

降低可见光通信不均匀限幅正交频分复用系统 非线性限幅失真的功率分配方法

陆庆峰¹ 季新生^{1,2} 黄开枝¹ 罗文字¹

(¹ 国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002)

(² 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要 针对可见光通信中不均匀限幅光正交频分复用(ACO-OFDM)系统发光二极管(LED)非线性限幅失真严重的问题,提出了一种降低 LED 非线性限幅失真的最优功率分配方法。基于原信号直接叠加非线性限幅失真成分的限幅处理模型,分析了 ACO-OFDM 系统中的 LED 非线性限幅失真;利用有效信噪比来衡量限幅失真,将限幅失真转化为有效信噪比分析;基于有效信噪比最优的原则给出了光功率约束下降低限幅失真的最优偏置信号和 ACO-OFDM 信号功率分配。仿真结果表明,当信道的信噪比较低时,信道噪声起主导作用;当信道的信噪比较高时,限幅失真起主导作用。在光功率约束下若不考虑偏置信号的影响而直接取其值为 LED 最小输出功率限制,则系统误码率(BER)在信道信噪比大于 40 dB 的情况下也始终大于 10^{-2} ,而采用最优功率分配时可以保证系统具有较好的误码率性能,当光功率约束为 200 mW 和 250 mW 时,分别需要 24 dB 和 27 dB 的信道信噪比即可使得系统的误码率低于 10^{-3} 。

关键词 光通信;可见光通信;不均匀限幅光正交频分复用;限幅失真;功率分配

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0706004

Power Allocation Method for Reducing Nonlinearity Clipping Distortion in Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing Based Visible Light Communication

Lu Qingfeng¹ Ji Xinsheng^{1,2} Huang Kaizhi¹ Luo Wenyu¹

¹ National Digital Switching System Engineering and Technological Research Center, Zhengzhou, Henan 450002, China

² National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

Abstract To handle the significant light emitting diode (LED) nonlinearity clipping distortion problem in asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing (ACO-OFDM) based visible light communication systems, an optimal power allocation method for reducing the clipping distortion is proposed. The LED nonlinear clipping distortion of the system is analyzed based on the clipping process model that original signal directly adds nonlinear clipping distortion components. The effective signal to noise ratio (SNR) is defined to measure the clipping distortion, and the clipping distortion analysis is converted into SNR analysis. Finally, the optimal bias signal and ACO-OFDM signal power allocation under optical power constraints based on the principle of effective SNR optimum are proposed. Simulation results show that the channel noise dominates at low channel SNR value while clipping distortion dominates at high channel SNR value. Bit error rate (BER) is greater than 10^{-2} even the channel SNR value beyond 40 dB if the bias power is selected as the minimum output power limit value of LED

收稿日期: 2014-01-21; **收到修改稿日期**: 2014-03-21

基金项目: 国家 863 计划(2013AA013603)、东南大学移动通信国家重点实验室开放基金(2013D09)

作者简介: 陆庆峰(1989—),男,硕士研究生,主要从事可见光通信、通信信号处理等方面的研究。

E-mail: tsingfenglu@126.com

导师简介: 季新生(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事移动通信网及其安全技术、可见光通信等方面的研究。

E-mail: jxs@mail.ndsc.com.cn

without considering, while optimal power allocation can effectively reduce the LED nonlinear clipping distortion to improve the BER performance. Channel SNR values of 24 dB and 27 dB are enough to insure that BER is below 10^{-3} under the optical power constraints of 200 mW and 250 mW, respectively.

Key words optical communications; visible light communication; asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing; clipping distortion; power allocation

OCIS codes 060.2605; 060.4080; 060.4510

1 引 言

近年来可见光通信(VLC)越来越受到人们的重视。它将照明和通信有机关联起来,具有发射功率高、无电磁干扰、无频谱认证、节约能源等优点,能够有效缓解无线电频谱资源趋于枯竭的问题^[1-2]。将正交频分复用(OFDM)技术应用到VLC中可以有效提高系统的通信速率,且OFDM通过将高速的数据流进行串并转换,分配到传输速率相对较低的若干个子载波中进行传输,使得每个子载波上的数据符号持续时间相对增加,降低了符号间干扰^[3-4]。在VLC中,强度调制/直接检测的光信号调制方式要求OFDM信号必须为实信号,且满足单极性。不均匀限幅光OFDM(ACO-OFDM)只在奇数载波上调制符号,并消减相应OFDM信号中的负信号来满足单极性,其功率利用率高,是VLC中具有广阔应用前景的单极性OFDM方案^[5]。

在VLC系统中,发光二极管(LED)非线性限幅失真是影响系统性能的重要因素^[6]。LED存在有限的动态工作范围,因此需要对超出该范围的信号进行限幅,这就使得ACO-OFDM信号在发送端存在严重的非线性限幅失真,导致各个子信道之间的正交性遭到破坏,产生相互干扰,降低系统性能。目前已有不少文献对ACO-OFDM方案的性能^[7-9]以及LED非线性限幅失真的影响进行了分析,文献^[10-12]均分析了非线性限幅对ACO-OFDM系统误码率(BER)性能的影响,其中文献^[10]给出了系统有效接收信噪比(SNR)与限幅噪声和信道噪声的关系,文献^[11]研究原信号经过一定的信号衰减并叠加限幅噪声的限幅处理模型中的衰减系数和限幅噪声,文献^[12]提出了一种非线性失真模型,并基于该模型分析LED非线性限幅失真下ACO-OFDM系统的误码率性能。但这些文献没有考虑实际系统的照明需求,也就忽略了偏置信号的影响。实际上,对于给定的照明需求,系统的输出光功率是受约束的,此时系统的非线性限幅失真受偏置信号直接影响,若不考虑偏置信号的影响,则会引入较大的非线性限幅失真,严重影响系统的误码率性能。文献^[13]分析了ACO-OFDM中的亮度控制和限幅失真

问题,通过仿真表明了ACO-OFDM在光功率约束下的性能受偏置信号功率的影响,但其仅通过仿真表明了影响的存在性,未能给出具体的分析,也未提供降低非线性限幅失真的方法。因此,ACO-OFDM系统中的非线性限幅失真以及如何对该失真进行抑制仍然是需要研究的重要问题。

针对这一问题,本文基于原信号直接叠加非线性限幅失真成分的限幅处理模型,综合考虑影响系统性能的输出光功率、偏置信号和LED动态范围等因素,提出了一种降低LED非线性限幅失真的最优功率分配方法。该方法旨在光功率约束条件下,通过合理的偏置信号和ACO-OFDM信号功率分配使得驱动信号尽可能地工作在LED的动态范围内,降低因限幅导致的限幅失真。假设光无线信道为加性高斯白噪声(AWGN)信道,利用最优化功率分配方法首先分析了ACO-OFDM系统的LED非线性限幅失真,给出影响系统限幅失真的相关因素;定义有效信噪比,将限幅失真转化为有效信噪比分析;基于有效信噪比最优的原则将最优功率分配转化为非线性约束优化问题,通过求解该最优化问题得到光功率约束条件下降低LED非线性限幅失真的最优功率分配。仿真结果表明,当信道的信噪比较低时,信道噪声起主导作用;当信道的信噪比较高时,限幅失真起主导作用。对于给定的信道条件,系统性能随输出光功率的增大而降低,即ACO-OFDM适用于输出光功率较低的场景。在低输出光功率约束下,偏置信号越小,相应的限幅失真也越小,即不考虑偏置信号而直接取值为LED最小输出功率限制时是最优的;但当输出光功率较大时,系统的有效信噪比首先随着偏置信号的增大而增大,之后随着偏置信号的增大而减小。若直接选取偏置信号功率为LED最小输出功率限制,则系统误码率在信道信噪比大于40 dB的情况下也始终大于 10^{-2} ,而采用最优功率分配时可以保证系统具有较好的误码率性能,当光功率约束为200 mW和250 mW时,分别只需要24 dB和27 dB的信道信噪比即可使得系统的误码率低于 10^{-3} 。

2 ACO-OFDM 系统模型

ACO-OFDM 通信系统模型如图 1 所示。在发送端, 首先将高速的输入数据流通过串并转换 (S/P, P/S), 分配到传输速率相对较低的若干个子载波。假设子载波采用矩形正交振幅调制 (QAM), $X_n = a_n + ib_n$ 表示第 n 路子载波上的 QAM 调制符号。VLC 系统直接利用基带 OFDM 信号进行强度调制, 这就要求基带信号必须为实信号, 且满足单级性。为此, 将输入到快速傅里叶逆变换 (IFFT) 的 QAM 调制符号 X_n 进行扩展, 使其满足厄米共轭对称性 (HSP), 即 $X_0 = X_{M/2} = 0, X_{M-n} = X_n^*, n = 0, 1, 2, \dots, M/2 - 1$, 其中 M 为 IFFT 长度, H^* 表示 H 的共轭复数。为了进一步获得单级性信号, ACO-OFDM 采取的方式是只在奇数子载波上调制符号并消减得到 OFDM 信号中的负信号。只利用奇数载波的 IFFT 输出信号为

$$x_k = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{n=1,3}^{M-1} X_n \exp\left(j \frac{2\pi kn}{M}\right), \quad k = 0, 1, \dots, M-1, \quad (1)$$

对 x_k 进行负信号消减处理可得 ACO-OFDM 信号为

$$s_k = \begin{cases} x_k, & x_k \geq 0 \\ 0, & x_k < 0 \end{cases}. \quad (2)$$

只利用奇数载波时的信号满足 $x_k = -x_{M/2+k}$, 因此消减负信号并不会导致信号失真, 其对奇数载波的作用只是将其幅度降低一半, 且相应的限幅噪声只作用于偶数子载波。对于较大的子载波数, x_k 可近似为独立同分布的高斯过程。若全部载波均调制的 OFDM 信号的概率密度函数 (PDF) 为 $p_s(x) = N(x; 0, \sigma^2)$, 其中 $N(x; \mu, \sigma^2)$ 表示均值为 μ , 方差为 σ^2 的高斯分布, $\sigma^2 = E[x_k^2]$, 那么 ACO-OFDM 的 PDF 为 $f(x) = N(x; 0, \frac{1}{2}\sigma^2)$ 。因此, 其电信号的均值和功率可表示为^[14]

$$E[s_k] = \int_0^{\infty} x \cdot f(x) dx = \frac{\sigma}{2\sqrt{\pi}}, \quad (3)$$

$$E[s_k^2] = \int_0^{\infty} x^2 \cdot f(x) dx = \frac{1}{4}\sigma^2. \quad (4)$$

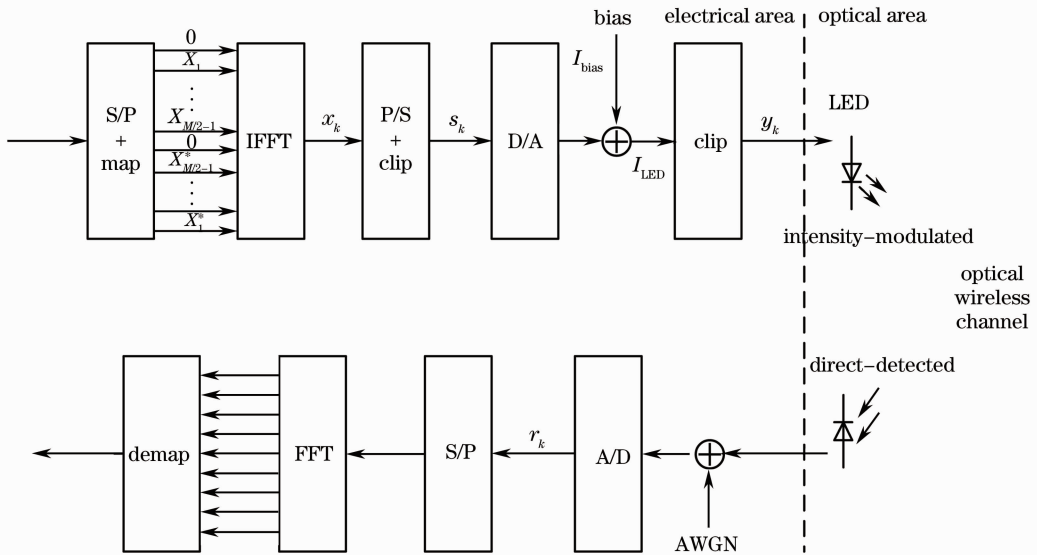


图 1 可见光 ACO-OFDM 通信系统模型

Fig. 1 System model of ACO-OFDM based VLC

考虑到 LED 的有限动态范围, 经过数模转换 (D/A) 的 ACO-OFDM 信号需要进一步添加偏置信号, 并对偏置后超出 LED 动态范围的部分进行限幅, 以保证信号工作在 LED 的安全工作范围。偏置并限幅后的信号驱动 LED 发射光功率, 将信号以光强度的形式发射到光无线信道。在接收端, 利用光电检测器件将接收到的光强度信号转换为电信号, 去除偏置信号得到相应的单级性信号, 然后再经过

串并转换、快速傅里叶变换 (FFT)、解调等相应的处理获得接收数据。

由于 LED 存在有限的动态范围, 超出该范围的信号将会被限幅, 进而引入严重的带内噪声和带外干扰。因此, 应当使得 ACO-OFDM 信号尽可能工作在 LED 动态范围内, 减小限幅引入的非线性失真。本文研究了光功率约束下 ACO-OFDM 系统的非线性限幅失真问题以及降低 LED 非线性限幅失

真的最优功率分配方法。

3 非线性限幅失真分析

LED 发送前端的信号和参数制约可以用输出光功率来描述。假设 LED 有限的动态范围为 $[P_{\min}, P_{\max}]$, 其中 P_{\min} 和 P_{\max} 分别表示 LED 正常工作所允许的最小输出光功率和最大输出光功率。根据预失真后输入电流和输出光功率的线性关系, P_{\min} 和 P_{\max} 分别对应于最小输入电流 I_{\min} 和最大输入电流 I_{\max} , 即 LED 有限的动态范围可表示为 $[I_{\min}, I_{\max}]$ 。将添加的偏置信号标记为 I_{bias} , ACO-OFDM 信号为 I_s , 可得 LED 的前向输入电流为 $I_{\text{LED}} = I_s + I_{\text{bias}}$ 。由于 LED 的动态范围有限, 当 $I_{\text{LED}} > I_{\max}$ 时, 需要对信号进行限幅, 限幅大小为 $e_{\text{top}} = I_{\text{LED}} - I_{\max}$; 同理, 当 $I_{\text{LED}} < I_{\min}$ 时, 信号的加性限幅大小为 $e_{\text{down}} = I_{\min} - I_{\text{LED}}$ 。根据 Bussgang 定理^[15], 将限幅处理建模为原信号直接叠加非线性限幅失真成分以避免复杂的衰减系数和限幅噪声求解, 即

$$\hat{s}_k = s_k + z_k, \quad (5)$$

式中 \hat{s}_k 是限幅后的信号, z_k 是限幅引入的非线性限幅失真成分, 满足 $z_k \sim N(0, \sigma_z^2)$, 其中 σ_z^2 为限幅噪声功率。经过偏置并限幅后的 LED 驱动信号 $y_k = \hat{s}_k + I_{\text{bias}}$ 通过 LED 将电信号转换为光信号发送到光无线信道。

在强度调制/直接检测的 VLC 系统中, 可以用加性高斯白噪声信道作为信道模型^[16-17], 信道噪声包含背景光噪声、接收机散粒噪声、热噪声等, 则接收信号为

$$r_k = s_k + z_k + I_{\text{bias}} + e_k, \quad (6)$$

式中 e_k 表示信道的加性噪声, 满足 $e_k \sim N(0, \sigma_e^2)$, 其中 σ_e^2 为 e_k 方差。可知限幅失真使得系统的总噪声功率增大, 进而影响系统的性能, 因此应当尽量降低限幅失真。

4 最优功率分配

ACO-OFDM 系统的 LED 非线性限幅失真与驱动信号超出 LED 动态范围外的切顶功率损失成正比, 因此, 要降低限幅失真, 应当尽量保证驱动信号工作在 LED 的动态范围内, 降低切顶功率损失。最优功率分配方法首先分析光功率约束条件下 ACO-OFDM 系统的非线性限幅失真, 给出影响切顶功率的相关因素。利用有效信噪比来衡量切顶功

率损失, 将限幅失真分析转化为有效信噪比分析。最后综合考虑影响系统有效信噪比的相关因素, 将最优功率分配转化为非线性约束优化问题, 通过求解该最优化问题得到系统的最优化功率分配。

ACO-OFDM 系统的输出光功率是 ACO-OFDM 信号功率与偏置信号功率的叠加。对于一个给定的信号, 其光功率由电信号的均值决定, 电功率由电信号二次方的均值决定。VLC 的目标是在照明的同时实现通信, 因此照明和误码率性能均是系统需要考虑的重要因素。照明分布与输出光功率有关, 考虑到人眼的安全、亮度调节等因素, VLC 的输出光功率是受约束的, 特别是室内场景, 对于某一照明需求, 光功率约束可表示为 $P_s + P_{\text{bias}} = P_{\text{opt}}$, 其中 P_s 表示限幅后的 ACO-OFDM 信号光功率, P_{bias} 表示偏置信号光功率, P_{opt} 表示光功率约束。该约束也可描述为 $\phi(\sigma, I_{\text{bias}}) = E[s_k] + I_{\text{bias}} = I_{\text{con}}$, 其中 I_{con} 是对应于输出光功率的驱动电流值, ϕ 表示 I_{con} 与偏置信号和 ACO-OFDM 信号电流值之间的关系函数。

在光功率约束条件下, 若偏置信号过大, 会使得驱动信号趋近 LED 的限制范围, 不仅会导致较大的非线性限幅失真, 而且会降低系统的光调制度, 调制度定义为交流信号峰峰值与偏置信号之间的比例关系, 理论上来说调制度越高, 光信号越容易被探测到; 若偏置信号过低, 为满足光功率约束, 需要增大 ACO-OFDM 信号的功率, 其幅度随之增大, 同样会引入较大的非线性失真。因此, 要最优化系统的性能, 必须综合考虑偏置信号、输出光功率和 LED 动态范围等相关因素。系统的性能可以通过有效信噪比 $R_{\text{SN}}^{\text{eff}}$ 来估计, 其定义为有效接收信号和总噪声的功率比^[18-19], 即

$$R_{\text{SN}}^{\text{eff}} = \frac{E[s_k]^2}{\sigma_z^2 + \sigma_e^2}. \quad (7)$$

假设添加的偏置信号不小于 LED 的最小输入电流限制, 即 $I_{\text{bias}} \geq I_{\min}$, 实际系统一般均满足这一假设, 因为 OFDM 信号服从高斯分布, 小信号出现的概率较大, 若 $I_{\text{bias}} < I_{\min}$, 则意味着信号下限限幅的概率大, 会导致严重的限幅失真, 且影响到正常的照明需求。当满足 $I_{\text{bias}} \geq I_{\min}$ 时, 只有大于最大输入电流限制的信号才会进行限幅, 因此经过偏置并限幅后的驱动信号为

$$y_k = \begin{cases} s_k + I_{\text{bias}}, & x_k < I_{\max} - I_{\text{bias}} \\ I_{\max}, & x_k > I_{\max} - I_{\text{bias}} \end{cases}, \quad (8)$$

记 $I_{\max} - I_{\text{bias}} = c_u$, 则限幅后的 ACO-OFDM 信号可

化简为

$$\hat{s}_k = \begin{cases} s_k, & x_k < c_u \\ c_u, & x_k > c_u \end{cases}, \quad (9)$$

由此可求得其均值为

$$E[\hat{s}_k] = \int_0^{\infty} \hat{s}_k \cdot f(x) dx = -\frac{\sigma}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{c_u^2}{\sigma^2}\right) + \frac{\sigma}{2\sqrt{\pi}} + c_u Q\left(\frac{\sqrt{2}c_u}{\sigma}\right) = \frac{\sigma}{2\sqrt{\pi}} [1 - \exp(-\eta^2)] + \sigma \eta Q(\sqrt{2}\eta), \quad (10)$$

限幅噪声功率 σ_z^2 等于超出最大功率限制的切顶功率损失：

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 &= \int_{c_u}^{+\infty} (x - c_u)^2 f(x) dx = \frac{\sigma_u}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{c_u^2}{\sigma^2}\right) + \frac{1}{2}\sigma^2 Q\left(\frac{\sqrt{2}c_u}{\sigma}\right) - \frac{\sigma_u}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{c_u^2}{\sigma^2}\right) + c_u^2 Q\left(\frac{\sqrt{2}c_u}{\sigma}\right) = \\ &= \frac{1}{2}\sigma^2 Q(\sqrt{2}\eta)(1 + \eta^2) - \frac{\sigma^2 \eta}{2\sqrt{\pi}} \exp(-\eta^2), \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $\eta = c_u/\sigma$ 定义为规范化的上限限幅度, $Q(x)$ 定义为标准正态随机变量超过定值 x 的概率

$$Q(x) = P[N(0,1) > x] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (12)$$

由以上推导可知, ACO-OFDM 系统的有效信噪比是与偏置信号功率、ACO-OFDM 信号功率、LED 的有限动态范围和信道状态相关的函数, 即 $R_{\text{SN}}^{\text{eff}}(I_{\text{bias}}, \sigma, \eta, \sigma_e)$ 。因而可以通过合理的 ACO-OFDM 信号和偏置信号功率分配, 在满足光功率约束的情况下降低 LED 非线性限幅失真的影响, 提高系统的误码率性能。系统在光功率约束下偏置信号和 ACO-OFDM 信号的功率分配可以建模为约束优化问题, 其优化目标是使得系统的有效信噪比最大, 即

$$\begin{aligned} (\hat{I}_{\text{bias}}, \hat{\sigma}) &= \underset{(I_{\text{bias}}, \sigma)}{\operatorname{argmax}} R_{\text{SN}}^{\text{eff}}(I_{\text{bias}}, \sigma, \eta, \sigma_e) \\ \text{s. t. } \phi(\sigma, I_{\text{bias}}) &= E[\hat{s}_k] + I_{\text{bias}} = I_{\text{con}}, \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $\operatorname{argmax}(\cdot)$ 表示函数取得最大值时所使用的判决条件, \hat{I}_{bias} 和 $\hat{\sigma}$ 分别表示有效信噪比取得最大值时对应的偏置信号大小和 OFDM 信号均值, 对应于 ACO-OFDM 信号的均值为 $\hat{\sigma}/4$ 。因此, 求解该最优化问题, 即可得到使得 ACO-OFDM 系统有效信噪比最大的功率分配 $(\hat{I}_{\text{bias}}, \hat{\sigma}/4)$ 。由(7)式可得

$$\frac{1}{R_{\text{SN}}^{\text{eff}}} = \frac{1}{R_{\text{SN}}^{\text{clip}}} + \frac{1}{R_{\text{SN}}^{\text{channel}}}, \quad (14)$$

式中 $R_{\text{SN}}^{\text{clip}} = \frac{\sigma^2}{4\sigma_z^2}$ 表示信号与限幅失真功率比, $R_{\text{SN}}^{\text{channel}} = \frac{\sigma^2}{4\sigma_e^2}$ 表示信号与信道噪声功率比。可知信道噪声和限幅噪声均会影响系统的性能, 当信道的信噪比低时,

信道噪声起主导作用; 当信道信噪比高时, 限幅噪声起主导作用。对于给定的信道条件和 LED 动态范围, 系统有效信噪比性能仅与 $R_{\text{SN}}^{\text{clip}}$ 有关, 约束优化问题可以转化为

$$(\hat{I}_{\text{bias}}, \hat{\sigma}) = \underset{(I_{\text{bias}}, \sigma)}{\operatorname{argmax}} R_{\text{SN}}^{\text{clip}}(I_{\text{bias}}, \sigma), \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \phi(\sigma, I_{\text{bias}}) = E[\hat{s}_k] + I_{\text{bias}} = I_{\text{con}}, \quad (16)$$

此时系统的有效信噪比仅受偏置信号和 ACO-OFDM 信号功率的影响。对于给定光功率约束, 利用(16)式可求解出 ACO-OFDM 信号与偏置信号的关系, 即 $\sigma = \varphi(I_{\text{bias}})$, 由此可得, 约束优化问题等价于求解

$$\hat{I}_{\text{bias}} = \underset{(I_{\text{bias}})}{\operatorname{argmax}} R_{\text{SN}}^{\text{clip}}[I_{\text{bias}}, \varphi(I_{\text{bias}})], \quad (17)$$

即利用变量消去法, 最优功率分配可转化为求解无约束优化问题。易通过求解该无约束优化问题得到最优的偏置信号功率 \hat{I}_{bias} , 进而求得最优 ACO-OFDM 信号功率 $\hat{\sigma}/4 = \varphi(\hat{I}_{\text{bias}})/4$ 。

5 仿真结果

采用蒙特卡罗仿真方法来分析 LED 非线性限幅失真对 ACO-OFDM 系统性能的影响, 通过仿真有效信噪比和误码率随偏置信号光功率或 ACO-OFDM 信号光功率的变化来衡量功率约束条件下的最优功率分配。假设系统已采用预失真方法来补偿 LED 的信号转换非线性, 得到的准线性动态范围为 100~400 mW。在所有的分析中, LED 调制带宽为 30 MHz, 子载波数为 1024, 添加的偏置信号不小于 100 mW。仿真参数如表 1 所示。

ACO-OFDM 系统不同光功率约束条件下的有效信噪比随偏置信号的变化如图 2 所示, 其中信道

信噪比为 30 dB。从图中可以看出,当系统光功率约束较低时,最优偏置信号在 LED 最小输出光功率限制处,即偏置信号越小,相应的限幅失真也越小;

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Number of subcarriers, M	1024
Subcarriers modulation	16QAM
LED modulation bandwidth /MHz	30
Minimum emitted optical power, P_{\min} /mW	100
Maximum emitted optical power, P_{\max} /mW	400
Bias signal power, I_{bias} /mW	≥ 100

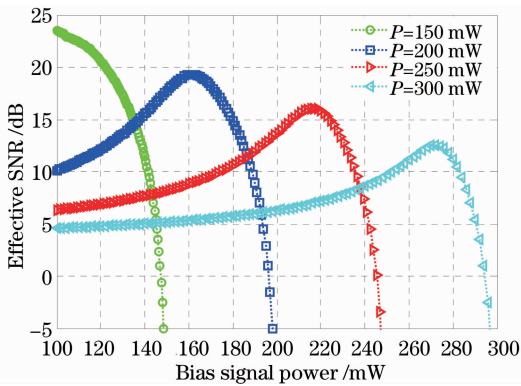


图 2 不同功率约束条件下 ACO-OFDM 系统的有效信噪和偏置信号的关系

Fig. 2 Relationship between the bias and effective SNR of ACO-OFDM system under different power constraints

当光功率约束增大到一定的数值时,系统的有效信噪比首先随着偏置信号的增大而增大,之后随着偏置信号的进一步增大而减小,即中间存在最优的偏置信号使得系统的有效信噪比最优,且不同的光功率约束,最优偏置信号也不相同。其原因是在某一输出光功率约束下进行功率分配时,在满足发送信号超出 LED 的有限动态范围概率小的情况下,ACO-OFDM 信号分配的功率越多,系统的有效信噪比就越大。当输出光功率约束低时,即使给 ACO-OFDM 信号分配最大的功率(如 150 mW 的光功率约束下最大功率为 50 mW),受整体功率低的影响,该最大功率较小,其峰值幅度超出 LED 动态范围的概率低,引入的限幅失真小,此时的最优偏置信号在 LED 最小输出光功率限制处。但是当输出光功率较高时,若偏置信号功率较小,此时 ACO-OFDM 信号分配的功率较大,导致峰值信号随之增大,使得超出 LED 有限范围的概率增大,进而导致限幅失真;反之若偏置信号功率较大,虽然 ACO-OFDM 的峰值信号较小,但偏置信号会将整体信号

提高到离上限限幅门限较近的区域,同样容易导致限幅失真。因此光功率约束较高时,需要合理地进行功率分配以降低限幅失真。从图中还可以看出,随着光功率约束的增大,最优功率分配得到的有效信噪比随之降低,即 ACO-OFDM 适用于平均输出光功率较低的场景。当光功率约束增大到一定的数值时,最优偏置信号出现在离约束值较近的位置,即该情况下采用较低的调制度更有助于提高系统的性能。综上,ACO-OFDM 系统需要根据不同的约束条件来分配偏置信号和 ACO-OFDM 信号功率。

当光功率约束较高时,不同光功率约束下 ACO-OFDM 系统的有效信噪比随偏置信号功率的变化趋势类似,考虑到选取的 LED 的有限动态范围,在此选折中的光功率约束 250 mW 来进一步分析 ACO-OFDM 系统的有效信噪比和信道噪声以及限幅噪声的关系。如图 3 给出了光功率约束为 250 mW 时,ACO-OFDM 系统的有效信噪比随偏置信号和信道信噪比的变化。从图中可知,信道噪声和限幅噪声均会影响系统的性能,当信道的信噪比低时,信道噪声起主导作用;当信道信噪比高时,限幅噪声起主导作用。图中也清晰地表明了最优偏置信号出现在离约束值较近的位置。

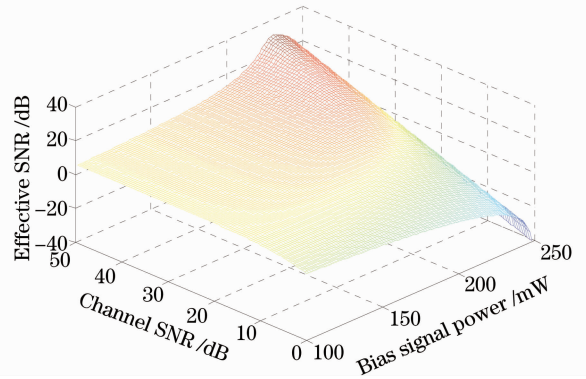


图 3 功率约束为 250 mW 时,ACO-OFDM 系统的有效信噪比随信道信噪比和偏置信号的变化

Fig. 3 Change in effective SNR of ACO-OFDM system with the bias and channel SNR when the power constraints is 250 mW

为了进一步验证功率分配方法对 ACO-OFDM 系统误码率性能的影响,对不同功率约束下系统的误码率性能进行分析。图 4 给出了不同功率约束下 ACO-OFDM 系统的误码率性能随偏置信号的变化曲线。误码率曲线表明,对于给定的光功率约束,ACO-OFDM 系统存在最优的偏置信号和 ACO-OFDM 信号功率分配使得系统的误码率性能最优,对应的变化趋势和最优值与图 2 中的结论一致,即

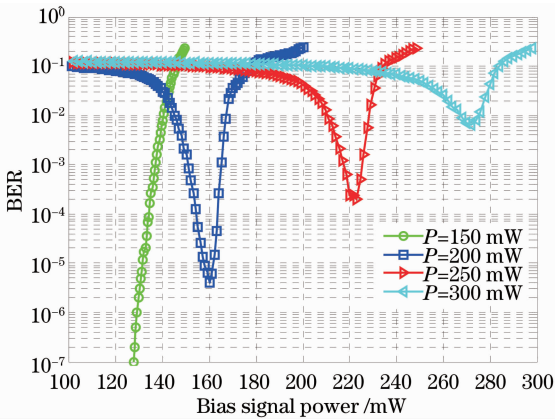


图4 不同功率约束条件下 ACO-OFDM 系统的误码率和偏置信号的关系

Fig. 4 Relationship between the bias and BER of ACO-OFDM system under different power constraints

系统误码率性能是有效信噪比的增函数,有效信噪比越大,系统误码率性能越好,因而基于有效信噪比最优原则的功率分配方法能有效降低系统的误码率。当光功率约束较低时,通过合理的功率分配,可以使得系统的误码率性能低于 10^{-5} 。但需要注意的是,当所需的输出光功率达到一定的数值时,采用最优的功率分配也很难使得系统具有较好的误码率性能,即 ACO-OFDM 系统更适用于低功率约束的场景,此时系统的性能主要受限于发射端 LED 等器件的线性动态范围。

在光功率约束条件下采用最优功率分配和不考虑偏置信号作用的 ACO-OFDM 系统的误码率性能如图 5 所示。子载波采用 16QAM,光功率约束为 150、200、250、300 mW 时对应的最优偏置信号分别为 100、160、220、275 mW,在不考虑偏置信号作用

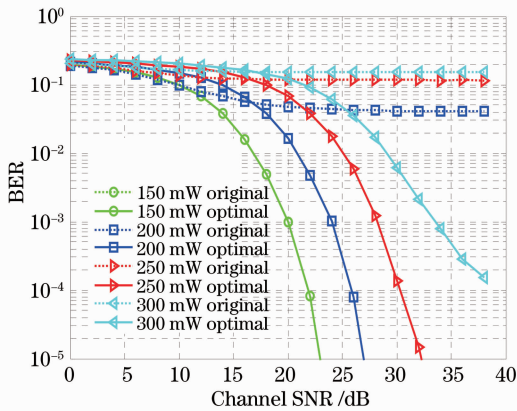


图5 采用最优功率分配和不考虑偏置信号的系统误码率性能对比

Fig. 5 BER performance comparison using optimal power allocation and without bias signal

时选择偏置信号等于 LED 的最小输出光功率限制,即 100 mW。从图中可以看出,在光功率约束条件下,若不考虑偏置信号的影响而直接选择偏置信号功率为 LED 的最小输出光功率限制,则当输出光功率大于一定的数值时,系统将引入严重的非线性限幅失真,误码率即使在信道信噪比大于 40 dB 的情况下也始终大于 10^{-2} ,很难满足通信要求。而采用最优功率分配时,能有效降低系统的非线性限幅失真,保证较好的误码率性能,当光功率约束为 200 mW 和 250 mW 时,分别只需要 24 dB 和 27 dB 的信道信噪比即可使得系统的误码率低于 10^{-3} 。此时系统性能主要受信道噪声的影响,随着信道信噪比的增加,系统误码率性能也随着改善。

ACO-OFDM 系统的性能还受到子载波调制阶数的影响,如图 6 给出了功率约束为 250 mW 时,采用最优功率分配时系统不同信道信噪比和载波调制阶数下的误码率。从图中可以看出,系统的误码率随着 QAM 调制阶数的增大而增大,随着信道信噪比的增大而降低,但当调制阶数 $M' = 128$ 时,系统的误码率性能已很难满足通信需求。图 6 也验证了当信道的信噪比低时,信道噪声起主导作用,以及当信道的信噪比高时,限幅噪声起主导作用的结论。

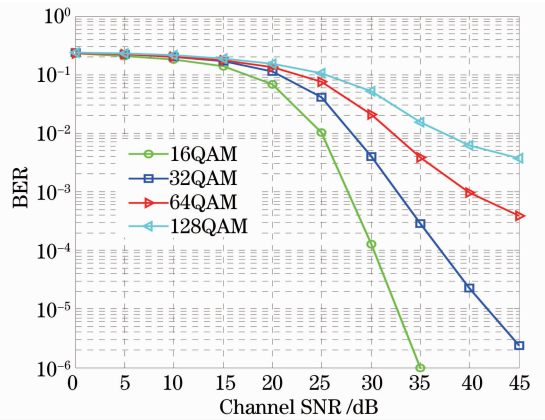


图6 最优功率分配时,不同 QAM 调制阶数下系统误码率与信道信噪比的关系

Fig. 6 Relationship between BER and channel SNR under different QAM modulation orders when using optimal power allocation

6 结 论

VLC 系统利用 LED 来进行照明和数据通信,照明和误码率性能是系统需要考虑的重要因素。基于原信号直接叠加限幅失真成分的限幅处理模型,分析了光功率约束下 LED 非线性限幅对可见光 ACO-OFDM 通信系统性能的影响,给出了系统有

效信噪比与偏置信号和 ACO-OFDM 信号功率等因素的关系,并基于有效信噪比最优原则给出了降低非线性限幅失真的最优化的功率分配。采用的限幅处理模型简化了有效信噪比的求解复杂度,给出的最优功率分配有效降低了 LED 非线性限幅失真,为构建高性能的可见光 ACO-OFDM 系统提供了指导。

参 考 文 献

- 1 H Elgala, R Mesleh, H Haas. Indoor optical wireless communication; potential and state-of-the-art [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(9): 56–62.
- 2 D J Fernandes Barros, J M Kahn. Optical modulator optimization for orthogonal frequency-division multiplexing [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(13): 2370–2378.
- 3 J Armstrong, B J C Schmidt, D Kalra, *et al.*. Performance of asymmetrically clipped optical OFDM in AWGN for an intensity modulated direct detection system [C]. IEEE Global Telecommunications Conference, 2006. 1–5.
- 4 D J F Barros, S K Wilson, J M Kahn. Comparison of orthogonal frequency-division multiplexing and pulse-amplitude modulation in indoor optical wireless links [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(1): 153–163.
- 5 J Armstrong, A J Lowery. Power efficient optical OFDM [J]. IEEE Electronics Letters, 2006, 42(6): 370–372.
- 6 H Elgala, R Mesleh, H Haas. A study of LED nonlinearity effects on optical wireless transmission using OFDM [C]. IEEE Wireless and Optical Communications Networks, 2009. 1–5.
- 7 X Li, J Vucic, V Jungnickel, *et al.*. On the capacity of intensity-modulated direct-detection systems and the information rate of ACO-OFDM for indoor optical wireless applications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(3): 799–809.
- 8 S K Wilson, J Armstrong. Transmitter and receiver methods for improving asymmetrically-clipped optical OFDM [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009, 8(9): 4561–4567.
- 9 X Li, R Mardling, J Armstrong. Channel capacity of IM/DD optical communication systems and of ACO-OFDM [C]. IEEE International Conference on Communications, 2007. 2128–2133.
- 10 R Mesleh, H Elgala, H Haas. On the performance of different OFDM based optical wireless communication systems [J]. IEEE Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(8): 620–628.
- 11 S Dimitrov, H Haas. On the clipping noise in an ACO-OFDM optical wireless communication system [C]. IEEE Global Telecommunications Conference, 2010. 1–5.
- 12 D Tsonev, S Sinanovic, H Haas. Complete modeling of nonlinear distortion in OFDM-based optical wireless communication [J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(18): 3064–3076.
- 13 I Stefan, H Elgala, H Haas. Study of dimming and LED nonlinearity for ACO-OFDM based VLC systems [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2012. 990–994.
- 14 L Chen, B Krongold, J Evans. Performance analysis for optical OFDM transmission in short-range IM/DD systems [J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(7): 974–983.
- 15 D Dardari, V Tralli, A Vaccari. A theoretical characterization of nonlinear distortion effects in OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(10): 1755–1764.
- 16 Yang Yu, Zhang Jiankun, Liu Bo, *et al.*. Study of the impact of LED nonlinearity on orthogonal frequency division multiplex based visible light communication systems [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0805007.
杨 宇, 张建昆, 刘 博, 等. LED 非线性对基于正交频分复用可见光通信系统的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0805007.
- 17 L Wu, Z Zhang, H Liu. MIMO-OFDM visible light communications system with low complexity [C]. IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013. 3933–3937.
- 18 H Elgala, R Mesleh, H Haas. Impact of LED nonlinearities on optical wireless OFDM systems [C]. IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2010. 634–638.
- 19 Liang Chen, K Brian, E Jamie. Theoretical characterization of nonlinear clipping effects in IM/DD optical OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(8): 2304–2312.

栏目编辑: 王晓琰