

# 激光与光电子学进展

## 基于 $N$ 重最小频移键控映射的 FHT-OFDM 可见光通信系统性能研究

张颖, 李宁\*

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 为解决正交频分复用(OFDM)可见光通信中存在的发光二极管(LED)非线性及由其引起的载波频率偏移问题,建立了  $N$  重最小频移键控( $N$ -MSK)映射下的 OFDM 可见光通信系统模型,并利用蒙特卡罗方法,对比分析了  $N$ -MSK 映射与二进制相移键控(BPSK)映射在信号功率谱密度、星座图、载波干扰比、误码率等性能方面的差异。实验结果表明: $N$ -MSK( $N>1$ )映射系统具有良好的带外衰减特性;在相同频率偏移的情况下,采用  $N$ -MSK( $N=1$ )映射方式,系统载波干扰比提升约 15 dB,抑制载波频偏引起的载波间干扰的能力增强;相同误码率情况下( $10^{-6}$ ),MSK 映射系统所需的信噪比(SNR)较 BPSK 映射低 2 dB;相同 SNR 条件下,MSK 映射方式能够克服 LED 非线性对系统性能的影响。因此,所提模型在信号星座图及误码率方面性能较好。

**关键词** 光通信; 发光二极管非线性;  $N$  重最小频移键控; 正交频分复用; 载波频率偏移; 哈特莱变换

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0506003

### Performance of FHT-OFDM Visible Light Communication System Based on $N$ Minimum Shift Keying Mapping

Zhang Ying, Li Ning\*

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

**Abstract** An orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) visible light communication system model based on  $N$  minimum shift keying ( $N$ -MSK) mapping is established to solve challenges related to light-emitting diode (LED) nonlinearity and carrier frequency offset caused by OFDM visible light communication. The Monte Carlo method is used to compare and analyze the differences between  $N$ -MSK and binary phase-shift keying (BPSK) mapping in the performance of signal power spectral density, constellation, carrier interference ratio, and bit error rate. The experimental results reveal that the  $N$ -MSK ( $N>1$ ) mapping system has superior out-of-band attenuation characteristics. In the case of the same frequency offset, the carrier interference ratio of the system is increased by approximately 15 dB using the  $N$ -MSK ( $N=1$ ) mapping mode, and the ability to suppress the intercarrier interference caused by carrier frequency offset is enhanced. For the same bit error rate ( $10^{-6}$ ), the signal-noise ratio (SNR) required by the MSK mapping system is 2 dB lower than that of BPSK mapping. The MSK mapping method can overcome the influence of LED nonlinearity on the system performance under the same SNR condition. Therefore, the proposed model has excellent signal constellation and bit error rate performance.

**Key words** optical communications; light-emitting diode nonlinearity;  $N$  minimum shift keying; orthogonal frequency division multiplexing; carrier frequency offset; Hartley transform

收稿日期: 2021-04-08; 修回日期: 2021-05-20; 录用日期: 2021-05-25

通信作者: \*1401236062@qq.com

## 1 引言

可见光通信(VLC)<sup>[1-2]</sup>是一种频谱资源丰富、绿色节能、安全性能高、保密性好的无线接入方案,发展迅猛。正交频分复用(OFDM)调制技术<sup>[3]</sup>具有频谱利用高、抗多径干扰的优点,目前已经广泛应用于可见光通信中以实现高速数据传输。

然而,OFDM系统具有较高的峰均功率比,发光二极管(LED)工作区内电光转换的非线性失真会使OFDM信号产生频率偏移,从而破坏相邻子载波间原有的正交性,引起严重的载波间干扰(ICI),导致通信系统误码率恶化<sup>[4-5]</sup>。对此,Aggarwal等<sup>[6]</sup>提出在信号调制前加入预失真模块,通过拟合出LED的反向特性曲线来补偿LED非线性失真的方法,该方法通常需要将软件算法与硬件电路相结合,会增加系统的复杂性及实现成本。最小频移键控(MSK)调制不需要额外的设备,实现简单,并且具有相位连续及包络恒定的特点,其信号经过非线性器件后畸变较小,能够减小由LED非线性引起的载波频率偏移<sup>[7]</sup>。Chen等<sup>[8]</sup>提出了一种基于短距离可见光通信的MSK方法,该方法改善了LED非线性对系统误码率的影响。为了适应大容量通信链路的需求,Javornik等<sup>[9]</sup>使用不同幅度的MSK信号叠加形成 $N$ 重最小频移键控( $N$ -MSK)信号,该方法可进一步提高MSK调制方案的频谱效率。

另外,可见光通信常采用强度调制/直接检测技术,且驱动LED的信号应非负的实信号<sup>[10-11]</sup>, $N$ -MSK调制可以采用连续相位编码和波形映射产生实信号。柯熙政等<sup>[12]</sup>研究了基于快速哈特莱变换(FHT)的OFDM可见光通信系统,对信号实映射后,直接进行哈特莱变换,无需共轭对称运算,所得OFDM信号为实信号,其频谱利用率明显优于基于傅里叶变换的OFDM可见光通信系统。因此,将 $N$ -MSK调制与基于FHT的OFDM可见光通信系统相结合不仅可以提高系统的频谱利用率,还能有效缓解LED非线性及载波频偏引起的系统性能恶化。

本文建立了一种基于 $N$ -MSK映射的FHT-OFDM可见光通信系统模型,并利用蒙特卡罗方法仿真分析了该系统相比于BPSK映射系统在功率谱密度(PSD)、星座图、载波干扰比及误码率(BER)等方面的性能优势。

## 2 系统模型及理论分析

### 2.1 LED非线性模型

依托LED的可见光通信系统可兼顾照明和数据传输功能,但LED非线性会对可见光通信系统误码率性能带来极大的影响。理论上,LED非线性效应难以通过某个物理量表征,一般采用Rapps模型<sup>[13]</sup>描述LED的非线性特性,表达式为

$$i_{\text{LED}}(v_{\text{LED}}) = \begin{cases} \frac{v_{\text{LED}} - v_{\text{TOV}}}{\left[1 + \left(\frac{v_{\text{LED}} - v_{\text{TOV}}}{i_{\text{max}}}\right)^{2k}\right]^{\frac{1}{2k}}}, & v_{\text{LED}} \geq v_{\text{TOV}} \\ 0, & v_{\text{LED}} < v_{\text{TOV}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $i_{\text{LED}}(v_{\text{LED}})$ 是LED的电流; $v_{\text{LED}}$ 是LED两端电压; $i_{\text{max}}$ 是允许通过的最大电流; $k$ 是弯曲指数, $k$ 的值决定了LED非线性模型的弯曲程度; $v_{\text{TOV}}$ 是LED的开启电压。令 $v_{\text{TOV}} = 1 \text{ V}$ , $i_{\text{max}} = 2 \text{ A}$ , $k$ 通常取2、3和8,由(1)式所得的LED伏安特性曲线如图1所示。从图中可以看出,LED的伏安特性曲线呈双向饱和特性, $k$ 值的变化会影响曲线由线性区到上部饱和区的非线性程度,而且 $k$ 值越大,该曲线越接近线性。

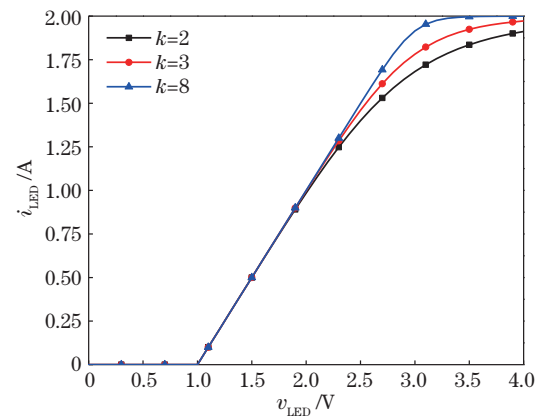


图1 不同非线性度 $k$ 的LED电光响应曲线

Fig. 1 LED electro-optical response curves with different nonlinearity  $k$

### 2.2 $N$ -MSK映射OFDM可见光通信系统模型

所提基于 $N$ -MSK映射的FHT-OFDM可见光通信系统模型如图2所示,该系统由发射端(transmitter)、信道(channel)和接收端(receiver)3部分组成。

在发射端,输入数据 $\gamma_n$ 经过串并变换(S/P conversion)后被分配到多个子载波上,并依次由 $N$ -MSK映射( $N$ -MSK mapping)、快速哈特莱逆变换

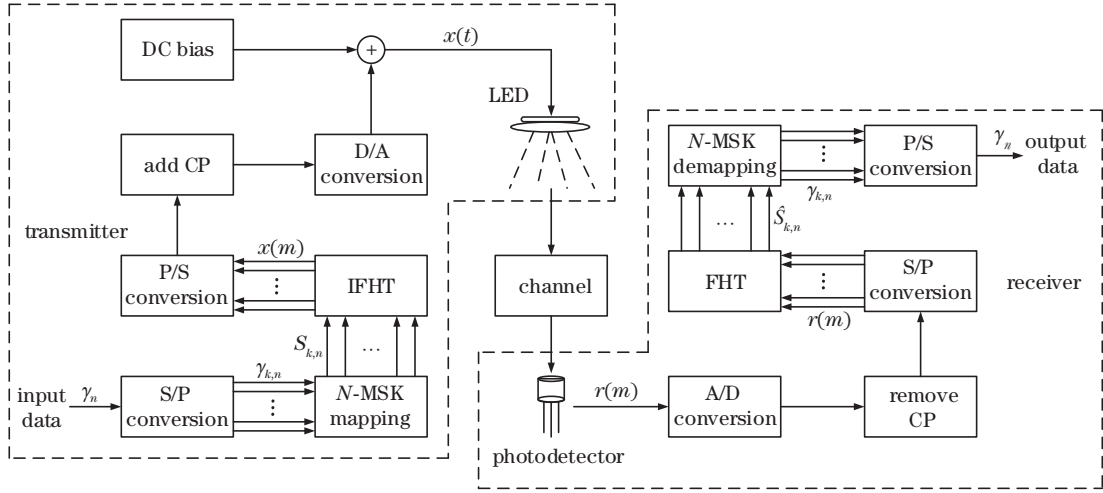


图 2 基于 N-MSK 映射的 FHT-OFDM 可见光通信系统框图

Fig. 2 Block diagram of FHT-OFDM visible light communication system based on N-MSK mapping

(IFHT)、并串变换(P/S conversion)、添加循环前缀(add CP)、数/模变换(D/A conversion)后,添加直流偏置(DC bias),形成 N-MSK 信号<sup>[14]</sup>,表达式为

$$S_{N-MSK}(t, \gamma_{k,n}) = A \sum_{i=1}^N 2^{i-1} S(t, \gamma_{k,n}^i), \quad (2)$$

$$A = \sqrt{2E/T} / \sqrt{\sum_{i=1}^N 2^{2(i-1)}}, \quad (3)$$

式中:  $E$  为信号平均能量;  $T$  为信号码元间隔;  $S(t, \gamma_{k,n}^i)$  为第  $n$  时刻第  $i$  路 MSK 信号分量。首先,根据第  $n$  时刻 MSK 信号的输入比特  $\gamma_{k,n}^i$  进行连续相位编码<sup>[15]</sup>,即  $a_n^i = \gamma_{k,n}^i \oplus \gamma_{k,n-1}^i, b_{n+1}^i = a_n^i \oplus b_n^i$ ; 然后进行波形映射,当  $(a_n^i, b_n^i)$  分别为  $(0, 0)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 1)$  时,对应的  $(U_{1,n}^i, U_{2,n}^i)$  分别为  $(1, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(-1, 0)$ 、 $(0, -1)$ 。则  $S(t, \gamma_{k,n}^i)$  的表达式为

$$S(t, \gamma_{k,n}^i) = (U_{1,n}^i \cos 2\pi f_1 t + U_{2,n}^i \cos 2\pi f_2 t) g(t - nT), \quad (4)$$

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: MSK 信号的两路载波频率  $f_1 = f_c - 1/4T, f_2 = f_c + 1/4T, f_c$  为调制频率。因此, N-MSK 信号的表达式可重写为

$$S_{N-MSK}(t) = (W_{1,n} \cos 2\pi f_1 t + W_{2,n} \cos 2\pi f_2 t) g(t - nT), \quad (6)$$

$$(W_{1,n}, W_{2,n}) = A \left( \sum_{i=1}^N 2^{i-1} U_{1,n}^i, \sum_{i=1}^N 2^{i-1} U_{2,n}^i \right). \quad (7)$$

对 N-MSK 信号进行  $M$  点哈特莱变换,可获得  $x(m)$  信号。

$$x(m) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{k=0}^{M-1} S_{k,n} \text{cas} \left( \frac{2\pi}{M} km \right),$$

$$m = 0, 1, \dots, M-1, \quad (8)$$

式中:  $M$  为 IFHT/FHT 运算点数;  $k$  为子载波的索引号;  $S_{k,n}$  为第  $n$  时刻第  $k$  路子载波的输入信号。此后,再对  $x(m)$  信号进行数模转换并添加直流偏置,即可得到正实信号  $x(t)$ ,将其加载到 LED 上发射出去,经信道传输后,信号<sup>[16]</sup>可表示为

$$r(t) = x(t) + w(t), \quad (9)$$

式中:  $w(t)$  为均值等于 0, 方差等于  $\sigma^2$  的加性高斯白噪声。

接收端,光电探测器(photodetector)将检测到的光信号  $r(t)$  转换为电信号,再由模/数转换(A/D conversion)、移除循环前缀(remove CP)、 $M$  点 FHT 处理,得到系统各路子载波输入信号的估计值  $\hat{S}_{k,n}$ 。

$$\hat{S}_{k,n} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} r(m) \text{cas} \left( \frac{2\pi}{M} km \right),$$

$$k = 0, 1, \dots, M-1, \quad (10)$$

再进行 N-MSK 解映射(N-MSK demapping),结合最大似然序列估计算法<sup>[17]</sup>,由(7)式可得 N-MSK 判决信号  $\Delta S_{k,n}$ 。

$$\Delta S_{k,n} = (S_{k,n-1} + S_{k,n}) - (S_{k+1,n-1} - S_{k+1,n}) = A \sum_{i=1}^N 2^{i-1} [(U_{k,n-1}^i + U_{k,n}^i) - (U_{k+1,n-1}^i - U_{k+1,n}^i)] = A \sum_{i=1}^N 2^{i-1} C_{k,n}^i, \quad (11)$$

式中:  $C_{k,n}^i$  为 N-MSK 子载波中的第  $i$  路 MSK 信号分量。由  $C_{k,n}^i$  可恢复信号  $\gamma_{k,n}^i$ , 判决规则为: 当  $C_{k,n}^i \geq 0$

时,  $\gamma_{k,n}^i = 0$ ; 当  $C_{k,n}^i < 0$  时,  $\gamma_{k,n}^i = 1$ 。所得信号再经过并串变换 (P/S conversion) 即可恢复出原始输入数据  $\gamma_n$ 。

### 3 仿真分析

根据图 2 的模型, 利用蒙特卡罗方法对所提基于  $N$ -MSK 映射的 FHT-OFDM 可见光通信系统进行仿真, 系统参数如表 1 所示。为了更好地说明  $N$ -MSK 映射方式在克服 LED 非线性效应及载波频率偏移引起的系统性能恶化上的效果, 将图 2 模型中的映射方式修改为 BPSK, 保持其他模块不变, 在功率谱密度、星座图、载波干扰比、误码率等方面, 对采用两种映射方式的系统进行对比分析。

表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

Parameter	Value
Number of OFDM symbols	10000
Interpolation factor	2
Number of subcarriers	128
Sequence length	256
Cyclic prefix	32
Breakover voltage / V	1
Maximum allowable alternating current / A	2
Knee factor	2, 3, 8
Channel noise	Additive white Gaussian noise

#### 3.1 功率谱密度

功率谱密度反映信号功率随频率的变化关系<sup>[18]</sup>。当 OFDM 信号的符号间隔为  $T$  时, BPSK 映射与  $N$ -MSK 映射子载波信号的归一化闭合功率谱

密度表达式分别为

$$G_{\text{BPSK}}(f) = \left[ \frac{\sin \pi(f-f_c)T}{\pi(f-f_c)T} \right]^2, \quad (12)$$

$$G_{N\text{-MSK}}(f, N) = \left[ \frac{\cos 2\pi N(f-f_c)T}{1 - [4N(f-f_c)T]^2} \right]^2, \quad (13)$$

式中:  $N$  为  $N$ -MSK 调制阶数。两个系统的归一化功率谱密度如图 3 所示。从图中可以看出, 与基于 BPSK 映射的 OFDM 系统相比, 基于  $N$ -MSK 映射的 OFDM 可见光通信系统具有良好的带外衰减特性。

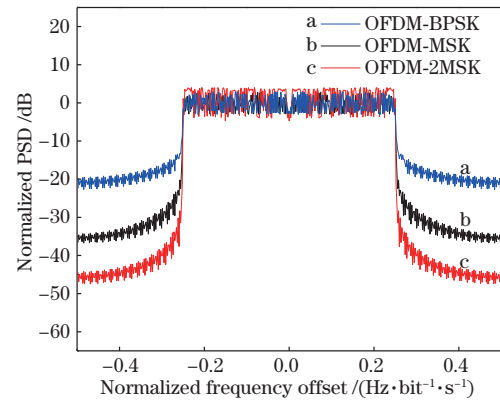


图 3 功率谱密度图

Fig. 3 Power spectral density diagram

#### 3.2 星座图

星座图<sup>[19]</sup>可以在复平面上直观地展示出信号之间的映射关系。根据图 2 的模型, 数据分别经过 BPSK 映射和  $N$ -MSK ( $N=1, 2$ ) 映射后的信号星座图如图 4 所示。从图中可以看出, 图 4(a)、(b)、(c) 均为实星座映射, 其信号经过 IFHT 后的时域信号为实数形式, 这种信号形式能够减小 OFDM 可见光通信系统的计算复杂度, 简化系统硬件设计。

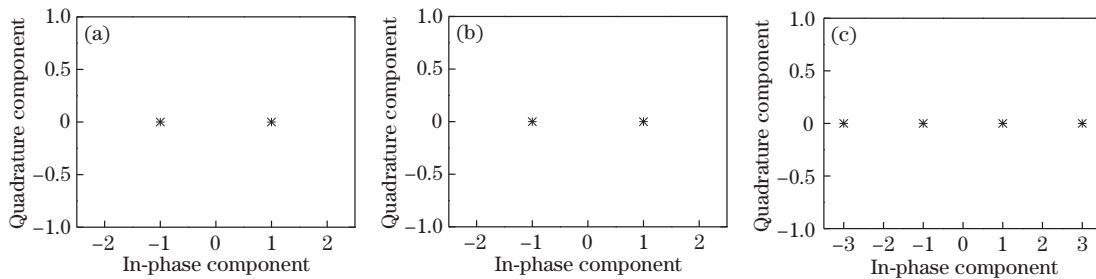


图 4 BPSK 映射和  $N$ -MSK 映射后的信号星座图。(a) BPSK 映射; (b) MSK 映射; (c) 2MSK 映射

Fig. 4 Signal constellation after BPSK mapping and  $N$ -MSK mapping. (a) BPSK mapping; (b) MSK mapping; (c) 2MSK mapping

假设信噪比 (SNR) 为 14 dB, 不考虑 LED 非线性情况下, 接收端信号星座图如图 5 所示, 而考虑 LED 非线性情况下, 即 Rapps 模型的弯曲指数  $k=3$

时, 接收端信号星座图如图 6 所示。比较图 5 和图 6, 不论采用何种映射方式, LED 非线性都将导致信号星座点扩散增大, 2MSK 映射方式与 BPSK 映射方式



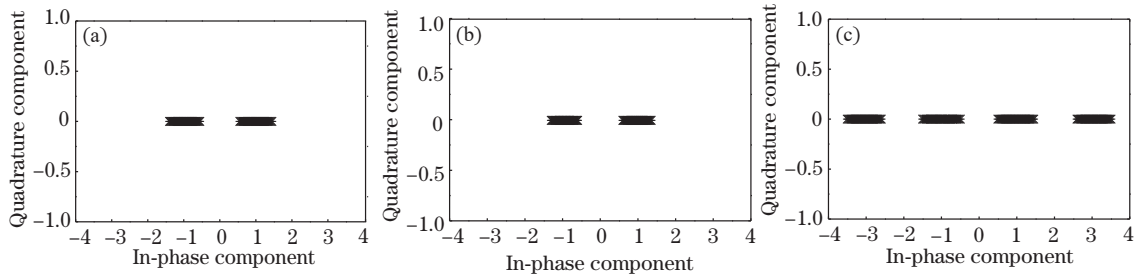


图 5 不考虑 LED 非线性时,不同映射方式 OFDM 系统接收端星座图。(a) BPSK 映射;(b) MSK 映射;(c) 2MSK 映射  
Fig. 5 Constellation diagrams of receiving end of OFDM system with different mapping methods when LED nonlinearity is not considered. (a) BPSK mapping; (b) MSK mapping; (c) 2MSK mapping

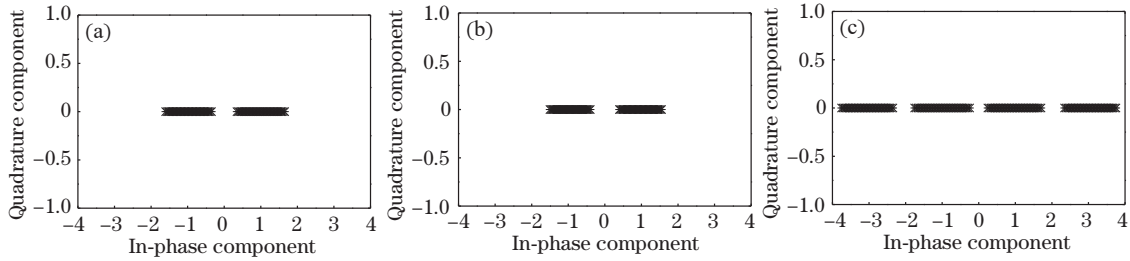


图 6 考虑 LED 非线性时,不同映射方式 OFDM 系统接收端星座图。(a) BPSK 映射;(b) MSK 映射;(c) 2MSK 映射  
Fig. 6 Constellation diagrams of receiving end of OFDM system with different mapping methods when LED nonlinearity is considered. (a) BPSK mapping; (b) MSK mapping; (c) 2MSK mapping

的星座点扩散程度基本一致,而 MSK 映射方式下的星座点扩散程度最小,所以受 LED 非线性影响最小。

### 3.3 载波频偏条件下系统抗干扰性能

OFDM 系统的载波干扰比<sup>[20]</sup>定义为系统的信号功率与载波间干扰分量功率的比值。基于  $N$ -MSK 映射的 OFDM 系统中第  $n$  时刻第  $k$  路  $N$ -MSK 子载波的载波干扰比为

$$R_{\text{CIR, OFDM-N-MSK(FHT)}}^k = \frac{E\left[(\Delta K_{k,k,n(N\text{-MSK})})^2\right]}{\sum_{l=0, l \neq k}^{M-1} E\left[(\Delta K_{l,k,n(N\text{-MSK})})^2\right]}, \quad (14)$$

式中:  $\Delta K_{k,k,n}$  为第  $n$  时刻第  $k$  路  $N$ -MSK 子载波的自相关值;  $\Delta K_{l,k,n(l \neq k)}$  为第  $n$  时刻第  $l$  路与第  $k$  路  $N$ -MSK 子载波的互相关值。载波干扰比与归一化频率偏移之间的关系如图 7 所示,图中表征 LED 非线性效应的参数  $k=8$ 。从图中可以看出:在相同频率偏移的情况下,基于 MSK 映射的 OFDM 可见光通信系统的载波干扰比最大;随着频率偏移的增加,基于 2MSK 映射的 OFDM 可见光通信系统的载波干扰比接近于 BPSK 映射 OFDM 系统,这说明基于  $N$ -MSK 映射的 OFDM 系统能够更加有效地抑制由载波频率偏移引起的载波间干扰。

为了研究所提基于  $N$ -MSK 映射的 OFDM 可见光通信系统在载波频偏影响下的误码率性能,经

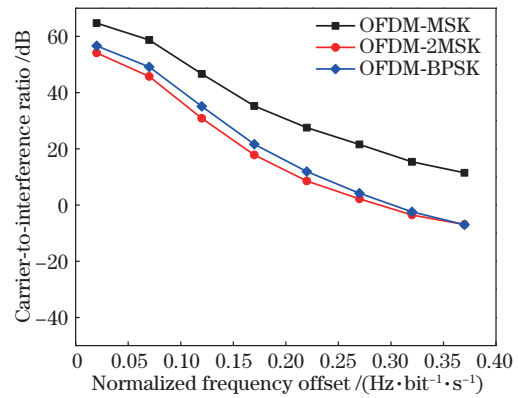


图 7 载波频偏条件下载波干扰比性能  
Fig. 7 Carrier-to-interference ratio performance in carrier frequency offset conditions

IFHT 后,在信道中传输的时域信号(9)式可重写为

$$r(n) = x(n) \cos\left(\frac{2\pi n}{N} \Delta f T\right) + w(n), \quad (15)$$

式中:  $\Delta f T$  为 LED 非线性噪声引起的归一化频率偏移值,  $\Delta f$  为系统发射端与接收端之间的频率偏差。仿真时,分别设置  $\Delta f T$  值为 0、0.08、0.15,所得  $N$ -MSK 映射系统与 BPSK 映射系统的误码率曲线如图 8 所示。当不存在载波频率偏移,即  $\Delta f T=0$  时,从图 8(a) 中可以看出,  $N$ -MSK ( $N=1$ ) 映射系统的误码率性能与 BPSK 映射相近,随着  $N$  增大,误码率性

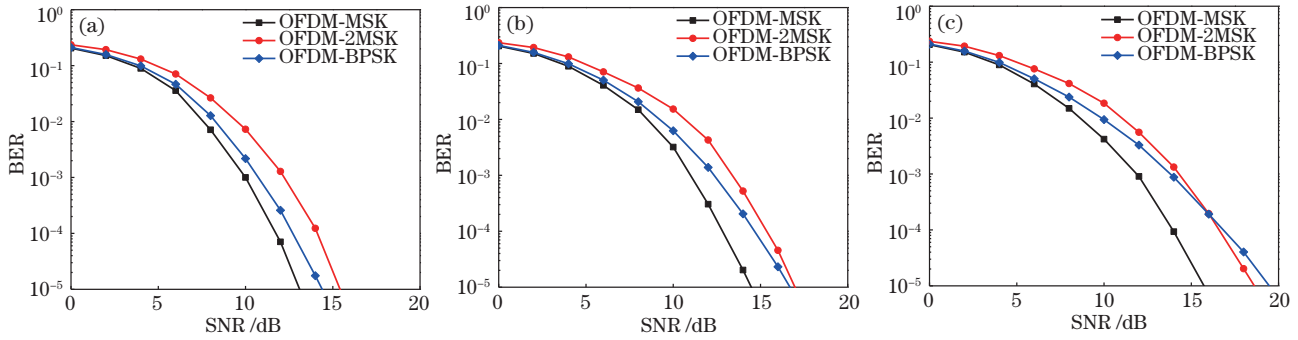


图 8 载波频偏条件下误码率性能。(a)  $\Delta fT=0$ ; (b)  $\Delta fT=0.08$ ; (c)  $\Delta fT=0.15$

Fig. 8 BER performance in carrier frequency offset conditions. (a)  $\Delta fT=0$ ; (b)  $\Delta fT=0.08$ ; (c)  $\Delta fT=0.15$

能下降。当存在载波频率偏移,即 $\Delta fT \neq 0$ 时,由于载波间正交性被破坏,系统都受到载波间干扰,从图 8(b)、(c)中可以看出,随着载波频率偏移程度的增加, $N$ -MSK 映射系统与 BPSK 映射系统的载波间干扰均越来越大,误码率性能恶化,但对  $N$ -MSK 映射系统的误码率影响较小,特别是  $N=1$  时,MSK 映射系统的误码率性能最优。

### 3.4 LED 非线性条件下系统误码率性能

图 9 为 LED 非线性条件下 OFDM 可见光通信系统误码率性能曲线。从图中可以看出:当不考虑 LED 非线性时,MSK 映射系统与 BPSK 映射系统的误码率相当;当 Rapps 模型弯曲指数  $k=3$ ,即考虑 LED 非线性时,由于信号会产生非线性畸变和频谱扩展, $N$ -MSK 映射系统与 BPSK 映射系统的误码率均增大,但 MSK 映射系统的误码率性能最优。随着  $N$ -MSK 的  $N$  值增大,无论是否存在 LED 非线性的影响,系统误码率均有所增加,从图 5 和图 6 的星座图来看,这是因为  $N$  越大,星座点越密,星座点之间的距离降低,容易判决成其他符号,导致误码率增加。

## 4 结 论

建立了一种基于  $N$ -MSK 映射的 FHT-OFDM 可见光通信系统模型,并利用蒙特卡罗方法仿真分析了该系统与 BPSK 映射系统在载波频率偏移和 LED 非线性影响下的性能差异。实验结果表明, $N$ -MSK 映射系统具有良好的带外衰减特性。随着载波频率偏移的增加,两种系统的载波干扰比都有不同程度的减小,但  $N$ -MSK 映射系统减小得比较缓慢,在频率偏移值为 0.15,误码率为  $10^{-5}$  情况下,MSK 和 2MSK 映射系统所需的信噪比相比于 BPSK 系统分别降低了 3.7 dB 和 1.2 dB, $N$ -MSK 映射能够减小频率偏移引起的载波间干扰,提升系统的误码率性能。当考虑 LED 非线性时,各系统的误码率均增加,在相同信噪比(14 dB)情况下, $N$ -MSK 映射系统误码率增加相比于 BPSK 映射系统少 6 dB,并且 MSK 映射系统的误码率及星座图性能均最佳,能够有效克服 LED 非线性对 OFDM 可见光通信系统性能的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Matheus L E M, Vieira A B, Vieira L F M, et al. Visible light communication: concepts, applications and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3204-3237.
- [2] Deng X, Mardanikorani S, Wu Y, et al. Mitigating LED nonlinearity to enhance visible light communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66 (11): 5593-5607.
- [3] Li J F, Liu X S, Li J K, et al. ACO-OFDM diversity combining receiver with direct current offset in visible light communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 190604.

李建锋, 刘晓爽, 李建科, 等. 可见光通信中直流偏

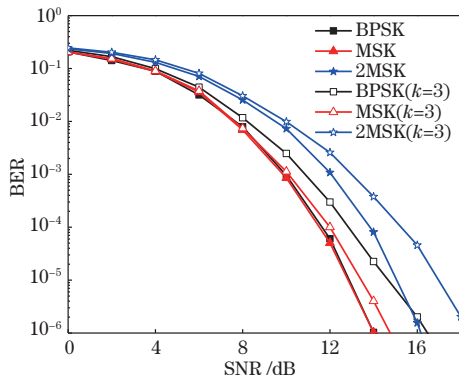


图 9 LED 非线性条件下误码率性能

Fig. 9 BER performance in LED nonlinear conditions

- 移的 ACO-OFDM 分集合并接收机[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 190604.
- [4] 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.  
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.
- [5] Lu H M, Jin J L, Wang J P. Alleviation of LED nonlinearity impact in visible light communication using companding and predistortion[J]. *IET Communications*, 2019, 13(7): 818-821.
- [6] Aggarwal P, Kabra T, Ahmad R, et al. Adaptive learning architecture-based predistorter for nonlinear VLC system[J]. *Photonic Network Communications*, 2019, 38(2): 258-269.
- [7] Dong S G, Momson I, Kshattray S, et al. A 10-Gb/s 180-GHz phase-locked-loop minimum shift keying receiver[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2021, 56(3): 681-693.
- [8] Chen Y, Li Z Y, Liu P, et al. The BER performance comparison of MSK and GMSK schemes for short-range visible light communication [C]//2017 IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), May 6-8, 2017, Guangzhou, China. New York: IEEE Press, 2017: 611-614.
- [9] Javornik T, Kandus G, Burr A. The performance of N-MSK signals in non-linear channels[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2002, E85B(7): 1265-1275.
- [10] Xu X Y, Yue D W. A novel optical spatial modulation OFDM based on complex constellation mapping with Hartley transform[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0906002.  
徐宪莹, 岳殿武. 基于复星座映射哈特莱变换的新型光空间调制正交频分复用[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0906002.
- [11] Jia K J, Yang B R, Lu H, et al. LED nonlinearity mitigation for visible light communication optical-orthogonal frequency division multiplexing system with symbol decomposing techniques[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0406002.  
贾科军, 杨博然, 陆皓, 等. 可见光通信光正交频分复用系统符号分解技术抑制 LED 非线性失真研究[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0406002.
- [12] Ke X Z, Lei Y, Zhang Y. Research on OFDM system based on Hartley transform in visible light communication[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(2): 266-274.  
柯熙政, 雷妍, 张颖. Hartley 变换 OFDM 调制的可见光通信研究[J]. 信号处理, 2019, 35(2): 266-274.
- [13] Elgala H, Mesleh R, Haas H. An LED model for intensity-modulated optical communication systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(11): 835-837.
- [14] Zhang G, Wang O, Shen J. Non-orthogonal N-MSK modulation for wireless relay D2D communication [C]//2017 2nd International Conference on Information Technology and Management Engineering, January 15, 2017, Beijing, China. Lancaster: DEStech Publications, 2017: 251-257.
- [15] Morioka K, Kanada N, Futatsumori S, et al. An implementation of CPFSK-OFDM systems by using software defined radio[C]//WAMICON 2014, June 6, 2014, Tampa, FL, USA. New York: IEEE Press, 2014: 1-3.
- [16] Tong Z R, Hu Y N, Wang Y R, et al. A PAPR reduction technique using FHT with repeated companding and filtering in CO-OFDM systems[C]//2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [17] Weng W W, Liu Y A, Hu H F, et al. Performance analysis of OFDM-NMSKNQMSK systems based on DCT[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2010, 33(2): 39-43.  
翁玮文, 刘元安, 胡鹤飞, 等. 基于 DCT 的 OFDM-NMSK/NQMSK 系统及其性能分析[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(2): 39-43.
- [18] Selvendran S, Raja A S, Muthu K E, et al. Certain investigation on visible light communication with OFDM modulated white LED using optisystem simulation[J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 109(2): 1377-1394.
- [19] Singh V K, Dalal U D. A fast Hartley transform based novel optical OFDM system for VLC indoor application with constant envelope PAPR reduction technique using frequency modulation[J]. *Optics Communications*, 2017, 400: 128-135.
- [20] Shen J, Yu J G, Zhao L, et al. Non-binary N-MSK non-orthogonal modulation for wireless communication [C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Education, Management, Information and Medicine, April 24-26, 2015. Shenyang, China. Paris, France:

Atlantis Press, 2015: 82-88.