

大气衰减和大气湍流效应下多输入多输出 自由空间光通信的性能

韩立强 游雅晖

燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 为了减小大气衰减效应和大气湍流效应对自由空间光通信的影响,采用了多输入多输出技术。假定自由空间光通信系统采用开关键控强度调制直接探测,信道独立同分布、无记忆平稳遍历并且具有加性高斯白噪声,在发射端和接收端都可以获取理想信道状态信息;建立了综合大气效应下多输入多输出信道模型和系统模型,推导了等增益分集合并下自由空间光通信系统的遍历容量和中断概率闭合表达式,仿真分析了各种天气条件和大气湍流对空间光通信链路的影响,结果显示随着发射孔径和接收孔径的数目增多,大气效应的影响逐渐减小,通信系统性能随之提高。从系统复杂度及性能提高程度综合考虑,选择2个发射孔径、2个接收孔径较为合适。

关键词 光通信;多输入多输出;自由空间光通信;遍历容量;中断概率;伽马-伽马分布

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0706004

Performance of Multiple Input Multiple Output Free Space Optical Communication under Atmospheric Turbulence and Atmospheric Attenuation

Han Liqiang You Yahui

School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract Multiple input multiple output (MIMO) is used in order to decrease the effects of atmospheric attenuation and turbulence on free space optical communication (FSO). It is assumed that the intensity modulation direct detection (ID/DD) with on-off keying (OOK) is used in the FSO communication systems. The channel is memoryless, stationary ergodic, identically independent and distributed with additive white Gaussian noise (AWGN). The perfect channel state information (CSI) is available to both the transmitter and the receiver. Based on the hypothesis, the multiple input multiple output channel model and systems model are established under the integrated atmospheric effects. The closed form expressions of ergodic capacity and outage probability of FSO system with the equal gain diversity combined technique are derived. The influences of various weather conditions and turbulence strength on space optical communication link are analyzed. The results indicate that the performance of the communication system is increased and the atmospheric effect is decreased with the increase of the number of transmit aperture and receiving aperture. Considering the complexity and the increasing performance of the system, 2 transmission apertures and 2 receiving apertures are more suitable for FSO.

Key words optical communications; multiple input multiple output; free space optical communication; ergodic capacity; outage probability; Gamma-Gamma distribution

OCIS codes 060.2605;060.4510

1 引言

自由空间光通信与其他接入技术相比具有频带宽、容量大、速率高、部署快捷等优点,然而,当光信号通过大气信道进行传输时会受到大气效应的影响,导致光通信系统的性能严重恶化。大气效应一方面表现为大气衰减效应,由于光信号受到大气层中气体分子、粒子等散射及吸收的综合作用,传输光在传输主轴方向

收稿日期: 2016-02-12; 收到修改稿日期: 2016-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(61107039)

作者简介: 韩立强(1976—),男,博士,副教授,主要从事自由空间光通信方面的研究。E-mail: ysdxhlq@163.com

上的辐射强度受到很大衰减,从而影响空间光通信链路的建立或正常运行;另一方面是大气湍流效应,由于大气局部温度、压强的随机变化,大气的折射率随机起伏,造成光在传输过程中,光强、相位在空间上和时间内发生变化,产生相位畸变、光强闪烁等,它主要发生在以不同速度移动着的若干气流层的交界处。这两种大气效应对空间光通信链路的性能具有重要影响,严重影响通信系统的可靠性^[1-3]。

为了研究大气效应特别是大气湍流对空间光通信链路的影响,出现了许多描述大气湍流信道的统计模型,如对数正态分布、K分布及伽马-伽马(Gamma-Gamma)分布等,目前广泛使用的是Gamma-Gamma分布模型,实验结果也表明了Gamma-Gamma分布是一种描述大气湍流下光强衰减分布特性较为精确的模型^[4]。近期有文献报道,双韦伯分布是大气湍流下的另一种随机分布模型,已经证明在中强湍流下,其比Gamma-Gamma分布模型更为精确^[5]。M分布是另一种新的模型,它涵盖已经提出的多数统计模型,K分布和Gamma-Gamma分布模型即为其特殊情况^[6]。此外,还有一种双广义伽马(Double GG)分布模型,强湍流下考虑球面波传播模型以及中等湍流情况下考虑平面波传播模型时,相比双韦伯模型更为精确^[7]。以这些信道模型为基础,各国研究人员研究了大气效应对单输入单输出(SISO)空间光通信系统性能的影响^[2,3,8-11]。

为了减小大气效应影响,提高自由空间光通信链路性能,提出了空间分集技术,也即多输入多输出(MIMO)技术,该技术应用于自由空间光通信中时,具体体现为多孔径发射和多孔径接收。Navidpour等^[12]提出因多输入多输出自由空间光通信系统的性能受到各子信道空间相关性影响,必须保证孔径间距足够大。Cvijetic等^[13]研究了多输入多输出自由空间光通信系统性能,讨论分析了如何对多雪崩二极管探测器输出信号的合并增益大小进行选择。Belmonte等^[14]研究了分集合成技术下自由空间光通信的谱效率和中断容量。Tsiftsis等^[15]采用K分布强湍流信道模型,推导出了空间分集下开关键控(OOK)调制时自由空间光通信的误码率闭合表达式。Navidpour等^[12]推导了对数正态分布湍流信道下自由空间光通信的误码率表达式,仿真结果表明多发射多接收技术能有效提高系统性能。Zhu等^[16]使用最大似然检测器进行符号判决,导出了空间光通信链路误码率计算公式,研究表明当小孔径接收器输出信号之间的相关性较强时,最大似然方法比等增益合成更好。Popoola等^[17]利用空间分集来减轻大气湍流的影响,假设闪烁服从对数正态分布,推导了采用多载波强度二进制相移键控(BPSK)调制的大气光通信系统的误码率,探讨了使用最优增益、等增益合并和选择合并技术来实现空间分集。Kaur等^[18]研究了大气衰减效应和湍流效应下多孔径接收自由空间光通信系统的误码率,但采用的是单孔径发射多孔径接收(单输入多输出)系统。Luong等^[19-20]基于对数正态信道,推导了等增益合并下MIMO自由空间光通信系统的平均容量闭合表达式,给出了Gamma-Gamma湍流信道中MIMO自由空间光通信系统的平均容量闭合表达式,但未给出中断概率闭合表达式,且仅考虑了大气湍流效应,未考虑大气衰减效应的影响。

本文研究了大气衰减效应和大气湍流效应对空间光通信的影响,建立两种效应下多输入多输出的联合信道模型和系统模型,推导等增益分集合并技术下自由空间光通信的遍历容量和中断概率闭合表达式,分析不同湍流强度和各种天气条件下MIMO空间光通信的性能。

2 系统和信道模型

在自由空间光通信中,激光在大气信道传输中会受到大气效应的影响,其中大气湍流效应的发生概率和强度具有随机性,因此对空间光通信链路的影响较大。

2.1 系统模型

多输入多输出技术应用于自由空间光通信系统,即为多孔径发射和多孔径接收,如果自由空间光通信系统有 M 个发射孔径 N 个接收孔径,系统采用直接探测开关键控强度调制,信道是独立同分布的,具有加性高斯白噪声,则第 n 个探测器得到的信号 y_n 可表示为^[3]

$$y_n = h_{mn}Rx + n_n, \quad (1)$$

式中 h_{mn} 为第 m 个发射至第 n 个接收链路的信道状态, R 为光电转换效率, x 为调制信号, $x \in \{0, 2P_t\}$, P_t 为平均发射功率, n_n 为方差为 σ_n^2 的零均值加性高斯白噪声。第 m 个发射孔径至第 n 个接收孔径的链路接收到信号的实时信噪比(SNR)为^[3]

$$\gamma_{mn} = \frac{2P_1^2 R^2 h_{mn}^2}{\sigma_n^2} \quad (2)$$

如果仅考虑大气衰减效应和大气湍流效应的影响,信道状态 h_{mn} 可表示为两个衰减因子的乘积:

$$h_{mn} = h_1 h_a \quad (3)$$

式中 h_1 为大气衰减效应造成的损耗, h_a 为大气湍流引起的光强随机衰减。

2.2 信道模型

各种天气条件下大气衰减效应造成的损耗,服从朗伯比尔法则,可描述为^[3]

$$h_1(z) = \exp(-\sigma z) \quad (4)$$

式中 $h_1(z)$ 为传输一定距离 z 后所引起的大气损耗, σ 为衰减系数,实验表明大气损耗一般为一个固定的常量。

由于大气湍流闪烁效应的作用,自由空间光通信的光强信号在传输过程中会发生衰退。实验及理论表明 Gamma-Gamma 分布能够较为地准确描述大气湍流信道,其概率密度函数为^[9]

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_a^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}) \quad (5)$$

式中 $K_v(\cdot)$ 为第二类修正贝塞尔函数, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数,传输光波为平面波时, α 和 β 分别表示为^[9]

$$\alpha = \left\{ \exp \left[\frac{0.49\sigma_0^2}{(1 + 1.11\sigma_0^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (6)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[\frac{0.51\sigma_0^2}{(1 + 0.69\sigma_0^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (7)$$

式中 σ_0^2 为利托夫方差,即 $\sigma_0^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$, k 为波数, L 为传输距离, C_n^2 为大气折射率结构常数。

因 h_1 为一个固定常量, h_a 为一个随机变量,考虑大气衰减和大气湍流的影响,联合信道状态 $h_{mn} = h_1 h_a$ 的概率分布可根据随机变量函数的分布定理得到

$$f_{h_{mn}}(h_{mn}) = \left| \frac{d}{dh_{mn}} \left(\frac{h_{mn}}{h_1} \right) \right| f_{h_a} \left(\frac{h_{mn}}{h_1} \right) \quad (8)$$

(3)式和(5)式代入(8)式,得

$$f_{h_{mn}}(h_{mn}) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2} h_{mn}^{[(\alpha+\beta)/2]-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)h_1^{(\alpha+\beta)/2}} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_{mn}/h_1}) \quad (9)$$

利用 Meijer G 函数表示 $K_v(\cdot)$ ^[22]

$$K_v(z) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left(\frac{z^2}{4} \middle| \frac{v}{2}, -\frac{v}{2} \right) \quad (10)$$

(10)式代入(9)式,信道状态 $h_{mn} = h_1 h_a$ 的概率分布可进一步表示为

$$f_{h_{mn}}(h_{mn}) = \frac{(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2} h_{mn}^{(\alpha+\beta)/2-1}}{h_1^{(\alpha+\beta)/2} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{\alpha\beta}{h_1} h_{mn} \middle| \frac{\alpha-\beta}{2}, \frac{\beta-\alpha}{2} \right] \quad (11)$$

3 系统性能

为了减小大气效应对通信链路的影响,提高系统性能,将多孔径发射和多孔径接收分集技术应用于空间光通信系统中。下文对多输入多输出空间光通信系统性能指标——遍历容量和中断概率进行分析。

3.1 遍历容量

信道容量指信道能无错误传送的最大信息率,是信道传送信息的最大能力的度量。如果信道是无记忆平稳遍历的,且在发射端和接收端都可以获取理想信道状态信息,则遍历容量(或称平均容量)定义为^[20]

$$\langle C \rangle = \int_0^\infty B \log(1 + \gamma) f(\gamma) d\gamma \quad (12)$$

式中 B 为带宽。如果接收端采用等增益合并技术(EGC),则得到合并信号为

$$y = \frac{Rx}{MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M h_{mn} + n', \quad (13)$$

式中 n' 为接收端合并信号中的加性高斯白噪声。因合并后信道状态 h 为 MN 个信道状态 h_{mn} 的和, 即 $h = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M h_{mn}$, 所以合并后信道状态 h 的概率密度可以由 MN 个随机变量 h_{mn} 和的概率分布得到, 根据文献[21] 给出的多个独立同分布 Gamma-Gamma 随机变量和的概率分布公式, 结合(13)式就可以得到合并后信道状态为 h 的概率密度函数

$$f_h(h) = \frac{\left(\frac{\alpha_s \beta_s}{MN}\right)^{(\alpha_s + \beta_s)/2} h^{(\alpha_s + \beta_s)/2 - 1}}{h_1^{(\alpha_s + \beta_s)/2} \Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s)} \times G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{\alpha_s \beta_s}{MN h_1} h \left| \frac{\alpha_s - \beta_s}{2}, \frac{\beta_s - \alpha_s}{2} \right. \right], \quad (14)$$

式中 $\alpha_s = MN\alpha + \epsilon$, $\beta_s = MN\beta$, ϵ 为误差调整参数[21], 即

$$\epsilon = (MN - 1) \frac{-0.127 - 0.95\alpha - 0.0058\beta}{1 + 0.00124\alpha + 0.98\beta}. \quad (15)$$

根据(2)式和(13)式, 可得系统总的信噪比为

$$\gamma = \frac{2P_t^2 R^2 h^2}{M^2 N^2 \sigma_n^2}, \quad (16)$$

定义 $\bar{\gamma} = \frac{2P_t^2 R^2}{\sigma_n^2}$, 则 $h = MN \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}$, 根据随机变量函数的分布定理, 关于信噪比 γ 的概率密度函数 $f_\gamma(\gamma)$ 可表示为

$$f_\gamma(\gamma) = \left| \frac{d}{d\gamma} \left(MN \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \right) \right| f_h \left(MN \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \right). \quad (17)$$

(14)式代入(17)式得

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{(\alpha_s \beta_s)^{(\alpha_s + \beta_s)/2} \bar{\gamma}^{(\alpha_s + \beta_s)/4 - 1}}{2h_1^{(\alpha_s + \beta_s)/2} \bar{\gamma}^{(\alpha_s + \beta_s)/4} \Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s)} \times G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{\alpha_s \beta_s}{h_1} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \left| \frac{\alpha_s - \beta_s}{2}, \frac{\beta_s - \alpha_s}{2} \right. \right], \quad (18)$$

用 Meijer G 函数表示 $\ln(1+z) = \frac{1}{\ln 2} \times \ln(1+z) = \frac{1}{\ln 2} \times G_{2,2}^{1,2}(z | 1, 1; 0)$, 同时把(18)式代入(12)式, 得

$$\langle C \rangle = \int_0^\infty B \frac{1}{\ln 2} G_{2,2}^{1,2}(\gamma | 1, 1; 0) \times \frac{(\alpha_s \beta_s)^{(\alpha_s + \beta_s)/2} \bar{\gamma}^{(\alpha_s + \beta_s)/4 - 1}}{2h_1^{(\alpha_s + \beta_s)/2} \bar{\gamma}^{(\alpha_s + \beta_s)/4} \Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s)} \times G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{\alpha_s \beta_s}{h_1} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \left| \frac{\alpha_s - \beta_s}{2}, \frac{\beta_s - \alpha_s}{2} \right. \right] d\gamma, \quad (19)$$

又由文献[22], 利用 Meijer G 函数, 可得

$$\langle C \rangle = \frac{B}{4\pi \ln 2} \frac{(\alpha_s \beta_s)^{(\alpha_s + \beta_s)/2}}{\bar{\gamma}^{(\alpha_s + \beta_s)/4} h_1^{(\alpha_s + \beta_s)/2} \Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s)} \times G_{2,6}^{6,1} \left[\frac{\alpha_s^2 \beta_s^2}{16h_1^2 \bar{\gamma}} \left| \frac{\alpha_s - \beta_s}{4}, \frac{\alpha_s - \beta_s}{4} + \frac{1}{2}, \frac{\beta_s - \alpha_s}{4}, \frac{\beta_s - \alpha_s}{4} + \frac{1}{2}, -\frac{\alpha_s + \beta_s}{4}, -\frac{\alpha_s + \beta_s}{4} + 1 \right. \right], \quad (20)$$

进一步化简得

$$\langle C \rangle = \frac{B}{\pi \ln 2} \frac{2^{\alpha_s + \beta_s - 2}}{\Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s)} \times G_{2,6}^{6,1} \left[\frac{\alpha_s^2 \beta_s^2}{16h_1^2 \bar{\gamma}} \left| \frac{\alpha_s}{2}, \frac{\alpha_s + 1}{2}, \frac{\beta_s}{2}, \frac{\beta_s + 1}{2}, 0, 0 \right. \right]. \quad (21)$$

3.2 中断概率

中断概率是度量通信传输可靠性的物理量, 是指系统信噪比低于某一目标信噪比门限值的概率, 信噪比门限值的大小将对系统中断概率产生重要影响, 中断概率定义为[2]

$$P_{\text{out}} = \Pr(\gamma \leq \gamma_0). \quad (22)$$

(18)式代入(22)式可得中断概率表达式

$$P_{\text{out}} = \int_0^{\gamma_0} \frac{(\alpha_s \beta_s)^{(\alpha_s + \beta_s)/2} \gamma^{(\alpha_s + \beta_s)/4 - 1}}{2h_l^{(\alpha_s + \beta_s)/2} \bar{\gamma}^{(\alpha_s + \beta_s)/4} \Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s)} \times G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{\alpha_s \beta_s}{h_l} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \left| \frac{\alpha_s - \beta_s}{2}, \frac{\beta_s - \alpha_s}{2} \right. \right] d\gamma, \quad (23)$$

根据 Meijer G 函数运算性质^[22], 可得到中断概率闭合表达式

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{\Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s)} \times G_{1,3}^{2,1} \left[\frac{\alpha_s \beta_s}{h_l} \sqrt{\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}} \left| \frac{1}{\alpha_s, \beta_s, 0} \right. \right]. \quad (24)$$

4 数值模拟

基于上述推导的闭合表达式, 仿真分析大气湍流效应和大气衰减效应对自由空间光通信的影响, 为了尽可能模拟实际情况, 假设波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 传输距离 $L = 1000 \text{ m}$, 要保证信道独立, 各个接收孔径间距必须大于相关长度 $\sqrt{\lambda L} \approx 3.9 \text{ cm}$, 在表 1 和表 2 中分别给出了各种典型天气条件和大气湍流强弱变化时对应的参数^[12], 根据这些参数进行模拟分析。

表 1 各种天气条件下的能见度和衰减系数(波长为 1550 nm)

Table 1 Visibility and attenuation coefficients for various atmospheric conditions at 1550 nm wavelength

Weather condition	Visibility /km	Attenuation coefficient / (dB/km)
Clear air	50.0	0.0647
Drizzle	20.0	0.2208
Haze	6.0	0.7360
Light fog	2.0	4.2850

表 2 湍流强度变化时有关参数

Table 2 Parameters at different atmospheric turbulence intensities

Distance /m	$C_n^2/\text{m}^{-2/3}$	σ_0^2	α	β
1000	5.03×10^{-15}	0.1	21.59	19.82
2000	4.24×10^{-15}	0.3	8.43	6.92
1000	3.02×10^{-14}	0.6	5.41	3.78
2000	1.41×10^{-14}	1.0	4.39	2.56
1000	8.05×10^{-14}	1.6	4.03	1.91
2000	5.64×10^{-14}	4.0	4.34	1.31

图 1~4 分别模拟了晴天、毛毛雨、霾及轻雾天气对空间光通信系统遍历容量 $\langle C \rangle / B$ 的影响。从图中可以看出, 信噪比的提高可以增大系统遍历容量, 随着天气条件的恶化, 系统遍历容量随之降低, 如在单输入单输出 ($M=1, N=1$) 时, 当平均信噪比为 20 dB 时晴天条件下, 系统遍历容量约为 5, 毛毛雨时遍历容量约为 4.5, 霾时遍历容量降为 3.3 左右, 而雾天时遍历容量还不到 0.1, 信道容量急剧下降。由图 1~4 可见, 采用空间分集可提高系统性能, 增加发射孔径 M 和接收孔径 N 数目, 可有效提高系统遍历容量, 其中 $M=1, N=2$ 时增幅最大, M 大于 2、 N 大于 2 以后提高幅度有限, 因此从系统复杂性角度以及性能提高程度综合考虑, 认为选择 2 个发射孔径 2 个接收孔径 ($M=2, N=2$) 比较合适。

图 5 给出了在晴天天气条件下, 随着大气湍流强弱的变化, 接收端探测器数量对空间光通信系统遍历容量的影响。当大气湍流从弱到强变化时, 遍历容量随之减小, 特别是强湍流对遍历容量影响最为严重, 而增加接收端探测器数目可显著提高遍历容量。从图中可发现探测器数目为 2 时遍历容量的提高幅度最大, 这和图 1~4 分析的结论一致。

图 6~8 给出了平均信噪比为 20 dB, 晴天、毛毛雨、霾及轻雾天气条件下, 弱湍流 ($C_n^2 = 4.24 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$)、中等湍流 ($C_n^2 = 3.02 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$)、强湍流 ($C_n^2 = 8.05 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$) 时, 探测器数目与空间光通信系统中断概率的关系的模拟结果。从图可以看出, 随着天气条件的恶化, 系统中断概率随之增大; 随着大气湍流强度的增大, 系统中断概率随之增大; 增加探测器数目可以减小系统中断概率。例如, 当系统为单

输入单输出($M=1, N=1$)时,由图 6 可见在弱湍流、晴天时系统中断概率为 10^{-8} 数量级,由图 8 可见强湍流、晴天时系统中断概率可达到 10^{-2} 数量级;多输入多输出技术的优势由图 8 可见,在强湍流、晴天条件下采用 2 个探测器可把中断概率降低为 10^{-6} 数量级,采用 4 个探测器可把中断概率降低为 10^{-14} 数量级。

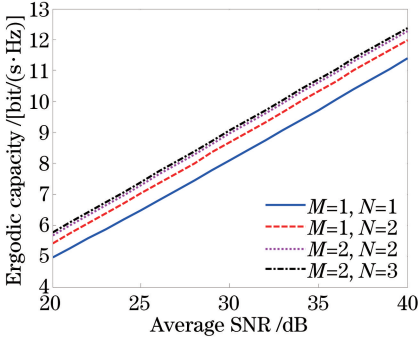


图 1 晴天条件下遍历容量与平均信噪比的关系

Fig. 1 Ergodic capacity versus average SNR at very clear air condition

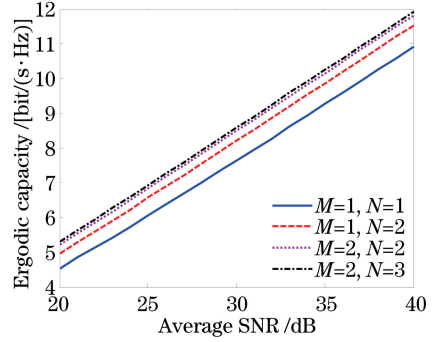


图 2 毛毛雨条件下遍历容量与平均信噪比的关系

Fig. 2 Ergodic capacity versus average SNR at drizzle condition

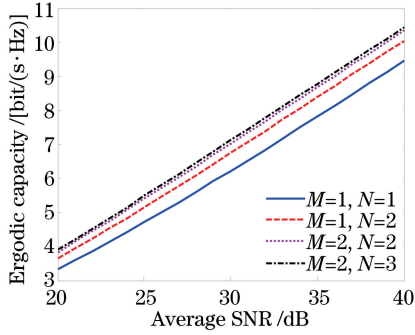


图 3 霾条件下遍历容量与平均信噪比的关系

Fig. 3 Ergodic capacity versus average SNR at haze condition

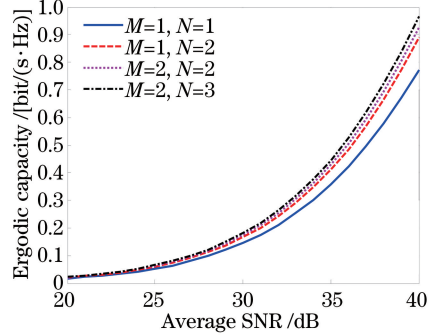


图 4 雾天条件下遍历容量与平均信噪比的关系

Fig. 4 Ergodic capacity versus average SNR at fog condition

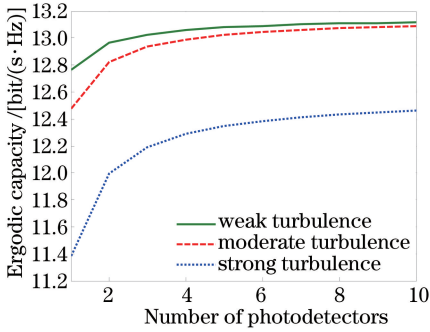


图 5 不同湍流强度时遍历容量与探测器数量的关系

Fig. 5 Ergodic capacity versus number of photodetectors with different turbulence intensities

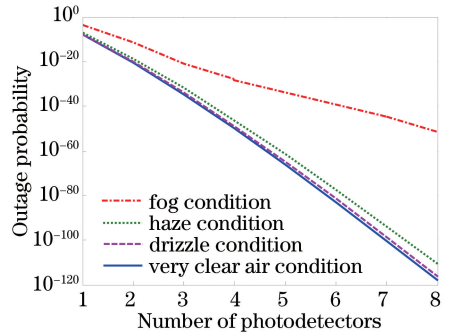


图 6 弱湍流不同天气条件下中断概率与探测器数量的关系

Fig. 6 Outage probability versus number of photodetectors in weak turbulence with different weather conditions

5 结 论

本文研究了大气湍流和大气衰减联合信道下, MIMO 自由空间光通信系统的性能, 采用等增益合并技术得出了自由空间光通信的遍历容量和中断概率闭合表达式, 数值模拟分析了大气湍流从弱到强变化和各种天气条件如晴天、毛毛雨、霾、雾等对系统链路性能的影响, 结果显示随着发射孔径接收孔径的数目增多,

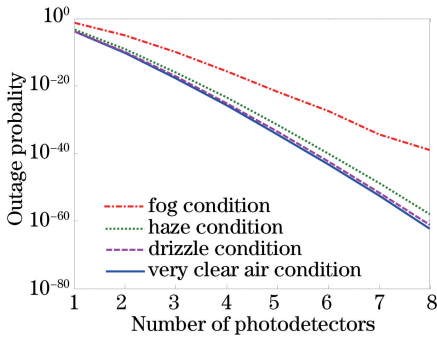


图 7 中等湍流不同天气条件下中断概率与探测器数量的关系

Fig. 7 Outage probability versus number of photodetectors in moderate turbulence with different weather conditions

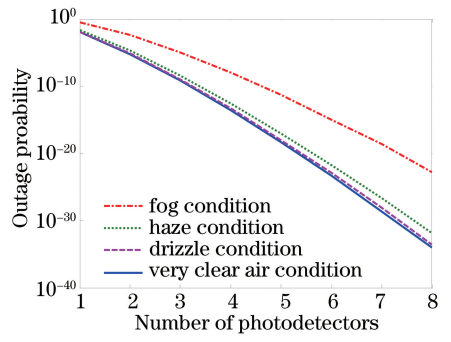


图 8 强湍流不同天气条件下中断概率与探测器数量的关系

Fig. 8 Outage probability versus number of photodetectors in strong turbulence with different weather conditions

大气效应的影响逐渐减小,自由空间光通信系统性能随之提高,但综合考虑系统复杂性以及性能提高程度,认为选择 2 个发射孔径 2 个接收孔径($M=2, N=2$)较为合适,这为空间光通信系统的设计提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Hu Qingsong, Huang Yuhua, Wang Junbo, *et al.*. Performance analysis of multi-hop free space optics over strong turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0906004.
胡庆松, 黄玉划, 王俊波, 等. 强湍流下多跳自由空间光通信的性能分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0906004.
- 2 Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunori. Performance of free space optical communication over Gamma-Gamma atmosphere turbulence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1318-1322.
韩立强, 王 祁, 信太克归. Gamma-Gamma 大气湍流下自由空间光通信的性能[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1318-1322.
- 3 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.
- 4 al-Habash M 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): 1554-1562.
- 5 Chatzidiamantis N D, Sandalidis H G, Karagiannidis G K, *et al.*. New results on turbulence modeling for free-space optical systems[C]. *IEEE International Conference on Telecommunications(ICT)*, 2010: 487-492.
- 6 Jurado-Navas A, Balsells J M G, Paris J F, *et al.*. General analytical expressions for the bit error rate of atmospheric optical communication systems[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 4095-4097.
- 7 Kashani M A, Uysal M, Kavehrad M. A novel statistical model for turbulence-induced fading in free space optical systems [C]. *International Conference on Transparent Optical Networks(ICTON)*, 2013: 1-5.
- 8 Uysal M, Li J, Yu M. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over Gamma-Gamma turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(6): 1229-1233.
- 9 Tsiftsis T A. Performance of heterodyne wireless optical communication systems over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channels[J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(5): 372-373.
- 10 Popoola W O, Ghassemlooy Z, Ahmadi V. Performance of sub-carrier modulated free-space optical communication link in negative exponential atmospheric turbulence environment [J]. *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems*, 2008, 1(3): 342-355.
- 11 Nistazakis H E, Tsiftsis T A, Tombras G S. Performance analysis of free-space optical communication systems over atmospheric turbulence channels[J]. *IET Communications*, 2009, 3(8): 1402-1409.
- 12 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.
- 13 Cvijetic N, Wilson S G, Brandt-Pearce M. Performance bounds for free space optical MIMO systems with APD receivers in atmospheric turbulence[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(3): 3-12.

- 14 Belmonte A, Kahn J M. Capacity of coherent free-space optical links using diversity-combining techniques[J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12601-12611.
- 15 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.
- 16 Zhu X M, Kahn J M. Maximum likelihood spatial diversity reception on correlated turbulent free space optical channels [C]. *IEEE Global Communication Conference*, 2000, 2: 1237-1241.
- 17 Popoola W O, Ghassemlooy Z, Allen J I H, *et al.*. Free-space optical communication employing subcarrier modulation and spatial diversity in atmospheric turbulence channel[J]. *IET Optoelectronics*, 2008, 2(1): 16-23.
- 18 Kaur P, Jain V K, Kar S. Performance analysis of FSO array receivers in presence of atmospheric turbulence[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(12): 1165-1168.
- 19 Luong D A, Thang T C, Pham A T. Average capacity of MIMO/FSO systems with equal gain combining over log-normal channels[C]. *Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks(ICUFN 2013)*, 2013: 306-309.
- 20 Pham A T. Average capacity of MIMO free-space optical Gamma-Gamma fading channel[C]. *2014 IEEE International Conference on Communications(ICC)*, 2014: 3354-3358.
- 21 Chatzidiamantis N D, Karagiannidis G K. On the distribution of the sum of Gamma-Gamma variates and applications in RF and optical wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(5): 1298-1308.
- 22 The Wolfram functions site. Meijer G function[EB/OL]. [2016-01-05] <http://functions.wolfram.com>.