

激光与光电子学进展

可见光 Polar-OFDM 通信系统中 PAPR 抑制方法研究

曹阳, 罗超*

重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 401320

摘要 针对可见光通信正交频分复用系统中存在峰均功率比过高的问题, 提出一种降低峰均功率比的改进 Polar 码方案, 将峰均比增长指数和修正比特引入到 Polar 码编码过程中。该方案首先以离线形式计算大量 Polar 码元的峰均比增长指数, 以获取最佳的修正集参数, 该过程通过蒙特卡罗仿真实现, 其次在系统传输过程中, 通过信噪比反馈信息进行信道匹配, 以查表方式获取仿真过程得到的最佳修正集, 最后将所属修正位进行比特翻转, 以实现峰均比的降低。该方案可以使用 Polar 码的传统解码方案对信息和修正比特进行联合解码, 因此不需要传输辅助信息, 编解码过程复杂度并未增加。仿真结果表明, 在码长为 1024, 子载波数目为 256, 选取修正位数为 32 时, 本文所提方案在不影响解码复杂度情况下, 峰均比减少了 4.9 dB, 对比同类型方案具有较小的误块率性能优势。

关键词 光通信; 可见光通信; 正交频分复用; 峰均功率比; Polar 码; 修正比特; 误块率

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0706006

Research on PAPR Reduction Method in Visible Light Polar-OFDM Communication System

Cao Yang, Luo Chao*

School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 401320, China

Abstract Aiming at the problem that the peak-to-average power ratio in the orthogonal frequency division multiplexing system of visible light communication is too high, this paper proposes an improved Polar codes scheme to reduce the peak-to-average power ratio. The peak-to-average ratio growth index and amendment bits are introduced into the Polar codes encoding process. First, the scheme calculates the peak-to-average ratio growth index of a large number of Polar symbols in offline form to obtain the best index of amendment. This process is realized by Monte Carlo simulation. Second, in the system transmission process, the channel matching is performed through the signal-to-noise ratio feedback information, and the optimal correction set is obtained by looking up the table. Finally, the corresponding correction bit is bit-flipped to reduce the peak-to-average ratio. This solution is able to use the traditional decoding solution of the Polar codes to jointly decode the information and amendment bits, so there is no need to transmit auxiliary information, and the complexity of the encoding and decoding process does not increase. The simulation results show that when the code length is 1024, the number of subcarriers is 256, and the number of amendment bits is selected as 32, the proposed correction scheme can reduce the peak-to-average ratio by 4.9 dB without affecting the decoding complexity, and has a smaller block error rate performance advantage

收稿日期: 2021-07-15; 修回日期: 2021-09-06; 录用日期: 2021-09-24

基金项目: 重庆市教委科学技术项目(KJQN201901125)、重庆市科委社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2017shm-sA40019)、重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2019jcy-msxmX0233)

通信作者: *302840548@qq.com

compared to the same type of scheme.

Key words optical communications; visible light communication; optical orthogonal frequency division multiplexing; peak-to-average power ratio; polar codes; amendment bit; block error rate

1 引言

频谱资源受限的传统射频通信技术已很难满足未来通信对高带宽的需求,而可见光通信(VLC)技术具有安全性高、频谱范围广、低碳环保、高效节能等优点,并可为特殊工作区域提供无缆化信息交互及日常照明,也可为未来 5G 移动通信网络室内外深度覆盖提供绿色、泛在、廉价的接入手段^[1]。为适应可见光通信等效信道频选特性和提高频谱利用率,通常采用具有高频谱效率的正交频分复用(OFDM)和高阶正交幅度调制(QAM)技术^[2]。

OFDM 系统中存在峰均功率比(PAPR)过高的问题,会引起系统非线性失真,加剧半导体器件的损坏^[3-6]。在 VLC 中照明终端的单向导电特性要求 OFDM 输入序列具有共轭反对称结构,这导致信号序列相位之间的相关性增加,非线性失真问题会更为严重,因此,如何降低 OFDM 中 PAPR 值已成为 VLC 中的研究热点。文献[7]中已经提到了用于 OFDM 系统的各种 PAPR 降低技术,包括简单的限幅和滤波(CAF),这类方案虽然实现简单,但会带来严重的带内失真,以及带外辐射。基于概率理论的多候选生成方案也被用于降低 PAPR,诸如选择映射(SLM),何聪聪等^[8]提出了一种改进 SLM 方案,Müller 等^[9]提出了部分传输序列(PTS)。然而,SLM 与 PTS 不仅会带来带内失真,还会增加较大的计算复杂度,同时,对于信号的发射功率需求较高,从而降低了系统的信噪比(SNR)增益。王燕瑾等^[10]提出预编码方案,在 60 GHz 无线通信光 OFDM 系统中获得了 0.4 dB 的改善。Xin 等^[11]基于冗余信道码的使用,提出了一种类似且更通用的 PAPR 降低技术,分别对卷积码、turbo 码和 LDPC 进行了研究。Lim 等^[12]提出了将陪集码加入基于 Polar 码的 SLM 系统,以生成较多的独立候选信号。Lu 等^[13]将混沌映射序列加入到 Polar 码 SLM 方案中,增加了 SLM 候选的随机性。在以上方案中,编码技术的使用虽较好地避免了带内失真和信号发生功率的问题,但由于部分方案更改了编译码方法,不仅降低了差错性能,还增加了译码的复杂度。

针对以上问题,本文提出一种 Polar codes-

OFDM(PC-OFDM)方案。该方案通过离线形式计算 Polar 码元对 PAPR 的影响,以此获取修正集,系统最终翻转修正集所属比特值以此降低 PAPR。本文提出的编码方案并不会带来带内失真和带外辐射,不需要增加信号发射功率,且此方案在使用常用码长的情况下,差错性能损失可忽略不计。该编码方案并未改变 Polar 码的整体编译码框架,且无需添加用于识别发送符号的辅助信息,故未对编译码复杂度造成不良影响。

2 PC-OFDM 系统原理

如图 1 所示,对于码长为 n 的 Polar 码构造,编码器的输入码元 u 可分为信息集 I 和冻结集 F 。 $I \cup F = U$,原信息 u 经过矩阵 F_n 得到编码信息 c ,即 $c = uF_n$,其中 $F_n = F^{\otimes \log_2 n}$,即 F_n 为核矩阵 $F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 的 $\log_2 n$ 次的克罗内克内积。

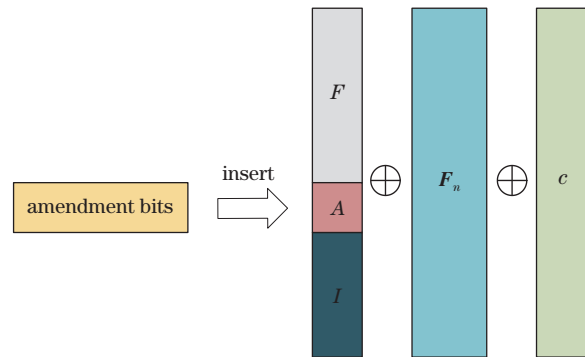


图 1 编码过程以及修正位选择

Fig. 1 Encoding process and selection of correction bit

本文引入 PAPR 增长指数 Δ 和修正集 A 概念,修正集 A 占据原信息集 I 的部分比特位置,使得 $I \cup F \cup A = U$, $|I \cup F \cup A| = n$,如图 1 所示。参数 Δ 用于量化 Polar 码中信息比特位对 PAPR 的影响,具体表达式为

$$\Delta_i = \left| \log_2 \frac{u_i^{\text{PAPR}}(u_i = 0)}{u_i^{\text{PAPR}}(u_i = 1)} \right|, \quad (1)$$

式中: $u_i^{\text{PAPR}}(u_i = b)$, $b \in \{0, 1\}$ 是对应于 $u_i = b$ 的 PAPR。较高的 Δ_i 值表示第 i 个比特对系统的 PAPR 性能具有较高的影响。

2.1 Polar 码修正集选取

本文通过蒙特卡罗仿真计算参数 Δ_i , 确定不同信噪比与不同码长下的修正集, 该操作只需进行离线执行一次。参数 Δ_i 的计算量与 Polar 码长息息相关, 随着码长的增加, 硬件计算能力出现瓶颈。为解决这一问题, 该方法是针对足够大的信息比特样

本获取参数 Δ_i 的期望 $E(\Delta_i)$, 然后选择达到最高 $E(\Delta_i)$ 的集作为修正集。

使用 Polar 码的高斯近似构造法(GA)选择一组信息集和修正集。令 T 表示对评定参数 Δ_i 取平均值的信息比特的数量。将计数器 j 设置为 1 作为初始化。方法过程如图 2 所示。

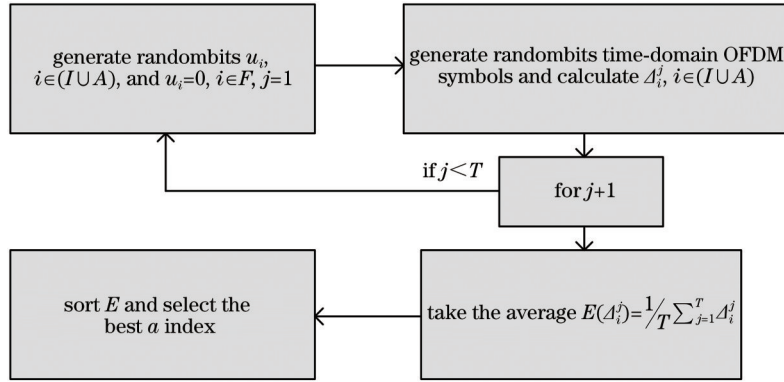


图 2 修正比特选取流程

Fig. 2 Selection process of amendent bit

首先, 生成随机信息比特 $u_i, i \in (IUA)$, 并将冻结的比特都预置为 0, 即对于 $u_i=0, i \in F$ 。对于给定的信息序列, 生成时域 OFDM 符号, 系统中的 OFDM 符号被过采样 A 倍, 以捕获准确的 PAPR 分布。为了计算 (1) 式中的度量 Δ_i^j , 系统将会对 $i \in (IUA)$ 的所有比特 u_i 进行比特翻转, 并且计算对应比特的 PAPR。

在计算了针对集 $i \in (IUA)$ 和 $1 \leq j \leq T$ 的度量 Δ_i^j 之后, 将它们在 T 个样本上平均, 得到 $E(\Delta_i^j) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T \Delta_i^j$ 。然后, 按降序对度量标准 $E = (E_1, E_2, \dots, E_{k+a})$ 进行排序, 并选择具有最高度量

标准的前 a 个集作为一组修正集 A 。

2.2 Polar 码修正比特翻转

根据图 2 方法确定修正集之后, 需从修正集中再进一步适配传输信道以及修正比特翻转。具体思路如下:

- 1) 根据 Polar 码编码器输出码字 c , 并将冻结集预置为零, 即 $c_i=0, i \in F$ 。
- 2) 系统接收端向发送端反馈信道信噪比信息, 根据反馈信息查表确定离线操作得出的修正集。
- 3) 将码字中 $i \in A$ 的 a 位比特值进行比特翻转。

图 3 为本文提出的 Polar 码的 VLC-OFDM 系统架构模型。系统输入码字序列 c 。假设所提出的

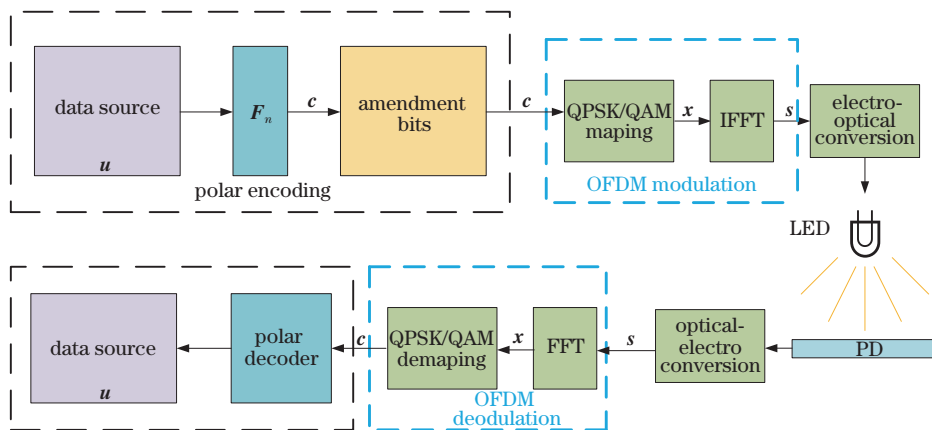


图 3 系统构架模型

Fig. 3 System architecture model

VLC-OFDM 系统方案是将 Polar 码的单个码字与单个 OFDM 符号一一映射,因此单位码字的调制符号数量等于单位 OFDM 符号中的子载波数量 N 。以 QAM 调制为例,码字 \mathbf{c} 被调制成 M 进制 QAM 信号 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N) \in \mathbf{X}^N$, 其中 \mathbf{X} 是一组 M 进制 QAM 调制符号星座图,且 $N = n / \log_2 M$ 。

对于 QAM 调制序列 \mathbf{x} , 通过应用快速傅里叶逆变换 (IFFT) 得到 OFDM 时域符号 $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_{ON}) \in \mathbf{I}^{ON}$, O 为过采样因子。所得 OFDM 符号表示为

$$s_i = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=1}^N x_m \exp(j2\pi im / ON), \quad (2)$$

式中: $i \in \{1, 2, \dots, ON\}$ 。OFDM 符号的最终 PAPR 定义为

$$s_{\text{PAPR}} = \frac{\max_{1 \leq i \leq ON} |s_i|^2}{\frac{1}{ON} \sum_{i=1}^{ON} |s_i|^2} \quad (3)$$

3 仿真性能与结果分析

VLC 系统的基带传输模型表示为

$$Y(t) = \gamma h(t) X(t) + \delta(t). \quad (4)$$

如(4)式和图 4 所示, $Y(t)$ 表示光电探测器 PD 所接收到的电流信号, γ 表示 PD 自身所具有的探测器响应度, $h(t)$ 表示系统的冲击响应, $\delta(t)$ 表示系统中存在的加性高斯白噪声(AWGN)。

本次实验采用 MATLAB R2019b 软件, 以及实验常用单光源视距型链路模型, 忽略墙壁反射, 模拟长宽都为 5 m, 高为 3 m 的室内环境, 光源设置在

屋顶中央, 位置为 $L_s = (2.5, 2.5, 3)$, 其他信道参数如表 1 所示。

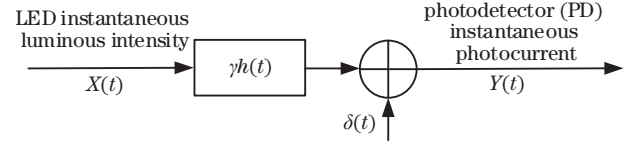


图 4 VLC 系统信道模型

Fig. 4 VLC system channel model

表 1 信道仿真实验参数

Table 1 Channel simulation experiment parameters

| Experimental parameter | Value |
|---|-----------|
| Half power point half angle $\varphi_{1/2}$ | 40 |
| Lambertian emission series m | 1.5684 |
| LED transmit power /W | 12 |
| Optical filter gain | 1 |
| Lens refractive index | 1.5 |
| Receiving field of view | 70 |
| Indoor space size / (m × m × m) | 5 × 5 × 3 |
| Vertical distance between light source and receiving plane /m | 2.15 |

3.1 不同实验参数情况下的性能分析

为检验本文方案在各参数不同数值下的详细的性能,进行了如下仿真实验。选取较短码长 $n = 256$ 与较长码长 $n = 1024$, 分别对应 $N = 64$ 和 $N = 256$ 数量的 16QAM 调制符号, 每组符号都选取 $a = 8$ 和 $a = 32$ 不同的修正位数, 并且分别取最优(表中 best 部分)和最差(表中 worst 部分)的修正位集, 这里指的最优是指修正指数 Δ_i 与极化子信道的质量的双重考量。具体 PAPR 性能与差错性能如表 2 所示。

表 2 不同码长下 PAPR 性能仿真实验参数

Table 2 Simulation experiment parameters of PAPR performance under different code lengths

| Parameter | Ordinary OFDM | Pro $a=8$, best | Pro $a=8$, worse | Pro $a=32$, best | Pro $a=32$, worse |
|---------------------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Code length | | 256 or 1024 | | | |
| Number of correction bits | N/A | 8 | 8 | 32 | 32 |
| Quality of Δ_i and sub-channel | N/A | Best | Worse | Best | Worse |

PAPR 性能如图 5 所示, 在 $n = 256$, $N = 64$ 条件下, 选取 $a = 8$, 由于选取修正比特位数相对较少, 当选取修正指数 Δ_i 最差的修正位集的结果对比修正的情况时, PAPR 性能增益几乎可以忽略; 当选取修正指数 Δ_i 最佳的修正位集时, PAPR 性能得到了较大改善。在互补累积分布函数 (CCDF) 为 10^{-4} 时, 具有约 2.5 dB 的性能增益, 提高约 20.7%。修正位集的选择需要考虑优先分配较高容量的极化

子信道, 由于受到编码码长本身较短的限制, 所以 $a = 32$ 选取最差修正指数 Δ_i 的效果并没有 $a = 8$ 选择最佳修正指数 Δ_i 的修正位集的增益高, 在 CCDF 为 10^{-4} 时, 两者相差约 0.4 dB, 对比未修正方案提高约 24.5%。而选取最佳修正指数 Δ_i 情况下, 在 CCDF 为 10^{-4} 时, 对比未修正的输出符号, 具有 4.9 dB 的性能增益, 提高约 46.2%。

在 $n = 1024$, $N = 256$ 条件下, 选取 $a = 8$, 由于

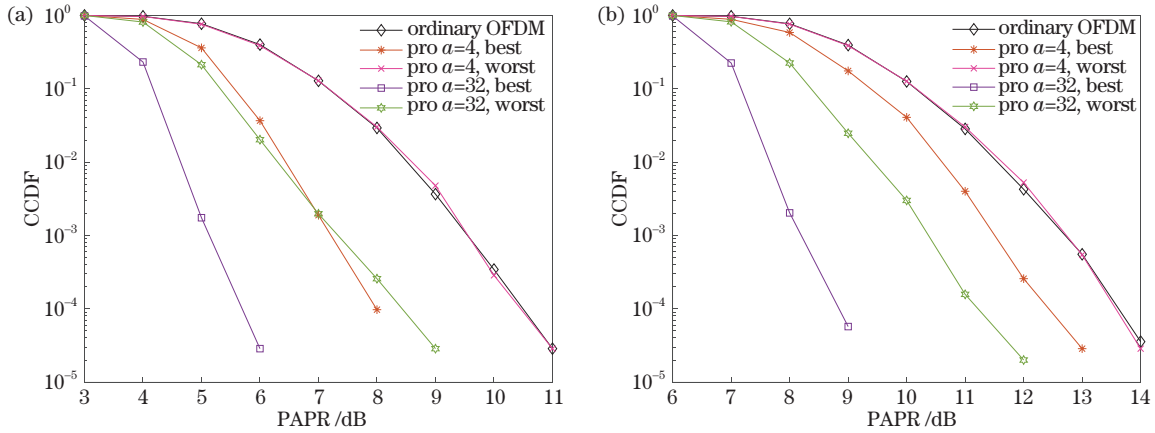


图 5 PAPR 的性能对比。(a) $n=256, N=64$; (b) $n=1024, N=256$

Fig. 5 Performance comparison of PAPR. (a) $n=256, N=64$; (b) $n=1024, N=256$

码长更长,选取位数相对较少,当选取修正指数 Δ 最差的修正位集的结果对比修正的情况时,PAPR 性能增益几乎可以忽略;当选择修正指数 Δ 最佳的修正位集时,PAPR 性能得到了较大改善,在 CCDF 为 10^{-4} 时,具有约 1.1 dB 的性能增益,提高约 8.1%。由于码长长度增大,修正位的选取和子信道的分配冗余度更高,所以 $a=32$ 选取最差修正指数 Δ 的效果与 $a=8$ 选择修正指数 Δ 最佳的修正位集的效果拉开了差

距,在 CCDF 为 10^{-4} 时,两者相差约 1.2 dB,对比未修正方案提高约 16.9%。而选取最佳修正指数 Δ 情况下,在 CCDF 为 10^{-4} 时,对比未修正的输出符号,具有 4.8 dB 的性能增益,提高约 35.2%。

差错性能仿真参数结果如表 3 所示,由于需要选取高质量的子信道优先分配给修正位集,所以会牺牲较少的系统差错性能,但本质上是增大 Polar 码的码率 k/n ,从而在一定程度上降低系统的差错性能。

表 3 差错性能仿真实验参数

Table 3 Simulation experiment parameters of error performance

| Group | Ordinary OFDM | Pro $a=8$, best | Pro $a=8$, worst | Pro $a=32$, best | Pro $a=32$, worst |
|-------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Code length | | 256 or 1024 | | | |
| | 128/256 | (128+8)/256 | (128+8)/256 | (128+32)/256 | (128+32)/256 |
| Bit rate | and | and | and | and | and |
| | 512/1024 | (512+8)/1024 | (512+8)/1024 | (512+5)/1024 | (512+32)/1024 |

从图 6 可以看出,选取的修正位数 a 越多,PAPR 降低效果越好,对系统的负担就越大,差错性能损失就越严重。在 $n=256, N=64$,误块率

(BLER) 为 10^{-2} 时,4 种修正后的方案对比未修正方案 BLER 性能损失呈阶梯式增长,均不超过 0.06 dB 并逐渐减小。

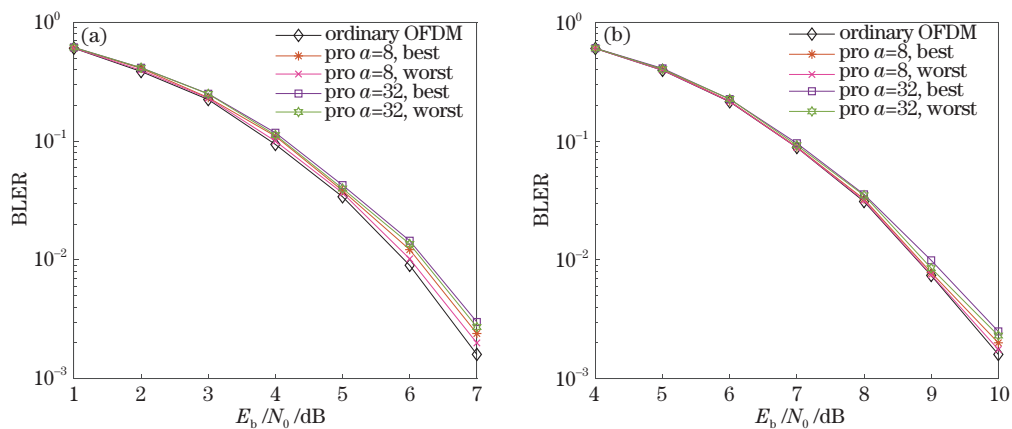


图 6 差错性能仿真。(a) $n=256, N=64$; (b) $n=1024, N=256$

Fig. 6 Simulation of error performance. (a) $n=256, N=64$; (b) $n=1024, N=256$

当 $n = 1024$, $N = 256$ 时, 由于码长较大, 修正位数 $a = 8$, 对比整体并不会造成实质上的影响, 差错性能损失几乎可以忽略不计。

3.2 不同方案的性能对比

首先进行了本文方案(Pro PC-OFDM)与文献[12]方案(PC-SLM 1)和文献[13]方案(PC-SLM 2)的性能对比, 选取 Polar 码长 $n = 512$, 码率 $k = 1/2$ (即本文方案修正位占据部分信息位), 同时本文方案的 Polar 码所需修正比特数量 a 与文献[12]和[13]中的编码冗余部分数量 q 保持相同, 分别对比了 $q = 32, a = 32, q = 16, a = 16, q = 8, a = 8$ 三种情况的 PAPR 与 BLER 性能。具体实验参数如表 4 所示。

表 4 不同方案 PAPR 性能对比的仿真实验参数
Table 4 Simulation experiment parameters for PAPR performance comparison of different schemes

| Scheme name | Code length | Code rate | Number of candidate signals | | |
|---------------|-------------|-----------|-----------------------------|--------|-------|
| Pro PC-OFDM | 512 | 1/2 | $a=32$ | $a=16$ | $a=8$ |
| PC-SLM 1 | 512 | 1/2 | $q=32$ | $q=16$ | $q=8$ |
| PC-SLM 2 | 512 | 1/2 | $q=32$ | $q=16$ | $q=8$ |
| Ordinary-OFDM | 512 | 1/2 | N/A | N/A | N/A |

如图 7 所示, 本文方案“Pro PC-OFDM”在 PAPR 性能上略优于参与对比的 PC-SLM 方案, 在 $q = 32, a = 32, q = 16, a = 16, q = 8, a = 8$, CCDF = 10^{-4} 的情况下, 对比“PC-SLM 1”方案分别有 0.2 dB、0.15 dB 和 0.1 dB 的 CCDF 性能提升; 对比“PC-SLM 2”方案分别有 0.3 dB、0.2 dB 和 0.15 dB 的 CCDF 性能提升。

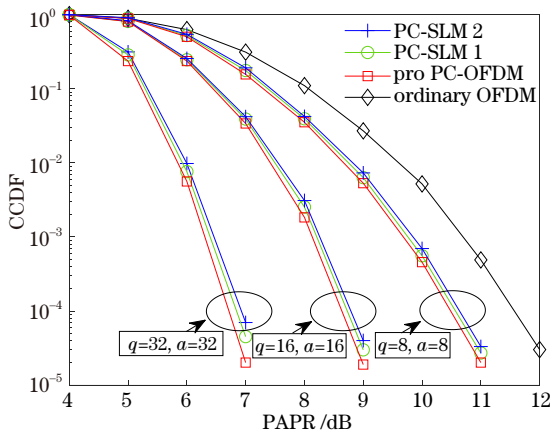


图 7 各方案 PAPR 抑制性能对比
Fig. 7 Comparison of PAPR inhibition performance of each scheme

对比“PC-SLM 1”方案, “PC-SLM 2”方案的各复数信号独立性不强, 即所产生的附属信号候选数量太低, 不足以选择最佳的 OFDM 信号, 同时由于本文方案是通过离线仿真的方式, 参考了修正位有可能产生的重复编码, 故性能较优于其他两者。

表 5 各方案 BLER 性能的仿真实验参数
Table 5 Simulation experiment parameters for BLER performance of each scheme

| Scheme name | Code length | Code rate | Number of candidate signals |
|---------------|-------------|---------------|-----------------------------|
| Pro PC-OFDM | 512 | 1/4, 1/2, 3/4 | $a=16$ |
| PC-SLM 1 | 512 | 1/4, 1/2, 3/4 | $q=16$ |
| PC-SLM 2 | 512 | 1/4, 1/2, 3/4 | $q=16$ |
| Ordinary-OFDM | 512 | 1/4, 1/2, 3/4 | N/A |

如图 8 所示, 在较低码率时, 本文方案“Pro PC-OFDM”对比“PC-SLM 1”方案没有明显的 BLER 性能差异, 在较高码率 $r = 3/4$ 时, 本文方案“Pro PC-OFDM”在 BLER 为 10^{-4} 的情况下, 存在不足 0.1 dB 的性能优势, 两者对比可知, “PC-SLM 2”方案在不同码率情况下都存在较为明显的 BLER 性能优势, 这是因为相比“PC-SLM 2”与“PC-SLM 1”方案, 本文方案都没有添加冗余信息。

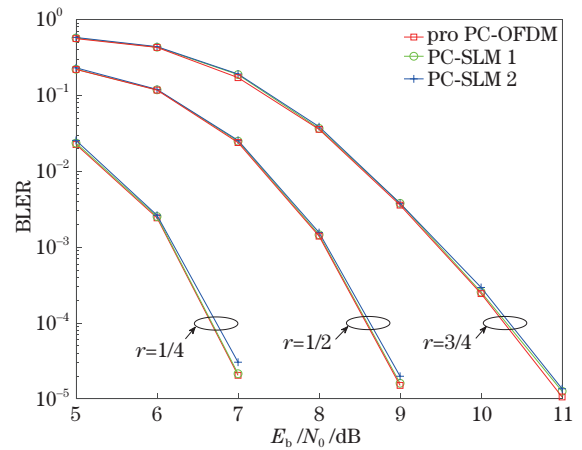


图 8 各方案 BLER 性能
Fig. 8 BLER performance of each scheme

4 结 论

本文提出一种 PC-OFDM 方案以解决 VLC 采取 OFDM 技术时 PAPR 过高的问题。系统初始阶段根据峰均比增长参数与极化子信道质量确定最佳修正位集, 以生成多个 OFDM 符号候选, 最终筛选具有最低 PAPR 的符号作为输出符号。仿真结果表明, 本文所提方案在常用码长 $n = 1024$, 子载

波数目 $N = 256$, 选取修正位数 $a = 32$ 时, 峰均比有 4.9 dB 的减少。在较短码长 $n = 512$ 情况下, 对比类似方案存在 0.2 dB 的 CCDF 性能增益, 在码率为 1/4、1/2 和 3/4 情况下, BLER 性能具有较小的提升, 能够明显改善由于 PAPR 过高引起的非线性失真, 延长 VLC 系统设备的使用寿命。在不压缩信息位即增加较小码率的情况下, 选取 BLER 为 10^{-2} , 性能损失只有 0.1 dB, 且本文方案并未改变 Polar 码的构造以及解码过程, 不会增加编解码复杂度。

参 考 文 献

- [1] Yu B Y. Research on key technologies of lighting LED based indoor high speed visible light communication [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
余冰雁. 基于照明 LED 的室内高速可见光通信关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [2] Wu K Q, He J, Ma J, et al. A BIPCM scheme based on OCT precoding for a 256-QAM OFDM-VLC system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(21): 1866-1869.
- [3] Zhang W, Zhang C F, Chen C, et al. Joint PAPR reduction and physical layer security enhancement in OFDMA-PON[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(9): 998-1001.
- [4] Ali N, Almahainy R, Al-Shabli A, et al. Analysis of improved μ -law companding technique for OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2017, 63(2): 126-134.
- [5] Wunder G, Fischer R F H, Boche H, et al. The PAPR problem in OFDM transmission: new directions for a long-lasting problem[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(6): 130-144.
- [6] Han S H, Lee J H. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(2): 56-65.
- [7] Jones A E, Wilkinson T A, Barton S K. Block coding scheme for reduction of peak to mean envelope power ratio of multicarrier transmission schemes[J]. Electronics Letters, 1994, 30(25): 2098-2099.
- [8] He C C, Wu Y T, Han M X, et al. A low-complexity SLM scheme for peak-to-average power ratio reduction in IM/DD O-OFDM systems[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0806003.
何聪聪, 吴雅婷, 韩梦欣, 等. 一种降低 IM/DD O-OFDM 系统峰均比功率的低复杂度 SLM 方案[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0806003.
- [9] Müller S H, Huber J B. OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences[J]. Electronics Letters, 1997, 33(5): 368-369.
- [10] Wang Y J, Shao Y F, Chi N. Application of peak-to-average power ratio reduction algorithm using precoding technique in 60 GHz orthogonal frequency-division multiplexing radio-over-fiber system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706018.
王燕瑾, 邵宇丰, 迟楠. 预编码峰均比抑制算法在 60 GHz 正交频分复用光载无线通信系统中的应用[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706018.
- [11] Xin Y, Fair I J. Error-control selective mapping coding for PAPR reduction in OFDM systems[C]// IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004, September 26-29, 2004, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 583-587.
- [12] Lim S C, Kim N, Park H. Polar coding-based selective mapping for PAPR reduction without redundant information transmission[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(8): 1621-1625.
- [13] Lu X J, Shi Y X, Li W, et al. A joint physical layer encryption and PAPR reduction scheme based on polar codes and chaotic sequences in OFDM system [J]. IEEE Access, 2019, 7: 73036-73045.