

基于删除 Polar 码的可调光可见光通信方案

李琳, 王超, 郭家宁, 吴奇, 张剑*

战略支援部队信息工程大学, 河南 郑州 450001

摘要 基于 IEEE 802.15.7 标准中的 OOK (On-Off Keying) 调光模式, 提出一种基于删除 polar 码的调光方案, 该方案在获取尽可能高质量的可见光通信性能的同时, 还可以支持用户的调光需求并抑制闪烁对人眼带来的不适。利用基于贪婪删除算法的删除 polar 码方案及 CRC (Cyclic Redundancy Check) 校验支持的 SCL (Successive Cancellation List) 译码方法, 本方案可以获得优越的误码性能; 利用置位式伪随机扰码对删除 polar 码加扰, 以获得 01 平衡、游程长度受限的数据序列, 使灯光变化在最大闪烁时间段 (MFTP) 内, 避免人眼感知到不适的灯光闪烁; 利用插入补偿符号 (CS) 的方式使平均光强度符合用户调光需求。经仿真对比分析, 发现该方案能支持用户任意调光率 (0~1) 需求。在调光率为 0.5 时, 与其他使用前向纠错 (FEC) 码进行调光的方案相比, 本文所提方案在码率为 0.5 的情况下传输效率有 1.25 倍以上的提高; 在调光率为 0.2、误比特率为 10^{-4} 时, 本文方案采用码率为 0.5 的 polar 码时能提供 0.5~1.7 dB 的信噪比增益。

关键词 光通信; 可见光通信; 调光方案; 删除 polar 码; 前向纠错码

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1606007

Dimmable Visible Light Communication Scheme Based on Punctured Polar Codes

Li Lin, Wang Chao, Guo Jianing, Wu Qi, Zhang Jian*

Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract Based on the OOK (On-Off Keying) dimming mode in IEEE 802.15.7 standard, this paper proposes a dimming scheme based on punctured polar code, which can not only obtain better communication performance, but also support the user's dimming requirements and suppress the discomfort caused by flicker to human eyes. Using punctured polar code scheme based on column greedy deletion algorithm and CRC (Cyclic Redundancy Check) aided SCL (Successive Cancellation List) decoding method, this scheme can obtain superior bit error performance. The pseudo-random scrambling code is used to scramble the punctured polar codes to obtain a 01 balancing data sequence with limited run length, so that the light intensity changes within the maximum flickering time period (MFTP), so as to avoid the perception of uncomfortable light flicker to the human eyes. The average light intensity can be obtained by inserting the compensation symbol, which meets the user's requirement of dimming. The simulation results show that the scheme can support any dimming rate (0-1). Compared with other schemes using forward error correction (FEC) code for dimming, the scheme proposed in this paper improves the transmission efficiency by more than 1.25 times when the code rate is 0.5; the scheme can provide a gain of 0.5-1.7 dB at the dimming rate of 0.2 and bit error rate of 10^{-4} when using a polar with code rate of 0.5.

Key words optical communications; visible light communications; dimming scheme; punctured polar code; forward error correction code

1 引言

可见光通信将以其高速传输的优势成为未来通信网络中不可缺少的一部分, 与其他通信方式相结合可

满足人类生活工作需要^[1]。可见光通信系统在设计时应考虑系统的可靠性、有效性, 同时还需考虑光信号的闪烁抑制、支持调光。前两个参数是从通信角度考虑, 后两个是用户对照明光源的需求, 若不能满足, 则会引

收稿日期: 2022-01-25; 修回日期: 2022-02-17; 录用日期: 2022-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(62071489, 61901524)、国家重点研发计划(2018YFB1801903)

通信作者: *zhang_xinda@163.com

起人眼感知不适,引起用户不良体验。

为方便系统实现,可见光通信一般采用强度调制和直接接收(IM/DD)调制方式,即信息加载在LED(Light-Emitting Diode)灯的光信号强度上。一般采用OOK(On-Off Keying)调制方式,即用LED灯的“On”和“Off”分别代表“1”和“0”。IEEE 802.15.7^[2-3]标准提出应根据用户需求控制光源的感知亮度(称之为调光),并建议了几种调光方案,其中一种是OOK调光(OOK dimming),将待发送信息进行前向纠错(FEC)编码后,通过OOK调制将其转换为光信号,在这种方式里,通过增加补偿符号(CS)调整一段时间内平均光亮度的变化,实现调光。近十年来,很多学者研究了用FEC来调光的方案,此类方案不仅提供编码增益、提升误码性能,还可以满足大范围的调光需求。学者们不断在FEC误码性能、辅助调光技术、闪烁抑制方法等方面进行改进。

Kim等^[4-7]研究了基于改进RM(Reed-Muller)码级联交织、Turbo码级联扰码、LDPC(Low-Density Parity Check)码级联RLL(Run-Length Limiting)码、非二进制LDPC(NBLDPC)级联恒重码(CWC)等纠错码调光方案,分别通过改进码字平衡或级联RLL码实现闪烁抑制,通过插入CS实现调光。以上方案的编码增益有所增大,系统误码性能得到改善,但存在改进RM码传输效率较低、Turbo码的译码复杂度较高、LDPC码对不同调光率需对应不同编译码矩阵以致不够灵活等问题。Lu等^[8]也提出了FEC级联RLL联合编码的方案,FEC码采用由OOK调制的Miller码作为内码、卷积码(CC)作为外码组成,该方案系统结构复杂,传输效率有待进一步提升。Feng等^[9]提出了采用喷泉码作为FEC的方案,在级联扰码后通过插入CS实现调光控制,补码插入数量少,从而提高传输效率。然而,该方案需要反馈链路,这在可见光通信(VLC)广播场景中是不适用的。随着polar码的发展和深入研究,有学者提出使用polar码作为FEC的调光方案^[10-12]。Wang等^[10]提出通过级联polar码和RLL码、然后对码字进行删除和CS补偿的方式实现VLC系统中的调光控制方案。但该方案的传输效率仍有很大提升空间。Fang等^[11]针对可调光VLC系统提出了一种基于polar码的高效无闪烁FEC编码方案,该方案提高了传输效率,简化了编码结构,但未能充分利用polar码的结构特点,导致补码长度在调光范围较大时太长,调光范围比较受限。以上方案均可以抑制闪烁、提供更可靠的通信性能并支持调光,但大部分方案都存在系统结构复杂且传输效率较低的问题。另外,在标准中OOK dimming模式下,数据子帧内数据长度和用于调光的CS长度都要求限制在1024以内,以上很多方案中未考量此因素。

Polar码具有优异的误码性能和低译码复杂度,本文也考虑基于polar码的调光方案。Polar码最初被提出时是一种基于二进制删除信道(BEC)的长度为2的幂次方的编码^[13],因其独特的信道合并和分裂构造方

式,在码长趋于无穷时可靠传输容量可以达到香农限。随着研究的深入,学者们研究了在二进制离散无记忆信道(BIDMC)、加性高斯白噪声信道(AWGN)中polar码的构造方法^[14-16],并提出了以不同参数为设计目标的删除方案^[17-20],该方案使得polar码也可以支持任意码率、任意码长的实际应用情况。Polar码的译码采用串行抵消(SC)译码方法^[13]及其基础上的各种优化算法,如串行抵消列表(SCL)译码^[21]、循环冗余校验协助下的SCL(CA-SCL)译码^[22]、自适应SCL译码方法^[23]等,其译码方法复杂度低,增加CRC的列表译码方法CA-SCL有比SC译码更好的性能。在采用CA-SCL译码方法的情况下,文献^[20]与文献^[17]中方案的性能相近,而后者的实现复杂度低,是一种比较实用的polar码删除方法。

本文为室内可见光通信提出一种兼顾通信可靠性、有效性并能支持人眼光感知需求的调光方案,本方案中采用删除polar码作为纠错码提供编码增益,利用伪随机扰码对数据进行加扰,得到01平衡且游程长度受限的数据序列,以支持LED灯闪烁抑制,再结合CS插入技术实现调光,进而实现了一个基于删除polar码的可调光VLC方案。Polar码的删除方案采用文献^[17]提及的列贪婪删除方案,译码方法选择CRC校验辅助的CA-SCL^[22]。仿真分析表明,与其他使用FEC进行调光的方案相比,该方案能提供较好的误码传输性能和相对较高的传输效率,能满足用户调光需求且系统结构简单、编译码复杂度低。

本方案的主要优点如下:

- 1)支持0~1范围内的任意调光率,且FEC编码长度和CS长度符合IEEE 802.15.7标准规定;
- 2)利用polar码相关技术特点,并利用更适合的删除方案和译码方法可得到本文研究场景下更优的通信性能。
- 3)伪随机扰码用于解决闪烁抑制问题,传输效率得到明显提高。

2 基于删除 Polar 码的可调光 VLC 方案

2.1 系统结构及说明

图1为基于删除polar码的可调光VLC系统。该方案将待传输信息通过FEC编码后,根据用户的需求并通过插入CS进行调光,并将最终装成的数据帧以OOK调制方式发送出去,这与标准中OOK调光模式一致。本文选用删除polar码作为FEC,选用伪随机加扰模式实现闪烁抑制。

根据用户需求设定调光率为 γ ,码字长度为 N ,编码效率为 R_c ,并依次确定删除polar码的码长 M 、信息长度 K 和删除长度 L_p ,以及CS插入长度 L_{cs} 等参数。将 K 比特信息 I 进行 (M, K) polar码编码,按照文献^[17]中方案删除 L_p 比特,得到长度为 $M - L_p$ 的码字序列 c 。通过对 c 进行加扰得到数据序列 u ,将 L_{cs} 长的CS按照标准中规定的方法插入数据序列

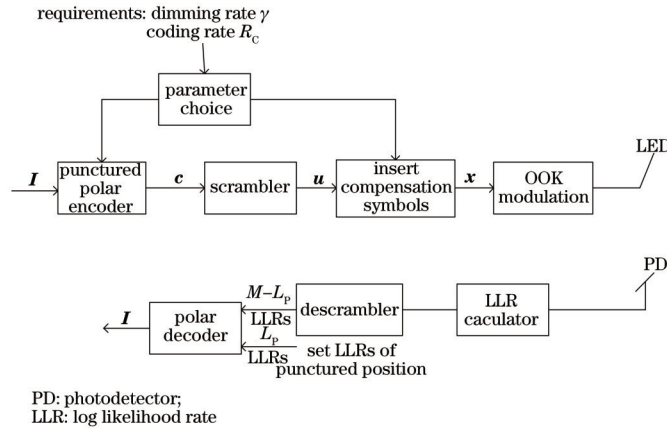


图1 基于删除 polar 码的可调光 VLC 系统

Fig. 1 Schematic diagram of dimmable VLC system based on punctured polar code

u 中, 得到长度为 N 、码重为 $N\gamma$ 的序列 x 。通过对 x 进行 OOK 调制后, 即可得到 N 个平均强度为 γ 的光信号。最终发送光信号的长度 N 值是不变的, 这样方便数据帧装帧, $N = M - L_p + L_{CS}$, 调光率是根据用户需求设定的。针对不同调光率, 所选择 polar 码参数满足 $M = 2^{\lceil \log_2 [N \times \min(\gamma, 1-\gamma) \times 2] \rceil}$, 删除长度 $L_p = M - \lfloor N \times \min(\gamma, 1-\gamma) \times 2 \rfloor$, $K = \lfloor (M - L_p) R_c \rfloor$, 插入的 CS 长度 $L_{CS} = N - M + L_p$, 其中, $\lfloor \cdot \rfloor, \lceil \cdot \rceil$ 分别代表向下和向上取整运算。图 2 为数据序列 c, u, x 的示意图。

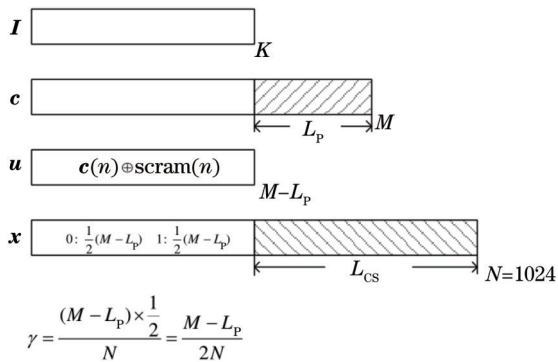


图2 数据序列 c, u, x 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sequences c, u , and x

接收端进行了一些发送端的逆向操作, 即去除 CS、增加删除码 LLR 信息、进行 polar 码译码等。值得注意的是, polar 码译码是利用信道对数似然比 LLR (Log Likelihood Rate) 信息进行译码。对于删除 polar 码, 可以得到 $M - L_p$ 个符号的 LLR 信息, 在这里根据 polar 码相关知识, 设置删除位置对应的 LLR 为 $+\infty$, 将补充完整的 M 个 LLR 信息送入 (M, K) polar 码译码器, 通过 CA-SCL^[22] 方法完成译码。

2.2 调光方案

调光功能为用户为了有更舒适或更有氛围的光照环境而提出的需求, 要求 LED 灯的感知亮度是可以根据用户需要变化的, 调光率就是人眼感知到的一段时间的平均光强度。对于 OOK 调制信号来说, 调光指将

发送符号按照特定比例 (调光率) 设置为亮 (on)/灭 (off) 状态^[24]。从数学角度说, 一段长为 N 的码字的调光率为 $\gamma (0 < \gamma < 1)$, 意味着码字中有 $N\gamma$ 个 1 和 $N(1 - \gamma)$ 个 0。

闪烁抑制是指要求 LED 灯亮度变化在最大闪烁时间段 (MFTP) 内, 这样人眼无法感知 LED 灯产生的闪烁^[3, 25]。那么, 进行光信号调制信息时, 就意味着要求传输数据中码字游程长度受限。

IEEE 802.15.7 标准^[2] 给出多种调光模式, 其中 OOK 调光模式是将进行了 FEC 编码的数据整帧或分子帧进行传送、通过增加补偿时间达到调光需求的一种调光模式。通过将 CS 插入数据帧, 可以调整人眼感知到的平均光强度以达到用户提出的调光需求。在标准中, 纠错码采用了 RS 码, 通过级联 RLL 码或 Manchester 码使得数据有直流平衡 (DC Balancing)、游程受限的特点, 避免 LED 灯闪烁引起人眼感知不适, 进而提供高质量照明。

本方案中 FEC 使用删除 polar 码, polar 码可提供优越的误码性能及低复杂度译码方案, 长度可删除 polar 码使得此方案更能满足任意调光率需求。采用伪随机加扰模式对删除 polar 码加扰, 使得数据直流平衡、游程长度受限。标准中对于 OOK 调光模式下数据长度和 CS 长度都有限制, 所以选取数据总长度 N 为 1024 bit, N 是码字长度和 CS 长度的和, $N = M - L_p + L_{CS}$ 。当调光率为 0.5 时, 不需要插入 CS, $L_{CS} = 0$; 当调光率逐渐远离 0.5 时, L_{CS} 逐渐增大, L_p 逐渐增大, 增大到一定程度后, 因删除数据太多, 当前参数 polar 码删除方案在接收端的译码性能较差, 此时将 polar 码码长和信息长度进行调整和缩短。

本方案中, polar 码及其他参数选择按照以下准则: 由数据总长度 N 和调光率 γ 得到插入补码符号后序列码重为 $N\gamma$ 。对于调光率小于 0.5 的情况, CS 插入为 0, 则插入补偿符号后待传递帧 x 的码重大小等于序列 u 的码重, 因 u 序列 01 平衡, 由此得到 c 和 u 的长度都是 $\lfloor 2N\gamma \rfloor$ 。找到大于此长度且与之最近的 2 的幂次, 即 polar 码的码长 M , 因此 $M = 2^{\lceil \log_2 (2N\gamma) \rceil}, 0 < \gamma \leq 0.5$,

删除长度 $L_p = M - \lfloor 2N\gamma \rfloor$ 。信息长度 K 可由码率 R_c 和码长 M 计算得到,补码长度也可确定。对于调光率大于 0.5 的情况,CS 插入为 1,序列中 0 值对应的数量为 $N(1-\gamma)$, c 序列和 u 序列长度为 $\lfloor 2N(1-\gamma) \rfloor$, polar 码码长 $M = 2^{\lceil \log_2 \lfloor 2N(1-\gamma) \rfloor \rceil}$, $0.5 < \gamma < 1.0$, 删除长度 $L_p = M - \lfloor 2N(1-\gamma) \rfloor$, $K = \lfloor (M - L_p)R_c \rfloor$, CS 长度 $L_{cs} = N - M + L_p$ 。可以看到,调光率大于 0.5 和小于 0.5 时,二者是对称关系,以下只讨论调光率小于 0.5 的情况。

其他 FEC 调光方案的调光范围受限,本文方案能支持 0~1 之间的任意调光率,这是符合 IEEE 802.15.7 标准需求的;本文方案的码字长度 M 和 L_{cs} 不超过 1024,符合标准中 OOK 调光模式封装格式要求;鉴于 polar 码信道构造、极化编码、概率译码等特点,虽然本方案中各参数会随着调光率的变化而变化,但从实现角度上来看,系统复杂度未增加。关于本方案具体的误码性能、传输效率、闪烁抑制效果等性能,将在后续章节进行分析说明。表 1 为不同调光率对应的参数设置举例。

表 1 不同调光率对应的参数设置举例

Table 1 Examples of parameters for different dimming rate γ

Paramter	γ	M	L_p	K	L_{cs}
	0.50	1024	0	512	0
$N=1024,$	0.25	512	0	256	512
$R_c=0.50$	0.20	512	104	204	616
	0.05	128	26	51	922
	0.50	1024	0	768	0
$N=1024,$	0.25	512	0	384	512
$R_c=0.75$	0.20	512	104	306	616
	0.05	128	26	76	922

2.3 删除 polar 码编码和译码

Polar 码的核心是信道极化,包含了信道合并和分解,对于 $M = 2^n$ 个独立并列子信道,不断迭代进行信道合并和分解的操作,可最终实现有些信道近似于无噪传输环境而有些信道近似于全噪环境。在无噪可靠信道安排传送有效信息,在全噪信道传输预定冻结信息或不传信息。信息比特数为 K 、码长 $M = 2^n$ 的极化码构造指的是在 M 个极化信道 $\mathbf{W}_M^{(i)} (1 \leq i \leq M)$ 中选取 K 个最可靠的极化信道,用于传输信息比特。

$$c = \mathbf{I}G = \mathbf{I}_A \mathbf{G}_A + \mathbf{I}_{A^c} \mathbf{G}_{A^c}, \quad (1)$$

式中: c 为生成的 polar 码码字; G 为 polar 码的生成矩阵;下标 A 为信息比特位置集合, A 中元素个数等于 K ;下标 A^c 为补集,即全噪信道的集合; \mathbf{I}_A 和 \mathbf{I}_{A^c} 分别为待传输信息序列和冻结比特序列^[13],冻结比特所在的信道特性极差,在信息传输时固定设为 0。对于二进制加性高斯白噪声(BAWGN)信道,采用高斯近似法来估算子信道错误概率,构造最合适的 A 和 A^c ^[15]。

但长度必须为 2 的幂次方这一特点导致 polar 码在应用时不够灵活,长度可变的删除 polar 码更适用于

本文所研究的支持任意调光率的场景。Wang 等^[17]提出了一种新的基于生成矩阵的删除算法,该方法是列权重贪婪算法,搜索列重为 1 的列,删除 1 对应的列和行,将迭代多次后产生的矩阵作为新的生成矩阵,这样能为删除 polar 码带来比较好的性能。与之前学者们提出的使用次优方法搜索具有最大指数的矩阵打孔模式^[18]和准均匀打孔算法^[26]相比,该方案有更好的性能。Miloslavskaya^[20]提出一种缩短 polar 码的方案,当采用 SC 译码时,该方案性能与 Wang 方法的性能基本一致,但系统实现更复杂了。因此本文采用列权重贪婪删除方案实现任意码长 polar 码,进而支持 0~1 的任意调光率信号生成。

基于以上长度可调删除 polar 码方案,根据调光率选择合适的 polar 码参数,删除方案和具体参数见 2.2 节。LDPC 为纠错码时,对于不同调光率,需选择特定的生成矩阵^[6],polar 码的构造函数、极化编码过程及概率译码不会因参数变化而在实现时差别很大,这一特点使得本方案的实现复杂度较低。

Polar 码译码采用 SC 译码方法,用对数似然比 LLR 来进行判决。信道转移概率用 $W_i(y_i/c_i)$ 表示,信道输出为 y_i 。那么矢量信道定义为 $\mathbf{W}_M[\mathbf{y}_1^{(M)}/\mathbf{I}_1^{(M)}] \triangleq \mathbf{W}^{(M)}\{\mathbf{y}_1^{(M)}/[\mathbf{I}_1^{(M)}\mathbf{G}_M]\}$,其中, $\mathbf{y}_1^{(M)} = [y_1, y_2, \dots, y_M]$, $\mathbf{W}^{(M)}\{\mathbf{y}_1^{(M)}/[\mathbf{I}_1^{(M)}\mathbf{G}_M]\} = \mathbf{W}^{(M)}[\mathbf{y}_1^{(M)}/\mathbf{c}_1^{(M)}] = \prod_{i=1}^M W_i(y_i/c_i)$ 。

第 i 个码字的 LLR 可表示为

$$L_i(y_i) = \lg \left[\frac{W_i(y_i/c_i = 0)}{W_i(y_i/c_i = 1)} \right]. \quad (2)$$

这些 LLR 值可以作为 polar 码 SC 译码器的输入值。

当已知 $\mathbf{y}_1^{(M)}$ 和 $\mathbf{I}_1^{(i-1)}$ 的估计值 $\hat{\mathbf{I}}_1^{(i-1)}$ 时,SC 译码算法估计 I_i 时使用以下对数似然比计算公式^[18]:

$$L_M^{(i)}[\mathbf{y}_1^{(M)}, \hat{\mathbf{I}}_1^{(i-1)}] = \lg \left[\frac{W_M^{(i)}[\mathbf{y}_1^{(M)}, \hat{\mathbf{I}}_1^{(i-1)}/I_i = 0]}{W_M^{(i)}[\mathbf{y}_1^{(M)}, \hat{\mathbf{I}}_1^{(i-1)}/I_i = 1]} \right]. \quad (3)$$

本文所讨论的是 AWGN 信道,调制方式为 OOK,接收信号 y_i 的 LLR 可表示为

$$R_{LLR}^{(i)}(y_i) = \ln \left[\frac{1/(\sigma\sqrt{2\pi}) / \exp[-(y_i - 1)^2/(2\sigma^2)]}{1/(\sigma\sqrt{2\pi}) / \exp[-(y_i)^2/(2\sigma^2)]} \right] = \frac{y_i}{\sigma^2}, \quad (4)$$

式中: σ 为高斯白噪声信道的方差。

LLR 值是 polar 码经典译码算法串行抵消译码 SC 中重要的参数。SC 译码器根据在接收端计算得到的 LLR₁, LLR₂, ..., LLR_M 序列值估计信息 $\hat{\mathbf{I}} = (\hat{I}_1, \hat{I}_2, \dots, \hat{I}_K)$,冻结

比特还原为 0 值。在此基础上,学者们研究了 CRC 辅助的增强 SC 译码方案,本文使用 CA-SCL 方法^[22],该方法的原理是将 L 个最大可能的译码结果都求出来并形成码字列表,结合 CRC 校验判断哪组是正确的码字。在发送信息后先进行一次 CRC 校验,再将信息和校验信息一起进行删除 polar 码编码,这样接收端就可以根据 CRC 结果辅助 SCL 译码。列表数取值呈 2 倍数量增加,当列表数为 1 时就是一次 SC 译码。那么, L 数值越大,正确码字在列表中的可能性就越高,译码后误码性能就越好。对 (1024, 512) polar 码进行 CA-SCL 译码,经过仿真验证, L 越大则误码性能越好, L 的取值大于 1 时比 $L=1$ 即 SC 译码算法时有较大性能的提升,对于误码率为 10^{-4} 的情况, L 取值为 8 时带来 1 dB 的性能增益。图 3 为 CA-SCL 译码方法中 L 值对 BER 的影响。

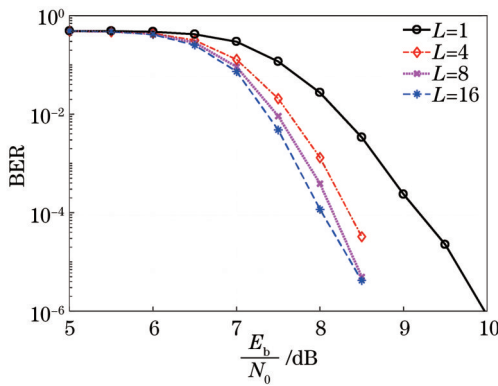


图 3 CA-SCL 译码方法中 L 值对 BER 的影响

Fig. 3 Influence of L on BER in CA-SCL decoding method

对于长度为 M 的码字,SC 译码复杂度约为 $O(M \lg M)$,列表数量为 L 的 CA-SCL 译码算法复杂度约为 $O(LM \lg M)$ 。可见, L 越大,SC 译码器功耗越大,所需存储越大,路径排序越复杂。综合考虑复杂度和译码性能,本文选择 $L=8$ 。

值得注意的是,对于删除 polar 码,通过删除位置无法计算得到 LLR 值,根据文献^[24],将删除位置 LLR 值设置为 $+\infty$,得到 M 个 LLR 值,再进行 (M, K) polar 码译码。

2.4 扰码和去扰

本方案中采用置位式伪随机扰码序列对删除 polar 码进行加扰,得到 01 平衡、游程长度受限的加扰序列,01 平衡可以支撑后续通过插入 CS 实现调光,游程长度受限使得调制后的光信号能实现闪烁抑制功能。本方案选择标准中选用的扰码 $g(D) = 1 + D^{14} + D^{15}$,其中, D 为延迟单元,扰码初态在帧封装头中设置。根据此公式产生的二进制伪随机序列为 $S[n] = S[n-14] \oplus S[n-15]$, $n=0, 1, 2, \dots$,其中, \oplus 代表模二加运算。加扰过程为 $u[n] = c[n] \oplus S[n]$ 。

与 RLL 手段相比,利用扰码进行闪烁抑制的缺点在于扰码序列 01 并不能严格地平衡,其是在一段长度上统计平衡,对数据进行统计分析,长度为 L 的序列均

值为 $L/2$,标准差为 $\sqrt{L}/2$ 。另外,伪随机序列加扰后数据最大游程长度与序列长度和统计数量有关,从理论上分析可得:对于 10^6 的统计量,长度为 1024 的序列、游程长度为 28 的情况会出现 $10^6 \times 1024 \times (1/2^{28+2}) \approx 1$ 次,大于此游程的情况更少出现。但相比其他方案中^[6,10],RLL 码或 CWC 码 01 各占 50%,游程长度在 10 bit 以内时,本方案效果略差。但根据标准^[25]的规定和参数设定,这一范围内的抖动是不为人眼所感知的,不会带来不良体验,详见仿真分析。反而用扰码进行闪烁抑制相对其他技术手段会带来传输效率的极大提升。

值得注意的一点是本方案中接收端去扰模块不能采用传统模式,因为 polar 码需要信道似然函数信息,将扰码序列为 1 的位置的 LLR 值取反,再送入 polar 码译码器,可以完成去扰和 polar 译码。

引入扰码不带来任何对误码性能的影响,只改变了传输序列统计特点,使数据满足调光和闪烁抑制的需求,相较于其他闪烁抑制技术如 RLL 还带来传输效率的提升,是一种适用于调光 VLC 系统的闪烁抑制方案。

3 仿真和分析

以下通过 Matlab 仿真从闪烁抑制、传输效率、误码性能方面分析本方案的性能。

3.1 闪烁抑制功能

用伪随机序列作为扰码序列,不管原来的数据是什么统计特点,加扰后数据序列中 0、1 个数相等。从统计学角度看,可以认为每个符号是一个 Bernoulli 随机变量,服从 $B(1/2)$ 分布,那么长度为 L 的序列可以看作是一个均值为 $L/2$ 、方差为 $L/4$ 的二项式随机变量,标准差为 $\sqrt{L}/2$ 。均值反映的是信号中直流分量的大小,标准差反映了一个数集中各数据偏离平均数距离的平均数,反映了整个数集的离散程度。长度为 1024 的序列,标准差约为 16 bit。

扰码序列的游程长度符合以下统计特点:游程长度为 1 的码字数量约占总数的 $1/4$,游程长度为 2 的码字数量约占总数的 $1/8$,随着游程长度的增加,有此游程长度的码字的平均数按 $1/2$ 的分数降低,即分别为 $1/4, 1/8, 1/16, \dots$ 。从理论上分析,对于 10^6 的统计量,长度为 1024 的序列、游程长度为 28 的情况会出现 $10^6 \times 1024 \times (1/2^{28+2}) \approx 1$ 次。

对多种参数情况下删除 polar 码加扰后码字序列 u 进行大数据量 (10^6) 统计分析,得到关于均值、标准差和游程的统计结果如表 2 所示。

可以看到,统计结果与理论分析基本一致。图 4、5 分别为不同参数码 u 序列码重统计结果、游程统计结果。

但相比其他方案^[2,8,10],本方案效果略差。在 IEEE 802.15.7 标准中^[2]和这些方案^[6,10]中,采用 Manchester 编码、4B6B RLL 码、8B10B RLL 码或 CWC 码,这些码字能提供 0、1 各占 50% 的序列,且游程长度

表 2 u 序列数据统计
Table 2 Data statistics of u sequence

Parameters	Length of u sequence	Theoretical mean value	Theoretical standard deviation	Statistical mean value	Statistical standard deviation	Max runs of 0 s or 1 s (occurrences)
$N=1024, \gamma=0.50,$ $M=1024, L_p=0$	1024	512	16.00	511.9968	16.0102	28 (1)
$N=1024, \gamma=0.25,$ $M=512, L_p=0$	512	256	11.30	256.0093	11.3043	28 (1)
$N=1024, \gamma=0.20,$ $M=512, L_p=104$	408	204	10.10	204.0043	10.0957	28 (1)
$N=1024, \gamma=0.10,$ $M=256, L_p=52$	204	102	7.14	101.9920	7.1418	25 (1)

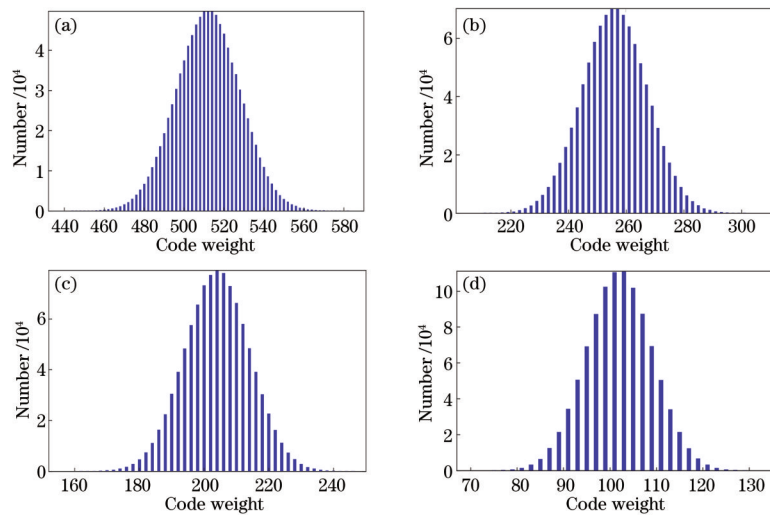


图 4 不同参数下 u 序列码重统计结果。(a)调光率为 0.50;(b)调光率为 0.25;(c)调光率为 0.20;(d)调光率为 0.10

Fig. 4 Statistical results of code weight for sequence u with different parameters. (a) Dimming rate of 0.50; (b) dimming rate of 0.25; (c) dimming rate of 0.20; (d) dimming rate of 0.10

都很短,在 10 bit 以内。本方案由伪随机扰码加扰,所生成序列在码重统计和游程统计上性能都略差。但依据标准^[25]有关规定,这一范围内的偏差从人眼感知角度是可以忽略的。

对于码字 01 平衡问题,首先调光本身就是一段时间内 01 占比符合用户需求即可,是一个统计平均。按标准^[25]规定,亮度的变化必须在 MFTP 内。通常,大于 200 Hz (MFTP 小于 5 ms) 的频率被认为是安全的^[27-28]。对于 OOK 调光信号,数据传输时光时钟有 15 MHz、30 MHz、60 MHz、120 MHz 几种可能,对于最低时钟 15 MHz,系统在 5 ms 内可传输 750000 bit 符号,在这一范围内本方案一定是统计 01 平衡的。另外,码重偏差可以用 $\sqrt{L}/(2 \times 1024)$ 来表示,对于本方案中 1024 最大可能码长,偏差占比为 $\sqrt{1024}/(2 \times 1024) \times 100\% \approx 1.6\%$,这意味着对应

的 LED 驱动电流存在 $\pm 1.6\%$ 的直流抖动,与标准^[3]中提到的灯光器件本身带来的 6.6% 的闪烁率相比在可接受范围内。

标准^[3]中规定的常用光时钟速率有 0.20 MHz、0.40 MHz、3.75 MHz、7.50 MHz、12.00 MHz、15.00 MHz 等。按照最慢的时钟速率计算,在 MFTP 内可以传输 1000 个符号以上。统计结果中的最大游程为 28,这相较于 1000 个符号是可以忽略的,因此不会带来引起人眼不适的闪烁。况且,码字中约 90% 的数据具有较短的游程长度(游程长度小于 5),长度为 28 的游程在每次统计数据量为 $10^6 \times 1024$ 时仅出现一次。

综上,虽然与 Manchester、RLL 和 CWC 码字相比,本方案所提供的通过对 FEC 进行伪随机加扰得到的序列统计结果中 01 游程长度偶尔出现长游程。但根据标准^[3,25]中各项参数的规定及人眼生理学特点,本

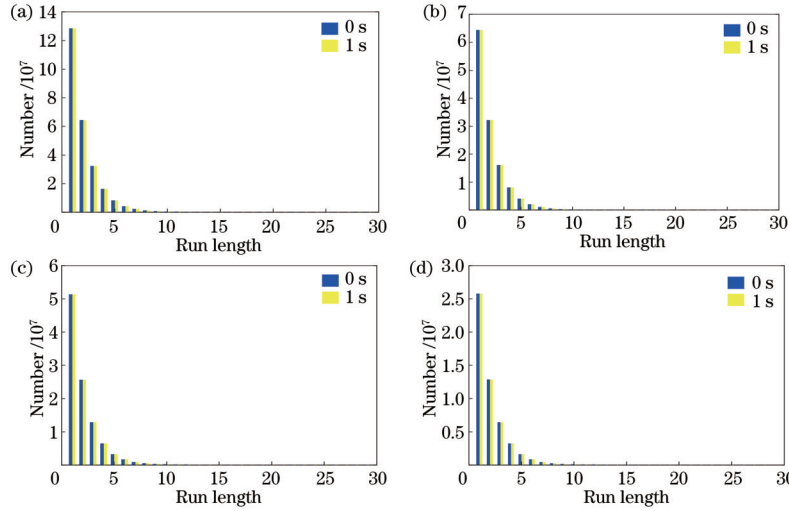


图 5 不同参数下 u 序列游程统计结果。(a)调光率为 0.50;(b)调光率为 0.25;(c)调光率为 0.20;(d)调光率为 0.10

Fig. 5 Statistical results of sequence u on run length with different parameters. (a) Dimming rate of 0.50; (b) dimming rate of 0.25; (c) dimming rate of 0.20; (d) dimming rate of 0.10

方案所产生序列的 01 平衡抖动和最大游程长度略长的问题不会被人眼所感知到。该方案在室内可见光通信系统中是适用的,能很好地支持调光并提供闪烁抑制功能。

3.2 传输效率分析

本文主要对以下几种方案展开比对:Kim^[6]在 LDPC 码的基础上,采用码字删除、补码插入和级联 Manchester 码的方案实现支持调光的可见光通信系统,称之为 Kim-LDPC 方案;Wang 等^[10]提出了一种 polar 码同时结合 RLL 码、删除、CS 技术的调光控制方案,删除 polar 码级联 RLL 码,称之为 Wang-Polar 方案;标准^[2]中采用的 RS 码级联 RLL 编码的方案可实现 OOK 调光,有 RS (64, 32)码和 RS (160, 128)码两种选择,称 RS (64, 32)级联 8B10B RLL 码的方案为 standard 1,称 RS (160, 128)级联 8B10B RLL 码的方案为 standard 2。

传输效率定义为信息比特数与发送帧长度的比值,即 $\eta = K/N_{Fr}$,其中, N_{Fr} 为插入 CS 后的帧长度。对 K 比特信息进行纠错码编码,得到码字长度为 N_{FEC} ,码率 $R_C = K/N_{FEC}$,进而抑制闪烁级联 RLL 码等码重恒定游程长度受限的码字,得到码字长度 N_{FM} 。定义 α 为闪烁抑制码字的编码效率, $\alpha = N_{FEC}/N_{FM}$ 。之后为调光插入补偿符号 N_{CS} ,那么 $N_{Fr} = N_{FM} + N_{CS}$ 。由调光率定义得到, $\gamma = (0.5N_{FM})/N_{Fr} = [0.5K/(R_C\alpha)]/N_{Fr}$,那么 $\eta = 2\alpha R_C \gamma$ 。可见,传输效率随调光率的降低而降低,同时受所选方案级联码编码效率的影响,各方案的传输效率有差别,详细参数见图 6 和表 3。

给出 $[0, 0.5]$ 区间上各方案的传输效率,如图 6 所示。Kim-LDPC 方案和 Wang-Polar 方案级联 1B2B 的 Manchester 码, α 取值为 0.5;standard 1 和 standard 2 采用 8B10B RLL 码, α 取值为 0.8;本文通过扰码实现闪

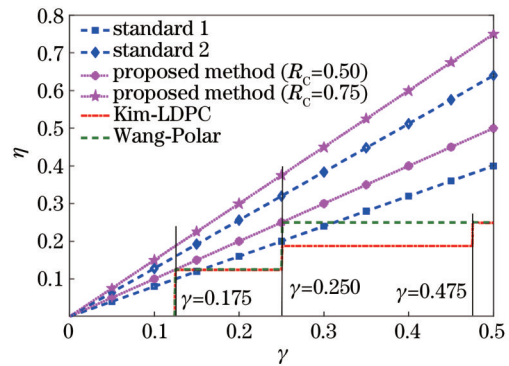


图 6 几种方案传输效率比对

Fig. 6 Comparison of transmission efficiency of several schemes

烁抑制, α 取值为 1。本文所提方案有更高的传输效率,主要在于采用的级联码码率较高,在没使用 RLL 线性码的情况下还可实现数据平衡和短游程。当调光率逐渐降低,所有方案的传输效率降低,这是由 N_{CS} 不断增加造成的。Kim-LDPC 方案和 Wang-Polar 方案在调光率不是 $1/2^j$ 的形式时,需要进行码字删除,删除码字比特数是由调光率决定的,因此其所选择的 FEC 码字按调光率分段调整,其传输效率按调光率分段变化。

表 3 中举例说明了调光率、码率给定情况下,各阶段码字长度变化及传输效率比对情况,其中, Kim-LDPC、Wang-Polar 两方案不支持 $\gamma < 0.125$ 的情况。当调光率为 0.5 时,比较 $R_C = 0.50$ 的几个方案,可以看到:所提方案的传输效率在 $R_C = 0.50$ 时较 standard 1 有 $0.5/0.4 = 1.25$ 倍的提高,较 Kim-LDPC、Wang-Polar 两方案有 2 倍的提高。若不考虑码率,本文方案的传输效率较 Kim-LDPC、Wang-Polar 两方案甚至可以有 3 倍的提高。这是本文方案可支持任意 FEC 码率的设计特点带来的优势。

表 3 调光率分别为 0.50, 0.20, 0.05 时几种方案码字参数及传输效率对比

Table 3 Comparison of code parameters and transmission efficiency of various coding schemes under dimming rate of 0.50, 0.20, and 0.05

γ	Scheme	K	N_{FEC}	R_c	N_{CS}	N_{Fr}	η
0.50	Standard 1	32	64	0.50	0	80	0.400
	Standard 2	128	160	0.80	0	200	0.640
	Kim-LDPC	576	1152	0.50	0	2304	0.250
	Wang-Polar	512	1024	0.50	0	2048	0.250
	Proposed scheme ($R_c = 0.50$)	512	1024	0.50	0	1024	0.500
	Proposed scheme ($R_c = 0.75$)	768	1024	0.75	0	1024	0.750
0.20	Standard 1	32	64	0.50	120	200	0.160
	Standard 2	128	160	0.80	300	500	0.256
	Kim-LDPC	288	460	0.63	1384	2304	0.125
	Wang-Polar	256	410	0.62	1228	2048	0.125
	Proposed scheme ($R_c = 0.50$)	204	408	0.50	616	1024	0.200
	Proposed scheme ($R_c = 0.75$)	306	408	0.75	616	1024	0.300
0.05	Standard 1	32	64	0.50	720	800	0.040
	Standard 2	128	160	0.80	1800	2000	0.064
	Proposed scheme ($R_c = 0.50$)	51	102	0.50	922	1024	0.050
	Proposed scheme ($R_c = 0.75$)	76	102	0.75	922	1024	0.074

3.3 误码性能分析

考虑一个室内 VLC 模型, 在 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 房间中心位置布 1 组 LED 阵列, 每组 LED 有 36 个 LED 灯珠, 房间高 3 m, 用户的光电探测器 (PD) 的接收机在 0.8 m 高的桌子上。灯和 PD 接收设备的详细参数参考文献 [29] 中参数, 主要参数如表 4 所示。

表 4 发送和接收设备参数列表

Table 4 Parameters of transmitter and receiver

Parameter	Value
Room size / ($\text{m} \times \text{m} \times \text{m}$)	$5 \times 5 \times 3$
Number of LED lamps per group	36 (6×6)
Distance between LED lamps / cm	4
Range of current / mA	400-600
Semi-angle at half power / ($^\circ$)	60
LED conversion factor / ($\text{W} \cdot \text{A}^{-1}$)	0.44
Refractive index of optical concentrator	1.5
Field of view / ($^\circ$)	60
System bandwidth / MHz	100
PD responsivity / ($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.3
Background current / mA	0.1

用户可以停留在房间内任意位置, 该位置用 $(x, y, 0.8)$ 表示, x, y 在 $(-2.5, 2.5)$ 范围内分布均匀。在考虑以上参数设置情况下, 在 $I_{\text{DC}} = 500\text{ mA}$ 时房间内的光照强度 (单位: lx) 分布如图 7 所示, 照度范围在 60~580 lx 之间, 平均光照强度为 210 lx。根据室内照明标准 [30], 室内照明和活动光照标准在 50~300 lx 之间, 以上模型和参数设置满足基本的工作生活需要。当用户位置给定时, 认为该室内 VLC 信道参数是不变

的, 信道噪声可以近似为加性高斯白噪声 [31], 参数为 $Z \sim (0, \sigma_z^2)$, 其中, σ_z 为信道加性高斯白噪声方差。当定义信噪比 $R_{\text{SN}} = 1/\sigma_z$ 时, 在不同的调光率和位置下, R_{SN} 值在 0~20 dB 范围内变动。后续研究主要在 6~12 dB 范围内开展: R_{SN} 值低于 6 dB 时, 所有方案的误码性能都很差; R_{SN} 值高于 12 dB 时, 几种方案的误码性能都在 10^{-5} 以上, 都能保证数据的可靠传输。

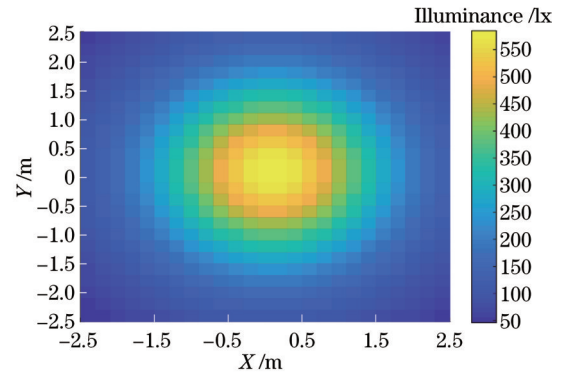


图 7 房间照度分布

Fig. 7 Distribution of indoor illuminance

本方案可支持任意码率 polar 码, 并支持任意调光率。码率分别为 0.50、0.75 的情况下, 调光率变化时该方案的误码性能如图 8 所示。在进行误码率性能分析时, 为比对公平, 与文献 [6, 10] 中方案一样定义信噪比为 $E_b/N_0 = R_{\text{SN}}/R_c$, 其中, E_b 为信号功率, N_0 为噪声功率。可以观察到, 同样码率条件下, 调光率越低则误码性能越差, 调光率为 0.5 时系统有最好的误码性能。这是因为随着调光率的降低, 码字长度缩短, 误码性能变差。在同样调光率情况下, 码率大的 polar 码或其删

除码的误码性能要差一些,其主要原因是码率高的 polar 码,传输信息位更多,从 polar 码信道构造的角度来说,将极化后子信道按质量排序,根据信息位 K 依次分配用于信息传输,当待传输信息位增多后,子信道质量会逐渐变差。

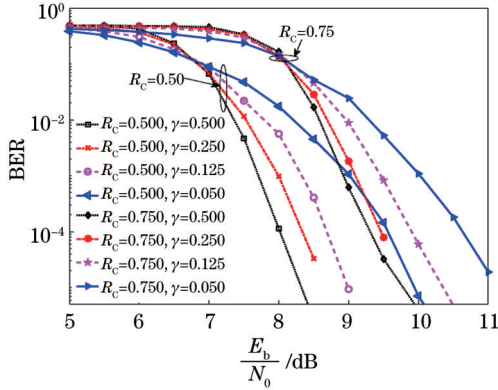


图 8 R_c 为 0.50 和 0.75 时调光率变化情况下本方案的误码性能分析
Fig. 8 BER performance under different dimming rates for R_c of 0.50 and 0.75

选择文献[6]中基于删除 LDPC 码的 Kim-LDPC 方案和文献[10]中基于删除 polar 码的 Wang-Polar 方案,与本文所提方案进行误码性能的比对分析。Kim-LDPC 方案随调光率的变化选择不同的 LDPC 生成矩阵,以满足系统设计的要求,译码时使用 BP 译码方法,迭代数选择 8。本方案和 Wang-Polar^[10]方案都采用删除 polar 码作为 FEC,但调光方案不同,polar 码的删除方式也不同,因此当选用 polar 码字长度为 2 的幂次值,polar 码无需删除即可满足调光要求,两方案误码性能一致;当调光率对应的码字长度不是 2 的幂次值

时,需要对 polar 码进行删除操作,本方案通过降低码率获得更高的传输可靠性,因此误码性能有一定优势。Polar 码方案译码时都采用 CA-SCL 译码方法,译码时列表数设置为 8。两方案都在传送信息后增加了 8 bit CRC 信息,在译码时对码字进行校验,辅助选出正确译码结果。

图 9 给出了调光率为 0.20、0.25 时,以上各方案与本文所提方案的误码性能分析对比结果,本方案支持任意码率,这里给出 $R_c = 0.50$ 、 $R_c = 0.75$ 两种情况的误码性能,分别称为 proposed 1、proposed 2。可以观察到,调光率为 0.25 时,proposed 1、proposed 2、Wang-Polar、Kim-LDPC 各方案的误码性能较调光率为 0.2 时各有约 0.1 dB、0.1 dB、0.6 dB、0.4 dB 的提升。这是因为随着调光率接近 0.50,所选用 FEC 码长增加或删除比特减少,FEC 纠错效果更好。当调光率为 0.20、误码率为 10^{-4} 时,proposed 1 较 Wang-Polar 方案和 Kim-LDPC 方案分别有 0.5 dB 和 1.7 dB 的性能提升,proposed 2 性能差于 Wang-Polar 方案,比 Kim-LDPC 方案有 0.6 dB 的性能提升。此时,proposed 1、proposed 2、Wang-Polar、Kim-LDPC 的码率分别对应 0.50、0.75、0.62、0.63。可见,删除 polar 码较 LDPC 码在当前研究信道模型下整体有更好的误码性能。当调光率为 0.25 时,几个方案在所选择 FEC 码字下可以满足调光率的需求,不需要进行码字删除操作,proposed 1、Wang-Polar、Kim-LDPC 三方案的码率都是 0.50,proposed 2 的码率为 0.75。当 E_b/N_0 分别在 8.3 dB、8.3 dB、9.4 dB、9.6 dB 时,误码率可以达到 10^{-4} ,proposed 1 较 Kim-LDPC 有 1.3 dB 的性能提升,与 Wang-Polar 性能一致。因为此情况下,proposed 1 和 Wang-Polar 方案都选用长度为 512、码率为 0.50 的 polar 码,不需要进行码字删除,二者有一致的误码性能。实际上调光率为 $1/2^j$ 时,都会存在这样的现象。

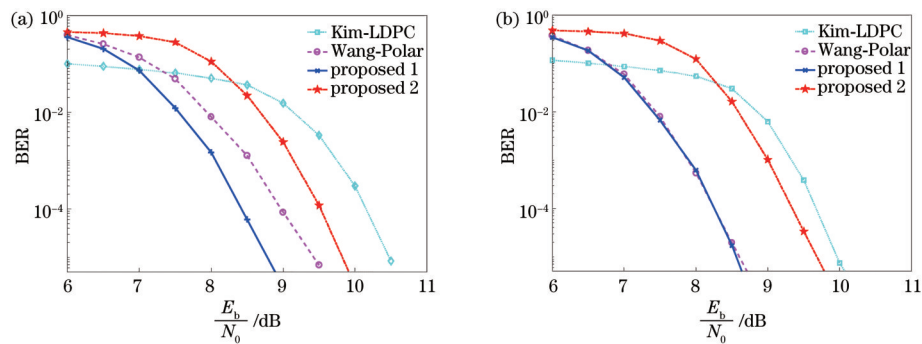


图 9 各 FEC 调光方案误码性能分析。(a)调光率为 0.20;(b)调光率为 0.25
Fig. 9 BER performance of proposed scheme and reference ones. (a) Dimming rate of 0.20; (b) dimming rate of 0.25

4 结 论

在设计可调光可见光通信系统时不仅要考虑通信系统的可靠性、有效性,还需要其满足光源可调光、无闪烁的要求。IEEE 802.15.7 标准中提出了一些方案,其中 OOK 调光模式的方案性能还有一定的提升空间。提出一种以删除 polar 码作为 FEC 码、利用置位

式伪随机扰码方式进行闪烁抑制、通过插入 CS 实现光强度满足调光需求的可见光通信中的调光方案。经实验比对分析可得:该方案能支持 0~1 之间的任意调光率,比很多调光方案的调光率范围要广;所采用闪烁抑制技术和 CS 插入技术虽然较其他方案会带来一些抖动,但根据标准^[25]的规定,这些抖动和偏差不在人眼感知范围内,不会带来影响;因扰码不会带来码字传输

效率损失,本方案的传输效率较标准中 FEC 为 RS (64,32)码的方案有 1.25 倍的提升;因 polar 码有效的删除方案和 CRC 辅助的译码方法,本方案误码性能优于对比方案,在调光率为 0.2、误码率为 10^{-4} 时,本方案采用码率为 0.5 的 polar 码时较 Wang-Polar 码和 Kim-LDPC 码分别有 0.5 dB、1.7 dB 的性能提升。

对于 polar 码的研究仍是当下学者们关注的重点,对于可见光通信,就可以 polar 码的删除方案再进一步开展研究,使得其更适应可见光通信调光需求。

参 考 文 献

- [1] 迟楠, 陈慧. 高速可见光通信的前沿研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 190687.
- [2] Chi N, Chen H. Progress and prospect of high-speed visible light communication[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(3): 190687.
- [3] Rajagopal S, Roberts R D, Lim S K. IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 72-82.
- [4] IEEE Draft Standard for Local and metropolitan area networks-part 15.7: short-range optical wireless communications: IEEE P802.15.7/D3[S]. New York: IEEE Press, 2018: 1-412.
- [5] Kim S, Jung S Y. Novel FEC coding scheme for dimmable visible light communication based on the modified reed-muller codes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(20): 1514-1516.
- [6] Lee S H, Kwon J K. Turbo code-based error correction scheme for dimmable visible light communication systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(17): 1463-1465.
- [7] Kim S. Adaptive FEC codes suitable for variable dimming values in visible light communication[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(9): 967-969.
- [8] Zhao S C. A serial concatenation-based coding scheme for dimmable visible light communication systems[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(10): 1951-1954.
- [9] Lu X X, Li J. Achieving FEC and RLL for VLC: a concatenated convolutional-miller coding mechanism[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(9): 1030-1033.
- [10] Feng L F, Hu R Q, Wang J P, et al. Fountain code-based error control scheme for dimmable visible light communication systems[J]. Optics Communications, 2015, 347: 20-24.
- [11] Wang H, Kim S. Design of polar codes for run-length limited codes in visible light communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(1): 27-30.
- [12] Fang J B, Che Z, Jiang Z L, et al. An efficient flicker-free FEC coding scheme for dimmable visible light communication based on polar codes[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 16840997.
- [13] Babalola O P, Balyan V. Efficient channel coding for dimmable visible light communications system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 215100-215106.
- [14] Arikan E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [15] Mori R, Tanaka T. Performance of polar codes with the construction using density evolution[J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(7): 519-521.
- [16] Wu D L, Li Y, Sun Y. Construction and block error rate analysis of polar codes over AWGN channel based on Gaussian approximation[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(7): 1099-1102.
- [17] 亢令川, 王超, 穆昱, 等. 室内多小区可见光通信系统孔径阵列接收机的优化设计[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1106002.
- [18] Kang L C, Wang C, Mu Y, et al. Optimal design of aperture array receivers for indoor multicell visible light communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1106002.
- [19] Wang R X, Liu R K. A novel puncturing scheme for polar codes[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(12): 2081-2084.
- [20] Shin D M, Lim S C, Yang K. Design of length-compatible polar codes based on the reduction of polarizing matrices[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(7): 2593-2599.
- [21] Korada S B, Sasoglu E, Urbanke R. Polar codes: characterization of exponent, bounds, and constructions [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(12): 6253-6264.
- [22] Miloslavskaya V. Shortened polar codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(9): 4852-4865.
- [23] Tal I, Vardy A. List decoding of polar codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(5): 2213-2226.
- [24] Niu K, Chen K. CRC-aided decoding of polar codes[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(10): 1668-1671.
- [25] Liu X J, Wu S H, Wang Y, et al. Exploiting error-correction-CRC for polar SCL decoding: a deep learning-based approach[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(2): 817-828.
- [26] 贾科军, 陆皓, 杨博然, 等. LED非线性对可见光通信系统性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 150603.
- [27] Jia K J, Lu H, Yang B R, et al. Influence of LED nonlinearity on performance of visible light communication systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 150603.
- [28] IEEE recommended practices for modulating current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers: IEEE Std 1789-2015[S]. New York: IEEE Press, 2015: 15185979.
- [29] Niu K, Chen K, Lin J R. Beyond turbo codes: rate-compatible punctured polar codes[C]//2013 IEEE International Conference on Communications, June 9-

- 13, 2013, Budapest, Hungary. New York: IEEE Press, 2013: 3423-3427.
- [27] Wang H, Kim S. Dimming control systems with polar codes in visible light communication[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(19): 1651-1654.
- [28] 荣新驰, 王超, 任嘉伟, 等. 基于嵌入式硬盘指示灯的可见光通信系统[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1806004.
Rong X C, Wang C, Ren J W, et al. Visible light communication system based on embedded hard drive indicator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1806004.
- [29] Ma H, Lampe L, Hranilovic S. Coordinated broadcasting for multiuser indoor visible light communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9): 3313-3324.
- [30] 全国文献工作标准化技术委员会. 建筑照明设计标准: GB 50034—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
National Technical Committee for standardization of literature work. Standard for lighting design of buildings: GB50034—2018[S]. Beijing: China Standard Press, 2018.
- [31] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50 (1): 100-107.