

可见光通信中概率整形算法研究

潘超,罗也,郭心悦*

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海 200093)

摘要:概率整形技术通过改变发送信源的概率分布,可进一步提高可见光通信系统的信道容量。提出一种新的概率整形算法,首先引入正交频分复用调制建立可见光通信模型,然后通过理论推导出星座点误符号率,并根据不同星座点的理论误符号率来生成发送端信源的概率分布。仿真结果表明:该算法生成的信源不仅能更好地适应当前信道状况,还避免了多次发送训练求取接收端误符号率的过程;与现有的概率整形算法相比,所提算法可以获得更高的信息传输速率。

关键词:可见光通信;概率整形;误符号率;正交频分复用调制

中图分类号:TN929.12 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2023)01-0008-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.01.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on probabilistic shaping algorithm in visible light communication

PAN Chao, LUO Ye, GUO Xinyue*

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Probabilistic shaping technology can improve the channel capacity of visible light communication system by changing the probability distribution of transmitting source. A new probabilistic shaping algorithm is proposed. Firstly, orthogonal frequency division multiplexing modulation is introduced to establish the visible light communication model. Then, the false sign rate of constellation points is derived theoretically. The simulation results show that the source generated by this algorithm can not only adapt to the current channel condition better, but also avoid the process of obtaining the false sign rate of the receiver through multiple transmission training. Compared with the existing probabilistic shaping algorithms, the proposed algorithm can achieve a higher information transmission rate.

Key words: visible light communication, probabilistic shaping, symbol error rate, orthogonal frequency division multiplexing modulation

0 引言

在第五代移动通信技术(5G)时代和即将到来的6G时代。在可供选择的无线替代接入技术中,由于可见光通信具有抗电磁干扰性、更强的安全性和未经开发商用的频段等优势,因此在众多替代技术中脱颖而出,获得了更高的关注度^[1-3]。

收稿日期:2022-06-20。

基金项目:国家重点研发计划(批准号:2018YFB1801503)资助;国家自然科学基金项目(批准号:61501296)资助。

作者简介:潘超(1998—),男,江苏徐州人,硕士研究生。本科毕业于常州工学院电子信息工程专业,现就读于上海理工大学光电信息与计算机工程学院信息与通信工程专业,主要研究方向为可见光通信中的信号处理技术。

*通信作者:郭心悦(1981—),女,博士,副教授,主要研究方向为无线通信技术。



然而,商用发光二极管(LED)的调制通常只有几兆至几十兆,大大限制了可见光通信系统的传输速率。为进一步提高数据传输速率,星座整形技术成为近期可见光通信中的一个研究热点^[4-6]。星座整形主要分为2种方法:一种是改变星座图形状的几何整形方法,另一种是改变星座点上发送概率的概率整形方法。其中,概率整形方法因其具有可观的增益和更灵活的频谱效率得到了广泛的研究^[7-8]。已有的信息表明,在高斯白噪声信道下,当信源的概率密度服从高斯分布时,该信源存在最大的相对信息熵,这意味着符合高斯分布的信源可以获得理论上的最大可达速率^[9]。目前,在星座图概率整形中,常用的方法是根据麦克斯韦-玻尔兹曼(M-B)分布生成高斯分布的信源。虽然功率低的星座点具有较大的发送概率,但在相同的功率下,经过功率归一化后,M-B分布比均匀分布

的星座图的欧式距离更大,并且在可见光通信中功率大的星座点更容易受到非线性影响;此外,由于在M-B分布中功率大的星座点概率较低,因此还可以降低系统的非线性失真。但是,M-B分布的概率分布性能并不是任何情况下都是最佳的。FALLAHPOUR A等人^[10]提出在光纤通信系统中,根据接收端误码自适应调整发送信号分布的星座整形方法,借助训练序列获取接收端各星座点的误码情况后在发送端自适应调整发射信号概率分布,提高了误符号率低的星座点的发送概率,降低了误符号率高的星座点的发送概率,在非线性模型下获得了比M-B分布更低的误符号率。但是,这种方法需要多次发送训练序列计算最大的互信息值,增加了系统的复杂度。

可见光通信中,为避免非线性失真,通常可调整LED的工作电压使其工作在LED电压-电流线性范围内。当不考虑信道的非线性时,信道近似为一个高斯白噪声信道,从理论上可以推导出每个星座点的误码情况,不再需要通过单独发送训练序列获得。基于此,本文提出一种可见光通信概率整形算法。

1 系统模型

本文提出的可见光通信中概率整形算法的主要思想是:星座图中不同位置的星座点误符号率是不同的,周围相邻点越少的星座点,其误符号率越低。因此,本文以16阶正交振幅调制(16QAM)为例,针对16QAM星座图中不同位置的星座点,推导各自的理论误符号率,然后以星座点的理论误符号率为依据,生成概率整形的信源分布,以保证星座点概率之和为1,同时避免多次重复发送训练序列。

本文引入了正交频分复用(OFDM)调制,建立了基于可见光通信模型的自适应概率整形系统,如图1所示。首先,发送端的固定组分分布匹配器(CCDM)^[11]将输入的等概率的二进制比特序列映射为期望的信源概率分布;然后,将二进制序列映射为QAM符号,

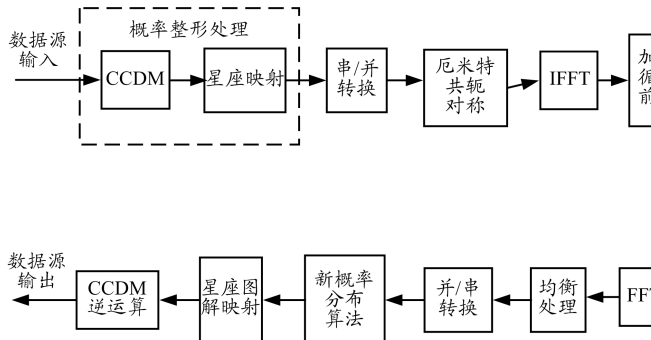


图1 基于可见光通信模型的自适应概率整形系统框图

并进行OFDM调制。考虑到在可见光通信系统中只能传输实信号,故前一半子载波上传输的数据与后一半子载波上的数据呈共轭对称,通过快速傅里叶逆变换(IFFT)将频域信号转换为时域信号;最后,添加循环前缀的OFDM信号叠加直流偏置后加载到LED上进行发送。

光信号经过自由空间传输后到达接收端。在接收端,光电二极管(PD)将接收到的信号转变为电信号。接收端的信号处理是发送端的逆过程。首先,将接收到的信号移除循环前缀,信号经过快速傅里叶变换(FFT)由时域转换到频域,并进行频域均衡。然后,经过星座解映射将符号映射为二进制比特流。最后,经过CCDM逆运算恢复原始的二进制数据。

可见光的传输分为视距(LOS)传输和非视距(NLOS)传输^[12]。在NLOS情况下,其反射链路的最强信号强度(此时接收机位于房间角落情况)比LOS链路信号强度最弱时至少低7 dB^[13]。基于此,本文仅考虑LOS传输情况。假定LED符合朗伯辐射模型,如图2所示。

视距传输的信道增益^[14]可表示为

$$h = \begin{cases} \frac{S_{PD}(l+1)}{2\pi d^2} \cos^l \phi \cos \varphi, & 0 < \varphi < \Phi \\ 0, & \varphi > \Phi \end{cases} \quad (1)$$

其中, S_{PD} 是接收端PD的有效接收区域面积, d 是发送端LED与接收端PD之间的距离, φ 是PD的入射角度, Φ 是PD的视场角度, ϕ 是LED的发射角度。 l 是朗伯辐射系数, $l = -1/(\log_2 \cos \psi_{1/2})$,其中 $\psi_{1/2}$ 是LED的半功率角度。当PD的入射角度大于其视场角度时,信道增益为0。

在频域上,每一个子信道的信道模型可等效为一个平坦衰落信道,接收信号可表示为

$$Y = HX + N \quad (2)$$

其中, X 表示频域发送信号, H 为信道频率响应, N 是噪声(可近似为高斯白噪声)。

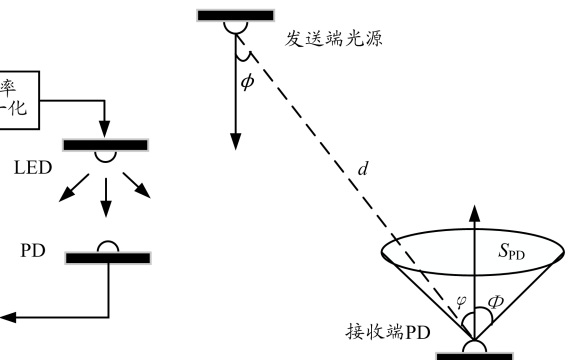


图2 可见光视距通信模型

2 概率整形算法

本文根据接收端每个星座点的误符号情况来调整发送端信源的分布情况^[10]。在星座图中,不同位置的星座点误符号率是不同的,这取决于星座点的位置及相邻星座点的个数。因此,按照每个星座点不同的误符号率情况,提出了一种新的星座点概率分布方法,每个星座点的发送概率 $P_{v_{\text{new}}}$ 可由式(3)得到

$$P_{v_{\text{new}}} = \frac{\frac{1}{P_{v_{\text{false}}}}}{\sum_{j=1}^V \frac{1}{P_{j_{\text{false}}}}} \quad (3)$$

其中, V 表示调制阶数, $P_{v_{\text{false}}}$ 是第 v 个星座点的理论误符号率, j 表示所有星座点下标, 即 $j \in [1, 2, \dots, V]$ 。由式(3)可知, 星座点的概率分布与自身的错误概率成反比关系, 如果推导出的该星座点的误符号率高, 那么再分配的概率就会较低, 反之就会较高, 并且这种方法可以保证所有星座点的概率累加值为 1。

不失一般性, 以 16QAM 为例。为了求出每个星座点的发送概率, 需要推导接收端每个星座点的误符号率。QAM 解映射采用的是最大似然判决准则。16QAM 星座图如图 3 所示, 红色虚线描绘了每个星座点的判决区域。以星座图第一象限为例, E 点是第一象限中的判决阈值临界点, m 和 n 分别为其 I 路和 Q 路的坐标值。16QAM 星座点共分为 3 类: 其中与 C 点直接相邻(上下左右)的有 4 个点, 分别为 B、D、G 和 H; 与 B 点和 D 点相邻的点均有 3 个, 与 B 点相邻的点为 C、A 和 J, 与 D 点相邻的点为 F、A 和 C; 而与 A 点相邻的只有 2 个点, 分别为 D 和 B。显然, 相邻点越少的点其错误概率越低, 因此本文首先推导 A 点的错误概率 $P(A)_{\text{false}}$ 为

$$P(A)_{\text{false}} = 1 - P(A)_{\text{true}} = 1 - P(X_I H_I + N_I > m) \times P(X_Q H_Q + N_Q > n) = 1 - T\left(\frac{m - X_I H_I}{\sigma_I}\right) T\left(\frac{n - X_Q H_Q}{\sigma_Q}\right) \quad (4)$$

其中, $P(A)_{\text{true}}$ 表示 A 点的正确概率, X_I 和 X_Q 是经过 OFDM 调制之后的 I 路和 Q 路的发送端信号, H_I 和 H_Q 为对应的信道增益, N_I 和 N_Q 分别是 I 路和 Q 路的加性高斯白噪声, σ_I 和 σ_Q 分别是 I 路和 Q 路噪声的标准

差(可在接收端估计得到), 函数 T 为标准正态高斯随机变量 Z 大于 x 的概率^[16], 表示为

$$T(x) = P(Z > x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (5)$$

B 点的错误概率 $P(B)_{\text{false}}$ 为

$$P(B)_{\text{false}} = 1 - P(B)_{\text{true}} = 1 - P(X_I H_I + N_I > m) \times P(0 < X_Q H_Q + N_Q < n) = 1 - T\left(\frac{m - X_I H_I}{\sigma_I}\right) \times T\left(\frac{-X_Q H_Q}{\sigma_Q}\right) T\left(\frac{X_Q H_Q - n}{\sigma_Q}\right) \quad (6)$$

D 点与 B 点的计算过程类似。

C 点的错误概率 $P(C)_{\text{false}}$ 为

$$P(C)_{\text{false}} = 1 - P(C)_{\text{true}} = 1 - P(0 < X_I H_I + N_I < m) \times P(0 < X_Q H_Q + N_Q < n) = 1 - T\left(\frac{-X_I H_I}{\sigma_I}\right) \times T\left(\frac{X_I H_I - m}{\sigma_I}\right) T\left(\frac{-X_Q H_Q}{\sigma_Q}\right) T\left(\frac{X_Q H_Q - n}{\sigma_Q}\right) \quad (7)$$

为了证明上述每个星座点理论误符号率的正确性, 本文进行了蒙特卡洛仿真, 仿真结果如图 4 所示。可以看出, 由式(4)、式(6)和式(7)得到的错误概率与实际统计出的误符号率进行对比后的结果一致, 验证了理论误符号率推导的正确性。此外, 在第一象限的 4 个星座点中, C 点的误符号率最高, A 点的误符号率最低, 这是因为 C 点的判决区域比其它星座点更小, C 点抵抗噪声的能力比其它星座点更差。

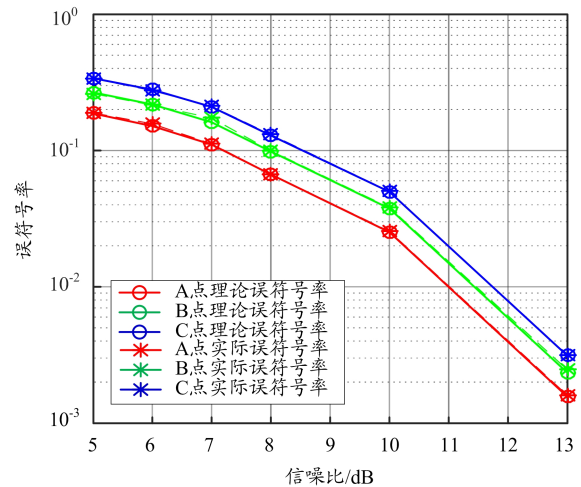


图 4 理论与实际误符号率对比

3 仿真结果及分析

归一化广义互信息量(NGMI)是概率整形技术中常用的指标之一, 它表示每个传输比特中最大的有效传输信息比特数, NGMI 值越大, 意味着通信系统可以

获得的可达信息速率^[17]越高, 其计算公式^[18]为

$$NGMI = \frac{1 - (H_X - GMI)}{r} \quad (8)$$

其中, H_X 是发送端信源熵, r 是星座图的二次阶数 (这里为 4)。信号的广义互信息量 (GMI) 的计算公式^[18]为

$$GMI \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_{T_X}(x_k) \log_2 P_{T_X}(x_k) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^r \log_2 \left(\frac{\sum_{x \in T_{X_{b_{k,i}}}} P_{R|T_X}(y_k|x) P_{T_X}(x)}{\sum_{x \in T_X} P_{R|T_X}(y_k|x) P_{T_X}(x)} \right) \quad (9)$$

其中, $b_{k,i}$ 表示第 k 个发送符号的第 i 个发送比特, T_X 、 R_X 分别是发送和接收符号集合, x 、 y 分别是实际发送和接收的信号, $P_{R|T_X}(y_k|x)$ 表示发送信号 x 到接收信号 y_k 的转移概率。

当信噪比为 15 dB 时, M-B 分布与本文提出整形算法的信源分布 (下文简称本文算法分布) 星座点三维概率分布图如图 5 所示。其中, 星座点柱状图的高低代表概率大小, 黄、绿、蓝颜色表示点 A、B、C 所代表的星座点类型。可以看出, 与 M-B 分布在内圈和外圈星座点概率分布情况相反, 本文提出的整形算法中外圈点分布的概率较大, 内圈点分布的概率较小, 这是因为外圈点错误的概率更小, 因此分配的概率更大。

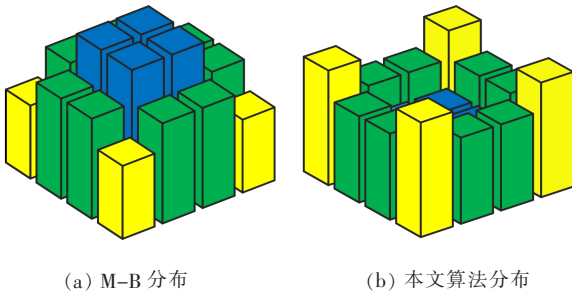
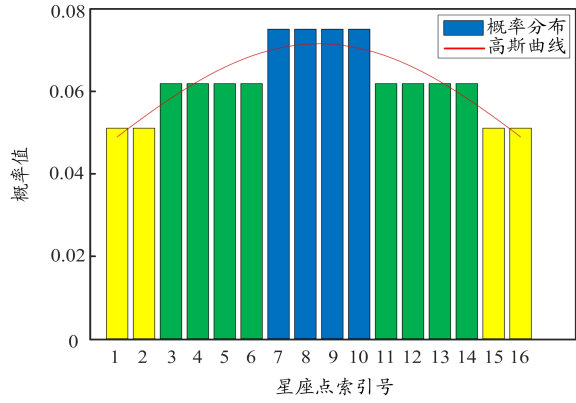


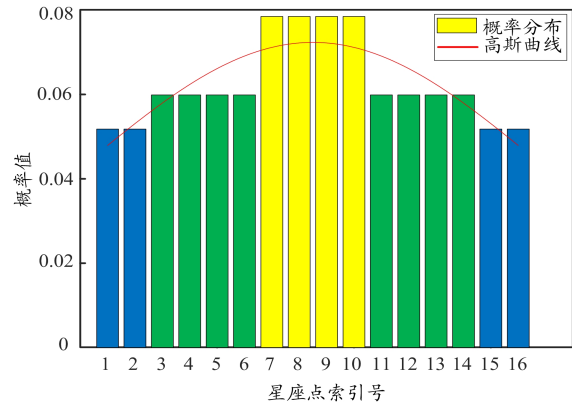
图 5 M-B 分布与本文算法的信源三维星座点概率分布图

图 6 是 M-B 分布与本文算法分布星座点二维概率分布图及高斯拟合曲线图, 其柱状图星座点概率分布大小及颜色含义与图 5 相对应。可以看出, M-B 分布与本文算法分布均服从离散高斯分布, 这个结论说明在高斯白噪声信道下, 当信源的概率分布服从高斯分布时, 可以获得更高的信息速率。

在发送功率相同的情况下, 均匀分布、M-B 分布和本文算法分布的 NGMI 比较结果如图 7 所示。可以看出, 本文算法分布和 M-B 分布均优于均匀分布, 这是因为前 2 种分布在经过概率整形后, 信源均为高斯分布的信源, 在高斯信道中能获得更高的信息速率。当



(a) M-B 分布



(b) 本文算法分布

图 6 M-B 分布与本文算法分布的星座点二维概率分布图及高斯拟合曲线

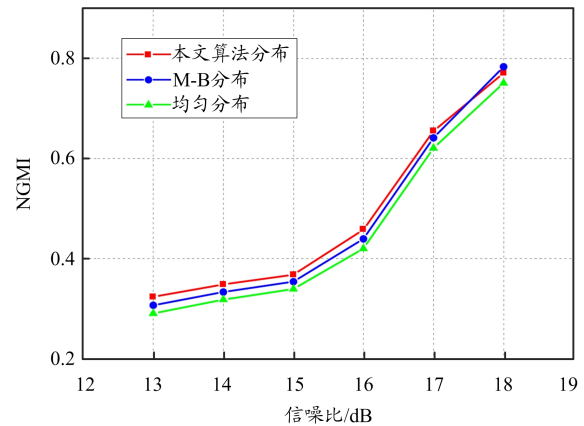


图 7 可见光信道下, 3 种算法分布的 NGMI 值对比

信噪比低于 17 dB 时, 本文算法分布优于 M-B 分布, 因为误符号率较小的外圈点出现的概率更高, 从而得到比传统的 M-B 分布更高的信息传输速率。然而, 当信噪比高于 18 dB 时, M-B 分布性能更优, 这是因为在相同的发送功率下, M-B 分布对应的星座图欧式距离更大, 其在高信噪比条件下获得的增益更大。

4 结束语

本文提出了一种可见光通信中的概率整形算法。考虑到星座图上不同位置星座点的误符号率不同,以16QAM为例,推导了不同位置星座点的理论误符号率;在此基础上,根据理论误符号率来生成信源的概率分布。仿真结果表明:本文推导的不同星座点的理论误符号率与蒙特仿真结果一致。与均匀分布相比,本文提出的概率整形算法可以获得更高的 NGMI 值;与 M-B 分布相比,在一定的信噪比条件下,本文算法分布也具有更高的 NGMI 值,即能获得更高的信息传输速率。

参考文献:

- [1] CHI N, ZHOU Y J, WEI Y R, et al. Visible light communication in 6G: advances, challenges, and prospects[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(4): 93–102.
- [2] MATHEUS L EM, VIEIRA A B, VIEIRA L FM, et al. Visible light communication: concepts, applications and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3204–3237.
- [3] KATZ M, AHMED I. Opportunities and challenges for visible light communications in 6G[C]//2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT), March 17–20, 2020, Levi, Finland. Piscataway: IEEE, 2020: 1–5.
- [4] BUCHALI F, STEINER F, BÖCHERER G, et al. Rate adaptation and reach increase by probabilistically shaped 64-QAM: an experimental demonstration[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(7): 1599–1609.
- [5] FEHNERBERGER T, LAVERY D, MAHER R, et al. Sensitivity gains by mismatched probabilistic shaping for optical communication systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(7): 786–789.
- [6] FEHNERBERGER T, ALVARADO A, BÖCHERER G, et al. On probabilistic shaping of quadrature amplitude modulation for the nonlinear fiber channel[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(21): 5063–5073.
- [7] QU Z, ZHANG S L, B I. Universal hybrid probabilistic-geometric shaping based on two-dimensional distribution matchers [C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11–15, 2018, San Diego, CA, USA. Piscataway: IEEE, 2018: 1–3.
- [8] CHO J, WINZER P J. Probabilistic constellation shaping for optical fiber communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(6): 1590–1607.
- [9] 曹雪虹, 张宗橙. 信息论与编码[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [10] FALLAHPOUR A, ALISHAHI F, MINOOFAR A, et al. 16-QAM probabilistic constellation shaping by adaptively modifying the distribution of transmitted symbols based on errors at the receiver[J]. Optics Letters, 2020, 45(18): 5283–5286.
- [11] SCHULTE P, BÖCHERER G. Constant composition distribution matching[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(1): 430–434.
- [12] SHI J, WANG Y, CHI N, et al. Enhanced performance using STBC aided coding for LED-based multiple input single output visible light communication network[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2015, 57(12): 2943–2946.
- [13] NARMANLIOGLU O, KIZILIRMAK R C, BAYKAS T, et al. Link adaptation for MIMO OFDM visible light communication systems[J]. IEEE Access, 2017(5): 26006–26014.
- [14] ANAND P K, JAIN S, MITRA R, et al. Random fourier features based post-distortion for massive-MIMO visible light communication [C]//2020 International Conference on Communications, Signal Processing, and Their Applications (ICCSPA), March 16–18, 2021, Sharjah, United Arab Emirates. Piscataway: IEEE, 2021: 1–6.
- [15] 张祖凡, 于秀兰, 雷维嘉. 通信原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [16] QU Z, DJORDJEVIC I B. On the probabilistic shaping and geometric shaping in optical communication systems [J]. IEEE Access, 2019(7): 21454–21464.
- [17] 谢晨晖. 基于星座图概率整形的可见光通信研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [18] XING S, HU F, LI G, et al. Demonstration of flexible access in a rate-adaptive visible light communication system with constellation probabilistic shaping[J]. Optics Express, 2021, 29(21): 34441–34451.