

文章编号: 2095-4980(2015)01-0071-05

降低可见光 OFDM 系统峰均比的新方法

曾福来¹, 刘洛琨¹, 陈侯本², 杨金金¹

(1.信息工程大学 信息系统工程学院, 河南 郑州 450002; 2.91230 部队, 福建 福州 350000)

摘要: 可见光正交频分复用(OFDM)系统的一个主要缺点是系统的峰均比(PAPR)较高, 会引起信号失真。为了降低可见光 OFDM 通信系统的峰均比, 本文将选择性映射(SLM)方法引入可见光通信系统中, 并将其进行适当的改进, 使之满足可见光通信信号必须为正的实信号的要求。提出将离散傅里叶变换展开(DFTS)与 SLM 相结合(DFT-S-SLM)的方法来进一步降低可见光 OFDM 系统的峰均比。仿真结果表明, 与原信号、仅采用 DFT 展开或者 SLM 方法相比, 在增加一定的系统复杂度的情况下, DFT-S-SLM 方法具有更好的峰均比性能。

关键词: 可见光通信; 正交频分复用; 峰均功率比; 选择性映射; 离散傅里叶变换展开

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201501.0071

A new method to reduce the PAPR of OFDM signal in visible light communication system

ZENG Fulai¹, LIU Luokun¹, CHEN Houben², YANG Jinjin¹

(1. Institute of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

(2. 91230 Unit, Fuzhou Fujian 350000, China)

Abstract: High Peak to Average Power Ratio(PAPR) is one of the major disadvantages of the Visible Light Communication(VLC) Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) system as it can cause signal distortion. A Selective Mapping(SLM) method is introduced in order to reduce the PAPR of OFDM signal in VLC system, which is modified to suit the demand that the signals must be positive and real. A method combining the Discrete-Fourier-Transform Spread(DFTS) and SLM is proposed to reduce the PAPR in VLC OFDM system further. The simulation results show that, comparing with the original signal, DFTS or SLM method used alone, the DFT-S-SLM method has the best PAPR performance at the cost of a certain increase of system complexity.

Key words: Visible Light Communication; Orthogonal Frequency Division Multiplexing; Peak to Average Power Ratio; selective mapping; Discrete Fourier Transform Spread

正交频分复用(OFDM)技术具有频谱利用率高、抗干扰能力强等优点, 在可见光通信系统中得到了广泛的应用^[1-3]。但由于 OFDM 是一种多载波调制方式, 高峰均比(PAPR)问题成为可见光 OFDM 系统中的一个突出问题^[4-5]。高峰均比信号会对发光二极管(Light Emitting Diode, LED)提出很高的要求。反过来, LED 的非线性特性也会对高峰均比信号产生干扰, 从而大大降低系统的性能。因此, 降低光 OFDM 系统的峰均比受到人们的极大关注。目前, 提出了多种降低峰均比的方法^[6-9]。其中, 选择性映射法(SLM)^[8]具有不会对信号产生畸变等优点, 得到了广泛应用。为了进一步降低可见光 OFDM 系统的峰均比, 本文提出一种将离散傅里叶变换展开(DFTS)与 SLM 相结合的方法(DFT-S-SLM), 来联合降低系统的峰均比。

1 DFT-S-SLM 系统原理框图

由于 OFDM 信号是由多个相互独立的子载波信号叠加而成的, 如果各子载波信号均以相同的相位相加时,

收稿日期: 2014-01-14; 修回日期: 2014-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271253); 国家 863 计划资助项目(2013AA013603)

得到的合成信号就有可能产生比较大的峰值功率，严重影响系统的性能。离散信号 x_n 的峰均比可以定义为：

$$PAPR = \frac{P_{peak}}{P_{average}} = 10 \log \frac{\max |x(n)|^2}{E[|x(n)|^2]} \quad (1)$$

DFT 展开与 SLM 方法相结合的系统原理框图如图 1 所示。输入的随机二进制数据流通过符号映射和串并变换后，进行离散傅里叶变换展开，以此来降低输入信号的自相关性，然后再通过 SLM 方法来进一步降低可见光 OFDM 系统的峰均比。下面介绍 DFT 展开与 SLM 方法的具体方法。

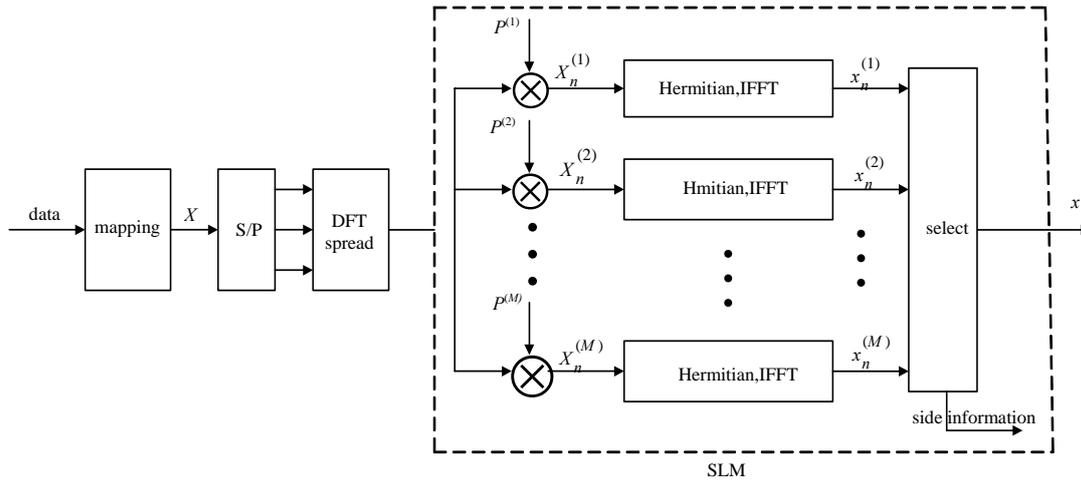


Fig.1 Principle diagram of DFT-S-SLM algorithm
图 1 DFT-S-SLM 算法的原理框图

2 DFT 展开方法简介

离散傅里叶变换展开方法是一种利用对频域信号进行 DFT 扩展来降低 OFDM 信号的 PAPR 值的技术^[10]。与普通的 OFDM 系统的不同之处在于，DFT 展开与 OFDM 技术相结合的传输方案(DFT-S-OFDM)首先将频域符号进行 DFT 展开和子载波分配，然后再进行 IFFT 变换，得到 OFDM 时域信号。

OFDM 系统的峰均比与输入信号的自相关函数有密切联系^[11]。两者的关系如下所示：

$$PAPR \leq 1 + \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N-1} |R_k| \quad (2)$$

式中： N 表示子载波的个数； R_k 为输入信号的自相关函数，它可以表示为：

$$R_k = \sum_{n=1}^{N-k} X_{n+k} X_n^*, \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

从式(3)可以看出，通过减小输入信号序列的自相关函数来降低 OFDM 信号的峰均比。由此，可以用离散傅里叶逆变换(IDFT)的方法来降低信号的自相关性^[12]，从而降低系统的峰均比；同时，通过离散傅里叶变换展开的方法来降低 OFDM 系统的峰均比^[10]。因此，根据这一性质，可以利用 DFT 展开的方法来减小输入信号序列的自相关函数，从而减小 OFDM 信号的峰均比。

图 2 所示为 DFT 展开方法的示意图，其具体步骤为：

Step 1：设待调制发送的频域信号为 $X=[X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]$ ， N 为子载波的个数。把输入信号序列 X 分割为 k 组互不重叠的子块，记为 $\{X_i, i=1, 2, \dots, k\}$ ，每个子块的长度是

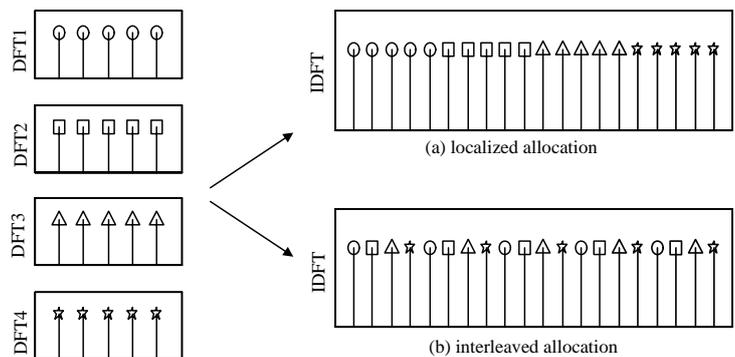


Fig.2 Schematic diagram of DFT Spread method
图 2 DFT 展开方法示意图

相同的。

Step 2: 对每个子块分别进行离散傅里叶变换(DFT), DFT 变换的长度与各个子块的数据长度相同。为了降低系统的复杂度, 可以用快速傅里叶变换(FFT)来代替 DFT 变换。

Step 3: 将每个子块进行 FFT 变换后得到的信号序列分配给每个子载波, 分配的方式有 2 种: 一种是集中式分配(Localized allocation), 如图 2(a)所示, 该方法将每个 FFT 输出序列子块依次集中映射到一组连续的子载波上; 第二种分配方法是插值分配(Interleaved allocation), 如图 2(b)所示, 每次从不同的 FFT 输出序列子块中各选择一个符号依次映射到一组连续的子载波上, 依次循环下去, 直到分配完成。

与 SLM 方法一样, DFT 展开法也是一个线性过程。文献[13]指出, 经过 DFT 展开后, 不会造成信号失真, 得到的输出信号幅度只是变为输入信号幅度的 $1/k$ 。因此, DFT 展开法能有效地降低 OFDM 信号的 PAPR 值, 不会造成系统误码率性能下降。

3 SLM 方法在可见光 OFDM 系统中的应用及其改进

选择性映射方法是信号加扰技术中的一种典型算法, 它最早由 Bauml R W 和 Fischer R 等人于 1996 年提出^[8], 其基本原理是利用多个相互独立的序列来表示同一组信息, 从中选择 PAPR 值比较小的序列进行传输, 从而减小高 PAPR 值信号出现的概率。SLM 算法在 VLC 系统中的原理框图如图 3 所示。

设待发送的频域数据为 $X_n = \{X_0, X_1, \dots, X_{N-1}\}$, 假设存在 M 组长度为 N 的不同的随机相位序列 $P^{(\mu)} = (P_0^{(\mu)}, P_1^{(\mu)}, \dots, P_{N-1}^{(\mu)})$, 其中, $\mu = 1, 2, \dots, M$, $P_i^{(\mu)} = \exp(j\varphi_i^{(\mu)})$, $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。式中, $\varphi_i^{(\mu)}$ 一般取在 $[0, 2\pi]$ 成均匀分布, 被称为边带信息(Side information)。

然后将这 M 组随机相位序列与频域数据 X_n 进行点乘, 则可以得到:

$$X^{(\mu)} = (X_0^{(\mu)}, X_1^{(\mu)}, \dots, X_{N-1}^{(\mu)}) = \langle X \bullet P^{(\mu)} \rangle = (X_0 P_0^{(\mu)}, X_1 P_1^{(\mu)}, \dots, X_{N-1} P_{N-1}^{(\mu)}) \quad (4)$$

式中 $\langle \bullet \rangle$ 表示向量的点乘运算。这里要注意的是, 可见光 OFDM 通信系统一般是采用 IM/DD 的方式, 光 OFDM 基带信号必须是实信号。因此, SLM 方法要做适当的改进才能适合在 VLC 系统中应用。与射频 OFDM 通信系统中的 SLM 方法不同的是, 在 VLC 系统中, 这里在对每路频域信号进行 IFFT 变换之前, 要将频域信号映射成厄密特共轭对称的形式, 以满足 IFFT 输出的时域 OFDM 信号为实信号的要求。然后再将产生的序列分别进行 IFFT 变换, 得到 M 个相应的 OFDM 时域实信号 $x^{(\mu)} = (x_0^{(\mu)}, x_1^{(\mu)}, \dots, x_{N-1}^{(\mu)})$ 。最后从这 M 个序列中选择 PAPR 最小的信号进行传输, 即满足 $PAPR_{SLM} = \min\{PAPR_1, PAPR_2, \dots, PAPR_M\}$ 的信号将代表原信号发送出去。

在接收端, 为了能够正确地恢复出原始数据, 就必须知道在发送端是哪一组随机相位序列 $\{P^{(\mu)}, \mu = 1, 2, \dots, M\}$ 与频域数据进行了点乘运算。因此, 发送端必须用 $\log_2 M$ 个比特来传送随机相位序列信息, 这样就引入了冗余信息, 降低了信息传输速率。

设峰均比的某一门限值为 $PAPR_0$, 令原始 OFDM 信号超过门限值 $PAPR_0$ 的概率为 $\Pr(PAPR > PAPR_0)$, 则原始信号经过 SLM 方法处理后, 所得的 SLM-OFDM 信号的 PAPR 值超过门限值 $PAPR_0$ 的概率, 即这 M 个序列 $\{x^{(\mu)}, \mu = 1, 2, \dots, M\}$ 的 PAPR 值均大于门限值 $PAPR_0$ 的概率变为 $[\Pr(PAPR > PAPR_0)]^M$ 。

因此, 很容易看出, SLM 方法能够显著降低 OFDM 信号的 PAPR 值; 而且 SLM 是线性过程, 不会产生信号畸变, 因此它不会造成系统误码率性能的下降。但同时其付出的代价也是十分明显的, 既需要在发送端进行 M 次向量点乘运算和计算 M 组信息序列的 IFFT 变换, 还要计算出 M 组信号的峰均比, 增加了系统的复杂度, 而且为了在接收端能正确解调而引入了冗余信息。

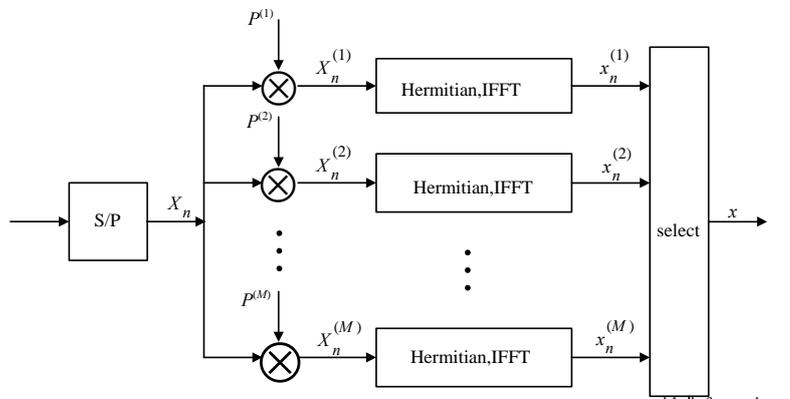


Fig.3 Principle diagram of SLM method in VLC system
图 3 SLM 算法在 VLC 系统中的原理框图

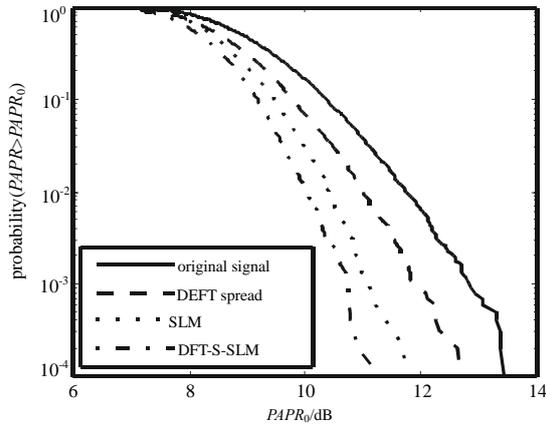


Fig.4 Performance simulation of DFT-S-SLM algorithm
图4 DFT-S-SLM 算法的性能仿真

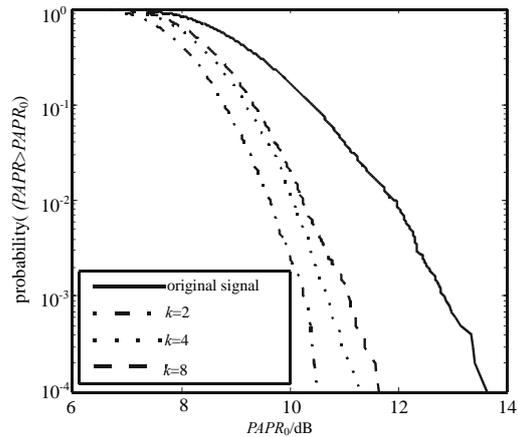


Fig. 5 Effect of the number of DFT Spread groups on PAPR performance
图5 DFT 展开的子块个数对 PAPR 性能的影响

4 仿真验证

下面对本文提出的算法进行 MATLAB 仿真验证, 并讨论参数的改变对系统峰均比性能的影响。

图 4 所示为在 DCO(DC-biased Optical)-OFDM 系统中, DFT-S-SLM 算法与原信号、DFT 展开和 SLM 算法的峰均比性能比较。仿真参数为: 采用 16APSK 调制, 子载波个数为 128, DFT 展开成 4 个子块, SLM 算法的随机相位序列个数为 2, 相位集合为 $\{1, -1\}$, 仿真次数为 10^4 。从图中可以看出, 采用 DFT-S-SLM 方法的 PAPR 性能最好, 原信号的性能最差, 仅采用 SLM 方法和 DFT 展开方法的性能介于两者之间。

图 5 所示为 DFT-S-SLM 算法中, DFT 展开的子块个数对 PAPR 性能的影响。DFT 展开的子块个数分别为: 2, 4, 8。其他参数同前。从图中可以看出, DFT 展开的子块个数为 2 时, 系统的 PAPR 抑制性能最好, 随着子块个数的增加, 系统的 PAPR 抑制性能也越来越差。

图 6 所示为 DFT-S-SLM 算法的 M 值大小对 DFT-S-SLM 算法的峰均比性能的影响仿真。随机相位序列的个数分别为 4, 8, 16。从图中可以看出, 随机序列的个数为 16 时, 可见光 OFDM 系统的峰均比性能最好, 随着随机序列个数的减小, OFDM 系统的峰均比性能也随之下降, 即随机序列的个数越多, VLC 系统的峰均比性能越好。付出的代价是系统的复杂度也随之增大。因此, 在实际应用中, 要综合考虑系统的峰均比性能和复杂度等因素的折中。

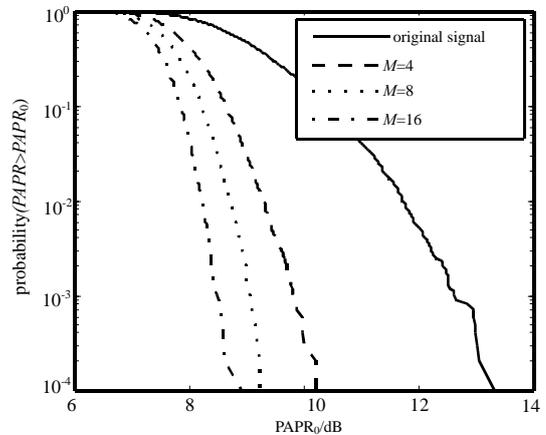


Fig.6 Effect of different M values on PAPR performance of DFT-S-SLM algorithm
图6 M 值大小对 DFT-S-SLM 算法的 PAPR 性能的影响

5 结论

LED 的非线性特性是影响可见光通信系统性能的一个主要因素。高的峰均比信号对 LED 等非线性器件提出了比较高的要求, 同时也会造成信号非线性失真。为了降低可见光 OFDM 系统的峰均比, 本文提出将 DFT 展开与 SLM 相结合的方法来联合降低系统的峰均比。仿真结果表明, 与原信号仅采用 DFT 展开和仅采用 SLM 方法相比, DFT-S-SLM 方法能够明显降低可见光 OFDM 系统的峰均比。

参考文献:

- [1] Armstrong J, Lowery A J. Power efficient optical OFDM[J]. Electronics Letters, 2006, 42(6):370-372.
- [2] Elgala H, Mesleh R, Haas H, et al. OFDM visible light wireless communication based on white LEDs[C]// in Proc. of the 64th IEEE Vehicular Technology Conference(VTC). Dublin, Ireland:[s.n.], 2007:22-25.

- [3] 刘莉红,冯辉,杨涛,等. 一种针对 MIMO-OFDM 相关信道的去耦合预测方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(2):203-209. (LIU Lihong,FENG Hui,YANG Tao,et al. A decoupled predictor for correlated MIMO-OFDM channel[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):203-209.)
- [4] Elgala H,Mesleh R,Haas H. Non-linearity effects and predistortion in optical OFDM wireless transmission using LEDs[J]. International Journal of Ultra Wideband Communications and Systems, 2009,1(2):143-150.
- [5] AI Bo,YANG Zhixing,PAN Changyong,et al. Effects of PAPR reduction on HPA predistortion[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005,51(4):1143-1147.
- [6] DONG Jiame,ZHAO Tonglin,ZHONG Lihui. A low-PAPR OFDM algorithm with the guaranty for data security[C]// IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation,Control,and Intelligent Systems(CYBER). Kunming China:IEEE, 2011:48-50.
- [7] Bandara K,Niroopan P,CHUNG Yeon-Ho. PAPR reduced OFDM visible light communication using exponential nonlinear companding[C]// IEEE International Conference on Microwaves,Communications,Antennas and Electronics Systems(COMCAS). Tel Aviv:IEEE, 2013:1-5.
- [8] Bauml R W,Fischer R F H,Huber J B. Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping[J]. Electronics Letters, 1996,32(22):2056.
- [9] Nakamura Y,Saito M. Evaluation of clipping effect on OFDM signals for visible light communications[C]// International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications System(ISPACS). Naha:IEEE, 2013:753-757.
- [10] Myung H G,Junsung Lim,Goodman D. Peak-to-average power ratio of single carrier FDMA singles with pulse shaping[J]. IEEE 17th International Symposium on Personal,Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC), 2006,58(6):1-5.
- [11] TELLAMBURA C. Upper bound on peak factor of N-multiple carriers[J]. Electronics Letters, 1997,33(19):1608-1609.
- [12] 朱晓东,朱光喜,林沛. 基于线性变换降低 OFDM 系统中峰均功率比的方法[J]. 计算机工程与科学, 2009,31(7):109-111. (ZHU Xiaodong,ZHU Guangxi,LIN Pei. A scheme based on linear transformation to reduce PAPR in the OFDM systems[J]. Computer Engineering&Science, 2009,31(7):109-111.)
- [13] FANG Yuan,TAO Li,CHI Nan. Interleaved subcarrier allocation for DFT-spread OFDM to reduce PAPR[C]// 2012 17th Opto-Electronics and Communications Conference(OECC 2012). Busan,Korea:IEEE, 2012:341-342.

作者简介:



曾福来(1985-),男,福建省莆田市人,助理工程师,主要研究方向为可见光通信.email: 815068588@qq.com.

刘洛琨(1963-),男,河南省洛阳市人,博士,教授,主要研究方向为卫星通信和超宽带无线通信系统.

陈侯本(1985-),男,福建省莆田市人,助理工程师,主要研究方向为通信信号处理.

杨金金(1990-),女,安徽省亳州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为阵列信号处理.