

空间调制无线光多输入多输出通信系统中 自适应功率分配算法

黄爱萍^{1,2}, 陶林伟^{1*}

¹西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072;

²西北工业大学深圳研究院, 陕西 西安 710072

摘要 在空间调制(SM)无线光多输入多输出(MIMO)通信(SM-OMIMO)系统中,为了在调制方法固定的条件下使系统的传输容量最大化,提出了一种新型自适应功率分配算法(PAA)。新算法采用蒙特卡罗模拟过程选择与具体信噪比(SNR)相对应的最优化功率分配系数。建立了室内通信环境模型,推导了 SM-OMIMO 系统的离散输入连续输出无记忆信道(DCMC)容量表达式;分析了新算法的分配原则及过程,并仿真研究了其系统性能,比较了不同发射接收阵组合条件下,各分配算法对系统 DCMC 容量增益的影响。仿真结果表明,低 SNR 条件下采用自适应 PAA 的系统 DCMC 容量明显高于传统的固定因子分配算法和均匀分配算法,在高 SNR 条件下更易达到 DCMC 容量饱和值,该结果可清晰表明信道的分集特征。因此,采用自适应 PAA 是提高 SM-OMIMO 系统传输速率的有效途径。

关键词 光通信; 多输入多输出通信系统; 自适应功率分配算法; 离散输入连续输出无记忆信道

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1006001

Adaptive Power Allocation Algorithm for Wireless Optical Multiple Input Multiple Output Communication System with Spatial Modulation

Huang Aiping^{1,2}, Tao Linwei¹

¹School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

²Research & Development Institute in Shenzhen, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

Abstract In order to maximize the discrete-input continuous-output memoryless channel (DCMC) transmission capacity under certain restriction of modulation scheme in wireless optical multiple input multiple output (MIMO) communication (SM-OMIMO) system with spatial modulation (SM), a novel adaptive power allocation algorithm (PAA) is proposed by the Monte Carlo simulation process. Power allocation coefficients are optimized adaptively for any signal noise ratio (SNR). A model of indoor communication environment is built, and DCMC capacity expression of SM-OMIMO is derived. The distribution principle and procedures of the algorithm are analyzed. Performance of the system is simulated. The effects of several allocation algorithms on DCMC capacity are compared under different combinations of transmits and receivers. Simulation results indicate that, under the condition of low SNR, the system DCMC capacity of system obtained by the proposed adaptive PAA is larger than that obtained by PAA with fixed factor and average PAA, and the proposed PAA is easier to achieve saturation value of DCMC capacity under the condition of high SNR. The results clearly demonstrate the diversity characteristics of the channel. Therefore, the adaptive PAA is capable of improving the transmission rate of SM-OMIMO system.

Key words optical communications; multiple input multiple output communication system; adaptive power

收稿日期: 2017-03-31; 收到修改稿日期: 2017-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(61404362)、深圳市基础研究基金(JCYJ20170306152455554)、中央高校基础研究基金(3102016ZY005)

作者简介: 黄爱萍(1984—),女,博士,讲师,主要从事无线光通信系统的关键技术方面的研究。

E-mail: appleagz1@163.com

* 通信联系人。E-mail: hapdoudou@nwpu.edu.cn

1 引 言

无线光通信系统将光作为信息载体进行数据传输,具有频带宽、通信容量大、抗干扰性强等特点,且不与电子设备产生干扰,可应用于家庭和办公室等场合。因此,室内无线光通信技术逐渐受到人们的重视^[1-2]。但广泛应用于无线光通信系统中的 LED 发光器存在调制速率低、非线性干扰强等缺点,严重影响无线光通信系统的传输速率^[3]。

空间调制(SM)无线光多输入多输出(MIMO)通信(SM-OMIMO)系统将 MIMO、数字脉冲调制和 SM 等技术相结合,可同时获得空间增益并发送和接收分集增益,成倍增加原有通信系统的信道容量且不会给系统增加额外的负担,还可以降低光束跟踪高精度的要求。因此,SM-OMIMO 技术成为目前无线光通信中提高传输速率的研究热点^[4-5]。传统的 SM-OMIMO 系统通常采用脉冲调制方法,包括开关键控^[6]和脉冲幅度调制(PAM)^[7]等,即每组信源信息均被转化为激活的发射光源索引号以及相应的发射脉冲功率强度。但由于发射与接收阵布局对称,系统信道相关性高,因此需要增加发射光源和接收探测器的数量才能保证系统的优越性能^[8]。

针对以上问题,目前已提出了一系列修正方法,Popoola 等^[9]研究了重复码下 SM-OMIMO 系统的性能,通过将所有发射光源同时激活以提高系统的传输特性,但信道相关性强,系统性能随着发射器之间距离的增大而急速下降;Mesleh 等^[10]分析了功率均匀分配下 SM-OMIMO 系统的结构和符号组成,但没有优化系统的传输性能;Zhang 等^[11]提出了可见光通信中 SM 正交频复用系统的优化功率分配算法(PAA),但仅分析了包含两个发射光源的简单结构;Fath 等^[12]给出了 4 个发射光源的功率分配因子表达式,但未明确其分配规则;Ishikawa 等^[13]研究了功率非均衡分配下 SM 无线光系统的信道容量,但该文献仅分析了多输入单输出的系统性能。

为了提高传统 SM-OMIMO 系统的传输性能,提出了一种新型自适应 PAA。在建立室内环境模型的基础上,推导了 SM-OMIMO 系统可获得的离散输入连续输出无记忆信道(DCMC)容量表达式;分析了新型自适应 PAA 以及分配原则,并比较了不同发射接收阵组合下系统获得的 DCMC 容量增益,以及不同优化准则对系统 DCMC 容量增益的影响。通过仿真,将所提自适应 PAA 与传统的固定因子 PAA 和平均 PAA 进行了比较分析。

2 无线光通信系统模型

仿真模型为一个典型的小型办公室,如图 1 所示,发射器光源(TX)的固定高度为 2.5 m,其轴线方向竖直朝下;接收光电探测器(RX)安装在办公桌上,高度为 0.75 m,轴线方向竖直朝上。

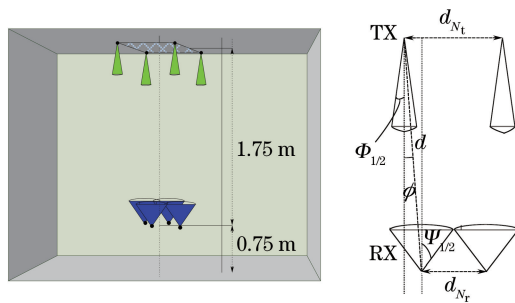


图 1 SM-OMIMO 信道模型

Fig. 1 Model of SM-OMIMO channel

图 1 中 ϕ 为发射光源(接收探测器轴线方向)与发射接收连线之间的角度, d 为发射光源与接收探测器之间的直线距离, $\Phi_{1/2}$ 和 $\Psi_{1/2}$ 分别为光源发散半角和探测器接收视场半角, d_{N_t} 和 d_{N_r} 分别为发射光源和接收探测器之间的距离, N_t 为光源个数, N_r 为探测器个数。系统主要在可视链路中进行通信,各子信道的传

输系数可表示为

$$h_{mn} = \begin{cases} \frac{(\epsilon + 1)S}{2\pi d_{mn}^2} \cos^{\epsilon+1} \Phi_{mn}, & 0 \leq \Phi_{mn} \leq \Psi_{1/2} \\ 0, & \Phi_{mn} > \Psi_{1/2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\epsilon = -\ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2})$, S 为接收器探测区域面积, m 和 n 分别表示发射光源和接收探测器的索引号。因此, 可根据发射光源和接收探测器特定位置以及实际系统参数来计算信道的传输系数, 但当发射光源的发射角大于探测器的接收视场半角时, 接收端将无法接收光信号。

为了便于分析, 假设发射光源和接收探测器均采用对称分布, 它们的中心点处于同一竖直方向, 其分布示意图如表 1 所示。采用 LPAM (L 为 PAM 调制级数, 此处 $L=2$) 的调制方式, 系统的仿真参数为: $d_{N_t} = 0.2 \text{ m}$, $d_{N_r} = 0.1 \text{ m}$, $\Phi_{1/2} = 15^\circ$, $\Psi_{1/2} = 45^\circ$, $S = 10^{-4} \text{ m}^2$ 。

表 1 TX 和 RX 分布示意图

Table 1 Distribution diagrams of TX and RX

Size	1×2	2×2	2×4
TX/RX array			

根据(1)式以及系统仿真参数, 计算得到 $N_t=4, N_r=4$ 的 SM-OMIMO 系统信道增益矩阵为

$$\mathbf{H} \approx 10^{-4} \begin{pmatrix} 1.0704 & 9.9420 & 9.9420 & 9.2140 \\ 9.9420 & 1.0704 & 9.2140 & 9.9420 \\ 9.9420 & 9.2140 & 1.0704 & 9.9420 \\ 9.2140 & 9.9420 & 9.9420 & 1.0704 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

3 SM-OMIMO 系统的 DCMC 容量

采用 PAM 的 SM-OMIMO 系统的发射部分结构如图 2 所示。将长度 $M=M_s+M_D$ 的调制符号分为两部分。 M_s 长度部分的信号由发射器阵进行 SM, 调制结果对应应激活的发射光源索引号, 且在任何时刻都只有一个光源是激活的, 其他光源均空闲; 将 M_D 长度部分的信号送入脉冲调制器进行 LPAM 调制 (L 为调制符号长度, 此处 $L=2^{M_D}$), 调制结果对应发射信号的峰值功率, 将峰值功率乘以每个光源的功率分配系数, 最后由相应的发射光源发射信号。图 2 中 a_1, a_2, a_3, a_4 为功率分配系数, p_1 和 p_2 为发射信号功率。

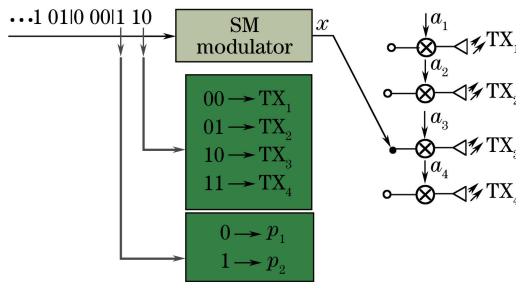


图 2 SM-OMIMO 系统发射器

Fig. 2 Transmitter of SM-OMIMO system

表 2 列举了 SM-OMIMO 系统发射光源 $N_t=4$ 结构中采用的 2PAM 方法和自适应 PAA 的调制信号星座图。可以看出, 除了 PAM 信号, 信源信息还通过发射光源空间位置来编码。因此 SM-OMIMO 系统是否可实现高效率数据传输不仅取决于信号星座图的大小, 还取决于发射光源的个数。

假设每个时隙传输过程中, 信道的状态是稳定的, 则衰减信道可以等价于输入随机的 PAM 调幅功率、输出为连续的 DCMC^[14]。因此, 接收信号向量 $\mathbf{Y} \in \mathbf{R}^{N_r \times 1}$ 可表示为 $\mathbf{Y} = r\mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{n}$, 其中 $\mathbf{H} \in \mathbf{R}^{N_r \times N_t}$, r 为探测器响应, 这里假设 $r=1$, $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_{N_t}]^T$ 为 N_t 个发射光源的发射功率向量, $\mathbf{n} \in \mathbf{R}^{N_r \times 1}$ 为接收电路上

表 2 发射光源在 $N_t=4, 2\text{PAM}$ 和自适应 PAA 下的调制信号参数

Table 2 Modulating signal parameters of transmitted light source with $N_t=4, 2\text{PAM}$ and adaptive PAA

M_D, M_S	m	PAM power		Coefficient	Transmitted signal $\mathbf{X}(t-kT)$
		$P_1^{(k)}$			
0, 00	1	P_1		a_1	$[a_1 P_1 0 0 0]^T$
0, 01	2	P_1		a_2	$[0 a_2 P_1 0 0]^T$
0, 10	3	P_1		a_3	$[0 0 a_3 P_1 0]^T$
0, 11	4	P_1		a_4	$[0 0 0 a_4 P_1]^T$
1, 00	1	P_2		a_1	$[a_1 P_2 0 0 0]^T$
1, 01	2	P_2		a_2	$[0 a_2 P_2 0 0]^T$
1, 10	3	P_2		a_3	$[0 0 a_3 P_2 0]^T$
1, 11	4	P_2		a_4	$[0 0 0 a_4 P_2]^T$

的热噪声和散弹噪声的等效总和,每个接收电路上的噪声独立,且可近似为均值为零、方差为 σ^2 的高斯白噪声。

定义接收端信噪比(SNR) $S_{\text{NR}} = \sum_{n=1}^{N_r} \left(\sum_{m=1}^{N_t} r I h_{nm} \right)^2 / \sigma^2$,其中 I 为 PAM 信号的平均发射光功率。

对于给定的调制信号 $\mathbf{X}^f (f=0,1,\dots,2^M-1)$, N_r 维的接收信号向量 $\mathbf{Y}=(y_1, y_2, \dots, y_{N_r})^T$ 的条件概率分布可表示为

$$p(\mathbf{Y} | \mathbf{X}^f) = \prod_{j=1}^{N_r} p(y_j | \mathbf{X}^f) = \frac{1}{(2\pi\sigma_0^2)^{N_t N_r/2}} \exp\left[-\sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} \frac{(y_{ji} - h_{ji}x_i^f)^2}{2\sigma_0^2}\right], \quad (3)$$

式中 $y_j (j=1,2,\dots,N_r)$ 为第 j 个探测器信号向量。根据文献[14],在 DCMC 信道中, N_r 维 2^M 级调制信号的无线光 MIMO 系统的信道容量为

$$C_{\text{DCMC}} = \max_{p(\mathbf{X}^0), p(\mathbf{X}^1), \dots, p(\mathbf{X}^{2^M-1})} \sum_{f=1}^{2^M} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(\mathbf{Y} | \mathbf{X}^f) p(\mathbf{X}^f) \text{lb} \left[\frac{p(\mathbf{Y} | \mathbf{X}^f)}{\sum_{g=1}^{2^M} p(\mathbf{Y} | \mathbf{X}^g) p(\mathbf{X}^g)} \right] d\mathbf{Y}, \quad (4)$$

式中 $p(\mathbf{X}^f)$ 为发射信号向量为 \mathbf{X}^f 的概率, $p(\mathbf{Y} | \mathbf{X}^f)$ 为发射信号向量为 \mathbf{X}^f 且接收信号为 \mathbf{Y} 的概率。当发射信号等概率分布时,即 $p(\mathbf{X}^f) = 1/2^M$, (4) 式可进一步化简为

$$C_{\text{DCMC}} = M - \frac{1}{2^M} \sum_{f=1}^{2^M} E \left[\text{lb} \sum_{g=1}^{2^M} \exp(\eta^{f,g}) \right], \quad (5)$$

式中 $E[\cdot]$ 表示期望值, $\eta^{f,g} = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} \frac{-(y_{ji} - h_{ji}x_i^f)^2 + (y_{ji} - h_{ji}x_i^g)^2}{2\sigma_0^2}$ 。

4 自适应 PAA

根据 SM 原理,假设 k 时刻待激活的发射器索引号为 $m^{(k)} (1 \leq m^{(k)} \leq N_t)$,发射信号的峰值功率 $p_l^{(k)} = [2I/(L+1)]l, l=1,2,\dots,L$,其中 $L=2^{M_D}$,则任意时刻的 SM 信号可表示为

$$\mathbf{X}(t-kT) = \mathbf{A} \cdot P_l^{(k)} \cdot [\underbrace{0 \dots 0}_1 1 \underbrace{0 \dots 0}_{N_t - m^{(k)}}]^T, \quad (6)$$

式中 T 为 SM 信号的符号长度; $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{N_t \times N_t}$ 为自适应功率参数矩阵,可表示为

$$\mathbf{A} = \text{diag}[a_1, a_2, \dots, a_{N_t}], \quad (7)$$

式中 $\text{diag}[\cdot]$ 表示对角矩阵, $a_m > 0 (m=1,2,\dots,N_t)$ 且相互独立。为了保证总发射功率恒定, \mathbf{A} 中各元素必须满足

$$\sum_{m=1}^{N_t} a_m = 1. \quad (8)$$

自适应 PAA 是为了在给定的 SM-OMIMO 系统几何结构、脉冲调制方法和输出 SNR 条件下得到最大的

系统 DCMC 容量而提出的,其中 \mathbf{A} 中的 N_t 个参数通过蒙特卡罗方法进行优化选择。新型自适应 PAA 的具体步骤为:1) 根据发射光源个数 N_t ,随机产生满足(8)式中限制条件的 \mathbf{A} ,根据给定的脉冲调制方法对信号源信号进行 SM;2) 根据系统的几何布局,计算 DCMC 信道传输衰减矩阵 \mathbf{H} ,根据(5)式并将脉冲调制发射功率 $p_i^{(k)}$ 和 \mathbf{A} 取值代入,计算系统的 DCMC 容量;3) 重复 1)、2) 步骤,得到不同 \mathbf{A} 系数组合下系统的 DCMC 容量;4) 搜索令 DCMC 容量达到最大值的 \mathbf{A} 系数组合,将其作为该 SNR 条件下系统的功率分配系数;5) 重复 1)~4) 步骤,得出不同 SNR 条件下系统的最优功率分配系数矩阵 \mathbf{A} ,并完成相应的星座图。

当 SM-OMIMO 系统采用 4 个发射光源和 4 个接收探测器,则可以得到接收信号的 S_{NR} 为 20 dB 时 \mathbf{A} 的最优化取值为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1.2697 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9391 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2935 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.4977 \end{bmatrix} \quad (9)$$

实际工作时,系统按照不同的信道环境和接收 SNR,可选择相应的 \mathbf{A} ,从而达到最大化信道容量的目的。

5 仿真结果与分析

根据上面的理论分析,对自适应 PAA 的 SM-OMIMO 系统性能进行了数值模拟仿真。图 3 为不同发射光源组合下,自适应功率分配的 SM-OMIMO 系统所得的 DCMC 容量,其中图 3(a)、(b) 分别表示存在 1 个接收探测器和 4 个接收探测器情况。

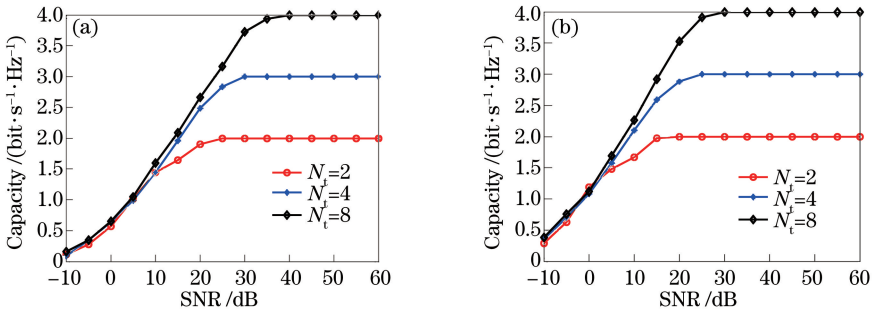


图 3 不同发射光源组合下,自适应 PAA 的 SM-OMIMO 系统 DCMC 容量。(a) $N_r=1$; (b) $N_r=4$
 Fig. 3 DCMC capacities of SM-OMIMO system with adaptive PAA under different combinations of transmitted light sources. (a) $N_r=1$; (b) $N_r=4$

从图中可以看出,DCMC 容量随着发射光源个数的增加明显增大,如 $N_r=1$ 系统中, $N_t=8$ 时可得高 SNR 下 DCMC 饱和容量为 $4 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$,为 $N_t=2$ 时的 2 倍。这也正是 SM-OMIMO 系统的优点之一,与传统的单发单收系统类似,每次仅激活一个发射器进行信号发送,既保证了能量的集中又有效地提高了系统容量。此外,通过比较图 3(a)、(b) 还可以看出,在相同的发射光源条件下,DCMC 容量随着探测器个数的增加更易趋向于饱和值,如 $N_t=4$ 时, $S_{NR} > 30 \text{ dB}$ 条件下 $N_r=1$ 的系统获得 DCMC 饱和容量,但 $S_{NR} > 25 \text{ dB}$ 条件下 $N_r=4$ 系统便可获得 DCMC 饱和容量。

图 4 示出在相同的 S_{NR} 条件下,采用不同功率优化矩阵时所得的 DCMC 容量以及理想的信道容量。假设 $N_t=4$,图 4(a)、(b) 分别表示存在 1 个接收探测器和 4 个接收探测器时 SM-OMIMO 系统的 DCMC 容量。可以看出,在接收探测器较少的情况下($N_r=1$), S_{NR} 为 5 dB、15 dB 的曲线在高 S_{NR} 条件下均出现瓶颈现象。相反,自适应分配曲线保证在任一 S_{NR} 时刻 DCMC 容量达到最大,较其他 3 组曲线更接近于理想信道容量值,且高 S_{NR} 时更容易获得饱和信道容量,能更好地体现系统的分集特性,如 $N_r=4$ 时自适应 PAA 在 $S_{NR}=25 \text{ dB}$ 时达到 DCMC 饱和容量,比 10 dB 优化曲线高约 15 dB。

图 5 比较了采用自适应 PAA 与传统的固定因子 PAA 和平均 PAA 的 DCMC 容量。图 5(a)、(b) 分别表示存在 1 个和 4 个接收探测器时的 DCMC 容量,且固定因子取 $0.3^{[12]}$ 。从图中可以看出,自适应 PAA 明

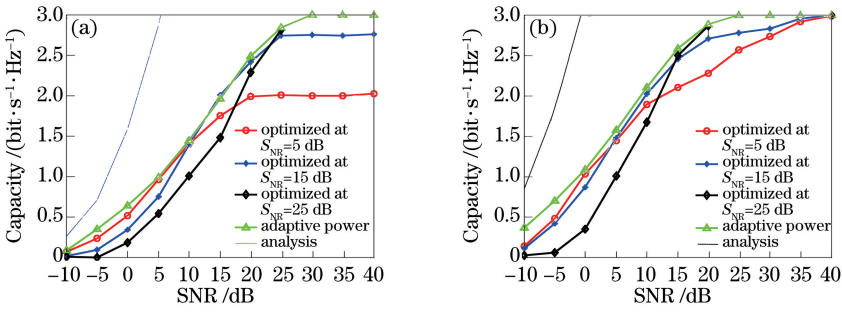


图 4 采用不同功率优化矩阵时 SM-OMIMO 系统的 DCMC 容量。(a) $N_r=1$; (b) $N_r=4$

Fig. 4 DCMC capacity of SM-OMIMO system under different optimized power allocation matrices.

(a) $N_r=1$; (b) $N_r=4$

显优于其他两种算法,当 $S_{NR}=30$ dB 时,自适应算法 DCMC 容量为 $3 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$,分别高于固定因子 PAA 和平均 PAA 约 $2 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 和 $0.8 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。

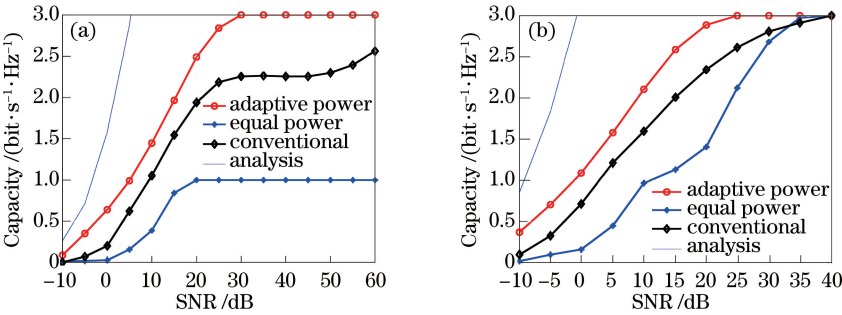


图 5 自适应 PAA、固定因子 PAA 和平均 PAA 下 SM-OMIMO 系统的 DCMC 容量比较。(a) $N_r=1$; (b) $N_r=4$

Fig. 5 Comparison of DCMC capacities of SM-OMIMO system under conditions of adaptive PAA, PAA with fixed factors and average PAA. (a) $N_r=1$; (b) $N_r=4$

此外,在 $N_r=1$ 系统中,采用平均 PAA 时,由于受到高信道相关性的限制,DCMC 容量达到 $1 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 时,不随 S_{NR} 的增大而增大。固定因子 PAA 也无法在中高 S_{NR} 条件下达到 DCMC 饱和信道容量值,如 $S_{NR}=60$ dB 时,DCMC 的信道容量仅约为 2.6 dB。因此,这两种方法均无法较好地体现系统的分集特性。

6 结 论

在脉冲调制方法确定的条件下,为了最大化 SM-OMIMO 系统中的 DCMC 容量,提出了一种新型自适应 PAA。分析了优化算法在实际中的具体应用步骤;在建立模型的基础上,研究了自适应 PAA 与传统 PAA 的系统性能,并与理想信道容量增益进行比较。仿真结果表明,在低 S_{NR} 条件下,系统 DCMC 容量随着发射光源个数和接收探测器个数的增加明显增大,如 $N_r=1$ 系统中, $N_t=8$ 时可得高 S_{NR} 下系统 DCMC 饱和容量为 $4 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$,为 $N_t=2$ 时的 2 倍。在高 S_{NR} 条件下,系统 DCMC 容量随着探测器个数的增加更易趋向于饱和值,如 $N_t=4$ 时, $S_{NR}>30$ dB 条件下 $N_r=1$ 系统获得 DCMC 饱和容量,但 $S_{NR}>25$ dB 条件下 $N_r=4$ 系统便可获得 DCMC 饱和容量。

在相同的 S_{NR} 条件下,采用自适应 PAA 的系统 DCMC 容量远优于传统的固定因子 PAA 和平均 PAA 的系统 DCMC 容量。自适应 PAA 可保证在任一 S_{NR} 时刻系统 DCMC 容量均达到最大,有效地避免了因高信道相关性等因素带来的容量饱和瓶颈现象,较其他算法更接近于理想信道容量值,且在高 S_{NR} 时更容易获得饱和信道容量,该结果能较好地体现系统的分集特性。因此,自适应 PAA 应用于 SM-OMIMO 系统具有很高的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Chi Nan, Lu Xingyu, Wang Can, *et al.* High-speed visible light communication based on LED[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(3): 0300001.
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于 LED 的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- [2] Liu Yang, Zhang Guoan. Study on modulation scheme of visible light communications and its performance[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090601.
刘洋, 章国安. 可见光通信调制方式及其性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090601.
- [3] Zeng L B, O'Brien D C, Minh H L, *et al.* High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9): 10999641.
- [4] Renzo M D, Haas H, Grant P M. Spatial modulation for multiple-antenna wireless systems: A survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(12): 12391429.
- [5] Renzo M D, Haas H, Ghayeb A, *et al.* Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities and implementation[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(1): 56-103.
- [6] Petkovic M I, Zdravkovic N M, Dordevic G T. Error performance of uncoded and convolutional coded SC receiver over FSO channel with pointing errors[C]. 21st Telecommunications Forum (TELFOR), 2013: 14044106.
- [7] Barry J R. Wireless infrared communications[M]. New York: Springer, 1994.
- [8] Popoola W O. Merits and limitations of spatial modulation for optical wireless communications[C]. 2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications, 2013: 14197244.
- [9] Popoola W O, Haas H. Demonstration of the merit and limitation of generalised space shift keying for indoor visible light communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(10): 1960-1965.
- [10] Mesleh R, Elgala H, Haas H. Optical spatial modulation[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(3): 234-244.
- [11] Zhang X, Dimitrov S, Sinanovic S, *et al.* Optimal power allocation in spatial modulation OFDM for visible light communications[C]. IEEE 75th Vehicular Technology Conference, 2012: 12865809.
- [12] Fath T, Haas H. Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(2): 733-742.
- [13] Ishikawa N, Sugiura S. Maximizing constrained capacity of power-imbalanced optical wireless MIMO communications using spatial modulation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(2): 519-527.
- [14] Hanzo L, Alamri O, El-Hajjar M, *et al.* Near-capacity multi-functional MIMO systems: Sphere-packing, iterative detection and cooperation[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2009.