

无线光自适应副载波 MDPSK 调制系统特性分析

陈 丹, 雷 雨, 柯熙政

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西西安 710048)

摘 要: 无线光通信中的自适应传输技术可有效抑制大气湍流引起的信道衰落. 根据接收信噪比和预定目标误比特率要求, 本文对通过瞬时湍流特性改变调制阶数的无线光自适应传输的通信系统进行了研究. 给出采用 Malaga 分布湍流模型分别描述 Gamma-Gamma、对数正态以及 K 分布湍流信道的相关参数设置; 推导了 Malaga 湍流信道下无线光自适应多进制差分相移键控 (MDPSK, M-ary Differential Phase Shift Keying) 调制系统的平均误比特率、频谱效率以及中断概率表达式, 以及基于 MeijerG 函数的渐近表达式. MDPSK 自适应和非自适应两种调制系统特性分析结果表明: 自适应调制系统不但在相同电信噪比下可获得更低的平均误比特率, 还可以大大提高频谱效率, 而不需要增加额外传输功率或牺牲误比特率.

关键词: 无线光通信; Malaga 湍流分布; 副载波调制; 自适应传输; 平均误比特率; 频谱效率

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)07-1748-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.07.030

Performance Analysis of Wireless Optical Adaptive Subcarrier MDPSK Modulation System

CHEN Dan, LEI Yu, KE Xi-zheng

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Adaptive transmission technology can effectively inhibit channel fading caused by atmospheric turbulence in wireless optical communications. Under the predefined bit error rate and received signal-to-noise ratio requirement, this paper researched a wireless optical adaptive transmission system due to changing the modulation order through the instantaneous nature of turbulence. Malaga distribution turbulence model is used to describe the distribution of the Gamma-Gamma, Lognormal and K distribution turbulence channel separately, and the related parameters setting methods are given. Analytical expressions of spectrum efficiency, average bit error rate and outage probability under Malaga channel are derived in the adaptive subcarrier M-ary differential phase shift keying (MDPSK) system. Closed form expressions are also derived based MeijerG function. With the comparison between the performance of adaptive modulation and non-adaptive modulation system, the results show that the adaptive system can acquire lower BER performance under the same telecom noise ratio, and also improve the spectrum efficiency without additional transmission power or sacrifice bit error rate.

Key words: wireless optical communication; Malaga turbulence distribution; subcarrier modulation; adaptive transmission; average bit error; spectrum efficiency

1 引言

大气激光通信 (FSO, Free space Optical Communication) 是以激光为载体, 大气为信道的光通信技术, 被作为“最后一公里”解决方案之一. 这种通信方式受大气

信道影响较大, 雨、雪、雾等大气效应和晴空下的大气湍流都会降低通信质量. 为此, 人们展开了多种对抗大气信道衰落技术的研究, 包括自适应光学技术、时域处理与阈值优化技术以及分集接收技术等^[1,2]. 近年来, 无线光副载波调制作为抑制大气湍流影响的一种光

收稿日期: 2017-06-12; 修回日期: 2017-08-17; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61671375); 陕西省工业攻关科技计划项目 (No. 2016GY-082); 陕西省重点产业创新项目 (No. 2017ZDCXL-GY-06-01)

调制储备技术已被广泛研究^[3-6].早在七十年代一种可变速率的自适应 Turbo 编码调制方案就被提出^[7],但该研究是基于开关键控 (OOK, On-Off Keying) 的 FSO 系统. Nestor D 等人 2011 年提出自适应无线光副载波相移键控 (PSK, Phase Shift Keying) 调制^[8],根据信道衰落强度改变传输参数,在对数正态湍流信道下分析了调制特性. Zoheb Hassan 在 2013 年将自适应正交幅度调制 (QAM, Quadrature Amplitude Modulation) 传输方案应用于 Gamma-Gamma 信道下的多输入输出 (MIMO, Multiple Input Multiple Output) 系统中^[9]. 2015 年 Jagadeesh V K 在 Malaga 信道下对非自适应 BPSK 调制系统信道容量和中断概率进行了仿真分析^[10].

Malaga 分布湍流信道是一个通用的分布模型,通过设置其概率密度函数中相应的参数,可描述目前大多数的湍流统计模型,其中包括有对数正态分布、Gamma-Gamma 分以及 K 分布等.本文基于大气湍流 Malaga 分布信道模型,研究了无线光副载波 MDPSK 自适应和非自适应调制系统性能,推导出自适应系统频谱效率、平均误比特率和中断概率理论表达式,同时采用 MeijerG 函数推导了部分性能渐进表达式,最后进行了自适应和非自适应调制系统性能对比.

2 非自适应副载波 MDPSK 强度调制

2.1 Malaga 分布湍流信道模型

电磁波在湍流大气中传播的物理模型如图 1 所示.因为电磁波在大气湍流中传播时,其折射率是随机变化的,通过大气湍流后,波的部分能量被散射,散射类型由辐照度概率分布形式所决定.可认为在系统接收端电磁波能量包含三部分,即视距 (LOS, Line-Of-Sight) 传播分量 U_L 、耦合到视距分量的 U_s^c (传输轴上前向散射分量) 及独立散射分量 U_s^i . 由于 U_s^c 能量被分散到接收端的离轴涡旋,它相比于前两部分是统计独立的. 图中 LOS 分量的平均功率 $\Omega = E[|U_L|^2]$, U_s^c 和 U_s^i 的平均功率分别是 $E[|U_s^c|^2] = 2\rho b_0$ 和 $E[|U_s^i|^2] = 2b_0(1-\rho)$, 则总散射部分的平均功率为 $2b_0 = E[|U_s^c|^2 + |U_s^i|^2]$. 参数 ρ 表示耦合到 LOS 部分的散射功率大小,取值范围 $0 \leq \rho \leq 1$.

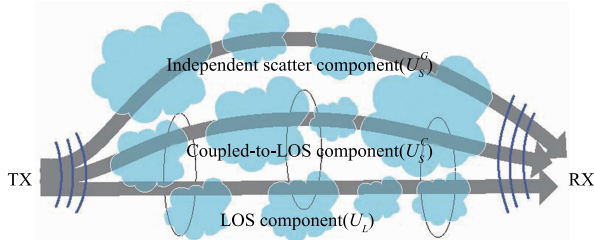


图1 电磁波在大气湍流中传播的几何模型

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、K 分布以及负指数分布等.基于电磁波在湍流大气中传播的物理模型, Malaga 分布的湍流信道光强 I 的概率密度函数定义为^[11]:

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

其中

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

$$a_k = \binom{\beta-1}{k-1} \frac{(\gamma \beta + \Omega')^{1-\frac{\alpha}{\beta}}}{(k-1)!} \left(\frac{\Omega'}{\gamma} \right)^{k-1} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{k}{2}} \quad (3)$$

$$\Omega' = \Omega + 2\rho b_0 + 2 \sqrt{2b_0 \Omega \rho} \cos(\varphi_A - \varphi_B) \quad (4)$$

上式, α 为一个正的参数,与大尺度湍流的有效数字相关.本文所研究的 Malaga 分布中 β 为自然数,表示衰落量的一个参数.记 $\gamma = E[|U_s^c|^2] = 2b_0(1-\rho)$, 参数 Ω' 代表了相干平均功率.式中 $k_v(\cdot)$ 是 v 阶的第二类修正贝塞尔函数. φ_A 和 φ_B 分别为视距传播分量 U_L 与耦合到视距分量 U_s^c 的相位.

2.2 MDPSK 副载波调制

在系统模型发送端,经过副载波 MDPSK 调制后,为保证连续波信号振幅为正,发射端在调制信号需加载直流偏置,发射光功率为:

$$P_i(t) = P[1 + \mu s(t)] \quad (5)$$

其中, P 是平均发射光功率, μ 是调制指数 ($0 < \mu < 1$).

MDPSK 电调制器输出 $s(t)$ 为:

$$s(t) = \sum_k g(t - kT) \cos(2\pi f_c t + \phi_k) \quad (6)$$

其中, f_c 是副载波频率, T 是符号周期, $g(t)$ 是整形脉冲, $\phi_k \in [0, \dots, (M-1)(\pi/M)]$ 是第 k 个发送符号的相位, M 是调制阶数.

接收端 MDPSK 相干解调并消除直流偏置后,在电信号第 k 个符号间隔采样,输出为:

$$r(k) = \mu \eta \sqrt{\frac{E_g}{2}} P I(k) s(k) + n(k) \quad (7)$$

其中, η 是接收端光电探测器的光电转换效率, $s(k) = \cos \phi_k - i \cdot \sin \phi_k$, E_g 是整形脉冲的能量, $n(k)$ 是零均值圆对称高斯噪声分量,其平均能量记为 $N_0 = 2\sigma_n^2$.

假定湍流导致的衰落在一个符号块上恒定为一常数,则在第 k 个符号间隔衰落可表示为:

$$I = I(k), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (8)$$

瞬时电信噪比定义为:

$$r = \mu^2 \eta^2 P^2 E_s I^2 / N_0 \quad (9)$$

平均电信噪比为:

$$\bar{r} = \mu^2 \eta^2 P^2 E_s / N_0 \quad (10)$$

其中, $E_s = E_g/2$.

2.3 平均误比特率性能

不考虑大气衰落效应,信道为高斯分布,副载波 MDPSK 调制系统误比特率, $BER = \text{erfc}(\sqrt{2r}\sin\frac{\pi}{2M})^{[11]}$, r 为瞬时电信噪比.

自由空间光通信系统的误比特率性能取决于大气湍流强度和调制阶数.

在大气湍流下,采用相干解调后 MDPSK 的误比特率为:

$$BER(M, I) = 2Q\left(2I\sqrt{r}\sin\left(\frac{\pi}{2M}\right)\right) \quad (11)$$

其中, $Q(x) = \frac{1}{2}\text{erfc}(x/\sqrt{2})$.

因此,在湍流信道下副载波 MDPSK 调制系统的平均误比特率为:

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

将式(11)的误比特率表达式带入式(12)可得:

$$BER(M) = \int_0^{\infty} 2Q\left(2I\sqrt{r}\sin\left(\frac{\pi}{2M}\right)\right) f_I(I) dI \quad (13)$$

将 Malaga 湍流分布光强的概率密度函数式(6)带入上式,则平均误比特率可表示为:

$$BER(M) = 2A \sum_{k=1}^{\beta} a_k \int_0^{\infty} Q\left(2I\sqrt{r}\sin\left(\frac{\pi}{2M}\right)\right) I^{\frac{\alpha+k}{2}-1} \cdot K_{\alpha-k}\left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta+\Omega'}}\right) dI \quad (14)$$

为便于计算,将 $Q(\cdot)$ 换算为 $\text{erfc}(\cdot)$, 式(14)可转化为:

$$BER(M) = A \sum_{k=1}^{\beta} a_k \int_0^{\infty} \text{erfc}\left(I\sqrt{2r}\sin\left(\frac{\pi}{2M}\right)\right) I^{\frac{\alpha+k}{2}-1} \cdot K_{\alpha-k}\left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta+\Omega'}}\right) dI \quad (15)$$

利用 MeijerG 函数运算性质^[12]可得到式(15)的渐近表达式为:

$$BER(M) = \frac{A \cdot 2^{\alpha-1}}{4\pi^{3/2}\sigma^{\alpha/2}} \sum_{k=1}^{\beta} \frac{a_k \cdot 2^k}{\sigma^{k/2}} \cdot G_{5,2}^{2,4}\left(\frac{16\omega}{\sigma^2} \left| \begin{matrix} 1-\alpha, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-k}{2}, \frac{2-k}{2}, 1 \\ 0, \frac{1}{2} \end{matrix} \right. \right) \quad (16)$$

其中, $\sigma = \frac{\alpha\beta}{\gamma\beta+\Omega'}$, $\omega = 2r\sin^2\frac{\pi}{2M}$

对 Malaga 分布的光强概率密度函数设置相应的 α 和 β 等参数,可以得到对数正态分布模型、Gamma-Gamma 分布模型以及 K 分布模型等大气湍流信道模型,仿真中平均光功率 $E[|U_L|^2 + |U_S^C|^2 + |U_S^G|^2] = \Omega + 2b_0 = 1$. 表 1 给出描述这三种分布的 Malaga 分布函数中相对

应的参数设置. 本文在基于 Malaga 分布的这三种湍流信道下,分析了不同光强起伏对平均误比特率、频谱效率以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了对比.

表 1 Malaga 分布湍流信道模型参数设置

可描述的光强分布	参数条件	α, β 值及光强振幅起伏方差
Lognormal	$\rho = 0, \Omega = 0, b_0 = 0.5, \gamma \rightarrow 0$	$\alpha = 11, \beta = 10, \sigma_I^2 = 0.2$
Gamma-Gamma	$\rho = 1, \Omega = 0.5, b_0 = 0.25, \gamma = 0$	$\alpha = 5, \beta = 2, \sigma_I^2 = 0.8$
		$\alpha = 8, \beta = 3, \sigma_I^2 = 0.5$
K 分布	$\rho = 0, \Omega = 0, b_0 = 0.5$	$\alpha = 2, \beta = 2, \sigma_I^2 = 2$

图 2 是非自适应四进制差分相移键控(4DPSK)调制在 Malaga 信道下的系统平均误比特率. Malaga 分布函数中选择不同参数值见表 1, 则描述的湍流强度及光强分布形式不同. 从图 2 可以看出,随着光强起伏 σ_I^2 的增大,在相同平均电信噪比下,系统误比特率增加,在 SNR = 25dB 时,对数正态分布 ($\sigma_I^2 = 0.2$) 误比特率为 $3.95e-5$, Gamma-Gamma 分布 ($\sigma_I^2 = 0.8$) 误比特率为 $1.7e-2$, 而 K 分布 ($\sigma_I^2 = 2$) 误比特率达到 $9.4e-2$.

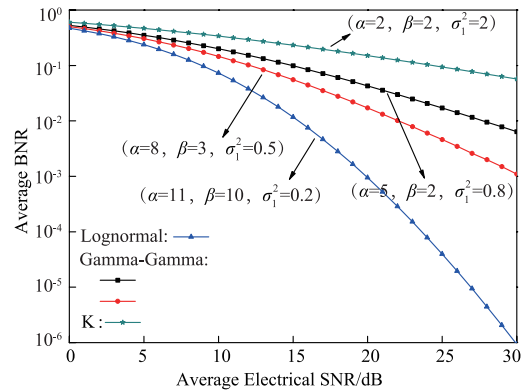


图 2 Malaga 湍流信道下非自适应 4DPSK 系统的平均误比特率

3 自适应副载波 MDPSK 调制

3.1 自适应传输模式

自适应传输是通过在符号块的起始处插入导频符号,接收机能够准确地估计大气湍流信道的瞬时衰落状态 I . 基于该估计,接收机处判决装置可选择要用于发送该符号块的非导频符号的调制阶数,相应地配置电解调器,并通过一个可靠的 RF 反馈路径来通知自适应 MDPSK 的发射机. 可实现在没有增加传输光功率和牺牲系统性能时,频谱效率得到了提高. 实现自适应传输是通过在目标误比特率 (BER_0) 要求下使用最大可能的调制阶数,从而最大化每符号间隔所传输的比特数,可以表示为^[7]:

$\max_{\log_2 M}$ subject to $\text{BER}(M, I) \leq \text{BER}_0$ (17)
 自适应调制阶数 $M_j \in \{M_1, M_2, \dots, M_N, j=1, 2, \dots, N\}$,
 阶数选取决定于大气衰落 I 和 BER_0 , 将衰落值 I 划分为
 $N+1$ 个区域, 则每个区域都与调制阶数 M_j 相关, 可
 得到:

$$M = M_j = 2^j \text{ if } I_j \leq I < I_{j+1}, j=1, \dots, N \quad (18)$$

在目标误比特率 BER_0 ($\text{BER}_0 = P_0$) 要求下, 对式(9)、
 (10)和式(11)进行推导, 可得到 MDPSK 自适应调制系
 统信道 I_j 为:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\bar{r}}} Q^{-1}\left(\frac{P_0}{2}\right) \quad (19)$$

$$I_j = \frac{1}{\sin(\pi/2M_j)} \frac{1}{2\sqrt{\bar{r}}} Q^{-1}\left(\frac{P_0}{2}\right), j=2, \dots, N \quad (20)$$

$$I_{N+1} = +\infty \quad (21)$$

上式中 $Q^{-1}(\cdot)$ 是 Q 函数的反函数.

3.2 系统性能分析

3.2.1 频谱效率

数字通信系统的频谱效率是指发送的净比特率
 (有用信息速率, 不包括纠错码)除以通信链路带宽, 通
 常被用于分析数字调制方式的效率. 频谱效率表达式
 可表示为:

$$S = C/W = \bar{n}/2 \quad (22)$$

其中, C 表示数据传输速率, 单位为 bit/s, \bar{n} 是传输的平
 均比特数. 在自适应 MDPSK 调制中传输的平均比特
 数为:

$$\bar{n} = \sum_{j=1}^N b_j \log_2 M_j \quad (23)$$

$$b_j = \Pr\{I_j \leq I < I_{j+1}\} = \int_{I_j}^{I_{j+1}} f_I(I) dI = F_I(I_{j+1}) - F_I(I_j) \quad (24)$$

分布函数 $F_I(I_j) = \int_0^{I_j} f(I) dI$ 的 MeijerG 函数表达式为:

$$F_I(I_j) = \frac{A}{2} I_j^{\alpha/2} \sum_{k=1}^{\beta} a_k I_j^{k/2} \cdot G_{1,3}^{2,1} \left(\sigma I_j \left| \begin{matrix} 1 - \frac{\alpha+k}{2} \\ \frac{\alpha-k}{2}, \frac{k-\alpha}{2}, -\frac{\alpha+k}{2} \end{matrix} \right. \right) \quad (25)$$

其中, $\sigma = \frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega}$, 且 $F_I(I_{N+1}) \rightarrow 1$, 将式(25)代入式
 (23), 则传输的平均比特数表达式为:

$$\bar{n} = N - \frac{A}{2} \sum_{j=1}^N I_j^{\alpha/2} \sum_{k=1}^{\beta} a_k I_j^{k/2} \cdot G_{1,3}^{2,1} \left(\sigma I_j \left| \begin{matrix} 1 - \frac{\alpha+k}{2} \\ \frac{\alpha-k}{2}, \frac{k-\alpha}{2}, -\frac{\alpha+k}{2} \end{matrix} \right. \right) \quad (26)$$

将式(26)代入到式(22), 可得到自适应调制 MDPSK 的
 频谱效率表达式.

图 3 是当 $\text{BER}_0 = 10^{-2}$ 时, Malaga 湍流信道下 Log-
 normal 分布、Gamma-Gamma 分布和 K 分布的自适应
 MDPSK 调制频谱效率与自适应调制的阶数 (2^N) 以及平
 均电信噪比的关系曲线. 当 $N=3$ 且 $10\text{dB} < \text{SNR} < 35\text{dB}$
 时, Lognormal ($\alpha=11, \beta=10, \sigma_I^2=0.2$) 分布下的频谱
 效率最大, 在 25dB 时趋于饱和约为 1.5bit/s/Hz , 而 Gamma-
 Gamma 分布 ($\alpha=5, \beta=2, \sigma_I^2=0.8$) 和 K 分布 ($\alpha=2, \beta=2, \sigma_I^2=2$)
 分别在信噪比约为 35dB 和 45dB 时频
 谱效率趋于该饱和值. 由图 3 还可以看出, 在一定的湍
 流强度下, 随着自适应调制阶数 2^N 的增大, 频谱效率也
 随之增大, 并逐步趋近于 Malaga 信道频谱效率上限 (文
 献[8], 式(14)得到).

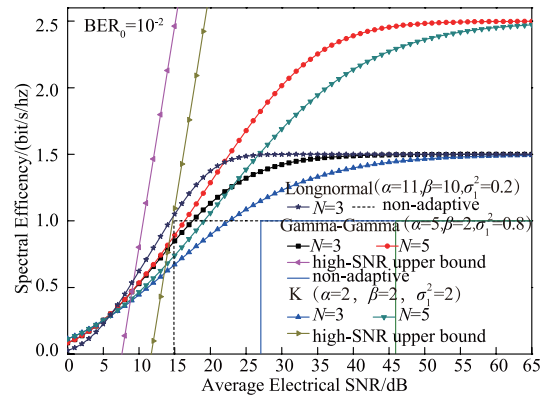


图 3 在 Malaga 湍流信道下自适应 MDPSK 系统的频谱效率

此外, 由式(16)和式(22)计算可得到在目标误比
 特率为 10^{-2} 时, 三种分布下平均电信噪比大于等于约
 15dB (Lognormal: $\sigma_I^2=0.2$), 27.5dB (Gamma-Gamma: $\sigma_I^2=0.8$)
 以及 46dB (K 分布: $\sigma_I^2=2$) 时, 非自适应 4DPSK
 系统频谱效率为一恒值 1.0bit/s/Hz , 与图 3 中 $N=3$ 时
 自适应调制频谱效率达到 1.0bit/s/Hz 所对应的平均电
 信噪比数值相比较, 自适应调制比非自适应 4DPSK 调
 制在 Lognormal 分布下获得约 1dB 频谱效率增益, 在
 Gamma-Gamma 分布下可获得约 9.5dB 的频谱效率增
 益, 在 K 分布下获得约 22dB 增益. 因此, 大气湍流强
 度越大, 在一定误比特率条件下, 自适应调制与非自
 适应调制 4DPSK 相比, 获得的频谱效率增益越大. 而在平
 均电信噪比较大时, 自适应调制频谱效率明显大于非
 自适应调制.

3.2.2 平均误比特率

自由空间光通信副载波 MDPSK 调制系统中的平
 均误比特率, 是指错误的比特数除以传输的总比特数.
 传输中错误的比特数可以表示为^[8]:

$$\bar{n}_{\text{err}} = \sum_{j=1}^{N+1} \langle \text{BER} \rangle_j \log_2 M_j \quad (27)$$

$$\langle \text{BER} \rangle_j = \int_{I_j}^{I_{j+1}} \text{BER}(M_j, I) f_I(I) dI \quad (28)$$

将式(1)、式(11)代入式(28)得:

$$\langle \text{BER} \rangle_j = A \sum_{k=1}^{\beta} a_k \int_{I_j}^{I_{j+1}} \text{erfc} \left(I_j \sqrt{2r} \sin \left(\frac{\pi}{2M_j} \right) \right) I_j^{\frac{\alpha+k}{2}-1} \cdot K_{\alpha-k} \left(2 \sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta + \Omega'}} \right) dI \quad (29)$$

则平均误比特率为:

$$\overline{\text{BER}} = \overline{n_{\text{err}}} / \overline{n} \quad (30)$$

由式(27)、式(29)和式(26), 可得到平均误比特率 $\overline{\text{BER}}$.

图4为在不同目标误比特率 10^{-2} 和 10^{-3} 下自适应 MDPSK 的平均误比特率性能. 可看出当目标误比特率一定时, 自适应调制阶数取值越小(体现为 N 的取值), 平均误比特率越小且均小于目标误比特率. 对比图4和图2, 在 Gamma-Gamma 湍流信道 ($\sigma_I^2 = 0.8$) 下, 当 $\text{BER}_0 = 10^{-3}$, $N=3$ (即自适应调制阶数最大值 $2^N = 8$), 且 $\text{SNR} = 25\text{dB}$ 时, 误比特率的值为 $4.86\text{e-}5$, 而图2中非自适应 4DPSK 误比特率值仅为 $1.7\text{e-}2$, 自适应调制平均误比特率与非自适应调制相比, 降低了3个量级. 因此自适应 MDPSK 调制的平均误比特率明显低于非自适应 4DPSK.

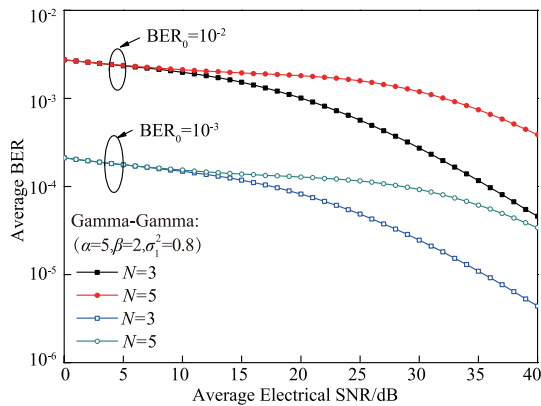


图4 Malaga湍流信道下自适应MDPSK系统的平均误比特率 (Gamma-Gamma分布)

图5为目标误比特率 $\text{BER}_0 = 10^{-3}$ 时, Malaga 信道下三种不同湍流分布的自适应平均误比特率. 当取 $N=3$, 平均信噪比为 25dB 时, 对数正态分布 ($\sigma_I^2 = 0.2$) 误比特率最小为 $2.9\text{e-}5$, Gamma-Gamma 分布 ($\sigma_I^2 = 0.8$) 的误比特率为 $4.9\text{e-}5$, 而 K 分布 ($\sigma_I^2 = 2$) 误比特率最大约为 $5.4\text{e-}5$. 与图2相比, 对数正态分布在小信噪比时, 自适应平均误比特率明显低于非自适应, 而在大信噪比时两者误比特率接近; 对于 K 分布, 自适应平均误比特率与非自适应相比, 降低约4个数量级. 由图5还可知, 在相同光强起伏 σ_I^2 下, 平均误比特率随着自适应调制的阶数增加而增大. 同时, 在相同调制阶数且平均电信噪比较小时, 光强起伏指数的变化对自适应 MDPSK 调

制平均误比特率的影响不明显, 如当 $N=3$ 时, 平均电信噪比约大于 20dB 后, 系统平均误比特率性能受湍流强度影响变化才明显.

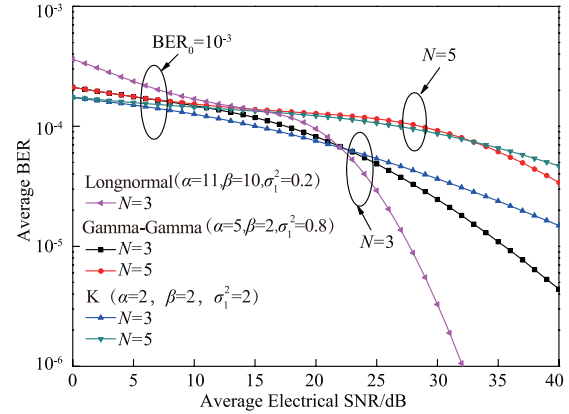


图5 Malaga湍流信道下的自适应MDPSK系统的平均误比特率

3.2.3 中断概率

系统中断概率和误比特率一样都是衡量通信系统好坏的指标. 在无线通信中, 由于信道时变, 所以信道容量也时变, 当信道容量小于信息速率时, 会导致通信中断. 中断概率可表示为接收机瞬时信噪比低于某一信噪比阈值的概率 ($\text{SNR} < \text{SNR}_{\text{th}}$). 在自适应 MDPSK 调制通信系统中, 当光强 $I < I_1$ 时, 该系统中数据停止传输, 因此系统中断概率表达式^[7]为:

$$P_{\text{out}} = \int_0^{I_1} f_I(I) dI \quad (31)$$

将 Malaga 分布信道的概率密度函数代入式(31)可得:

$$P_{\text{out}} = \int_0^{I_1} A \sum_{k=1}^{\beta} a_k I_1^{\frac{\alpha+k}{2}-1} K_{\alpha-k} \left(2 \sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta + \Omega'}} \right) dI \quad (32)$$

采用 MeijerG 可得中断概率渐近式为:

$$P_{\text{out}} = \frac{A}{2} I_1^{\alpha/2} \sum_{k=1}^{\beta} a_k I_1^{k/2} G_{1,3}^{2,1} \left(\sigma I_1 \left| \begin{array}{c} 1 - \frac{\alpha+k}{2} \\ \frac{\alpha-k}{2}, \frac{k-\alpha}{2}, -\frac{\alpha+k}{2} \end{array} \right. \right) \quad (33)$$

图6为在目标误比特率 $\text{BER}_0 = 10^{-2}$ 时, Malaga 分布信道中三种不同湍流分布下自适应 MDPSK 调制系统的中断概率. 可以看出在相同平均电信噪比下, 光强起伏指数越小, 中断概率越小. 当平均电信噪比为 25dB 时, K 分布 ($\sigma_I^2 = 2$) 的中断概率达到 $1.6\text{e-}1$, Gamma-Gamma ($\sigma_I^2 = 0.8$) 分布的中断概率为 $3.4\text{e-}2$, 而对数正态分布的 ($\sigma_I^2 = 0.2$) 中断概率仅为 $1.5\text{e-}5$.

4 结论

本文研究了在 Malaga 湍流信道下非自适应和自适应副载波 MDPSK 调制系统的性能. 给出用 Malaga 分布描述 Gamma-Gamma 分布、K 分布、和对数正态大气湍流

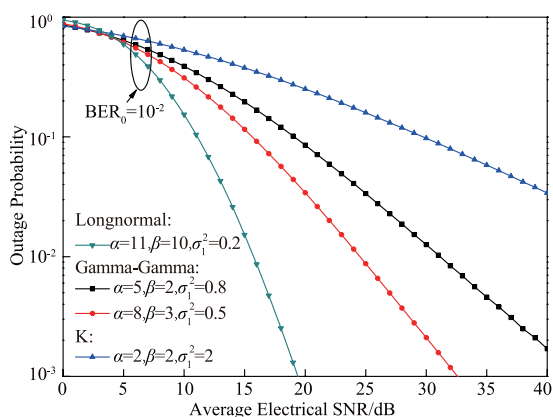


图6 Malaga湍流信道下自适应MDPSK系统的中断概率

分布时的参数设置,推导了 Malaga 信道下自适应调制系统频谱效率、平均误比特率以及中断概率表达式,并采用 MeijerG 函数推导了部分性能的渐近表达式.最后分别在三种不同湍流分布下对自适应和非自适应系统性能进行了仿真对比.仿真结果表明自适应 MDPSK 调制系统的平均误比特率性能优于非自适应调制系统,在中强湍流强度下,自适应平均误比特率下降约 3~4 个数量级,且在不牺牲误比特率和额外增加传输功率下自适应调制可以大大提高系统频谱效率.本文的研究为无线光通信自适应传输的工程实现提供了必要的理论基础.

参考文献

- [1] Li M, Gao W, Cvijetic M. Slant-path coherent free space optical communications over the maritime and terrestrial atmospheres with the use of adaptive optics for beam wavefront correction [J]. *Applied Optics*, 2017, 56 (2). 284 - 297.
- [2] Sharma M, Chadha D, Chandra V. Performance analysis of spatially multiplexed MIMO-OFDM free space optical communication system [A]. 10th International Conference on Signal Processing and Communications [C]. Bangalore, India: IEEE, 2014. 1 - 5.
- [3] Li Jia, Liu J Q, Taylor D P. Optical communication using subcarrier PSK intensity modulation through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55 (8). 1598 - 1606.
- [4] Popoola W O, Ghassemlooy Z. BPSK subcarrier modulated free space optical communications in atmospheric turbulence [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27 (8). 967 - 973.
- [5] Hossein Samimi. Performance of subcarrier intensity modulated FSO systems over Gamma - Gamma turbulence channels with pointing errors [J]. *Wireless Personal Communications*, 2016, 11 (1). 1 - 10.

- [6] 陈丹,柯熙政.基于 Turbo 码的无线光通信副载波误码性能分析[J]. *光学学报*, 2010, 30 (10): 2859 - 2863.
- [7] Levitt B K. Variable rate optical communication through the turbulent atmosphere [J]. MIT Research Laboratory of Electronics, 1971. 93 - 95.
- [8] Chatzidiamantis N D, Lioumpas A S, et al. Adaptive subcarrier PSK intensity modulation in free-space optical systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59 (5). 1368 - 1377.
- [9] Hassan I Z, Hossain M J, Cheng J. Performance of MIMO adaptive subcarrier QAM intensity modulation in Gamma-Gamma turbulence [A]. 13th Canadian Workshop on Information Theory [C]. Toronto, Canada: IEEE, 2013. 195 - 199.
- [10] Jagadeesh V K, Palliyembil Vineeth, Muthuchidambaranathan P, et al. Channel capacity and outage probability analysis of subcarrier intensity modulated BPSK system over M distribution free space optical channel [A]. 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems [C]. Coimbatore, India: IEEE, 2015. 1051 - 1054.
- [11] Garrido-Balsells J M, Paris J F, Puerta-Notario A. A unifying statistical model for atmospheric optical scintillation [J]. *Physics*, 9 Feb, 2014. 1 - 4.
- [12] 樊昌信,曹丽娜.通信原理[M].北京:国防工业出版社, 2001. 209 - 233.
- [13] Tsiftsis T A, Sandalidis H G, Karagiannidis G K, et al. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8 (2). 951 - 957.

作者简介



陈丹女, 1975年7月出生于陕西省汉中市. 博士, 现为西安理工大学自动化与信息工程学院副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为无线激光通信及现代信号处理.

E-mail: chdh@xaut.edu.cn



雷雨女, 1993年5月出生于陕西省渭南市. 现为西安理工大学研究生. 主要研究方向为无线光通信.

E-mail: 793334010@qq.com