

文章编号:1002-2082 (2020) 03-0626-05

自适应功率分配可见光 MIMO 信道容量研究

杨博瑞, 赵黎, 芦颖, 周宇

(西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 可见光通信 (VLC) 系统通常采用多阵列光源布局方式来兼顾照明与通信双重功能, 因此需要使用多输入多输出 (MIMO) 技术进行多天线协同传输来实现高速率通信。然而传统 MIMO 系统中采用平均功率分配来实现空间复用, 无法充分体现 MIMO 多天线协调传输的优势。根据每组收发天线信道状态的差异, 设计了一种低计算复杂度的快速迭代注水算法, 可实现依据信道特征自适应的分配信息, 从而提高系统的信道容量。仿真结果表明: 在相同信噪比情况下注水算法自适应功率分配系统比等功率分配系统的信道容量提高了 1.25 bit/Hz 左右。

关键词: 可见光通信; 多输入/多输出; 信道状态; 注水算法

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202041.0308002](https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308002)

Research on MIMO channel capacity for adaptive power allocation visible light

YANG Borui, ZHAO Li, LU Ying, ZHOU Yu

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The multi-array light source layout is usually adopted by the visible light communication (VLC) system to give consideration to both illumination and communication functions. Therefore, the MIMO technology is required for the multi-antenna cooperative transmission to achieve the high-rate communication. However, the average power allocation is used to achieve the spatial multiplexing in the traditional MIMO system, which cannot fully reflect the advantages of the MIMO multi-antenna coordinated transmission. Based on the differences for the state of receiving and sending antenna channel in each group, a fast iterative water-filling algorithm with low computational complexity was designed, which could realize the allocation information on the basis of channel feature adaption and improve the channel capacity of the system. Finally, the simulation results show that under the same SNR, the channel capacity of the adaptive power allocation system with water-filling algorithm is about 1.25 bit/HZ higher than that of the equal power allocation system.

Key words: visible light communication; multi-input/multi-output; channel condition; water-filling algorithm

引言

实际上 MIMO 技术由来已久, 早在 20 世纪 70 年代就有人提出将 MIMO 技术用于通信系统来抵抗衰落损耗。由于室内 VLC 系统需在保证照明的前提下兼顾通信^[1-2], 多采用多阵列光源布局方式来保证照明, 因此需要使用 MIMO 技术进行多天线协同传输^[3] 来实现高速率通信。它能够在提高其他通道和链路的全系统性能的同时减少不必

要的射频能量。然而, 为保证通信系统的多流传输能力, 进一步提升系统的信道容量, 通常可以采用大规模 MIMO(massive MIMO) 系统, 顾名思义就是将传统 MIMO 的天线数增加^[4-5], 然而在实际的 VLC 系统中会造成 LED 光源和探测器开销的增加, 从而提高了系统在光源布局、射频组件以及两端信号处理的复杂度。为寻求一种在低效益的情况下改善通信质量的方法, 研究者们不断地在

收稿日期: 2020-02-10; 修回日期: 2020-03-08

基金项目: 国家自然科学基金 (61271362); 陕西省科技厅一般项目-工业领域 (2020GY-054); 西安市科技计划项目 (2017075CG/RC038 (XAGY001))

作者简介: 杨博瑞 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事无线光通信关键技术研究。E-mail: 1678458207@qq.com

导师简介: 赵黎 (1981-), 女, 教授, 博士, 主要从事无线光通信关键技术研究。E-mail: pilly_lily@126.com

MIMO-VLC^[6-7]系统中扩展空间复用、空时分集等新技术和概念,以提高系统的传输速率并推广光通信理论。空间复用技术能够极大增加信道容量以此来提升数据传输速率,并且能够在“开环”的条件下使用。Foschini等人提出的“贝尔实验室分层空时”(Bell-Laboratories layered space-time, BLAST)^[8]是典型的空间复用技术。空间分集技术将信号分成几路分散传输,接收端集中处理来自多个信道承载同一信息的多个独立信号副本,以此来保证信号的可靠性。柯熙政^[9]、王慧琴^[10]等利用空时分集分别对光通信中空时分组码和空时网格码研究出低复杂度的译码方案。然而上述MIMO系统中采用平均功率分配来实现空间复用和分集增益,

无法充分体现MIMO多天线协调传输的优势。为了在给定的功率下最大化提高MIMO系统的信道容量,本文根据每组收发天线信道的状态,引入注水原理。针对传统注水算法需要进行复杂的搜索注水线计算的特点,利用注水性质快速调整注水线,设计了一种低计算复杂度的快速迭代注水算法,实现了功率的最小化及速率的最大化。仿真计算结果表明,同已有的注水算法相比,设计的算法极大地提升了通信系统的信道容量。

1 可见光 MIMO 通信系统

可见光 MIMO 通信系统的信道模型如图 1 所示。

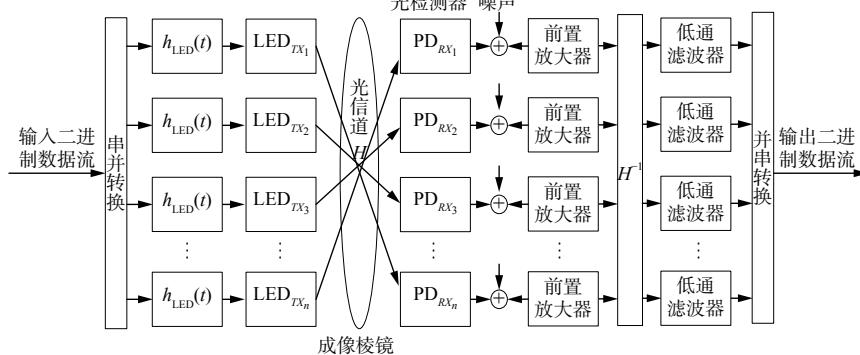


图 1 可见光 MIMO 通信系统信道模型

Fig. 1 Channel model of visible light MIMO communication system

系统将原始串行传输的二进制数据流转化为数目和发射器数目同等的并行数据流,每个独立的信息数据经过调制与映射后,由驱动电路调配 N_T 个发射器 LED 阵列以此被加载到 LED 灯上,LED 灯会把数据传播到系统中的 N_R 接收模块上,接收模块通过探测器 PD 进行光电转换后通过解调与映射,最终经过一系列放大与滤波处理完成对原始数据的解析^[11]。在室内可见光 MIMO 系统中,发送端和接收端具有双射函数的映射关系,本文中将其作为 LTI 系统处理^[12]。

信道模型表达式为

$$\mathbf{y} = \mathbf{R}\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中: \mathbf{R} 为电光转换效率; \mathbf{x} 为发射信号矢量; \mathbf{y} 为接收信号矢量; \mathbf{n} 为高斯噪声矢量。 \mathbf{H} 为信道矩阵,由于发射端有 N_T 个 LED 阵列,接收端有 N_R 个 LED 阵列,因此其为 $N_T \times N_R$ 的复数矩阵。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{N_R 1} & h_{N_R 2} & \dots & h_{N_R N_T} \end{bmatrix} \quad (2)$$

信道矩阵中的元素 $h_{i,j}$ 表示每个信道的直流增益,假设每个 LED 阵列有 K 个 LED 灯珠,其值可通过发射端 i 上所有 LED 发出到达接收端 j 上的能量总和来估算,因此发射端 i 与接收端 j 之间的信道增益 $h_{i,j}$ 为

$$h_{i,j} = \begin{cases} \sum_{k=1}^K \frac{A_{rx}^j}{d_{ijk}^2} I(\phi_{ijk}) \cos(\varphi_{ijk}) & 0 \leq \varphi_{ijk} \leq \varphi_c \\ 0 & \varphi_{ijk} \geq \varphi_c \end{cases} \quad (3)$$

式中: A_{rx}^j 为第 j 个光电接收装置上的接收面积; d_{ijk}^2 为第 k 个 LED 从发射端 i 到接收端 j 的距离; ϕ_{ijk} 为 LED 的辐射角; $I(\phi_{ijk})$ 为第 k 个 LED 沿 φ_{ijk} 方向的光强; φ_{ijk} 为接收端的光入射角; φ_c 为光电接收装置的视场角。可见光 MIMO 室内布局见图 2。

2 MIMO 信道容量

假设发射端和接收端已知信道信息时,MIMO 信道通常可转化为多个独立并行的单输入单输出(SISO)信道来分析。

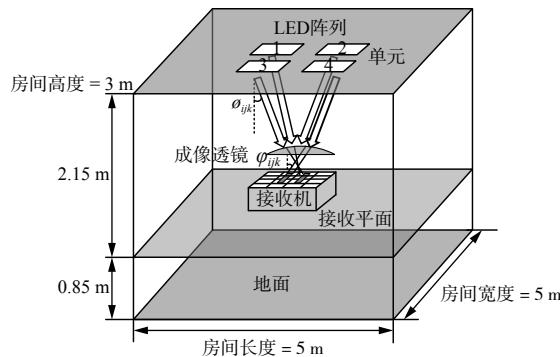


图 2 可见光 MIMO 室内布局
Fig. 2 Visible light MIMO indoor layout

对于任意一个 $N_T \times N_R$ 的复数矩阵来说, 它都可以通过奇异值分解(SVD)分解为^[13]

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^H \quad (4)$$

式中: $(\cdot)^H$ 表示矩阵的共轭转置; \mathbf{D} 是 $N_R \times N_T$ 维非负对角矩阵, 并且矩阵 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 特征值的非负平方根 λ_i 是 \mathbf{D} 的对角阵元素, 其对角非零元素模值为 \mathbf{H} 的正奇异值; \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 分别是 $N_T \times N_R$ 维和 $N_T \times N_T$ 维的酉矩阵, 根据酉矩阵的性质可得 $\mathbf{U}\mathbf{U}^H = \mathbf{I}_{N_R}$ 和 $\mathbf{V}\mathbf{V}^H = \mathbf{I}_{N_T}$, 其中 \mathbf{I}_{N_R} 和 \mathbf{I}_{N_T} 分别是 $N_R \times N_R$ 维和 $N_T \times N_T$ 维的单位阵。

对(4)式进行变换, 两边同时左乘酉矩阵, 又因为 $\mathbf{U}\mathbf{U}^H = \mathbf{I}_{N_R}$, $\mathbf{V}\mathbf{V}^H = \mathbf{I}_{N_T}$, 令 $y' = \mathbf{U}^H y$, $x' = \mathbf{V}^H x$, $n' = \mathbf{U}^H n$ 可以推出新的接收信号和发射信号之间的关系:

$$y' = \mathbf{R}\mathbf{D}x' + n' \quad (5)$$

这样就将 MIMO 信道分解为多个独立并行的 SISO 信道:

$$y'_i = \mathbf{R}\mathbf{D}x'_i + n'_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, r) \quad (6)$$

根据矩阵理论, 矩阵 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的特征值为非负数。

$$\text{rank}(\mathbf{H}\mathbf{H}^H) = \text{rank}(\mathbf{H}) = r = \min(N_R, N_T) \quad (7)$$

用 $\sqrt{\lambda_i}$ 表示矩阵 \mathbf{H} 的奇异值, 将 $\sqrt{\lambda_i}$ 带入(6)式中得:

$$y'_i = R\sqrt{\lambda_i}x'_i + n'_i \quad (i = 1, 2, \dots, r) \quad (8)$$

可以进一步推导出 y'_i , x'_i , n'_i 的协方差:

$$\mathbf{R}_{y'y'} = \mathbf{U}^H \mathbf{R}_{yy} \mathbf{U}, \mathbf{R}_{x'x'} = \mathbf{V}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{V}, \mathbf{R}_{n'n'} = \mathbf{U}^H \mathbf{R}_{nn} \mathbf{U} \quad (9)$$

若 MIMO 系统的接收端信道参数已知, 发射端未知, 发射端功率平均分配, 那么设发射机总功率为 P_T , 则每个天线发射功率为 P_T/N_T , 此时:

$$\mathbf{R}_{xx} = E\{XX^H\} = \frac{P_T}{N_T} \mathbf{I}_{N_T} \quad (10)$$

根据(9)式得:

$$\mathbf{R}_{x'x'} = \mathbf{V}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{V} = \frac{P_T}{N_T} \mathbf{I}_{N_T} \quad (11)$$

信道容量的一般公式为

$$C = B \log_2 \left\{ \det \left[\mathbf{I}_{N_R} + \frac{\mathbf{H}\mathbf{R}_{xx}\mathbf{H}^H}{\sigma^2} \right] \right\} \quad (12)$$

把根据(4)式算出的 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 和(10)式代入(12)式得:

$$C = B \sum_i^r \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i P_T}{\sigma^2 N_T} \right) \quad (13)$$

由于都是线性变化, 所以接收信号、发射信号和噪声的统计特性是没有发生变化的。假设 n 均值为 0, 功率 $\sigma^2 = N_0$, r 为信道矩阵 \mathbf{H} 的秩, 则 $\gamma_i = E\{|x_i|^2\}$ 为第 i 个子信道的发射能量即 P_T/N_T 。由此可以得出:

$$C = \max \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i}{\sigma^2 \gamma_i} \right) \quad (14)$$

3 迭代注水算法

3.1 功率注水算法

由(14)式得知, 等功率分配算法是一种在总发射功率限制下的平均分配算法, 实现简单, 但存在功率浪费的弊端。实际上注水算法是把信道矩阵 \mathbf{H} 分解成 $m(\text{rank}(H))$ 个彼此独立且并行的子信道, 而后根据每一个子信道的质量来分拨不同的传输功率。信道好, 多分配; 差一些的, 相应的减少功率; 对于环境实在太差的信道, 即使分配给它功率也对容量的提升没有帮助, 所以可以把这些功率分配给其他信道好的, 而这些信道太差的不分配功率(关闭这些信道), 规避了信道的通路容量浪费, 因此为使 MIMO 系统的分配功率最大化, 可根据信道状态信息(CSI)调整分配策略。自适应功率分配算法正是根据上述调配准则, 对发送功率进行自适应分配。发射端根据信道矩阵来分配各个发送天线的功率, 选择信道条件最好的分路, 全力发送功率, 从而使得信道容量最大化, 避免系统的冗余浪费。注水原理图如图 3 所示。

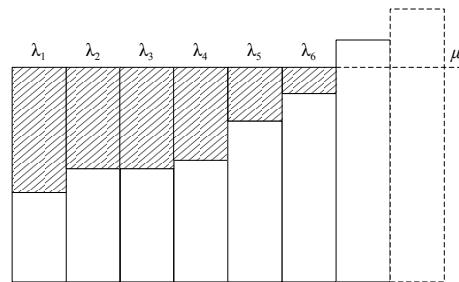


图 3 注水原理

Fig. 3 Water-filling principle

3.2 自适应功率分配算法

自适应功率分配是在总功率受限的条件下进行的功率再分配, 因此其功率满足^[14]:

$$\sum_{i=1}^r \gamma_i = \gamma \quad (i = 1, 2, \dots, r) \quad (15)$$

式中: γ_i 是分配给天线第 i 个子信道的功率; γ 是总功率, 为一定值。MIMO 信道的归一化容量由下式确定:

$$C = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i}{\sigma^2} \gamma_i \right) \quad (16)$$

通过拉格朗日乘数法, 引入函数, 寻找 γ_i 值使容量 C 最大化:

$$Z = \sum_{i=1}^r \log_2 \left[1 + \frac{\gamma_i \lambda_i}{\sigma^2} \right] + L \left(\gamma - \sum_{i=1}^r \gamma_i \right) \quad (17)$$

式中: L 是拉格朗日函数; λ_i 是信道矩阵的第 i 个特征值; σ^2 是噪声方差。可以通过令 Z 的偏微分为零得到未知的发射功率 γ_i 。令 $\partial Z / \partial \gamma_i = 0$, 有:

$$\frac{\partial Z}{\partial \gamma_i} = \frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{\lambda_i / \sigma^2}{1 + \gamma_i \lambda_i / \sigma^2} - L = 0 \quad (18)$$

由此得:

$$\gamma_i = \frac{1}{L \cdot \ln 2} - \frac{\sigma^2}{\lambda_i} = \mu - \frac{\sigma^2}{\lambda_i} \quad (19)$$

式中: μ 为常数, 且 $\mu = \frac{1}{L \ln 2}$ 。

3.3 自适应功率分配算法的信道容量

当已知发射端的信道参数时, 基于注水原理, 根据信道状况对发送功率进行自适应分配, 可以增加(14)式给出的信道容量。一般是信道传输质量好的时候, 极力发送功率, 信道差的时候, 适度调整或者不发送功率, 从而使得传输速率趋于最大, 实现功率的自适应分配。

由(19)式推导得:

$$\sum_{i=1}^r \gamma_i = \gamma = \sum_{i=1}^r \left(\mu - \frac{\sigma^2}{\lambda_i} \right) = r\mu - \sum_{i=1}^r \frac{\sigma^2}{\lambda_i} \quad (20)$$

则分配给信道 i 的功率为

$$\gamma_i = \left(\mu - \frac{\sigma^2}{\lambda_i} \right)^+ \quad (i = 1, 2, \dots, r) \quad (21)$$

式中: a^+ 指 $\max(a, 0)$; μ 称为注水平面, 并且 μ 的确定应满足:

$$\sum_{i=1}^r \gamma_i = \gamma \quad (i = 1, 2, \dots, r) \quad (22)$$

在等效 MIMO 信道模型中, 第 i 个子信道的接收功率为

$$\gamma_{ri} = (\lambda_i \mu - \sigma^2)^+ \quad (23)$$

根据 MIMO 信道容量推导的有关内容, 不难得出基于注水算法 MIMO 系统的信道容量为

$$C = \sum_{i=1}^r \log_2 \left[1 + \frac{1}{\sigma^2} (\lambda_i \mu - \sigma^2)^+ \right] \quad (24)$$

4 仿真实验

本节将通过自适应功率分配算法仿真验证上述理论推导的正确性。采取图 2 所示 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的空间为模型, 接收机放在距离地面 0.85 m 的位置, 针对不同发射接收天线的 MIMO 系统信道容量分别对等功率分配及本文提出的自适应功率分配 MIMO 系统信道容量进行计算仿真实验, 滤波器的增益和聚光器的增益都取 1, 仿真结果如图 4 所示。

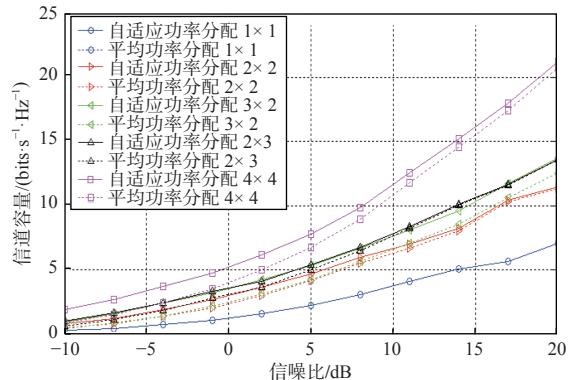


图 4 已知信道和未知信道加入注水算法信道容量对比

Fig. 4 Comparison of channel capacity of known channel and unknown channel added water-filling algorithm

由仿真结果可以看出: 随着发送端天线数和接收端天线数的逐渐增加, MIMO 系统的信道容量得到了有效的提高。当信噪比较小的时候, 相同容量下采用自适应功率分配能够使系统的性能提升 $2 \text{ dB} \sim 3 \text{ dB}$ 。当发射天线和接收天线数量相同时, 在发射信噪比小于 20 dB 的条件下, 采用注水自适应功率分配和等功率分配相比较有 1.25 bit/Hz 上下波动的通量增益。

5 结论

本文针对 MIMO 功率分配系统, 仿真了一种基于收发天线信道状态的低复杂度迭代注水算法。首先选择在相同发射和接收天线数目下进行配对发送, 然后选择加入自适应功率分配算法进行调配传输, 对比平均功率分配系统中的信道容

量，并分析了在收发端天线数目逐渐增加时的增益变化。在小信噪比时，自适应功率分配使得室内接收平面的通信容量和误码率分布较均匀，论证了注水算法能够有效提升可见光 MIMO 系统信道容量理论分析的正确性，说明了所提算法的有效性。

参考文献：

- [1] DING Deqiang, KE Xizheng, LI Jianxun. Design and simulation on the layout of lighting for VLC system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(1): 131-134.
- 丁德强, 柯熙政, 李建勋. VLC系统的光源布局设计与仿真研究[J]. *光电工程*, 2007, 34(1): 131-134.
- [2] LI Jin, MO Juming, FANG Junjian, et al. Visible light indoor parking lot positioning navigation system based on LED lighting[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(5): 746-750.
- 李锦, 莫巨明, 方俊键, 等. 基于LED照明灯光的可见光室内停车场定位导航系统[J]. *应用光学*, 2019, 40(5): 746-750.
- [3] ZHU Tong, ZHAO Li, LIU Zhigang, et al. Visible light MIMO communication system model considering lighting[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 340-345.
- 朱彤, 赵黎, 刘智港, 等. 兼顾照明的可见光MIMO通信系统模型[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 340-345.
- [4] CUI Jianhua, YUAN Zhengdao, WANG Zhongyong, et al. Massive MIMO-OFDM receiver design based on hidden cluster hypothesis and dirichlet process[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(12): 2515-2523.
- 崔建华, 袁正道, 王忠勇, 等. 基于隐聚类和狄利特雷过程的大规模MIMO-OFDM接收机设计[J]. *电子学报*, 2019, 47(12): 2515-2523.
- [5] LIU Kai, CHEN Guichao, TAO Cheng, et al. Performance analysis of massive MIMO-OFDM system with mixed-precision analog-to-digital converter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(11): 2541-2548.
- 刘凯, 陈贵潮, 陶成, 等. 基于混合精度模数转换器的大规模MIMO-OFDM系统性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(11): 2541-2548.
- [6] WANG Z, HAN S Q, CHI N. Performance enhancement based on machine learning scheme for space multiplexing 2×2 MIMO VLC system employing joint IQ independent component analysis[J]. *Optics Communications*, 2020, 458: 124733.
- [7] LIANG S Y, QIAO L, LU X Y, et al. Enhanced performance of a multiband super-Nyquist CAP16 VLC system employing a joint MIMO equalizer[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15718.
- [8] GUO Xinyue, LI Xin, HUANG Ruyi. Adaptive multiple-input multiple-output mode switching for indoor visible light communication system with orthogonal frequency division multiplexing modulation[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(11): 28-33.
- [9] CHEN Juan, KE Xizheng, ZHANG Na, et al. Adaptive multi-layer space-time coding in FSO-MIMO[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 158-164.
- 谌娟, 柯熙政, 张娜, 等. FSO-MIMO中的自适应多层空时编码[J]. *激光技术*, 2013, 37(2): 158-164.
- [10] WANG Huiqin, XIAO Bo, JIA Fei, et al. Low-complexity optical space-time trellis code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 80-85.
- 王惠琴, 肖博, 贾非, 等. 低复杂度的光空时网格编码[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 80-85.
- [11] XU Shuai, WANG Xudong, SHAN Tiantian, et al. Implementation of dimming control scheme based on joint coding and modulation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(4): 470-475.
- 徐帅, 王旭东, 单甜甜, 等. 基于联合编码调制的调光控制方案实现[J]. *应用光学*, 2018, 39(4): 470-475.
- [12] HUANG Aiping, TAO Linwei. Adaptive power allocation algorithm for wireless optical multiple input multiple output communication system with spatial modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 161-167.
- 黄爱萍, 陶林伟. 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[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 161-167.
- [13] GUERREIRO J, DINIS R, CAMPOS L. On the achievable capacity of MIMO-OFDM systems in the CathLab environment[J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 938.
- [14] HUANG Aiping, TAO Linwei, NIU Yilong. Underwater wireless optical MIMO system with spatial modulation and adaptive power allocation[J]. *Optics Communications*, 2018, 412: 21-27.