

# 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。推导了该系统在对数正态分布衰落信道中的理论误码率公式。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。蒙特卡罗仿真结果表明: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** 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

doi: 10.3788/LOP57.230605

## BER Performance of 4PAM-FTN Atmospheric Optical Communication System in a 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 fourth-order pulse amplitude modulation faster-than-Nyquist (4PAM-FTN) rate atmospheric optical transmission system was proposed to improve the transmission rate. The theoretical bit error rate (BER) equation in a log-normal fading channel was derived. Then, the influence of transmission distance and laser wavelength on the system BER performance was discussed. Furthermore, the relationship between the acceleration factor and the transmission rate was analyzed. Monte Carlo simulation results reveal that the BER is proportional to the transmission distance, but inversely proportional to the acceleration factor and the laser wavelength. When the acceleration factor is 0.9, the system shows a 6.1% transmission rate gain with an almost invariable BER performance, and when the acceleration factor is 0.83, it achieves a 16.7% transmission rate gain.

**Key words** optics 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

无线通信网络对网络容量、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

收稿日期: 2020-05-29; 修回日期: 2020-06-05; 录用日期: 2020-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(61875080, 61861026)、甘肃省科技计划资助(20JR5RA472)

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

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,会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,脉冲幅度调制(PAM)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(LED)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。

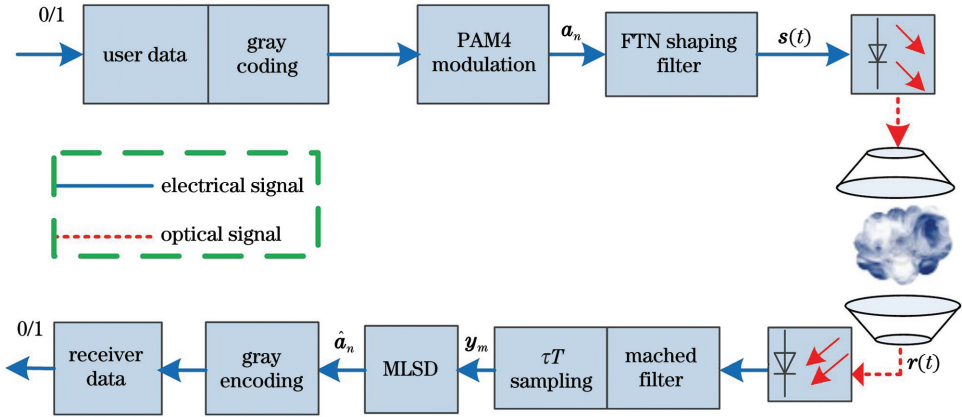


图1 4PAM-FTN大气光通信系统框图

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

发送信号 $s(t)$ 可以表示为

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

式中, $a_n \in A, A = \{a_r = (2r - 1 - R, 0), r = 1, 2, \dots, R\}$ 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,对其进行归一化处理,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>

$$f_1(h_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \frac{1}{2h_n} \exp\left[-\frac{(\ln h_n - 2\mu_x)^2}{8\sigma_x^2}\right], \quad (2)$$

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>

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

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)式可以写为

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

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

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

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

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

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>

$$\begin{aligned} R_{\text{BE}} &\leq \frac{1}{2^j \times j} \times \\ & \sum_{a_m \in A} \sum_{\hat{a}_m \in A} d(a_m, \hat{a}_m) P(a_m \rightarrow \hat{a}_m | u_m), \quad (7) \end{aligned}$$

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

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

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

于超奈奎斯特速率传输使波形之间叠加更为紧密, 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  $\sum_{\substack{n=0, n \neq m \\ n=0, n \neq m}}^{L-1} a_n g(n-m)$ 。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

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

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  $\frac{2\sigma_x^2}{\eta^2} \|u_m (\hat{a}_m - a_m)\|_F^2$  的高斯随机变量。因此, (9) 式可以写为<sup>[25]</sup>

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

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

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

将(11)式代入(7)式可得系统理论误码率的上界公式为

$$\begin{aligned} R_{\text{BE}} &\leq \frac{1}{2^{j+1} \times j} \sum_{a_m \in A} \sum_{\hat{a}_m \in A} d(a_m, \hat{a}_m) \cdot \\ & \operatorname{erfc}\left[\sqrt{\frac{\eta^2}{4\sigma_x^2}} \|u_m (\hat{a}_m - a_m)\|_F\right]. \quad (12) \end{aligned}$$

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 1550 nm, $C_n^2$  为  $7 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ , $L$  为 1600 m。

图 2 为系统误码率理论与蒙特卡罗仿真结果之间的关系。可以看出:随着信噪比(SNR,  $R_{SN}$ )的不断增大,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。

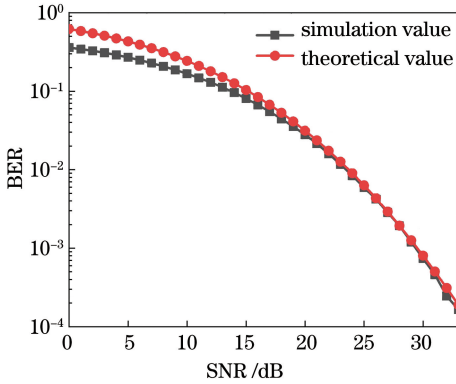


图 2 理论误码率与仿真误码率的对比

Fig. 2 Comparison 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 0.90~1.00 之间时,4 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 0.80~0.90 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 0.80 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,导致越来越严重的码间干扰。

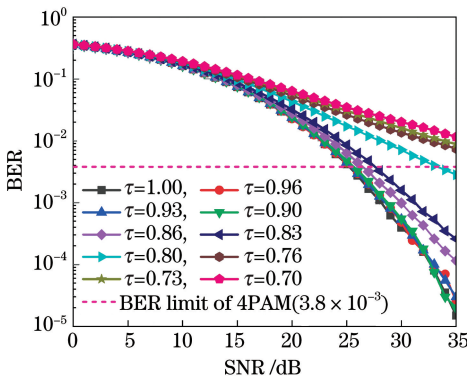


图 3 误码率与信噪比的关系

Fig. 3 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 0.90,信噪比为 35 dB,  $C_n^2$  为  $2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 。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

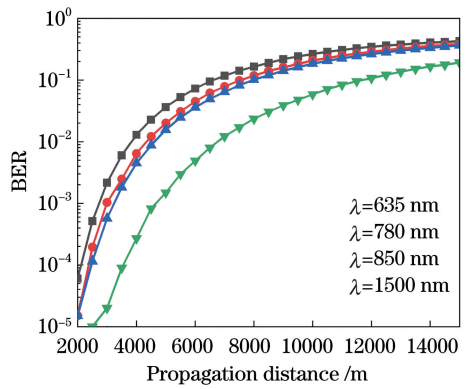


图 4 误码率与传输距离的关系

Fig. 4 Relationship of BER and propagation distance

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来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 0.83~1.00 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。

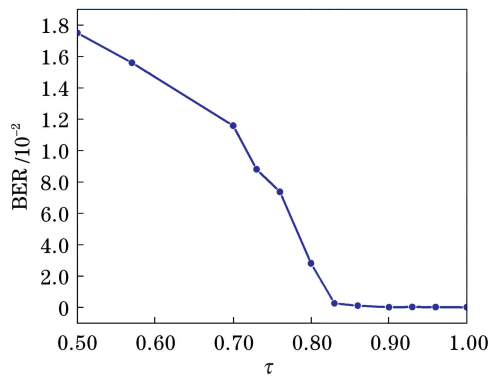


图 5 误码率与加速因子的关系(信噪比为 35 dB)

Fig. 5 Relationship of BER and parameter  $\tau$  (SNR at 35 dB)

图 6 与图 7 相结合可以看出:在信噪比为 35 dB 时, Nyquist 系统的传输速率约为  $1.80 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。当加速因子为 0.9 时,系统传输速率约为  $1.91 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,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约

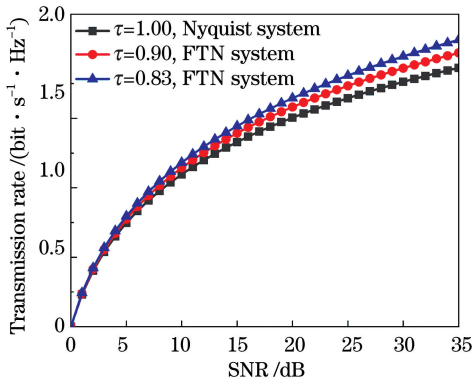


图6 不同加速因子下的传输速率

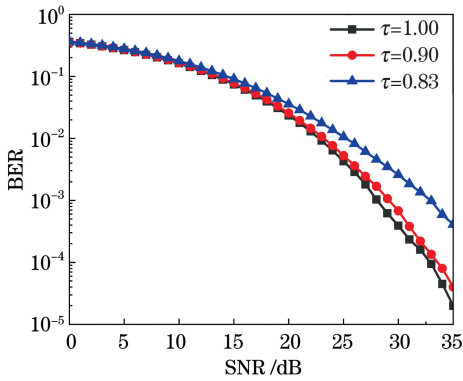
Fig. 6 Transmission rate of different  $\tau$ 

图7 不同加速因子下的误码性能

Fig. 7 BER performance of different  $\tau$ 

$2.10 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。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  $0.30 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  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的性能较差,难以达到通信的目的。

## 5 结 论

将 FTN 技术引入弱湍流大气激光通信系统中可有效地提高系统的传输速率。当  $\tau$  为 0.83 时,可以得到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大幅增加,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 & 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(7): 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(7): 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(1): 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(1): 0106003.
- [4] Li X Y, Zhang P, Tong S F. Bit error rate performance for modulating retro-reflector free space optical communication system based on adaptive threshold under atmospheric turbulence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 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(6): 0606001.
- [5] Muhammad S S, Brandl P, Leitgeb E, 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 Press, 2007: 174-177.
- [6] Huang X H, Li C Y, Lu H H, et al. WDM free-space optical communication system of high-speed hybrid signals [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 1-7.
- [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 Press, 2013: 180-185.
- [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, Ganhao 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 Press, 2015: 1-5.
- [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, Yanikomeroglu H. 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 pre-coded 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. 40 Gbps - 80 GHz 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. Pulsedelay and broadening of laser signal in sand and dust weather [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0729001. 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] Lü 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PAM4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] Liu A J. Low complexity faster-than-Nyquist transmission method: CN105933255A[P]. 2016-09-07. 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. Performance analysis of space-shift keying over negative-exponential and log-normal FSO channels [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(5): 051001.
- [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 Press, 2015: 1-7.
- [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.