

文章编号 1004-924X(2016)09-2142-07

## 相关信道中光多输入多输出系统的误码率

王惠琴\*, 王 雪, 曹明华

(兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 多输入多输出(MIMO)技术可以在不额外增加频谱资源和发射功率的条件下成倍提高通信系统的信道容量, 但子信道间存在的空间相关性会影响光 MIMO 无线通信系统(OWC)的性能。本文研究了对数衰落信道中空间相关性对光 MIMO 系统误码率的影响。针对脉冲位置调制(PPM)方式, 采用指数相关模型推导出了光 MIMO 通信系统在不同相关机制下的对数振幅衰落系数矩阵和最大似然检测准则。然后, 采用 Wilkinson 近似方法推导出了该条件下光 MIMO 系统误码率的上界。最后, 利用仿真实验进一步分析了空间相关性对 OWC MIMO 系统误码率的影响。结果表明: 空间相关性的存在使得 OWC MIMO 系统的性能恶化, 且随着收发天线数量的增加, 空间相关性会导致系统误码率恶化加剧。因此在实际工程应用中要合理放置天线, 尽量减小天线之间的相关性, 以便更好地发挥 MIMO 系统的优势。

**关键词:** 光通信; 多输入多输出; 误码率; 空间相关性; 脉冲位置调制

**中图分类号:** TN929.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162409.2142

### Bit error rate of optical multiple input multiple output system in correlated channel

WANG Hui-qin\*, WANG Xue, CAO Ming-hua

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

\* Corresponding author, E-mail: 15117024169@139.com

**Abstract:** Multiple Input Multiple Output (MIMO) systems can improve the channel capability of an Optical Wireless Communication(OWC) system without adding extra frequency resources and emitting powers, but the space correlation between the channels will impact the system performance. This paper researches the effects of space correlation on the Bit Error Rate (BER) of an optical MIMO system in log-normal fading channel. In view of the Pulse Position Modulation (PPM), the log-amplitude fading matrix in different correlation mechanisms and maximum likelihood detection rule were derived by using an exponential correlation model in the log-normal fading channel. On the basis of this, the upper bound of the BER of correlated OWC MIMO system was deduced by adopting Wilkinson method. Finally, the impact of space correlation on BER of the OWC MIMO system was analyzed further. The results show that space correlation deteriorates the performance of OWC MIMO system and the BER of the system will be worsen by the space correction with the increase of the number of the antenna. It suggests that antennas should be placed reasonably to reduce the space

收稿日期: 2016-05-29; 修订日期: 2016-06-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61465007, No. 61265003); 兰州理工大学博士基金资助项目(No. 14-0232)

correction between the antennas, so to better play the advantages of MIMO systems.

**Key words:** optical communication; multiple-input multiple-output system; spatial correlation; pulse position modulation

## 1 引言

光无线通信(Optical Wireless Communication, OWC)具有传输效率高、通信容量大、保密性强、无需频率许可等优点,被认为是解决“最后一公里”瓶颈问题切实可行的方案。光信号在大气中传输时容易受到外界环境的影响,大气对光信号的吸收、散射以及湍流等作用会限制传输距离及增大系统误码率<sup>[1-2]</sup>。而出于对人眼安全角度的考虑,激光器的输出功率不宜过高,因此自由空间光通信的发展和应用受到了极大的制约<sup>[3]</sup>。

光多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术可以在不额外增加频谱资源和发射功率的条件下成倍提高通信系统的信道容量<sup>[4]</sup>,因此受到格外的重视。近年来,国内外MIMO技术在OWC通信系统中的应用研究越来越多。文献[4-5]研究了在已知收发端信道状态信息的条件下,泊松信道中光MIMO系统的信道容量。该研究基于理想的信道假设,即各子信道均服从独立同分布的衰落特性。而文献[6]的研究表明,信道独立的假设过于理想化,脱离了实际。在实际环境中,衰落的影响以及天线间距的有限性致使各光束间存在一定的相关性。Angulita等<sup>[7]</sup>指出多发射光束链路抑制光强闪烁的能力依赖于各光束的空间相关性,而空间相关性和发射器的间距、接收器天线及湍流条件等因素有关。肖帅芳等研究了空间相关性对室内可见光MIMO信道的影响,并建立了发送与接收空间相关性和空间距离参数间的关系<sup>[8]</sup>。Ozbilgin等基于Rytov理论研究了孔径尺寸对信道相关性的影响,估计了平面波及球面波在不同波长、不同湍流条件下的相关长度<sup>[9]</sup>。沈红等推导了弱起伏条件下空间分集接收信道相关系数的表达式,给出了信道相关系数与分集接收闪烁的关系<sup>[10]</sup>。这些研究成果指出了光MIMO系统中空间相关性的存在,以及其影响因素。针对开关键控(On-Off Keying, OOK)调制,文献[11-12]研究了空间相关性对光MIMO系统误码率性能的影响。在相同条

件下,Chakraborty等研究了光MIMO系统在相关衰落信道中的中断概率,结果表明相关性的存在会使衰落信道的中断概率性能恶化<sup>[13]</sup>。

另一方面,相对于OOK调制而言,脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)具有较高的功率利用率,且受到外界噪声和多径发散的影响较小<sup>[14-16]</sup>,因此,文献[17]针对PPM调制研究了不同衰落信道下光MIMO通信系统的传输性能。文献[18]推导了强湍流下OWC MIMO系统误码率的封闭解形式。但上述文献均未考虑空间相关性的影响。本文针对PPM调制方式,建立了Possion机制下相关OWC MIMO系统的信道模型,并推导了相关对数正态衰落信道中的最大似然检测准则以及误码率上界。

## 2 信道模型

对于 $M \times N$ 的光MIMO系统,即采用 $M$ 个激光器, $N$ 个光电探测器。设系统总能量 $E_s$ 不变,则每个激光器上的平均能量为 $E_s/M$ 。采用 $Q$ 进制脉冲位置调制,当字符等概率发送时,每个字符表示的信息为 $\log_2 Q$ 比特。设字符周期为 $T_s$ ,则每时隙长度 $T = T_s/Q$ 。假定信道为平坦慢衰落信道,且探测器检测到的光子数服从泊松计数模型,则第 $n(n = 1, 2, \dots, N)$ 个探测器接收到的信号 $\mathbf{y}^{(n)}$ 为:

$$\mathbf{y}^{(n)} = \frac{n_s}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{x}^{(m)} a_{nm}^2 + n_b \mathbf{n}_0, \quad (1)$$

式中: $n_s = \frac{\eta P_r T}{hf} = \frac{\eta E_s}{hf}$ ,表示无衰落时接收到光子的平均数量, $\eta$ 表示光电转换效率, $h$ 表示普朗克常数, $f$ 表示光载波频率, $P_r$ 表示每个探测器上的平均接收功率; $\mathbf{x}^{(m)}$ 表示第 $m(m = 1, 2, \dots, M)$ 个激光器上发送的信号; $\mathbf{n}_0$ 为噪声向量; $n_b = \frac{\eta E_b}{hf}$ ,表示噪声所产生的平均计数速率, $E_b$ 表示每个探测器上的噪声能量, $a_{nm}^2$ 表示第 $m$ 个激光器到第 $n$ 个探测器上的光强衰减系数。其中, $\mathbf{x}^{(m)}$ ,  $\mathbf{y}^{(n)}$ 和 $\mathbf{n}_0$ 均为 $1 \times Q$ 的行向量。

本文采用常规描述,即“on”时隙表示 1,“off”时隙表示 0,探测器上的信号  $\mathbf{y}^{(m)}$  由“on”和“off”时隙组成。设  $\lambda_{\text{on},n}$  为“on”时隙上的光子计数,  $\lambda_{\text{off}}$  为“off”时隙上的平均光子计数,则有:

$$\begin{cases} \lambda_{\text{on},n} = \frac{\eta E_s}{hfM} \sum_m a_{nm}^2 + \frac{\eta E_b}{hf}, n = 1, \dots, N \\ \lambda_{\text{off}} = \frac{\eta E_b}{hf} \end{cases} \quad (2)$$

在弱湍流信道中,单光束近似服从 Lognormal 分布<sup>[19]</sup>;在强湍流信道中,若传输距离、接收孔径和发射器之间距离满足一定条件,随着光束数目的增加,信道衰落趋于对数正态分布<sup>[20]</sup>。在对数正态分布中,光信号的幅度  $a$  可表示为  $a = \exp(b)$ 。式中,  $b$  表示均值为  $\mu_b$ 、方差为  $\sigma_b^2$  的正态变量,则其概率分布为:

$$f(a) = \frac{1}{(2\pi\sigma_b^2)^{1/2} a} \exp\left\{-\frac{\ln a - \mu_b}{2\sigma_b^2}\right\} \quad (3)$$

对衰落强度进行归一化,即  $E[a^2] = 1$ , 则  $\mu_b = -\sigma_b^2$ 。在该分布中,也可采用闪烁指数来表示衰落的大小,闪烁指数定义为:

$$S. I. = \frac{E[a^4]}{E^2[a^2]} - 1 = \exp(4\sigma_b^2) - 1, \quad (4)$$

典型  $S. I. \in [0.4 \sim 1.0]$ <sup>[21]</sup>。

根据 Taylor 冻结湍流大气的假设,如果探测器间的距离  $D_r$  满足条件  $\sqrt{\lambda l} \leq D_r \leq l\theta$ , 其中,  $\theta$  是光束的发散角,  $\lambda$  是波长,  $l$  是传输距离,则各探测器接收的信号是相互独立的;反之,信号之间存在相关性。如果各个激光器以及探测器之间的间隔足够大,则光 MIMO 系统中各支路可以认为是互相独立的,此时将矩阵  $\mathbf{S} = (s_{mn})_{NM}$  作为对数振幅衰落矩阵,  $s_{mn}$  表示第  $m$  个激光器到第  $n$  个探测器上的光强对数振幅衰落系数。当各支路之间存在相关性时,可通过对  $\mathbf{S}$  分别左乘和右乘收发两端的相关矩阵来获得相关信道中对数振幅衰落矩阵  $\mathbf{G}$ :

$$\mathbf{G} = \mathbf{R}_r \mathbf{S} \mathbf{R}_t = (g_{mn})_{NM} \quad (5)$$

其中:  $g_{mn} = 2 \ln a_{mn}$ ,  $\mathbf{R}_r$  为  $N \times N$  维空间接收相关矩阵,  $\mathbf{R}_t$  为  $M \times M$  维发送相关矩阵。  $\mathbf{G}$  中第  $c$  列  $g_c$  表示第  $c$  个激光器与各探测器之间的对数振幅衰落系数,第  $r$  行  $g_r$  表示各激光器与第  $r$  个探测器之间的对数振幅衰落系数。因此收发端相关矩阵分别为:

$$\mathbf{R}_r = E\{\mathbf{G}\mathbf{G}^H\} = \sum_{c=1}^M E\{g_c g_c^H\}, \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_t = E\{(\mathbf{G}^H \mathbf{G})^T\} = \sum_{r=1}^N E\{g_r^H g_r\}^T. \quad (7)$$

不同的两对天线经历衰落间的相关性等于对应的发送天线相关与接收天线相关之积<sup>[22]</sup>,可表示为  $\mathbf{R} = \mathbf{R}_t \otimes \mathbf{R}_r$ ,  $\otimes$  表示矩阵的 Kronecker 乘积。同时假设发送端和接收端的相关系数矩阵均采用指数相关模型<sup>[23]</sup>:

$$\mathbf{R}_t = \{r_{ij}\}_{i,j=1,\dots,M} = \{r_t^{|i-j|}\}_{i,j=1,\dots,M}, \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_r = \{r_{ij}\}_{i,j=1,\dots,N} = \{r_r^{|i-j|}\}_{i,j=1,\dots,N}, \quad (9)$$

其中:  $r_t, r_r$  分别表示发送端和接收端的相关系数,且  $|r_t| < 1, |r_r| < 1$ 。根据信道相关的程度,可将相关信道分为不相关、部分相关和完全相关 3 种情况来讨论。

### 2.1 不相关

这种情况下,  $\mathbf{R}_t = I_{M \times M}, \mathbf{R}_r = I_{N \times N}$ , 此时:

$$\mathbf{G} = \mathbf{S} = (s_{mn})_{NM}, \quad (10)$$

其中:  $s_{mn}$  服从均值为  $-0.5 \ln(1 + S. I.)$ 、方差为  $\ln(1 + S. I.)$  的正态分布。

### 2.2 部分相关

部分相关可分为仅发送端相关和仅接收端相关两种情况。当仅发送端相关时,有  $\mathbf{R}_t \neq I_{M \times M}, \mathbf{R}_r = I_{N \times N}$ , 由式(5)可得:

$$\mathbf{G} = \mathbf{S} \mathbf{R}_t = (g_{mn})_{NM}. \quad (11)$$

当仅接收端相关时,有  $\mathbf{R}_t = I_{M \times M}, \mathbf{R}_r \neq I_{N \times N}$ , 由式(5)可得:

$$\mathbf{G} = \mathbf{R}_r \mathbf{S} = (g_{mn})_{NM}. \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可见,两种情况下的对数振幅衰落矩阵  $\mathbf{G}$  具有相同的形式。由矩阵  $\mathbf{R}_t$  或  $\mathbf{R}_r$  的对称性及正态分布的性质可得,  $g_{mn}$  仍服从正态分布,且均值为  $-0.5 \ln(1 + S. I.) \cdot \left\{\frac{1-r^B}{1-r}\right\}$ , 方差为  $\ln(1 + S. I.) \cdot \left\{\frac{1-r^{2B}}{1-r^2}\right\}$ , 其中  $r \in \{r_t, r_r\}, B \in \{M, N\}$ 。由此可见,均值和方差不仅与闪烁系数  $S. I.$  有关,还与相关系数  $r$  和相关端的天线数  $B$  有关。同时,其均值随着相关系数的增大而减小,方差随相关系数的增大而增大,这说明相关性的存在导致光强起伏增大。在相同的闪烁下,对于收发天线数相等的系统而言,部分相关情况下的光强起伏具有相同的特性。

### 2.3 完全相关

完全相关是指收发两端都相关,此时  $\mathbf{R}_t \neq I_{M \times M}, \mathbf{R}_r \neq I_{N \times N}$ , 相关对数振幅衰落系数矩阵为:

$$\mathbf{G} = \mathbf{R}_r \mathbf{S} \mathbf{R}_t = (g_{mn})_{NM}. \quad (13)$$

根据矩阵  $\mathbf{R}_i$  和  $\mathbf{R}_r$  的对称性以及正态分布的性质可知,  $g_{mn}$  服从均值为  $-0.5 \ln(1 + S. I.) \cdot \left( \frac{1-r_t^M}{1-r_t} \right) \cdot \left( \frac{1-r_r^N}{1-r_r} \right)$ , 方差为  $\ln(1 + S. I.) \cdot \left( \frac{1-r_t^{2M}}{1-r_t^2} \right) \cdot \left( \frac{1-r_r^{2N}}{1-r_r^2} \right)$  的正态分布。显然, 对数光强起伏的均值和方差受到  $S. I.$ ,  $r_t$ ,  $r_r$ ,  $M$ ,  $N$  的影响, 而且其均值和方差受相关系数的影响增大, 说明此时的光强起伏较部分相关时更严重。

$$\hat{X}_i = \arg \max_{X_i} f(\mathbf{Z} | X_i) = \arg \max_{X_i} \prod_n \left[ \frac{\exp(-\lambda_{on,n})(\lambda_{on,n})^{z_{ni}}}{z_{ni}!} \prod_{q \in Q_{off}^{(i)}} \frac{\exp(-\lambda_{off})(\lambda_{off})^{z_{nq}}}{z_{nq}!} \right]. \quad (14)$$

由于  $z_{ni}!$ ,  $\exp(-\lambda_{on,n})$ ,  $\exp(-\lambda_{off})$  对于  $X_i$  来说是常量, 消除式(14)中的常量及与  $X_i$  无关的项并取对数得到:

$$\hat{X}_i = \arg \max_{X_i} \sum_n \left[ z_{ni} \ln(\lambda_{on,n}) + \sum_{q \in Q_{off}^{(i)}} z_{nq} \ln(\lambda_{off}) \right] = \arg \max_{X_i} \sum_n \left[ z_{ni} \ln \left( \frac{\lambda_{on,n}}{\lambda_{off}} \right) \right]. \quad (15)$$

将式(2)代入式(15)可得:

$$\hat{X}_i = \arg \max_{X_i} \sum_{n=1}^N z_{ni} \ln \left[ \frac{\frac{n_s}{M} \sum_{m=1}^M a_{nm}^2 + n_b}{n_b} \right]. \quad (16)$$

检测时, 将所有检测器上检测到的光子数加权和最大的时隙判决为“on”时隙; 否则, 判为“off”时隙。假设本文在接收端采用等增益合并(Equal Gain Combination, EGC)技术, 即:

$$z_q = \sum_{n=1}^N z_{nq}, q = 1, 2, \dots, Q. \quad (17)$$

$$P_{s|A} \leq 1 - P[\text{all } z_q < z_1 | \text{slot } 1, A] \leq 1 - P[z_2 < z_1 | \text{slot } 1, A]^{Q-1} \leq 1 - \left[ \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{i-1} P(z_1 = i, z_2 = j | \text{slot } 1, A) \right]^{Q-1} \leq 1 - \left[ \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{i-1} \frac{\left[ \left( \frac{n_s}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{N=1}^N a_{nm}^2 \right) + N n_b \right]^i e^{-\left( \frac{n_s}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{N=1}^N a_{nm}^2 + N n_b \right)}}{i!} \times \frac{[N n_b]^j e^{-N n_b}}{j!} \right]^{Q-1}. \quad (19)$$

由式(19)可见, 条件误符号率依赖于衰落变量  $a_{nm}^2$ , 对  $a_{nm}^2$  求统计平均可以得到系统的误符号率  $P_s$  的上界, 即:

$$P_s = \int_{-\infty}^{\infty} P_{s|A} \cdot f(a) da.$$

但直接对  $a_{nm}^2$  ( $n=1, \dots, N; m=1, \dots, M$ ) 求统计平均需计算  $MN$  重积分, 计算过程十分复杂且运算量较大。依据文献[24]可知, 相关对数正态变量之和可以近似为另一个对数正态变量, 从而可以对和式  $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{nm}^2$  进行近似。本文采用文

### 3 相关光 MIMO 系统的误码率

#### 3.1 最大似然检测

假设  $z_{ni}$  为第  $n$  个探测器在  $q$  时隙上的光子计数, 则  $\mathbf{Z} = \{ z_{ni}, n=1, 2, \dots, N, q=1, 2, \dots, Q \}$  表示接收观测集合, 可以将它看作  $N \times Q$  的整数矩阵。设接收端采用最大似然估计准则, 发送端发送  $X_i$  时的估计值  $\hat{X}_i$  可表示为:

#### 3.2 误码率

依据式(16)中描述的最大似然检测准则, 设时隙 1 为“on”时隙, 若检测到其他任意时隙的光子数  $z_q$  ( $q=2, \dots, Q$ ) 大于时隙 1 处检测到的光子数  $z_1$ , 则出现误判,  $z_1$  服从参数为  $\left( \left( \frac{n_s}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{N=1}^N a_{nm}^2 \right) + N n_b \right)$  的泊松分布,  $z_q$  服从参数为  $N n_b$  的泊松分布。则正确判决的概率为:

$$P_{\text{correct}|A} = P[\text{all } z_q < z_1] = (P[z_2 < z_1])^{Q-1}. \quad (18)$$

从而可以得到条件误符号率的上界:

献[24]中的 Wilkinson 近似方法对式(19)中的和式  $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{nm}^2$  进行近似。令:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} e^{\xi_1} & e^{\xi_2} & \dots & e^{\xi_M} \\ e^{\xi_{M+1}} & e^{\xi_{M+2}} & \dots & e^{\xi_{2M}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{\xi_{(N-1)M+1}} & e^{\xi_{(N-1)M+2}} & \dots & e^{\xi_{NM}} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$L = e^{\xi_1} + e^{\xi_2} + \dots + e^{\xi_{NM}} \cong e^Z. \quad (21)$$

这里  $Z$  服从正态分布, 假设其均值和方差分别为  $m_z, \sigma_z^2$ , 则  $L$  的一阶距和二阶距分别为:

$$u_1 = E[L] = e^{m_z + \sigma_z^2/2} = \sum_{i=1}^{NM} e^{m_{g_i} + \sigma_{g_i}^2/2}, \quad (22)$$

$$u_2 = E[L^2] = e^{2m_z + 2\sigma_z^2} = \sum_{i=1}^{NM} E[(e^{g_i})^2] + 2 \sum_{i=1}^{NM-1} \sum_{j=i+1}^{NM} E[e^{g_i + g_j}] = \sum_{i=1}^{NM} e^{2m_{g_i} + 2\sigma_{g_i}^2} + 2 \sum_{i=1}^{NM-1} \sum_{j=i+1}^{NM} \{e^{m_{g_i} + m_{g_j}} \cdot e^{\frac{1}{2}(\sigma_{g_i}^2 + \sigma_{g_j}^2 + 2\rho_{ij}\sigma_{g_i}\sigma_{g_j})}\}, \quad (23)$$

$$P_s \leq 1 - \int_0^\infty \left[ \sum_{i=0}^\infty \sum_{j=0}^{i-1} \frac{\left[\frac{n_s L}{M} + Nn_b\right]^i e^{-(\frac{n_s L}{M} + Nn_b)}}{i!} \times \frac{[Nn_b]^j e^{-Nn_b}}{j!} \right]^{Q-1} \cdot f(L) dL, \quad (25)$$

依据  $P_b = ((Q/2)/(Q-1)) P_s$ , 可得到误码率的上界为:

$$P_b \leq \frac{Q}{2(Q-1)} - \frac{Q}{2(Q-1)} \cdot \int_0^\infty \left[ \sum_{i=1}^\infty \sum_{j=0}^{i-1} \frac{\left[\frac{n_s L}{M} + Nn_b\right]^i e^{-(\frac{n_s L}{M} + Nn_b)}}{i!} \times \frac{[Nn_b]^j e^{-Nn_b}}{j!} \right]^{Q-1} \cdot f(L) dL. \quad (26)$$

由式(26)可得, 误码率上界与时隙数  $Q$ 、激光器数  $M$ 、探测器数  $N$ 、总能量  $E_s$ 、噪声能量  $E_b$  以及信道衰落系数和的近似值  $L$  等有关, 而  $L$  又与激光器数  $M$ 、探测器数  $N$  和信道相关系数有关。

### 4 仿真分析

为了进一步分析相关性对 OWC MIMO 系统性能的影响, 假设接收端已知信道状态信息且系统总功率不变, 采用蒙特卡洛方法对相关光 MIMO 系统的误码性能进行仿真分析, 并与独立信道下的误码性能进行对比。仿真参数为:  $\eta=0.5, S. I. = 0.6, Q=4, \lambda=1550 \text{ nm}, E_b = -170 \text{ dB}$ 。其结果如图 1~图 3 所示。

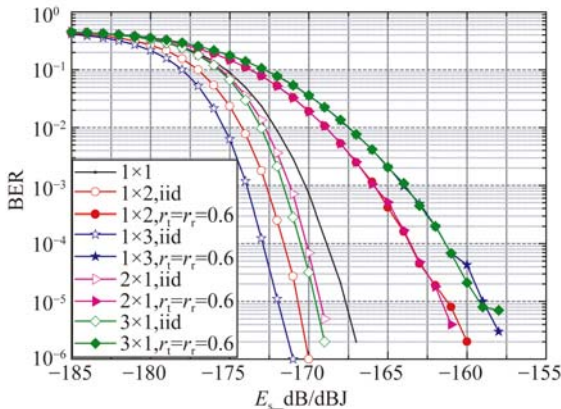


图 1 不同分集系统的误码率曲线

Fig. 1 BER curves for different diversity systems

图 1 为信道独立和信道相关时 MIMO 系统的误码率曲线, 此时相关系数为 0.6。由图 1 可

其中  $\rho_{ij}$  表示  $g_i$  与  $g_j$  之间的相关系数。解式(22)和式(23)可得  $m_z = 2\ln u_1 - \frac{1}{2}\ln u_2, \sigma_z^2 = \ln u_2 - 2\ln u_1$ 。则  $L$  的概率密度函数为:

$$f(L) = \frac{1}{(2\pi\sigma_z^2)^{\frac{1}{2}} L} \exp\left[-\frac{\ln L - m_z}{2\sigma_z^2}\right]. \quad (24)$$

从而可将误符号率  $P_s$  的上界化简为:

$$P_s \leq 1 - \int_0^\infty \left[ \sum_{i=0}^\infty \sum_{j=0}^{i-1} \frac{\left[\frac{n_s L}{M} + Nn_b\right]^i e^{-(\frac{n_s L}{M} + Nn_b)}}{i!} \times \frac{[Nn_b]^j e^{-Nn_b}}{j!} \right]^{Q-1} \cdot f(L) dL, \quad (25)$$

率的上界为:

$$P_b \leq \frac{Q}{2(Q-1)} - \frac{Q}{2(Q-1)} \cdot \int_0^\infty \left[ \sum_{i=1}^\infty \sum_{j=0}^{i-1} \frac{\left[\frac{n_s L}{M} + Nn_b\right]^i e^{-(\frac{n_s L}{M} + Nn_b)}}{i!} \times \frac{[Nn_b]^j e^{-Nn_b}}{j!} \right]^{Q-1} \cdot f(L) dL. \quad (26)$$

见:(1)随着天线数量的增加, 不同子信道间的空间相关性增大, 致使系统的误码率明显增加。此时,  $1 \times 3, 3 \times 1$  系统的误码率大于  $1 \times 2$  和  $2 \times 1$  系统。(2)信道独立时, 接收分集比发送分集更具有优势。但在相关信道中, 由于相关性的影响, 二者误码率曲线几乎重合, 说明二者具有几乎相同的误码性能。

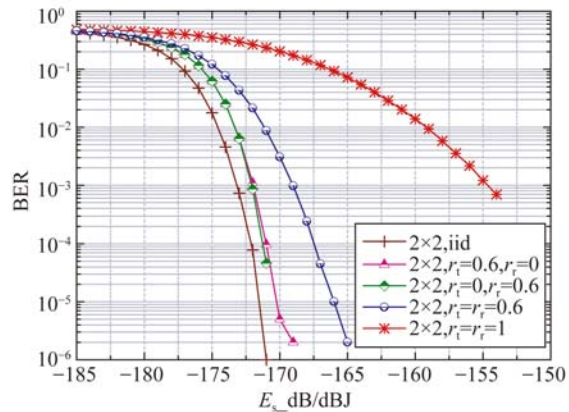


图 2 不同相关机制下的误码率曲线

Fig. 2 BER curves for different correlation mechanisms

图 2 为不同相关机制下  $2 \times 2$  系统的误码率随  $E_s$  的变化曲线, 此时相关系数为 0.6。由图 2 可见:(1)在光 MIMO 系统中, 相关性的存在使得系统误码率明显增大;(2)发端相关和收端相关两种情况下的曲线基本重合。这说明在收发天线数相等的系统中, 由于两种部分相关时的光强起伏具有相同的特性, 其误码率特性也相同。(3)完全相关对误码率的影响较部分相关时更为严重。

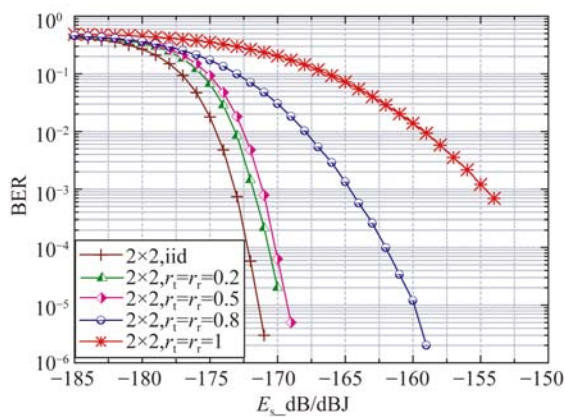


图 3 信道完全相关,不同相关系数下  $2 \times 2$  的误码率曲线  
Fig. 3 BER curves under different correlation coefficients in perfect correlation channel

图 3 为信道完全相关时,在不同相关系数下  $2 \times 2$  系统的误码率随  $E_s$  的变化曲线。由图 3 可得:误码率随着相关系数的增大而增大,且误码率增大的幅度也是随着相关系数的增大而明显变大。当  $P_b = 10^{-4}$  时,相对于信道独立时的系统而

#### 参考文献:

- [1] KARIM M, NASIRI-KENARI I M. Outage analysis of relay-assisted free-space optical communications [J]. *IET Communications*, 2010, 4 (12): 1423-1432.
- [2] SAFARI M, UYSAL M. Cooperative diversity over log-normal fading channels: performance analysis and optimization [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(5): 1963-1972.
- [3] FARID A A, HRANILOVI S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(7): 1702-1710.
- [4] CHAKRABORTY K. Capacity of the MIMO optical fading channel [C]. *Information Theory, 2005 ISIT 2005 Proceedings International Symposium*, 2005: 530-534.
- [5] 王惠琴,曹明华,陈海燕,等. 无背景噪声下 PPM 调制时光 MIMO 的信道容量分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306003-1  
WANG H Q, CAO M H, CHEN H Y, et al.. Channel capacity of optical multiple input multiple output system without background noise [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306003-1. (in Chinese)

言,相关系数分别为 0.2, 0.5 和 0.8 的系统所需要的能量分别增加了约 1.7, 2.3 和 10 dBJ。当相关系数取最大值 1 时,误码率达到最大,相当于该系统下误码率的上界。

## 5 结 论

光 MIMO 技术可以在不额外增加频谱资源和发射功率的条件下成倍提高通信系统的信道容量,但是子信道间存在的空间相关性会导致光 MIMO 系统性能的恶化。本文结合 PPM 调制,针对指数相关模型推导出了不同相关情况下的对数振幅衰落系数矩阵,并依据最大似然检测准则推导了相关光 MIMO 系统误码率的上界。结果表明:相关性的存在使得 OWC MIMO 系统的误码率增大。所以,在实际工程应用中要合理放置天线,尽量减小天线之间的相关性,从而使光 MIMO 系统的优势得到更好的发挥。

- [6] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. *Laser Beam Propagation Through Random Media* [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [7] ANGUIAJ 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.
- [8] 肖帅芳,黄开枝,钟州,等. 室内可见光 MIMO 信道的空间相关性分析[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36 (9): 2117-2123.  
XIAO SH F, HANG K ZH, ZHONG ZH, et al.. Spatial correlation analysis of MIMO channel in indoor visible light communication [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36 (9): 2117-2123. (in Chinese)
- [9] OZBILGIN T, KOCA M. Inter-aperture correlation in MIMO free space optical systems [J]. *Optics Communications*, 2015, 353: 139-146.
- [10] 沈红,范承玉. 信道相关对空间分集接收信号闪烁的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44 (8): 2523-2527.  
SHEN H, FAN CH Y. Influence of channel correlation on the signal scintillation with spatial diversity receiver [J]. *Infrared and Laser Engi-*

- neering, 2015, 44(8): 2523-2527. (in Chinese)
- [11] ZHU X M, KAHN J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(8):1293-1300.
- [12] NAVIDPOURS 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] KAUSHIK C, SUBHRAKANTI D, MASSIMO F. Outage capacity of MIMO poisson fading channels [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(11): 4887-4907.
- [14] GAGLIARDI, KARP S. M-ary poisson detection and optical communications [J]. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 1969, 17(2): 208-216.
- [15] CHAN H H, STERCKX K L, ELMIRGHANI J M H. *et al.*. Performance of optical wireless OOK and PPM systems under the constraints of ambient noise and multipath dispersion [J]. *IEEE Communications Magazine*, 1998, 36(12): 83-87.
- [16] WU N, WANG X, DAI H. Performance of indoor visible light systems using OOK and PPM modulations under multipath channels [C]. *Optical Wireless Communications(IWOW)*, 2013 2nd International Workshop on, 2013:84-88.
- [17] WILSONS G, BRANDT-PEARCE M, CAO Q, *et al.*. Free-space optical MIMO transmission with Q-ary PPM [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 53: 1402-1412.
- [18] TSIFTSIST A, SANDALIDIS H G, KARAGIANNIDIS G K, *et al.*. FSO links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels [J]. 2008 *IEEE International Conference on Communications*, 2008: 5379-5384.
- [19] CHURNSIDE J H, CLIFFORD S F. Log-normal Rician probability density function of optical scintillations in the turbulent atmosphere [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, 4(10):1923-1930.
- [20] KIM I I, HAKAKHA H, ADHIKARI P. Scintillation reduction using multiple transmitters [J]. *SPIE*, 1997, 2990: 102-113.
- [21] WILSONS G, BRANDT-PEARCE M, CAO Q, *et al.*. Optical repetition MIMO transmission with multipulse PPM [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23: 1901-1910.
- [22] 罗涛, 乐光新. 多天线无线通信原理与应用[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2005:63-64.
- LUO T, LE G X. *Principle and Application of Multi-antenna Wireless Communication* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 2005:63-64. (in Chinese)
- [23] CRISTOFF M, BJORN O. Asymptotic eigenvalue distributions and capacity for MIMO channels under correlated fading [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004,3(4):1350-1359.
- [24] ABU-DAYYA A A, BEAULIEU N C. Outage probabilities in the presence of correlated lognormal interferers [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1994, 43(1):164-173.

#### 作者简介:



王惠琴(1971—),女,甘肃渭源人,教授,硕士生导师,2012年于西安理工大学获得博士学位,主要从事无线光通信理论与技术方面的研究。E-mail: 15117024169@139.com



王雪(1991—),女,甘肃景泰人,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

(版权所有 未经许可 不得转载)