

湍流信道无线光通信中的分集接收技术

柯熙政 刘 妹

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 大气分子的吸收、散射和大气湍流等因素引起的光强闪烁严重影响无线光通信系统的性能,导致激光束能量衰减、信噪比下降,而分集接收技术能有效地克服这种影响。采用开关键控(OOK)调制,建立了强湍流模型-K分布模型下无线光通信空间接收分集系统模型,在不同信道参数和接收天线数下,分别对比分析了最大比合并(MRC)、等增益合并(EGC)和选择合并(SC)的差错性能。仿真结果表明,分集接收能在很大程度上改善大气激光通信的性能,具有较强的抗大气信道衰落能力。三种合并算法中,MRC性能最优,EGC次之,SC性能最差。

关键词 大气和海洋光学;无线光通信;强湍流信道;K分布模型;分集合并;差错性能

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0106005

Diversity Reception Technology over Atmospheric Turbulence Channels in Wireless Optical Communication

Ke Xizheng Liu Mei

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shanxi 710048, China

Abstract The light scintillating caused by atmospheric turbulence, absorption and scattering can increase the energy attenuation of the laser beam and decrease the signal to noise ratio(SNR). Diversity reception technology can overcome this effect, effectively. Using on off keying (OOK) modulated, free space optical communication (FSO) system with spatial diversity based on the K-distributed model is established. The error performances among three linear combining technologies as maximal ratio combining (MRC), equal gain combining (EGC) and selection combining (SC) for different channel parameters and different detectors are analysed. The simulation results show that the performance of the system by MRC is the best, followed by EGC, and SC combining is poor. Spatial diversity has strong ability to improve the performance and resistance to atmospheric channel decline.

Key words atmospheric and oceanic optics; wireless optical communication; strong atmospheric turbulence channel; K distribution; diversity combining; bit error rate performance

OCIS codes 010.1330; 060.2605; 060.4510

1 引 言

自由空间光通信(FSO)具有传输速率高、保密性好,无需频谱许可等特点,近年来备受关注^[1]。但是,大气湍流引起的信号强度闪烁、光束漂移和波前畸变等效应,严重影响光通信系统接收性能,分集技术通过对2个或多个不相关信号进行处理,以抑制大气湍流引起的光强起伏,并且实现简单、成本低^[2]。分集接收技术在无线电领域用于克服多径衰落的影响,文献[2]首次将其应用到FSO系统中,证明分集技术可抑制湍流引起的衰落

收稿日期: 2014-07-29; 收到修改稿日期: 2014-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(61377080, 60977054, 61271110)、陕西省“13115”科技统筹计划(2011KTCQ01-31)、陕西省教育厅产业化培育基金(2010JC17)、陕西省自然科学基金基础研究计划资助(2013JQ8011)、陕西省教育厅科研计划项目(2013JK1104)、陕西省工业攻关科技计划(2013K06-08)、江苏省省级前瞻性研究专项资金(BE201308)、西安市科技成果转化基金(CX12165)

作者简介: 柯熙政(1962—),男,教授,主要从事无线激光通信方面的研究。E-mail: xzke@263.net

效应。研究表明^[3]:与无线电频率(RF)通信系统的分集技术相比,大气激光通信系统的空间分集更易实现。原因是湍流大气的相关长度在厘米量级,接收天线之间的距离只需要在厘米量级即可使不同传输信道之间的衰落特性相互独立。RF通信中信号衰减一般用瑞利分布描述,而大气激光通信中的信道分布有:对数正态分布、Gamma-Gamma分布、K分布、指数分布^[4]。以这些湍流模型为基础,人们研究了分集接收技术对大气湍流所引起的闪烁效应的抑制作用,Shin等^[4]研究了基于对数正态分布的弱湍流信道下自由空间光通信-多输入多输出(FSO-MIMO)系统的中断概率;Wilson等^[5]对基于脉冲位置调制(PPM)的FSO空间分集系统进行研究,在对数正态信道和瑞利信道两种情形下对有无衰落和有无背景辐射时的误码率(BER)和信道容量性能进行了仿真;Navidpour等^[6]在2007年给出了多输入多输出(MIMO)系统误码率的解析解,并指出在对数正态信道中,空间分集可以降低对数正态衰落的方差;2009年,Tsiftsis等^[7]研究了多输入单输出(MISO)、单输入多输出(SIMO)和MIMO条件下,FSO系统在强湍流条件下的误码性能,并给出了SIMO系统的误码率解析表达式;柯熙政等^[8]对PPM调制Gamma-Gamma信道下无线激光通信系统的多孔径接收误码率性能进行了分析;张秋丽等^[9]研究了弱湍流对数正态分布下分集接收技术几种合并算法的误码性能。

本文在前人研究的基础上,研究了对强湍流信道-K分布模型下,分集接收技术在抑制闪烁、提升光通信系统性能方面的表现做了系统研究;对比分析了三种合并算法,最大比合并(MRC)、等增益合并(EGC)以及选择合并(SC)各自的误码性能,并对它们的抗衰落能力作一阐述。

2 系统与大气湍流模型

2.1 系统模型

根据冻结场理论,相对于通信的速率,大气湍流引起的光信号衰减是一个缓变的过程,因此大气信道可看作是无记忆准静态平坦衰落的时变信道。假设信道噪声环境为加性高斯白噪声(AWGN),采用开关键控(OOK),则系统模型表示如下^[7]:

$$y = x\eta I + v(I), \quad (1)$$

式中 y 为接收端得到的电信号, η 为光电转换效率, I 为接收器接收到的光强; $x \in (0, 1)$ 为调制信号, v 为零均值加性高斯白噪声,其方差 $\sigma_v^2 = N_0/2$ 。定义系统信噪比 γ 和平均信噪比 μ 分别为

$$\gamma = \frac{(\eta I)^2}{2\sigma_v^2}, \quad \mu = \frac{[\eta E(I)]^2}{2\sigma_v^2}, \quad (2)$$

式中 $E(\cdot)$ 为数学期望值,同时将 $E(I)$ 归一化,即 $E(I) = 1$ 。

2.2 湍流模型

近年来,针对不同的信道环境,人们提出了多种不同的信道分布模型。弱湍流下,湍流信道服从对数正态分布;中强湍流下,应用广泛的则是 Gamma-Gamma 分布^[10];强湍流情况下,光强度 I 更接近于 K 分布,其概率密度函数为^[7]

$$f(I) = \frac{2\alpha^{(\alpha+1)/2}}{\Gamma(\alpha)} I^{(\alpha-1)/2} K_{\alpha-1}(2\sqrt{\alpha I}), \quad (3)$$

式中 α 是与离散散射体的有效数目相关的信道参数, $K_\nu(\cdot)$ 是 ν 阶第二类贝塞尔函数,在强湍流范围内, α 随湍流强度的减弱而增大。 $K_\nu(\cdot)$ ^[11] 的 Meijer G 函数表达式写作 $K_\nu(z) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left[z \left| \begin{matrix} - \\ \frac{\nu}{2} \quad -\frac{\nu}{2} \end{matrix} \right. \right]$, 则 K 分布的分布函数(CDF)为^[11]

$$F(I) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} G_{1,3}^{2,1} \left[\alpha I \left| \begin{matrix} 1 \\ \alpha \quad 1 \quad 0 \end{matrix} \right. \right], \quad (4)$$

定义 K 分布下的闪烁指数为

$$\sigma_I^2 = \frac{E(I^2) - E^2(I)}{E^2(I)} = \frac{\alpha + 2}{\alpha}. \quad (5)$$

由(5)式可以看出, σ_I^2 仅取决于信道参数 α 。 σ_I^2 随湍流强度的增强而增大。

3 自由空间光通信-单输入单输出(FSO-SISO)系统性能分析

FSO通信系统采用OOK,其误码率表示如下^[6]:

$$P_e = p(0)p(e|0) + p(1)p(e|1), \quad (6)$$

式中 $p(0)$ 和 $p(1)$ 分别为发送 0 和 1 的概率; $p(e|0)$ 和 $p(e|1)$ 分别为在发送 0 和 1 情况下的条件概率, e 为接收到的信号。假设发射端 1 和 0 是等概率发送, 即 $P(1) = P(0) = 1/2$, 且 $p(e|0, I) = p(e|1, I) = Q\left(\frac{\eta I}{\sqrt{2N_0}}\right)$, 其中,

$Q(\cdot)$ 为高斯 Q 函数, 定义为 $Q(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_y^{\infty} \exp(-t^2/2) dt$ 。则平均误码率为

$$P_e = \int_0^{\infty} f(I) Q\left(\frac{\eta I}{\sqrt{2N_0}}\right) dI, \quad (7)$$

且有关系式 $\text{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{2}x)$, $\text{erfc}(\cdot)$ 为误差函数。则在 K 分布信道模型下, 平均误码率为

$$P_e = \int_0^{\infty} f(I) \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{\eta I}{2\sqrt{N_0}}\right) dI. \quad (8)$$

对(8)式积分的计算可利用 Meijer G 函数, 将 $K_v(\cdot)$ 函数可写 $K_v(z) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0}\left(z \left| \frac{\gamma}{2} \quad \frac{-\gamma}{2} \right.\right)^{[11]}$, $\text{erfc}(\cdot)$ 函数可写作

$\text{erfc}(\sqrt{x}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{0,2}^{2,0}\left(x \left| 1 \quad 0 \quad \frac{1}{2} \right.\right)^{[11]}$, 式中, $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$ 为 Meijer G 函数, 利用 Meijer G 函数的运算性质可得到误码率的

闭合表达式:

$$P_e = \frac{2^{\alpha-2}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha)} G_{5,2}^{2,4}\left(\frac{4\eta^2}{N_0 \alpha^2} \left| \frac{1-\alpha}{2} \quad \frac{2-\alpha}{2} \quad 0 \quad \frac{1}{2} \quad 1 \right.\right), \quad (9)$$

将其表示为信噪比(SNR)的闭合表达式:

$$P_e = \frac{2^{\alpha-2}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha)} G_{5,2}^{2,4}\left(\left(\frac{2}{\alpha}\right)^2 \mu \left| \frac{1-\alpha}{2} \quad \frac{2-\alpha}{2} \quad 0 \quad \frac{1}{2} \quad 1 \right.\right). \quad (10)$$

4 接收分集 SIMO 系统分集合并方法的性能分析

分集技术包含两重含义^[12]: 1) 分散接收; 2) 集中处理, 即在接收端获取不同路径上统计独立的衰落信号, 再把这些统计独立的衰落信号进行适当的合并, 从而抑制信道衰减, 提高系统性能。常用合并算法有 MRC、EGC、SC^[13]。

假设接收端 N 个输入信号, 若第 i 条支路接收信号为 $x_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, M$, w_i 为第 i 条接收支路的加权系数。则合并后输出的信号 $y(t)$ 可以表示为

$$y(t) = w_1 x_1(t) + w_2 x_2(t) + \dots + w_M x_M(t) = \sum_{i=1}^N w_i x_i(t). \quad (11)$$

接收端以何种方式将多种信号相结合以达到提高信噪比的目的, 这是合并技术所要解决的问题。选择不同的加权系数, 即选择了不同的合并策略。

4.1 最大比合并

最大比合并是一种最佳合并方式, 它对多路信号进行同相加权合并, 权重是由各支路信号所对应的信号功率与噪声功率的比值决定的^[14], 最大比合并输出 SNR 等于各路 SNR 之和。则总输出信噪比可表示为

$$\gamma_{\text{mrc}} = \left(\frac{\eta}{\sqrt{2N}}\right)^2 \sum_{i=1}^N \frac{I_i^2}{\sigma_v^2} = \sum_{i=1}^N \gamma_i, \quad (12)$$

式中 $\gamma_{\text{mrc}} = \left(\frac{\eta I_i}{\sqrt{2N\sigma_v^2}} \right)^2$ 为单支路信噪比。

当采用 MRC 合并, 加权系数与接收光强成比例, MRC 下的误码率表示为^[7]

$$P_{\text{eMRC}} = \int_0^{\infty} f(I) Q \left(\frac{\eta}{\sqrt{2NN_0}} \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \right) dI. \quad (13)$$

利用 $Q(x) \approx \frac{1}{12} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) + \frac{1}{4} \exp\left(-\frac{2x^2}{3}\right)$, 对(13)式积分进行化简得:

$$P_c = \frac{1}{12} \prod_{n=1}^N \int_0^{\infty} f(I_n) \exp\left(-\frac{\eta^2}{4NN_0} I_n^2\right) dI_n + \frac{1}{4} \prod_{n=1}^N \int_0^{\infty} f(I_n) \exp\left(-\frac{\eta^2}{3NN_0} I_n^2\right) dI_n. \quad (14)$$

将 K 分布的概率密度函数以及 $K_r(\cdot)$ 函数的 Meijer G 函数表达式代入(14)式, 又因为 $\exp(-x) = G_{0,1}^{1,0} \left[x \middle| 0 \right]^{[11]}$,

因此, MRC 合并的误码率解析表达式为

$$P_c = \frac{1}{12} \prod_{n=1}^N \frac{2^{\alpha_n-1}}{\pi \Gamma(\alpha_n)} G_{4,1}^{1,4} \left[\frac{4\eta^2}{\alpha_n^2 NN_0} \middle| \frac{1-\alpha_n}{2} \quad \frac{2-\alpha_n}{2} \quad 0 \quad \frac{1}{2} \right] + \frac{1}{4} \prod_{n=1}^N \frac{2^{\alpha_n-1}}{\pi \Gamma(\alpha_n)} G_{4,1}^{1,4} \left[\frac{16\eta^2}{3\alpha_n^2 NN_0} \middle| \frac{1-\alpha_n}{2} \quad \frac{2-\alpha_n}{2} \quad 0 \quad \frac{1}{2} \right]. \quad (15)$$

将其表示为信噪比的表达式即

$$P_c = \frac{1}{12} \prod_{n=1}^N \frac{2^{\alpha_n-1}}{\pi \Gamma(\alpha_n)} G_{4,1}^{1,4} \left[\frac{4\mu_n}{\alpha_n^2 N} \middle| \frac{1-\alpha_n}{2} \quad \frac{2-\alpha_n}{2} \quad 0 \quad \frac{1}{2} \right] + \frac{1}{4} \prod_{n=1}^N \frac{2^{\alpha_n-1}}{\pi \Gamma(\alpha_n)} G_{4,1}^{1,4} \left[\frac{16\mu_n}{3\alpha_n^2 N} \middle| \frac{1-\alpha_n}{2} \quad \frac{2-\alpha_n}{2} \quad 0 \quad \frac{1}{2} \right], \quad (16)$$

式中 α_n 是第 n 条支路的信道参数, μ_n 是第 n 条支路的平均信噪比。

4.2 等增益合并

等增益合并无须对信号加权, 各支路信号是等增益相加的。采用 EGC 合并方式, 加权因子为一个常数^[14]。EGC 合并输出信噪比为

$$\gamma_{\text{EGC}} = \left(\frac{\eta}{\sqrt{2N\sigma_v^2}} \right)^2 \sum_{i=1}^N I_i^2. \quad (17)$$

等增益合并下系统的误码率为

$$P_{\text{eEGC}} = \int_0^{\infty} f(I) Q \left(\frac{\eta}{N\sqrt{2N_0}} \sum_{i=1}^N I_i \right) dI, \quad (18)$$

对其的分析方法参照 MRC 合并。

4.3 选择合并

在三种线性合并中, 选择合并是最简单的一种合并方法, 因为其是对接收到的分集信号进行检测, 以选取其中信号强度或者信噪比最高的接收支路作为最优信号输出^[15]。则其输出信号为

$$I_{\text{sc}} = \max\{I_1, I_2, \dots, I_n\}, \quad (19)$$

因此在选择合并时, 加权系数只有一项为 1, 其余均为 0。SC 算法只需从 N 条支路中选取一条分集支路作为输出, 与 MRC、EGC 相比复杂性小, 且不需要估计幅度与相位, 但牺牲了合并增益。并且, SC 需要不间断地监视各分支以寻找信噪比最大的分支作为输出, 而输出只选取一个分支的信号, 因此造成了资源浪费。SC 合并的平均误码率表达式为

$$P_{\text{esc}} = \int_0^{\infty} f_{\text{sc}}(I_{\text{sc}}) Q \left(\frac{\eta I_{\text{sc}}}{2\sqrt{NN_0}} \right) dI_{\text{sc}}, \quad (20)$$

$$f_{\text{sc}}(I) = \frac{dF_{\text{sc}}(I)}{dI} = NF_{\text{sc}}(I)^{N-1} f_{\text{sc}}(I), \quad (21)$$

$F_{\text{sc}}(I)$ 为 N 条支路下选择合并算法的分布函数, 因此, SC 合并下的误码率解析表达式为

$$P_{eSC} = \int_0^{\infty} N F_{sc}(I)^{N-1} f_{sc}(I) Q\left(\frac{\eta I_{sc}}{\sqrt{2NN_0}}\right) dI_{sc}, \quad (22)$$

这里采用高斯积分对(22)式进行化简。

5 仿真及性能分析

根据第4节对强湍流信道-K分布模型下FSO系统空间分集接收系统误码性能的分析,分别对不同信道参数 α 和信道支路 N 下三种合并算法(MRC、EGC和SC)的性能做仿真对比。

仿真条件:假设接收机已知信道信息,且各接收支路间是相互独立的。实际中,为了保证这个相互独立性,接收天线间至少间隔一个相关长度的距离,文献[10]给出对天线间距 S 的近似约束条件: $S \geq \sqrt{\lambda L}$,其中 λ 为光波长, L 为传输距离。

图1仿真了FSO-SISO系统误码率随闪烁指数 σ_I^2 的变化。湍流强度越弱,信道参数 α 越大,因此为便于研究,定义 σ_I^2 为闪烁指数,湍流越强, σ_I^2 越大;这里,取 σ_I^2 值的变化范围为1~4。由图1可看出,随着 σ_I^2 的增大,误码率也随之增大,说明K分布下,随湍流强度的增大,性能越来越差;另外,由图中可以看出,即使当平均信噪比达到50 dB,不同 σ_I^2 值下平均误码率均达不到 10^{-3} ,故引入分集接收就显得很有必要。

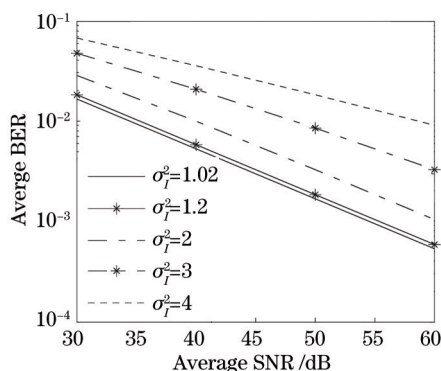


图1 FSO-SISO系统误码率随 σ_I^2 (闪烁指数)的变化

Fig.1 Average BER of FSO-SISO system with a function of σ_I^2

图2是对信道参数 $\alpha_1 = 4$ 、 $\alpha_2 = 40$,接收支路 $N = 2, 3$ 时MRC误码率性能仿真图。由图中可以看出,MRC合并相较无分集时性能有很大改善,且随着接收天线数目的增大,性能越来越好。当平均误码率为 10^{-3} 时,如图1未分集单输入单输出(SISO)系统所需平均信噪比超出50 dB,而分集支路 $N = 2, 3$ 达到该误码率所需平均信噪比约为33 dB、23 dB,其相差分别为不小于17 dB、10 dB。可以看出:MRC合并技术可有效地改善系统误码性能,具有较强的抗衰落能力。但随着分集支路数的逐渐增大,改善力度也在减小;并且,当 N 从1~3,两种湍流强度下其性能的差距也逐渐变大,说明随着分集支路的增大,其对湍流的抑制也愈加明显。

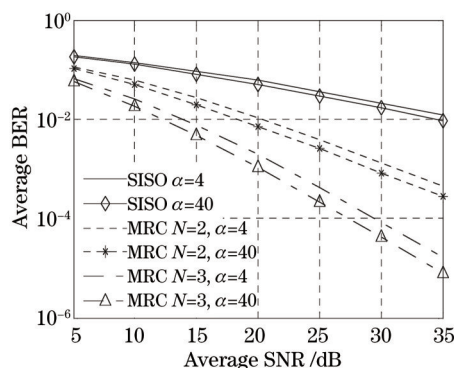


图2 不同接收天线数、不同信道参数下MRC合并的误码率性能仿真

Fig.2 BER performance of MRC for $N = 2(\alpha_1 = 4, \alpha_2 = 40)$ and $N = 3(\alpha_1 = 4, \alpha_2 = 40)$

图3是对信道参数 $\alpha_1=4, \alpha_2=40$ 接收支路 $N=2,3$ 时 EGC 误码率性能仿真图。由图中可以看出,EGC 合并相较无分集时性能也有很大改善,当平均误码率为 10^{-3} 时,如图1所示未分集 SISO 系统所需平均信噪比超出 50 dB,而分集支路 $N=2,3$ 达到该误码率所需平均信噪比约为 32 dB,22 dB,其相差分别为不小于 18 dB,10 dB。由此数据可以看出,EGC 合并技术可有效地改善系统误码性能,但随着分集支路数的逐渐增大,改善程度也在减小;并且,当 N 从 1~3,两种湍流强度下其性能的差距也逐渐变大,说明随着分集支路的增大,其对湍流的抑制也愈加明显。

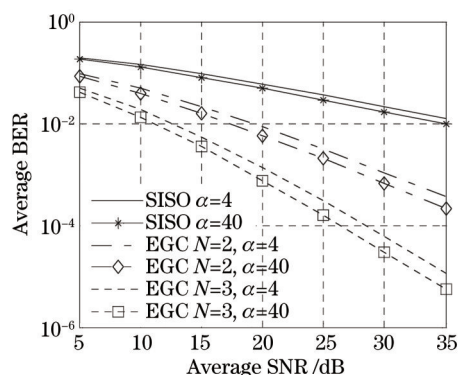


图3 不同接收天线数、不同信道参数下 EGC 合并的误码率性能仿真

Fig.3 BER performance of EGC for $N=2(\alpha_1=4, \alpha_2=40)$ and $N=3(\alpha_1=4, \alpha_2=40)$

图4为当信道参数 $\alpha=4$ 时, MRC 合并与 EGC 在 $N=2,3$ 时的误码率性能对比图。可以看出, $N=2$ 时其曲线几乎是重合的, $N=3$ 时, EGC 合并与 MRC 合并平均误码率性能相差 1dB 左右,说明 EGC 合并与 MRC 的性能是非常接近的,随着分集支路的增大,它们之间的差距会越来越明显。该图也给出了 EGC 算法 $\alpha=40$ 的误码率性能仿真图,其性能比 MRC $\alpha=4$ 的性能要稍微好一点,但差距很小,约为 1 dB,说明强湍流下合并算法受闪烁指数的影响较小,因此, MRC 算法优于 EGC 合并算法。

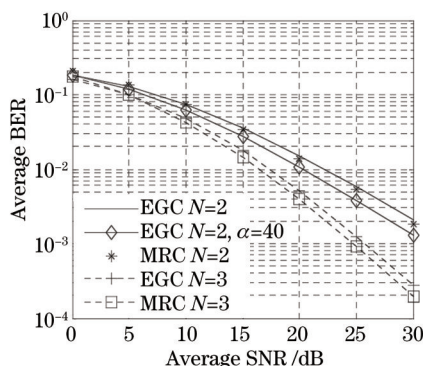


图4 不同接收天线数下 MRC 与 EGC 的误码率性能比较

Fig.4 Comparison of MRC and EGC receivers for $N=2$ and $N=3(\alpha=4)$

图5是对信道参数 $\alpha_1=4, \alpha_2=40$, 接收支路 $N=2$ 时选择合并 SC 与等增益合并 EGC 误码率性能对比仿真图。可以看出,相较未分集 SISO 情况, SC 与 EGC 均对系统性能有很好的改善,能有效抑制大气湍流引起的衰减。二者平均误码率均随着接收天线数 N 的增大在逐步减小,当误码率达到 10^{-4} , 接收天线数 $N=2$ 时, $\alpha_1=4, \alpha_2=40$, SC 合并分别所需平均信噪比为 47 dB, 44 dB, EGC 合并所需平均信噪比为 45 dB, 41 dB。由此数据可以看出,同种湍流强度下 SC 的性能是不如 EGC 的,但 $\alpha=40$ 时 SC 合并的性能要稍稍好于 $\alpha=4$ 时 EGC 合并,相差约为 1 dB,说明这里受湍流强度的影响,但影响不大,因此, EGC 合并总体上还是优于 SC 合并算法的。

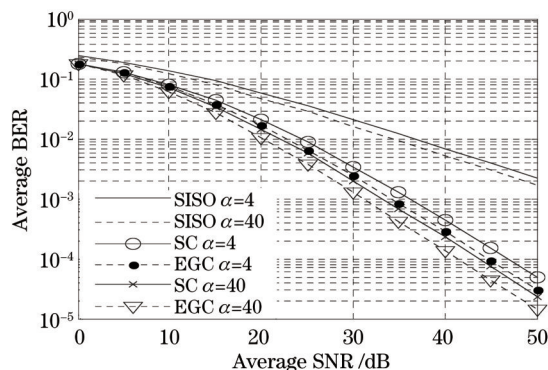


图 5 不同信道参数下 EGC 与 SC 的误码率性能比较

Fig. 5 Comparison of EGC and SC receivers for $\alpha_1 = 4$ and $\alpha_2 = 40(N = 2)$

6 结 论

研究了基于强湍流信道-K分布模型下的无线光通信系统空间接收分集技术,给出了OOK调制下的无线光通信系统对这三种空间分集接收合并的误码率模型,并进行了仿真分析。结果表明:分集接收技术可有效抑制大气湍流引起的信道衰减,并且大气湍流越严重,分集接收技术对系统的性能改善越明显。MRC、EGC和SC对提高系统增益和信噪比能力不同,在相同信道参数下,MRC性能改善最明显,EGC次之,SC性能最差。随着接收天线数的增加,其性能均越来越好。相同分集数和信噪比增益下,MRC误码率最小。但MRC实现复杂,SC相对容易,在工程应用中,要综合考虑实现的难易程度和性能,做出合理的折中。

参 考 文 献

- 1 L Andrews, R L Philips, C Y Hopen. Laser beam scintillation with applications [C]. SPIE, 2001. 211-212.
- 2 M M Ibrahim, A M Ibrahim. Performance analysis of optical receivers with space diversity reception [J]. IEEE Commun, 1996, 143(6): 369-372.
- 3 S M Navidpour, M Uysal, Mohsen Kavehrad. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 2813-2819.
- 4 E J Shin, V W S Chan. Optical communication over the turbulence atmospheric channel using spatial diversity [C]. Global Commun Conference, 2002, 3: 2005-2060.
- 5 S G Wilson, M Brandt-Pearce, Q Cao, et al.. Optical repetition MIMO transmission with multipulse PPM [J]. IEEE Journal on Select Areas Commun, 2005, 9(23): 1901-1910.
- 6 S M Navidpour, M Uysal, M Kavehrad. BER performance of free space optical MIMO transmission with spatial diversity [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2007, 6(8): 2813-2819.
- 7 T A Tsiftsis, H G Saïidalidis, G K Karagiannidis, et al.. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2009, 8(2): 951-957.
- 8 Ke Xizheng, Song Peng, Pei Guoqiang. 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.
- 9 Zhang Qiuli, Wang Yi, Du Fan. Research on the BER performance of receiver antenna arrays in free space optical communication systems [J]. Journal of China University of Metrology, 2013, 24(4): 88-91.
张秋丽, 王 怡, 杜 凡. 自由空间光通信系统天线阵接收的误码率分析[J]. 中国计量学院学报, 2013, 24(4): 88-91.
- 10 Xu Jianwu, Wang Hongxing, Sun Xiaoming, et al.. Method of establishing channel in multiple beam transmission and reception FSO systems [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305009.
徐建武, 王红星, 孙晓明, 等. 一种多光束发射和接收 FSO 系统的信道建模方法[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305009.
- 11 V S Adamchik, O I Marichev. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in REDUCE system[C]. Proceedings of 1990 International Conference on Symbolic and Algebraic Computation, 1990. 212-224.
- 12 Chen Dan, Ke Xizheng. Research on diversity receive technology on wireless optical communication using subcarrier modulation [J].

- Journal on Communication, 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.
- 13 Shou Qin, Zhang Tao, Wang Han. Analysis of BER performance in free space optical MIMO-OFDM communication systems over the Gamma-Gamma atmospheric turbulence [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 50(2): 020602.
- 寿 钦, 张 涛, 王 涵. Gamma-Gamma大气湍流下自由空间光通信 MIMO-OFDM 系统误比特率分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020602.
- 14 Leng Jiaofeng, Hao Shiqi, Qu 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. 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.
- 15 E K Lee, V W S Chan. Optical communication over the clear turbulent atmospheric channel using diversity [C]. Global Telecommunications Conference, 2004, 22(9): 1896-1906.

栏目编辑: 王晓琰