

# Gamma-Gamma 大气湍流下相干光通信 分集接收技术研究

孙晶, 黄普明, 么周石

西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100

**摘要** 大气湍流引起的光强闪烁使得自由空间光通信(FSO)系统性能恶化,而分集接收技术可有效改善这一影响。为进一步分析分集接收技术对相干接收系统性能的影响,基于二进制相移键控(BPSK)调制和外差相干接收技术,建立了 Gamma-Gamma 大气湍流信道模型下自由空间光通信分集接收系统模型。在不同大气湍流强度和接收天线数情况下,分别采取最大比合并(MRC)、选择合并(SC)和等增益合并(EGC),分析了对应的系统误码率(BER)和通信中断概率(OP),并与相同接收口径下的传统单天线接收系统的性能进行了比较。结果表明:MRC、EGC 分集接收对大气湍流下的相干通信系统性能有明显改善,而 SC 分集接收仅当平均信噪比低于某一阈值时对相干通信系统的性能有所优化。

**关键词** 大气光学; 大气湍流; 相干光通信; 分集接收

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0706002

## Diversity Reception Technology in Coherent Optical Communication over Gamma-Gamma Atmospheric Turbulence Channel

Sun Jing, Huang Puming, Yao Zhoushi

*Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an, Shaanxi 710100, China*

**Abstract** The performance of free space optical communication (FSO) system will deteriorate with the existence of light scintillating caused by atmospheric turbulence. But the performance of FSO can be improved effectively by means of diversity reception technology. To further analyze its impact on the performance of coherent receiving system, we use binary phase-shift keying (BPSK) modulation and heterodyne detection to establish FSO system model with spatial diversity over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channel. Bit-error rate (BER) and outage probabilities (OP) of maximum ratio combining (MRC), selection combining (SC) and equal gain combining (EGC) with different numbers of receiving antennas and turbulence regions are analyzed. In addition, the BER and the OP of MRC, SC and EGC are compared with the performance of the traditional single-antenna receiving system with the same receiving aperture. The results show that spatial diversity based on MRC and EGC can improve the performance of coherent communication system over atmospheric turbulence, and the spatial diversity based on SC can improve the performance of the system only when the average signal to noise rate (SNR) is below a certain threshold.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric turbulence; coherent optical communication; diversity receiving

**OCIS codes** 010.1290; 010.1330; 060.1660

### 1 引 言

自由空间相干光通信因具有接收灵敏度高、传输速率高、保密性好、终端质量低和功耗低等优势,在未来空间信息组网中的应用前景广阔<sup>[1]</sup>。星地激

光通信作为空间信息组网的重要组成部分,其通信链路经过大气信道时,由于受到大气湍流的影响,接收平面会出现光强闪烁、光束漂移等现象,最终导致基于单天线接收的自由空间光通信(FSO)系统的通信性能无法得到保证。分集接收技术通过在接收端

收稿日期: 2018-01-25; 收到修改稿日期: 2018-03-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61231012)

作者简介: 孙晶(1990—),女,博士研究生,主要从事空间光通信方面的研究。E-mail: sjtiandi@126.com

导师简介: 黄普明(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事数据传输与处理、航天器通信技术方面的研究。

E-mail: huangpuming@hotmail.com

使用多个光学天线接收光信号,当接收天线间隔大于大气相干长度时,各支路接收信号是相互独立的,将其适当地合并,可有效改善大气湍流对空间通信系统性能的影响<sup>[2]</sup>。

目前,主要的大气湍流信道模型有:对数正态分布、 $K$ 分布、Gamma-Gamma分布<sup>[3]</sup>。对数正态分布适用于弱强度的大气湍流信道<sup>[4]</sup>, $K$ 分布可有效模拟强大气湍流下的信道特点<sup>[5]</sup>,Gamma-Gamma分布能很好地拟合从弱到强不同强度大气湍流条件下的信道特性<sup>[6]</sup>。针对不同大气湍流信道模型下分集接收系统的性能分析,已有的研究工作主要集中于强度调制/直接检测系统,而基于相干接收系统的性能研究相对较少且不完善<sup>[7-15]</sup>。其中,文献[13]研究分析了星地通信链路中基于最大比合并(MRC)、选择合并(SC)的多天线相干接收系统性能,但未涉及等增益合并(EGC)。为了全面比较和

分析不同合并算法下的分集接收系统性能,有必要补充分析EGC分集接收,并与MRC、SC进行对比。

本文在现有研究的基础上,对不同强度大气湍流信道Gamma-Gamma分布模型下,分集接收技术对相干接收系统性能的影响进行了系统研究。对比MRC、SC合并算法,给出了基于EGC分集接收的系统误码率(BER)和通信中断概率(OP)表达式;在不同大气湍流强度及接收支路数下,通过数值仿真,分析了采用不同合并算法时分集接收系统的BER和OP,并与传统的单天线接收系统进行了比较。

## 2 系统与信道模型

### 2.1 接收系统模型

基于空间分集的FSO相干接收系统示意图如图1所示,图中接收天线数为 $L$ 。

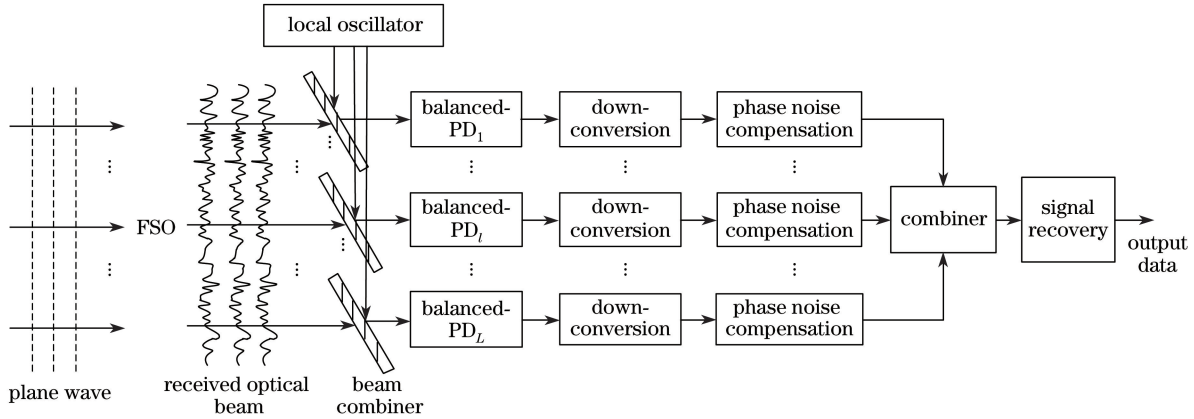


图1 基于空间分集的FSO相干接收系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coherent receiver system based on spatial diversity for FSO

当相干接收机工作在量子噪声极限下时,即接收系统仅受散粒噪声的影响, $l(1 \leq l \leq L)$ 支路合并前电信号信噪比(SNR)可表示为<sup>[8]</sup>

$$\gamma_l = \frac{RP_{s,l}}{q\Delta f} = \frac{RA\Omega_l I_l}{q\Delta f}, \quad (1)$$

式中: $R$ 为光电探测器响应度; $A$ 为接收天线口径; $\Omega_l$ 为 $l$ 路接收光信号光辐照度的均值,本文默认各支路 $\Omega_l$ 相等; $I_l$ 为均值归一化光辐照度; $\Delta f$ 为光电探测器等效噪声带宽; $q$ 为介电常数; $P_{s,l} = A\Omega_l I_l$ 为 $l$ 路接收光信号功率。

### 2.2 信道模型

Gamma-Gamma模型假设在大气湍流信道下,小尺度涡流产生衍射效应,大尺度涡流产生折射效应,小尺度涡流被大尺度涡流调制<sup>[16]</sup>,接收端光信号均值归一化光辐照度 $I$ 可表示为两个独立的服从Gamma分布的随机变量的乘积,即 $I = I_x I_y$ , $I$ 的

概率密度函数(PDF)<sup>[6]</sup>为

$$f_I(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), I > 0, \quad (2)$$

$$I_x \sim \Gamma(\alpha, 1/\alpha), I_y \sim \Gamma(\beta, 1/\beta), \quad (3)$$

式中: $K_\nu(\cdot)$ 为 $\nu$ 阶第二类修正贝塞尔函数; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; $\alpha$ 与 $\beta$ 分别表征大尺度涡流和小尺度涡流的参数。 $\alpha$ 、 $\beta$ 与Rytov方差 $\sigma_R^2$ 的关系为<sup>[6]</sup>

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

$$\beta = \left\{ \exp \left[ \frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}. \quad (4)$$

## 3 基于分集接收的FSO系统性能分析

基于二进制相移键控(BPSK)调制、差分接收的FSO分集接收系统的BER可表示为<sup>[10]</sup>

$$P_e = \int_0^\infty P_e(I_{\text{equ}}) f(I_{\text{equ}}) dI_{\text{equ}}, \quad (5)$$

式中:  $I_{\text{equ}}$  为合并后信号对应的均值归一化光辐照度;  $f(I_{\text{equ}})$  为  $I_{\text{equ}}$  的概率密度函数,  $P_e(I_{\text{equ}})$  为  $I_{\text{equ}}$  条件下的 BER, 表达式为

$$P_e(I_{\text{equ}}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma_0 I_{\text{equ}}}{2}}\right), \quad (6)$$

式中:  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  为误差函数;  $\gamma_0 = \Omega R A / (q \Delta f)$  为合并后信号的平均 SNR;  $\Omega$  为接收光辐照度均值。

当 SNR 低于一定阈值  $\gamma_T$  时, 一般设置  $\gamma_T = 10 \text{ dB}^{[13]}$ , 通信质量恶化, 接收机无法恢复原有信息, 此时, 认为通信中断。因此, 系统 OP 可表示为

$$P_{\text{outage}} = \int_0^{\gamma_T} f_\gamma(\gamma) d\gamma = \int_0^{\gamma_T/\gamma_0} f(I_{\text{equ}}) dI_{\text{equ}}. \quad (7)$$

### 3.1 最大比合并

MRC 算法, 通过加权合并, 使得合并输出 SNR 为各支路 SNR 之和<sup>[14]</sup>, 则采用 MRC 合并算法时,

输出信噪比为  $\gamma_{\text{MRC}} = \sum_{l=1}^L \gamma_l = \gamma_0 \sum_{l=1}^L I_l = \gamma_0 I_{\text{MRC}}$ 。要

推导系统 BER 与 OP, 需给出  $I_{\text{MRC}} = \sum_{l=1}^L I_l$  的 PDF。

文献[13]指出  $\sum_{l=1}^L I_l = \sum_{l=1}^L I_x I_y \approx \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L I_x \sum_{l=1}^L I_y$ , 根据 Gamma 分布的可加性原理, 可知

$$\sum_{l=1}^L I_x \sim \Gamma(L\alpha, 1/\alpha), \quad \sum_{l=1}^L I_y \sim \Gamma(L\beta, 1/\beta). \quad (8)$$

根据(2)式和(3)式, 通过变量替换、化简可得到  $I_{\text{MRC}}$  的 PDF 为

$$f_{I_{\text{MRC}}}(I) = \frac{2(L\alpha\beta)^{\frac{L(\alpha+\beta)}{2}}}{\Gamma(L\alpha)\Gamma(L\beta)} I^{\frac{L(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{L(\alpha-\beta)}(2\sqrt{L\alpha\beta I}), \quad I > 0. \quad (9)$$

将(9)式代入(5)式, 可得到系统 BER 为

$$P_{e, \text{MRC}} = \frac{L\alpha\beta}{2\Gamma(L\alpha)\Gamma(L\beta)} \int_0^\infty \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma_0 I}{2}}\right) (L\alpha\beta I)^{\frac{L(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{L(\alpha-\beta)}(2\sqrt{L\alpha\beta I}) dI. \quad (10)$$

引入 Meijer G 函数,  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0}\left(x \left| \begin{matrix} 1 \\ 0 \ 1/2 \end{matrix} \right. \right)^{[17-18]}$ ,  $K_\nu(z) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0}\left(z \left| \begin{matrix} - \\ \nu/2 \ -\nu/2 \end{matrix} \right. \right)^{[17]}$ , 其中,

$G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$  为 Meijer G 函数, 则可得到系统误码率闭合表达式为

$$P_{e, \text{MRC}} = \frac{L\alpha\beta}{\Gamma(L\alpha)\Gamma(L\beta)\sqrt{\pi}\gamma_0} G_{2,3}^{2,2}\left(\frac{2L\alpha\beta}{\gamma_0} \left| \begin{matrix} -\frac{1}{2} & 0 \\ L\alpha-1 & L\beta-1 & -1 \end{matrix} \right. \right). \quad (11)$$

将(9)式代入(6)式, 可得到系统中断概率为

$$P_{\text{outage, MRC}} = \frac{(L\alpha\beta)^{\frac{L(\alpha+\beta)}{2}}}{\Gamma(L\alpha)\Gamma(L\beta)} \int_0^{\gamma_T/\gamma_0} I^{\frac{L(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{L(\alpha-\beta)}(2\sqrt{L\alpha\beta I}) dI. \quad (12)$$

### 3.2 选择合并

选择合并算法, 即选择  $L$  条接收支路中 SNR 最大一路输出, 则合并输出 SNR 为<sup>[14]</sup>

$$\gamma_{\text{SC}} = \max\{\gamma_1, \gamma_1, \dots, \gamma_L\} = \gamma_0 \max\{I_1, I_2, \dots, I_L\} = \gamma_0 I_{\text{SC}}. \quad (13)$$

$I_{\text{SC}}$  的 PDF 可表示为

$$f_{I_{\text{SC}}}(I_{\text{SC}}) = C_L^1 f_I(I_{\text{SC}}) \left[ \int_0^{I_{\text{SC}}} f_I(I_l) dI_l \right]^{L-1} = L \cdot f_I(I_{\text{SC}}) \left[ \int_0^1 f_I(I \cdot I_{\text{SC}}) I_{\text{SC}} dI \right]^{L-1}. \quad (14)$$

为进一步数值仿真, 对积分区间进行了归一化处理。将(14)式代入(5)式和(7)式, 分别可得到基于 SC 的系统 BER 与 OP:

$$P_{e, \text{SC}} = \frac{L}{2} \int_0^\infty \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma_0 I_{\text{SC}}}{2}}\right) f_I(I_{\text{SC}}) \left[ \int_0^1 f_I(I \cdot I_{\text{SC}}) I_{\text{SC}} dI \right]^{L-1} dI_{\text{SC}}, \quad (15)$$

$$P_{\text{outage, SC}} = \int_0^{\gamma_T/\gamma_0} L \cdot f_I(I_{\text{SC}}) \left[ \int_0^1 f_I(I \cdot I_{\text{SC}}) I_{\text{SC}} dI \right]^{L-1} dI_{\text{SC}}, \quad (16)$$

式中:  $f_I(I_{\text{SC}}) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_{\text{SC}}^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I_{\text{SC}}})$ 。

### 3.3 等增益合并

EGC 算法,是将各支路信号等增益合并<sup>[7]</sup>,设加权系数为 1,则合并输出信噪比可表示为

$$\gamma_{\text{EGC}} = R\Omega \left( \sum_{l=1}^L \sqrt{AI_l} \right)^2 / (Lq\Delta f) = \frac{\gamma_0}{L} \left( \sum_{l=1}^L \sqrt{I_l} \right)^2 = \frac{\gamma_0}{L} I_{\text{EGC}}. \quad (17)$$

推导出  $z = \sqrt{I_l}$  的特征函数为<sup>[15]</sup>

$$\phi_z(\omega) = E(e^{j\omega z}) = {}_2F_1\left(\beta, \alpha; \frac{1}{2}; -\frac{\omega^2}{4\alpha\beta}\right) + i \frac{\Gamma(\alpha + 1/2)\Gamma(\beta + 1/2)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\sqrt{\alpha\beta}} {}_2F_1\left(\beta + \frac{1}{2}, \alpha + \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; -\frac{\omega^2}{4\alpha\beta}\right), \quad (18)$$

式中:  ${}_2F_1(a, b; c; z)$  为高斯超几何函数。

由于各支路接收信号相互独立,根据特征函数计算性质,可得  $I_E = \sum_{l=1}^L I_l = \sqrt{I_{\text{EGC}}}$  的特征函数为  $\phi_z^L(\omega)$ 。

根据(5)式和(6)式,可得基于 EGC 的系统 BER 为

$$P_{e,\text{EGC}} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma_0 I_{\text{EGC}}}{2L}}\right) f_{I_{\text{EGC}}}(I_{\text{EGC}}) dI_{\text{EGC}} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma_0}{2L}} I_E\right) f_{I_E}(I_E) dI_E. \quad (19)$$

由特征函数逆公式,可将(19)式化简为

$$P_{e,\text{EGC}} = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [\phi_z^*(\omega)]^L \int_0^\infty \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma_0}{2L}} I_E\right) \exp(i\omega I_E) dI_E d\omega. \quad (20)$$

文献[18]给出  $\int_0^\infty \text{erfc}(ax) \exp(ibx) dx = \frac{-i}{b} \times \exp(-b^2/4a^2) \text{erfc}\left(\frac{ib}{2a}\right) + \frac{i}{b} [1 - \exp(-b^2/4a^2)]$ , 则

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \text{erfc}(ax) \exp(ibx) dx &= \frac{i}{b} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{b^2}{4a^2}\right) \right] - \frac{i}{b} \exp\left(-\frac{b^2}{4a^2}\right) \left[ \frac{ib}{a\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{b^2}{4a^2}\right) {}_1F_1\left(1; \frac{3}{2}; -\frac{b^2}{4a}\right) \right] = \\ &= \frac{i}{b} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{b^2}{4a^2}\right) \right] + \frac{1}{a\sqrt{\pi}} {}_1F_1\left(1; \frac{3}{2}; -\frac{b^2}{4a}\right). \end{aligned} \quad (21)$$

将(21)式代入(20)式,通过变量替换  $\omega' = \omega/a$  和  $a = \sqrt{\frac{\gamma_0}{2L}}$  可得

$$P_{e,\text{EGC}} = \text{Re} \left\{ \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \phi_z^* \left( \sqrt{\frac{\gamma_0}{2L}} \omega' \right) \right]^L \left[ \frac{i}{\omega'} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\omega'^2}{4}\right) \right] + \frac{1}{\sqrt{\pi}} {}_1F_1\left(1; \frac{3}{2}; -\frac{\omega'^2}{4}\right) \right] d\omega' \right\}, \quad (22)$$

式中:  ${}_1F_1(a; b; z)$  为合流超几何函数;  $\text{Re}(\cdot)$  为取实部操作。通过变量替换  $\omega' = \tan \theta$ , 可进一步化简为

$$P_{e,\text{EGC}} = \text{Re} \left\{ \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \left[ \phi_z^* \left( \sqrt{\frac{\gamma_0}{2L}} \tan \theta \right) \right]^L \psi(\tan \theta) \left[ \phi_z^* \left( \sqrt{\frac{\gamma_0}{2L}} \tan \theta \right) \right]^L \arccos \theta \right\} d\theta, \quad (23)$$

式中:  $\psi(x) = \frac{i}{x} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{4}\right) \right] + \frac{1}{\sqrt{\pi}} {}_1F_1\left(1; \frac{3}{2}; -\frac{x^2}{4}\right)$ 。

依照上述推导思路,推导基于 EGC 的系统 OP。由上文推导可知  $\gamma_{\text{EGC}} = \frac{\gamma_0}{L} I_{\text{EGC}} = \frac{\gamma_0}{L} I_{\text{EGC}}^2$ , 则  $\gamma_{\text{EGC}}$  概率分布可表示为

$$f_{\gamma_{\text{EGC}}}(\gamma) = \frac{1}{2} f_{I_E} \left( \sqrt{\frac{L\gamma}{\gamma_0}} \right) \sqrt{\frac{L}{\gamma\gamma_0}}. \quad (24)$$

由特征函数逆公式,系统 OP 可表示为

$$P_{\text{outage,EGC}} = \int_0^{\gamma_T} f_{\gamma_{\text{EGC}}}(\gamma) d\gamma = \int_0^{\sqrt{L\gamma_T/\gamma_0}} f_{I_E}(I) dI = \int_0^{\sqrt{L\gamma_T/\gamma_0}} \int_{-\infty}^{+\infty} [\phi_z(\omega)]^L \exp(-i\omega I) d\omega dI, \quad (25)$$

交换积分顺序,并进行变量替换  $\omega = \tan \theta$ , 可得

$$\begin{aligned} P_{\text{outage,EGC}} &= \text{Re} \left\{ \frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_z^L(\omega) \left[ \frac{\exp(-i\omega \sqrt{L \cdot \gamma_T / \gamma_0})}{\omega} - \frac{1}{\omega} \right] d\omega \right\} = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \text{Re} \left\{ i \cdot \phi_z^L(\tan \theta) \frac{1}{\sin(2\theta)} \left[ \exp(-i \tan \theta \sqrt{L \cdot \gamma_T / \gamma_0}) - 1 \right] \right\} d\theta. \end{aligned} \quad (26)$$

## 4 仿真结果与分析

根据第 3 节对不同合并算法的 FSO 系统误码率、通信中断概率的推导,本节对不同强度大气湍流、不同接收支路数量  $L$  下三种合并算法的性能进行数值仿真与分析。

仿真条件:假设接收各支路接收到的光信号相互独立,系统基于 BPSK 调制,接收机采用外差相干接收机制。单输入单输出(SISO)系统对应的 BER、OP 表达式参考文献[13]。为了将  $L$  路分集接收与 SISO 进行有效对比,设定系统具有相同的入射光功率,即当 SISO 系统天线口径为  $A$  时, $L$  路分集接收天线口径均为  $A/L$ 。不同强度大气湍流对应的 Rytov 方差  $\sigma_R^2$  值不同,通常当  $\sigma_R^2 > 1$  时认为信道为强大气湍流,当  $\sigma_R^2 \ll 1$  时认为弱大气湍流<sup>[19]</sup>。本文中,弱、中、强湍流参数对应的 Rytov 方差  $\sigma_R^2$  分别取 0.20,0.80,1.56。

不同强度大气湍流信道 Gamma-Gamma 分布下,FSO-SISO 系统 BER、OP 随平均 SNR 的变化如图 2 所示。从仿真结果可以看出,当平均 SNR 大

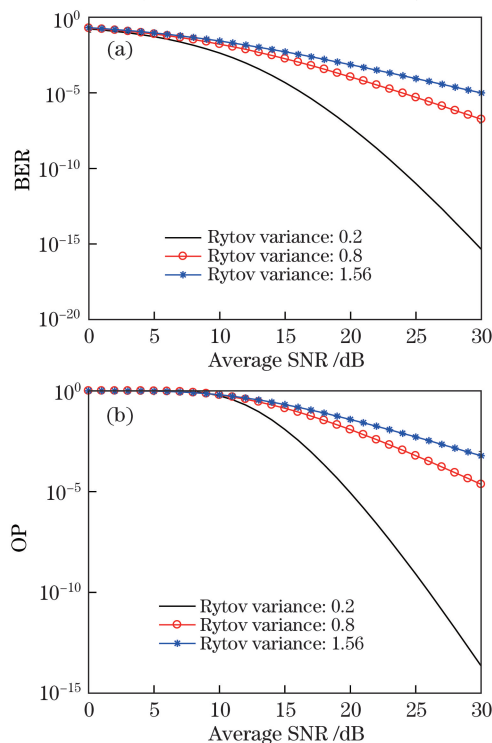


图 2 不同大气湍流强度下,FSO-SISO 系统误码率和通信中断概率随平均信噪比的变化。(a)系统误码率;(b)通信中断概率

Fig. 2 BER and OP change with average SNR of FSO-SISO system under different turbulence regions. (a) BER; (b) OP

于 10 dB 时,随着大气湍流强度的增加,系统 BER 与 OP 明显增加,且当平均 SNR 越大,强大气湍流,相对于弱大气湍流,使系统性能恶化更加明显。另外,在强大气湍流条件下,即使平均 SNR 达到 30 dB,系统 BER 仍然维持在  $10^{-4}$  左右,而 OP 则维持在  $10^{-3}$  左右。因此通过使用分集接收,实现抗大气湍流影响尤为必要。

图 3、4 和 5 分别为在不同强度大气湍流通道下,基于相同口径不同数量的接收天线数,不同合并算法的性能仿真结果。

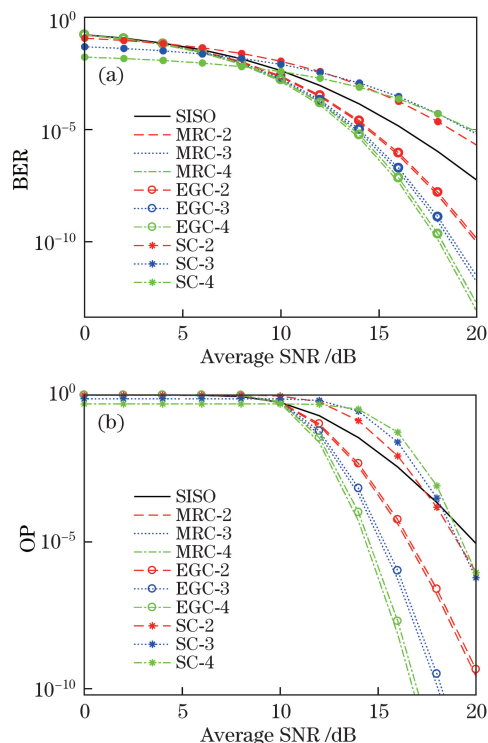


图 3 弱湍流下,基于不同接收天线数,不同合并算法的性能比较。(a)误码率;(b)通信中断概率

Fig. 3 Performance comparison with different numbers of receiving antennas under weak turbulence.

(a) BER; (b) OP

弱大气湍流下,只有平均 SNR 低于某一临界值时,SC 分集接收系统的 BER 才低于 SISO 系统的值,当平均 SNR 继续增加,SC 分集接收系统的 BER 将明显高于 SISO 系统的值,如图 3(a)所示。对比图 4(a)和图 5(a),可发现不同强度大气湍流,相同接收天线情况下,上述临界值随大气湍流强度的增大而增加;以 4 支路接收 SC-4 为例,当 SNR 在大于 10 dB 且小于 18 dB 区域中时,其对应的 OP 大于 SISO 系统的 OP,如图 3(b)所示。对比图 4(b)和图 5(b),随着大气湍流强度的增加,上述区域不断缩减,在强大气湍流下,SC-4 系统 OP 始终优于



SISO 系统的 OP。以上结果表明:SC 分集接收系统性能并不一定优于 SISO 系统,仅在低信噪比下,可通过 SC 分集接收改善大气湍流对 SISO 通信系统性能的影响。造成这一结果的原因是:SC 合并中,仅有 SNR 最大支路的输入光信号用于信号恢复,对应的光功率仅为相同接收口径下 SISO 系统的  $1/L$ ,当 SNR 较大时,SC 合并对大气湍流的抑制无法弥补光功率损失对系统带来的影响。

中度大气湍流下,MRC、EGC 分集接收对应的 BER、OP 均小于 SISO 系统,如图 4 所示。以 3 支路接收为例,平均 SNR 为 20 dB 时,SISO、EGC-3、MRC-3 系统对应的 BER 分别为: $1.8 \times 10^{-4}$ , $1.3 \times 10^{-7}$ , $5.3 \times 10^{-8}$ ,SISO、EGC-3、MRC-3 系统对应的 OP 分别为: $1.1 \times 10^{-2}$ , $2.3 \times 10^{-5}$ , $8.7 \times 10^{-6}$ 。对比图 3 和图 5 不同大气湍流强度下数值仿真结果,可以发现上述优势始终存在。以上结果表明:通过采用 MRC、EGC 分集接收可明显改善大气湍流对系统性能的影响,并且相同接收天线数下,MRC 对应的 BER 和 OP 优于 EGC。

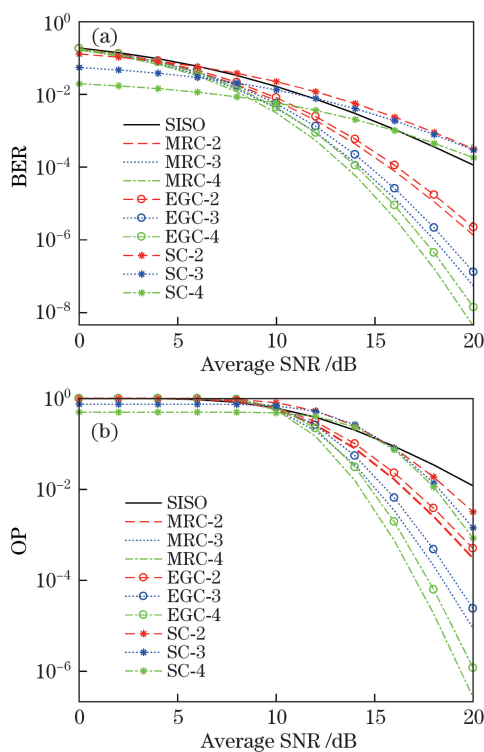


图 4 中度湍流下,基于不同接收天线数,不同合并算法的性能比较。(a)误码率;(b)通信中断概率

Fig. 4 Performance comparison with different numbers of receiving antennas under moderate turbulence.

(a) BER; (b) OP

分析接收天线数对分集接收系统性能的影响:强大气湍流下,基于 SC 的分集接收系统在低 SNR

时,接收天线数越多,SC 接收对应的 BER 和 OP 越小,但随着平均 SNR 的增加,接收天线数越多,对应的 BER 和 OP 反而越大,如图 5 所示。造成上述现象的原因仍为:随着平均 SNR 的增加,SC 合并对大气湍流影响的抑制无法弥补光功率损失对系统性能的恶化;基于 MRC、EGC 的分集接收系统,随着接收支路的增加,系统对应的 BER 和 OP 明显减小。以 MRC 为例,当 SNR 为 20 dB 时,MRC-2、MRC-3、MRC-4 对应 BER 分别为  $1.7 \times 10^{-5}$ , $1.0 \times 10^{-6}$ , $1.0 \times 10^{-7}$ ,对应的 OP 分别为  $2.9 \times 10^{-3}$ , $2.3 \times 10^{-4}$ , $2.0 \times 10^{-5}$ 。对比图 3、图 4 不同大气湍流强度情况,规律一致。以上结果表明:随着接收支路数的增加,基于 MRC、EGC 的分集接收系统性能可明显得到进一步的优化;SC 分集接收系统的性能,随着支路数的增加,仅在低 SNR 时,可得到提高,在大 SNR 下,反而会使系统性能变差。

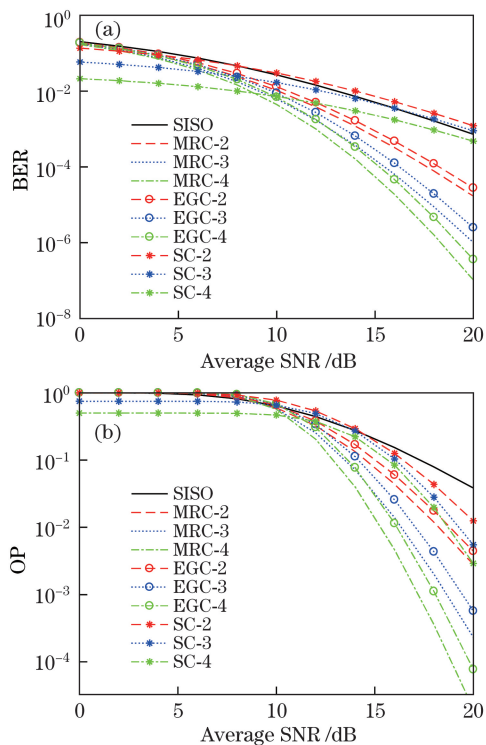


图 5 强湍流下,基于不同接收天线数,不同合并算法的性能比较。(a)误码率;(b)通信中断概率

Fig. 5 Performance comparison with different numbers of receiving antennas under strong turbulence.

(a) BER; (b) OP

## 5 结 论

研究了不同强度 Gamma-Gamma 大气湍流信道下 FSO 中的分集接收技术,基于 BPSK 调制和外差相干接收,推导了 3 种空间分集合接收技术对应

的系统 BER 和 OP,并对其进行仿真分析。结果表明:总接收天线口径相同时,EGC、MRC 分集接收可有效提高不同强度湍流下的相干通信系统性能,且接收天线数越大,其对系统性能的改善越明显,相同接收天线数下,MRC 分集接收的性能优于 EGC;SC 分集接收仅在平均信噪比低于某一阈值时,相比于 SISO 系统性能有所改善,但性能仍次于 MRC 接收和 EGC 接收。从系统结构复杂度考虑,SC 最简单,EGC 次之,MRC 最为复杂,且随着接收支路的增加,系统复杂度成倍增加。在实际工程应用中,可以根据需求,折中选择合适的合并方法及接收支路数。

## 参 考 文 献

- [1] Yao Z S. Space coherent laser data transmission system and multi-order correction[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010: 1-12.  
 么周石. 相干激光空间数据传输系统及其多阶波前校正研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010: 1-12.
- [2] Ibrahim M M, Ibrahim A M. Performance analysis of optical receivers with space diversity reception[J]. Proceedings of the IEEE Communications, 1996, 143(6): 369-372.
- [3] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [4] Zhu X, Kahn J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(8): 1293-1300.
- [5] Parry G, Puaey P N. Kdistributions in atmospheric propagation of laser light[J]. Journal of the Optical Society of America, 1979, 69(65): 796-798.
- [6] Al-Habash A, Andrews L C, Phillips R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media[J]. Optical Engineering, 2001, 40(8): 1554-1563.
- [7] Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y, *et al.* Theory of optical scintillation[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1999, 16(6): 1417-1429.
- [8] Zhang H Y, Li H Z, Xiao D Y, *et al.* Performance analysis of spatial-diversity reception over combined effects of atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0405002.  
 张慧颖, 李洪祚, 肖冬亚, 等. 大气湍流综合效应下空间分集接收性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0405002.
- [9] Li X Y, Zhang P, Tong S F. Bit error rate performance of free space optical communication system based on differential detection with zero decision threshold under Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106001.  
 李晓燕, 张鹏, 佟首峰. Gamma-Gamma 大气湍流下零判决门限差分探测自由空间光通信系统误码率性能[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106001.
- [10] Navidpour S M, Uysal M, Kavehrad M. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 2813-2819.
- [11] Niu M, Cheng J, Holzman J F. Exact error rate analysis of equal gain and selection diversity for coherent free-space optical systems on strong turbulence channels[J]. Optics Express, 2010, 18(13): 13915-13926.
- [12] Ke X Z, Song P, Pei G Q. Research on multi-aperture reception in wireless laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1201003.  
 柯熙政, 宋鹏, 裴国强. 无线激光通信中的多孔径接收技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1201003.
- [13] Zhao J Q, Xu Y F, Li J H, *et al.* Turbulence channel modeling of visible light communication under strong background noise and diversity receiving technologies[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0301001.  
 赵嘉琦, 许银帆, 李洁慧, 等. 强背景光下可见光大气湍流信道建模及分集接收技术[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0301001.
- [14] Ma J, Li K, Tan L, *et al.* Performance analysis of satellite-to-ground downlink coherent optical communications with spatial diversity over Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2015, 54(25): 7575-7585.
- [15] Ke X Z, Liu M. 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.
- [16] Niu M, Cheng J, Holzman J F, *et al.* Coherent free-space optical transmission with diversity combining for gamma-gamma atmospheric turbulence[C]// Communications (QBSC), 2010 25th Biennial Symposium on. IEEE, 2010: 217-220.
- [17] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of integrals, series, and products[M]. New York: Academic Press, 2014.
- [18] Ng E W, Geller M. A table of integrals of the error functions[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards B, 1969, 73(1): 1-20.
- [19] Thomas F E. Thescintillation index in moderate to strong turbulence for the gaussian beam wave along a slant path[D]. Orlando: University of Central Florida, 2005.