

自由空间光通信中相干 OFDM 系统性能分析

王 怡^{1,2}, 杨 帅², 马 晶¹, 单 良²

(1. 哈尔滨工业大学 可调谐激光器国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国计量学院 信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 结合正交频分复用 (OFDM) 技术和相干探测的优势, 研究了相干 OFDM 自由空间光通信 (FSO) 系统的误码性能, 考虑了 OFDM 映射方式以及映射阶数对系统误码性能的影响。在 Gamma-Gamma 大气湍流信道下, 分别从平均信噪比和所需平均接收光功率的角度考虑了系统在弱、中和强湍流三种情况下的误码性能。在此基础上, 推导了系统误符号率的闭合表达式。仿真结果表明, 相干探测下 OFDM FSO 系统可以较好地克服大气湍流效应, 在弱、中湍流情况下, QAM 映射方式下系统的误码性能明显优于 PSK 方式, 在强湍流下这种优势不明显, 此外随着映射阶数的增加, 系统误符号率增加, 因此在实际应用中可以通过降低映射阶数来提高系统误码性能。

关键词: 自由空间光通信; 相干 OFDM; 误符号率; 平均接收光功率

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0722003

Performance analysis of coherent OFDM system in free space optical communication

Wang Yi^{1,2}, Yang Shuai², Ma Jing¹, Shan Liang²

(1. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Combining the advantages of OFDM technology with the coherent detection, the bit error rate (BER) performance of coherent OFDM FSO system was studied, and the influence of OFDM mapping mode and mapping order on the symbol error of the system was taken into account. In Gamma-Gamma atmospheric turbulence channel model, the bit error performance of three cases of weak, moderate and strong turbulence were taken into consideration separately from the perspective of the average signal-to-noise ratio and the required average received optical power. On this basis, the closed form expression of the symbol error rate was deduced. Simulation results show that the coherent detection OFDM FSO system can better overcome the effects of atmospheric turbulence, in weak and moderate turbulence, the system BER performance with QAM mapping mode is obviously better than that of PSK mapping mode, however, under the strong turbulence the advantage is not very obvious. In addition, with the increase of mapping order, system symbol error rate increases, so in practice it can improve the system BER performance by reducing the number of mapping order.

Key words: FSO; coherent OFDM; symbol error rate; average received optical power

收稿日期: 2015-11-06; 修订日期: 2015-12-09

基金项目: 海洋工程国家重点实验室(上海交通大学)(1213); 中国博士后科学基金(2013M540290); 浙江省自然科学基金(LQ14E060003)

作者简介: 王怡(1980-), 女, 副教授, 博士, 主要从事星地光通信和自由空间光通信方面的研究。Email: wcy16@cjlu.edu.cn

0 引言

自由空间光通信(FSO)因其具有高带宽、低功率损耗以及保密性好等优点引起了广泛的关注,但大气随机波动产生的大气湍流效应,会严重影响自由空间光通信系统的通信质量^[1]。正交频分复用(OFDM)技术因其抵抗频率选择性衰落和窄带噪声能力强,可以有效地抑制符号间干扰(ISI),也可以很好地抑制大气信道引起的随机衰落效应,因此能更好地保证系统的通信质量^[2-4]。

近几年针对 OFDM 技术在自由空间光通信领域的研究,主要集中在直接探测方式方面;OFDM 子载波个数等参数会影响直接探测下 OFDM FSO 系统的误码性能^[5-7];在大气湍流信道下 OFDM-FSO 系统的研究中可以利用半导体光放大技术增加传输距离^[8];采用最大比值合并(MRC)和等增益合并(EGC)的分集接收方案,在对数正态衰落信道下可以改善 OFDM-FSO 系统的误码性能^[9]。将低密度奇偶校验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,可以满足大气激光通信系统的需求^[10]。非对称限幅光正交频分复用调制技术增强了系统对大气湍流的抗干扰能力^[11]。目前对相干探测下 OFDM-FSO 的研究较少,其中一个 2014 年印度 Shaheed Bhagat Singh 国家科技大学的 Vishal Sharma 提出的相干 OFDM-FSO 传输系统,比较了光双边带调制(ODSB)方案和光单边带调制(OSSB)方案,得出了 OSSB 性能优于 ODSB 的结论^[12]。另一个是 2014 年新加坡南洋理工大学陈晨等人提出的在自由空间光通信系统中运用非均衡正交频分复用(NE-OFDM)技术,用于降低系统设计的复杂度,编码和调制利用多进制差分相移键控(MDPSK)方式进一步提高了频带利用率^[13]。

文中比较了 QAM 和 PSK 两种映射方式对 OFDM-FSO 系统误符号率的影响,同时结合高阶调制的优势,分析了调制阶数对系统性能的影响。在 Gamma-Gamma 信道下,分别从平均信噪比和接收光功率的角度考虑了系统的误符号性能。

1 系统模型

1.1 大气湍流模型

在 FSO 信道中,光波在大气湍流中传输时由于

折射率的起伏使其强度会随之起伏,而弱中强湍流下的光强起伏概率分布模型均符合 Gamma-Gamma 分布。光强起伏的 PDF 为^[11]:

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

式中: K_n 为 n 阶第二类 Bessel 修正函数; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; α 和 β 分别代表大规模和小规模的光强起伏,表示为^[11]:

$$\alpha = \{\exp[0.49\delta_R^2/(1+1.11\delta_R^{12/5})] - 1\}^{-1}$$

$$\beta = \{\exp[0.51\delta_R^2/(1+0.69\delta_R^{12/5})] - 1\}^{-1} \quad (2)$$

式中: $\delta_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 为 Rytov 方差,可用来判别光强起伏的强度, δ_R 为湍流强度,代表对数型光强起伏的方差; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; L 为链路长度; C_n^2 为大气折射率结构常数。当 $\delta_R^2 < 1$ 时,被研究湍流为弱湍流,当 $\delta_R^2 \approx 1$ 时,被研究湍流为中湍流,当 $\delta_R^2 > 1$ 时,被研究湍流为强湍流。此外,闪烁因子可根据 α 和 β 定义为^[11]:

$$SI = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta} \quad (3)$$

1.2 OFDM-FSO 系统分析

如图 1 所示,文中相干 OFDM FSO 系统由发射和接收两部分组成。发射部分编码后采用 QAM 或者 PSK 映射方式通过串并变换,变换成若干并行低速的子数据流,完成串并变换后,形成调制信息序列 $c(n)$,对 $c(n)$ 进行逆快速傅里叶变换(IFFT),计算出 OFDM 已调信号的时域抽样序列,加上保护间隔,经过并串变换以后,对串行序列再作 D/A 变换,得到 OFDM 已调信号的时域波形,通过低通滤波器(LPF)滤掉高频噪声,通过上变频过程,将已调 OFDM 信号间接调制到一个合适的中频 f_{LO1} 上,然后再将调制后的中频信号通过马赫增德调制器(MZM)调制到光载波上,此时信号可表示为:

$$E_s(t) = P_T \cdot \mu \cdot \frac{1}{N} \cdot \exp(j2\pi f_{LO1} t) \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^N X_{i,k} \exp(j2\pi f_k t) =$$

$$m \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^N X_{i,k} \exp[j(\omega_i t + \varphi_0)] \quad (4)$$

式中: $X_{i,k}$ 表示第 i 个 OFDM 符号,第 k 个子载波上的信号,设本振信号形式为:

$$E_L(t) = n \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^N Y_{i,k} \exp[j(\omega_i t + \varphi_L)] \quad (5)$$

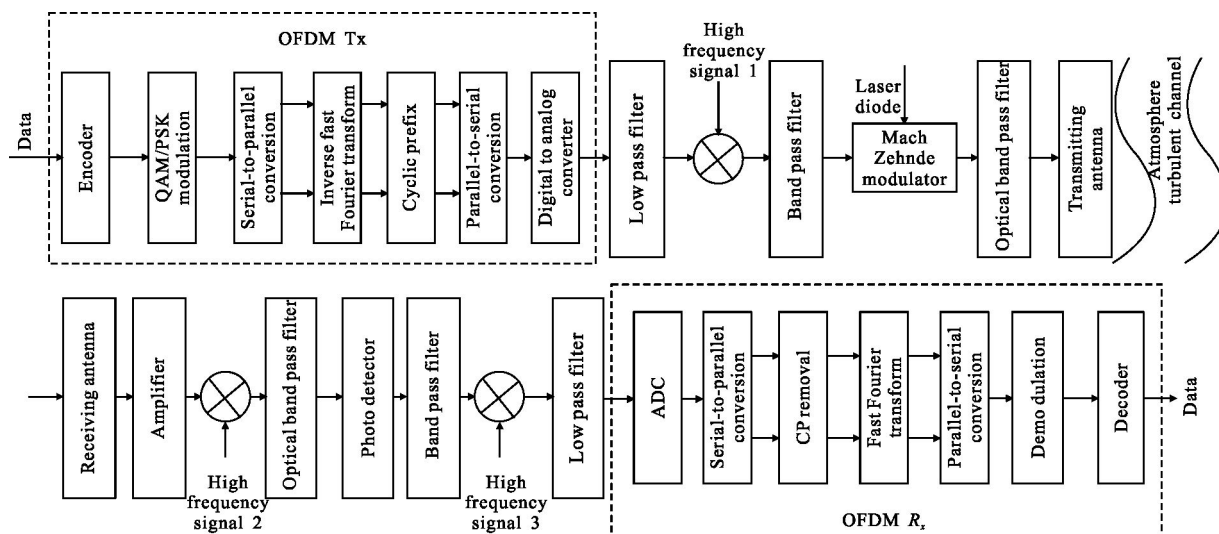


图 1 Gamma-Gamma 信道下相干 OFDM FSO 系统链路框图

Fig.1 Block diagram of the coherent OFDM system over FSO links with Gamma-Gamma channel

信号通过发射天线(TA)发射到大气信道中。

在接收时,使用接收天线(RA)进行接收。接收端文中采用相干探测方式,如图 1 所示,则混频后的信号表示为 $E_c^2(t)=E_s^2(t)+E_L^2(t)$,光探测器的输出响应电流 $I_R \propto E_c^2(t)$ 。滤掉直流和高频项以后,考虑大气湍流引起的光强闪烁后,信号光和本振激光混频后经光电探测器探测响应得到的中频信号电流为:

$$i(t)=2R\sqrt{P_0P_L}I(t)\cos(\omega_{IF}t+\varphi_0-\varphi_L) \quad (6)$$

式中: $\omega_{IF}=\omega_0-\omega_L$ 为中频; P_0 和 P_L 分别为信号光和虚拟本振光的功率,由于接收端带通滤波器的作用是超出光探测器的频率响应范围,利用带通滤波器的带宽控制在中频信号范围内,即可检测到差频信号,由公式(7)可知该差频信号包括了信号光所携带的全部信息。如图 OFDM 信号的接收过程是发射端的逆过程,虽然子信道频谱相互混叠,子载波间的正交性却使得各个子信道依然能够分离出来,最后解调解码出原始信号。

2 性能分析

文中首先考虑平均信噪比对系统误符号率的影响。设空间相干光通信系统的光电探测器后级为理想的带通滤波器,系统噪声:

$$N_0=2q\rho(P_0+P_L)R^2+4K_bT_{sys}R \quad (7)$$

式中: q 为电子电荷量; ρ 为探测器的探测效率; K_b 为

玻耳兹曼常量; T_{sys} 为系统的相对开氏温度; R 为等效负载电阻。则信噪比可以表示为:

$$SNR=\frac{4R^2P_0P_LI^2(t)}{2q\rho(P_0+P_L)R^2+4K_bT_{sys}R} \quad (8)$$

通常,在相干光通信中提供足够大的本振光功率,使信噪比达到散弹噪声极限。因此,当 P_L 远大于 P_0 时, $SNR=\frac{2P_0I^2}{q\rho}$, 令 $\bar{\gamma}=\frac{2P_s}{q\rho}$ 则 $SNR=\bar{\gamma}I^2$, 若采用 QAM 映射方式系统误符号率为:

$$P_{S,QAM}=hQ\left(\sqrt{\bar{\gamma}I^2\frac{3TB}{N(M-1)}}\right) \\ P_{S,PSK}=\text{erfc}\left(\sqrt{\bar{\gamma}I\frac{3TB}{N(M-1)}\sin\frac{\pi}{M}}\right) \quad (9)$$

式中: T 为 OFDM 的符号周期; B 为带宽; N 为子载波个数; M 为星座点映射系数。由于 $Q(\sqrt{2}\alpha)=0.5\text{erfc}(\alpha)$, 在 Gamma-Gamma 信道中的平均误符号率可以表示为:

$$P_{S,OFDM}=\int_0^\infty P_f(I)I dI \quad (10)$$

利用两个经典的 Meijer G 函数^[14] $K_\nu(x)=\frac{1}{2}\times G$

$$2.0\left[\frac{x^2}{4}\bar{\Gamma}_{\nu/2,-\nu/2}\right], \text{erfc}(\sqrt{x})=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\times G_{0.2}^{2.0}[x|_{0.2}^1],$$

把公式(1)、(3)、(9)带入公式(10)中,则在外差探测 OFDM-FSO 系统的平均误符号率的闭合表达式形式为:

$$P_{S,QAM}=\frac{h2^{\alpha+\beta-3}}{\pi^{3/2}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}\sum_{i=1}^N w_i G_{5.2}^{2.4}$$

$$P_{s,PSK} = \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi^{3/2}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{i=1}^N w_i G_{5,2}^{2,4} \left[\frac{24\gamma\bar{\gamma}TB}{N(M-1)(\alpha\beta)^2} \left| \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \right|_{0,0.5} \right] \quad (11)$$

式中： N 为近似阶数； $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ 和 $w_i (i=1, 2, \dots, N)$ 分别为 N 阶 Hermite 多项式的零点和权因子。

3 仿真与数据分析

文中，弱、中、强湍流强度下的不同 Rytov 方差取值为 $\delta_R^2=0.49$ 、 $\delta_R^2=1.21$ 和 $\delta_R^2=4$ ，所以根据公式(2)和公式(3)可得不同湍流强度下的不同的光强闪烁参数为 $\{\alpha=6.05, \beta=4.47, SI=0.43\}$ ， $\{\alpha=4.19, \beta=2.26, SI=0.79\}$ ， $\{\alpha=4.34, \beta=1.31, SI=1.17\}$ 。图 2 仿真分析了平均信噪比和系统误符号率之间的关系。可以看出，随着大气湍流强度的增加，系统误符号率升高。在不同大气湍流强度下，随着调制阶数的增加系统误符号率增加，在弱、中湍流情况下，QAM 调制方式明显优于 PSK 方式，但在强湍流情况下，QAM 映射方式的优势不明显。例如，映射方式为 16 QAM 时，误符号率最好分别可以达到 3.91×10^{-11} 、 2.30×10^{-6} 和 3.9×10^{-4} ，而映射方式为 16 PSK 时，误符号率

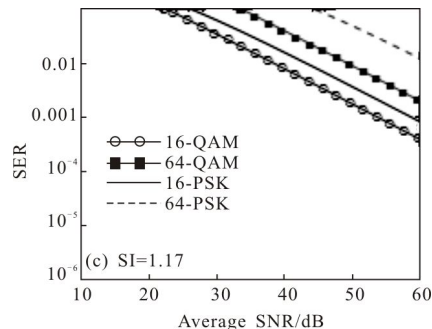
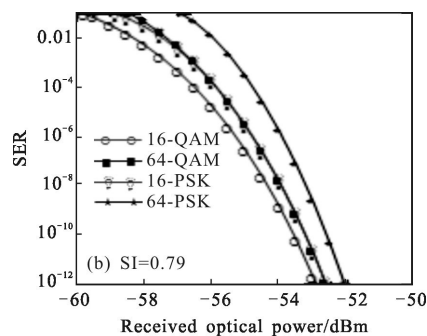
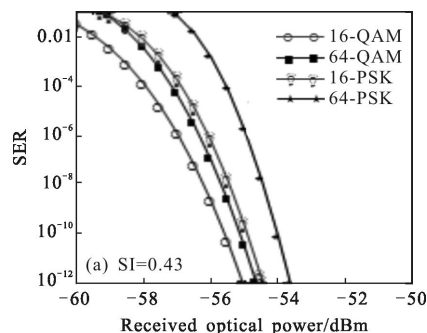
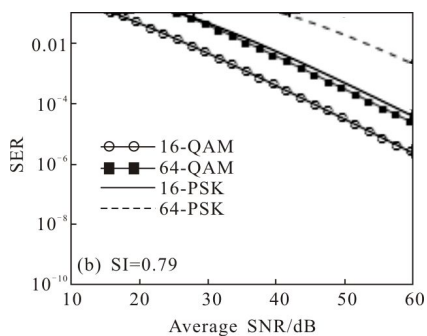
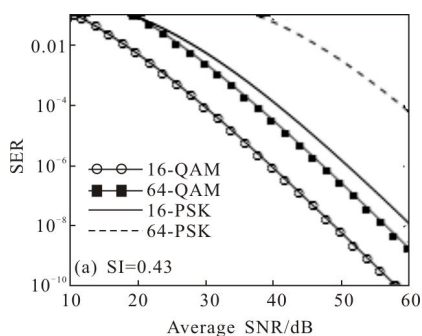


图 2 不同大气湍流强度下 OFDM FSO 系统平均信噪比与误符号率的关系

Fig.2 Symbol error probability performance of OFDM FSO system as a function of average SNR for different atmospheric turbulence intensity

最好分别可以达到 1.24×10^{-8} 、 2.24×10^{-5} 和 8.3×10^{-4} 。随着湍流强度的增加，映射方式和调制阶数等因素对系统的误码性能的影响变小。

为了更全面地分析系统的误码性能，进一步仿真分析了在不同大气湍流强度下的误符号率与平均接收光功率的关系。文中假设电带宽值 $B=10$ GHz，在大气湍流信道，开氏温度被假定为 $T=300$ K。如图 3 所示，OFDM-FSO 系统的误符号率随着所需的平均接收光功率的增加而降低。在弱、中大气湍流强度情况下，达到相同误符号率采用 QAM 映射方式所需的平均接受光功率明显低于 PSK 方式，在强湍流情况下两种映射方式差别不大。结合图 3(a)、(b)、(c)可



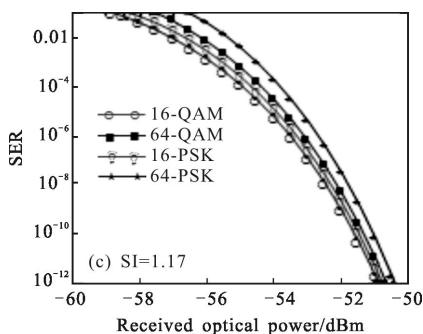


图 3 不同大气湍流强度下 OFDM FSO 系统所需平均接收光功率与误符号率的关系

Fig.3 Symbol error probability performance of OFDM FSO system as a function of the required average received optical power for different atmospheric turbulence intensity

知,随着光强闪烁强度的增加,系统达到一定误符号率所需的平均接收光功率也会增加,也就意味着系统发射功率也要相应地增加。例如当误符号率为 10^{-6} 时,弱、中湍流下如果采用 16 QAM,系统所需的平均接收光功率分别为 -56.8 dBm 和 -55.7 dBm,但采用 16PSK 所需的平均接收光功率为 -55.9 dBm 和 -54.7 dBm,说明采用 QAM 映射方式比 PSK 方式接收更加灵敏,强湍流下这种优势不明显,同时随着调制阶数的增加,系统达到一定误符号率所需的平均接收光功率也增加,若因系统需要增加调制阶数时,需要相应地增大发射功率。

4 结 论

文中通过对相干探测下 OFDM FSO 系统的误码性能研究,可以知道 OFDM 系统可以较好地克服大气湍流效应,在弱、中湍流情况下,QAM 映射方式下系统误码性能明显优于 PSK 方式,在强湍流下优势不明显。此外随着调制阶数的增加,系统误符号率增加,因此可以通过降低调制阶数来提高系统误码性能。文中对相干探测 OFDM FSO 系统的研究为自由空间光通信领域的应用提供了理论参考。

参考文献:

[1] Al-Habash M A, Larry C Andrews, Ronald L Phillips. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1554-1562.

[2] Tomoaki Ohtsuki. Multiple Subcarrier modulation in optical wireless communications [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(3): 74-79.

[3] Wang Yi, Wang Deli, Ma Jing. On the performance of coherent OFDM systems in free space optical communications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 1-10.

[4] Neda Cvijetic, WiMAX access using optical wireless technology with heterodyne detection in turbulent atmospheric channels[C]// IEEE presented at Global Telecommunications Conference, San Francisco, CA, USA, Nov, 2006.

[5] Neda Cvijetic, Qian Dayou, Wang Ting. 10 Gb/s free space optical transmission using OFDM [C]//National Fiber Optic Engineers Conference, 2008.

[6] Abdelmoula Bekkali, Chedlia Ben Naila. Transmission analysis of OFDM-based wireless services over turbulent radio-on-FSO links modeled by Gamma-Gamma distribution[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(3): 510-590.

[7] Nistazakis H E, Stassinakisa A N, Sheikh S Muhammadb, et al. BER estimation for multi-hop RoFSO QAM or PSK OFDM Communication systems over gamma-gamma or exponentially modeled turbulence channels [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 64: 106-112.

[8] Sushank Chaudharya, Angela Amphawanab, Kashif Nisar, Realization of free space optics with OFDM under atmospheric turbulence[J]. *Optik*, 2014, 125: 5196-5198.

[9] Bai Fan, Su Yuwei, Sato Takuro. Performance evaluation of dual diversity reception base on OFDM RoFSO systems over correlated log-normal fading channel [C]//ITU Kaleidoscope Academic Conference, 2014: 263-268.

[10] 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 Journal of Lasers*, 2010, 37 (12): 3031-3036. (in Chinese)

[11] 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): 0036-0040. (in Chinese)

[12] Vishal Sharma, Sushank Chaudhary. High speed CO-OFDM-FSO transmission system[J]. *Optik*, 2014, 125: 1761-1763.

[13] Chen Chen, Zhong Wende, Li Xiang, et al. MDPSK based non equalization OFDM for coherent free space optical communication [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2014, 26 (16): 1617-1620.

[14] Wolfram. The wolfram functions site [EB/OL]. [2015-05-10].<http://functions.wolfram.com>.