



激光与光电子学进展

*Laser & Optoelectronics Progress*

ISSN 1006-4125, CN 31-1690/TN

## 《激光与光电子学进展》网络首发论文

题目: 4PAM-FTN 大气光传输系统在弱湍流信道中的误码性能  
作者: 曹明华, 张伟, 张悦, 王惠琴, 武鑫, 毛一聪, 康中将  
收稿日期: 2020-06-03  
网络首发日期: 2020-07-03  
引用格式: 曹明华, 张伟, 张悦, 王惠琴, 武鑫, 毛一聪, 康中将. 4PAM-FTN 大气光传输系统在弱湍流信道中的误码性能[J/OL]. 激光与光电子学进展.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20200702.1053.042.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 4PAM-FTN 大气光传输系统在弱湍流信道中的误码性能

曹明华\*, 张伟, 张悦, 王惠琴, 武鑫, 毛一聪, 康中将  
兰州理工大学计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050

**摘要** 为了进一步提高大气光通信系统的传输速率, 设计了一种采用 4 阶脉冲幅度调制的超奈奎斯特 (4PAM-FTN) 速率大气光传输系统。推导了对数正态大气信道中该系统的理论误码率公式。分析了传输距离、波长对系统误码性能的影响, 以及加速因子与传输速率之间的关系。蒙特卡洛仿真结果表明: 误码率与传输距离成正比, 与加速因子、光波长成反比。在加速因子为 0.9 时, 系统可以在误码性能几乎不变的情况下获得 6.1% 的传输速率增益; 当加速因子为 0.83 时, 可以获得 16.7% 的传输速率增益。

**关键词** 大气激光通信; 脉冲幅度调制; 对数正态湍流信道; 误码率; 超奈奎斯特

**中图分类号** TN929.12 **文献标志码** A

## BER Performance of 4PAM-FTN Atmospheric Optical Communications in Weak Turbulent Channel

Cao Minghua\*, Zhang Wei, Zhang Yue, Wang Huiqin, Wu Xin, Mao Yicong, Kang  
Zhongjiang

*School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou,  
Gansu 730050, China*

**Abstract** A 4-order Pulse Amplitude Modulation Faster-than-Nyquist (4PAM-FTN) rate atmospheric optical transmission system is proposed to improve the transmission rate. The theoretical bit error rate (BER) equation in log-normal fading channel is derived. Moreover, the influence of transmission distance and laser wavelength on the system BER performance is discussed. Furthermore, the relationship of the acceleration factor and the transmission rate is analyzed. Monte Carlo simulation results show that the BER is proportional to the transmission distance, and inversely proportional to the acceleration factor and the laser wavelength. When the acceleration factor is 0.9, the system gains 6.1% transmission rate promotion at a negligible BER performance loss. When the acceleration factor is 0.83, it achieves 16.7% transmission rate promotion.

**Key words** Atmospheric laser communications; Pulse amplitude modulation; Logarithmic normal turbulent channel; Bit error rate; Faster-than-Nyquist

**OCIS codes** 060.4510;060.4080;010.7060

## 1 引言

无线网络对网络容量、速率和延迟的要求不断增长。大气激光通信作为新一代通信

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (NO. 61875080, NO. 61861026)

\*E-mail: caominghua@lut.edu.cn

系统的备选技术之一，具有频谱不受限、链路灵活等优点<sup>[1-4]</sup>。但与传统光纤系统相比，大气激光通信系统的传输速率易受天气、气溶胶以及大气湍流的影响。为了进一步提高其传输速率，科研人员提出了高阶调制<sup>[5]</sup>、波分复用<sup>[6]</sup>以及超奈奎斯特（FTN, Faster-than-Nyquist）速率传输<sup>[7]</sup>等技术方法。其中，FTN 是一种新型的非正交传输技术，它可有效提高系统的传输速率。同时，将它与高阶调制、波分复用等技术相结合可进一步提升系统性能<sup>[8,9]</sup>。

FTN 技术在微波通信与光纤通信领域的研究已取得了丰富的成果<sup>[10-15]</sup>。在自由空间光通信领域，文献[16]将 FTN 技术引入室内可见光通信系统中，实现了 1.5 m 传输距离下 1.47 Gb/s 的传输速率。文献[17]在此基础上提出了改进算法，进一步证明了 FTN 技术应用到大气光通信的可行性。将 FTN 技术从无线和光纤领域扩展到大气光通信系统中，其应用场景和前景将更加丰富和广阔。但是室外大气信道中存在着复杂的不确定因素，导致通信系统的性能变差<sup>[18-20]</sup>。因此对湍流信道下 FTN 大气光通信系统的性能进行分析就成了首先要解决的问题。另一方面，PAM 调制技术具有实现简单，设备成本低以及抗干扰能力强等优点<sup>[21]</sup>。因此，将 FTN 技术与 PAM 调制相结合构建了 4PAM-FTN 大气光传输系统，并分析了其在对数正态（弱湍流）信道中的误码性能。

## 2 4PAM-FTN 系统模型

4PAM-FTN 系统结构如图 1 所示。在发送端，首先对二进制序列进行格雷编码，然后映射成 4PAM 信号，再经 FTN 成型滤波后获得发送信号  $s(t)$ 。 $s(t)$  经发光二极管(LD)电光调制后通过光学天线送入大气信道。在接收端，光学天线接收到的信号  $r(t)$  经光电探测器 (PD)转换为电信号，再经匹配滤波、采样、最大似然序列检测(MLSD)及格雷译码后恢复出发送信息。

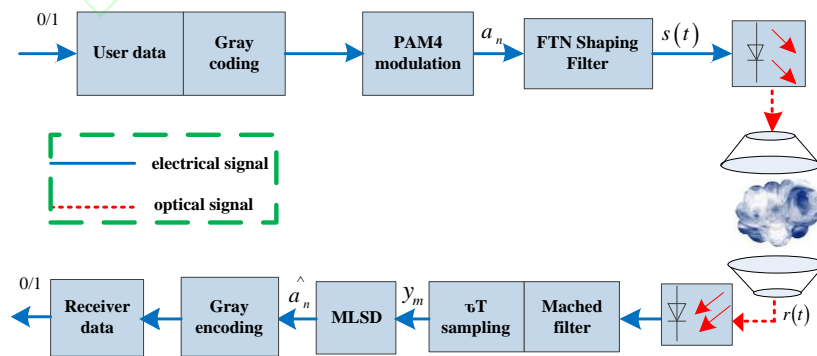


图 1 4PAM-FTN 大气光通信系统框图

Fig.1 Diagram of 4PAM-FTN atmospheric optical communication system

发送信号  $s(t)$  可以表示为

$$s(t) = \sum_{n=0}^{L-1} a_n q(t - n\tau T), 0 < \tau < 1, \quad (1)$$

式中,  $a_n \in A$ ,  $A = \{a_r = 2r - 1 - R, r = 1, 2, \dots, R\}$  为调制符号,  $R$  为调制阶数;  $T$  为奈奎斯特传输间隔;  $\tau$  为加速因子, 其值越小, 符号间的间隔越小;  $q(t)$  表示脉冲成型函数, 对其做归一化处理, 即假设其能量为 1, 有  $\int_{-\infty}^{+\infty} |q(t)|^2 dt = 1$  成立。

信号经大气信道传输后, 在接收端可以表示为  $r(t) = h(t) \times s(t) + z(t)$ , 其中  $h(t)$  为信道衰落系数,  $z(t)$  为加性高斯白噪声。当信道为弱湍流时, 信道衰落系数服从对数正态分布, 其概率密度函数为<sup>[1]</sup>

$$f_I(h_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \frac{1}{2h_n} \exp\left\{-\frac{[\ln(h_n) - 2\mu_x]^2}{8\sigma_x^2}\right\}, \quad (2)$$

式中,  $h_n$  为信道衰落系数,  $\mu_x$  和  $\sigma_x$  分别为其均值和方差。对衰落强度进行归一化处理(即  $E[h_n] = 1$ )可得  $\mu_x = -\sigma_x^2$ 。再依据文献[22],  $\sigma_x^2$  可表示为  $\sigma_x^2 = \frac{1.23C_n^2 k^{7/6} l^{11/6}}{4}$ , 其中  $C_n^2$  为大气折射率结构常数,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为激光波长,  $l$  为传输距离。

接收光信号  $r(t)$  由 PD 转换为电信号后通过匹配滤波器, 再以  $\tau T$  为时间间隔对其进行采样, 得到的第  $m$  个符号采样值可表示为<sup>[23]</sup>

$$\begin{aligned} y_m &= \eta \int_{-\infty}^{+\infty} r(t) q^*(t - m\tau T) dt = \eta \int_{-\infty}^{+\infty} [h(t) \times s(t) + z(t)] q^*(t - m\tau T) dt \\ &= \eta \int_{-\infty}^{+\infty} [h(t) \times s(t)] q^*(t - m\tau T) dt + \eta \int_{-\infty}^{+\infty} z(t) q^*(t - m\tau T) dt, \quad (3) \\ &= \eta \sum_{n=0}^{L-1} a_n \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) q(t - n\tau T) q^*(t - m\tau T) dt + z_m \end{aligned}$$

式中,  $q^*(t)$  为  $q(t)$  的共轭,  $\eta$  为光电转换效率,  $z_m$  为滤波后的噪声值。假设信道衰落系数  $h(t)$  已知, 则 (3) 式可以写成如下形式

$$\begin{aligned} y_m &= \eta \sum_{n=0}^{L-1} a_n h_n \int_{-\infty}^{+\infty} q(t - n\tau T) q^*(t - m\tau T) dt + z_m \\ &= \eta \sum_{n=0}^{L-1} a_n h_n g(n - m) + z_m, \quad (4) \\ &= \eta a_m h_m + \eta \sum_{n=0, n \neq m}^{L-1} a_n h_n g(n - m) + z_m \end{aligned}$$

式中，等号右侧第一项  $\eta a_m h_m$  表示当前传输的第  $m$  个符号经过信道衰落及光电检测后的值。同时，由于超奈奎斯特速率传输使波形之间叠加更为紧密，导致符号间存在干扰，等号右侧第二项  $\eta \sum_{n=0}^{L-1} a_n h_n g(n-m)$  表示除第  $m$  个符号外，其他符号在第  $m$  个符号采样时刻上干扰值的总和。因此，可以从理论上计算出除光电检测器及信道衰落对符号产生的影响外，超奈奎斯特传输对第  $m$  个符号造成的干扰值，即  $\sum_{n=0, n \neq m}^{L-1} a_n g(n-m)$ 。所以在第  $m$  个符号采样时刻上，因超奈奎斯特传输引起的干扰系数可表示为

$$c_m = \frac{a_m g(0) + \sum_{n=0, n \neq m}^{L-1} a_n g(n-m)}{a_m} = 1 + \frac{\sum_{n=0, n \neq m}^{L-1} a_n g(n-m)}{a_m}, \quad (5)$$

在接收端已知信道状态信息的条件下，调制符号可以通过最大似然检测准则估计得到，即：

$$\begin{aligned} \hat{a}_m &= \arg \min_{a_n} \|y_m - \eta \times h_m \times c_m \times a_m\|_F^2, \\ &= \arg \min_{a_n} \|y_m - \eta \times u_m \times a_m\|_F^2, \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $\|\cdot\|_F^2$  表示 2 范数， $u_m = h_m \times c_m$  表示干扰系数， $\hat{a}_m$  表示估计得到的已调符号。经解映射后即可恢复出原始信息。

### 3 理论误码率

根据联合界理论可得出该系统理论误码率的上界为<sup>[24]</sup>：

$$BER \leq \left( \frac{1}{(2^j * j)} \right) \sum_{a_m \in A} \sum_{\hat{a}_m \in A} d(a_m, \hat{a}_m) P(a_m \rightarrow \hat{a}_m | u_m), \quad (7)$$

式中， $j=2$  为每个符号发送的比特数， $d(a_m, \hat{a}_m)$  表示  $a_m$  和  $\hat{a}_m$  的汉明距离， $P(a_m \rightarrow \hat{a}_m | u_m)$  表示接收端已知干扰系数  $u_m$  的情况下，发送的  $a_m$  被错误检测的概率，可表示为

$$\begin{aligned} P(a_m \rightarrow \hat{a}_m | u_m) &= P(\|y_m - \eta \times u_m \times a_m\|^2 > \|y_m - \eta \times u_m \times \hat{a}_m\|^2) \\ &= P\left(\frac{2}{\eta} y_m \times u_m (\hat{a}_m - a_m) > \|u_m \times \hat{a}_m\|^2 - \|u_m \times a_m\|^2\right), \end{aligned} \quad (8)$$

由(4)式和(5)式可知  $y_m = \eta u_m \times a_m + z_m$ ，将其代入 (8) 式有：

$$P(a_m \rightarrow \hat{a}_m | u_m) = P(D > \|u_m (\hat{a}_m - a_m)\|^2), \quad (9)$$

其中,  $D \triangleq \frac{2}{\eta} z_m \times u_m (\hat{a}_m - a_m)$  是服从均值为 0, 方差为  $\frac{2\sigma_x^2}{\eta^2} \|u_m (\hat{a}_m - a_m)\|^2$  的高斯随机变量。因此, (9) 式可以写为<sup>[25]</sup>

$$P(a_m \rightarrow \hat{a}_m | u_m) = Q\left(\frac{\eta}{\sqrt{2\sigma_x^2}} \|u_m (\hat{a}_m - a_m)\|\right), \quad (10)$$

再依据  $Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$  可得

$$P(a_m \rightarrow \hat{a}_m | u_m) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\eta^2}{4\sigma_x^2} \|u_m (\hat{a}_m - a_m)\|^2}\right), \quad (11)$$

将 (11) 式代入 (7) 式可得系统理论误码率的上界公式为

$$\operatorname{BER} \leq \left(\frac{1}{(2^{j+1} * j)}\right) \sum_{a_m \in A} \sum_{\hat{a}_m \in A} d(a_m, \hat{a}_m) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\eta^2}{4\sigma_x^2} \|u_m (\hat{a}_m - a_m)\|^2}\right), \quad (12)$$

由(12)式可知, 系统误码率的上界与信号间的汉明距离、传输距离、波长、大气湍流折射率结构常数、超奈奎斯特速率传输、光电转换系数有关。

## 4 性能分析

在上述理论分析的基础上, 采用蒙特卡罗方法分析了 4PAM-FTN 方案在对数正态 (log-normal) 湍流信道中的误码性能。其中, 系统误码限设为  $3.8 \times 10^{-3}$ <sup>[26]</sup>, 光电转换系数为 0.5, 加速因子  $\tau$  为 0.86,  $\lambda$  为 1550nm,  $C_n^2$  为  $7 \times 10^{-15} m^{-2/3}$ ,  $L$  为 1600m。

图 2 为系统误码率理论值与蒙特卡洛仿真结果之间的关系。可以看出: 随着信噪比不断增大, 理论误码率曲线与仿真误码率曲线趋于重合, 说明仿真结果与理论推导的结果较为一致。

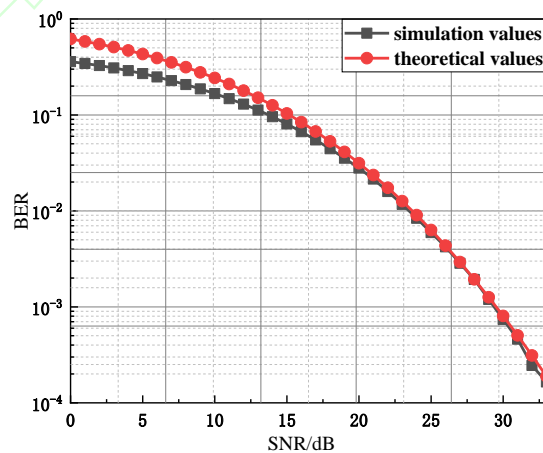


图 2 理论误码率与仿真误码率的对比

Fig.2 Curves of theoretical BER and simulation BER

图 3 表示不同加速因子下系统误码率之间的关系，可以看出：当  $\tau$  在 0.9~1 之间时，四条误码率曲线近似重合，说明系统误码性能近似保持不变；当  $\tau$  在 0.8~0.9 之间时，虽然系统误码性能有所降低，但是系统仍能保证较好的通信性能；当  $\tau$  小于 0.8 时，误码性能出现明显恶化，导致系统误码率高于误码限，丧失可靠的通信能力。造成这一现象的原因是随着加速因子的不断减小，信号波形之间重叠部分不断增加，导致了越来越严重的码间干扰。

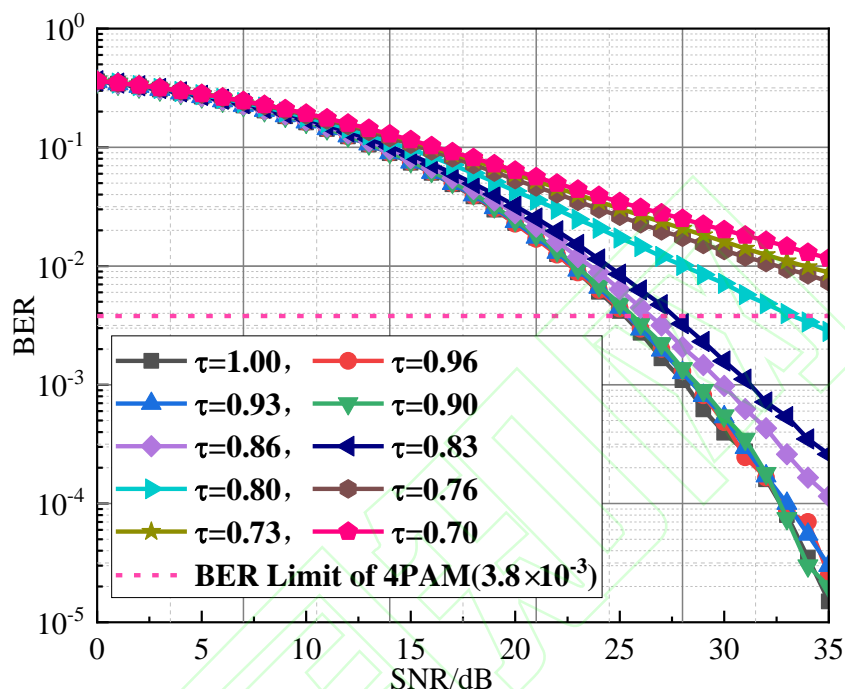


图 3 误码率与信噪比的关系

Fig.3 The relationship of BER and SNR

图 4 表示不同波长下系统误码率与传输距离的关系，其中  $\tau$  为 0.9，信噪比为 35dB， $C_n^2$  为  $2 \times 10^{-15} m^{-2/3}$ 。可以看到，在波长一定的条件下，随着信号传输距离的增加，系统误码性能逐渐变差。这是因为激光信号在大气信道中传输时受大气湍流以及气溶胶粒子的影响，使激光信号发生不同程度的反射、折射、散射以及衰减<sup>[27]</sup>。同时，对比不同波长下的曲线，可以发现激光波长越长，系统的抗干扰能力越强。因此在沙尘、阴雨等天气可以使用长波长激光以增强通信系统的抗干扰能力。

图 5 展示了系统误码率随加速因子的变化情况。可以发现，随着加速因子的增大，系统误码性能越来越好。当  $\tau$  在 0.83~1.0 之间时，系统误码性能存在微小变化并可以近似为平滑直线，这时的误码性能与 Nyquist 系统近似保持一致。因此，将加速因子的取值保持在 0.83~1.0 区间内既可以提高系统传输速率，又能保持较小的误码性能损失。

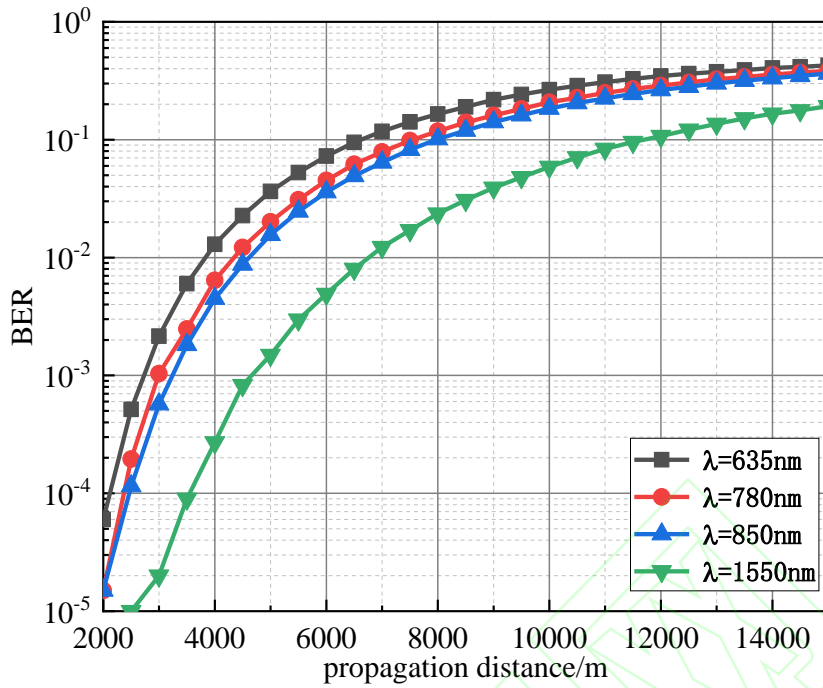


图4 误码率与波长的关系

Fig.4 The relationship of BER and wavelength

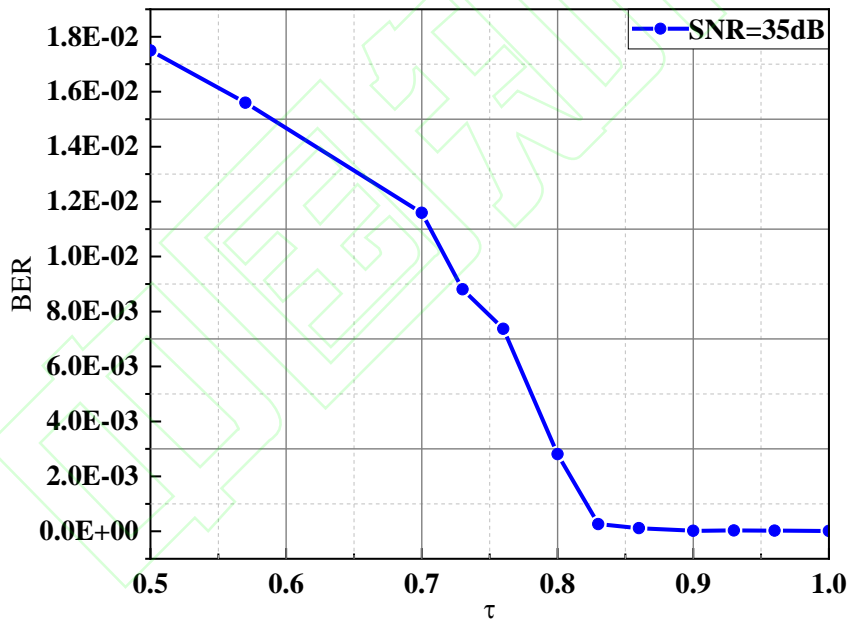


图5 误码率与加速因子的关系

Fig.5 The relationship of BER and parameter  $\tau$

图6与图7相结合可以看出：在信噪比为35dB时，Nyquist系统的传输速率约为1.8 bit/s/Hz。当加速因子为0.9时，系统传输速率约为1.91 bit/s/Hz，相对于正交传输系统而言可以获得约6.1%的传输速率增益。当加速因子为0.83时，信号波形之间的间距被进一步压缩，系统的传输速率可以增加至约2.1 bit/s/Hz。此时系统的误码性能与正交传输系统相比有所降低，但得到了0.3 bit/s/Hz的速率增益，即可以获得约16.7%的传输速率增益。另外，当 $\tau$ 小于0.83时，依据图5的结果可以认为系统误码性能较差，难以达到通信的目的。



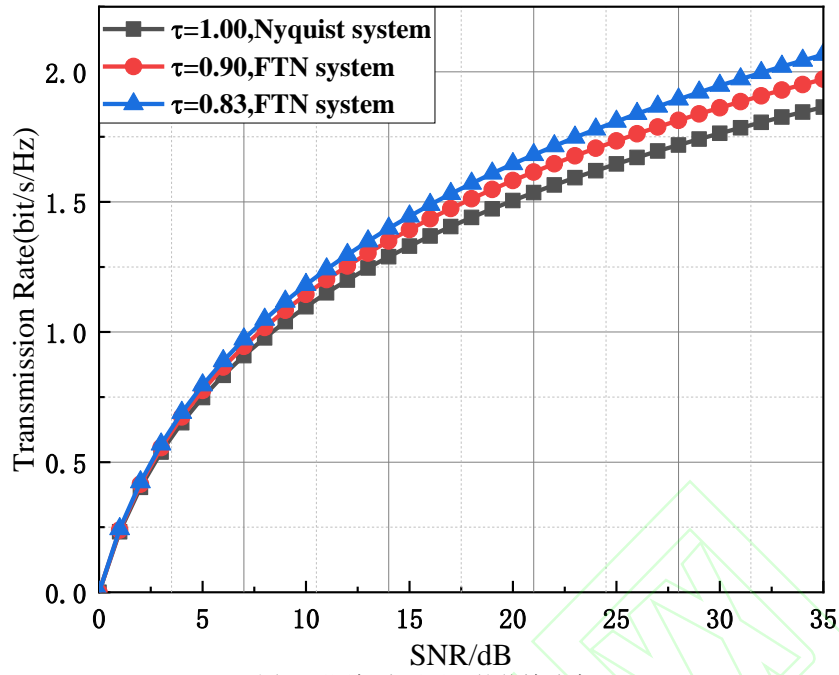


图 6 不同加速因子下的传输速率

Fig.6 Transmission rate of different  $\tau$

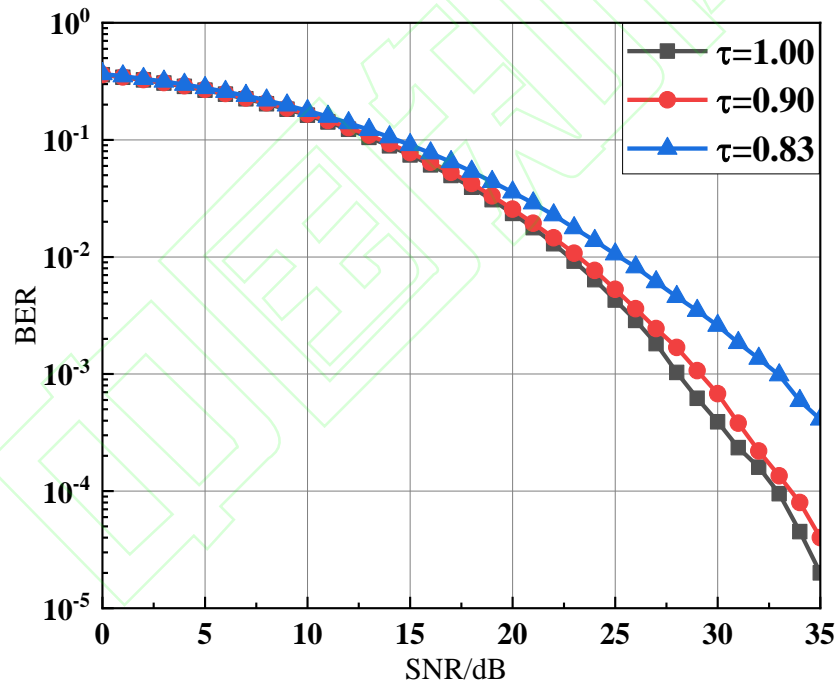


图 7 不同加速因子下的误码性能

Fig.7 BER performance of different  $\tau$

## 5 结论

将 FTN 技术引入弱湍流大气激光通信系统中可有效提高系统的传输速率。当  $\tau$  为 0.83 时得到了系统的最优加速因子, 通过牺牲少量误码性能可换取传输速率的较大幅度增加, 具

有很好的应用价值。若想进一步提高系统的传输速率，可以在此基础上结合高阶调制技术，同时探索更适合于湍流信道的检测方法，来实现系统性能的提升。

## 参考文献

- [1] Wang H Q, Wang X, Lynette K, *et al.* Performance analysis of MIMO wireless optical communication system with Q-ary PPM over correlated log-normal fading channel[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 102: 153-159.
- [2] Sun J, Huang P M, Yao Z S. Diversity Reception Technology in Coherent Optical Communication over Gamma-Gamma Atmospheric Turbulence Channel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018,38(07): 0706002.  
孙晶,黄普明,么周石. Gamma-Gamma大气湍流下相干光通信分集接收技术研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(07): 0706002.
- [3] Cao Y, Zhang X, Peng X F, *et al.* Cascade Scheme Based on Multiple-Input Multiple-Output in Spatial Optical Communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(01): 0106003.  
曹阳,张勋,彭小峰,等. 空间光通信中基于多输入多输出的级联码方案研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(01): 0106003.
- [4] Li X Y, Zhang P, Tong S F. Cascade Diversity Reception Technology in Coherent Optical Communication over Gamma-Gamma Atmospheric Turbulence Channel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(06): 0606001.  
李晓燕,张鹏,佟首峰. 大气湍流影响下基于自适应判决门限的逆向调制自由空间光通信系统误码率性能分析[J]. *中国激光*, 2018, 45(06): 0606001.
- [5] Sheikh Muhammad S, Brandl P, *et al.* VHDL Based FPGA implementation of 256-ary PPM for Free Space Optical Links [C]. 2007 9th International Conference on Transparent Optical Networks, July 1-5, 2007, Rome, Italy. New York: IEEE, 9835300.
- [6] Xu H H, Chung Y L, Lu H H, *et al.* WDM free-space optical communication system of high-speed hybrid signals[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 7204207.
- [7] Mazo J E. Faster-Than-Nyquist Signaling[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1975, 54(8): 1451-1462.
- [8] Li S Y, Ping L, Bai B M, *et al.* Faster-than-Nyquist transmission based on multi-layer superposition[J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(9): 86-94.  
李双洋,平磊,白宝明,等. 基于多层叠加传输的超奈奎斯特传输方案[J]. *通信学报*, 2017, 38(9): 86-94.
- [9] Cao M H, Wu X, Yang S X, *et al.* BER performance of Faster-than-Nyquist communications under Log-normal turbulence channel[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 465-473.  
曹明华,武鑫,杨顺信,等. Log-normal 湍流信道中超奈奎斯特传输系统的误码性能[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 465-473.
- [10] Kim Y J D, Bajcsy J. Binary faster than Nyquist optical transmission via non-uniform power allocation[C]. 2013 13th Canadian Workshop on Information Theory, June 18-21, 2013, Toronto, ON, Canada. New York: IEEE, 13823284.
- [11] Ishihara T, Sugiura S. Differential Faster-Than-Nyquist Signaling[J]. *IEEE Access*, 2018, 6:

4199-4206.

- [12] Sugiura S. Frequency-Domain equalization of Faster-than-Nyquist signaling[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2013, 2(5):555-558.
- [13] Dinis R, Cunha B, Ganhaio F, *et al.* A hybrid ARQ scheme for Faster than Nyquist signaling with iterative Frequency-Domain detection[C]. 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 11-14, 2015, Glasgow, UK. New York: IEEE, 15288156.
- [14] Jana M, Medra A, Lampe L, *et al.* Pre-equalized Faster-than-Nyquist transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(10): 4406-4418.
- [15] Bedeer E, Ahmed M H, Halim Y. A very low complexity successive symbol-by-symbol sequence estimator for Faster-than-Nyquist signaling[J]. IEEE Access, 2017, 5: 7414-7422.
- [16] Chi N, Zhao J Q, Wang Z X. Bandwidth efficient visible light communication system based on faster than Nyquist precoded CAP modulation[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(8): 080601.
- [17] Liang S Y, Jiang Z H, Qiao L, *et al.* Faster-Than-Nyquist precoded CAP modulation visible light communication system based on nonlinear weighted Look-Up table predistortion[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1) :7900709.
- [18] Sushank C, Lin B J, Tang X, *et al.* 40Gbps–80GHz PSK-MDM based Ro-FSO transmission system[J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(8): 1-9.
- [19] Li Y Q, Zhu W Y, Qian X M. Numerical simulation of propagation performance of super-continuum laser in turbulent atmosphere[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(10).1001002.  
李雅倩,朱文越,钱仙妹. 超连续谱激光在湍流大气中传输特性的数值仿真研究[J]. 光子学报, 2019, 48(10): 1001002.
- [20] Wang H Q, Yao Y, Cao M H. Pulse Delay and Broadening of Laser Signal in Sand and Dust Weather[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 333-341.  
王惠琴, 姚宇, 曹明华. 激光信号在沙尘天气下的脉冲时延和展宽[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0729001.
- [21] Lv W T. Study on direct detection of PAM4 signals with FTN for optical transmission SYSTEM[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications,2017:1-30.  
吕婉婷. 基于 4PAM 和 FTN 的直接检测光纤传输系统研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017: 1-30.
- [22] Wilson S G, Brandt-pearce M, Cao Q L, *et al.* Optical repetition MIMO transmission with multipulse PPM[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(9): 1901-1910.
- [23] 刘爱军. 低复杂度超奈奎斯特传输方法, CN105933255A[P]. 2016-09-07.
- [24] Abaza M, Mesleh R, Mansour A, *et al.* Aggoune. Performance analysis of space-shift keying over negative-exponential and log-normal FSO channels[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(05): 30-34.
- [25] Alaka S P, Narasimhan T L, Chockalingam A. Generalized spatial modulation in indoor wireless visible light communication[C]. 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), December 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 15820546.
- [26] Chagnon M, Morsy-osman M, Poulin M, *et al.* Experimental parametric study of a silicon photonic modulator enabled 112 Gb/s PAM transmission system with a DAC and ADC[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(7): 1380-1387.
- [27] Cao M H, Wang H Q, Yao Y, *et al.* Performance evaluation of FSO communications under

Sand-Dust conditions[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2019, (1): 1-11.



## 网络首发:

**标题:** 4PAM-FTN大气光传输系统在弱湍流信道中的误码性能

**作者:** 曹明华, 张伟, 张悦, 王惠琴, 武鑫, 毛一聪, 康中将

**收稿日期:** 2020-06-03

**录用日期:** 2020-06-09

**DOI:** 10.3788/lop57.230605

## 引用格式:

曹明华, 张伟, 张悦, 王惠琴, 武鑫, 毛一聪, 康中将. 4PAM-FTN大气光传输系统在弱湍流信道中的误码性能[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 230605.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

---

## 您感兴趣的其他相关论文:

### 联合效应影响下脉冲位置调制的大气光多输入多输出系统的误码率

张悦 王惠琴 曹明华 雷景丽 王道斌

兰州理工大学计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050

激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 090602

### 基于QAM的X射线通信系统性能改善方法

王润 薛凤凤 薛阳 林俊龙 李娜

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 063401

### 激光器线宽对空间相干光通信链路传输误码率研究

孔英秀 柯熙政 杨媛

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040603

### 基于可见光通信的正交频分复用技术研究进展

宋小庆 王慕煜 邢松 赵梓旭

陆军装甲兵学院兵器与控制系, 北京 100072

激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120008

### 非Kolmogorov湍流下拉盖尔-高斯光束传输性能数值研究

骆传凯 卢芳 尹晨旭 韩香娥

西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120101