

# 相关信道下无线光多输入多输出系统的平均容量

王惠琴<sup>1</sup> 王 雪<sup>1</sup> 孙剑锋<sup>2</sup> 曹明华<sup>1</sup>

<sup>1</sup>兰州理工大学计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050

<sup>2</sup>中国移动通信集团甘肃有限公司省网络管理中心, 甘肃 兰州 730050

**摘要** 大气信道中,信道衰落以及天线间距的限制导致无线光多输入多输出(MIMO)系统的各光束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。基于脉冲位置调制(PPM)建立了相关信道下无线光 MIMO 系统的信道模型,并采用 Wilkinson 方法推导出对数正态衰落时无线光 MIMO 系统的平均信道容量。模拟结果表明:空间相关性的存在降低了系统的平均信道容量,而且随着总能量的增大,相关性带来的容量损失也增大。在完全相关信道中,发送端相关对信道容量产生的影响比接收端相关的影响更为严重。

**关键词** 光通信;多输入多输出;脉冲位置调制;空间相关性;信道容量

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0706003

## Average Capacity of Wireless Optical Multiple Input Multiple Output System with Spatial Correlation

Wang Huiqin<sup>1</sup> Wang Xue<sup>1</sup> Sun Jianfeng<sup>2</sup> Cao Minghua<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

<sup>2</sup> Provincial Network Management Center, China Mobile Group Gansu Company Limited, Lanzhou, Gansu 730050, China

**Abstract** In the atmospheric channel, the spatial correlation among the beams of wireless optical multiple input multiple output (MIMO) system caused by the antenna spacing and the channel fading can seriously affect the wireless optical communication system performance. We proposed a channel model for the correlative wireless optical MIMO channel based on the pulse position modulation (PPM), and the average channel capacity in lognormal fading channel is derived by using the Wilkinson method. The simulation results indicate that the average channel capacity is decreased due to the spatial correlation, and the effect is enhanced with the growth of the total energy. In addition, in a completely correlative channel, the impact of transmitter correlation on the channel capacity is more obvious than that of the receiver correlation.

**Key words** optical communications; multiple input multiple output; pulse position modulation; spatial correlation; channel capacity

**OCIS codes** 060.4510; 060.5060; 010.1330

## 1 引 言

在不额外增加频谱资源和发射功率的条件下,多输入多输出(MIMO)技术可以成倍提高通信系统的信道容量,因此常被引入到无线光通信系统中以提高系统性能<sup>[1-3]</sup>。目前,有关无线光 MIMO 技术的研究成果较多,其中,Wilson 等<sup>[4]</sup>研究了基于 Q 进制脉冲位置调制(QPPM)的无线光 MIMO 系统的误码率和信道容量,Luong 等<sup>[5]</sup>基于开关键控(OOK)调制方式,研究了对数正态衰落信道中的平均信道容量。大部分研究都假设各发射天线和接收天线上的信号是不相关的,即各子信道均服从独立同分布的衰落特性。但 Andrews 等<sup>[6]</sup>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。针对这一问题,

**收稿日期:** 2016-01-22; **收到修改稿日期:** 2016-03-07

**基金项目:** 国家自然科学基金(61465007,61265003)、兰州理工大学博士基金(14-0232)

**作者简介:** 王惠琴(1972—),女,博士,教授,主要从事无线光通信理论与技术方面的研究。E-mail: whq1222@lut.cn

2007年 Anguita 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空间相关性的尺寸,其与发射器间距、接收器天线及湍流条件等因素有关。陈志晓<sup>[8]</sup>研究了单输入多输出(SIMO)系统的信道相关性,得到了信道相关系数的理论模型以及不同湍流条件下信道相关长度的近似表达式。另外,肖帅芳等<sup>[9]</sup>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。这些研究成果指出了光 MIMO 系统中空间相关性的存在性,以及影响其大小的可能因素。然而,空间相关性的存在也会对通信系统的性能产生影响,有关这方面的研究已经引起人们的注意。Zhu 等<sup>[10]</sup>指出了空间相关性对光 MIMO 系统误码率性能的影响。后来,Chakraborty 等<sup>[11]</sup>研究了光 MIMO 系统在相关 Poisson 衰落信道中的中断概率。其研究结果表明,在相关衰落信道中,相关性的存在使得衰落信道的中断性能恶化。衰落信道中相关性除了会影响系统误码率外,也会影响系统的信道容量。而目前有关空间相关性对无线光 MIMO 系统性能影响的研究还处于初步探索阶段,所涉及的理论还不够健全和完善。

在无线光通信中,通常采用光强调制/直接检测(IM/DD)技术,典型的调制方式主要是 OOK 调制和脉冲位置调制(PPM)。OOK 是一种容易实现的调制方式,但这种调制方式传输效率较低,无法满足高速率的传输要求。与 OOK 调制相比,PPM 的光功率利用率更高,能够满足高速率通信的需求,且受外界噪声和多径发散的影响较小,因此,研究 PPM 下无线光 MIMO 系统的性能尤为重要。本文针对大气衰落信道,结合 PPM,研究了信道相关性对无线光 MIMO 系统信道容量的影响。

## 2 相关条件下光 MIMO 的信道模型

在  $M \times N$  光 MIMO 系统中( $M$  表示激光器的数目, $N$  表示探测器数目),分析的假设条件如下:

- 1) 系统总能量  $E_s$  不变,每个激光器上的平均能量为  $E_s/M$ ;
- 2) 采用 QPPM,当字符等概率发送时,每个字符表示的信息为  $\log_2 Q$  比特;
- 3) 设字符周期为  $T_s$ ,每时隙长度为  $T = T_s/Q$ ;
- 4) 背景光已被滤波器滤除,接收端仅考虑散弹噪声;
- 5) 接收端接收的光子数服从泊松计数模型;
- 6) 信道参数在一个字符周期上是不变的,即信道为平坦慢衰落信道。

根据 Taylor 冻结湍流大气的假设,如果探测器间距  $D_r$  满足条件  $\sqrt{\lambda l} \leq D_r \leq l\theta$ ,则各接收天线上接收的信号是相互独立的,其中  $\theta$  为光束的发散角, $\lambda$  为波长, $l$  为传输距离。反之,信号之间存在相关性。如果各个发射器以及接收天线之间的间隔足够大,则光 MIMO 信道各个支路可以认为是互相独立的。此时,第  $n$  ( $n=1,2,\dots,N$ ) 个探测器上接收到的信号  $\mathbf{y}^{(n)}$  可表示为<sup>[12]</sup>

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

式中  $n_s = \frac{\eta P_r T}{hf} = \frac{\eta E_s}{hf}$  为无衰落时接收到光子的平均数量, $\eta$  为光电转换效率, $h$  为普朗克常数, $f$  为光载波的频率, $P_r$  为每个探测器上的平均接收功率; $\mathbf{x}^{(m)}$  为第  $m$  ( $m=1,2,\dots,M$ ) 个激光器上发送的信号; $\mathbf{n}_0$  为噪声向量, $n_b = \frac{\eta P_b T}{hf}$  为噪声所产生的平均计数速率, $P_b$  为一个探测器上的平均噪声功率, $\mathbf{x}^{(m)}$ 、 $\mathbf{y}^{(n)}$  和  $\mathbf{n}_0$  均为  $1 \times Q$  的行向量。 $\alpha_{nm}^2$  表示第  $m$  个激光器到第  $n$  个探测器上的光强衰减系数。对单光束而言,在弱湍流信道中其近似服从 Lognormal 分布<sup>[13]</sup>。对于多光束而言,即使在强湍流信道,随着光束数目的增加其将趋于对数正态分布<sup>[14]</sup>。在对数正态分布中,路径幅度增益  $a$  可表示为  $a = \exp b$ ,其中  $b$  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

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

对衰落强度进行归一化,即  $E[a^2] = 1$  ( $E[*]$  表示取平均值),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

$$x_{s.l} = \frac{E[a^4]}{E^2[a^2]} - 1 = \exp(4\sigma_b^2) - 1, \quad (3)$$

其典型值为  $x_{s.l} \in [0.4 \sim 1.0]$ <sup>[15]</sup>。由归一化衰落强度得  $\mu_b = -0.5 \ln(1 + x_{s.l})$ ,  $\sigma_b^2 = \ln(1 + x_{s.l})$ 。

实际情况下,衰落的影响以及天线间距的限制使得信号间存在一定的相关性。第  $n$  个探测器上接收到的信号  $\mathbf{y}^{(n)}$  仍可表示为(1)式的形式,即

$$\mathbf{y}^{(n)} = \frac{n_s}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{x}^{(m)} q_{nm} + n_b \mathbf{n}_0, \quad (4)$$

式中引入  $q_{nm}$  表示受到相关性影响的光强衰减系数。将矩阵  $\mathbf{S} = (s_{nm})_{NM}$  用作信道独立时光强衰减系数的对数矩阵,其中  $s_{nm} = \ln(\alpha_{nm}^2)$ ,则可以通过对  $\mathbf{S}$  分别左乘和右乘收发两端的相关矩阵来获得相关信道中光强衰减系数的对数矩阵:

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

式中  $g_{nm} = \ln q_{nm}$ ,  $\mathbf{R}_r$  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  $c$  个发送天线与各接收天线之间的信道衰落系数,第  $r$  行  $g_r$  表示各发送天线与第  $r$  个接收天线之间的信道衰落系数,因此收发阵列相关矩阵可以分别表示为

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

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

不同的两对天线经历的衰落之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>[16]</sup>,可表示为  $\mathbf{R} = \mathbf{R}_t \otimes \mathbf{R}_r$ ,  $\otimes$  表示矩阵的克罗内克乘积。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>[17]</sup>

$$\mathbf{R}_t = \begin{pmatrix} 1 & r_t & r_t^2 & \cdots & r_t^{M-1} \\ r_t & 1 & r_t & \cdots & r_t^{M-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_t^{M-1} & r_t^{M-2} & r_t^{M-3} & \cdots & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_r = \begin{pmatrix} 1 & r_r & r_r^2 & \cdots & r_r^{N-1} \\ r_r & 1 & r_r & \cdots & r_r^{N-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_r^{N-1} & r_r^{N-2} & r_r^{N-3} & \cdots & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中  $|r_t| < 1$ ,  $|r_r| < 1$ 。根据信道相关的程度,可将相关信道分为三种情况讨论:

#### 1) 不相关

这种情况下,  $\mathbf{R}_t = \mathbf{I}_{M \times M}$ ,  $\mathbf{R}_r = \mathbf{I}_{N \times N}$ , 即  $r_t = 0$ ,  $r_r = 0$ , 式中  $\mathbf{I}$  为  $N \times N$  的单位矩阵, 此时

$$\mathbf{G} = \mathbf{S} = (s_{nm})_{NM}, \quad (9)$$

式中  $s_{nm}$  服从均值为  $-0.5 \ln(1 + x_{s.l})$ , 方差为  $\ln(1 + x_{s.l})$  的正态分布。

#### 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。

##### A. 仅发送端相关

此时,  $\mathbf{R}_t \neq \mathbf{I}_{M \times M}$ ,  $\mathbf{R}_r = \mathbf{I}_{N \times N}$ , 即  $r_t \neq 0$ ,  $r_r = 0$ , (5)式可写为

$$\mathbf{G} = \mathbf{S} \mathbf{R}_t = (g_{nm})_{NM}, \quad (10)$$

由矩阵  $\mathbf{R}_t$  的对称性及正态分布的性质,可得  $g_{nm}$  仍服从正态分布,且均值为  $-0.5 \ln(1 + x_{s.l}) \cdot \left(\frac{1 - r_t^M}{1 - r_t}\right)$ , 方差为  $\ln(1 + x_{s.l}) \cdot \left(\frac{1 - r_t^{2M}}{1 - r_t^2}\right)$ 。由此可见,均值和方差不仅与闪烁系数  $x_{s.l}$  有关,而且还与相关系数  $r_t$ 、发送天线数  $M$  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。

##### B. 仅接收端相关

此时,  $\mathbf{R}_t = \mathbf{I}_{M \times M}$ ,  $\mathbf{R}_r \neq \mathbf{I}_{N \times N}$ , 即  $r_t = 0$ ,  $r_r \neq 0$ , (5)式可写为

$$\mathbf{G} = \mathbf{R}_r \mathbf{S} = (g_{nm})_{NM}, \quad (11)$$

同理,  $g_{nm}$  仍服从正态分布, 且均值为  $-0.5\ln(1+x_{s,l}) \cdot \left(\frac{1-r_r^N}{1-r_r}\right)$ , 方差为  $\ln(1+x_{s,l}) \cdot \left(\frac{1-r_r^{2N}}{1-r_r^2}\right)$ , 其形式与仅发送端相关的情况类似。在闪烁系数不变的情况下, 当  $r_r=r_t, M=N$  时, 仅接收端相关与仅发送端相关对光强起伏所产生的影响是相同的。

### 3) 完全相关

完全相关是指收发两端都相关, 这时  $\mathbf{R}_t \neq \mathbf{I}_{M \times M}, \mathbf{R}_r \neq \mathbf{I}_{N \times N}$ , 即  $r_t \neq 0, r_r \neq 0$ , 相关对数光强衰减系数矩阵由(5)式给出。根据矩阵  $\mathbf{R}_t$  和  $\mathbf{R}_r$  的对称性以及正态分布的性质可知,  $g_{nm}$  仍服从正态分布, 其均值为  $-0.5\ln(1+x_{s,l}) \cdot \left(\frac{1-r_t^M}{1-r_t}\right) \cdot \left(\frac{1-r_r^N}{1-r_r}\right)$ , 方差为  $\ln(1+x_{s,l}) \cdot \left(\frac{1-r_t^{2M}}{1-r_t^2}\right) \cdot \left(\frac{1-r_r^{2N}}{1-r_r^2}\right)$ 。显然,  $x_{s,l}, r_r, r_t, M$  和  $N$  共同影响完全相关时对数光强起伏的均值和方差, 而且其均值和方差受相关系数的影响越大, 说明此时光强起伏较部分相关时更严重。

## 3 相关条件下的信道容量

根据(4)式的信道模型, 光 MIMO 系统的信道容量可定义为

$$C = \max_{p(\mathbf{x})} I(\mathbf{x}; \mathbf{y}), \quad (12)$$

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

$$I(\mathbf{x}; \mathbf{y}) = H(\mathbf{y}) - H(\mathbf{y} | \mathbf{x}), \quad (13)$$

式中  $H(\mathbf{y})$  为接收信号矢量  $\mathbf{y}$  的熵,  $H(\mathbf{y} | \mathbf{x})$  为在给定发送信号为  $\mathbf{x}$  的条件下接收到信号为  $\mathbf{y}$  的条件熵。在背景光不存在的情况下, PPM 时光 MIMO 系统的瞬时信道容量为

$$C = 1bQ \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\eta E_s \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{nm}}{hfM}\right) \right]. \quad (14)$$

在实际衰落环境中, 由于信道衰落系数具有随机性, 所以信道容量也是一个随机变量, 因此, 通常采用平均信道容量来衡量衰落信道中的系统容量。光 MIMO 系统的平均信道容量  $C_{\text{avg}}$  是对瞬时信道容量关于信道参数  $q_{nm}$  求统计平均, 因此, 信道相关时的平均信道容量可表示为

$$C_{\text{avg}} = E[C] = \underbrace{\int_0^\infty \cdots \int_0^\infty}_{MN} f(q_{nm}) 1bQ \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\eta E_s \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{nm}}{hfM}\right) \right] \underbrace{dq_{11} \cdots dq_{NM}}_{MN}. \quad (15)$$

由(15)式可见, 要得到相关系统的平均信道容量需进行  $MN$  重积分运算, 计算较为复杂。依据文献[18]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  $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{nm}$  进行近似。采用文献[18]中的 Wilkinson 近似方法, 对(14)式中的  $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{nm}$  进行近似。

$$\text{令 } \mathbf{H} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1M} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{N1} & q_{N2} & \cdots & q_{NM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \exp(g_1) & \exp(g_2) & \cdots & \exp(g_M) \\ \exp(g_{M+1}) & \exp(g_{M+2}) & \cdots & \exp(g_{2M}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \exp[g_{(N-1)M+1}] & \exp[g_{(N-1)M+2}] & \cdots & \exp(g_{NM}) \end{pmatrix}, L = \exp(g_1) +$$

$\exp(g_2) + \cdots + \exp(g_{NM}) \cong \exp(Z)$ , 这里  $Z$  服从正态分布。假设其均值和方差分别表示为  $m_z, \sigma_z^2$ , 则  $L$  的一阶矩和二阶矩分别表示为

$$E(L) = E[\exp(Z)] = E[\exp(g_1) + \exp(g_2) + \cdots + \exp(g_{NM})] = \exp(m_z + \sigma_z^2/2) = \sum_{i=1}^{NM} \exp(m_{g_i} + \sigma_{g_i}^2/2) = u_1, \quad (16)$$

$$E[L^2] = E\{[\exp(Z)]^2\} = E\{[\exp(g_1) + \exp(g_2) + \cdots + \exp(g_{NM})]^2\} = \exp(2m_z + 2\sigma_z^2) = \sum_{i=1}^{NM} E\{[\exp(g_i)]^2\} + 2 \sum_{i=1}^{NM-1} \sum_{j=i+1}^{NM} E[\exp(g_i + g_j)] =$$

$$\sum_{i=1}^{NM} \exp(2m_{g_i} + 2\sigma_{g_i}^2) + 2 \sum_{i=1}^{NM-1} \sum_{j=i+1}^{NM} \left\{ \exp(m_{g_i} + m_{g_j}) \cdot \exp\left[\frac{1}{2}(\sigma_{g_i}^2 + \sigma_{g_j}^2 + 2\rho_{ij}\sigma_{g_i}\sigma_{g_j})\right] \right\} = u_2, \quad (17)$$

式中  $\rho_{ij}$  表示  $g_i$  与  $g_j$  之间的相关系数,  $m_{g_i}$ 、 $\sigma_{g_i}^2$  分别表示  $g_i$  的均值和方差。解(16)、(17)式,可得

$$\begin{cases} m_z = 2\ln u_1 - \frac{1}{2}\ln u_2, \\ \sigma_z^2 = \ln u_2 - 2\ln u_1 \end{cases}, \quad (18)$$

则  $L$  的概率密度函数为

$$f(L) = \frac{1}{(2\pi\sigma_z^2)^{\frac{1}{2}}L} \exp\left(-\frac{\ln L - m_z}{2\sigma_z^2}\right), \quad (19)$$

信道相关时系统的平均信道容量为

$$C_{\text{avg}} = \int_0^{\infty} f(L) 1\text{b} Q \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\eta E_s L}{hfM}\right)\right] dL, \quad (20)$$

因  $Q$  与  $L$  无关, (20)式可化简为

$$C_{\text{avg}} = 1\text{b} Q - 1\text{b} Q \cdot \int_0^{\infty} f(L) \exp\left(-\frac{\eta E_s L}{hfM}\right) dL. \quad (21)$$

由(21)式可见,此时的平均信道容量与时隙数  $Q$ 、发送天线数  $M$ 、总能量  $E_s$ 、光电转换效率  $\eta$  以及信道衰落参数之和的近似值  $L$  有关,而  $L$  又与发送天线数  $M$ 、接收天线数  $N$  以及相关系数  $r$  有关。

由上述分析可知:仅一端相关时,相关系数  $r$  越大,则光强起伏越大,导致平均容量减小。当收发两端都相关时,平均容量与相关系数  $r_t$ 、 $r_r$ 、发送天线数  $M$  以及接收天线数  $N$  有关。与部分相关相比较,在各参数不变的情况下,完全相关时信道容量的减小量更大。

#### 4 仿真分析

在总能量受限的情况下,利用蒙特卡罗方法对相关光 MIMO 系统的平均信道容量进行仿真分析,模拟中参量为  $\eta=0.5$ ,  $x_{s,i}=0.6$ ,  $Q=8$ ,  $\lambda=1550$  nm。

图 1 为信道部分相关时  $4 \times 4$  MIMO 系统的  $C_{\text{avg}}$  随  $E_s$  变化的曲线。由图 1 可见:

- 1) 相关信道下,平均容量随着系统能量  $E_s$  的增加而增大,但是当  $E_s$  达到某一门限值时,平均信道容量将达到饱和,不再随系统能量的增加而增大;
- 2) 随着系统能量  $E_s$  的增加,由相关性所引起的容量损失也增大;
- 3) 相关信道下,容量达到饱和的门限值随着相关系数的增大而增大。在  $4 \times 4$  系统中,当相关系数分别为 0, 0.3, 0.8 时,其门限值分别为  $-187.5$  dB,  $-186$  dB,  $-180$  dB;
- 4) 信道平均容量随着相关系数的减小逐渐增大,信道独立时平均容量达到最大值;

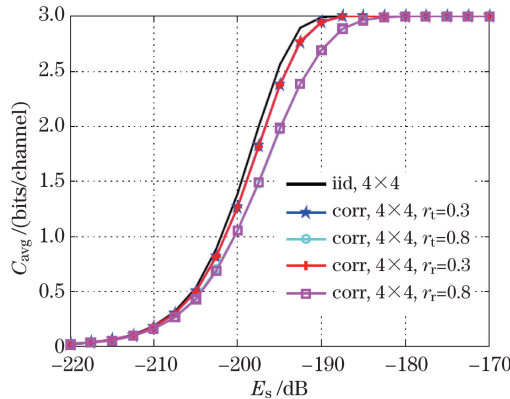


图 1 信道部分相关时的平均信道容量

Fig. 1 Average channel capacity at partial correlation



5)当相关系数相同,收发天线数相等,接收端与发送端两者仅有一端相关时,平均容量曲线重合。这说明,在相关系数相同,收发天线数相等的条件下,仅一端相关对平均信道容量产生的影响是相同的。

图 2 为收发两端都相关时,4×4 系统的  $C_{avg}$  随  $E_s$  的变化曲线。图 2 所反映的规律与图 1 极为相似,它们的主要区别在于:

1)平均信道容量受到相关性的影响更大,此时随着相关性的增加系统容量的损失增大。当  $E_s = -190$  dB时,较独立信道而言,相关系数为 0.8 时系统的信道容量减小了约 1.2 bits/channel;

2)平均容量达到饱和值所需要的门限值不同。在 4×4 系统中,当相关系数分别为 0,0.3,0.8 时,门限值分别为 -187.5 dB, -185 dB, -170 dB。与图 1 中完全相关时达到饱和时的门限值相比较,该门限值分别增加了 0 dB,1 dB,10 dB。

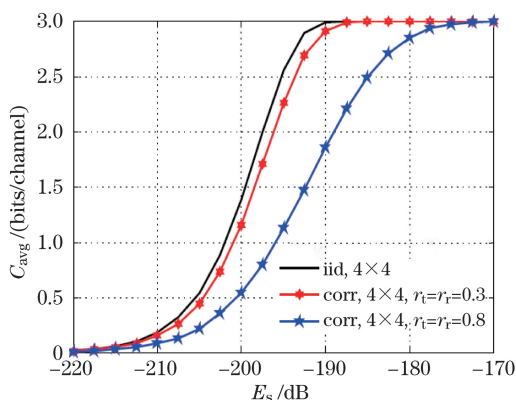


图 2 信道完全相关时的平均信道容量

Fig. 2 Average channel capacity at perfect correlation

图 3 为发送分集数和相关系数均不同时  $C_{avg}$  随  $E_s$  的变化曲线。由图 3 可见,随着发送天线数  $M$  的增加平均信道容量虽然略有增加(此结论文献[12]已得到),但相关性的存在会引起信道容量的减小。当相关系数取值较小时,增加发送天线数的优势更为突出;当相关系数取值较大时,增加发送天线数会引起系统相关性的增大,而此时相关性增大所引起的弊端将大于天线数量增加所带来的好处,反而会使系统的平均信道容量减小。这说明,当信道相关性较强时,增加发送分集所带来的信道容量的增加不足以克服信道相关性所造成的信道容量的损失。因此,在实际相关信道条件下,发送分集数不宜太大。

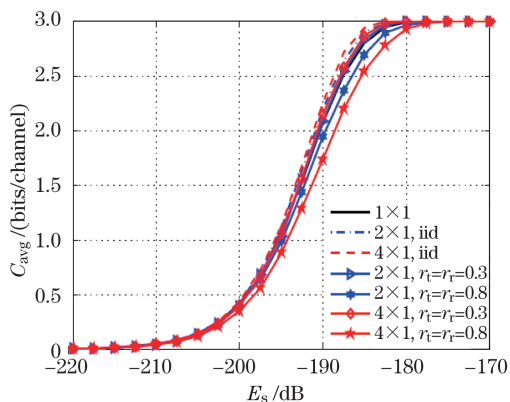


图 3 不同发送分集时相关性对信道平均容量的影响

Fig. 3 Impact of correlation on average channel capacity at different transmission diversity

与图 3 类似,图 4 为接收分集数和相关系数均不同时  $C_{avg}$  随  $E_s$  的变化曲线。图 4 的结果表明:平均信道容量随着接收天线数  $N$  的增加而明显增大,然而随着相关系数的增加,天线数所带来的平均信道容量的增加量会逐渐减小。这说明在相关性较强的信道中,接收分集所带来的信道容量的增加能够克服信道相关性所带来的信道容量的减小。从图 3 和图 4 的结果来看,接收分集具有更好地抵御信道相关性的能力。

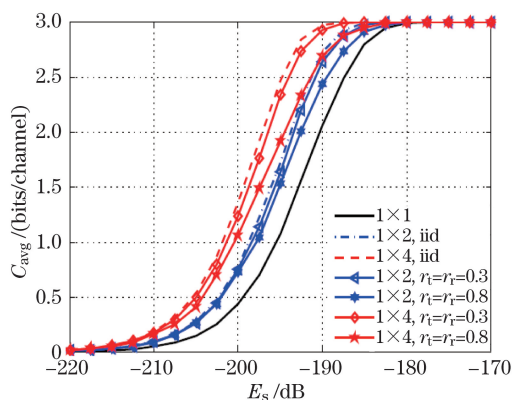


图 4 不同接收分集时相关性对信道平均容量的影响

Fig. 4 Impact of correlation on average channel capacity at different reception diversity

图 5 为采用不同收发天线数和不同信道相关系数时  $C_{\text{avg}}$  随  $E_s$  的变化曲线。由图 5 可见：

1) 当天线数一定时, 信道平均容量随相关系数的增大而减小。在强相关信道下, 分集带来的信道容量的增加有可能不足以克服信道相关性所导致的信道容量的减小, 即在强相关信道下, 无线光 MIMO 系统的信道容量有可能低于 SISO 系统的信道容量;

2) 当相关系数一定时, 平均信道容量随接收天线数目  $N$  的增加而明显增加, 但发送天线数目  $M$  对平均容量的影响较为复杂。具体来讲, 平均信道容量随着  $M$  的增加而略有增加, 但随着相关系数的增大, 由  $M$  的增加所带来的平均信道容量的增加不足以抵抗相关性所导致的信道容量的减小。例如, 在相关系数为 0.8 时,  $4 \times 4$  系统的平均信道容量反而低于  $2 \times 4$  系统, 甚至低于  $2 \times 2$  系统。由此可见, 在强相关信道下, 接收分集所带来的信道容量的增加明显大于发送分集所带来的好处。

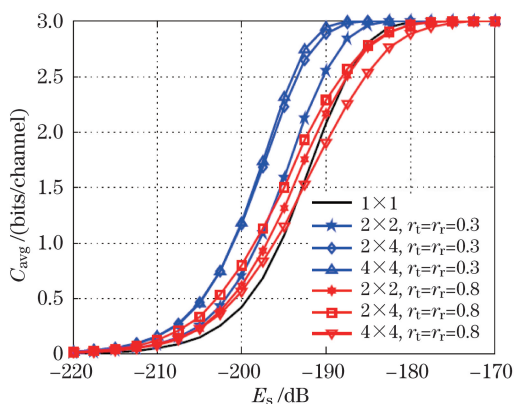


图 5 不同收发天线时相关性对信道平均容量的影响

Fig. 5 Impact of correlation on average channel capacity with different transmission and reception antennas

图 6 为时隙数  $Q$  不同时  $C_{\text{avg}}$  随  $E_s$  的变化曲线。由图 6 可见：

1) 平均信道容量随系统能量  $E_s$  的增加而增加, 但当  $E_s$  大于门限值时, 平均容量达到饱和值, 不再随系统能量的增大而增加;

2)  $Q$  值越大, 平均信道容量达到饱和值的速率越快, 且其饱和值也越大;

3) 对于任意时隙, 相关信道下的信道容量小于独立信道下的信道容量。

## 5 结 论

在实际通信环境中, 无线光 MIMO 系统的各信道之间往往难以保证相互独立, 子信道之间的相关性会严重影响无线光通信系统的性能。本文研究了对数正态衰落信道下相关性对信道容量的影响。结合 PPM, 建立了无线光 MIMO 系统的相关信道模型, 在此基础上, 推导了该模型下无线光 MIMO 系统平均信道容量的表达式, 并通过仿真实验进行了分析。结果表明:

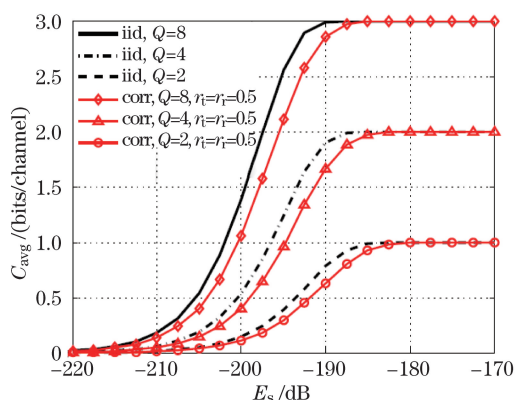


图 6 不同时隙数时相关性对信道平均容量的影响

Fig. 6 Impact of correlation on average channel capacity with different number of slots

1) 空间相关性的存在会引起信道容量的减小,而且随着系统能量  $E_s$  的增加,由相关性所引起的容量损失也会增大;

2) 在部分相关信道中,当相关系数相同、收发天线数相等时,接收端与发送端两者仅有一端相关对平均信道容量产生的影响是相同的;

3) 在相关信道中,当相关系数取值较小时,增加发送天线数优势明显;但相关系数取值较大时,增加发送天线数反而会使系统的平均信道容量减小;

4) 在完全相关信道中,由增加接收分集数所带来的好处要明显大于由增加发送分集数所带来的好处。这就说明信道相关性的存在会严重影响光 MIMO 技术通过增加分集增益所带来的优势,而且这种影响还会随着信道相关性的增加而变大。所以,在实际工程应用中,要合理地放置天线,并根据信道相关性的合理确定光 MIMO 技术的分集数。

## 参 考 文 献

- 1 Bayaki E, Schober R, Mallik R K. Performance analysis of MIMO free-space optical systems in Gamma-Gamma fading [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(11): 3415-3424.
- 2 Xu Jianwu, Wang Hongxing, Hu Hao, *et al.*. Encoding and decoding method of orthogonal space time block code in free space optical communication systems [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0105004.  
徐建武, 王红星, 胡昊, 等. 大气无线光通信系统中一种正交空时分组码编译方法 [J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0105004.
- 3 Ke Xizheng, Liu Mei. 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.
- 4 Wilson S G, Brandt-Pearce M, Cao Q, *et al.*. Free-space optical MIMO transmission with Q-ary PPM [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(8): 1402-1412.
- 5 Luong D A, Thang T C, Pham A T. Average capacity of MIMO/FSO systems with equal gain combining over log-normal channels [C]. International Conference on Ubiquitous and Future Network (ICUFN), 2013: 306-309.
- 6 Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- 7 Anguita 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.
- 8 Chen Zhixiao. Research on scintillation suppression techniques for free-space optical communications [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013: 101-116.  
陈志晓. 自由空间光通信中光强闪烁抑制的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013: 101-116.
- 9 Xiao Shuaifang, Huang Kaizhi, Zhong Zhou, *et al.*. Spatial correlation analysis of MIMO channel in indoor visible light communication [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(9): 2117-2123.  
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.



- 10 Zhu X M, Kahn J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(8): 1293-1300.
- 11 Chakraborty K, Dey S, Franceschetti M. Outage capacity of MIMO Poisson fading channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(11): 4887-4907.
- 12 Wang Huiqin, Cao Minghua, Chen Haiyan, *et al.*. Channel capacity of optical multiple input multiple output system without background noise[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306003.  
王惠琴, 曹明华, 陈海燕, 等. 无背景噪声时光多输入多输出系统的信道容量[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306003.
- 13 Churnside J H, Clifford S F. Log-normal Rician probability density function of optical scintillations in the turbulent atmosphere[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(10): 1923-1930.
- 14 Kim I I, Hakakha H, Adhikari P, *et al.*. Scintillation reduction using multiple transmitters[C]. SPIE, 1997, 2990: 102-113.
- 15 Wilson S G, Brandt-Pearce M, Cao Q. Optical repetition MIMO transmission with multipulse PPM[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(9): 1901-1910.
- 16 Luo Tao, Le Guangxin. Principle and application of multi-antenna wireless communication [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 2005: 63-64.  
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.
- 17 Martin C, Ottersten B. Asymptotic eigenvalue distributions and capacity for MIMO channels under correlated fading[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(4): 1350-1359.
- 18 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.