

湍流信道下指向误差对自适应副载波调制性能的影响

陈丹*, 鲁萌萌, 刘艳蓉

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 基于未对准衰落(即指向误差)和 Malaga 湍流分布的联合概率密度函数,采用 Meijer G 函数推导自适应多进制相移键控(MPSK)调制系统的平均误比特率和中断概率渐近表达式。接收机半径一定时,通过调整光束束腰半径和抖动标准差参数值,可获得系统最优误比特率。当束腰半径与接收机半径之比 $w_z/a=10$ 且抖动标准差与接收机半径之比 $\sigma_s/a=1.5$ 时,非自适应二进制相移键控(BPSK)系统平均误比特率曲线下降最快;而 $w_z/a=5$, $\sigma_s/a=1.5$ 时,自适应 MPSK 系统频谱效率和平均误比特率均达到最优。当未对准衰落一定且平均电信噪比较小时,自适应系统平均误比特率和中断概率主要受未对准衰落影响,但随着平均电信噪比的增加,受湍流的影响增大。

关键词 光通信; 无线光通信; Malaga 湍流; 未对准衰落; 自适应调制; 频谱效率; 平均误比特率

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2206004

Effect of Pointing Error on Adaptive Subcarrier Modulation Performance in Turbulent Channel

Chen Dan*, Lu Mengmeng, Liu Yanrong

School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Meijer G function is used to derive asymptotic expressions of average bit error rate and outage probability of adaptive M-ary phase-shift keying (MPSK) modulation system based on joint probability density function of misaligned fading (i. e., pointing error) and Malaga turbulence distribution. When receiver radius is fixed, the optimal bit error rate can be obtained by adjusting the beam waist radius and jitter standard deviation. When the ratio of the beam waist radius to the receiver radius is $w_z/a=10$ and jitter standard deviation to the receiver radius is $\sigma_s/a=1.5$, the average bit error rate curve of non-adaptive binary phase-shift keying (BPSK) system drops the fastest. The average bit error rate and spectral efficiency of the adaptive MPSK system are both optimal when $w_z/a=5$ and $\sigma_s/a=1.5$. When the misaligned fading is constant and average electric signal-to-noise ratio is small, the average bit error rate and outage probability of adaptive system are mainly affected by the misaligned fading, but with the increase in the average electric signal-to-noise ratio, the influence of turbulence increases.

Key words optical communications; wireless optical communication; Malaga turbulence; misalignment fading; adaptive modulation; spectral efficiency; average bit error rate

OCIS codes 060.2330; 010.1330

1 引 言

与传统射频通信相比,自由空间光(FSO)通信系统可解决射频通信系统的频谱昂贵和稀缺等问题,其链路具有更强的安全性、高数据速率、低成本、无许可证等优点^[1-2]。FSO 通信系统在被应用于 5G 通信网络的大容量回程传输时具有明显优势^[3],

但是 FSO 通信链路在实际应用时受到阻碍。一是大气条件会对 FSO 通信产生影响,温度、高度及压力会导致传播中的光信号发生随机折射率变化,进而导致严重的信号损失,即大气湍流;二是指向误差,即建筑物的抖动、大气湍流、光学设备的对准误差和机械振动等因素影响而产生的信号损失^[4]。

当信号在链路上进行传输时,由于大气湍流和

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-07-23; 录用日期: 2020-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61771385)、陕西省重点研发计划(2020GY-036)、西安市科技计划(2019217814GXRC014CG015-GXYD14. 21)

* E-mail: chdh@xaut.edu.cn

指向误差的影响,FSO 通信系统性能显著下降。为提高 FSO 链路通信的可靠性,需要建立有效的复合大气信道数学模型,即大气湍流和指向误差引起的辐照度变化的概率密度函数(PDF)等。目前描述 FSO 大气湍流信道的模型较多,如对数正态分布^[5-6]、负指数分布^[7]、Gamma-Gamma 分布^[8-10]及 K 分布^[11],但是大多数研究仅限于一种特定的模型。Jurado-Navas 等^[12]研究了一种广义的 Malaga 湍流信道分布模型,可以通过调整该信道模型概率密度函数的参数来描述常见的湍流分布。

影响 FSO 链路通信可靠性的条件会随机变化,固定传输方式无法在实际环境中使用,因此需要采用自适应传输技术。自适应传输具有时变性,可在变化的湍流和指向误差条件下传输更高的数据速率,且性能不会因为频谱效率的提高而下降。FSO 通信系统目前常见的调制方式有关键控(OOK)调制^[13-15]、脉冲调制(PM)^[16-17]、副载波调制^[18]。副载波调制属于连续波调制,可以有效抑制大气湍流的影响^[19]。

Farid 等^[20]研究了在 Gamma-Gamma 湍流和指向误差影响下,通过优化光束宽度来提高非自适应系统性能的内容。Jurado-Navas 等^[21]在 Malaga 湍流和未对准影响下,推导了 OOK 调制系统的平均误码率渐近表达式,但是未讨论自适应调制 FSO 通信系统的性能。Chen 等^[22]研究了在 Malaga 湍流信道影响下的自适应副载波多进制相移键控(MPSK)和 M 进制差分相移键控(MDPSK)调制的平均误比特率和频谱效率,但是未考虑系统受指向误差的影响。Alheadary 等^[23]基于矩形正交振幅调制(R-QAM)调制,在 Malaga 湍流信道和未对准影响下,将联合概率密度函数转换为广义函数形式,给出自适应系统的频谱效率和误比特率渐近表达式,但没有对系统的自适应频谱效率和中断概率进行数值分析。

本文在 Malaga 湍流和未对准衰落联合影响下,采用 Meijer G 函数推导了自适应 MPSK 调制系统自适应频谱效率、自适应平均误比特率及中断概率的渐近表达式,对比分析了在不同光强起伏、抖动偏差及束腰半径下的非自适应二进制相移键控(BPSK)和自适应 MPSK 系统性能。

2 系统模型

采用 FSO 通信系统中广泛应用的强度调制直接检测方式。发射机发送的光信号经过大气信道时受湍流和未对准的影响,接收到的光信号转换为光

电流,去除背景光照度产生的直流偏置后,可以建立模型^[24],表达式为

$$y = xI + n, \quad (1)$$

式中: x 为发射光强; y 为接收的电信号; n 为系统加性高斯白噪声,方差为 σ_n^2 。根据文献^[25],假设离轴闪烁在视轴位移点附近缓慢变化,可以使用闪烁指数的恒定值来表征大气湍流,因此大气湍流和指向误差相互独立。 I 为信道衰落系数,所提系统模型包括两部分:表征大气湍流衰落的随机变量 I_a ,表征几何扩展和指向误差(抖动)的随机变量 I_p ,且有 $I = I_a I_p$ 。

3 信道建模

3.1 大气湍流分布模型

电磁波在大气湍流中传播时,折射率是随机分布的,波的部分能量会被散射。在接收端的系统,其波的能量主要包含三个部分,即视距(LOS)传播分量、耦合到视距分量、独立散射分量。Malaga 湍流模型可以描述几类不同湍流强度分布模型,包括对数正态分布、Gamma-Gamma 分布、负指数分布等。基于电磁波在湍流大气中传播的物理模型,Malaga 分布湍流光强 I_a 的概率密度函数^[12]定义为

$$f_{I_a}(I_a) = A \sum_{k=1}^{\beta} a_k I_a^{\frac{\alpha+k}{2}-1} K_{\alpha-k} \left(2 \sqrt{\frac{\alpha \beta I_a}{\gamma \beta + \Omega'}} \right), \quad (2)$$

$$A = \frac{2\alpha^{\frac{\alpha}{2}}}{\gamma^{1+\frac{\alpha}{2}} \Gamma(\alpha)} \left(\frac{\gamma \beta}{\gamma \beta + \Omega'} \right)^{\beta+\frac{\alpha}{2}}, \quad (3)$$

$$a_k = \binom{\beta-1}{k-1} \frac{(\gamma \beta + \Omega')^{1-\frac{k}{2}} (\Omega')^{k-1} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{k}{2}}}{(k-1)!}, \quad (4)$$

式中: α 为正参数,与大尺度湍流相关; β 为自然数,表征衰落量; $\binom{\beta}{k}$ 为二项式系数; $K_\nu(\cdot)$ 是 ν 阶的第二类修正贝塞尔函数;视距传播独立散射分量 U_S^G 的平均功率为 $\gamma = E[|U_S^G|^2] = 2b_0(1-\rho)$;总散射部分的平均功率为 $2b_0 = E[|U_S^C|^2 + |U_S^G|^2]$; ρ 为耦合到视距部分的散射功率大小,取值范围为 $0 \leq \rho \leq 1$;相干平均功率 $\Omega' = \Omega + 2\rho b_0 + 2\sqrt{2b_0\Omega\rho} \cdot \cos(\varphi_A - \varphi_B)$, φ_A 和 φ_B 分别为视距传播分量和视距传播耦合分量的相位, Ω 为视距分量的平均功率。

3.2 未对准衰落模型

信道衰落系数 I 可以表示为湍流引起的光强闪烁、几何扩散和指向误差两部分随机变量的乘积,其中指向精度对系统性能具有重要影响。由于建筑物的摇摆、风载和热膨胀,接收机处的信号会出现衰

退。假设光束束腰为高斯分布,其半径为 w_z ,则在传输距离 z 处的光强^[21]为

$$I_{\text{beam}}(\boldsymbol{p}; z) = \frac{2}{\pi w_z^2} \exp\left(-\frac{2 \|\boldsymbol{p}\|^2}{w_z^2}\right), \quad (5)$$

式中: \boldsymbol{p} 为来自光束中心的径向矢量。考虑半径 a 的圆形检测孔径和接收机 I_{beam} 的高斯光束轮廓,当存在指向误差 \boldsymbol{r} 时,半径为 a 的接收机接收的光功率可以近似为高斯形式,表达式为

$$h_p(\boldsymbol{r}; z) \approx A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w_{\text{zeq}}^2}\right), \quad (6)$$

式中: $r = \|\boldsymbol{r}\|$ 为径向距离,由于光束形状和探测器面积对称,因此 h_p 的大小只取决于 r ; A_0 为 $r=0$ 处的部分接收功率,且 $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$, $v = \sqrt{\pi} a / (\sqrt{2} w_z)$; 等效光束宽度的平方为 $w_{\text{zeq}}^2 = w_z^2 \sqrt{\pi} \cdot \text{erf}(v) / 2v \exp(-v^2)$, $\text{erf}(\cdot)$ 为误差函数。

考虑仰角和水平位移(摇摆)呈独立相同高斯分布,则接收机径向位移 r 服从瑞利分布:

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad r > 0, \quad (7)$$

式中: σ_s^2 为接收机的抖动方差。则 I_p 的概率密度函数^[21]可表示为

$$f_{I_p}(I_p) = \frac{g^2}{A_0^2} I_p^{g^2-1}, \quad 0 \leq I_p \leq A_0, \quad (8)$$

式中: $g = w_{\text{zeq}} / 2\sigma_s$, 是接收机等效光束半径 w_{zeq} 与指向误差位移标准差(或抖动标准差) σ_s 的比值。

3.3 复合信道统计模型

未对准下大气湍流引起的衰落为

$$f_I(I) = \int f_{I|I_a}(I | I_a) f_{I_a}(I_a) dI_a, \quad (9)$$

式中: $f_{I|I_a}(I | I_a)$ 为湍流下的条件概率密度函数,表达式为

$$f_{I|I_a}(I | I_a) = \frac{1}{I_a} f_{I_p}\left(\frac{I}{I_a}\right), \quad 0 \leq I \leq A_0 I_a. \quad (10)$$

将(8)、(10)式代入(9)式,采用 Meijer G 函数运算性质,则湍流和未对准情况下的信道联合概率密度函数渐近表达式^[26]为

$$f_I(I) = \frac{g^2 A}{2} I^{-1} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'}\right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} \cdot G_{1,3}^{3,0} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \times \frac{I}{A_0} \middle| \frac{g^2 + 1}{g^2}, \alpha, k\right). \quad (11)$$

4 未对准和大气湍流影响下的系统性能

4.1 非自适应副载波 MPSK 调制平均误比特率

FSO 通信系统在未对准和大气湍流影响下,采用副载波 MPSK 调制,则系统平均误比特率表达式^[19]为

$$R_{\text{BE}}(M) = \int_0^{\infty} R_{\text{BE}}(M, I) f_I(I) dI, \quad (12)$$

$$R_{\text{BE}}(M, I) = \frac{2}{\log_2 M} Q \left[I \sqrt{2\bar{r}} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \right], \quad (13)$$

式中: $Q(\cdot)$ 为高斯函数; M 为调制阶数; \bar{r} 为平均电信噪比(SNR)。

将(13)式代入(12)式,采用 Meijer G 函数(07.34.03.0619.01)^[27]得到系统平均误比特率为

$$R_{\text{BE}}(M) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi} \log_2 M} G_{1,2}^{2,0} \left[\bar{r} I^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right) \middle| \frac{1}{0}, \frac{1}{2} \right] f_I(I) dI. \quad (14)$$

将未对准和大气湍流影响下的联合概率密度函数(11)式代入(14)式,采用 Meijer G 函数(07.34.21.0013.01)^[27]进一步化简,可以得到系统平均误比特率为

$$R_{\text{BE}}(M) = \frac{g^2 A}{4\pi^{3/2} \log_2 M} \sum_{k=1}^{\beta} a_k 2^{\alpha+k-2} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'}\right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} \times G \left[\frac{16\bar{r} \sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right) A_0^2}{\left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'}\right)^2} \middle| \frac{1-g^2}{2}, \frac{2-g^2}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-k}{2}, \frac{2-k}{2}, 1 \right]_{0, \frac{1}{2}, -\frac{g^2}{2}, \frac{1-g^2}{2}}. \quad (15)$$

4.2 自适应副载波 MPSK 调制

自适应调制阶数有 N 种选择 $\{M_1, M_2, \dots, M_N\}$, 阶数的选择取决于大气信道的光强瞬时衰落状态 I 和系统目标误比特率 $R_{\text{BE}0}$ 。将 I 的范围划分

为 N 个区域,并且每个区域都与调制阶数 M_j 相关,规则^[22]如下

$$M = M_j = 2^j, \quad I_j \leq I < I_{j+1}, \quad j = 1, \dots, N, \quad (16)$$

式中:光强衰落值 I_j 的表达式见文献[22]。

4.2.1 频谱效率

自适应传输系统的频谱效率为单位带宽传输数据的速率,其表达式^[22]为

$$S = \frac{C}{W} = \frac{\bar{n}}{2}, \quad (17)$$

式中: C 为数据传输速率,单位为 bit/s; W 为传输信息所需要的带宽,单位为 Hz; \bar{n} 为传输的平均比特数。 \bar{n} 的表达式为

$$\bar{n} = \sum_{j=1}^N b_j \log_2 M_j, \quad (18)$$

$$b_j = \Pr\{I_j \leq I < I_{j+1}\} = \int_{I_j}^{I_{j+1}} f_I(I) dI = F_I(I_{j+1}) - F_I(I_j), \quad (19)$$

式中: $\Pr\{\cdot\}$ 为光强 I 在区域为 $I_j \leq I < I_{j+1}$ 的概率;未对准和大气湍流联合影响下的光强 I 的分布

函数 $F_I(I_j) = \int_0^{I_j} f_I(I) dI$ 。

将(11)式代入 $F_I(I_j)$ 的表达式,可得到未对准和大气湍流影响下的分布函数为

$$F_I(I_j) = \int_0^{I_j} \frac{g^2 A}{2} I^{-1} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} G_{1,3}^{3,0} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \times \frac{I}{A_0} \middle| \begin{matrix} g^2 + 1 \\ g^2, \alpha, k \end{matrix} \right) dI. \quad (20)$$

采用 Meijer G 函数(07.34.21.0084.01)^[27],可以将(20)式转换为

$$F_I(I_j) = \frac{g^2 A}{2} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} G_{2,4}^{3,1} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \times \frac{I_j}{A_0} \middle| \begin{matrix} 1, g^2 + 1 \\ g^2, \alpha, k, 0 \end{matrix} \right), \quad (21)$$

式中: $F_I(I_j)$ 为光强 I 的分布函数,且 $F_I(I_{N+1}) \rightarrow 1$ 。将(21)式代入(18)式,则可得系统传输的平均比特数为

$$\bar{n} = N - \sum_{j=1}^N \frac{g^2 A}{2} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} G_{2,4}^{3,1} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \times \frac{I_j}{A_0} \middle| \begin{matrix} 1, g^2 + 1 \\ g^2, \alpha, k, 0 \end{matrix} \right). \quad (22)$$

将(22)式代入(17)式,则推导出的自适应频谱效率为

$$S = \frac{N - \sum_{j=1}^N \frac{g^2 A}{2} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} G_{2,4}^{3,1} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \times \frac{I_j}{A_0} \middle| \begin{matrix} 1, g^2 + 1 \\ g^2, \alpha, k, 0 \end{matrix} \right)}{2}. \quad (23)$$

4.2.2 自适应平均误比特率

无线光通信系统自适应副载波 MPSK 调制系统的平均误比特率^[22]为

$$R_{BE} = \frac{\bar{n}_{err}}{\bar{n}} = \frac{\sum_{j=1}^N \langle R_{BE} \rangle_j \log_2 M_j}{\bar{n}}, \quad (24)$$

$$\langle R_{BE} \rangle_j = \int_{I_j}^{I_{j+1}} R_{BE}(M_j, I) f_I(I) dI, \quad (25)$$

式中: \bar{n}_{err} 为平均比特数中错误的比特数。将副载波 MPSK 调制误比特率(13)式与大气湍流和未对准影响下的联合概率密度函数(11)式代入(25)式中,则在 Malaga 湍流和未对准联合影响下, $\langle R_{BE} \rangle_j$ 为

$$\langle R_{BE} \rangle_j = \frac{g^2 A}{2 \log_2 M_j} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} \times \int_{I_j}^{I_{j+1}} \operatorname{erfc} \left(I \sqrt{r} \sin \frac{\pi}{M_j} \right) I^{-1} G_{1,3}^{3,0} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \times \frac{I}{A_0} \middle| \begin{matrix} g^2 + 1 \\ g^2, \alpha, k \end{matrix} \right) dI. \quad (26)$$

将(26)式和(22)式代入系统平均误比特率(24)式,则在 Malaga 大气湍流信道和未对准影响下的自适应平均误比特率为

$$R_{BE} = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{g^2 A}{2} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} \int_{I_j}^{I_{j+1}} \operatorname{erfc} \left(I \sqrt{r} \sin \frac{\pi}{M_j} \right) I^{-1} G_{1,3}^{3,0} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \times \frac{I}{A_0} \middle| \begin{matrix} g^2 + 1 \\ g^2, \alpha, k \end{matrix} \right) dI}{N - \sum_{j=1}^N \frac{g^2 A}{2} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} G_{2,4}^{3,1} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \times \frac{I_j}{A_0} \middle| \begin{matrix} 1, g^2 + 1 \\ g^2, \alpha, k, 0 \end{matrix} \right)}. \quad (27)$$

4.2.3 中断概率

中断概率是衡量 FSO 通信系统可靠性的重要因素, 即当 $I < I_1$ 时, 自适应调制通信系统传输产生中断。系统中断概率的表达式^[19]为

$$P_{\text{out}} = \int_0^{I_1} f_I(I) dI, \quad (28)$$

式中: $I_1 = \sqrt{1/2r} \times Q^{-1}(R_{\text{BER}})$; $Q(\cdot)^{-1}$ 为高斯 Q 函数的反函数。将未对准和大气湍流影响下的联合概率密度函数(11)式代入(28)式, 可得自适应调制系统的中断概率为

$$P_{\text{out}} = \frac{g^2 A}{2} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} \int_0^{I_1} I^{-1} G_{1,3}^{3,0} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \times \frac{I}{A_0} \middle| g^2 + 1 \right) dI. \quad (29)$$

采用 Meijer G 函数(07.34.21.0084.01)^[27], 则中断概率可推导为

$$P_{\text{out}} = \frac{g^2 A}{2} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} G_{2,4}^{3,1} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \times \frac{I_1}{A_0} \middle| 1, g^2 + 1 \right). \quad (30)$$

5 数据结果及分析

对 Malaga 分布的概率密度函数进行参数设置以表示不同的湍流信道, 即对数正态分布信道、Gamma-Gamma 分布信道及 K 分布信道, 分析了不同光强起伏方差、光束束腰半径及抖动标准差对自适应调制的平均误比特率、频谱效率及中断概率特性的影响, 并对三种湍流信道下调制特性受影响程度的大小进行对比。

5.1 非自适应平均误比特率

未对准衰落效应(或指向误差效应)对系统平均误比特率的影响主要是光束束腰和抖动标准差。图 1 是在未对准衰落和大气湍流情况下, 光束束腰半径对非自适应 BPSK 系统平均误比特率的影响。其中, Malaga 湍流信道取 Gamma-Gamma 分布光强起伏方差($\sigma_I^2 = 0.5$), 参数取值如文献[22]中的表 1 所示, 抖动标准差 $\sigma_s = 0.3$ m, 接收机半径 $a = 0.1$ m, 光束束腰半径与接收机半径比值分别取 $w_z/a = 5, 10, 15, 20, 25$ 。

由图 1 可知, 当 SNR 为 60 dB、 $w_z/a = 5$ 时, 非自适应系统平均误比特率为 3.7×10^{-2} , $w_z/a = 25$ 时非自适应系统平均误比特率为 5.6×10^{-2} , 而 $w_z/a = 10$ 时为 3.5×10^{-3} 。当接收机半径固定时, w_z/a 值越大, 光束束腰半径越大。当光束束腰半径大于接收机半径时, 接收机接收到的光束不再增多, 落在接收机外的光束增多, 因此系统的平均误比特率会增大。为获得更好的非自适应平均误比特率性能, 可以使用较窄波束宽度提高接收信号的功率, 但当波束宽度较窄时, 失调效应的增强又会导致通信中断, 因此 $w_z/a = 5$ 时的非自适应平均误比特率

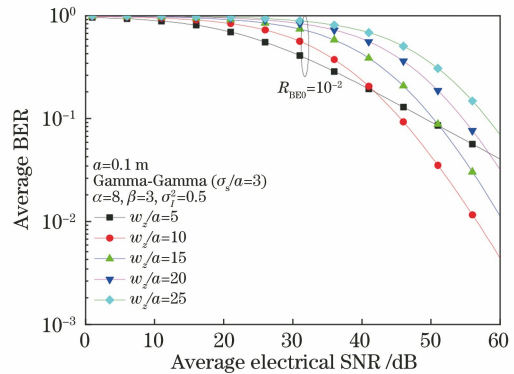


图 1 w_z/a 取值变化时 BPSK 系统的平均误比特率
Fig. 1 Average BER of BPSK system with changing w_z/a value

比 $w_z/a = 10$ 时的大, 因此存在一个最佳的 w_z/a , 从而获得最优平均误比特率。

图 2 是在未对准衰落和大气湍流效应情况下, 抖动标准差对非自适应 BPSK 系统平均误比特率的影响。因为由图 1 可知, 当 $w_z/a = 10$ 时, 非自适应平均误比特率曲线随 SNR 增大下降最快, 所以研究抖动标准差对非自适应平均误比特率的影响时取 $w_z/a = 10$ 。Malaga 湍流信道取 Gamma-Gamma 分布($\sigma_I^2 = 0.5$), 抖动标准差与接收机半径的比值分别取 $\sigma_s/a = 1.5, 2, 3$ 。由图 2 可知, 在 SNR 为 60 dB、 $\sigma_s/a = 1.5$ 时, 非自适应系统平均误比特率为 1.0×10^{-3} , $\sigma_s/a = 3$ 时非自适应系统平均误比特率为 3.5×10^{-3} 。抖动标准差对接收机的接收光功率有影响, 当抖动标准差逐渐增大时, 光斑的漂移情况加重, 即大量光束不能被接收机接收, 因此随着抖动标准差 σ_s 的增大, 非自适应 BPSK 系统平均误比特率增大。

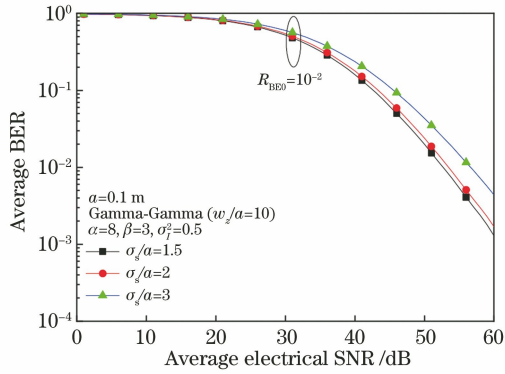


图 2 非自适应 BPSK 系统的平均误比特率随 σ_s 的变化

Fig. 2 Average BER of non-adaptive BPSK system varying with σ_s value

图 3 是在未对准衰落和大气湍流情况下, $w_z/a = 10$ 且 $\sigma_s/a = 1.5$ 时, 不同湍流分布下光强起伏方差对非自适应 BPSK 系统平均误比特率的影响。其中 Malaga 信道取 Lognormal($\sigma_l^2 = 0.2$)、Gamma-Gamma($\sigma_l^2 = 0.5$ 和 $\sigma_l^2 = 0.8$) 及 K 分布($\sigma_l^2 = 2$) 三种湍流分布。当平均电 SNR 为 40 dB 时, Lognormal 分布($\sigma_l^2 = 0.2$) 的非自适应平均误比特率为 4.6×10^{-2} ; Gamma-Gamma 分布($\sigma_l^2 = 0.5$) 的非自适应平均误比特率为 1.3×10^{-1} 和 Gamma-Gamma 分布($\sigma_l^2 = 0.8$) 的非自适应平均误比特率为 1.8×10^{-1} ; K 分布($\sigma_l^2 = 2$) 的非自适应平均误比特率为 3.2×10^{-1} 。因此当 w_z/a 和 σ_s/a 一定时, 非自适应系统平均误比特率随着光强起伏的增大而增大, 湍流对系统平均误比特率影响显著。

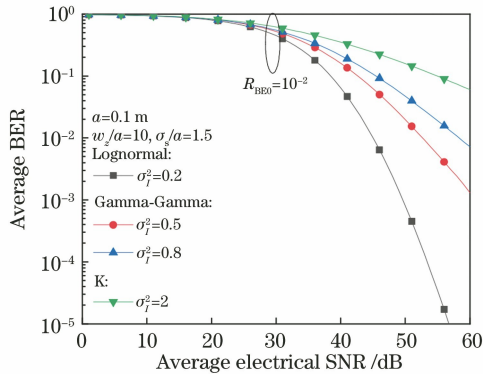


图 3 光强起伏方差对非自适应 BPSK 系统平均误比特率的影响

Fig. 3 Influence of light intensity fluctuation variance on average BER of non-adaptive BPSK system

5.2 自适应副载波 MPSK 调制系统特性

5.2.1 自适应频谱效率

图 4 是当目标误比特率为 $R_{BE0} = 10^{-2}$ 时, 在未对准衰落和大气湍流效应情况下, 抖动标准差和光

束束腰半径对自适应 MPSK 调制频谱效率的影响。Malaga 湍流信道取 Gamma-Gamma 分布($\sigma_l^2 = 0.8$)。由图 4 可知: 当抖动标准差一定时, 随着光束束腰半径的增大, 系统频谱效率初始增加速度缓慢, 到达最大频谱效率时平均电 SNR 明显增大; 当光束束腰半径一定时, 随着抖动标准差的增大, 频谱效率达到最大值后变得缓慢。因此参数 w_z/a 影响频谱效率的初始增加速度, σ_s/a 影响频谱效率达到最大值的速度。当 $w_z/a = 5$ 且 $\sigma_s/a = 1.5$ 时, 系统自适应频谱效率初始增加速度和达到最大值的速度最快, 因此后续研究中选取 $w_z/a = 5, \sigma_s/a = 1.5$ 。

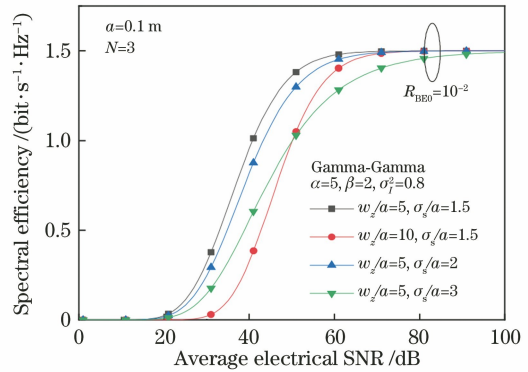


图 4 Gamma-Gamma 分布下自适应 MPSK 系统频谱效率

Fig. 4 Spectral efficiency of adaptive MPSK system under Gamma-Gamma distribution

图 5 是当目标误比特率为 $R_{BE0} = 10^{-2}$ 时, 在未对准衰落和大气湍流情况下, 不同湍流分布下自适应 MPSK 系统的频谱效率。由图 5 可知, 随着光强起伏方差的增加, 频谱效率的初始增加速度降低, 到达最大值 $1.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 后速度还在降低。在平均电 SNR 较小时, 光束束腰半径对自适应调制频谱效率的影响最大, 其次是光强起伏方差, 抖动标准差影响相对较小。对于弱湍流($\sigma_l^2 = 0.2$), 当 SNR 为 60 dB 时, 不同束腰半径及抖动标准差下的自适应系统频谱效率均趋于最大值 $1.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$; 但对于强湍流($\sigma_l^2 = 2$) 情况, 频谱效率达到最大值需要更大的平均电 SNR。

5.2.2 自适应平均误比特率

图 6 是当目标误比特率为 $R_{BE0} = 10^{-3}$ 时, 在 Malaga 湍流和未对准衰落情况下, 光束束腰半径和抖动标准差对自适应 MPSK 系统平均误比特率的影响。Malaga 湍流信道采用 Gamma-Gamma 分布($\sigma_l^2 = 0.8$)。由图 6 可知, 当抖动标准差一定($\sigma_s/a = 1.5$) 时, 束腰半径对自适应系统平均误比特率的影响显著增大。在 SNR 为 45 dB、束腰半径与接

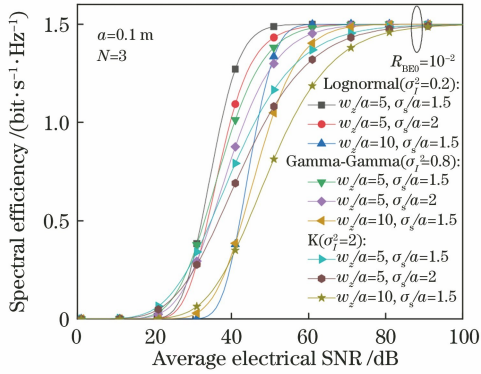


图 5 不同湍流分布下自适应 MPSK 系统频谱效率

Fig. 5 Spectral efficiency of adaptive MPSK system under different turbulence distributions

收机半径比值取 $w_z/a=5$ 时,系统平均误比特率为 7.9×10^{-5} ,而 $w_z/a=10$ 时为 9.3×10^{-5} ,同时,自适应系统平均误比特率明显小于非自适应系统平均误比特率(9.1×10^{-2} ,由图 3 可得)。另一方面,当束腰半径一定($w_z/a=5$)时,随着平均电 SNR 增大到大于 40 dB 后,抖动标准差对自适应系统平均误比特率的影响显著。因此, w_z/a 对自适应系统平均误比特率影响明显大于抖动标准差的影响。

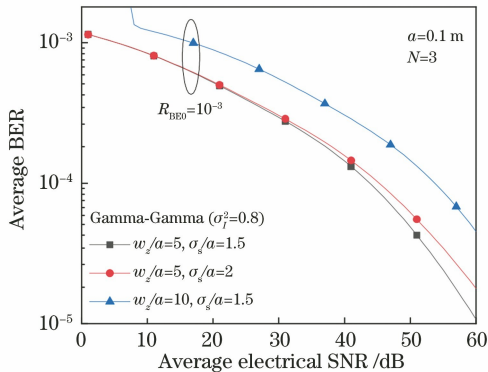


图 6 光束束腰半径和抖动标准差对自适应 MPSK 系统平均误比特率的影响

Fig. 6 Influence of beam waist radius and jitter standard deviation on average BER of adaptive MPSK system

图 7 是当目标误比特率 $R_{BE0}=10^{-3}$ 时,在大气湍流和未对准衰落情况下,调制阶数对自适应 MPSK 系统的平均误比特率的影响。Malaga 湍流信道取 Lognormal 分布 ($\sigma_1^2=0.2$)、Gamma-Gamma 分布 ($\sigma_1^2=0.8$)、K 分布 ($\sigma_1^2=2$)。由图 7 可知,在平均电 SNR 较小时,自适应系统平均误比特率受湍流影响小,当 SNR 大于 40 dB 时,湍流对平均误比特率的影响显著增大。在一定的 σ_1^2 、束腰半径 w_z 及抖动标准差 σ_s 下,平均误比特率随调制阶数 ($M=2^N$) 增大而增大。

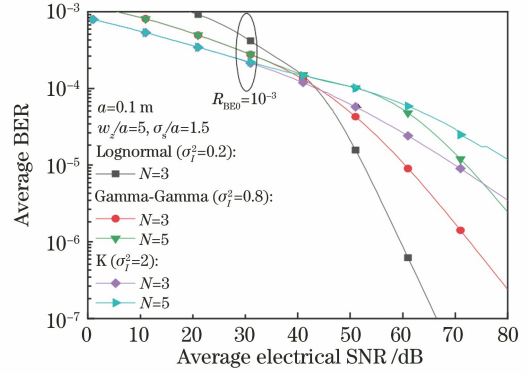


图 7 调制阶数对自适应系统平均误比特率的影响

Fig. 7 Influence of modulation order on average BER of adaptive system

5.2.3 中断概率

图 8 是当目标误比特率为 $R_{BE0}=10^{-2}$ 时,在大气湍流和未对准衰落情况下,自适应 MPSK 调制系统的中断概率。Malaga 信道取 Lognormal 分布 ($\sigma_1^2=0.2$)、Gamma-Gamma 分布 ($\sigma_1^2=0.8$)、K 分布 ($\sigma_1^2=2$)。由图 8 可知,与抖动标准差相比,光束束腰半径对中断概率的影响更大。在任何湍流强度信道下,平均电 SNR 为 55 dB 时, $w_z/a=5$ 且 $\sigma_s/a=1.5$ 参数取值下的自适应系统中断概率最优。

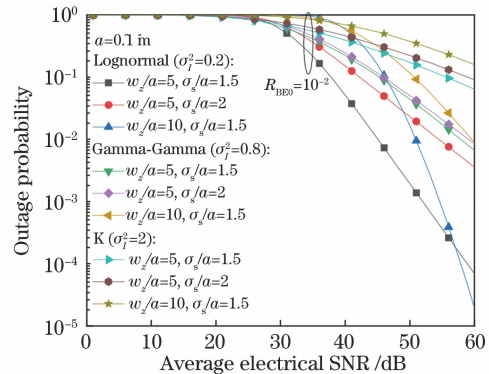


图 8 自适应 MPSK 调制的中断概率

Fig. 8 Outage probability of adaptive MPSK modulation

6 结 论

在 Malaga 湍流信道和未对准衰落影响下,研究了无线光自适应副载波 MPSK 调制系统的频谱效率、平均误比特率及中断概率。通过调整光束束腰半径和抖动标准差,FSO 通信系统性能达到最佳。当 SNR 为 60 dB 时,与 $w_z/a=25, \sigma_s/a=3$ 比较, $w_z/a=10, \sigma_s/a=1.5$ 时的非自适应系统平均误比特率由 5.6×10^{-2} 下降为 1.0×10^{-3} 。当 $w_z/a=5, \sigma_s/a=1.5$ 时,中至强湍流的自适应频谱效率在 SNR 为 70 dB 达到平稳,而自适应平均误比特率

在 SNR 为 45 dB 时为 7.9×10^{-5} 。随着光强起伏方差的增加,频谱效率的初始增加速度降低,达到最大值后的速度还在降低,同时自适应平均误比特率增大。光束束腰半径对自适应系统平均误比特率和中断概率的影响均大于抖动标准差的影响,此外,自适应平均误比特率随自适应调制阶数增大而增加。

参 考 文 献

- [1] Ghassemlooy Z, Uysal M, Khalighi M A, et al. An overview of optical wireless communications [M]// Uysal M, Capsoni C, Ghassemlooy Z, et al. Optical wireless communications. Signals and communication technology. Cham: Springer, 2016: 1-23.
- [2] Anbarasi K, Hemanth C, Sangeetha R G. A review on channel models in free space optical communication systems [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 97: 161-171.
- [3] Alzenad M, Shakir M Z, Yanikomeroglu H, et al. FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1): 218-224.
- [4] Wang H X, Song B, Wu X J, et al. Influence of pointing error on bit error rate of free space optics system at sea[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0901001.
王红星, 宋博, 吴晓军, 等. 指向误差对海上无线光通信误码率性能的影响分析[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0901001.
- [5] Song X G, Cheng J L. Joint estimation of the lognormal-Rician atmospheric turbulence model by the generalized method of moments [J]. Optics Communications, 2012, 285(24): 4727-4732.
- [6] Epple B. Simplified channel model for simulation of free-space optical communications [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(5): 293-304.
- [7] Yi X, Yao M W. Free-space communications over exponentiated Weibull turbulence channels with nonzero boresight pointing errors [J]. Optics Express, 2015, 23(3): 2904-2917.
- [8] Aarthi G, Prabu K, Reddy G R. Aperture averaging effects on the average spectral efficiency of FSO links over turbulence channel with pointing errors [J]. Optics Communications, 2017, 385: 136-142.
- [9] Cao M H, Wu X, Wang H Q, et al. Performance of super Nyquist optical communication system under Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906003.
曹明华, 武鑫, 王惠琴, 等. Gamma-Gamma 大气湍流下超奈奎斯特光通信系统性能[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906003.
- [10] 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.
- [11] Samimi H. Distribution of the sum of K-distributed random variables and applications in free-space optical communications [J]. IET Optoelectronics, 2012, 6(1): 1-6.
- [12] Jurado-Navas A, Maria J, Francisco J, et al. A unifying statistical model for atmospheric optical scintillation [M]//Awrejcewicz J. Numerical simulations of physical and engineering processes. Croatia: InTech, 2011: 181-206.
- [13] Li J, Uysal M. Achievable information rate for outdoor free space optical communication with intensity modulation and direct detection [C]// GLOBECOM'03. IEEE Global Telecommunications Conference, December 1-5, 2003, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2003: 2654-2658.
- [14] Aarthi G, Ramachandra Reddy G. Average spectral efficiency analysis of FSO links over turbulence channel with adaptive transmissions and aperture averaging[J]. Optics Communications, 2018, 410: 896-902.
- [15] Han L Q, You Y H. Performance of free space optical communication with combined effects from atmospheric turbulence and pointing errors[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106005.
韩立强, 游雅晖. 大气湍流及瞄准误差联合效应下自由空间光通信的性能[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106005.
- [16] Gappmair W, Hranilovic S, Leitgeb E. Performance of PPM on terrestrial FSO links with turbulence and pointing errors [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(5): 468-470.
- [17] Djordjevic I B, Djordjevic G T. On the communication over strong atmospheric turbulence channels by adaptive modulation and coding [J]. Optics Express, 2009, 17(20): 18250-18262.
- [18] Gökçe M C, Baykal Y, Ata Y. Binary phase shift keying-subcarrier intensity modulation performance in weak oceanic turbulence [J]. Physical Communication, 2019, 37: 100904.
- [19] Samimi H, Azmi P. Performance analysis of adaptive subcarrier intensity-modulated free-space optical systems[J]. IET Optoelectronics, 2011, 5(4): 168-

- 174.
- [20] Farid A A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(7): 1702-1710.
- [21] Jurado-Navas A, Garrido-Balsells J M, Paris J F, et al. Impact of pointing errors on the performance of generalized atmospheric optical channels[J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12550-12562.
- [22] Chen D, Huang G Q, Liu G H, et al. Performance of adaptive subcarrier modulated MIMO wireless optical communications in Malaga turbulence [J]. *Optics Communications*, 2019, 435: 265-270.
- [23] Alheadary W G, Park K H, Alouini M S. Bit error rate analysis of free-space optical communication over general Malaga turbulence channels with pointing error [C]//2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 4-8, 2016, Valencia, Spain. New York: IEEE Press, 2016.
- [24] Ansari I S, Alouini M S, Cheng J L. Ergodic capacity analysis of free-space optical links with nonzero boresight pointing errors [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(8): 4248-4264.
- [25] Yang F, Cheng J L, Tsiftsis T A. Free-space optical communication with nonzero boresight pointing errors [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(2): 713-725.
- [26] Yang L, Hasna M O, Gao X Q. Asymptotic BER analysis of FSO with multiple receive apertures over \mathcal{M} -distributed turbulence channels with pointing errors[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18238-18245.
- [27] Wolfram Research. The mathematical functions site, 2008. [2020-06-01]. <http://functions.wolfram.com>.