

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.002

相关无线光 MIMO 系统的信道容量

王 雪 王惠琴 曹明华

(兰州理工大学 计算机与通信学院 兰州 730050)

摘要:空间相关性是制约无线光多输入多输出(MIMO)系统性能的主要因素之一。结合 OOK 调制技术,建立了相关无线光 MIMO 系统的信道模型,推导了不同相关机制下无线光 MIMO 系统的平均信道容量的解析式,分析了其中断性能。采用仿真实验分析了对数正态衰落信道中,空间相关性对均匀圆阵光 MIMO 系统的平均信道容量和中断信道容量的影响。结果表明,空间相关性的存在使得无线光 MIMO 系统的平均信道容量减小,中断概率增大;同时完全相关对于系统性能的影响较部分相关而言更为严重。

关键词:无线光通信;多输入多输出;空间相关性;信道容量

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Channel capacity of correlated wireless optical MIMO system

Wang Xue Wang Huiqin Cao Minghua

(School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Spatial correlation is one of the main factors restricting performance of the wireless optical communication (WOC) multiple-input multiple-output (MIMO) system. The channel model of correlated WOC MIMO systems combined with OOK modulation technology is established. Then, the expressions of average channel capacity of WOC MIMO system for different correlated mechanisms are derived and the outage performance is analyzed. Finally, the impacts of spatial correlation on average channel capacity and outage channel capacity of WOC uniform circular array MIMO system in lognormal fading channel are simulated. The results show that spatial correlation deteriorates the average channel capacity of WOC MIMO system and increasing the probability of interruption. Meanwhile, the impacts of complete correlation are more serious than that of partial correlation on the performance of WOC MIMO system.

Keywords: WOC; MIMO; spatial correlation; channel capacity

1 引 言

无线光通信(WOC)是以激光作为信息传输的载体、能够实现高速率数据传输的一种新兴无线通信技术,被认为是解决“最后一公里”问题的最佳方案。然而,WOC一直面临一项巨大的挑战,当激光信号在大气信道中传输时,大气湍流运动引起的光强闪烁、光束漂移、扩展与抖动等现象,会使接收到的光信号产生随机起伏,这将严重影响光通信的可靠传输,严重时甚至会导致通信

中断^[1-3]。

克服大气湍流简单有效的方法是孔径平均,即利用孔径平滑效应来减弱接收光强的起伏。但大孔径光学器件的体积重量大,不适用于终端尺寸受限的无线光通信系统^[4]。多输入多输出(MIMO)技术是指通过多个相互不相干激光束经过不同路径到达多个接收端,并利用非相干叠加而进行信息传输的一种技术,具有实现简单,实用性强的优点,因而成为近年来无线光通信中克服湍流效应方面的研究热点^[5-6]。现已文献[7-10]结合检测技术、调制方式以及合并准则等研究了光 MIMO 系统在各

个子信道互相独立时的系统性能。然而,在实际的通信环境中(尤其是中强湍流条件下),为保证信道独立的假设条件成立,接收孔径以及发射光束之间需要的间距通常较大而不容易实现^[4,11]。

基于此,文献[12]研究了影响发射分集系统空间相关性的主要因素,并指出其抑制光强闪烁的能力受各光束间空间相关性的影响,空间相关性越大,分集系统抑制光强闪烁的能力就越弱。文献[13]研究了光强起伏方差随相关性的变化情况,结果表明,相关系数越大,光强起伏方差越大。文献[14-15]研究了对数正态衰落信道中信道相关性对空间分集系统误码率的影响,并得到了系统误码率的表达式。文献[16]研究了自由空间光通信 MIMO 系统在相关 Poisson 衰落信道中的中断概率问题。文献[17-19]研究了 gamma-gamma 衰落信道下相关性对空间分集系统的误码率以及中断概率的影响。结果表明,空间相关性严重影响了光 MIMO 系统的性能。然而,大多数关于光 MIMO 系统空间相关性的研究,都是针对不同衰落信道中相关性对误码率和中断概率的影响展开的,而相关性对光 MIMO 系统的平均信道容量的影响的研究较少,因此对相关光 MIMO 系统的信道容量的研究是十分必要的。本文针对光强调制/直接检测(IM/DD)技术,建立了 OOK 调制下相关光 MIMO 系统的信道模型,并基于该模型,分析了对数正态衰落信道中,不同相关机制下光 MIMO 系统的平均信道容量以及中断信道容量。

2 信道模型

对于一个有 M 个激光器和 N 个探测器的 MIMO 光通信系统而言,其信道模型如图 1 所示。第 i 个激光器发送的信号用 x_i 来表示,第 j 个探测器收到的光电流用 y_j 来表示。 h_{ji} 表示从第 i 个激光器到第 j 个探测器的光强衰减系数。 I_s 表示无衰落时接收端在每个探测器上收到的平均光电流。在一个字符周期内它为一常数,近似服从对数正态分布。则它们之间满足:

$$y_j(t) = \frac{\eta I_s}{M} \sum_{i=1}^M h_{ji} x_i(t) + n_j(t) \quad (1)$$

或用矩阵形式表示为:

$$\mathbf{y}(t) = \frac{\eta I_s}{M} \mathbf{H} \mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t))^T$ 为输入信号矩阵, $\mathbf{y}(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t))^T$ 为输出信号矩阵, $\mathbf{n}(t) = (n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t))^T$ 为噪声矩阵。其中各分量之间互相统计独立,且都是均值为 m_x 、方差为 N_0 的高斯白噪声, η 表示光电转换效率, \mathbf{H} 为信道增益矩阵,即:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $h_{ji} = a_{ji}^2$ 表示从第 i 个激光器到第 j 个探测器上的光强衰减系数。当单光束在弱湍流信道中传输时,光强的对数振幅 A 服从正态分布,即:

$$f_A(a) = \frac{1}{(2\pi\sigma_x^2)^{1/2}a} \exp\left(-\frac{\ln a - \mu_x}{2\sigma_x^2}\right) \quad a > 0 \quad (4)$$

式中: μ_x 为均值, σ_x^2 为方差。设 $E[A^2] = 1$ 时,则 $\mu_x = -\sigma_x^2$ 。虽然单光束通过强湍流大气后,其光强闪烁服从负指数分布。但当传输距离、接收孔径和发射孔径之间满足一定条件时,随着光束数目的增加,大气闪烁也将趋于对数正态分布^[20]。在对数正态分布中,可采用闪烁指数

数来表示衰落的大小。闪烁指数定义为 $S.I. = \frac{E[A^4]}{E^2[A^2]} - 1 = e^{4\sigma_x^2} - 1$, 其典型值为 $S.I. \in [0.4 \sim 1.0]$ ^[21]。

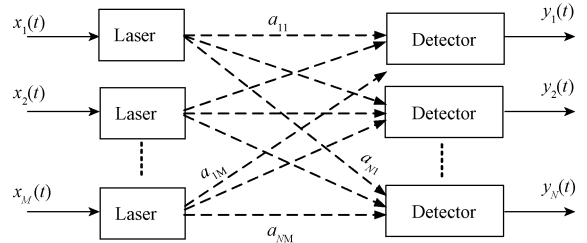


图 1 MIMO 光通信系统的信道模型

Fig. 1 Channel model of optical MIMO communication system

3 信道容量

根据式(2)的信道模型,光 MIMO 系统的信道容量可定义为:

$$C = \max_{p(\mathbf{x})} I(\mathbf{x}; \mathbf{y}) \quad (5)$$

式中: $p(\mathbf{x})$ 是矢量 \mathbf{x} 的概率密度函数。矢量 \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 之间的互信息量 $I(\mathbf{x}; \mathbf{y})$ 表示为:

$$I(\mathbf{x}; \mathbf{y}) = H(\mathbf{y}) - H(\mathbf{y} | \mathbf{x}) = H(\mathbf{y}) - H(\mathbf{n}) \quad (6)$$

式中: $H(\mathbf{y})$ 和 $H(\mathbf{n})$ 分别是接收信号矢量 \mathbf{y} 和噪声矢量 \mathbf{n} 的熵, $H(\mathbf{y} | \mathbf{x})$ 是在给定发送信号为 \mathbf{x} 的条件下接收到信号为 \mathbf{y} 的条件熵。这样,最大化 $I(\mathbf{x}; \mathbf{y})$ 就简化为最大化 $H(\mathbf{y})$, 接收信号 \mathbf{y} 的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_{yy} = E(\mathbf{y}\mathbf{y}^H) = \frac{\eta^2 I_s^2}{M} \mathbf{H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{H}^H + N_0 \mathbf{I}_N \quad (7)$$

式中: $E(\cdot)$ 表示统计平均, $(\cdot)^H$ 表示矩阵或向量的共轭转置矩阵, \mathbf{I}_N 是 N 阶的单位阵, \mathbf{R}_{xx} 为发送信号矩阵 \mathbf{x} 的协方差矩阵。

根据信息论,此时 \mathbf{y} 和 \mathbf{n} 的熵分别为:

$$\begin{aligned} H(\mathbf{y}) &= \log_2 [\det(\pi e \mathbf{R}_{yy})] \\ H(\mathbf{n}) &= \log_2 [\det(\pi e N_0 \mathbf{I}_N)] \end{aligned} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)就可得到互信息量:

$$I(\mathbf{x}; \mathbf{y}) = \log_2 \det \left[\mathbf{I}_N + \left(\frac{\eta^2 I_s^2}{MN_0} \right) \mathbf{H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{H}^H \right] \quad (9)$$

再将式(9)代入到式(5)就可得光 MIMO 系统的信道容量为:

$$C = \max_{\mathbf{R}_{xx}, \text{tr}(\mathbf{R}_{xx})=M} \log_2 \det \left[\mathbf{I}_N + \left(\frac{\eta^2 I_s^2}{MN_0} \right) \mathbf{H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{H}^H \right] \quad (10)$$

式中: $\det(\cdot)$ 表示矩阵行列式, \mathbf{R}_{xx} 的迹为 $\text{tr}(\mathbf{R}_{xx})$ 。为了保证发射总功率恒定,并且不受发射天线数的影响, $\text{tr}(\mathbf{R}_{xx})$ 满足 $\text{tr}(\mathbf{R}_{xx}) \leq M$ 。假设发送端无法获得有关信道的知识,此时则会有 $\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{I}_M$ 。则式(10)可简化为:

$$C = \log_2 \det \left[\mathbf{I}_N + \left(\frac{\eta^2 I_s^2}{MN_0} \right) \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right] \quad (11)$$

在实际的环境,由于信道参数的随机性,致使 MIMO 系统的信道容量 C 也是随机变量。所以在分析 MIMO 信道容量时,通常使用各态历经容量和中断概率容量两种统计特性来描述。各态历经容量就是使用渐近的最优码字能够无误的传输速率。从理论上说,信道的遍历容量可以通过码字在信道上的长时间传输得到。它是信道矩阵 \mathbf{H} 的平均信道容量,可通过对式(11)求统计平均而得到;

$$C_{\text{avg}} = E_A[C] = E_A \left[\log_2 \det \left[\mathbf{I}_N + \left(\frac{\eta^2 I_s^2}{MN_0} \right) \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right] \right] \quad (12)$$

式中: $E_A[\cdot]$ 表示瞬时信道容量 C 关于信道衰落系数求平均。对于相关 MIMO 系统,信道矩阵 \mathbf{H} 由下式给出:

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_{\text{iid}} \mathbf{R}_t^{1/2} \quad (13)$$

式中: \mathbf{H}_{iid} 为 i. i. d 对数正态衰落的信道增益矩阵, \mathbf{R}_r 为接收端相关矩阵, \mathbf{R}_t 为发送端相关矩阵。将上式代入式(12)并化简,得:

$$C_{\text{avg}} = E_A \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I}_N + \frac{\eta^2 I_s^2}{MN_0} \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_{\text{iid}} \mathbf{R}_t \mathbf{H}_{\text{iid}}^H \mathbf{R}_r^{1/2} \right) \right] \quad (14)$$

根据不同的信道相关条件,可将平均信道容量分为如下3种情况来讨论。

1) 不相关衰落信道

在这种情况下 $\mathbf{H} = \mathbf{H}_{\text{iid}}$, 即 $\mathbf{R}_r^{1/2} = \mathbf{I}_N, \mathbf{R}_t^{1/2} = \mathbf{I}_M$, 此时,系统的平均信道容量可表示为:

$$C_{\text{avg}} = E_A \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I}_M + \frac{\eta^2 I_s^2}{MN_0} \mathbf{H}_{\text{iid}} \mathbf{H}_{\text{iid}}^H \right) \right] \quad (15)$$

2) 部分相关衰落信道

此时,式(13)可表示为 $\mathbf{H} = \mathbf{H}_{\text{iid}} \mathbf{R}_t^{1/2}$ 或 $\mathbf{H} = \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_{\text{iid}}$, 当 $\mathbf{R}_t^{1/2} = \mathbf{I}_N, \mathbf{R}_r^{1/2} \neq \mathbf{I}_M$ 时,信道为发送端相关衰落,当

$\mathbf{R}_r^{1/2} \neq \mathbf{I}_N, \mathbf{R}_t^{1/2} = \mathbf{I}_M$ 时,信道为接收端相关衰落。系统平均信道容量表示为:

$$\begin{aligned} C_{\text{avg}} &= E_A \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I}_N + \frac{\eta^2 I_s^2}{MN_0} \mathbf{H}_{\text{iid}} \mathbf{R}_t \mathbf{H}_{\text{iid}}^H \right) \right] \text{ 或} \\ C_{\text{avg}} &= E_A \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I}_N + \frac{\eta^2 I_s^2}{MN_0} \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_{\text{iid}} \mathbf{H}_{\text{iid}}^H \mathbf{R}_r^{1/2} \right) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

3) 完全相关衰落信道

此时发送端和接收端都相关,衰落矩阵表示为 $\mathbf{H} = \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_{\text{iid}} \mathbf{R}_t^{1/2}$, 即 $\mathbf{R}_r^{1/2} \neq \mathbf{I}_N, \mathbf{R}_t^{1/2} \neq \mathbf{I}_M$ 。平均信道容量表示为:

$$C_{\text{avg}} = E_A \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I}_N + \frac{\eta^2 I_s^2}{MN_0} \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_{\text{iid}} \mathbf{R}_t \mathbf{H}_{\text{iid}}^H \mathbf{R}_r^{1/2} \right) \right] \quad (17)$$

中断容量是指系统能以某一较高确定概率保证信息传输的速率。它分析量化了在一定的可靠性程度下,能够保证的性能(容量)水平,可以很好的表达多输入多输出系统的分集增益,其定义为如果系统的信道容量小于某一固定值 C_{out} 的概率为一个较小的数值 P_{out} , 即:

$$P_{\text{out}} = P_r \{ C < C_{\text{out}} \} = F_C(C_{\text{out}}) \quad (18)$$

式中: P_{out} 为中断概率, C_{out} 为中断容量, $F_C(C_{\text{out}})$ 表示 C 的累积概率密度函数。

中断概率与中断容量是相互对应的,也就是说,系统能以 $1 - P_{\text{out}}$ 的概率保证容量高于定值 C_{out} , 或者说,系统所有实现中容量低于定值 C_{out} 的概率是某一确定值 P_{out} 。

4 仿真分析

天线阵可以有各种排列形式。在线性阵中,天线排成一条直线;在平面阵中,天线元素的位置按极坐标或笛卡尔坐标分布。为简单起见,本文在几何模型中仅考虑方位面。图2所示给出了一个半径为 r 、天线元素 $M = 4$ 的均匀圆形阵(UCA)。

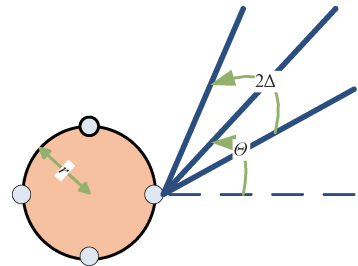


图2 阵元为4的均匀圆阵模型

Fig.2 The system model for four-element

发送端和接收端的角度扩展分别为 α, β , 中心到达角和离开角均为 $\theta = \pi/3$, 散射角均匀分布在 $[\theta - \Delta, \theta + \Delta]$, Δ 是角度扩展(为 α 或 β)。

对于UCA,第 m 个与第 n 个天线之间的空间衰落相

相关性可以定义为^[22]:

$$R(m, n) = \exp\left(\frac{j4\pi r k}{\lambda}\right) \text{sinc}\left(\frac{4\pi r \zeta \Delta}{\lambda}\right) \quad (19)$$

式中: $\kappa = \sin\left(\frac{\varphi_n - \varphi_m}{2}\right) \sin\left(\theta - \frac{\varphi_n - \varphi_m}{2}\right)$, $\zeta = \sin\left(\frac{\varphi_n - \varphi_m}{2}\right) \cos\left(\theta - \frac{\varphi_n - \varphi_m}{2}\right)$, $\varphi_i (i \in [0, M-1])$ 是第 i 个天线元素的方位角。

为了进一步分析相关性对 WOC MIMO 系统性能的影响,图 3~5 所示为仿真了相关性对 4×4 均匀圆阵系统的平均信道容量以及中断信道容量的影响,仿真参数为 $\eta = 0.4$, $S.I. = 0.6$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $r = 1$ 。

图 3 所示给出了不同相关机制下, 4×4 WOC 系统的平均信道容量随信噪比(SNR)变化的情况,结果表明:1) 相关性的存在严重影响到信道平均容量,在 SNR 为 10 dB 时,信道独立时的信道容量比部分相关(仅发送端或仅接收端相关)时的平均容量高出约 2.5 bps/Hz,比完全相关时平均容量高出约 3.9 bpd/Hz,且这种影响随着信噪比的增大越来越明显;2) 仅发送端相关与仅接收端相关时的平均容量曲线重合。这说明,对收发天线数相等的系统而言,仅一端相关对平均信道容量产生的影响是相同的。

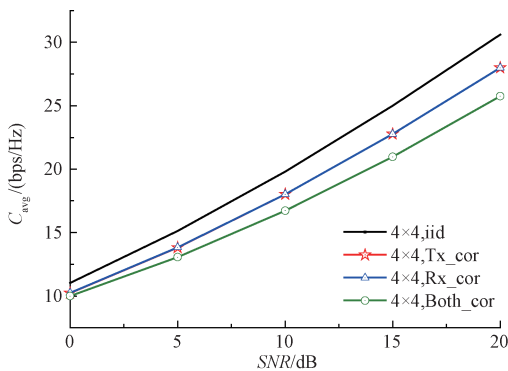


图 3 不同相关机制下的平均信道容量

Fig. 3 Average capacity in different correlation mechanism

图 4 所示为不同相关机制下, 4×4 WOC 系统的中断容量的变化情况,由图 4 可知:1) 两种部分相关时的曲线是重合的,也就是说,仅发端相关与仅收端相关对系统的中断性能的影响是一样的;2) 在信道独立时的中断性能优于部分相关时的中断性能,而部分相关时的中断性能又比完全相关时的中断性能好。在中断概率为 20% 时,信道独立时的中断容量比部分相关是中断容量高出约 1.8 bps/Hz,而比完全相关时中断容量高出约 2.5 bps/Hz。

图 5 所示为天线角度扩展不同的情况下,平均信道容量随 SNR 变化的曲线图,结果表明,角度扩展越小,平

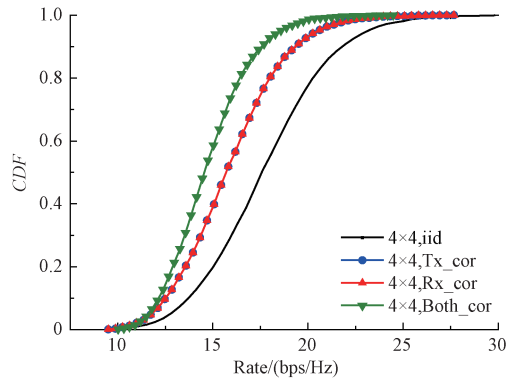


图 4 不同相关机制下的中断信道容量

Fig. 4 Outage capacity in different correlation mechanism

均信道容量随之减小。这是因为角度扩展越小, MIMO 系统的空间相关系数越大,导致系统的平均信道容量减小。

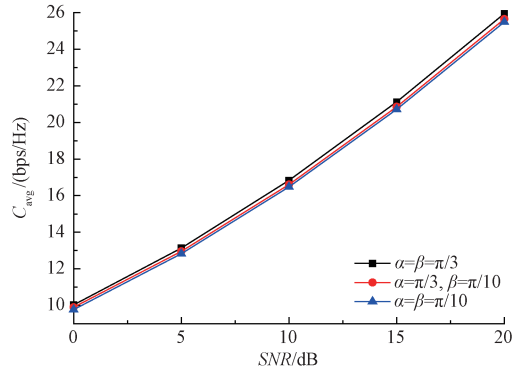


图 5 不同扩展角度下的平均信道容量曲线

Fig. 5 The curve of channel capacity in different spread angle

5 结论

实际的通信环境中,由于存在信道衰落以及空间距离的有限性,导致无线光 MIMO 系统的各光束之间存在一定的相关性,这种相关性严重影响无线光通信系统的性能。本文针对 WOC MIMO 系统在对数正态衰落环境中的空间相关性问题,结合 OOK 调制,分析了相关 WOC MIMO 系统的信道模型,推导了 WOC MIMO 系统在不同相关机制下的平均信道容量以及中断概率的表达式,分析了空间相关对信道容量以及中断性能的影响。最后,采用均匀圆阵模型,仿真了不同相关性对于 WOC MIMO 系统性能的影响。结果表明,相关性的存在严重影响了 WOC MIMO 系统的性能,相关性越大,平均信道容量越小,系统中断性能越差。

参考文献

[1] 柯熙政,赵黎,殷致云,等. 无线激光通信中差错控制

- 实验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(6): 18-23.
- KE X ZH, ZHAO L, YIN ZH Y, et. al. Experimental research on the error control of wireless laser communication[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(6): 18-23.
- [2] 黎明, 黄勇. 16 KM 空间光通信的跟踪实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(1): 230-234.
- KE X ZH, HUANG Y. Experimental study of tracking system for 16 KM free-space optical communication[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(1): 230-234.
- [3] 杨利红, 柯熙政. 基于大气光通信偏振 PPM 的误码率研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(7): 1664-1668
- YANG L H, KE X ZH. BER of polarization PPM based on atmospheric optical communication [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(7): 1664-1668.
- [4] KHALIGHI M A, SCHWARTZ N, AITAMER N. Fading reduction by aperture averaging and spatial diversity in optical wireless systems [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2009, 1(6): 580-593.
- [5] POPOOLA W O, GHASSEMLOOY Z. BPSK subcarrier intensity modulated free-space optical communications in atmospheric turbulence [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(8): 967-973.
- [6] CHATZIDIAMANTIS N D, UYSAL M, TSIFTSIS T A. Iterative near maximum-likelihood sequence detection for MIMO optical wireless systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(7): 1064-1070.
- [7] HASAN O M, TAHA M, SHARKH O A. Outage capacity and outage rate performance of MIMO free-space optical system over strong turbulence channel [J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(11): 1106-1114.
- [8] WILSON S G, BRANDT-PEARCE M, CAO Q L. Optical repetition MIMO transmission with multipulse PPM [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(9): 1901-1910.
- [9] SHABAN H A, AZIZ S D A E, ABOULSEOD A K, et al. Error performance of free space optical MIMO systems in weak, moderate, and severe atmospheric turbulence channels [C]. Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2011: 000777-000782.
- [10] BHATNAGAR M R, GHASSEMLOOY Z. Performance analysis of Gamma-Gamma fading FSO MIMO links with pointing errors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(9): 2158-2169.
- [11] CHEN Z, YU S, WANG T, et al. Channel correlation in aperture receiver diversity system for free-space optical communication[J]. Journal of Optics, 2012, 14(12): 2198-2198.
- [12] ANGUIA J A, NEIFELD M A, VASIC B V. Spatial correlation and irradiance statistics in a multiple-beam terrestrial free-space optical communication link [J]. Applied Optics, 2007, 46(26): 6561-6571.
- [13] 柯熙政, 谟娟, 裴国强. 无线激光通信中的多光束发射技术研究[J]. 光电工程, 2012, 39(7): 1-7.
- KE X ZH, CHEN J, PEI G Q. Multiple-beam transmission techniques for wireless laser communication[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(7): 1-7.
- [14] NAVIDPOUR S M, UYSAL M. Performance bounds for correlated turbulent free-space optical channels [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006: 1944-1948.
- [15] 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.
- [16] CHAKRABORTY K, DEY S, FRANCESCHETTI M. Outage capacity of MIMO poisson fading channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(11): 4887-4907.
- [17] YANG G, KHALIGHI M A, GHASSEMLOOY Z. Performance evaluation of correlated fading space diversity FSO links [C]. Optical Wireless Communications (IWOW), 2013: 71-73.
- [18] NAVIDPOUR S M, UYSAL M, JING LI. Analysis of coded wireless optical communications under correlated gamma-gamma channels [C]. Vehicular Technology Conference, 2004: 827-831.
- [19] YANG G, KHALIGHI M A, GHASSEMLOOY Z. Performance analysis of space-diversity free-space optical systems over the correlated Gamma-Gamma fading channel using Padé approximation method [J]. IET Communications, 2014, 8(13): 2246-2255.
- [20] KIM I I. Scintillation reduction using multiple transmitters[C]. SPIE, 1997: 102-113.
- [21] WILSON S G, BRANDT-PEARCE M, CAO Q. Optical MIMO transmission with Q-ary PPM for atmosphere channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 53(8): 1090-1094.
- [22] MUIRHEAD R J. Aspects of Multivariate Statistical Theory[M]. New York: John Wiley, 1982: 79-112.

作者简介



王雪,1991 年出生,现为兰州理工大学在读硕士研究生,主要从事无线光通信 MIMO 技术方面的研究。

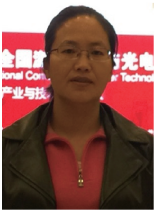
E-mail: wxue91012@163.com

Wang Xue was born in 1991. And she is a M. Sc. candidate in Lanzhou University of Technology now. Her main research interest includes MIMO technology of wireless optical communication.

王惠琴,1972 年出生,博士现为兰州理工大学教授,主要从事无线光通信理论与技术方面的研究工作。

E-mail: whq1222@lut.cn

Wang Huiqin was born in 1972. And now, she is a professor in Lanzhou University



of Technology. Her main research interests include theory and technology of wireless optical communication.



曹明华,1979 年出生,现为兰州理工大学副教授,主要从事光无线通信理论与技术方面的研究。

E-mail: caominghua@lut.cn

Cao Minghua was born in 1979. And now, he is an associate professor in Lanzhou University of Technology. His main research interests include theory and technology of wireless optical communication.