

# 大气湍流综合效应下空间分集接收性能研究

张慧颖<sup>1,2</sup> 李洪祚<sup>1</sup> 肖冬亚<sup>1</sup> 宁素焕<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学空间光通信研究所, 长春 吉林 130000

<sup>2</sup>吉林化工学院信息与控制工程学院, 吉林 吉林 132022

**摘要** 分析和研究大气湍流和瞄准误差综合效应下,空间分集接收技术对差分相移键控(DPSK)光通信性能的改善。在不同湍流情况下,讨论采用多入多出(MIMO)和单入多出(SIMO)空间分集技术的系统性能;并将3种分集合并技术对系统误码率(BER)和中断概率的影响进行分析;采用广义超几何方法推导出自由空间光通信(FSO)系统误码率闭合表达式。由分析和实验结果可知:空间分集技术可以提高系统误码率并降低中断概率,有效地改善大气湍流引起的信道衰落;当分集数增大时,系统性能改变越明显。对比3种分集技术,最大比合并接收分集技术最为优越。

**关键词** 光通信;空间分集技术;广义超几何;误码率;单入多出;多入多出

中图分类号 TN929 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0405002

## Performance Analysis of Spatial-Diversity Reception over Combined Effects of Atmospheric Turbulence

Zhang Huiying<sup>1,2</sup> Li Hongzuo<sup>1</sup> Xiao Dongya<sup>1</sup> Ning Suhuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Space Optical Communication, Changchun University of Science and Technology, Jilin, Changchun 130000, China*

<sup>2</sup>*College of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin, Jilin 132022, China*

**Abstract** The improvement for the spatial-diversity reception technology with the combined effect of atmospheric turbulence and pointing errors based on differential phase shift keying (DPSK) modulation is analyzed and studied. The performance of spatical-diversity reception for multiple input multiple output (MIMO) and single input multiple output (SIMO) systems is discussed, and the bit error rate (BER) and outage probability for three types of diversity reception technologies are investigated under different turbulence situations, and the novel closed form expressions of BER and outage probability for free space optical communication(FSO) system are derived with the generalized hypergeometric method. The analysis and experiment results show that the performance of BER can be improved, the outage probability can be degraded with the spatial-diversity reception technology, and channel fading caused by atmospheric turbulence can be effectively improved. With the number of diversity increasing, performance of FSO system is improved obviously. Compared with three diversity reception technologies, the maximum ratio combining diversity reception technology is most advantageous.

**Key words** optical communications; spatial-diversity reception technology; generalized hypergeometric method; bit error rate; single input multiple output; multiple input multiple output

**OCIS codes** 060.4510; 060.5060; 060.2605

## 1 引 言

近年来,自由空间光通信(FSO)由于其高速率、安全性好、大带宽等特点受到越来越多的关注和应用。FSO所面临的关键问题是激光信号在大气中传输时容易受到大气湍流、光强闪烁和瞄准误差的影响引起信号衰落,

收稿日期: 2015-11-13; 收到修改稿日期: 2015-12-07

基金项目: 国家863计划(2011AA7117046)、国家自然科学基金(60977052)

作者简介: 张慧颖(1982—),女,博士研究生,讲师,主要从事空间激光通信等方面的研究。E-mail: funnyjlu@163.com

导师简介: 李洪祚(1953—),男,本科,教授,博士生导师,主要从事空间激光通信技术方面的研究。

E-mail: LiHongzuo@sohu.com(通信联系人)

影响通信系统稳定性和可靠性<sup>[1]</sup>。大气湍流不仅造成接收端光强起伏变化而且会使接收端产生波前畸变;另一方面,由于接收端和发射端之间未校准引起的随机抖动会大大降低系统接收灵敏度。为了克服大气湍流影响,国内外很多学者通过研究和实验提出增大接收孔径的方案,但是该方案并不能克服光强波动效应;国内学者武云云等<sup>[2-3]</sup>通过实验提出将自适应光学技术应用于波前畸变补偿可有效提高系统性能,但是该方案增加了系统的复杂程度;国外大量学者通过研究发现,多人多出(MIMO)空间光通信系统可以满足FSO系统对大容量、强抗衰落能力的需求,充分弥补大气湍流效应对通信性能的影响,采用分集技术的MIMO空间光通信系统可以提高信息冗余性,以减小衰落效应提高传输速率<sup>[4-7]</sup>。由文献[8-9]可知,空间分集技术可以显著降低中断概率同时提供较高链路余量,提高高空平台光通信链路性能。文献[10]指出MIMO系统通常采用开关键控(OOK)调制,这种调制方式虽然简单,但是易受大气湍流影响而且系统敏感度高,因此逐渐被脉冲位置调制(PPM)所取代,但是PPM调制格式使发射机的结构复杂化对带宽需求高,解调时需要严格的时钟同步和符号同步;文献[11-12]采用差分相移键控(DPSK)相干调制方式抑制湍流方面的性能,通过比较可知,DPSK调制方式优于OOK调制方式,解调时不需要同步信号。目前,FSO系统中逐步向DPSK方式转换。

在此基础上,本文研究了DPSK光通信系统的空间分集接收技术,有效解决由大气湍流引起的光束漂移和扩展等现象而导致的多径效应,提高系统的传输速率和误码率(BER)。在Gamma-Gamma信道模型下,综合考虑大气湍流和瞄准误差联合效应下对DPSK光通信分集接收技术的影响,推导出FSO系统误码率和中断概率两个重要性能指标的理论模型,并且采用广义超几何方法得到其闭合表达式;完成3种分集技术的理论分析和实验仿真,旨在找到一种更适合FSO系统的分集技术。

## 2 MIMO理论及系统模型

### 2.1 MIMO理论

分集合并技术是将接收到不同路径承载同一信息的多个独立信号副本之间变得“不相关”的方法。分集技术分为空间分集、频率分集、角度分集、时间分集和地域分集等,空间分集由于不受时延和环境因素的限制被广泛采用。空间分集分为多发单收(MISO)和单发多收(SIMO)。MIMO系统在发送或接收端配置多副天线,信号通过多条天线传送和接收,在不牺牲信号带宽的情况下有效抵制信道衰落。接收分集是在接收端使用多副天线,通过将每副天线上接收的信号副本进行适当合并,获得分集增益改善系统信能<sup>[13]</sup>。

### 2.2 MIMO系统模型

基于DPSK调制的MIMO系统模型如图1所示。输入的二进制信号经过两级串联马赫-曾德尔(MZM)调制器调制后加载到激光光束上。在发射端,携带信息的光信号通过 $M$ 条发射天线发射至大气信道中;为保证不同传输信道之间的衰落特性相互独立,设计时,选择光学发送天线和光学接收天线之间距离处于厘米量级之上。在接收端,放置 $N$ 条光学接收天线,将 $N$ 个信号副本先线性合并后进行解调<sup>[14]</sup>。若不考虑大气湍流,第 $k$ 条支路输出的电流可表示为 $i(t) = \eta A^2 \cos[\phi_s(t) - \phi_s(t - T_b)]$ ,其中 $\eta$ 表示光电转换效率, $A$ 为接收天线面积, $T_b$ 表示相位延迟时间。如果信号电流足够大,来自探测器暗电流和热噪声的影响忽略不计,则输出的信

噪比(SNR)可以表示为 $R_{sn}(h) = \frac{\eta A^2 h}{2qB_e} = \bar{\gamma}h$ ,其中 $q$ 表示电子电荷量, $B_e$ 表示等效带宽, $\bar{\gamma}$ 为平均信噪比,因此误

码率可以表示为 $p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\sqrt{R_{sn}(h)}}{\sqrt{2}} \right] = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{\bar{\gamma}h}}{\sqrt{2}} \right)$ 。

由于系统采用的是先线性合并后解调的结构,因此,通过选择不同的加权因子可以对探测阵列实现不同的合并方式。常用的合并方法包括最大比合并(MRC)、等增益合并(EGC)和选择性合并(SC)3种方式。合并后的信号采用马赫-曾德尔延迟仪(MZDI)解调方式,该解调方式性能虽不及外差相干解调,但是解调结构简单且无需本振激光。

### 2.3 FSO综合信道模型

假设大气信道是带有加性高斯白噪声(AWGN)且无记忆准静态平坦衰落的时间遍历模型。被调制后的信息经过发送天线发送至大气湍流信道,在接收端,第 $n$ 条接收天线接收到信号可以表示为<sup>[15]</sup>

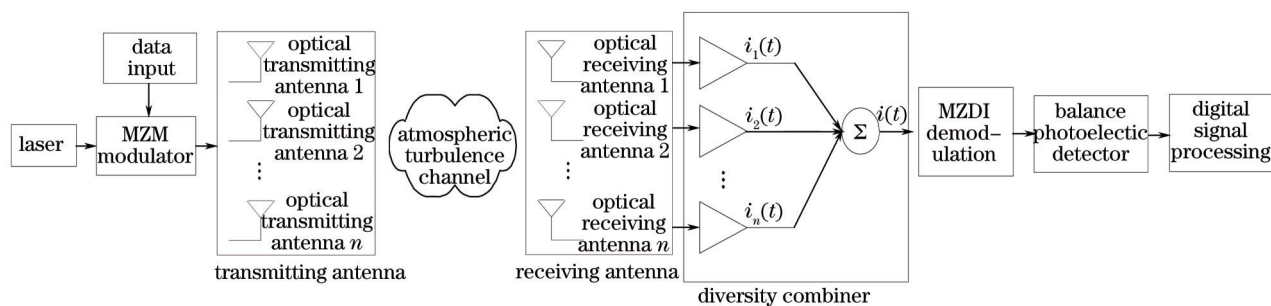


图1 MIMO系统框图

Fig.1 Block diagram of MIMO

$$y_n = x\eta \sum_{m=1}^M h_{mn} + n_n, n=1,2,\dots,N, \quad (1)$$

式中  $x$  表示发送的二进制信号,  $\eta$  表示探测器转换效率,  $h_{mn}$  表示第  $m$  根发送天线和第  $n$  根接收天线之间产生的信道衰落系数,  $n_n$  表示均值为 0、方差为  $N_0/2$  的加性高斯白噪声。在接收端,由于大气链路损耗、大气湍流和大气衰落所引起的光强度波动定义为光辐照度,其可以表示为  $h_{mn} = h_{l_{mn}} h_{s_{mn}} h_{p_{mn}}$ , 其中  $h_{l_{mn}}$  表示来自第  $m$  根发送天线和第  $n$  根接收天线之间路径损耗和光束消光引起的衰落系数,  $h_{s_{mn}}$  表示由于闪烁效应导致的衰减而  $h_{p_{mn}}$  表示由于几何扩散和瞄准误差引起的衰减。根据 Beers Lambert 定律  $h_{l_{mn}}$  可以表示为

$$h_{l_{mn}} = \exp(-\sigma l_{mn}), \quad (2)$$

式中  $\sigma$  表示衰减系数,  $l_{mn}$  表示第  $m$  根发送天线和第  $n$  根接收天线之间的传输距离。通常,大气损耗是一个常量。由于湍流状态是一种随机变化过程,采用 Gamma-Gamma 模型来描述光强起伏的概率分布函数 (PDF),即

$$f_{h_{mn}}(h_{smn}) = \frac{2(\alpha_{mn}\beta_{mn})^{(\alpha_{mn}+\beta_{mn})/2}}{\Gamma(\alpha_{mn})\Gamma(\beta_{mn})} h_{smn}^{\left(\frac{\alpha_{mn}+\beta_{mn}}{2}-1\right)} K_{\alpha_{mn}-\beta_{mn}}(2\sqrt{\alpha_{mn}\beta_{mn}h_{smn}}), \quad (3)$$

式中  $K_{(\alpha-\beta)}$  表示修正的第二类贝叶斯公式,  $\Gamma$  表示 Gamma 函数,正参数  $\alpha$  和  $\beta$  代表强湍流和弱湍流光波强度波动。根据大气环境,闪烁参数  $\alpha$  和  $\beta$  可以定义为

$$\alpha = \left\{ \exp \left[ \frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1},$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[ \frac{0.51\sigma_R^2}{(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (4)$$

式中  $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$  表示 Rytov 方差,  $C_n^2$  表示折射率结构参数,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  表示波数,  $L$  表示发射机和接收机之间的通信距离。发射机和接收机之间由于未校准导致信号衰退称为瞄准误差。假定圆形探测孔半径为  $\delta$  并且探测光束为高斯光束,则  $h_p$  的 PDF 表示为<sup>[16]</sup>

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\delta_{mn}^2}{A_0} h_p^{\delta_{mn}^2 - 1}, 0 \leq h_p \leq A_0, \quad (5)$$

式中  $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$  表示在  $r=0$  处的部分收集功率;径向距离用  $r$  表示;而  $\delta$  定义为在接收端处等效光束半径和瞄准误差抖动标准偏移量之间的比值。则在综合大气信道下,由文献[16]可以得到 MIMO 信道模型的闭合表达式:

$$f_{h_{mn}}(h_{mn}) = \frac{\alpha_{mn}\beta_{mn}\delta_{mn}^2}{A_{0mn}h_{l_{mn}}\Gamma(\alpha_{mn})\Gamma(\beta_{mn})} \times G_{1,3}^{3,0} \left[ \frac{\alpha_{mn}\beta_{mn}h_{mn}}{A_{0mn}h_{l_{mn}}} \middle| \delta_{mn}^2 - 1, \alpha_{mn} - 1, \beta_{mn} - 1 \right]. \quad (6)$$

当  $m=1, n=1$  时是单入单出 (SISO) 大气信道模型。由文献[17]可知,  $h$  的累积分布函数 (CDF) 为  $F_h(h) \triangleq \int_0^h f_h(h)dh$ , 采用 Meijer-G 对其进行化简可得

$$F_{h_{mn}}(h_{mn}) = \frac{\delta_{mn}^2}{\Gamma(\alpha_{mn})\Gamma(\beta_{mn})} \times G_{2,4}^{3,1} \left[ \begin{matrix} \alpha\beta h_{mn} \\ A_{0mn} h_{l_{mn}} \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1, & \delta_{mn}^2 + 1 \\ \delta_{mn}^2, & \alpha_{mn}, & \beta_{mn}, & 0 \end{matrix} \right]. \quad (7)$$

### 3 系统性能分析

#### 3.1 误码率分析

##### 3.1.1 SISO 系统误码率推导

假设系统为基于 DPSK 调制方式,由 1 根发送天线和 1 根接收天线构成的 SISO 空间光通信系统,则在大气湍流和瞄准误差的综合信道下的系统平均误码率可以表示为<sup>[18]</sup>

$$P_{\text{SISO}} = \int_0^{\infty} f_h(h) p_c(h) dh, \quad (8)$$

式中取  $m=1, n=1$  得到 SISO 信道模型并将系统误码率代入(8)式,利用 Meijer-G 函数性质(07.34.21.0011.01)和

$\text{erfc}(\cdot)$  的 Meijer-G 函数形式  $\text{erfc}(\sqrt{x}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left[ x \middle| \begin{matrix} 1 \\ 0, \frac{1}{2} \end{matrix} \right]$  进行化简,得到 SISO-FSO 平均误码率的闭合表达式为

$$P_{\text{SISO}} = \frac{\delta^2}{2\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{4,3}^{2,3} \left[ \begin{matrix} A_0 h_l \bar{r} \\ 2\alpha\beta \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1-\delta^2, & 1-\alpha, & 1-\beta, & 1 \\ 0, & \frac{1}{2}, & -\delta^2 & \end{matrix} \right]. \quad (9)$$

##### 3.1.2 MIMO 系统误码率推导

设 MIMO 空间光通信系统的发射天线数量为  $M$  根,接收天线数量为  $N$  根。假设各接收天线接收的信号衰减特性满足相互独立性,设计时使接收天线之间的距离大于大气相干长度。对于 MIMO-FSO 系统,线性合并后进行解调,则输出的平均误码率可以表示为<sup>[19]</sup>

$$P_{\text{MIMO}} = \int_0^{\infty} f_h(\mathbf{h}) \times \frac{1}{2} \text{erfc} \left[ \frac{\sqrt{\bar{\gamma}}}{\sqrt{2} MN} \sqrt{\sum_{n=1}^N \left( \sum_{m=1}^M h_{mn} \right)} \right] d\mathbf{h}, \quad (10)$$

式中  $f_h(\mathbf{h})$  表示长度为  $MN$  由向量  $\mathbf{h} = (h_{11}, h_{12}, \dots, h_{MN})$  组成的综合信道状态概率分布函数。将(6)式代入(10)式,并采用 Meijer-G 函数性质进行化简,则 DPSK 调制的 MIMO-FSO 平均误码率的闭合表达式表示为

$$P_{\text{MIMO}} = \prod_{m=1}^M \prod_{n=1}^N \frac{\delta_{mn}^2}{2\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha_{mn})\Gamma(\beta_{mn})} \times G_{4,3}^{2,3} \left[ \begin{matrix} \bar{\gamma} A_{0mn} h_{l_{mn}} \\ 2\alpha_{mn} \beta_{mn} M^2 N^2 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1-\delta_{mn}^2, & 1-\alpha_{mn}, & 1-\beta_{mn}, & 1 \\ 0, & \frac{1}{2}, & -\delta_{mn}^2 & \end{matrix} \right]. \quad (11)$$

在接收端,采用分集技术可以有效改善大气湍流对系统性能的影响,提高系统信噪比。分集技术的核心是解决在接收端如何将多个独立衰落信号进行合并,因此选择合适的加权系数是合并分集技术的关键。

##### 1) 最大比合并技术

最大比合并技术是信道状态信息可知的一种最优合并技术,它将接收的来自不同路径的  $N$  个相互独立不相关的分集信号通过增益可变放大器为信号分配增益系数,选取合适的加权系数后进行同相加权合并<sup>[20]</sup>。

因此, MRC 输出的总信噪比为各分集支路的信噪比之和,即  $R_{\text{SN-MRC}} = \sum_{i=1}^N R_{\text{SN-}i} / N = \frac{\bar{\gamma}}{N} \sum_{i=1}^N h_i$ 。  $R_{\text{SN-}i}$  为第  $i$  条支路

输出的信噪比。则 BER 可表示为  $p_{\text{SISO-MRC}}(h) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \frac{\sqrt{R_{\text{SN-MRC}}}}{\sqrt{2}} \right)$ 。由于 MRC 的加权系数与接收光强呈正比例

关系,因此,经过大气信道后在接收端采用 MRC 技术平均误码率为

$$P_{\text{SISO-MRC}} = \int_0^{\infty} f_{h_n}(h_n) \times \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\sum_{i=1}^N R_{\text{SN-}i} \times \frac{1}{\sqrt{2N}}} \right) dh_n = \int_0^{\infty} f_{h_n}(h_n) \times Q \left( \sqrt{\sum_{i=1}^N R_{\text{SN-}i} \times \frac{1}{\sqrt{N}}} \right) dh_n. \quad (12)$$

由于  $Q$  函数的近似表达式为  $Q(x) \approx \frac{1}{12} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) + \frac{1}{4} \exp\left(-\frac{2x^2}{3}\right)$ , 将(12)式中的积分采用  $Q$  函数的近似表达式进行化简,则有



$$P_{\text{SIMO-MRC}} = \frac{1}{12} \prod_{n=1}^N \int_0^{\infty} f_{h_n}(h_n) \times \exp\left(-\frac{\eta A^2 h_n}{4NqB_e}\right) dh_n + \frac{1}{4} \prod_{n=1}^N \int_0^{\infty} f_{h_n}(h_n) \times \exp\left(-\frac{\eta A^2 h_n}{3NqB_e}\right) dh_n. \quad (13)$$

将  $f_{h_n}(h_n)$  和  $\exp(-x)$  的 Meijer-G 的表达式  $\exp(-x) = G_{0,1}^{1,0}\left[x \middle| -\right]$  代入(13)式,最大比合并后的平均误码率闭合表达式为

$$\begin{aligned} P_{\text{SIMO-MRC}} &= \frac{1}{12} \prod_{n=1}^N \frac{\delta_n^2}{\Gamma(\alpha_n)\Gamma(\beta_n)} G_{3,2}^{1,3} \left[ \frac{\eta A^2}{4NqB_e} \cdot \frac{A_{0n} h_{ln}}{\alpha_n \beta_n} \middle| \begin{matrix} 1-\delta_n^2, & 1-\alpha_n, & 1-\beta_n \\ 0, & -\delta_n^2 \end{matrix} \right] + \\ &\frac{1}{4} \prod_{n=1}^N \frac{\delta_n^2}{\Gamma(\alpha_n)\Gamma(\beta_n)} G_{3,2}^{1,3} \left[ \frac{\eta A^2}{3NqB_e} \cdot \frac{A_{0n} h_{ln}}{\alpha_n \beta_n} \middle| \begin{matrix} 1-\delta_n^2, & 1-\alpha_n, & 1-\beta_n \\ 0, & -\delta_n^2 \end{matrix} \right] = \\ &\frac{1}{12} \prod_{n=1}^N \frac{\delta_n^2}{\Gamma(\alpha_n)\Gamma(\beta_n)} G_{3,2}^{1,3} \left[ \frac{\bar{\gamma}_n}{2N} \cdot \frac{A_{0n} h_{ln}}{\alpha_n \beta_n} \middle| \begin{matrix} 1-\delta_n^2, & 1-\alpha_n, & 1-\beta_n \\ 0, & -\delta_n^2 \end{matrix} \right] + \\ &\frac{1}{4} \prod_{n=1}^N \frac{\delta_n^2}{\Gamma(\alpha_n)\Gamma(\beta_n)} G_{3,2}^{1,3} \left[ \frac{2\bar{\gamma}_n}{3N} \cdot \frac{A_{0n} h_{ln}}{\alpha_n \beta_n} \middle| \begin{matrix} 1-\delta_n^2, & 1-\alpha_n, & 1-\beta_n \\ 0, & -\delta_n^2 \end{matrix} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

式中  $\alpha_n$ 、 $\beta_n$  和  $\bar{\gamma}_n$  分别表示采用 MRC 的 FSO 中第  $n$  条支路的信道参数和平均信噪比。

### 2) 等增益合并技术

等增益合并技术(EGC)对信号合并时无需对信号进行加权处理,权系数均为 1。将各分集支路信号进行同相处理后合并叠加,对于具有  $N$  个接收端的 FSO 系统,合并后解调器输出信噪比为

$$R_{\text{SN-EGC}} = \frac{\eta A^2}{2NqB_e} \left( \sum_{i=1}^N h_i \right) = \frac{\bar{\gamma}}{N} \left( \sum_{i=1}^N h_i \right), \text{BER 表达式为 } p_{\text{SIMO-EGC}}(h) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{R_{\text{SN-EGC}}}}{\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{\bar{\gamma}}}{\sqrt{2} \sqrt{N}} \sum_{i=1}^N \sqrt{h_i} \right)^{[21]}. \text{ 通}$$

过大气综合信道后采用 EGC 技术并利用 Meijer-G 公式化简得到的平均误码率为

$$P_{\text{SIMO-EGC}} = \int_0^{\infty} f_{h_n}(h_n) \times \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{\bar{\gamma}}}{\sqrt{2N}} \sqrt{\sum_{i=1}^N h_n} \right) dh_n = \prod_{n=1}^N \frac{\delta_n^2}{2\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha_n)\Gamma(\beta_n)} G_{4,3}^{2,3} \left[ \frac{\bar{\gamma} A_{0n} h_{ln}}{2N\alpha_n \beta_n} \middle| \begin{matrix} 1-\delta_n^2, & 1-\alpha_n, & 1-\beta_n, & 1 \\ 0, & \frac{1}{2}, & -\delta_n^2 \end{matrix} \right]. \quad (15)$$

### 3) 选择性合并技术

选择性合并技术(SC)是 FSO-MIMO 系统中最简单的一种合并技术。在 SC 合并时,只选取接收到的分集信号输出强度或信噪比最高的一个支路,舍弃其他分集支路信号。因此,选择性合并技术的加权系数只有一条支路为 1,其他支路为 0<sup>[22]</sup>。SC 技术实现起来比较容易,此时的信道状态为  $h_{\text{sc}} = \max(h_1, h_2, \dots, h_n)$ 。信噪比的提高是以牺牲合并增益为代价的,因此,SC 技术不是最优的合并技术。输出的信噪比可以表示为

$$R_{\text{SN-SC}} = \frac{\eta A^2 h_{\text{sc}}}{2NqB_e} = \bar{\gamma} h_{\text{sc}}, \text{ 系统平均误码率可表示为 } p_{\text{SIMO-SC}}(h) = \int_0^{\infty} f_h(h_{\text{sc}}) \times \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{\bar{\gamma} h_{\text{sc}}}}{\sqrt{2}} \right) dh_{\text{sc}}. \text{ 由于 SC 合并的信道}$$

模型 PDF 为

$$f_{h_{\text{sc}}}(h_{\text{sc}}) = \frac{dF_{h_{\text{sc}}}(h_{\text{sc}})}{dh_{\text{sc}}} = \frac{d}{dh_{\text{sc}}} \prod_{j=1}^N F_{h_j}(h_{\text{sc}}) = \sum_{i=1}^N \prod_{j=1, j \neq i}^N f_{h_i}(h_{\text{sc}}) F_{h_j}(h_{\text{sc}}), \quad (16)$$

式中  $h$  的累积分布函数  $F_h(h)$  如(7)式所示,通过对  $N$  个半无限的积分求和可得平均误码的表达式为

$$P_{\text{SIMO-SC}} = \frac{1}{2} \times \sum_{i=1}^N \prod_{j=1, j \neq i}^N \int_0^{\infty} f_{h_i}(h_{\text{sc}}) F_{h_j}(h_{\text{sc}}) \times \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{\bar{\gamma} h_{\text{sc}}}}{\sqrt{2}} \right) dh_{\text{sc}}, \quad (17)$$

式中的积分可以采用高斯求积规则(GQR)进行化简。

## 3.2 中断概率分析

中断概率是衡量光通信系统的重要指标,它定义为短时间(小于强度起伏相关时间)内系统信噪比低于接收机门限信噪比  $R_{\text{SN-th}}$  的概率。假定信道性能满足门限值规定的接收灵敏度。MRC 技术和 EGC 技术的中断概率可以表示为  $P_{\text{out}} = P_r(R_{\text{SN}} < R_{\text{SN-th}}) = F_{\gamma}(R_{\text{SN-th}})^{[23-24]}$ ,其中  $P_r$  表示事件发生的概率,  $F_{\gamma}(R_{\text{SN-th}})$  表示瞬时信噪比(SNR)的累积分布函数(CDF)。经过计算可得中断概率的表达式为

$$P_{\text{out}} = F_{\gamma}(R_{\text{SN-th}}) = \frac{\delta^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[ \frac{\alpha\beta}{A_0 h_1 M N} \sqrt{\frac{R_{\text{SN-th}}}{R_{\text{SN}}}} \middle| \begin{matrix} 1, & 1 + \delta^2 \\ \delta^2, & \alpha, & \beta, & 0 \end{matrix} \right], \text{其中 } \frac{R_{\text{SN-th}}}{R_{\text{SN}} M^2 N^2} \text{ 表示归一化中断门限值。而}$$

SC技术是对  $N$  条支路信号进行分析,选出信噪比最大的一条支路作为接收信号的输出,则中断概率可以表示为  $P_{\text{out}} = P_r(R_{\text{SN-SC}} < R_{\text{SN-th}})$ 。

### 4 系统仿真及结果分析

基于第3节推导的有关系统误码率和中断概率的闭合表达式在 Matlab 平台下进行仿真,分析分集技术对空间光通信系统误码率和中断概率的影响。根据系统指标要求合理选取 FSO 系统的仿真参数如表 1 所示。

表1 系统仿真参数表

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Wavelength /nm	1550
Modulation format	DPSK
Atmospheric loss	0.9
Photoelectric conversion efficiency	0.8
Transmission distance /km	2.5
Noise standard deviation I/(A/Hz)	$\cong 10^{-7}$
Beam radius /m	5
Standard deviation of jitter /cm	25

在弱湍流  $\sigma_r^2 = 0.3(\alpha = 8.43, \beta = 6.92)$ 、中等湍流  $\sigma_r^2 = 1(\alpha = 2.5, \beta = 2.63)$  和强湍流  $\sigma_r^2 = 3(\alpha = 4.12, \beta = 1.44)$  条件下,对 SISO-FSO 系统、SIMO-FSO 和 MIMO-FSO 系统误码率进行仿真比较。分析时,选取不同数目的收发天线,对 SISO-FSO 系统、发送天线数目和接收天线数目为  $2 \times 2, 2 \times 3, 3 \times 2, 4 \times 4$  的 MIMO-FSO 系统及发送天线数量  $M=1$  和接收天线数量  $N=2, 4, 6, 8$  的 SIMO-FSO 系统进行仿真。仿真曲线如图 2 和 3 所示。

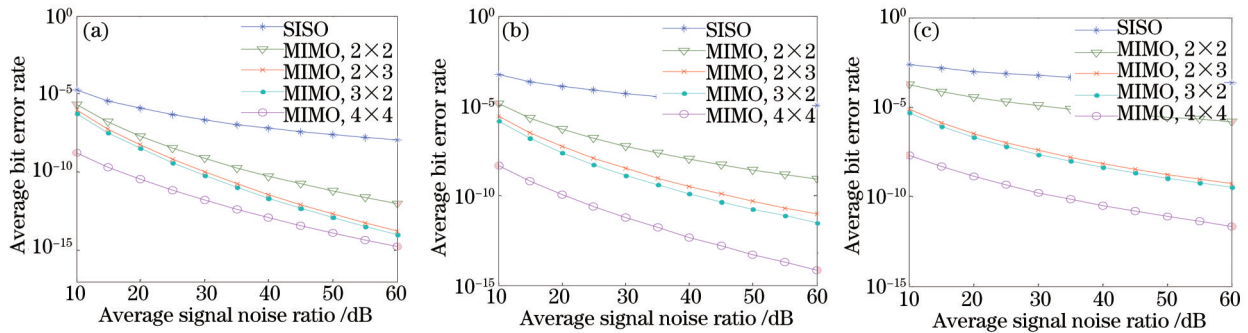


图2 不同湍流条件下 MIMO 系统 SNR 与 BER 关系曲线。(a) 弱湍流; (b) 中等湍流; (c) 强湍流

Fig.2 Curves of SNR and BER for MIMO system under different turbulence conditions. (a) Weak turbulence; (b) moderate turbulence; (c) strong turbulence

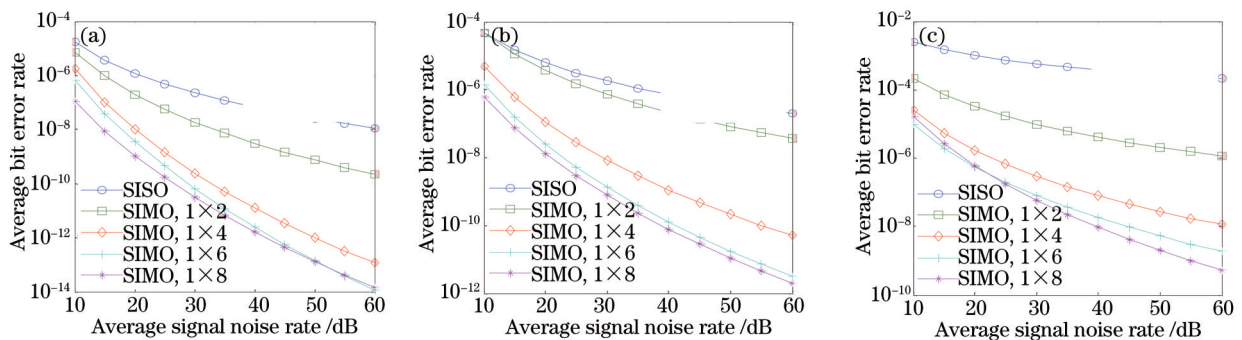


图3 不同湍流条件下 SIMO 系统 SNR 与 BER 关系曲线。(a) 弱湍流; (b) 中等湍流; (c) 强湍流

Fig.3 Curves of SNR and BER for SIMO system under different turbulence conditions. (a) Weak turbulence; (b) moderate turbulence; (c) strong turbulence

由图2和图3可以看出,当湍流增大时系统的误码率随之增大,对于未采用分集技术的系统其误码率随着信噪比的增加而有所改善。对于SIMO系统,当接收天线数目增加时系统误码性能得到明显改善,可有效克服大气湍流效应对系统的影响;但是当接收天线数目大于4时,改善的效果并不明显。与SIMO系统相比, $M \times N$ 的MIMO-FSO系统使误码率得到明显提高;2×3和3×2系统误码率几乎一致。在强湍流条件下,当系统信噪比为20 dB时,随着分集数从1增大至8时的平均误码率从 $10^{-3}$ 下降到 $10^{-7.2}$ ;2×2、2×3、3×2和4×4的系统误码率分别为 $10^{-4.3}$ 、 $10^{-7}$ 、 $10^{-7.2}$ 和 $10^{-9}$ ;而2×3和3×3的系统性能几乎一致。由此说明使用分集技术可以有效提高系统平均误码率,尤其是增加接收分集天线数目可以有效提高系统性能,但是系统性能的改善是以牺牲接收端复杂程度为代价的。当发射和接收数目为4×4时,系统可以获得最优误码性能。考虑综合信道环境在强湍流( $\sigma_r^2 = 3$ )条件,当接收天线数目分别为2、3和4时,分别对选用MRC、EGC和SC技术的SIMO-FSO系统进行仿真,平均误码率和信噪比关系仿真曲线如图4所示。

由仿真结果可看出,采用分集接收技术的SIMO-FSO系统比未采用分集接收技术的SISO-FSO系统在改善湍流效应影响方面有较大的优势。3种分集合并技术都可以有效改善系统误码率,而且系统抗衰能力随着接收天线数目的增加而增强。在3种分集合并技术中,MRC技术在改善系统误码率方面是一种最优的技术,而SC技术较差;EGC技术和MRC技术在误码性能改善方面非常接近。当信噪比为20 dB时,接收天线数目为2时,EGC技术和MRC技术下的平均误码率几乎相等;而当分集数的增加时,两者的平均误码率相差越来越明显。当接收天线数目为4时,MRC技术下的平均误码率比EGC技术高出1 dB。在相同信道参数条件下, $N=2$ 时的EGC与 $N=3$ 的MRC技术在平均误码率改善方面几乎一致。由图4很明显看出:采用MRC分集技术的2×2的MIMO系统性能最优。

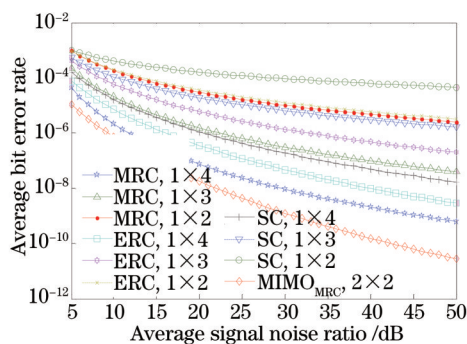


图4 3种合并技术对比图

Fig.4 Comparison for three combined technologies

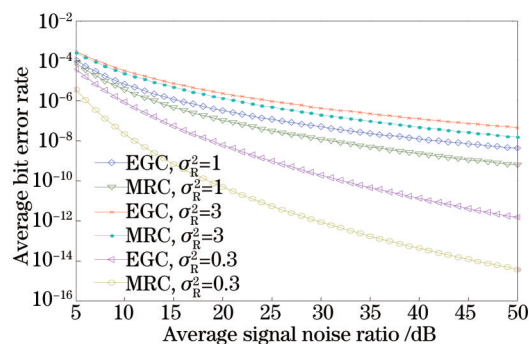


图5 不同湍流条件下,MRC和EGC的对比

Fig.5 Comparison of MRC with EGC under different turbulence conditions

图5为不同湍流条件下采用MRC和EGC技术的仿真曲线。由图可知,当湍流增加时,分集合并技术受到影响;在同种湍流强度下,MRC性能优于EGC性能。在不同湍流条件下,对SISO-FSO系统、SIMO-FSO系统及MIMO-FSO系统的中断概率进行仿真,中断概率随归一化门限的关系曲线如图6所示。

由图6可以看出,湍流强度和归一化门限的增加会导致中断概率增大,严重影响通信质量甚至造成通信中断。在不分集的情况下,中断概率可能会达到1,分集接收技术可以有效改善通信质量,降低中断概率。随着分集数目的增多,系统中断概率随之减小。当归一化门限为15 dB的弱湍流条件下,中断概率对 $N=2$ 和3的SIMO-FSO系统分别是0.59和0.56;而对2×2和4×4的MIMO-FSO系统分别为0.51和0.35。因此,4×4的MIMO系统改善地较为明显。在强湍流条件下,对3种分集技术进行对比可知,MRC的优势最为明显,SC的中断概率最高。但是,当分集数为3时,SC合并性能却优于分集数为2的EGC合并性能。分集接收技术可以有效提高通信系统的可靠性。

## 5 结 论

研究了大气湍流闪烁和瞄准误差综合效应下对采用分集合并技术的自由空间光通信性能影响。采用广义超几何方法推导出Gamma-Gamma信道下DPSK光通信系统平均误码率和中断概率的闭合表达式。通

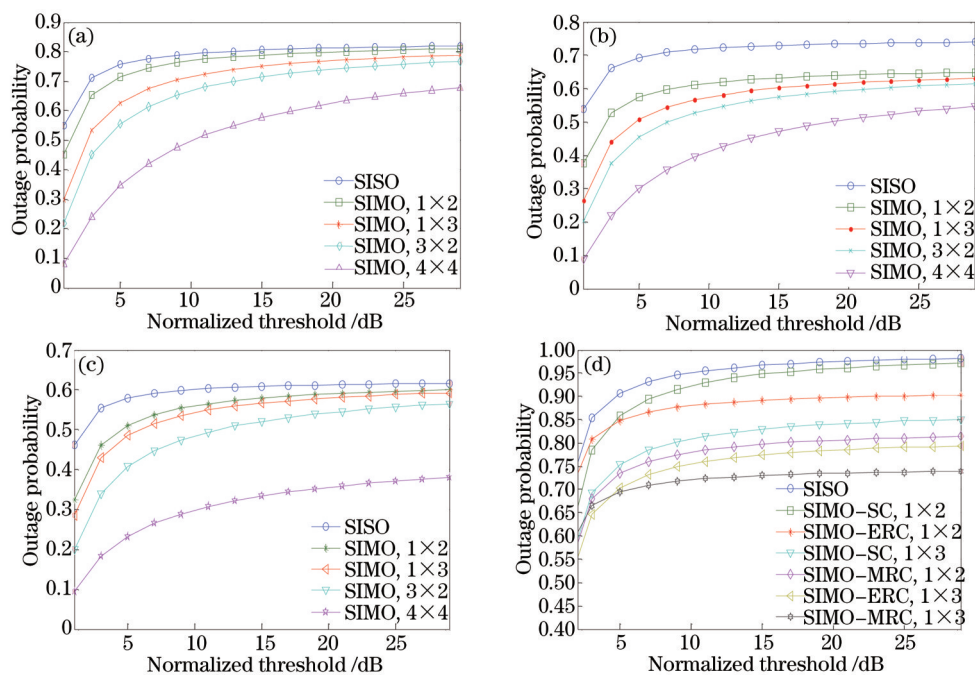


图6 不同湍流条件下中断概率与归一化门限的关系曲线图。(a)强湍流;(b)中等湍流;(c)弱湍流;(d)强湍流下采用合并技术  
Fig.6 Relationship between outage probability and normalized threshold under different turbulence conditions. (a) Strong turbulence;  
(b) moderate turbulence; (c) weak turbulence; (d) utilizing combined technique in strong turbulence

过仿真分析可知:平均误码率和中断概率随着发射/接收天线数目的增加而逐渐减小。MRC、EGC和SC技术可以有效抑制大气湍流现象。在相同信道参数条件下,采用MRC合并技术可以有效地改善平均误码率和中断概率,而EGC和MRC的技术性能几乎一致,具有较强的抗衰能力,但是MRC合并技术的系统复杂程度高。因此,不建议系统采用MRC合并,工程中采用EGC合并更为合适。这为FSO系统的研究和设计提供了理论依据,为进一步开展实验提供了重要的参考价值。

### 参 考 文 献

- 1 Jiang Huilin. The technologies and systems of space laser communication[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 35-52.  
姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 35-52.
- 2 Heba Yuksel, Christopher C Davis. Aperture averaging analysis and aperture shape invariance of received scintillation in free space optical communication links[C]. SPIE, 2006, 6304: 63041E.
- 3 Wu Yunyun. Application research of adaptive optics technique in atmospheric optical communications[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.  
武云云. 自适应光学技术在大气光通信中的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- 4 Wu Yunyun, Li Xinyang, Rao Changhui. Effect of atmospheric turbulent aberration on the bit-error performance of homodyne binary phase shift keying coherent optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 33(6): 0606002.  
武云云, 李新阳, 饶长辉. 大气湍流像差对空间零差二进制相移键控相干光通信误码性能的影响[J]. 光学学报, 2014, 33(6): 0606002.
- 5 E Bayki, R Schober, R K Mallik. Performance analysis of MIMO free-space optical systems in Gamma-Gamma fading[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(11): 3415-3424.
- 6 T A Tsiftsis, H G Sandalidis, G K Karagiannidis, et al.. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(2): 951-957.
- 7 M Safari, S Hranilovic. Diversity and multiplexing for near-field atmospheric optical communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(5): 1988-1997.
- 8 Zhao Jing, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al.. Application of spatial diversity technology for airborne laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080603.  
赵 静, 赵尚弘, 李勇军, 等. 空间分集技术在航空激光通信中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080603.
- 9 Wang Xiang, Zhao Shanghong, Zheng Guangwei, et al.. Performance analysis of high altitude platform optical communication links with



- spatial diversity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0106001.  
 王 翔, 赵尚弘, 郑光威, 等. 基于空间分集的高空平台光链路性能研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0106001.
- 10 J Li, J Q Liu, D P Taylor. Optical communication using subcarrier PSK intensity modulation through atmospheric turbulence channel[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(8): 1598–1606.
- 11 K Kiasaleh. Performance of coherent DPSK free-space optical communication systems in K-distributed turbulence[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 54(4): 604–607.
- 12 Song Gao, Anhong Dang, Hong Guo. Performance of wireless optical communication systems using DPSK modulation[C]. 11th International Conference on Advanced Communication Tecnology, 2009: 1793–1796.
- 13 Tang Yanfeng, Li Rui, Xia Dan, *et al.*. Performance simulation of MIMO system in space optical communication[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 37(4): 52–55.  
 唐雁峰, 李 锐, 夏 丹, 等. 空间光通信中光 MIMO 系统性能仿真[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 37(4): 52–55.
- 14 Chen Dan, Ke Xizheng. Research on diversity receive technology on wireless optical communication using subcarrier modulation[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(8): 128–133.  
 陈 丹, 柯熙政. 副载波调制无线光通信分集接收技术研究[J]. *通信学报*, 2012, 33(8): 128–133.
- 15 Mohammadreza A Kashani, M Uysal, M Kavehrad. A novel statistical channel model for turbulence-induced fading in free-space optical systems[J]. *J Lightwave Technol*, 2015, 33(11): 2303–2312.
- 16 Han Liqiang, You Yahui. 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.
- 17 Harilaos G Sandalidis, Theodoros A Tsiftsis, George K Karagiannidis. Optical wireless communication with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors[J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(20): 4440–4445.
- 18 Yi Xiang, Yue Peng, Liu Zengji, *et al.*. Performance analysis of coherent atmospheric[J]. *Jouranl of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(9): 1743–1748.  
 易 湘, 岳 鹏, 刘增基, 等. 基于分集接收技术的相干大气激光通信系统性能分析[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(9): 1743–1748.
- 19 Ke Xizheng, Liu Mei. Diversity reception technology over atmospheric turbulence channels in wireless optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0106005.  
 柯熙政, 刘 妹. 湍流信道无线光通信中的分集接收技术[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0106005.
- 20 K Prabu, D Sriram Kumar, Reza Malekian. BER analysis of BPSK-SIM-based SISO and MIMO FSO systems in strong turbulence with pointing errors[J]. *Optik*, 2014, 125(21): 6413–6417.
- 21 K Prabu, D Sriram Kumar. MIMO free-space optical communication employing coherent BPOLSK modulation in atmospheric optical turbulence channel with pointing errors[J]. *Opt Commun*, 2015, 343: 188–194.
- 22 Ranran Wang, Ping Wang, Tian Cao, *et al.*. Average bit error rate performance analysis of subcarrier intensity modulated MRC and EGC FSO systems with dual branches over M distribution turbulence channels[J]. *Optoelectronics Letters*, 2015, 11(4): 281–285.
- 23 Prabhmandeep Kaur, Virander Kumar Jain, Subrat Kar. Performance analysis of free space optical links using multi-input multi-output and aperture averaging in presence of turbulence and various weather conditions[J]. *IET Commun*, 2015, 9(8): 1104–1109.
- 24 Leng Jiaofeng, Hao Shiqi, Zhai Fuqi, *et al.*. Combination of spatial diversity coherent receivers for wireless optical communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 010602.  
 冷蛟锋, 郝士琦, 瞿福琪, 等. 无线相干光通信空间分集接收合并技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 010602.

栏目编辑: 张浩佳