

基于艾里光的自由空间光通信系统性能分析

秦蕴仪¹, 谢孟桐², 徐智勇¹, 汪井源^{1*}, 李建华¹, 赵继勇¹, 戚艾林¹

(1. 陆军工程大学 通信工程学院, 南京 210001; 2. 中国人民解放军 31121 部队)

摘要:为进一步分析艾里光在光通信中的可行性,以艾里光为载波,研究了弱湍流下基于对数正态分布湍流信道模型的自由空间光(FSO)通信系统的平均误码率、中断概率及平均信道容量,与相同湍流条件和传输距离下以高斯光为载波的FSO通信系统性能进行了对比,同时讨论了艾里光自身的光束宽度、指数截断因子及传输距离对系统性能的影响。仿真结果表明,在湍流条件及传输距离相同时,基于艾里光的FSO通信系统的性能明显优于基于高斯光的FSO通信系统性能,且随着平均信噪比的增加,以艾里光为载波的链路性能优势体现更为显著。

关键词:艾里光束;自由空间光通信;弱湍流;对数正态分布;性能分析

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)04-0046-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Performance analysis of free space optical communication system based on Airy beam

QIN Yunyi¹, XIE Mengtong², XU Zhiyong¹, WANG Jingyuan^{1*}, LI Jianhua¹, ZHAO Jiyong¹, QI Ailin¹

(1. College of Communication Engineering, Army Engineering University, Nanjing 210001, China; 2. Troop 31121 of the PLA)

Abstract: In order to further analyze the feasibility of Airy beam in optical communication, taking Airy beam as the carrier, the average bit error rate, outage probability and average channel capacity of free space optical (FSO) communication system based on lognormal distribution turbulent channel model under weak turbulence are studied, and the performance of FSO communication system with Gaussian beam as the carrier under the same turbulence conditions and transmission distance is compared. At the same time, the effects of beam width, exponential truncation factor and propagation distance of Airy beam on system performance are discussed. The simulation results show that under the same turbulence conditions and transmission distance, the performance of FSO communication system based on Airy beam is significantly better than that based on Gaussian beam, and with the increase of average signal-to-noise ratio, the link performance advantage of Airy beam as carrier is more significant.

Key words: Airy beam, free space optical communication, weak turbulence, log-normal distribution, performance analysis

0 引言

自由空间光(FSO)通信是一种以激光束为信息载体,在大气信道中进行点对点传输的无线通信技术,FSO结合了微波通信和光纤通信的优点,如容量大、建网速度快、无须获得频谱许可和安全性高等,因此受到

了广泛的关注^[1]。但是,激光束在大气信道中传播,受大气湍流的影响严重,极易产生光强闪烁、光束扩展等现象,造成信号严重衰落、误码率增加。其中,光强闪烁对系统性能的影响尤为显著^[2]。因此,如何更加有效地减轻大气湍流对FSO通信系统的影响一直是一个亟待解决的问题。当前,FSO通信系统通常都是基于高斯光传输信息,然而高斯光受大气湍流及衍射现象的影响较大^[3],若从改变系统光源的角度出发,使用比高斯光传输特性更稳健的无衍射艾里光,或许能为解决大气湍流问题提供一种有效手段。

艾里光是一种新型的无衍射光,包含抗衍射性、自重建性以及横向自加速性等与众不同的光学特性^[4-6]。研究发现,在光源能量与接收器的接收能量相同时,与

收稿日期:2022-04-06。

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:62171463)资助。

作者简介:秦蕴仪(1995—),女,江苏南通人,硕士研究生,现就读于陆军工程大学通信工程学院,主要从事无线光通信方面的研究工作。研究生期间的研究方向为自由空间光通信、逆向调制光通信等。

*通信作者:汪井源(1975—),男,博士,副教授,主要从事无线光通信方面的研究工作。



高斯光相比, 艾里光在湍流环境中的抗干扰能力更强、光强闪烁更小, 其良好的光学特性在光通信领域拥有广泛的应用前景^[7]。目前, 针对艾里光的研究主要集中在生成方法、加速轨迹控制、阵列合成自聚焦及大气传输特性等方面, 在光通信中的应用研究较少^[8-9]。因此, 本文对基于艾里光的自由空间光通信系统的性能进行分析。

1 系统和信道模型

1.1 系统模型

本文使用二进制开关键控 (OOK) 调制的点对点 FSO 通信系统, 激光束沿水平路径传播, 穿过具有加性高斯白噪声的湍流信道。系统的工作方式是将艾里光产生器生成的艾里光进行 OOK 调制后发送到大气信道中传输, 该光束被接收天线接收后汇聚到光电检测器表面, 检测器将接收到的光信号转化为电信号。在考虑湍流的影响下, 接收端接收到的电信号 $y^{[10]}$ 可表示为

$$y = \eta I x + n \quad (1)$$

其中, η 为接收机的光/电转换系数, I 为归一化接收光强, x 是发送电信号 (取值为 0 或 1), n 是均值为 0、方差为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声。

1.2 对数正态分布湍流信道模型

对于弱到中等的大气湍流条件, 湍流引起的衰落被假定为一个随机过程, 遵循对数正态分布。对数正态分布湍流信道模型是目前使用最广泛的衰落分布模型之一, 其概率密度函数 (PDF) 表达式^[11]为

$$f_I(I) = \frac{1}{I \sigma_{\ln I} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\ln(I) + \sigma_{\ln I}^2/2]^2}{2\sigma_{\ln I}^2} \right\} \quad (2)$$

其中, $\sigma_{\ln I}^2$ 是光信号的对数光强方差, σ_I^2 是闪烁指数, 两者关系为 $\sigma_{\ln I}^2 = \ln(\sigma_I^2 + 1)$; 弱湍流条件下, $\sigma_{\ln I}^2 \approx \sigma_I^2$, 在下文均以 σ_I^2 代替 $\sigma_{\ln I}^2$ 。

对式 (2) 进行积分, 可得到对数正态分布湍流信道模型的累积分布函数 (CDF) 为

$$F_I(I) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[-\frac{\ln(I) + \sigma_I^2/2}{\sqrt{2\sigma_I^2}} \right] \quad (3)$$

其中, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 是互补误差函数。

已知瞬时信噪比 $\mu = (\eta I)^2 / N_0$, 平均信噪比 $\bar{\mu} = (\eta E[I])^2 / N_0$, 由于 I 为归一化光强, 所以 $E[I] = 1$ 。接收信号瞬时信噪比的概率密度函数 $f_\mu(\mu)$ ^[12] 可表示为

$$f_\mu(\mu) = \frac{1}{2\mu\sigma_I\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\ln(\mu/\bar{\mu}) + \sigma_I^2]^2}{8\sigma_I^2} \right\} \quad (4)$$

通过对式 (4) 进行积分, 可得到 μ 的累积分布函数 CDF 为

$$F_\mu(\mu) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln(\bar{\mu}/\mu) - \sigma_I^2}{2\sqrt{2}\sigma_I} \right] \quad (5)$$

1.3 艾里光的闪烁指数

闪烁指数用来描述光强起伏的大小, 是衡量大气湍流对光通信链路造成的影响的重要参数。2013 年, EYYUBOGLU H T 基于 von-Karman 折射率模型, 采用 Rytov 方法推导出艾里光的闪烁指数^[7,13], 其表达式为

$$\sigma_I^2 = 0.4147 k^2 C_n^2 \int_0^L dp \int_0^{2\pi} d\phi_\kappa \int_0^\infty d\kappa \frac{\kappa \exp[-\kappa^2(l_0/5.92)^2]}{[\kappa^2 + (2\pi/L_0)^2]^{11/6}} \times \\ \left\{ \exp \left(-\frac{2(L-p)}{k\omega_x} \right) \alpha_x \kappa \cos \phi_\kappa \frac{|Ai_{x1}|^2}{|Ai_x|^2} \frac{|Ai_{y1}|^2}{|Ai_y|^2} - \right. \\ \left. \operatorname{Re} \left[\exp \left(-\frac{j(L-p)}{k} \kappa^2 \cos^2 \phi_\kappa \right) \frac{Ai_{x1} Ai_{x2} Ai_{y1} Ai_{y2}}{Ai_x^2 Ai_y^2} \right] \right\} \quad (6)$$

其中,

$$Ai_x = Ai \left(\frac{\rho_x}{\omega_x} + \frac{j\alpha_x L}{k\omega_x} - \frac{L^2}{4k^2 \omega_x^4} \right) \quad (7)$$

$$Ai_y = Ai \left(\frac{\rho_y}{\omega_y} + \frac{j\alpha_y L}{k\omega_y} - \frac{L^2}{4k^2 \omega_y^4} \right) \quad (8)$$

$$Ai_{x1} = Ai \left\{ \frac{\rho_x}{\omega_x} + \frac{1}{2} [j\alpha_x L - \kappa \omega_x (L-p) \cos \phi_\kappa] - \frac{L^2}{4k^2 \omega_x^4} \right\} \quad (9)$$

$$Ai_{x2} = Ai \left\{ \frac{\rho_x}{\omega_x} + \frac{k}{\omega_x} [j\alpha_x L - \kappa \omega_x (L-p) \cos \phi_\kappa] - \frac{k^2 L^2}{4\omega_x^4} \right\} \quad (10)$$

$$Ai_{y1} = Ai \left\{ \frac{\rho_y}{\omega_y} + \frac{1}{2} [j\alpha_y L - \kappa \omega_y (L-p) \sin \phi_\kappa] - \frac{L^2}{4k^2 \omega_y^4} \right\} \quad (11)$$

$$Ai_{y2} = Ai \left\{ \frac{\rho_y}{\omega_y} + \frac{k}{\omega_y} [j\alpha_y L - \kappa \omega_y (L-p) \sin \phi_\kappa] - \frac{k^2 L^2}{4\omega_y^4} \right\} \quad (12)$$

其中, $Ai(\cdot)$ 表示艾里函数, ρ_x 和 ρ_y 为与光源面距离为 L 的接收面上的点坐标, p 为轴向传播距离, ϕ_κ 为方位角, κ 为空间波束的量级, ω_x 和 ω_y 分别表示与艾里光的光束宽度有关的参量, α_x 和 α_y 分别表示与艾里光的指数截断因子有关的参量, C_n^2 为大气折射率结构常量, k 是波数 ($k = 2\pi/\lambda$), l_0 和 L_0 分别代表湍流内尺度、湍流外尺度的大小。根据式 (6) 可以计算出艾里光在传播距离 L 后的接收面上强度最大值处的闪烁指数。

2 基于艾里光的 FSO 通信系统性能

2.1 中断概率

中断概率 P_{out} 代表了瞬时信噪比 μ 低于临界阈值 μ_{th} 的概率, 该阈值对应于接收机的灵敏度极限^[14], 是 FSO 通信链路性能中一个非常关键的指标, 其计算方式如下:

$$P_{\text{out}} = P(\mu \leq \mu_{\text{th}}) = \int_0^{\mu_{\text{th}}} f_{\mu}(\mu) d\mu = F_{\mu}(\mu_{\text{th}}) \quad (13)$$

其中, P 表示概率。根据式(5)求出的累积分布函数 $f_{\mu}(\mu)$, 则中断概率 P_{out} 可以表示为

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln(\bar{\mu}/\mu_{\text{th}}) - \sigma_I^2}{2\sqrt{2}\sigma_I} \right] \quad (14)$$

2.2 平均误码率

误码率是评判通信链路性能的重要参数, 通常衰落信道下平均误码率 $\bar{P}_e$ 的计算可以通过将瞬时误码率 P_e 与接收信号瞬时信噪比的概率密度函数 $f_{\mu}(\mu)$ 相乘求和得到^[15], 即

$$\bar{P}_e = \int_0^{\infty} f_{\mu}(\mu) P_e d\mu \quad (15)$$

其中, 瞬时误码率表示为 $P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\mu}}{2} \right)$, 将式(4)

代入式(15), 可求出平均误码率 $\bar{P}_e$ 为

$$\bar{P}_e = \int_0^{\infty} \frac{1}{2\mu\sigma_I\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln(\mu/\bar{\mu}) + \sigma_I^2)^2}{8\sigma_I^2} \right] \times \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\mu}}{2} \right) d\mu \quad (16)$$

高斯-埃尔米特(Gauss-Hermite)积分运算公式如式(17)所示。

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} f(x) dx = \sum_{i=1}^n w_i f(x_i) \quad (17)$$

根据高斯-埃尔米特积分运算公式, 进一步化简式(16), 得到平均误码率 $\bar{P}_e$ 的表达式为

$$\bar{P}_e = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \exp \left(-\frac{m^2}{8\sigma_I^2} \right) \sum_{i=1}^n w_i \exp \left(\frac{mx_i}{\sqrt{2}\sigma_I} \right) \times \operatorname{erfc} \left[\frac{\exp(\sqrt{2}\sigma_I x_i)}{2} \right] \quad (18)$$

其中, $m = \ln \bar{\mu} - \sigma_I^2$, $\{w_i\}$ 和 $\{x_i\}$ ($i=1, \dots, n$) 分别是式(18)中求积公式对应的高斯-埃尔米特多项式 $R_n(x) = (-1)^n e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} e^{-x^2}$ 的权重和零点, $\{w_i\}$ 的计算方式^[16]如下:

$$w_i = \frac{2^{n-1} n! \sqrt{\pi}}{n [R_{n-1}(x_i)]^2} \quad (19)$$

2.3 平均信道容量

平均信道容量 $\bar{C}$ 代表在大气湍流引起的衰落下 FSO 信道实际可达到的容量, 它是评估链路性能的一个非常重要的指标^[14], 其计算方式为

$$\bar{C} = \int_0^{\infty} B \log_2(1+\mu) f_{\mu}(\mu) d\mu \quad (20)$$

其中, B 是信道带宽。将式(4)代入式(20)得

$$\frac{\bar{C}}{B} = \frac{1}{2\sigma_I\sqrt{2\pi} \ln(2)} \int_0^{\infty} \frac{\ln(1+\mu)}{\mu} \times \exp \left\{ -\frac{[\ln(\mu/\bar{\mu}) + \sigma_I^2]^2}{8\sigma_I^2} \right\} d\mu \quad (21)$$

同理, 根据高斯-埃尔米特积分运算公式, 式(21)可进一步化简为

$$\frac{\bar{C}}{B} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-\frac{m^2}{8\sigma_I^2} \right) \sum_{j=1}^k s_j \exp \left(\frac{mp_j}{\sqrt{2}\sigma_I} \right) \times \log_2[1 + \exp(2\sqrt{2}\sigma_I p_j)] \quad (22)$$

其中, $\{s_j\}$ 和 $\{p_j\}$ ($j=1, 2, \dots, k$) 分别是高斯-埃尔米特多项式的权重和零点。

3 仿真分析

本文将基于艾里光的 FSO 通信系统性能与相同湍流条件、传输距离下的以高斯光为载波的 FSO 通信系统性能进行对比, 同时针对艾里光自身的光束宽度、指数截断因子及传输距离对系统性能的影响进行讨论。假设 x, y 对称, 系统的仿真参数如表 1 所示。

取艾里光的光束宽度 $\omega_c = 2$ cm、指数截断因子 $\alpha_c = 0.5$, 传输距离 L 分别为 1 km、2 km、3 km、4 km 时的系统性能对比情况如图 1 所示。可以看出, 在相同湍流条件及传输距离下, 与基于高斯光的 FSO 通信系统相比, 基于艾里光的 FSO 通信系统的平均误码率和中断概率均更小、平均信道容量更高, 且随着平均信噪比

表 1 仿真参数

参数	数值
波长 λ/nm	1550
大气折射率结构常数 C_n^2/m^{-23}	8.4×10^{-15}
湍流内尺度 l_0	趋于 0
湍流外尺度 L_0	趋于 ∞
指数截断因子 α_c	0.2, 0.5, 1, 1.5, 2
光束宽度 ω/cm	0.8, 1, 1.5, 2, 3
传输距离 L/km	1, 2, 3, 4

的增加,艾里光的优势更加显著;此外,由图 1(a)、图 1(b)可知,当平均信噪比低于 8 dB 时,采用艾里光为载波的 FSO 通信系统的平均误码率几乎不受传输距离的影响,不过此时的误码率较高;随着平均信噪比的增加,系统的平均误码率、中断概率逐渐减小且不同传输距离间的系统性能的差距逐渐增大。当平均信噪比固定时,传输距离越远,系统性能越差。当 $L=1$ km、 $\bar{\mu}=20$ dB 时,基于艾里光的 FSO 通信系统满足 $\bar{P}_e \leq 10^{-6}$ 。此外,平均信道容量与带宽之比随着平均信噪比的增大而增大,且平均信噪比固定时,基于艾里光的 FSO 通信系统比基于高斯光的 FSO 通信系统的平均信道容量受传输距离的影响小。

取艾里光的传输距离 $L=3$ km、指数截断因子 $\alpha_x=0.5$, 光束宽度分别为 0.8 cm、1 cm、1.5 cm、2 cm、3 cm 时的系统性能对比情况如图 2 所示。可以看出,在相同湍流条件及传输距离下,基于艾里光的 FSO 通信系统的性能均优于基于高斯光的 FSO 通信系统性能,且随着平均信噪比的增加,这种优势更加明显。此外,当 $\omega_x=1.5$ cm 时,相较于其它几种光束宽度,基于艾里光

的 FSO 通信系统的性能相对较好,且当 $\bar{\mu}=25$ dB 时,系统可满足 $\bar{P}_e \leq 10^{-6}$,且 $\bar{\mu}/\mu_{th}=25$ 时,能够满足 $P_{out} \leq 10^{-9}$ 。当 $\omega_x=3$ cm 时,此时系统性能相较于其它光束宽度下的系统性能较差。

取艾里光的传输距离 $L=3$ km、光束宽度 $\omega_x=2$ cm,指数截断因子分别为 0.2、0.5、1、1.5、2 时的系统性能对比情况如图 3 所示。可以看出,在湍流条件及传输距离相同时,基于艾里光的 FSO 通信系统的性能指标均优于基于高斯光的 FSO 通信系统,且随着平均信噪比的增加和指数截断因子的减小,以艾里光为载波的链路性能优势体现更显著。此外,当平均信噪比一定时,系统的平均误码率、中断概率随艾里光的指数截断因子的增大而升高,平均信道容量随着指数截断因子的增大而减小。与其它几种指数截断因子相比,当 $\alpha_x=0.2$ 时,平均误码率、中断概率最小,平均信道容量最大,故此时系统的通信性能较好;当 $\bar{\mu}=25$ dB 时,基于艾里光的 FSO 通信系统可满足 $\bar{P}_e \leq 10^{-6}$,且 $\bar{\mu}/\mu_{th}=25$ 时,能够满足 $P_{out} \leq 10^{-9}$ 。

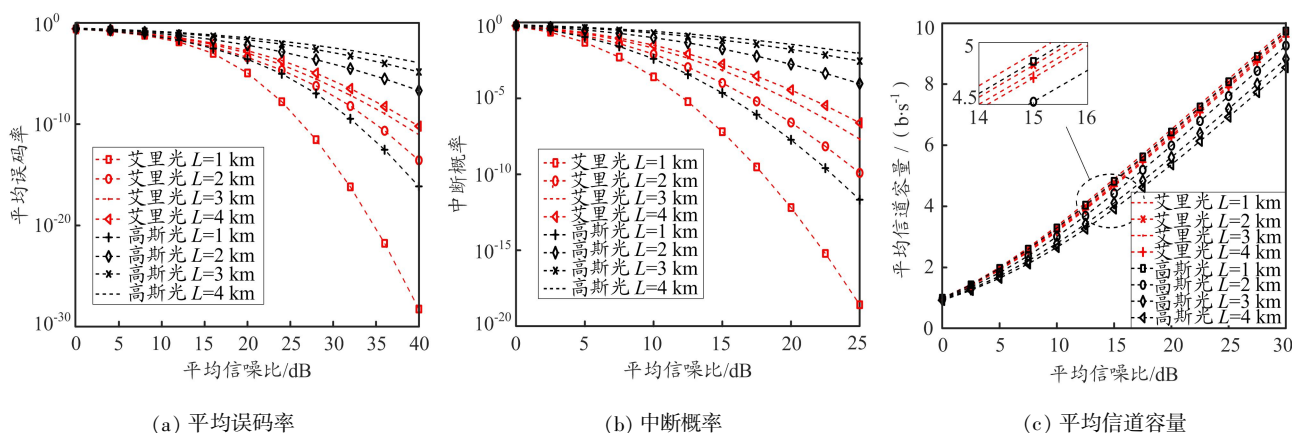


图 1 不同传输距离下,2 种系统的性能指标随信噪比的变化

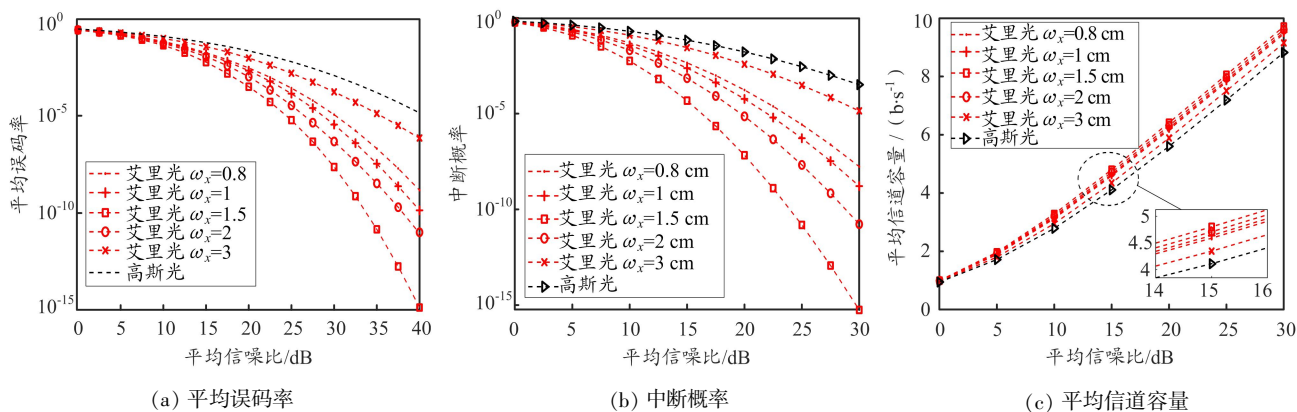


图 2 光束宽度不同时,2 种系统的性能指标随信噪比的变化

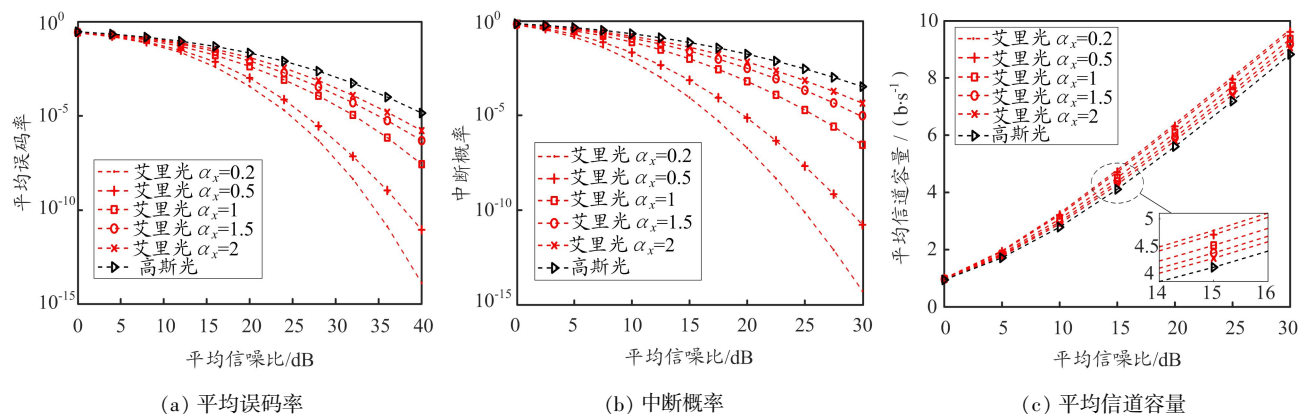


图3 指数截断因子不同时, 2种系统的性能指标随信噪比的变化

4 结束语

本文基于对数正态分布湍流信道模型, 讨论分析了弱湍流环境下以艾里光为信息载波的FSO通信系统的平均误码率、平均信道容量及中断概率。仿真结果表明: 在湍流条件及传输距离相同时, 基于艾里光的FSO通信系统的性能均大大优于基于高斯光的FSO通信系统性能, 且随着平均信噪比的增加, 以艾里光为载波的链路性能优势体现更显著。此外, 关于艾里光自身参数对系统性能影响的分析, 也可对未来艾里光在光通信中的应用提供一定的参考。本文选取了对数正态分布湍流信道模型进行讨论, 下一步工作将进一步研究艾里光在其它湍流信道模型下的通信性能, 以深入分析艾里光在FSO通信系统中的可行性。

参考文献:

- [1] ARUN K M. 先进自由空间光通信[M]. 刘敏, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2021, 8–28.
- [2] KE X Z, WU J L, YANG S J. Research progress and prospect of atmospheric turbulence for wireless optical communication [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(3): 323–339.
- [3] MAHDIEH M H, POURNOURY M. Atmospheric turbulence and numerical evaluation of bit error rate (BER) in free-space communication[J]. Optics&Laser Technology, 2010, 42(1): 55–60.
- [4] DURNIN J. Exact solutions for non-diffracting beams. I. The scalar theory [J]. Journal of the Optical Society of America A-optics Image Science and Vision, 1987, 4(4): 651–654.
- [5] BROKLY J, SIVILOGLOUG A, DOGARIU A, et al. Self-healing properties of optical Airy beams[J]. Opt. Express, 2008, 16: 12880–12891.
- [6] 吴疆苗, 林海笑, 黄国金, 等. Airy 光束横向加速特性的实验研究[J]. 激光杂志, 2014, 35(9): 11–13.
- [7] EYYUBOLU H T. Scintillation behavior of airy beam [J]. Opt. Laser Tech., 2013, 47: 232–236.
- [8] 楚兴春, 赵尚弘, 程振, 等. 艾里光束研究进展及其用于 FSO 系统的可行性分析[J]. 科学通报, 2016, 61: 1963–1974.
- [9] CHU X C, LIU R J, LI Y, et al. BER analysis of FSO system with airy beam as carrier over exponentiated weibull channel model[J]. Optical Quantum Electronics, 2021, 53(12): 1–13.
- [10] SANDALIDIS H G, TSIFTIS T A. Outage probability and ergodic capacity of free-space optical links over strong turbulence[J]. Electronics Letters, 2008, 44(1): 46–47.
- [11] MAJUMDAR A K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel [J]. Journal of Optical and Fiber Communications Research, 2005(2): 345–396.
- [12] ZHU X, KAHN J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(8): 1293–1300.
- [13] 王加安, 王馨兰, 郭林杨, 等. 艾里光束的光强闪烁研究[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 247–254.
- [14] 吴琰, 梅海平, 魏合理. 联合信道条件下自由空间光通信系统性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 100–106.
- [15] 陈泉润, 余翔, 崔文楠, 等. 基于中短距离星间链路的可见光通信及性能分析[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 102–112.
- [16] PRESSWH, TEUKOLSKY S A, VETTERLING W T, et al. Numerical recipes in C: the art of scientific computing[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.