFDM 系统都提升了 6 dB 左右。因为 OFDM 调制系统对相位噪声十分敏感, 从仿真结果可以看出, 高阶调制对相位噪声更敏感, 因为它要求更高的信噪比。

载噪比相对信噪比是在信号的功率中多了一个载波功率, 而单个载波功率与传输信号功率相比通常都是很小的, 解调后的  $R_{\text{SNR}} = R_{\text{CNR}} + 0.9$  dB,  $R_{\text{SNR}} \approx R_{\text{CNR}}$ <sup>[12]</sup>, 为方便图形分析, 在图 4 中设横坐标为  $R_{\text{SNR}}$  (dB)。图 4 为不同湍流强度下 4QAM-OFDM 系统和 OOK 系统误码率曲线。4QAM-OFDM 系统完全优于 OOK 系统, 在湍流强度  $\sigma_R^2 = 0.16$  时, 系统误码率要求为  $10^{-3}$  时, OOK 调制系统的  $R_{\text{SNR}} = 19$  dB, 而 4QAM-OFDM 系统要达到相同的误码率, 需  $R_{\text{SNR}} = 15.9$  dB, 性能提升了 3.1 dB, 在中、强湍流强度时, 性能分别提升 3.1 dB 和 2.1 dB。随着湍流强度从  $\sigma_R^2 = 0.16$  到  $\sigma_R^2 = 3.9$ , 4QAM-OFDM 调制系统和 OOK 调制系统性能都在不断恶化。

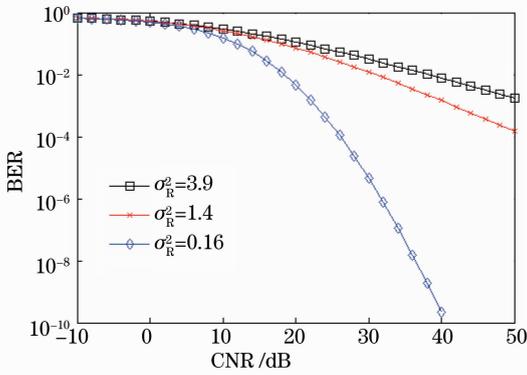


图3 不同湍流强度下16QAM-OFDM系统误码率  
Fig. 3 BER for 16QAM-OFDM system under different atmospheric-turbulence intensity

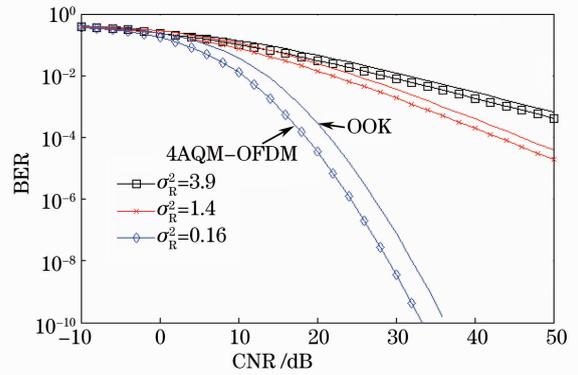


图4 不同大气湍流下4QAM-OFDM与OOK系统误码率  
Fig. 4 BER for 4QAM-OFDM system and OOK system under different atmospheric-turbulence intensity

## 4 结 论

本文分析了OFDM调制在自由空间光通信系统的传输过程,对OFDM调制方案中的4QAM-OFDM调制和16QAM-OFDM调制进行了比较,用4QAM-OFDM调制与传统的OOK调制进行了对比,仿真结果表明4QAM-OFDM调制方案对比上述两个方案具有更好的抗湍流能力。对自由空间光通信大气湍流下OFDM系统性能的研究还包括采用信道编码技术和分集接收技术等。

## 参 考 文 献

- 1 V. W. S. Chan. Free-space optical communications[J]. *Lightwave Technol.*, 2006, **14**(12): 4750~4760
- 2 Yang Shiji, He Zhiping, Jia Jianjun *et al.*. Research of the transmittance of atmospheric turbulent channels[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2860~2863  
杨世骥, 何志平, 贾建军等. 湍流大气信道激光透射率的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2860~2863
- 3 Hu Dengke, Chi Hao, Zhang Xianmin. Principles, applications and development of optical orthogonal frequency division multiplexing technology[J]. *Optical Communication Technology*, 2009, **33**(9): 30~33  
胡登科, 池 灏, 章献民. 光正交频分复用技术的原理、应用及发展[J]. *光通信技术*, 2009, **33**(9): 30~33
- 4 Zhao Li, Ke Xizheng, Liu Jian. Improved base band domain FSO-OFDM model[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, **30**(2): 277~280  
赵 黎, 柯熙政, 刘 健. 一种改进的FSO-OFDM基带模型[J]. *半导体光电*, 2009, **30**(2): 277~280
- 5 Wang Yong, Cao Jianian. Performance analysis of atmospheric laser communication system based on asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing intensity modulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 36~39  
王 勇, 曹家年. 大气激光通信非对称限幅光正交频分复用技术[J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 36~39
- 6 J. Vitasek, J. Latal, S. Hejduk *et al.*. Atmospheric turbulences in free space optics channel[C]. Budapest: Int. Conf. Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2011. 104~107
- 7 Han Liqiang, Wang Qi, Katsunori. Performance of free space optical communication over Gamma-Gamma atmosphere turbulence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(7): 1318~1322  
韩立强, 王 祁, Katsunori. Gamma-Gamma大气湍流下自由空间光通信的性能[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(7): 1318~1322
- 8 Jean Armstrong. OFDM for optical communications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3): 189~202
- 9 H. A. Ahmed, A. I. Sulyman, H. S. Hassanein. BER performance of OFDM system with channel impairments[C]. Zurich: The 9th IEEE International workshop on Wireless Local Networks (WLN 2009), 2009. 1027~1031
- 10 W. Gappmair, M. Flohberger. Error performance of coded FSO links in turbulent atmosphere modeled by Gamma-Gamma distribution[J]. *IEEE Trans. Wireless Communication*, 2009, **8**(5): 2209~2213
- 11 Z. Wang, S. Fu. Performance comparison of different modulation formats over FSO turbulence links with space diversity reception technique[J]. *IEEE Photon. J.*, 2009, **1**(6): 277~284
- 12 Zhang Wanshu, Feng Guiqian. The relationship between RF carrier to noise ration and video signal to noise ratio[J]. *Video Technology*, 2011, **35**(13): 31~39  
张万书, 冯桂钱. 射频载噪比与视频信噪比的关系[J]. *电视技术*, 2011, **35**(12): 31~39