

PPM调制光纤耦合多孔径接收系统性能研究

李康宁¹, 冯旭¹, 高建文¹, 马晶²

(1.中国电子科学研究院, 北京 100041;

2.哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 研究空间激光通信脉冲位置调制 (PPM) 光纤耦合多孔径接收系统的通信性能, 在Gamma-Gamma光强分布大气模型和非中心卡方分布光纤耦合效率分布模型基础上, 给出PPM光纤耦合多孔径接收系统经大气链路传输的信噪比和平均误码率表达式。多孔径接收合并方式考虑了选择性合并 (SC)、等增益合并 (EGC) 以及最大比合并 (MRC) 3种。通过Monte Carlo仿真, 对比分析地面链路4PPM调制SC、EGC和MRC光纤耦合多孔径接收系统和等接收面积单孔径接收系统的误码率, 对比研究4PPM调制和8PPM调制多孔径接收系统在不同合并方式下的误码率性能。

关键词: 空间光通信; 大气湍流; 多孔径接收; 光纤耦合; PPM

中图分类号: TN929.13

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021021

Research on Performance of Fiber-Based Multiple Apertures Receiver System with PPM Modulation

LI Kangning¹, FENG Xu¹, GAO Jianwen¹, Ma Jing²

1. China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract: The performance of fiber-based FSO with multiple apertures receiver system was studied for pulse position modulation (PPM). Expressions of PPM modulated signal-to-noise ratio (SNR) and bit-error rate (BER) for fiber-based FSO multiple apertures receiver system were presented based on the probability density function of Gamma-Gamma intensity distribution and non-central chi-square fiber coupling efficiency distribution under atmospheric influence. Selection combining (SC), equal gain combining (EGC) and maximum ratio combining (MRC) were considered to be three signal combining methods for multiple apertures receiver system. The BER performance of 4PPM modulated SC, EGC and MRC fiber-based multiple apertures receiver system and single aperture receiver system with the same total aperture area were comparative analyzed by Monte Carlo simulation. The BER performance of fiber-based multiple apertures receiver systems in 4PPM and 8PPM modulation modes were directly compared for different combining methods.

Keywords: space optical communication, atmospheric turbulence, multiple apertures receiver, fiber-based, PPM

1 引言

自由空间光 (Free Space Light, FSO) 通信系统作为一种极具竞争力的空间高速通信解决方案, 已经引起了国际社会的广泛关注。FSO具有各种优势, 例如设备体积小、重量轻、易于安装, 并具有高安全性和抗干扰性。然而, 大气湍流会严重影响空间光通信系统的通信性能。空间光信号经过大气折射会导致光强度随时间和

空间的随机变化。经过大气传输后激光波前相位的随机变化会产生波前畸变, 从而导致光接收系统接收光信号的随机起伏^[1-2]。

多孔径接收技术、自适应光学技术和误差控制编码技术都可以缓解大气湍流对空间激光通信系统性能的影响, 其中多孔径接收技术是空间通信领域应用最广泛的技术之一。多孔径接收技术就是将单个接收孔径改变为

多个接收孔径。在各孔径间距离大于大气相干长度的条件下，由于各孔径传输信道之间存在的非相关性，多孔径接收时不容易出现较强的信号衰落，从而能够提高空间激光通信的通信性能^[3-4]。另外，在无线电和微波频率的空间通信系统中多孔径技术已经得到了广泛的研究和应用，技术已经非常成熟。而激光波段的波长相对于无线电和微波波段更短，其大气相干长度为厘米量级，所以FSO多孔径接收系统各孔径间的距离更短，安装配置更简单。

在过去的研究中研究人员依据多孔径接收技术的特点，对空间光通信多孔径接收系统的通信性能做了大量的研究工作。

2016年，SAHIN^[5]研究了脉冲位置调制（Pulse Position Modulation, PPM）下星地链路多孔径接收系统在所需误码率条件下的信噪比范围。

2017年，KAUR等^[6]在开关键控（On-Off Keying, OOK）、二进制脉冲位置调制（Binary Pulse Position Modulation, BPPM）以及二进制相移键控（Binary Phase Shift Keying, BPSK）调制模式下研究了多输入多输出（Multiple Input Multiple Output, MIMO）空间光通信在Gamma-Gamma和K分布大气干扰条件下的误码率以及多孔径接收性能增益。

2017年，Viswanath等^[7]针对星地链路研究了OOK、多进制PPM（Multiple PPM, MPPM）以及多进制差分PPM（Multiple Differential PPM, MDPPM）调制模式在不同大气湍流模型和不同天气状况条件下的误码率以及大孔径接收和MIMO两种空间激光通信接收技术。

在美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）的月球激光通信演示（Lunar Laser Communication Demonstration, LLCD）中，为减轻大气湍流对系统通信性能的影响，NASA的LLCD计划地面终端的望远镜系统由4个接收孔径组成，下行链路接收器使用保偏光纤将4个望远镜接收器的接收信号耦合到光计数超导纳米线检测器，再进行后续的信号合并和解调^[8-9]。

目前，越来越多的空间光通信链路已经开始采用基于光纤耦合的接收系统。利用基于光纤耦合的光通信系统开发组件，例如发射器和接收器模块、掺铒光纤放大器（Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA）和多路复用器等器件，提供更高的链路容量和更长的链路距离。本文主要研究了MPPM调制模式下基于光纤耦合的空间光通信多孔径接收系统的通信性能，多孔径接收合并方式主要考虑最大比合并（Maximum Ratio Combined, MRC）、等增益合并（Equal Gain Combination, EGC）和选择性合并（Selective Merger, SC）。

2 系统模型

对于一个典型的PPM调制直接探测光纤耦合多孔径接收系统，信号光经过大气湍流环境传输后通过光学接收孔径进行空间光到单模光纤的耦合，耦合光信号可通过EDFA等装置进行光学放大处理，再通过光电探测器转化为电信号，并利用MRC、EGC和SC等合并方式对各孔径的接收信号进行合并。

在接收系统中各孔径之间的距离都设为大于大气相干长度的条件下，各个孔径之间光强或信噪比的概率密度分布都是相互独立的。

FSO接收系统中每一个接收孔径 l 中光电探测器所产生的光电流信号为

$$i_l = i_{s,l} + i_{n,l} \quad (1)$$

其中， $i_{s,l}$ 表示的是第 l 个孔径的信号电流， $i_{n,l}$ 表示的是第 l 个孔径的噪声电流。接收系统中每一个孔径 l 的信噪比可以表示为

$$\text{SNR}_l(\eta_l I_l) = \frac{P_a^2}{N_0 R_b} (\eta_l I_l)^2 \quad (2)$$

其中， P_a 为第 l 个接收孔径的信号功率比例常数， R_b 为第 l 个接收孔径的比特率， I_l 为第 l 个接收孔径的接收光强， η_l 为第 l 个接收孔径的光纤耦合效率， N_0 为第 l 个接收孔径的噪声谱密度。

对于一个接收孔径数为 L 、各个接收孔径的面积同为 A 、各孔径比特率同为 R_b 、各孔径噪声谱密度同为 N_0 的光纤耦合MRC多孔径接收系统，合成器会将每一个接收孔径的接收信号乘上和各孔径接收光强成正比的加权系数再进行信号合并，这样合成信号输出信噪比可以表示为

$$\text{SNR}_{\text{MRC}}(\eta_l I_l) = \sum_{l=1}^L \text{SNR}_l(\eta_l I_l) = \frac{P_a^2}{N_0 R_b} \sum_{l=1}^L (\eta_l I_l)^2 \quad (3)$$

对于一个光纤耦合EGC多孔径接收系统的瞬时信噪比，合成器会按照相同的权重合成来自各孔径的信号，其信噪比可以表示为

$$\text{SNR}_{\text{EGC}}(\eta_l I_l) = \frac{P_a^2}{LN_0 R_b} \left(\sum_{l=1}^L \eta_l I_l \right)^2 \quad (4)$$

光纤耦合SC合并多孔径接收系统的瞬时信噪比可以写为

$$\text{SNR}_{\text{SC}}(\eta_l I_l) = \frac{P_a^2}{N_0 R_b} \max \{ \eta_l^2 I_l^2, l=1, \dots, L \} \quad (5)$$

MPPM调制空间光通信系统的误码率可以通过对固定符号长度的MPPM调制方式使用最小距离进行解码，则具有 M 个固定长度正交符号的MPPM调制的条件错误

概率（误符号率）为^[10]

$$P_{e,M-PPM} = \frac{M-1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{M \log_2(M) \text{SNR}}{2}} \right) \quad (6)$$

其中， $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数，SNR为系统接收到的瞬时信噪比。

3 传输信道模型

在传输光经过大气湍流传传输的条件下，基于入射光场的互相干函数可以对空间光到单模光纤的平均耦合效率进行分析评估^[11-12]。但是，这种一定时长范围内的平均光纤耦合效率不足以完全表征光纤耦合接收系统在高速率激光通信条件下系统的不确定性。因此，必须使用耦合效率的概率统计模型来研究光纤耦合空间光通信系统的通信性能。空间光到单模光纤耦合效率 η 的概率密度函数（Probability Density Function, PDF）可以利用非中心卡方分布表示为^[13]

$$f(\eta) = \frac{1+c}{\bar{\eta}} \exp(-c) \exp\left[-\frac{(1+c)\eta}{\bar{\eta}}\right] I_0\left(2\sqrt{\frac{(1+c)\eta}{\bar{\eta}}}\right) \quad (7)$$

其中， $\bar{\eta}$ 为 η 的平均值，可以表示为

$$\bar{\eta} = \frac{2S}{\pi\omega_a^2} \bar{a}^2 \quad (8)$$

其中， $\bar{a}^2 = \sigma_r^2 + \sigma_i^2 + (\bar{a}_r)^2$ ， $S = \pi D^2/4$ 为接收孔径面积， D 为接收孔径直径， $\omega_a = \lambda f / \pi \omega_0$ 为单模光纤传输模场半径， λ 为波长， f 为耦合透镜的焦距， ω_0 为光纤模场半径， $1/c$ 为对比常数，可以表示为

$$\frac{1}{c} = \frac{\sigma_r^2 + \sigma_i^2 + (\bar{a}_r)^2}{\sqrt{(\bar{a}_r)^4 + 2(\bar{a}_r)^2(\sigma_i^2 - \sigma_r^2) - (\sigma_i^2 - \sigma_r^2)^2}} - 1 \quad (9)$$

其中

$$\bar{a}_r = \bar{T} \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_\phi^2\right) \quad (10)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{\bar{T}^2}{2N} [1 + \exp(-2\sigma_\phi^2)] - \frac{\bar{T}^2}{N} \exp(-\sigma_\phi^2) \quad (11)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{\bar{T}^2}{2N} [1 - \exp(-2\sigma_\phi^2)] \quad (12)$$

其中， $\bar{a}_r$ 表示 a 的实部的均值， σ_r^2 和 σ_i^2 分别表示 a 的实部和虚部的方差，且

$$\sigma_\phi^2 = C_j \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} \quad (13)$$

$$\bar{T} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_a^2}\right) r dr d\theta}{S} \quad (14)$$

$$\bar{T}^2 = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_a^2}\right) r dr d\theta}{S} \quad (15)$$

$$N = 0.994 \left(\frac{D}{r_0} \right)^2 \quad (16)$$

其中， σ_ϕ^2 为模式补偿后的剩余方差， C_j 为受补偿项值影响的系统参数， r_0 为大气相干长度， N 表示独立的湍涡数量。

空间光传输经过大气湍流干扰后的光强分布可用Gamma-Gamma分布表示^[16]，其PDF可以表示为

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Omega} \left(\frac{I}{\Omega}\right)^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\alpha\beta\frac{I}{\Omega}}\right), \quad I \geq 0 \quad (17)$$

其中， α 表示大尺度湍涡对接收光强的影响参数， β 表示小尺度湍涡对接收光强的影响参数， $\Gamma(\cdot)$ 表示Gamma函数， $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 表示 $\alpha-\beta$ 阶第二类修正Bessel函数， I 表示接收光强， Ω 表示平均光强。

根据Gamma-Gamma分布的性质，参数 α 和 β 可以表示为

$$\alpha = \frac{1}{\sigma_X^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_{\ln X}^2) - 1} \quad (18)$$

$$\beta = \frac{1}{\sigma_Y^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_{\ln Y}^2) - 1} \quad (19)$$

其中， σ_X^2 和 σ_Y^2 分别表示大尺度和小尺度起伏方差， $\sigma_{\ln X}^2$ 和 $\sigma_{\ln Y}^2$ 可以分别表示为

$$\sigma_{\ln X}^2 = \frac{0.49\sigma_{R,hp}^2}{(1 + 1.11\sigma_{R,hp}^{12/5})^{7/6}} \quad (20)$$

$$\sigma_{\ln Y}^2 = \frac{0.51\sigma_{R,hp}^2}{(1 + 0.69\sigma_{R,hp}^{12/5})^{5/6}} \quad (21)$$

其中， $\sigma_{R,hp}^2$ 是空间光大气传输链路的Rytov方差，可以表示为

$$\sigma_{R,hp}^2 = 1.23 C_n^2(h) k^{7/6} L_d^{11/6} \quad (22)$$

其中， $k = 2\pi/\lambda$ 为传输光的波数， L_d 为光传输距离， $C_n^2(h)$ 表示大气折射率结构常数，可以用Hufnagel-Valley（H-V）模型表示。

4 误码率性能分析

在大气影响下MPPM调制光纤耦合多孔径接收系统的错误概率为光强起伏在所有可能取值条件下对条件错误概率的系综平均，所以MPPM调制MRC直接探测多孔径接收系统在独立同分布大气模型条件下的无条件平均

错误率可以表示为

$$P_{e,M-PPM}^{MRC} = \int_0^\infty P_{e,M-PPM} \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l)^2 \right) f \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l)^2 \right) d \sum_{l=1}^L (\eta_l I_l)^2 \quad (23)$$

其中, $f \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l)^2 \right)$ 为 $\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l)^2$ 的概率密度函数, $P_{e,M-PPM} \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l)^2 \right)$ 为MPPM调制下MRC多孔径接收系统的条件错误概率, 可以用 Q 方程表示为

$$P_{e,M-PPM} \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l)^2 \right) = (M-1)Q \sqrt{\frac{M \log_2 \left(MP_a^2 \sum_{l=1}^L (\eta_l I_l)^2 \right)}{N_0 R_b}} \quad (24)$$

所以, MPPM调制MRC光纤耦合多孔径接收系统的平均错误概率可以表示为

$$P_{e,M-PPM}^{MRC} = \int_0^\infty (M-1)Q \sqrt{\frac{M \log_2 \left(MP_a^2 \sum_{l=1}^L (\eta_l I_l)^2 \right)}{N_0 R_b}} f \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l)^2 \right) d \sum_{l=1}^L (\eta_l I_l)^2 \quad (25)$$

在MPPM调制模式下, EGC光纤耦合多孔径接收系统的无条件平均错误率可以表示为

$$P_{e,M-PPM}^{EGC} = \int_0^\infty P_{e,M-PPM} \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l) \right) f \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l) \right) d \sum_{l=1}^L (\eta_l I_l) \quad (26)$$

其中, $P_{e,M-PPM} \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l) \right)$ 表示MPPM调制EGC多孔径接收系统的条件错误概率, 可以表示为

$$P_{e,M-PPM} \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l) \right) = \frac{M-1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{M \log_2 \left(MP_a^2 \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l) \right)^2 \right)}{2LN_0 R_b}} \quad (27)$$

所以, MPPM调制EGC光纤耦合多孔径接收系统的平均错误概率为

$$P_{e,M-PPM}^{EGC} = \int_0^\infty \frac{M-1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{M \log_2 \left(MP_a^2 \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l) \right)^2 \right)}{2LN_0 R_b}} f \left(\sum_{l=1}^L (\eta_l I_l) \right) d \sum_{l=1}^L (\eta_l I_l) \quad (28)$$

相比于MRC接收系统和EGC接收系统, SC多孔径接收系统只是简单地实时处理多个孔径中具有最高信噪比的一个孔径, 并且将其余的都舍弃。所以在数值仿真时可直接利用此性质, 结合SC光纤耦合多孔径接收系统的瞬时信噪比和误码率表达式进行仿真。

在以上的错误概率分析中, MPPM采用误符号率 (Symbol Error Rate, SER) 表示错误概率, 为了便于下面的分析, 误码率和误符号率之间的关系可以表示为

$$\text{BER} = \frac{M}{2(M-1)} \text{SER} \quad (29)$$

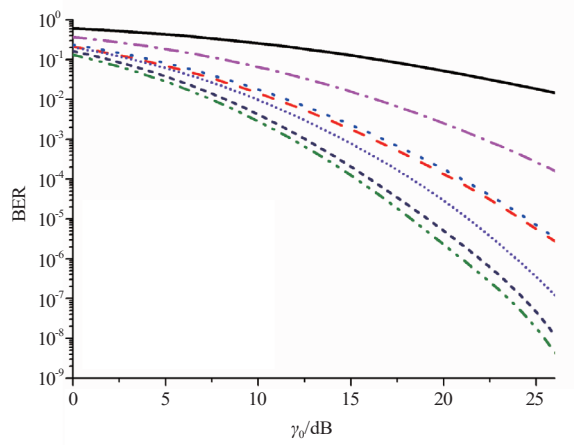
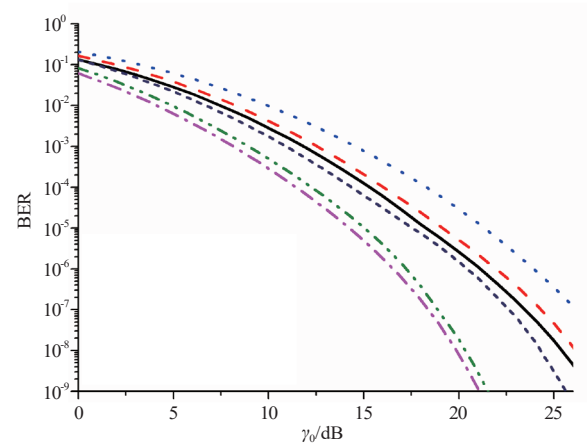
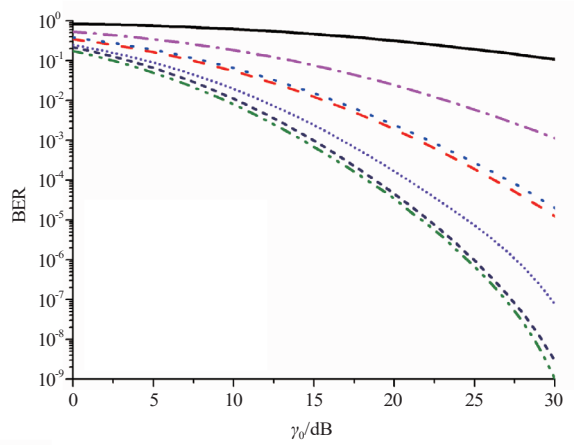
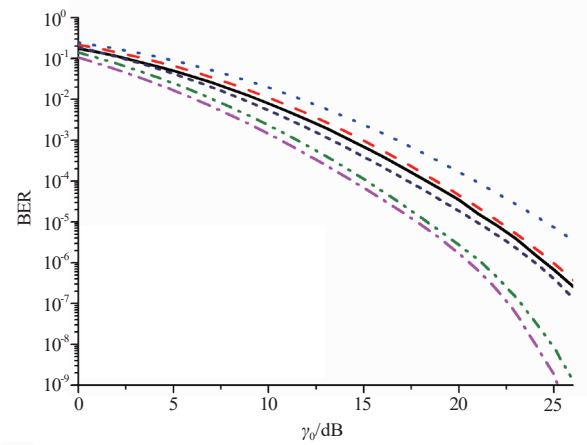
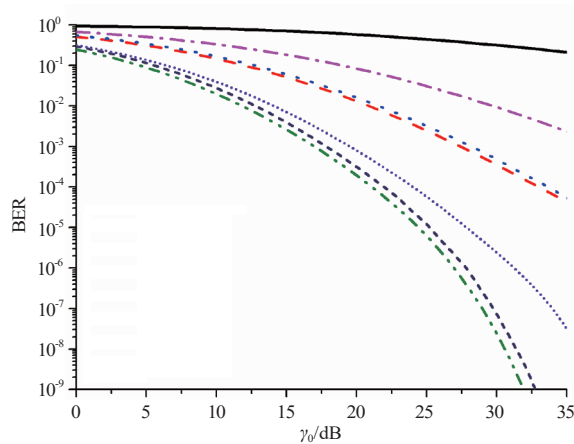
从以上表达式可以看出, MPPM调制不同合并方式下光纤耦合多孔径接收系统的平均错误率很难通过推导得出精确解。本文通过Monte Carlo仿真方法, 在Gamma-Gamma大气湍流光强分布模型以及非中心卡方分布空间光到单模光纤耦合效率模型中各取 10^6 样本, 对MPPM调制模式下MRC、EGC和SC光纤耦合多孔径接收系统经过大气传输影响的平均误码率进行对比分析。

5 数值仿真结果与分析

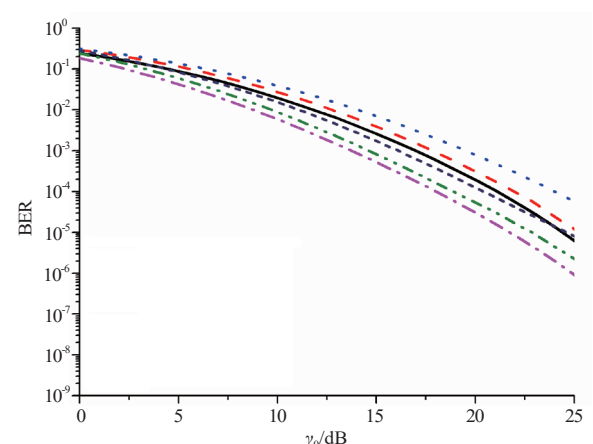
为了研究MPPM调制模式下基于光纤耦合的多孔径接收系统相对于单孔径接收系统的增益效果, 在仿真分析中比较了具有相同总接收面积AT的4PPM调制单孔径接收系统和MRC、EGC以及SC多孔径接收系统的误码率。同时, 对比分析了4PPM和8PPM调制模式下光纤耦合多孔径接收系统的误码率性能。在分析中, 考虑一个地面水平链路光纤耦合多孔径接收系统, 具体参数如下: 传输距离 $L_d=1\ 000\text{ m}$, 接收孔径总面积为 $A_r=0.031\ 4\text{ m}^2$, 通信波长为 $\lambda=1\ 550\text{ nm}$, 光纤模场半径为 $\omega_0=5.6\ \mu\text{m}$, 最优几何参数值 χ 为1.121^[14], 补偿参数 $C_f=0.088$ 。在分析中选择了 $2.91 \times 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$ 、 $3.95 \times 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$ 和 $5.06 \times 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$ 作为不同的 $C_n^2(h)$ 以代表不同的大气湍流强度。

图1给出了4PPM调制不同接收孔径数条件下的MRC、EGC和SC光纤耦合多孔径接收系统在折射率结构常数为 $2.91 \times 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$ 、 $3.95 \times 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$ 和 $5.06 \times 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$ 时平均误码率的Monte Carlo仿真结果, 设 $\gamma_0 = P_{a,A_r}^2 / (N_0 R_b)$ 。

从图1可以看出, 对于4PPM调制光纤耦合多孔径接收系统, 在仿真中给出的条件下, MRC、EGC和SC多孔径接收系统的误码率性能优于单孔径接收系统。在相同 γ_0 条件下, MRC的多孔径增益略优于EGC, 且MRC和EGC的多孔径增益都优于SC多孔径接收系统。这主要是因为MRC和EGC多孔径接收系统在具有和单孔径接收系统相同的总平均接收光能量的基础上, 又增加了由各孔径接收信号互不相关性所产生的多孔径增益, 而对于SC多孔径接收系统, 多孔径增益需要克服接收信号总能量的减少对系统通信性能造成的影响。例如, 当折射率结构常数为 $2.91 \times 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$, γ_0 同为15 dB时, 4PPM调制二孔径MRC、EGC和SC接收系统的误码率分别为 1.79×10^{-3} 、 2.32×10^{-3} 和 1.58×10^{-2} , 同等条件下

(a) 折射率结构常数为 $2.91 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ (a) 折射率结构常数为 $2.91 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ (b) 折射率结构常数为 $3.95 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ (b) 折射率结构常数为 $3.95 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ (c) 折射率结构常数为 $5.06 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

图注: — $L=1$ - - $L=2$, MRC ··· $L=2$, EGC - - $L=2$, SC
 ··· $L=3$, MRC - - $L=3$, EGC ··· $L=3$, SC

(c) 折射率结构常数为 $5.06 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

图注: — $M=4$, $L=3$, MRC - - $M=8$, $L=3$, MRC
 - - $M=4$, $L=3$, EGC ··· $M=8$, $L=3$, EGC
 ··· $M=4$, $L=3$, SC - - $M=8$, $L=3$, SC

图1 不同接收孔径数条件下, 4PPM调制光纤耦合单孔径以及多孔径接收系统误码率

图2 不同大气强度条件下, 4PPM和8PPM调制光纤耦合多孔径接收系统误码率

单孔径接收系统的误码率为 1.28×10^{-1} 。当折射率结构常数为 $3.95 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ， γ_0 同为15 dB时，4PPM调制三孔径MRC、EGC和SC接收系统的误码率分别为 6.90×10^{-4} 、 9.83×10^{-4} 和 2.40×10^{-3} ，同等条件下单孔径接收系统的误码率为 4.67×10^{-1} 。当折射率结构常数为 $5.06 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ， γ_0 同为15 dB时，4PPM调制三孔径MRC、EGC和SC接收系统的误码率分别为 2.61×10^{-3} 、 3.91×10^{-3} 和 7.05×10^{-3} ，同等条件下单孔径接收系统的误码率为 7.08×10^{-1} 。在Monte Carlo仿真中， $M=4$ 、8、16等数值都能得到多孔径接收系统具有多孔径接收增益的类似研究结果，所以这里只给出了 $M=4$ 作为典型值的仿真分析结果。

图2给出了不同大气强度条件下4PPM和8PPM调制光纤耦合多孔径接收系统的误码率分析结果。

从图2可以看出，在同等条件下，8PPM调制模式三孔径接收系统的通信性能在MRC、EGC和SC 3种合并方式下都优于4PPM调制三多孔径接收系统。例如，当折射率结构常数为 $2.91 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ， γ_0 同为15 dB时，4PPM调制三孔径MRC、EGC和SC接收系统的误码率分别为 1.25×10^{-4} 、 2.06×10^{-4} 和 7.81×10^{-4} ；同等条件下，8PPM调制三孔径MRC、EGC和SC接收系统的误码率分别为 4.99×10^{-6} 、 1.05×10^{-5} 和 6.36×10^{-5} 。当折射率结构常数为 $5.06 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ， γ_0 同为15 dB时，4PPM调制三孔径MRC、EGC和SC接收系统的误码率分别为 2.61×10^{-3} 、 3.91×10^{-3} 和 7.05×10^{-3} ；同等条件下，8PPM调制三孔径MRC、EGC和SC接收系统的误码率分别为 5.27×10^{-4} 、 8.24×10^{-4} 和 1.73×10^{-3} 。

6 结束语

基于Gamma-Gamma光强分布大气模型、非中心卡方分布光纤耦合效率分布模型以及MPPM调制的条件误码率，给出了基于光纤耦合的MPPM调制多孔径接收系统在MRC、EGC以及SC合并条件下的平均误码率表达式。在具有相同的总平均接收光能量条件下，对比分析了4PPM调制多孔径接收系统和单孔径接收系统的误码率性能。同时，在同等条件下，研究对比了4PPM和8PPM光纤耦合多孔径接收系统的误码率性能。研究结果表明，对于4PPM调制光纤耦合多孔径接收系统，多孔径接收相对于单孔径接收存在不同大小的多孔径增益。在相同 γ_0 条件下，MRC的多孔径增益略优于EGC，且MRC和EGC的多孔径增益都优于SC。在4PPM和8PPM光纤耦合多孔径接收系统的误码率性能对比中，8PPM调制多孔径接收系统的通信性能在MRC、EGC和SC 3种合并方式下都优于4PPM调制多孔径接收系统。

参考文献：

- [1] CHAN V W S. Free-space optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4750-4762.
- [2] 杨清波. 星地下行相干激光通信系统接收性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
YANG Q B. Research on receiving performance of satellite-to-ground downlink coherent laser communication systems[D]. Harbin Institute of Technology, 2012.
- [3] ZHAO W, HAN Y, YI X. Error performance analysis for FSO systems with diversity reception and optical preamplification over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channels[J]. Journal of Modern Optics, 2013, 60(13): 1060-1068.
- [4] LEE J, CHAN V W S. Diversity coherent and incoherent receivers for free-space optical communication in the presence and absence of interference[J]. Optical Communications & Networking IEEE/OSA Journal, 2009, 1(5): 463-483.
- [5] SAHIN S. Improvement of required SNR for satellite-to-ground optical communication via aperture diversity by using PPM, communication systems, networks and digital signal processing (CSNDSP)[C]//2016 10th International Symposium on. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [6] KAUR K, MIGLANI R, MALHOTRA J S. Analysis of MIMO FSO over different modulation techniques[J]. Pertanika Journal of Science & Technology, 2017, 25(3): 905-919.
- [7] VISWANATH A, JAIN V K, KAR S. Reduction in transmitter power requirement for earth-to-satellite and satellite-to-earth free space optical links with spatial diversity[J]. Optical and Quantum Electronics, 2017, 49(12): 418.
- [8] BOROSON D M, SCOZZAFAVA J J, MURPHY D V, et al. The lunar laser communications demonstration (LLCD)[C]//IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology. Piscataway: IEEE Press, 2009: 23-28.
- [9] MURPHY D V, KANSKY J E, GREIN M E, et al. LLCD operations using the lunar lasercom ground terminal[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 8971. Piscataway: IEEE Press, 2014: 450-453.
- [10] VISWANATH A, JAIN V K, KAR S. Performance evaluation of satellite-to-earth FSO link in presence of turbulence and weather conditions for different IM schemes[C]//2016 Twenty Second National Conference on Communication (NCC). Piscataway: IEEE Press, 2016.

- [11] WALLNER O, WINZER P J, LEEB W R. Alignment tolerances for plane-wave to single-mode fiber coupling and their mitigation by use of pigtailed collimators[J]. Applied Optics, 2002, 41(4): 637-643.
- [12] WINZER P J, LEEB W R. Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lidar[J]. Optics Letters, 1998, 23(13): 986-988.
- [13] 李康宁. 空间光通信多孔径接收系统性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2017.
- LI K N. Research on performance of multiple apertures receiver system for free-space optical communications[D]. Harbin Institute of Technology, 2017.
- [14] DIKMELIK Y, DAVIDSON F M. Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2005, 44(23): 4946-4952.

[作者简介]



李康宁（1986-），中国电子科学研究院高级工程师，主要研究方向为空间激光通信。

冯旭（1987-），中国电子科学研究院高级工程师，主要研究方向为卫星通信网络。

高建文（1987-），中国电子科学研究院高级工程师，主要研究方向为空间通信技术。



马晶（1956-），男，光学专业，哈尔滨工业大学航天学院教授，博士生导师，空间光通信技术研究中心主任，可调谐激光技术国家级重点实验室主任，主要研究方向为卫星光通信、激光干涉计量、光学信息处理、激光全息等。