

水下可见光像素化多输入多输出比特加载自适应研究

陈雅迪^{1,2}, 符杰林^{1,2}, 李燕龙^{1,2,3*}, 林基明¹

¹桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

²桂林电子科技大学认知无线电与信息处理教育部重点实验室, 广西 桂林 541004;

³桂林电子科技大学电子电路国家级实验教学示范中心, 广西 桂林 541004

摘要 针对水下可见光像素化多输入多输出(MIMO)系统中信道的吸收散射和接收透镜模糊引起的高频衰减带来部分子载波误比特数高的问题,提出一种基于可见光像素化 MIMO 系统的比特加载自适应算法。该算法在保证全部子载波待分配总比特数不变的前提下,根据不同子载波上的信噪比动态选择最优的子载波调制阶数,从而降低不同子载波误比特数,提升系统的可靠性。仿真结果表明,在像素化 MIMO 系统传输速率不变的条件下,本文算法大幅降低了误码率。

关键词 海洋光学; 高频衰减; 像素化多输入多输出; SACO-OFDM; 比特加载自适应

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.220102

Adaptive Bit Loading of Underwater Visible-Light Pixelated Multiple-Input and Multiple-Output Systems

Chen Yadi^{1,2}, Fu Jielin^{1,2}, Li Yanlong^{1,2,3*}, Lin Jiming¹

¹*School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;*

²*Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing, Ministry of Education, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;*

³*National Demonstration Center for Experimental Electronic Circuit Education, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*

Abstract An adaptive bit loading algorithm is proposed based on visible-light pixelated multiple-input and multiple-output (MIMO) systems to deal with the problem of high number of bit errors for some subcarriers caused by the high-frequency attenuation, which is attributed to the absorption and scattering of channels and lens blur in underwater visible-light pixelated MIMO systems. By ensuring that the total number of bits allocated across all the subcarriers remains constant, the proposed algorithm dynamically selects the optimal subcarrier modulation order according to the signal-to-noise ratios of the subcarriers to reduce the number of bit errors for each subcarrier and improve the system reliability. The simulation results denote that the bit error rate can be considerably reduced when the transmission rate of the pixelated MIMO system is maintained constant.

Key words oceanic optics; high-frequency attenuation; pixelated multiple-input and multiple-output; SACO-OFDM; adaptive bit loading

OCIS codes 010.4455; 010.0180; 010.4458

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-05-05; 录用日期: 2019-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(61761014)、认知无线电与信息处理教育部重点实验室 2017 年主任基金(CRKL170106)、广西高校中青年教师基础能力提升项目(2018KY0208)、广西研究生教育创新计划资助项目(YCBZ2017050)、广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA281131)、广西重点研发计划项目(桂科 AB18126030)

* E-mail: lylong@guet.edu.cn

1 引言

在水下短距离高速无线通信技术中,对比衰减很快的电磁波,LED 可见光技术存在波长 450~570 nm 的蓝绿光低损耗传输窗口,同时该技术具有低成本、高安全性及可用频谱资源宽等特点,因此 LED 可见光无线通信系统逐渐代替无线射频通信系统,成为水下无线通信场景的一种主要技术^[1]。由于不同海域、不同水深、不同温度下的海水对光的衰减特性不同,在水下不同光信道环境下单点的无线光通信系统很难满足短距离高速的传输需求,因此利用光多输入多输出(MIMO)方式进行分集复用来克服复杂的信道环境影响。构建多输入多输出的无线光通信 MIMO 系统成为水下光通信的重要研究方向。然而研究表明非成像光 MIMO 系统^[2]由于信道相关性大,很难提供足够的分集增益,但利用透镜的成像 MIMO 系统^[3]可以有效克服上述问题。而随着显示阵列与成像设备的不断普及,人们提出新的可见光像素化 MIMO 系统并对该系统的可行性进行了验证^[4-10],其发送端由 LED 光源阵列或者显示阵列组成,通过控制大量液晶分子的电信号,LED 阵列在不同的空间位置发出相同的光强,从而使输出的光强空间分布,从而形成包含大量不同像素值的图像,接收端利用相机多像素接收单元接收信号并产生对应的电信号完成信息的还原。发送与接收单元数量要远远大于其他两种光 MIMO 方式,使该系统实现了更大的分集复用增益,更能满足水下短距离高速率的通信场景。

虽然可见光像素化 MIMO 系统为水下短距离高速通信提供了新的候选方案,但是水下像素化 MIMO 的可靠性还需进一步提升。在像素化 MIMO 系统中,影响系统可靠性的因素可以归纳为 2 类。一类是水下信道环境复杂多变,尤其是吸收、散射,导致像素化 MIMO 系统的发射机和接收机需要在空间上严格的对准,以避免透视失真带来系统误码率性能的下降^[11]。文献[12]将一维正交频分复用(OFDM)扩展到二维空间,使用正交空间频域子载波携带数据,提出空间正交频分复用调制(S-OFDM)方式,对比一维 OFDM,降低了对系统收发机对准的要求,提升了系统误码率性能。文献[13]则根据将双极性电信号变为单极性光信号的方式的不同,进一步扩展出空间非对称削波 OFDM 系统(SACO-OFDM)与空间直流偏置 OFDM 系统,并对两种系统的误码率性能进行对比。但是上述研究

均是基于收发机未对准长度是像素边长的整数倍的情况,而对于分数线性未对准问题仍然有待研究。文献[14]则基于 S-OFDM 调制方式的像素化光 MIMO 系统,给出了在收发机分数线性不对准情况下系统的误码率性能。另一类,像素化 MIMO 系统中使用了透镜,使得携带信息的子载波在高频处衰减很大。文献[15]首先仿真不同透镜带来的高频衰减对系统误码率性能的影响。文献[16]则针对高频衰减提出多像素基组阵技术,将多个像素组阵为 $N \times N$ 大小的基阵列,对基阵列内像素以重复编码方式进行编码,从而减小高频衰减影响,改善系统可靠性。虽然文献[16]所述方法有效地改善了系统可靠性,但却以损失系统有效性为代价。而文献[17]则从系统有效性出发,根据 OFDM 划分的子载波上的信噪比(SNR)进行自适应比特加载,从而大大提高了系统的频谱利用率。然而目前很少有文献对水下可见光像素化 MIMO 系统的自适应发送方案进行研究并进行实验性验证。

综上,本文以减小系统高频衰减影响,提升系统可靠性为目标,使用自适应技术动态分配像素化 MIMO 系统中不同子载波对应的比特数,使像素化 MIMO 系统中单个 OFDM 符号内的总比特数不变,使得系统误码率性能提升。

2 系统模型

2.1 水下可见光像素化 MIMO 系统

水下可见光像素化 MIMO 系统框图如图 1 所示。

与传统一维 OFDM 不同,像素化 MIMO 系统是将数据调制到空间子频率上传输,以 SACO-OFDM 调制方式为例,对于一幅发送的数据帧,将多个时刻的 OFDM 符号同时显示在屏幕空间位置上。在发送端,首先对原始二进制数据进行串并转换(S/P)使其变成 N 路并行数据,再对各个子载波数据进行正交振幅调制(QAM),调制后为频域离散信号,一路的频域离散信号可以表示为 $\mathbf{X} = [X_{0,1}, X_{1,1}, \dots, X_{N_1-1,1}]$,多路 QAM 调制后的复数域数据映射在一个 $N_1 \times N_2$ 的星座矩阵 \mathbf{X}_i ^[15]中, i 表示发送数据帧的序号,其中 N_1, N_2 均为偶数。 \mathbf{X}_i 可表示为

$$\mathbf{X}_i = \begin{pmatrix} X_{0,1} & X_{0,2} & X_{0,3} & \cdots & X_{0,N_2-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{N_1-1,1} & X_{N_1-1,2} & X_{N_1-1,3} & \cdots & X_{N_1-1,N_2-1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

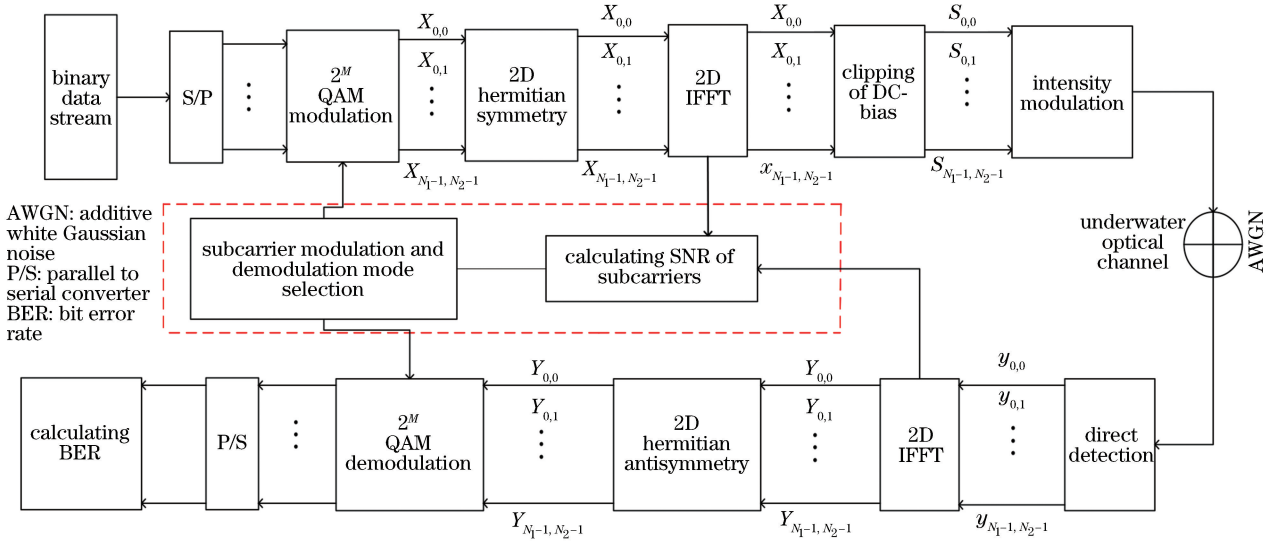


图 1 水下可见光像素化 MIMO 系统框图

Fig. 1 Block diagram of underwater visible-light pixelated MIMO system

为确保 QAM 调制后的复数域信号在进行二维傅里叶逆变换(IFFT)后输出为实数,需要对输入数据经 QAM 调制后得到的星座矩阵进行调整,调整后的 QAM 星座映射矩阵 \mathbf{X}_c ^[15] 为

$$\mathbf{X}_c = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & X_{1,1} & 0 & \cdots & X_{1,N_2-1} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & X_{N_1-1,1} & 0 & \cdots & X_{N_1-1,N_2-1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

因为光信号的非负性,对于 SACO-OFDM 可见光像素化 MIMO 系统,QAM 调制后的星座矩阵应保持其二维 Hermitian 共轭对称特性。具体地,对于星座矩阵的行,数据必须映射在其偶数行,并且奇数行数据置为 0,对于矩阵的列也要满足同样的要求,这与一维 SACO-OFDM 系统中将数据映射在奇数子载波,偶数子载波数据置 0 的操作类似。定义二维 Hermitian 共轭对称特性^[16] 为

$$X_{k_1,k_2} = X_{N_1-k_1,N_2-k_2}^* \quad (3)$$

式中, k_1, k_2 为矩阵行和列的索引,“ $*$ ”为共轭操作。于是在二维 IFFT 后, X_{k_1,k_2} 输出矩阵元素为实数。而为满足光信号非负的约束条件,对输出的实数信号矩阵,需要进行削波处理。对于二维 IFFT 后的负数信号,直接削去小于 0 的信号幅度,产生的 SACO-OFDM 信号为

$$s(n_1, n_2) = \begin{cases} 0, & \mathbf{x}(n_1, n_2) < 0 \\ \mathbf{x}(n_1, n_2), & \mathbf{x}(n_1, n_2) \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{x}(n_1, n_2)$ 表示 IFFT 后输出的实数矩阵, n_1

和 n_2 分别表示实数矩阵中行、列的索引。通过对信号矩阵 $s(n_1, n_2)$ 的光强值进行归一化,并映射到 $[0, 255]$ 的像素区间中,可以得到在发送设备显示的发送数据帧,如图 2 所示。

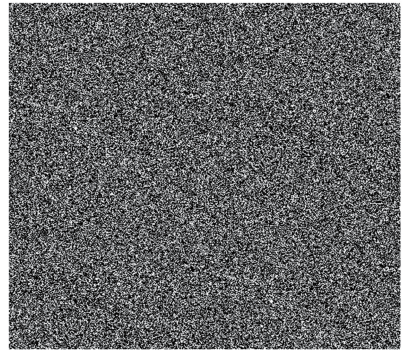


图 2 SACO-OFDM 数据发送帧

Fig. 2 Data transmission frame of SACO-OFDM

光信号在经过信道传输后,在接收端被 CMOS 或 CCD 等二维光检测阵列接收,然后在接收端进行与发送端相反的操作。二维傅里叶变换(FFT)后输出频域信号,与发送端映射信号结构相对应,但仅提取接收频域信号矩阵中奇数列作为解调信号,最后输入到 QAM 解调器中得到原始发送数据。

2.2 水下像素化 MIMO 信道建模

在水下可见光像素化 MIMO 系统中,水的散射与吸收均会使光强衰减,进而导致透视失真,一般用 $d(\lambda)$ ^[18] 表示该水体环境下的吸收散射系数, λ 为蓝绿光的波长。进一步可以使用广泛认可的比尔指数衰减模型,图像在进入成像系统前的信道损失可以描述为通信距离 z 和水下吸收散射系数 $d(\lambda)$ 的函

数表达式,则信道损失可表示为

$$L_{\text{ch}} = \exp[-d(\lambda)z]。 \quad (5)$$

对于发送数据帧而言,图像在水下传输过程中受到的影响,不仅仅只表现为水下信道对图像强度造成的影响,成像系统采集图像时,透镜的成像模糊,也会造成接收信号的高频衰减,一般通过具有低通特性的点扩展函数来对其建模^[18]。除此以外相机的热噪声也是不可忽视的影响,其在图像上的分布通常被建模为高斯分布^[5]。则接收数据帧的表达式为

$$q(x_1, y_1) = [p(x_1, y_1) \cdot L_{\text{ch}}] \otimes h(x_1, y_1) + n(x_1, y_1), \quad (6)$$

式中, $p(x_1, y_1)$ 表示图像经过信道损失之后的数据帧, (x_1, y_1) 表示像素点的坐标, $h(x_1, y_1)$ 表示成像系统的冲激响应,即点扩展函数, $n(x_1, y_1)$ 表示噪声,“ \otimes ”表示二维线性卷积

3 水下可见光像素化 MIMO 单像素基比特加载自适应算法

在水下可见光像素化 MIMO 系统中,高频衰减会导致相应的子载波上产生大的误码率。如果在受到高频衰减影响较大的子载波上采用低阶调制模式,在高频衰减影响较小的子载波上采用高阶调制模式,就可将像素化 MIMO 系统的频谱资源有效地利用起来,在传输速率不变的前提下,提高系统的误码率性能。

根据上述内容,本文提出水下可见光像素化 MIMO 单像素基比特加载自适应 (BLAoSPPB) 算法,该自适应分析可在提升系统传输可靠性的同时,保证系统的传输速率不变甚至更优。系统的传输速率可由单个 OFDM 符号所能传输的比特数体现。定义单个 OFDM 符号的数据量为 B (单位: bit), 其值越大,表示系统的传输速率越大, B 可表示为

$$B = \sum_{i=1}^N c(i), \quad (7)$$

式中, N 表示子载波数, $c(i)$ 表示第 i 个子载波传输的比特数。

在水下可见光像素化 MIMO 调制自适应系统中,发送端上的发送数据帧由多个 OFDM 符号组成,在空间分布的相邻 OFDM 符号之间受信道影响的差异较小。因此在得到首个 OFDM 符号的自适应分配方法后,其余 OFDM 符号均遵循该 OFDM 符号的比特分配方法。首先在接收端计算每个 OFDM 符号中所有携带 QAM 数据符号的子载波

信噪比 $R_{\text{SNR}}(i)$ ^[19]:

$$R_{\text{SNR}}(i) = 10 \lg \left(\frac{|s_i|^2}{|s_i - r_i|^2} \right), \quad (8)$$

式中, s_i 和 r_i 分别为传输的 QAM 数据符号和解调前的接收 QAM 数据符号, $i \in (1, 2, 3, \dots, N)$ 。

具体算法实现步骤如下:

- 1) 由(8)式计算每一个子载波的信噪比 $R_{\text{SNR}}(i)$, $i \in (1, 2, 3, \dots, N)$ 。
- 2) 因为信道状态的随机性,为防止系统的性能和速率在信道状态变差时降低,需要给系统的信噪比设置一个余量门限^[19],即 γ_{margin} ,单位为 dB,可以使用的子载波数等于 N ,初始迭代次数为 0,最大迭代次数等于 10。
- 3) 依次计算得到比特数的理论值,单个 OFDM 符号中第 1 个到第 N 个子载波上的比特数 $c(i)$ 、取整后的比特数 $c'(i)$ 、比特数差值 $\Delta(i)$ 分别为

$$c(i) = \log_2 \left[1 + \frac{R_{\text{SNR}}(i)}{\Gamma + \gamma_{\text{margin}}} \right], \quad (9)$$

$$c'(i) = \text{round}[c(i)], \quad (10)$$

$$\Delta(i) = c(i) - c'(i), \quad (11)$$

式中, $\text{round}(\cdot)$ 表示取整操作, Γ 表示在特定的调制方式及误码率下,达到一定传输速率时,理论所需要的功率与实际所需要的功率之间的比值^[20]。其计算表达式为

$$\Gamma = -\log_2(5R_{\text{target}})/1.5, \quad (12)$$

式中, R_{target} 为目标误码率。如果 $c'(i)$ 的值为 0,则对可使用子载波数目减 1。

- 4) 计算已经分配的总比特数 R_{total} 。如果该值为 0,则表示信号状态太差,不能使用。
- 5) 计算新的最优余量门限 γ'_{margin} ,其表达式为

$$\gamma'_{\text{margin}} = \gamma_{\text{margin}} + 10 \lg \left(2^{\frac{R_{\text{total}} - B}{N}} \right)。 \quad (13)$$

- 6) 令迭代次数加 1。
- 7) 若 $R_{\text{total}} \neq B$ 且迭代次数小于迭代次数门限值,令使用子载波数等于 N ,转到步骤 3),重新找最优的门限值;否则转到步骤 8)。
- 8) 若 $R_{\text{total}} > B$,则找到最小的 $\Delta(i)$,相应的 $c'(i)$ 减 1, $\Delta(i)$ 加 1,重复此步骤直到 $R_{\text{total}} = B$ 。若 $R_{\text{total}} < B$,则找到最大的 $\Delta(i)$,相应的 $c'(i)$ 加 1, $\Delta(i)$ 减 1,重复此步骤直到 $R_{\text{total}} = B$ 。

4 仿真结果与性能分析

实验通过 MATLAB 仿真验证本文方法对像素化 MIMO 系统的改善。首先假设子载波总数 N 为 256,其中传输数据的子载波数为 128,空子载波数为 128,共轭对称后送入 IFFT 模块的子载波数是

512,IFFT 长度为 512,变换后得到 512×512 的实数据矩阵,经过削波处理后得到元素为正实数的光信号矩阵,即在发送端形成大小为 512×512 的单帧图像。通信距离 z 为 1 m,符号映射分别采用 4QAM、16QAM、32QAM、64QAM。图 3 为不同调制阶数下像素化 MIMO-SACO-OFDM 系统误码率性能曲线图。从中可以看出,随着 SACO-OFDM 的星座点数增加,在相同误码率下,低阶调制所需信噪比要比高阶调制的低,但此时系统的传输速率较低。因此在保持相同子载波数与目标误码率的前提下,选择不同子载波的调制阶数可以有效地提高系统传输速率。

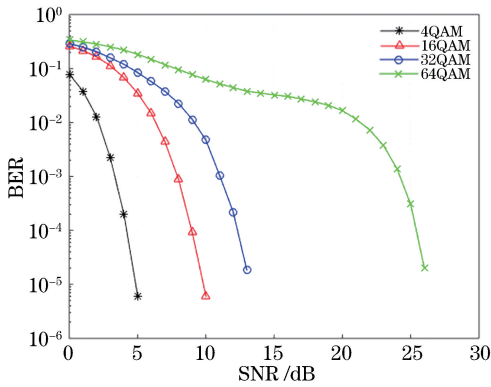


图 3 不同调制阶数下像素化 MIMO-SACO-OFDM 误码率性能比较

Fig. 3 Performance comparison of BERs of pixelated MIMO-SACO-OFDM under different modulation orders

图 4 为水下可见光像素化 MIMO 系统不同子载波的信道增益及比特分配情况。可以看出当子载波信道增益比较大时,即信道状态好,分配的比特

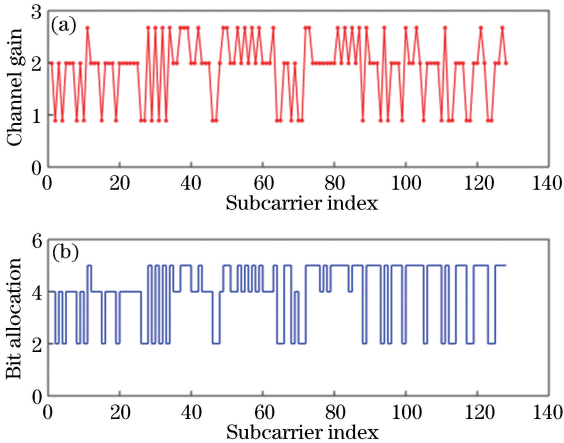


图 4 像素化 MIMO-OFDM 系统的各子载波信道增益与比特分配数。(a)信道增益;(b)比特分配数

Fig. 4 Channel gain and number of bit allocation of each subcarrier in pixelated MIMO-OFDM system. (a) Channel gain; (b) number of bit allocation

多;当信道增益减小时,即信道状态变差,分配的比特数逐渐变少。

图 5 为自适应分配前提下,自适应比特分配像素化 MIMO 系统与等比特分配像素化 MIMO 系统传输速率的比较,误码率目标为 10^{-5} ,可以看出当信噪比低于 6.5 dB 时,自适应像素化 MIMO 系统反馈得到的调制阶数要低于等比特分配 OFDM 像素化 MIMO 系统,但随着信噪比的提升,系统反馈得到的调制模式变为高阶,传输速率比等比特分配 OFDM 像素化 MIMO 系统有着明显的提升。

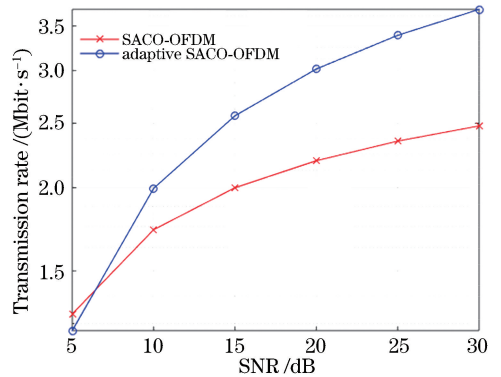


图 5 采用等比特分配 OFDM 和自适应 OFDM 像素化 MIMO 系统的传输速率与信噪比的关系

Fig. 5 Relationship between transmission rate and SNR for equal bit allocation OFDM and adaptive OFDM pixelated MIMO system

在目标误码率为 10^{-4} 以下的条件下,分别采用 Hughes-Hartoges 算法^[21]、BLAoSPB 算法、32QAM 调制等比特分配 (32QAM equal bit allocation)算法,比较等比特传输方案 and 不同自适应 OFDM 传输方案的误码率曲线,结果如图 6 所示。具体仿真参数如下:总子载波数 N 为 256,传

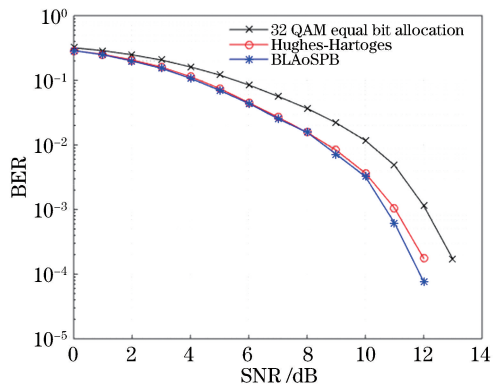


图 6 等比特分配 OFDM 和自适应 OFDM 系统误码率与信噪比的关系

Fig. 6 Relationship between BER and SNR for equal bit allocation OFDM and adaptive OFDM systems

输数据子载波数为 128, 二维 IFFT 长度为 512, 误码率目标设为 10^{-5} , 单个 OFDM 符号待分配比特数为 512 bit。结果表明采用自适应 OFDM 传输方案的像素化 MIMO 系统的性能要优于等比特传输系统, 信噪比提升约 1 dB。在系统信噪比相同的前提下(此处信噪比为 13 dB), 采用本文 BLAoSPB 算法, 其误码率数值为 7.6294×10^{-5} , 而此信噪比条件下 Hughes-Hartoges 算法与 32QAM 调制等比特分配算法的误码率数值分别为 1.7548×10^{-4} 和 0.0011; 与之相比, BLAoSPB 算法的误码率性能分别提高了 1 个数量级与 2 个数量级。

5 结 论

由于水下信道吸收散射和透镜模糊带来的高频衰减, 可见光像素化 MIMO 系统成为制约系统误码率性能的重要因素。本文提出一种可见光像素化 MIMO 子载波比特加载自适应算法, 根据发送端不同区域的单个像素对应的子载波信道增益不同, 动态调整子载波 QAM 映射的比特数, 使受到高频衰减影响大的子载波少传数据, 高频衰减影响小的子载波多传数据。仿真结果表明, 针对典型的水下短距光通信场景, 在使用 BLAoSPB 算法使系统获得相同传输速率的前提下, 系统的误码率性能也明显提升。

参 考 文 献

- [1] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518-1547.
- [2] Donic M, Rus D. Bidirectional optical communication with AquaOptical II[C] // 2010 IEEE International Conference on Communication Systems, November 17-19, 2010, Singapore. New York: IEEE, 2010: 390-394.
- [3] Tivey M, Fucile P, Sichel E. A low power, low cost, underwater optical communication system[J]. Ridge 2000 Events, 2004, 2(1): 27-29.
- [4] Kahn J M, Barry J R. Wireless infrared communications[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(2): 265-298.
- [5] Wook H B C, Komine T, Haruyama S, *et al.* Visible light communication with LED-based traffic lights using 2-dimensional image sensor[C] // CCNC 2006. 2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2006., January 8-10, 2006, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE, 2006: 243-247.
- [6] Ashok A, Gruteser M, Mandayam N, *et al.* Challenge: mobile optical networks through visual MIMO [C] // Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking, September 20-24, 2010, Chicago, Illinois, USA. New York: ACM, 2010: 105-112.
- [7] Hranilovic S, Kschischang F R. Short-range wireless optical communication using pixilated transmitters and imaging receivers[C] // 2004 IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No. 04CH37577), June 20-24, 2004, Paris, France. New York: IEEE, 2004: 891-895.
- [8] Hranilovic S, Kschischang F R. A pixelated MIMO wireless optical communication system [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(4): 859-874.
- [9] Mohamed M D A, Hranilovic S. Two-dimensional binary halftoned optical intensity channels [J]. IET Communications, 2008, 2(1): 11-17.
- [10] Dabbo A, Hranilovic S. Multilevel error diffusion for wireless optical MIMO channels [C] // 2008 24th Biennial Symposium on Communications, June 24-26, 2008, Kingston, ON, Canada. New York: IEEE, 2008: 10104100.
- [11] Mondal M R H, Armstrong J. Analysis of the effect of vignetting on MIMO optical wireless systems using spatial OFDM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(5): 922-929.
- [12] Perli S D, Ahmed N, Katabi D. PixNet: interference-free wireless links using LCD-camera pairs [C] // Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking, September 20-24, 2010, Chicago, Illinois, USA. New York: ACM, 2010: 137-148.
- [13] Mondal M R H, Panta K R, Armstrong J. Performance of two dimensional asymmetrically clipped optical OFDM [C] // 2010 IEEE Globecom Workshops, December 6-10, 2010, Miami, FL, USA. New York: IEEE, 2010: 995-999.
- [14] Mondal M R H, Armstrong J. Impact of linear misalignment on a spatial OFDM based pixelated system[C] // 2012 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), October 15-17, 2012, Jeju Island, Korea. New York: IEEE, 2012: 617-622.
- [15] Mondal M R H, Armstrong J. The effect of defocus blur on a spatial OFDM optical wireless

- communication system [C] // 2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 2-5, 2012, Coventry, UK. New York: IEEE, 2012: 12908299.
- [16] Ashok A. Design, modeling, and analysis of visual MIMO communication [D]. USA: New Brunswick Rutgers, 2014.
- [17] Guo X Y, Li X. Adaptive transmission scheme for indoor VLC based on MIMO-OFDM modulation [J]. Optical Technique, 2018, 44(1): 35-40.
郭心悦, 李鑫. 基于 MIMO-OFDM 调制的室内 VLC 自适应传输方案研究 [J]. 光学技术, 2018, 44(1): 35-40.
- [18] Kerker M. Physical optics of ocean water [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1988, 126(1): 386.
- [19] González O, Rabadán J, Pérez-Jiménez R, *et al.* Adaptive OFDM system for communications over the indoor wireless optical channel [J]. IEE Proceedings - Optoelectronics, 2006, 153(4): 139-144.
- [20] Chow P S, Cioffi J M, Bingham J A C. A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(2/3/4): 773-775.
- [21] Jia K J, Jin B, Hao L. Performance analysis of optical OFDM adaptive bit-power loading in indoor visible light communications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(3): 036031.
贾科军, 靳斌, 郝莉. 室内可见光通信 OFDM 自适应比特功率加载算法性能分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(3): 036031.