

# 指数威布尔信道下 FTN-OWC 系统的信道容量分析

曹明华\*, 康中将, 武鑫, 豆红霞, 王惠琴

兰州理工大学计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050

**摘要** 超奈奎斯特技术能大幅提升无线光通信系统的传输速率,但大气湍流严重影响超奈奎斯特无线光通信(FTN-OWC)系统的性能。详细研究了指数威布尔湍流信道中光强衰落对 FTN-OWC 系统平均容量和中断容量的影响,基于脉冲幅度调制推导了 FTN-OWC 系统的平均容量上界和中断概率,并采用广义超几何方法得到了其闭合表达式。仿真分析了加速因子、滚降系数、湍流强度和接收孔径对平均容量和中断容量的影响。结果表明,增强湍流会导致平均容量和中断容量减小,但可通过增大接收孔径和滚降系数进行提升。在弱湍流条件下,当接收孔径为 25 mm、滚降系数为 0.5、加速因子为 2/3、平均信噪比为 30 dB 时,FTN-OWC 的平均容量相比采用相同调制方式的奈奎斯特无线光通信系统提升了 16.43%。

**关键词** 光通信; 超奈奎斯特; 指数威布尔; 信道容量; 中断概率

**中图分类号** TN929.12

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/AOS202040.1506004

## Channel Capacity Analysis of FTN-OWC System Under Exponentiated Weibull Channel

Cao Minghua\*, Kang Zhongjiang, Wu Xin, Dou Hongxia, Wang Huiqin

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

**Abstract** Faster-than-Nyquist technology can significantly improve the transmission rate of wireless optical communication system, but the atmospheric turbulence seriously affects the performance of faster-than-Nyquist wireless optical communication (FTN-OWC) system. In this paper, the influence of light intensity fading in exponential Weibull turbulent channel on the ergodic capacity and outage capacity of the FTN-OWC system is studied in detail. Based on pulse amplitude modulation, the ergodic capacity upper bound and outage probability of the FTN-OWC system are derived, and its closed-form expression is obtained by using the generalized hypergeometric method. In addition, the impact of acceleration factor, roll-off coefficient, turbulence intensity, and receiving aperture on the ergodic capacity and outage capacity is discussed. The results show that the ergodic capacity and outage capacity are reduced when the turbulence increases, but they can be improved by increasing the receiving aperture and roll-off coefficient. In the case of weak turbulence, the ergodic capacity of the FTN-OWC system is improved by 16.43% compared to the Nyquist wireless optical communication system using the same modulation method when the receiving aperture is 25 mm, the roll-off coefficient is 0.5, the acceleration factor is 2/3, and the average signal to noise ratio is 30 dB.

**Key words** optical communications; faster-than-Nyquist; exponentiated Weibull; channel capacity; outage probability

**OCIS codes** 060.4510; 010.1330; 060.2605; 320.5540

## 1 引 言

无线光通信(OWC)具有无需频率许可、传输速率高和保密性好等优点,被认为是未来空间通信的主要技术方案。但因其直接在大气信道传输数据,传输性能不可避免地受到大气湍流的影响。因此,

人们针对如何提高 OWC 系统的容量展开了研究。目前,常用的提高 OWC 系统传输速率的技术有多输入多输出(MIMO)<sup>[1]</sup>、正交频分复用(OFDM)<sup>[2]</sup>和相干光通信技术<sup>[3]</sup>等。但这些技术均以奈奎斯特第一准则为基础理论,其传输速率的上限受到约束,因此需要引入更高频谱效率的技术,进一步提高

**收稿日期:** 2020-03-20; **修回日期:** 2020-04-20; **录用日期:** 2020-05-06

**基金项目:** 国家自然科学基金(61875080,61861026);兰州理工大学博士基金(03-061616)

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

OWC 系统的传输容量。

1975 年, Mazo<sup>[4]</sup>发现在高斯信道中,超奈奎斯特(FTN)系统的码元速率比奈奎斯特系统提升了 25%,且不会引起误码性能的变化。FTN 还能直接与 MIMO 和 OFDM 等技术结合使用<sup>[5-6]</sup>,为进一步提高 OWC 系统的传输容量提供了一种可行方法。近年来,众多学者在 OWC 领域对 FTN 技术展开研究。在系统设计方面,2016 年,Zhu 等<sup>[7]</sup>将 FTN 应用于多用户多小区可见光广播系统,使频谱效率有了成倍提升。Chi 等<sup>[8]</sup>用差分 FTN 预编码和无载波幅度相位(CAP)调制搭建了可见光通信实验平台,实测数据速率达到了 1.47 Gbit/s。在算法设计方面,Liang 等<sup>[9]</sup>采用加权查表法和递归最小二乘法降低了 FTN 可见光通信系统中由放大器和光电器件造成的非线性损伤。Shan 等<sup>[10]</sup>提出了一种哈特莱域直接探测超奈奎斯特(HD-DD-FTN)算法,用于补偿无线光通信非对称限幅单载波频分复用(ACO-SCFDM)系统中的高频失真,并消除带内噪声。Ha 等<sup>[11]</sup>基于深度神经网络提出了一种针对 FTN 可见光通信系统的频域整形和补偿方案。

上述研究都在不同方向上给出了很好的解决方案,但未见有对大气信道下 FTN-OWC 系统的中断概率和平均容量分析,而平均容量和中断概率作为 FTN-OWC 系统设计的重要指标,对整个系统的性能优化具有重要意义。除此之外,FTN-OWC 系统性能与大气湍流状态密切相关。因此,选择准确的湍流模型开展相关研究能得到更可靠的分析结果。Barrios 等<sup>[12-13]</sup>的实验表明,当考虑接收孔径时,指数威布尔(EW)湍流模型能更准确地描述任何接收孔径和任意强度的湍流状态。因此,本文针对 EW 湍流模型,推导了 FTN-OWC 系统平均容量上界和中断概率的闭合表达式,并通过仿真验证了理论分析结果。

## 2 FTN-OWC 信道和系统模型

### 2.1 湍流信道模型

当光信号在大气信道中传输时,大气湍流会导

致接收光强的随机起伏,严重影响 OWC 系统的性能。常见的湍流模型有:对数正态(LN)、Gamma-Gamma(G-G)和 EW 湍流模型<sup>[14-15]</sup>。Barrios 等<sup>[12-13]</sup>的实验结果表明,当考虑孔径平均效应时,EW 湍流模型与实验数据的拟合效果优于 LN 和 G-G 湍流模型,因此实验采用该湍流模型分析和讨论 FTN-OWC 系统的信道容量。

在 EW 湍流模型中,信道增益  $h$  ( $h > 0$ ) 的概率密度函数和累积分布函数分别表示为<sup>[12-13]</sup>

$$f_h(h; \beta, \eta, \alpha) = \frac{\alpha\beta}{\eta} \left(\frac{h}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{h}{\eta}\right)^\beta\right] \times \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{h}{\eta}\right)^\beta\right]\right\}^{\alpha-1}, \quad (1)$$

$$F_h(h; \beta, \eta, \alpha) = \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{h}{\eta}\right)^\beta\right]\right\}^\alpha, \quad (2)$$

式中,  $\alpha = 3.931 \times \left(\frac{D}{\rho}\right)^{-0.519}$  和  $\beta = (\alpha\sigma^2)^{-\frac{6}{11}}$  为形状参数,其中,  $D$  为接收孔径,  $\rho$  为大气相干半径,  $\sigma^2$  为闪烁指数。  $\eta = \left[\alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\xi(\alpha, \beta)\right]^{-1}$  为尺度参数,其中,  $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数,  $\xi(\alpha, \beta) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j (j+1)^{-(1+\beta)/\beta} \Gamma(\alpha)}{j! \Gamma(\alpha-j)}$ ,  $j$  为计数变量。

### 2.2 FTN-OWC 系统模型

已有文献中,通常采用辛格(sinc)或根升余弦(RRC)信号波形研究 FTN 系统的性能<sup>[8-11]</sup>。但 sinc 信号波形在物理上无法实现,且其“尾巴”振荡幅度大,收敛速度慢,对定时要求严格。相比而言,RRC 信号波形具有物理可实现的特点,其时域表达式为

$$g(t) = \frac{\sin[\pi t(1-b)/T] + 4bt \cos[\pi t(1+b)/T]/T}{(\pi t/T)(1-4bt/T)^2}, \quad (3)$$

式中,  $T$  为脉冲宽度,  $b$  为滚降系数 ( $0 \leq b \leq 1$ )。当  $b=0$  时,  $g(t)$  为 sinc 信号。

假设  $g(t)$  的功率谱密度为  $|G(f)|^2$ , 可表示为<sup>[16]</sup>

$$|G(f)|^2 = \begin{cases} T, & 0 < |f| \leq \frac{1-b}{2T} \\ \frac{T}{2} \left\{1 + \cos\left[\frac{\pi T}{b} \left(f - \frac{1-b}{2T}\right)\right]\right\}, & \frac{1-b}{2T} < |f| \leq \frac{1+b}{2T} \\ 0, & |f| > \frac{1+b}{2T} \end{cases}, \quad (4)$$

式中,  $f$  为频域变量。

由(4)式可知,RRC 信号波形具有等效低通特性,且“尾巴”振荡幅度和收敛速度可通过滚降系数进行控制。因此,实验采用 RRC 信号波形构建 FTN-OWC 系统。构建的 FTN-OWC 系统模型如图 1 所示,其中,tx-side 表示发送端,rx-side 表示接收端,发送端先对二进制信息序列进行脉冲幅度调

制(PAM),再经 RRC 成形滤波器后,由发射望远镜送入大气湍流信道。假设发送信号为

$$x(t) = \sum_n a_n g(t - n\tau T), \quad (5)$$

式中,  $a_n$  为第  $n$  个发送信息序列,  $\tau$  ( $0 < \tau \leq 1$ ) 为时域加速因子,  $1/\tau T$  为码元速率。当  $\tau = 1$  时,该系统变为奈奎斯特系统。

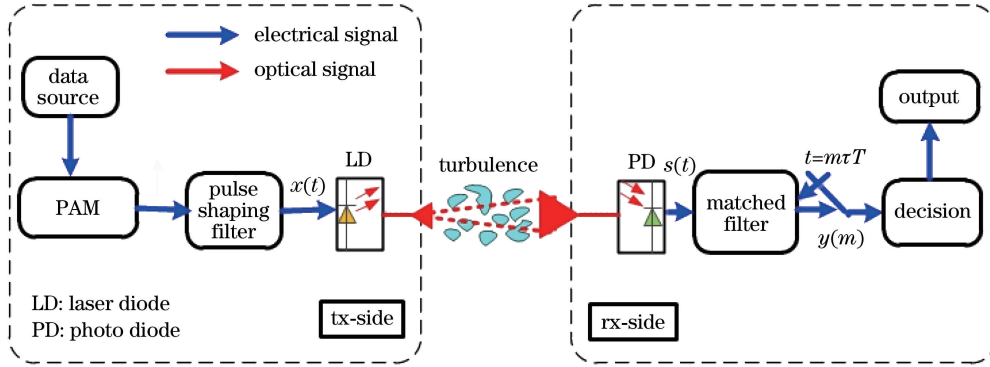


图 1 FTN-OWC 系统模型

Fig. 1 Model of FTN-OWC system

发送端发出的光信号经大气湍流信道后,在接收端由光电探测器接收并转换为电信号。假设探测器的输出信号即匹配滤波器的输入信号为

$$s(t) = Rhx(t) + \omega(t), \quad (6)$$

式中,  $R$  为光电转换效率,  $\omega(t)$  为信道中的加性噪声。假设匹配滤波器的冲激响应与发送端成型滤波器的冲激响应完全一致。则  $s(t)$  经匹配滤波器和采样间隔为  $\tau T$  的采样器后,得到的数字序列为

$$y(m) = Rh \int_{-\infty}^{\infty} x(t) g(t - m\tau T) dt + \int_{-\infty}^{\infty} \omega(t) g(t - m\tau T) dt = Rh \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \sum_n a_n g(t - n\tau T) \right] g(t - m\tau T) dt + \int_{-\infty}^{\infty} \omega(t) g(t - m\tau T) dt = Rh (a_m p_0 + \sum_{n \neq m} a_n p_{m-n}) + \omega(m), \quad (7)$$

式中,  $a_m$  为第  $m$  个发送信息序列,  $p_{m-n} = \int_{-\infty}^{\infty} g(t - n\tau T) g(t - m\tau T) dt$  为码间干扰的冲击响应,  $\omega(m)$  为加性高斯白噪声(AWGN),服从参数为  $(e, N_0/2)$  的高斯分布,其中,  $e \geq 0$  为均值,  $N_0/2$  为方差。

### 3 信道容量分析

#### 3.1 平均信道容量

瞬时信道容量是接收信噪比的函数,假设接收端的瞬时信噪比为

$$\gamma = \frac{P_s R^2 h^2}{N_0/2} = \hat{\gamma} R^2 h^2, \quad (8)$$

式中,  $P_s$  为平均发送功率,  $\hat{\gamma} = \frac{P_s}{N_0/2}$  为平均信噪比。

将(8)式代入到(1)式、(2)式中,得到  $\gamma$  的概率

密度函数和累积分布函数分别为

$$f_\gamma(\gamma; \beta, \eta, \alpha) = \frac{\alpha \beta}{2\gamma} \left( \frac{\gamma}{\hat{\gamma} R^2 \eta^2} \right)^{\frac{\beta}{2}} \exp \left[ - \left( \frac{\gamma}{\hat{\gamma} R^2 \eta^2} \right)^{\frac{\beta}{2}} \right] \times \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\gamma}{\hat{\gamma} R^2 \eta^2} \right)^{\frac{\beta}{2}} \right] \right\}^{\alpha-1}, \quad (9)$$

$$F_\gamma(\gamma; \beta, \eta, \alpha) = \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\gamma}{\hat{\gamma} R^2 \eta^2} \right)^{\frac{\beta}{2}} \right] \right\}^\alpha. \quad (10)$$

依据牛顿广义二项式定理  $(1+z)^r = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\Gamma(r+1)z^j}{j! \Gamma(r-j+1)}$  和  $\exp z$  的 Meijer-G 函数形式  $\exp z = G_{0,1}^{1,0}(-z | \cdot)$  [17], 得到  $\gamma$  的概率密度函数和累积分布函数的闭合表达式分别为

$$f_\gamma(\gamma; \beta, \eta, \alpha) = \frac{\alpha\beta\Gamma(\alpha)\gamma^{\left(\frac{\beta}{2}-1\right)}}{2(\hat{\gamma}R^2\eta^2)^{\frac{\beta}{2}}} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j! \Gamma(\alpha-j)} \times G_{0,1}^{1,0} \left[ (1+j) \left( \frac{\gamma}{\hat{\gamma}R^2\eta^2} \right)^{\frac{\beta}{2}} \middle| \begin{matrix} - \\ 0 \end{matrix} \right], \quad (11)$$

$$F_\gamma(\gamma; \beta, \eta, \alpha) = \Gamma(\alpha+1) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j! \Gamma(\alpha-j+1)} \times G_{0,1}^{1,0} \left[ j \left( \frac{\gamma}{\hat{\gamma}R^2\eta^2} \right)^{\frac{\beta}{2}} \middle| \begin{matrix} - \\ 0 \end{matrix} \right]. \quad (12)$$

根据文献[18],得到 FTN-OWC 系统的瞬时信道容量为

$$C = \int_0^{\frac{1}{2\tau T}} \text{lb} \left[ 1 + \frac{P_s R^2 h^2}{N_0/2} |G(f)|^2 \right] df = \int_0^{\frac{1}{2\tau T}} \text{lb} [1 + \gamma |G(f)|^2] df. \quad (13)$$

由于  $|G(f)|^2$  为分段函数,可将(4)式代入(13),得到

1) 当  $\frac{1}{2\tau T} < \frac{1+b}{2T}$  时

$$C = \int_0^{\frac{1-b}{2T}} \text{lb}(1 + \gamma T) df + \int_{\frac{1-b}{2T}}^{\frac{1}{2\tau T}} \text{lb} \left\{ 1 + \frac{\gamma T}{2} \left[ 1 + \cos \left[ \frac{\pi T}{b} \left( f - \frac{1-b}{2T} \right) \right] \right] \right\} df. \quad (14)$$

2) 当  $\frac{1}{2\tau T} \geq \frac{1+b}{2T}$  时

$$C = \int_0^{\frac{1-b}{2T}} \text{lb}(1 + \gamma T) df + \int_{\frac{1-b}{2T}}^{\frac{1+b}{2T}} \text{lb} \left\{ 1 + \frac{\gamma T}{2} \left[ 1 + \cos \left[ \frac{\pi T}{b} \left( f - \frac{1-b}{2T} \right) \right] \right] \right\} df. \quad (15)$$

从(14)式、(15)式可以发现,减小  $\tau$  可以提高系统的瞬时信道容量,当  $\frac{1}{2\tau T} = \frac{1+b}{2T}$  (即  $\tau = \frac{1}{1+b}$ ) 时,瞬时信道容量达到上限。若给定的瞬时信噪比一定(即信道增益一定)时,假设  $b = 0.5$ , 则当  $\tau = \frac{1}{1+0.5} = \frac{2}{3}$  时系统的瞬时信道容量达到最大。

作为实际通信系统中衡量系统有效性的重要指标,信道容量上界给出了通信系统性能的性能上界。(15)式为 FTN-OWC 系统瞬时信道容量上界的积分表达式,为便于分析,根据对数和三角函数的积分公式<sup>[16]</sup>

$$\int_0^\pi \text{lb}(\mu + \nu \cos z) dz = \pi \cdot \text{lb} \frac{\mu + \sqrt{\mu^2 - \nu^2}}{2}, \quad (16)$$

式中,  $\mu, \nu$  分别为一个常数。将(15)式简化为

$$C = \frac{1-b}{2T} \text{lb}(1 + \gamma T) + \frac{b}{T} \text{lb} \left( 1 + \frac{\gamma T}{2} + \sqrt{1 + \gamma T} \right) - \frac{b}{T}. \quad (17)$$

FTN-OWC 系统的平均容量  $\langle C \rangle$  为

$$\langle C \rangle = \int_0^\infty C f_\gamma(\gamma) d\gamma = - \int_0^\infty \frac{dC}{d\gamma} F_\gamma(\gamma) d\gamma. \quad (18)$$

将(12)式、(17)式代入(18)式,并依据 Meijer-G 函数形式  $(1-x)^{-1} = \pi \cdot G_{2,2}^{1,1}(x |_{0,0,0,5}^{0,0,0,5})$ <sup>[17]</sup> 和 Meijer 函数运算性质(07.34.21.0013.01)<sup>[19]</sup>,推导出  $\langle C \rangle$  的闭合表达式为

$$\langle C \rangle = \frac{\pi(b+1)}{2 \ln 2 \cdot T} \cdot \frac{k^{0.5} \Gamma(\alpha+1)}{2\pi^{0.5(k-1)}} \cdot \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j! \Gamma(\alpha-j+1)} G_{2l, k+2l}^{k+l, l} \left[ \frac{\left( \frac{j}{k} \right)^k \left( \frac{1}{\hat{\gamma}R^2\eta^2} \right)^{\frac{\beta}{2}}}{(-T)^l} \middle| \begin{matrix} 0, \dots, 0, \frac{-1}{2l}, \dots, \frac{-1}{2l} \\ \Delta(k, 0), 0, \dots, 0, \frac{-1}{2l}, \dots, \frac{-1}{2l} \end{matrix} \right], \quad (19)$$

式中,  $k$  和  $l$  为正整数,且满足  $k/l = \beta/2$ ,  $\Delta(k, 0) = 0, \frac{1}{k}, \dots, \frac{k-1}{k}$ 。

### 3.2 中断容量

平均容量反映了系统信道容量的整体状态,而中断容量反映的是一定可靠性程度下,系统能够保

证的最大容量水平。假设  $C_{\text{out}}$  为保证信息传输的最低速率(即中断容量),则中断概率  $P_{\text{out}}$  为<sup>[20]</sup>

$$P_{\text{out}} = P_r(C < C_{\text{out}}), \quad (20)$$

式中,  $P_r(\cdot)$  为某事件发生的概率。当  $\gamma = \gamma_{\text{th}}$  时,  $C = C_{\text{out}}$ , 则  $\gamma_{\text{th}}$  为阈值信噪比。瞬时信道容量是关于瞬时信噪比的单调递增函数,因此中断概率又可表示为<sup>[20]</sup>

$$P_{\text{out}} = P_r(\gamma < \gamma_{\text{th}}). \quad (21)$$

依据累计分布函数定义,得到系统中断概率的闭合表达式为

$$P_{\text{out}} = F_\gamma(\gamma_{\text{th}}; \beta, \eta, \alpha) = \Gamma(\alpha + 1) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j! \Gamma(\alpha - j + 1)} \times G_{0,1}^{1,0} \left[ j \left( \frac{\gamma_{\text{th}}}{\hat{\gamma} R^2 \eta^2} \right)^{\frac{\beta}{2}} \middle| - \right]. \quad (22)$$

### 4 仿真及分析

分别采用理论计算和蒙特卡罗仿真分析了 FTN-OWC 系统的平均容量和中断容量,并研究了加速因子、滚降系数、接收孔径和湍流强度等参数对两者的影响。仿真时,光电转换效率为 0.5 A/W,

采用的 EW 湍流模型参数来源于文献[21],具体数值如表 1 所示,仿真结果如图 2~图 7 所示,其中直线表示理论计算结果,符号表示蒙特卡罗仿真结果。

图 2 是滚降系数  $b = 0.5$ 、加速因子不同时 FTN-OWC 系统的平均容量。可以发现,FTN-OWC 系统平均容量的理论计算结果与蒙特卡罗仿真结果存在细微差别,但基本重合; $\tau < 1$  时的平均容量均大于  $\tau = 1$  时的平均容量,这表明采用 FTN 技术可提高 OWC 系统的信道容量;平均容量随  $\tau$  的减小呈增大趋势,但减小到某个定值( $\tau = \frac{1}{1+b}$ )时,平均容量不再增加。如  $\tau = 0.65$  和  $\tau = 0.60$  时的平均容量曲线几乎重合。原因是在  $b = 0.5$ 、 $\tau = 2/3$  时,平均容量达到上界。

表 1 EW 湍流模型参数

Table 1 Parameters of the EW turbulence model

Turbulence intensity	Rytov variance	$\alpha$	$\beta$	$\eta$	Receiving aperture $D$ /mm
Weak	0.317	4.89	1.03	0.46	0
	0.317	3.67	1.97	0.73	25
	0.317	1.69	8.27	1.00	60
	0.317	1.01	19.27	1.03	80
Moderate	2.202	5.93	0.46	0.11	0
	2.202	5.37	0.81	0.33	25
	2.202	3.47	2.20	0.77	60
	2.202	2.52	4.06	0.92	80
Strong	15.851	5.94	0.46	0.11	0
	15.851	5.50	0.74	0.29	25
	15.851	4.80	1.08	0.48	60
	15.851	4.39	1.34	0.58	80

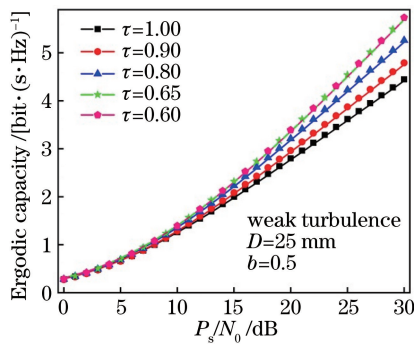


图 2 加速因子不同时 FTN-OWC 系统的平均容量

Fig. 2 Ergodic capacity with different acceleration factors of FTN-OWC system

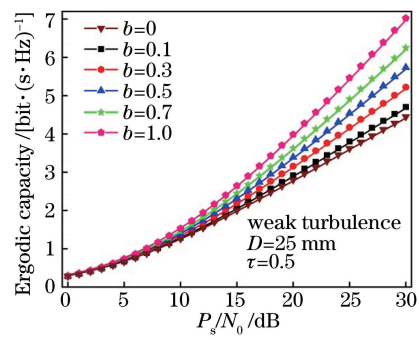


图 3 滚降系数不同时 FTN-OWC 系统的平均容量

Fig. 3 Ergodic capacity with different roll-off coefficients of FTN-OWC system

图 3 是加速因子为 0.5、滚降系数不同时 FTN-OWC 系统的平均容量。可以看出,相比采用 sinc 信号波形的 FTN-OWC 系统而言,采用 RRC 信号波形时系统平均容量明显增大,且滚降系数越大,平均容量也越大。这说明采用 RRC 信号波形的

FTN-OWC 系统能够带来更大的平均容量增益,且平均容量随着滚降系数的增大而增大。

图 4(a)是接收孔径为 25 mm,滚降系数为 0.5,加速因子为 0.8 时,无湍流和弱、中、强湍流下 FTN-OWC 系统的平均容量,图 4(b)为  $P_s/N_0$  在

15~20 dB 时的曲线。可以发现,弱、中、强湍流状态时的平均容量均小于无湍流状态时的平均容量,这表明湍流会造成系统平均容量的减小。且湍流强度越大,平均容量越小。还可以发现,中等湍流时系统的平均容量明显小于弱湍流时的平均容量,而强湍流与中等湍流时系统的平均容量差距很小。这说明在接收孔径一定时,随着湍流强度的增强,FTN-

OWC 系统平均容量的衰减量减小。如当  $P_s/N_0 = 20$  dB 时,弱、中、强湍流下的理论平均容量分别为 3.21, 2.96, 2.89 bit/(s · Hz)。将弱湍流下的平均容量作为参考对象,中湍流下的平均容量衰减了 0.25 bit/(s · Hz),而强湍流下的平均容量仅衰减了 0.32 bit/(s · Hz)。虽然湍流强度大幅增加,但平均容量的衰减量却很小。

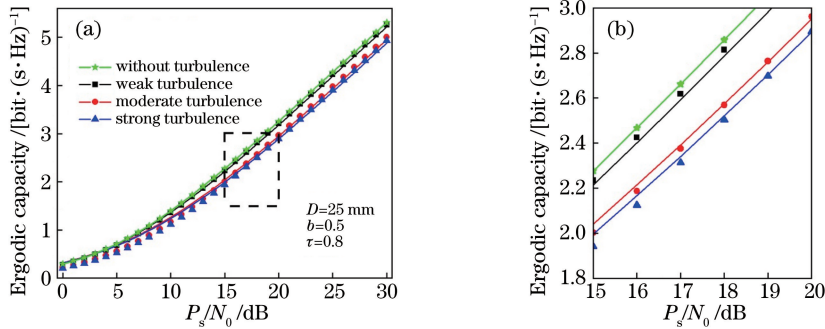


图 4 不同湍流强度下 FTN-OWC 系统的平均容量。(a)  $P_s/N_0$  为 0~30 dB; (b)  $P_s/N_0$  为 15~20 dB 的放大图  
Fig. 4 Ergodic capacity of FTN-OWC system under different turbulence intensities. (a)  $P_s/N_0$  is 0~30 dB;  
(b) enlarged view at  $P_s/N_0$  of 15~20 dB

在滚降系数为 0.5, 加速因子为 0.8, 仿真了接收孔径分别为 0 (表示点接收情况), 25, 60, 80 mm 时强湍流下 FTN-OWC 系统的平均容量, 如图 5(a) 所示, 图 5(b) 为  $P_s/N_0$  在 15~20 dB 时的变化曲线。可以发现, 接收孔径分别为 25, 60, 80 mm 时的平均容量均大于点接收情况下的平均

容量, 且接收孔径越大, 平均容量也越大。虽然系统在接收孔径为 80 mm 时的平均容量大于接收孔径为 60 mm 时的平均容量, 但两者之间的差别很小。这表明增大接收孔径可以增加通信系统的容量, 但当接收孔径达到某个值时, 系统容量量不会继续增大。

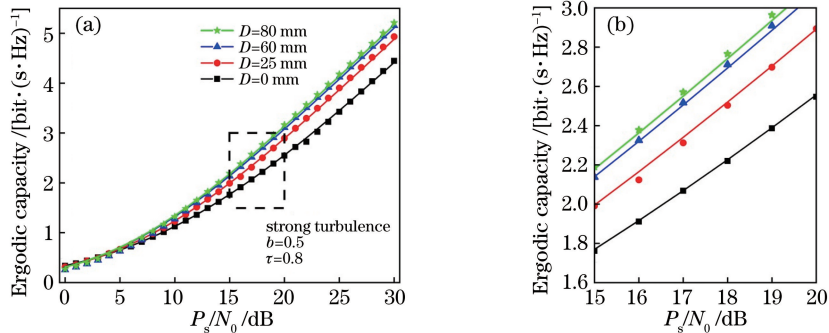


图 5 接收孔径不同时 FTN-OWC 系统的平均容量。(a)  $P_s/N_0$  为 0~30 dB; (b)  $P_s/N_0$  为 15~20 dB 的放大图  
Fig. 5 Ergodic capacity of FTN-OWC system with different receiving apertures. (a)  $P_s/N_0$  is 0~30 dB;  
(b) enlarged view at  $P_s/N_0$  of 15~20 dB

在弱湍流情况下, 滚降系数为 0.5, 接收孔径分别为 0 mm 和 25 mm 时, 仿真了不同加速因子条件下 FTN-OWC 系统的 10% 中断容量 (中断概率为 10% 时的系统容量) 曲线, 如图 6 所示。在加速因子为 0.5, 接收孔径为 25 mm 时, 仿真得到弱湍流和强湍流下不同滚降系数的 FTN-OWC 系统

的 10% 中断容量曲线, 如图 7 所示。可以发现, 中断容量随加速因子、滚降系数、接收孔径和湍流强度的变化规律与平均容量随各因素的变化规律相同。当湍流强度、接收孔径和中断概率相同时, FTN-OWC 系统的中断容量大于奈奎斯特 OWC 系统的中断容量。

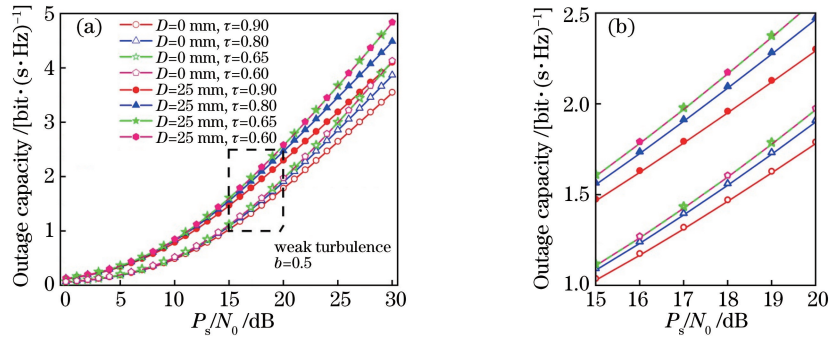


图 6 加速因子不同时 FTN-OWC 系统的中断容量。(a)  $P_s/N_0$  为 0~30 dB; (b)  $P_s/N_0$  为 15~20 dB 的放大图

Fig. 6 Outage capacity of FTN-OWC system with different acceleration factors. (a)  $P_s/N_0$  is 0~30 dB;

(b) enlarged view at  $P_s/N_0$  of 15~20 dB

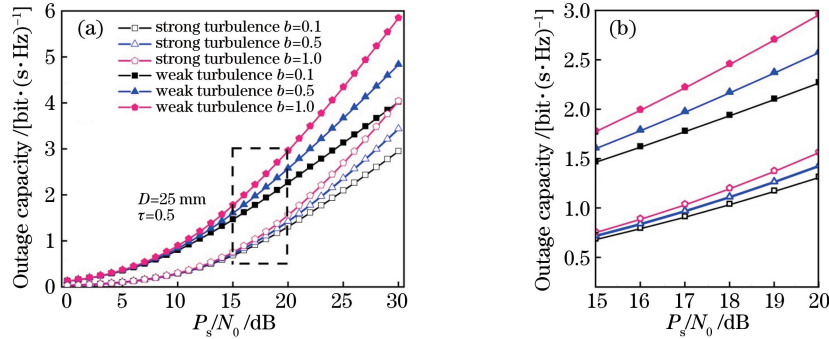


图 7 滚降系数不同时 FTN-OWC 系统的中断容量。(a)  $P_s/N_0$  为 0~30 dB; (b)  $P_s/N_0$  为 15~20 dB 的放大图

Fig. 7 Outage capacity of FTN-OWC system with different roll-off coefficients. (a)  $P_s/N_0$  is 0~30 dB;

(b) enlarged view at  $P_s/N_0$  of 15~20 dB

## 5 结 论

FTN 技术的引入为增大 OWC 系统容量、提高其传输速率提供了一种良好的可行方案, 信号波形的滚降系数、加速因子等参数对系统传输容量具有很大影响。传输容量的增加进一步提升了 OWC 在带宽接入网络中的竞争力, 使 OWC 有望成为万物互联时代超高速泛在网络链接的关键技术之一。

### 参 考 文 献

- [1] Wang H Q, Wang X, Cao M H. Ergodic channel capacity of spatial correlated multiple-input multiple-output free space optical links using multipulse pulse-position modulation[J]. Optical Engineering, 2017, 56(2): 026103.
- [2] Liu M W, Li Y C. Propagation of OFDM-OAM optical signal in atmospheric turbulence [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0706002.  
刘旻雯, 李迎春. OFDM-OAM 光信号在大气湍流中的传输[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0706002.
- [3] Ma B B, Ke X Z, Zhang Y. Polarization control and control algorithm of beams in coherent optical

communication system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0106002.

马兵斌, 柯熙政, 张颖. 相干光通信系统中光束的偏振控制及控制算法研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0106002.

- [4] Mazo J E. Faster-than-Nyquist signaling [J]. Bell System Technical Journal, 1975, 54(8): 1451-1462.
- [5] Yuhas M, Feng Y, Bajcsy J. On the capacity of faster-than-Nyquist MIMO transmission with CSI at the receiver[C]//2015 IEEE Globecom Workshops. December 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2015: 1-6.
- [6] Wang K, Liu A J, Liang X H, et al. A faster-than-Nyquist (FTN)-based multicarrier system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1): 947-951.
- [7] Zhu Y J, Wang W Y, Xin G. Faster-than-Nyquist signal design for multiuser multicell indoor visible light communications [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-12.
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] Shan C, Zhou J, Guo D, et al. Hartley-domain DD-FTN algorithm for ACO-SCFDM in optical-wireless communications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 1-9.
- [11] Ha Y, Niu W Q, Chi N. Frequency reshaping and compensation scheme based on deep neural network for a FTN CAP 9QAM signal in visible light communication system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11048: 110482F.
- [12] Barrios R, Dios F. Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging for Gaussian beam waves[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13055-13064.
- [13] Barrios R, Dios F. Exponentiated Weibull model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through atmospheric turbulence [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 13-20.
- [14] Wang H Q, Li Y, Hu Q, et al. Experimental investigation on light intensity fluctuation at night in Lanzhou area [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(4): 0401001.  
王惠琴, 李源, 胡秋, 等. 兰州地区夜间光强起伏特性实验[J]. *光子学报*, 2018, 47(4): 0401001.
- [15] 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.
- [16] Hefnawy M E, Kramer G. Impact of spectrum sharing on the efficiency of faster-than-Nyquist signaling[C]//2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. April, 6-9 2014, Istanbul, Turkey. New York: IEEE, 2014: 648-653.
- [17] Adamchik V S, Marichev O I. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in REDUCE system[C]//Proceedings of the International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation, August 20-24, 1990, Tokyo, Japan. New York: ACM, 1990: 212-224.
- [18] Rusek F, Anderson J B. Constrained capacities for faster-than-Nyquist signaling[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(2): 764-775.
- [19] Meijer G function. The Wolfram functions site [Z/OL]. [2020-02-25]. <http://functions.wolfram.com>.
- [20] Han L Q, Jiang H B. Outage probability analysis of a mixed cognitive RF and MIMO FSO system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0406001.  
韩立强, 江红兵. 一种混合认知 RF 和 MIMO FSO 系统的中断概率分析 [J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0406001.
- [21] Barrios R. Exponentiated Weibull fading channel model in free-space optical communications under atmospheric turbulence [D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2013: 116-118.