

Gamma-Gamma 大气湍流中部分相干光通信系统性能研究

吴君鹏^{1,2}, 刘 泉³, 于林韬¹

(1. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 3. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 部分相干光在湍流大气中传输时,可以有效抑制湍流所引起的光强闪烁效应,从而改善通信链路性能。针对 Gamma-Gamma 大气湍流信道模型和部分相干光的光束特性,得到了采用 OOK 调制方式下部分相干光通信系统的平均误码率、中断概率和平均信道容量三个性能指标的解析表达式;在此基础上,分析了光束的空间相干长度和通信距离对通信链路的性能影响。计算结果表明,在相同的大气湍流条件和传输距离下,随着部分相干光的空间相干长度的减小,系统的误码率和中断概率逐步降低,在平均信噪比为 30 dB 时,系统的误码率可以达到 10^{-5} ,中断概率低于 10^{-6} ;另外,系统的平均信道容量会随着光束相干长度的减小而增加,在信噪比等于 12 dB 时,平均信道容量达到 $3.8 \text{ b/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。分析结果为部分相干光在湍流大气中实现可靠通信提供了理论依据。

关键词: 部分相干光; 光强闪烁; 误码率; 中断概率; 平均信道容量

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0322004

Performance analysis of partially coherent optical communication system in Gamma-Gamma atmospheric turbulence

Wu Junpeng^{1,2}, Liu Quan³, Yu Lintao¹

(1. School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;
3. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: When a partially coherent beam is transmitted in turbulent atmosphere channel, the optical intensity scintillation effect caused by atmospheric turbulence can be effectively suppressed, and accordingly performance of communication link is improved. According to Gamma-Gamma atmospheric channel model and characteristics of partially coherent beams, the analytic expressions of average bit error rate (BER), outage probability and average channel capacity were obtained for partially coherent optical communication system. Based on these results, the influence of spatial coherence length and communication distance on performance of communication link was analyzed. Numerical results show that as the spatial coherence length of a partially coherent beam decreases, the system BER and outage probability decrease gradually under the same atmospheric turbulence conditions and transmission distance, and the outage probability is lower than 10^{-6} and system BER is 10^{-5} , when average signal-to-noise ratio

收稿日期: 2016-07-10; 修订日期: 2016-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目面上项目(41076060); 吉林省自然科学基金(20130101056JC)

作者简介: 吴君鹏(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事无线光通信及信号处理方面的研究。Email: wujpeng2010@126.com

通讯作者: 刘泉(1981-), 女, 副教授, 博士, 主要从事光通信与光电检测技术方面的研究。Email: liuquancust@126.com

(SNR) is 30 dB; Meanwhile, as the spatial coherence length of the partially coherent beam decreases, average channel capacity of the system increases, and the average channel capacity is up to $3.8 \text{ b/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$ when SNR is 12 dB. The analytical results provide a theoretical basis for the realization of the communication of partially coherent light in the turbulent atmosphere.

Key words: partially coherent beam; scintillation; bit error rate; outage probability; average channel capacity

0 引言

作为新兴的无线通信方式,大气激光通信的应用与研究受到了广泛的关注。对比传统的射频通信,由于激光具有较高的方向性、单色性和相干性等特点,使其技术上达到数据传输速率高、通信容量大、抗电磁干扰能力强、保密性良好等优势,并且无需频谱申请。因此,无线光通信广泛地应用于远距离的空间数据传输、局域网/城域网互连、应急通信等领域。但是,无线光通信系统的性能在很大程度上受到大气信道环境的制约。当激光信号在大气中传播时,由于大气折射率不均匀性引起光强信号的闪烁,使得接收机所接收到的光波信号振幅和相位产生随机起伏,导致通信系统的误码率和中断概率的增大,严重干扰通信系统的稳定性和可靠性^[1]。

为了进一步提升无线光通信系统的链路性能,减轻大气湍流对传输光波的影响成为各国相关学者关注的热点技术问题,其中利用部分相干光束抑制大气湍流对光通信系统的干扰得到了深入的研究。Wu. J 和 Aristide Dogariu 首先从理论和实验上研究了部分相干光束在湍流大气中的传输特性,分析了相干长度和波前曲率随机变化之间的关系,得到了部分相干光束受湍流影响程度小于完全相干光的重要结论^[2-3]。于诗杰等也通过模拟实验验证了上述的结论^[4]。因此,利用部分相干光进行大气激光通信可以在一定程度上抑制大气湍流的影响,从而改善通信系统的性能。Jennifer C. Ricklin 等研究了高斯-谢尔光束在大气湍流中的传输特性,其研究表明随着发射光束的空间相干度降低,光强的起伏也随之减弱^[5],并且光束空间相干长度的减少可以降低系统的误码率。Olga Korotkova 等建立了涵盖弱湍流和强湍流大气中的部分相干光束闪烁指数模型,并分析了相干长度对误码率的影响^[6]。王利国等推导了

大气湍流中部分相干光束的三参数二阶统计矩,并分析了光束相干长度在湍流大气传播中的变化^[7]。王慧等利用大气的功率谱密度模型,分析了部分相干光束的瑞利区间受到湍流的影响^[8]。Lee I E 从信息论的角度分析了孔径平均和波束宽度对部分相干高斯光束通信系统信道容量的影响^[9]。柯熙政、张磊、王婉婷等分别研究了高斯-谢尔光束在大气湍流中传输特性,并分析了光源相干程度、大气折射率常数和传输距离等参数对光强起伏方差的影响,以及部分相干光束在大气湍流中水平和斜程传输时束宽和角扩展的变化^[10-12]。综上所述,利用部分相干光束在大气湍流中的传播特性来提升大气激光通信系统的性能是一种切实可行的技术手段。

文中首先分析了湍流大气中光强起伏的 Gamma-Gamma 模型和部分相干光光束模型,采用直接探测开关键控调制通信方式,利用超几何函数得到了部分相干光在湍流信道中的平均误码率、中断概率和平均信道容量的解析表达式,然后通过仿真结果分析了部分相干光的相干长度,通信距离对以上三个性能指标的影响。结果表明,部分相干光在中强大气湍流中通信时,通信系统的性能要优于完全相干光束,同时随着光束相干程度的降低,系统的性能指标可以进一步得到提升,进一步验证了部分相干光通信系统的可行性。

1 大气湍流中光束模型和光强起伏分布

1.1 光束模型

文中考虑采用高斯-谢尔光束,接收机平面上的光强信号可以表示为:

$$\langle I(\rho) \rangle = \frac{w_r^2}{w^2} \exp\left(-\frac{2\rho^2}{w^2}\right) \quad (1)$$

式中: ρ 为在光束横截面内距离光束中心的长度; w 为光束半径; w_r 为束腰尺寸。根据 Kolmogorov 模型,

在弱起伏大气湍流中部分相干光束的闪烁指数可表示为^[6]:

$$\sigma_B^2 = 3.86\sigma_R^2 \operatorname{Re} \left[i {}_2F_1 \left(-\frac{5}{6}, \frac{11}{6}; \frac{17}{6}; \bar{\Theta}_{ed} + i\Lambda_{ed} \right) - \frac{11}{16} \Lambda_{ed}^{5/6} \right] \quad (2)$$

式中: ${}_2F_1$ 为高斯超几何函数; $\operatorname{Re} [\cdot]$ 为取复数的实部, 部分相干光在接收平面上的有效光束参数分别为:

$$\bar{\Theta}_{ed} = 1 - \Theta_{ed} = \frac{\Lambda_0 N_s}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2 N_s} \quad (3)$$

$$\Lambda_{ed} = \frac{\Lambda_0 N_s}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2 N_s} \quad (4)$$

式中: $N_s = 1 + \frac{4q_c}{\Lambda_0}$, N_s 为发射光束横截面内的散斑数量; q_c 为表示部分相干光相干程度的无量纲参数, $q_c = \frac{L}{k l_c}$, k 为光波数; L 为光束传播距离; l_c 为空间相干长度, 当 l_c 增加时, 光束的相干性也随之提高^[10]; Θ_0 和 Λ_0 表示部分相干光束在发射端的光束参数, 分别为 $\Theta_0 = 1 - \frac{L}{F_0}$, $\Lambda_0 = \frac{2L}{k w_0}$, F_0 为波前曲率半径, w_0 为光束发射处的束腰半径, Θ_0 表示发射光束发散程度的参数, 当 $\Theta_0 = 1$ 时, 为准直光束。

1.2 光强起伏分布

目前, 针对大气湍流的光强起伏分布的模型主要有对数正态(log-normal)分布、Gamma-Gamma 分布模型、 K 分布模型和威布尔分布等。其中, 对数正态分布适用于大气中弱湍流的光强分布, Gamma-Gamma 分布主要用于中强程度湍流中的光强分布, 而 K 分布模型则适于强湍流大气信道。文中采用 Gamma-Gamma 分布的光强分布模型, 其概率密度为^[13]:

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I) \quad (5)$$

式中: $K_\nu(x)$ 为 ν 阶第二类修正贝塞尔函数。根据 Rytov 理论, Gamma-Gamma 分布可以看成是大尺度光强信号对小尺度光强信号的调制, 参数 α 和 β 分别表示小尺度和大尺度湍流涡旋的数目:

$$\alpha = \frac{1}{\exp[\sigma_{\ln X}^2] - 1} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{\exp[\sigma_{\ln Y}^2] - 1} \quad (7)$$

式中: $\sigma_{\ln X}^2$ 和 $\sigma_{\ln Y}^2$ 分别为服从 Gamma-Gamma 分布的大尺度湍流和小尺度湍流对数光强的起伏方差, 可表示如下:

$$\sigma_{\ln X}^2 = 0.49\sigma_R^2 \left(\frac{\Omega_G - \Lambda_e}{\Omega_G + \Lambda_e} \right)^2 \times$$

$$R \left(\frac{\eta_x}{1 + 0.4\eta_x(1 + \Theta_e)/(\Lambda_e + \Omega_G)} \right)^{7/6} \quad (8)$$

$$\sigma_{\ln Y}^2 = \frac{1.27\sigma_R^2 \eta_y^{-5/6}}{1 + 0.4\eta_y/(\Lambda_1 + \Omega_G)} \quad (9)$$

式中: $R = 1/3 - (1/2)(1 - \Theta_e) + (1/5)(1 - \Theta_e)^2$; η_x 为归一化的大尺度截止频率, $\eta_x = R^{-6/7}(\sigma_B/\sigma_R)^{12/7}/(1 + 0.56\sigma_R^{12/5})$; η_y 是小尺度的截止频率; $\Omega_G = 2L/kW_G^2$, W_G 为接收的半径; $\eta_y = 3(\sigma_R/\sigma_B)^{12/5}/(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})$, σ_R^2 为 Rytov 方差, $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$; L 为光束传输距离, C_n^2 为大气折射率结构常数, 变化范围一般为 $10^{-17} \sim 10^{-13}$ 。一般情况下, 当 $\sigma_R^2 < 1$ 时大气湍流处于弱湍流, $\sigma_R^2 \geq 1$ 时大气湍流则处于强湍流状态。

图 1 给出了光强起伏方差和归一化接收孔径之间的关系曲线。选取光波波长 1550 nm, 光束传输距离 1 km, 发射孔径 2.5 cm, $\sigma_R^2 = 1$ 。由此可以看到随着光束的相干性减弱, 光强的起伏方差也相对减小, 即部分相干光可以在一定程度上抑制大气信道的衰落。

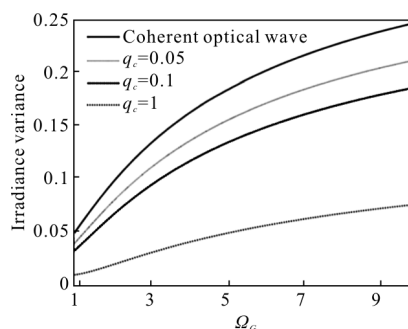


图 1 光强起伏方差和归一化接收孔径之间的关系曲线
Fig.1 Relationship between intensity fluctuation variance and normalized receiving aperture

2 通信系统模型和性能分析

文中主要考虑点对点的大气激光通信,目前在点对点的激光通信中多数采用的是基于强度调制/直接(IM-DD)探测的通信方式。在接收端经过光电探测器所得到的信号通常可以表示为^[14]:

$$y = \eta I x + n \quad (10)$$

式中: y 为接收到的信号; η 为光电转换效率; I 为接收到的光强信号; x 为制信号且 $x \in (0,1)$; n 为均值为0,方差为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声。定义系统的瞬时信噪比和平均信噪比分别为: $\mu = (\eta I)^2 / N_0$, $\bar{\mu} = (\eta E(I))^2 / N_0$, $E(I)$ 为取光强信号的数学期望值。

2.1 系统平均误码率

假设通信信道是无记忆的 AWGN 二进制对称信道,调制方式采用开关键控(OOK),且接收机侧可获得信道的状态信息(CSI),则系统的误码率可以表示为 $P_e = P(0)P(e|0) + P(1)P(e|1)$,其中, $P(0)$ 和 $P(1)$ 分别为调制信息1和0的发送概率, $P(e|0)$ 和 $P(e|1)$ 分别为发送调制信息0和1时的条件误码率,且 $P(e|0) = P(e|1)$, $P(0) = P(1) = 1/2$ 。在光强起伏信号 I 的条件下的误码率,可表示为:

$$P(e|0, I) = P(e|1, I) = Q\left(\frac{\eta I}{\sqrt{2N_0}}\right) \quad (11)$$

在大气衰落信道中的平均误码率则表示为:

$$P_e = \int_0^\infty f(I) Q\left(\frac{\eta I}{\sqrt{2N_0}}\right) dI = \frac{1}{2} \int_0^\infty f(I) \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta I}{2\sqrt{N_0}}\right) dI \quad (12)$$

式中: $Q(\cdot)$ 为高斯 Q 函数; $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数。利用 MeijerG 函数及其性质^[15-16],上式的积分可以简化为:

$$P_e = \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{5,2}^{2,4} \left[\frac{4\mu}{\alpha\beta} \left| \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \right. \right] \quad (13)$$

式中: $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$ MeijerG 函数。

2.2 系统中断概率

大气激光通信系统的中断概率是指接收机接收

信号的信噪比低于某一阈值信噪比的概率,并且随着阈值信噪比的变化,中断概率也随之发生改变。中断概率可以表示为:

$$P_{\text{out}} = P(\mu \leq \mu_{th}) = F_\mu(\mu_{th}) \quad (14)$$

式中: μ_{th} 为信噪比阈值; $F_\mu(\cdot)$ 为光强随机信号的累积分布函数。由公式(5)进一步得到中断概率的表达式为^[16]:

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{2,1} \left[\alpha\beta \sqrt{\frac{\mu_{th}}{\mu}} \left| \frac{1}{\alpha, \beta, 0} \right. \right] \quad (15)$$

2.3 平均信道容量

根据香农信息论可知系统的通信容量是输入信息和输出信息的最大互信息^[17],即:

$$C = \max_{p(X|S)} I(Y; X|S) \quad (16)$$

考虑到光通信系统的接收机和发射机均可获得信道信息,并且通信系统采用 OOK 调制通信方式,则在大气衰落信道中通信容量可以表示为:

$$C = \int_0^\infty C_{\text{AWGN}}(s, N_0) f_I(s) ds \quad (17)$$

式中: $C_{\text{AWGN}}(s, N_0) = B \log_2(1 + s^2 / N_0)$ 为 AWGN 信道中的通信容量, B 为通信带宽。利用 MeijerG 函数和 $\ln(x)$ 以及 $K_\nu(x)$ (函数之间的关系,上式的积分可以得到如下结果:

$$C = \frac{B(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{4\pi \ln 2 \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\mu^{(\alpha+\beta)/4}} \times G_{2,6}^{6,1} \left[\frac{(\alpha\beta)^2}{16\mu} \left| \frac{\alpha+\beta}{4}, \frac{4-\alpha-\beta}{4}, \frac{\alpha-\beta}{4}, \frac{\alpha-\beta+2}{4}, \frac{\alpha-\beta}{4}, \frac{\alpha-\beta-2}{4}, \frac{\alpha+\beta}{4}, \frac{\alpha+\beta}{4} \right. \right] \quad (18)$$

根据 Meijer G 函数的相关性质,上式可以进一步简化为:

$$C = \frac{B 2^{\alpha+\beta-2}}{\pi \ln 2 \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{2,6}^{6,1} \left[\frac{(\alpha\beta)^2}{16\mu} \left| \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0, 0 \right. \right] \quad (19)$$

3 数值仿真分析

根据上节中得到的误码率、中断概率以及平均信道容量的解析表达式对部分相干光通信系统的性

能进行分析。选取激光的波长 1 550 nm, 大气折射率结构常数 $0.97 \times 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$, 无量纲相干参数 q_c 分别为 0, 0.05, 0.1 和 0.2, 其中 $q_c=0$ 时, 表示光束是完全相干光束, 通信距离分别为 1 000 m 和 2 000 m。

在图 2(a)和(b)中给出了部分相干光在湍流大气中传输时误码率和平均信噪比之间的关系曲线。由图可知, 在 Gamma-Gamma 大气湍流中随着信噪比的增加, 误码率持续下降; 在相同信噪比的条件下, 参数 q_c 的增加, 即: 相干程度的降低, 系统的误码率随之降低, 表明在 Gamma-Gamma 湍流大气模型中, 部分相干光束可以降低通信系统的误码率。

通过图 2(a)和(b)的对比, 还可以发现在平均信噪比为 30 dB, 通信距离为 1 km 时, 平均误码率达到 10^{-5} ; 当通信距离增加到 2 km 时, 平均误码率将高于 10^{-4} , 同时系统误码率的降低幅度减小, 这是因为近传输距离通信时, 随着光束的相干程度降低, 光束的闪烁也随之减小, 但是当通信距离增加时, 部分相干光的光束扩展加剧, 使得部分相干光的闪烁效应加剧, 并有可能超过完全相干光。

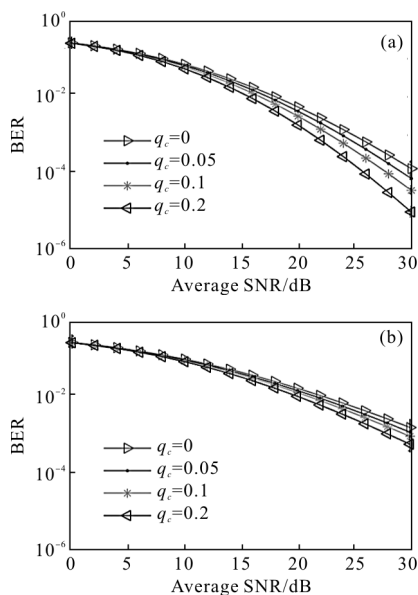


图 2 通信距离 1 000 m (a)和2 000 m (b)时误码率和平均信噪比的关系曲线

Fig.2 Relationships between BER and average SNR at a communication distance of 1 000 m (a) and 2 000 m (b)

图 3(a)和(b)中给出了通信系统的中断概率和归一化平均信噪比的变化曲线。从图中可以看到中断概率曲线和误码率曲线具有相似的变化趋势, 在归

一化信噪比为 30 dB, 通信距离为 1 km 时, 中断概率低于 10^{-6} ; 当通信距离为 2 km 时中断概率高于 10^{-4} 。另外, 中断概率和归一化平均信噪比的变化曲线同样会受到光束相干程度的影响。由图可见, 随着光束相干程度的降低, 中断概率也随之减小, 表明采用部分相干光束通信可以有效提高通信链路的可靠性。

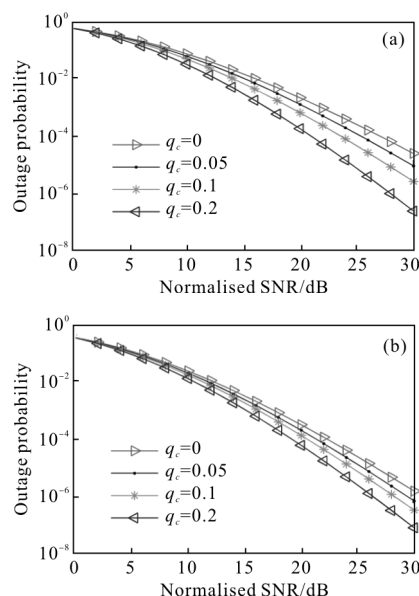
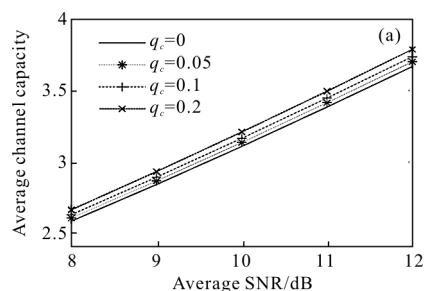


图 3 通信距离为 1 000 m (a)和 2 000 m (b)时系统中断概率和归一化信噪比的关系曲线

Fig.3 Relationships between outage probability and normalized SNR at a communication distance of 1 000 m (a) and 2 000 m (b)

综合图 2 和图 3 可知部分相干光在降低系统误码率和中断概率这两个性能参数时要优于完全相干光, 但是这种性能的提升在低信噪比条件下并不明显。

在图 4(a)和(b)给出了系统的信道容量和平均信噪比之间的关系变化曲线。由图可知, 信道容量和平均信噪比之间呈近似的线性递增关系。另外在相同的信噪比条件下, 随着相干程度的降低, 信道容量也会得到相应的提升, 当信噪比为 12 dB, 通



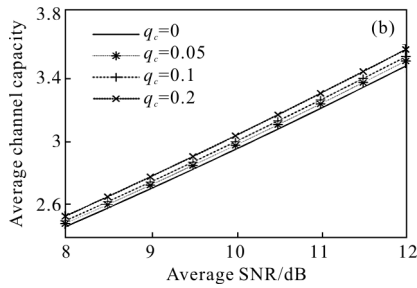


图 4 通信距离为 1 000 m 和 2 000 m 时,信道容量和平均信噪比的关系曲线

Fig.4 Relationships between channel capacity and average SNR at a communication distance of 1 000 m and 2 000 m

信距离 1 000 m, $q_c=0.1$ 时,信道的容量可以达到约 $3.8 \text{ b/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$,并且随通信距离的增加平均信道容量随之降低。

4 结 论

文中主要分析了采用部分相干光束的通信系统在 Gamma-Gamma 大气湍流中的误码率、中断概率、平均信道容量三个性能指标,并利用超几何函数得到了各性能指标的解析表达式。通过计算结果可以发现,在中等程度到强湍流的大气信道环境下,无线光通信系统的误码率、中断概率和平均信道容量均和光束的相干性有关。其中,误码率和中断概率会随光束的相干长度的减少而降低,误码率和中断概率在 30 dB 信噪比时可分别降低到 10^{-5} 和 10^{-6} 的数量级;而平均信道容量会随相干长度的减少而增加,在 12dB 的信噪比下,信道容量可达到约 $3.8 \text{ b/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。文中的结果表明,在光通信系统中采用部分相干光进行通信时,可在一定程度上抑制大气湍流对通信系统的性能影响,然而在光束相干性不变的情况下,随着传输距离的增加,通信系统性能会随着光束扩展引起的光强下降而降低。因此,在实际的激光通信系统中一方面可根据实际情况对光束的相干性进行选择,另一方面,还可以考虑在部分相干光通信中采用如 PPM、BPSK 等调制方式来改善系统性能,有关这方面的内容将在后续的研究中进一步分析和讨论。

参考文献:

[1] Andrews L C, Philips R L. Laser Beam Propagation

Through Random Media[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.

[2] Jian W. Propagation of a Gaussian-Schell beam through turbulent media[J]. *Journal of Modern Optics*, 1990, 37(4): 671-684.

[3] Dogariu A, Amarande S. Propagation of partially coherent beams: turbulence-induced degradation [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(1): 10-12.

[4] Yu Shijie, Long Minhui, Lu Fang, et al. Experiment of partially coherent and coherent light propagating through a turbulence emulator [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(1): 32-36. (in Chinese)

于诗杰, 龙敏慧, 卢芳, 等. 部分相干光与相干光在湍流中的传输特性实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(1): 32-36.

[5] Ricklin J C, Davidson F M. Atmospheric optical communication with a Gaussian Schell beam [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2003, 20(5): 856-866.

[6] Korotkova O, Andrews L C, Phillips R L. Model for a partially coherent Gaussian beam in atmospheric turbulence with application in Lasercom[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(2): 330-341.

[7] Wang Ligu, Wang Zhensen, Wang Mingjun, et al. Model with three parameters for the second-order moment of a partially coherent beam in atmospheric turbulence and its application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 317-320. (in Chinese)

王利国, 吴振森, 王明军, 等. 湍流大气中部分相干光二阶统计特性的三参数模型及其应用 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1): 317-320.

[8] Wang Hui, Yang Jun, Zhang Xi. Influence of atmospheric turbulence on the rayleigh range of gaussian beams[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(11): 1355-1359. (in Chinese)

王慧, 杨军, 章曦. 大气湍流对高斯光束瑞利区间的影响 [J]. *激光与红外*, 2015, 45(11): 1355-1359.

[9] Lee I E, Ghassemlooy Z, Ng W P, et al. Effects of aperture averaging and beam width on a partially coherent Gaussian beam over free-space optical links with turbulence and pointing errors[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(1): 1-9.

[10] Ke Xizheng, Zhang Yu. Scintillation of partially coherent beam in atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 56-62. (in Chinese)

柯熙政, 张宇. 部分相干光在大气湍流中的光强闪烁效应 [J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 56-62.

[11] Zhang Lei, Chen Ziyang, Xiong Mengsu, et al. Scintillation

- index of partially coherent beam propagating through atmospheric turbulence [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(9): 77–81. (in Chinese)
- 张磊, 陈子阳, 熊梦苏, 等. 部分相干光在大气湍流中传输的闪烁指数[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(9): 77–81.
- [12] Ke Xizheng, Wang Wanting. Expansion and angular spread of partially coherent beam propagating in atmospheric turbulence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2726–2733. (in Chinese)
- 柯熙政, 王婉婷. 部分相干光在大气湍流中的光束扩展及角扩展[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2726–2733.
- [13] Majumdar A K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel[J]. *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*, 2005, 2(4): 345–396.
- [14] Nistazakis H E, Tsiftsis T A, Tombras G S. Performance analysis of free-space optical communication systems over atmospheric turbulence channels [J]. *IET Communications*, 2009, 3(8): 1402–1409.
- [15] Andrews L C. *Special Functions of Mathematics for Engineers* Bellingham[M]. Bellingham: SPIE Press, 1998.
- [16] Han L Q, Wang Qi, Shida Katsunori. Performance of free space optical communication over atmospheric turbulence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (7): 1318–1322. (in Chinese)
- 韩立强, 王祁, 信太克归. 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.
- [17] Li J, Uysal M. Optical wireless communications: system model, capacity and coding [C]//IEEE Vehicular Technology Conference, 2003, 1: 168–172.