

面向多速率码分多址可见光通信系统的新码集研究

王建萍, 陈丹阳, 路慧敏, 金建力, 冯莉芳

(北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对无线通信多址接入系统中不同数据流量需求和 VLC 特点, 构造了一种适用于多速率码分多址可见光通信系统的正交可变扩频因子-零互相关 (OVSF-ZCC) 码集, 该码集包含可变长度的单极性扩频序列, 序列之间保持零互相关特性。假设 LED 光源辐射为朗伯分布, 进一步搭建了应用提出的 OVSF-ZCC 码集的多速率码分多址可见光通信系统模型, 并在此基础上分析了码集构造参数、传输速率、传输距离等参数对该系统性能的影响。结果表明, 所构造的 OVSF-ZCC 码集能够有效降低系统多址干扰 (MAI) 的影响, 并支持多址接入系统中不同用户的多种速率传输。

关键词: 可见光通信; 码分多址接入; 正交可变扩频因子

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436X.2020178

Study of a new code set in multi-rate CDMA VLC system

WANG Jianping, CHEN Danyang, LU Huimin, JIN Jianli, FENG Lifang

School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: For the diverse traffic requirements of the wireless communication multiple access system and the characteristics of VLC, a new orthogonal variable spreading factor zero cross correlation (OVSF-ZCC) code set was proposed for multi-rate VLC code division multiple access (CDMA) system, which consisted of unipolar spreading sequences with variable lengths, and zero cross correlation properties. Assuming the radiation of LED light source was Lambert distribution, a multi-rate CDMA-VLC system with proposed code set was further presented. The effects of construction parameters, transmission rate and distance on system performance were evaluated. The results show that the new code set can effectively reduce multiple access interference (MAI), and support multiple transmission rate requirements of different users in multiple access systems.

Key words: visible light communication, code division multiple access, orthogonal variable spreading factor

1 引言

近年来, 随着移动互联网和物联网的快速发展, 移动用户的业务流量呈爆炸式增长, 这对传统的网络接入技术提出了更高的要求^[1-2]。可见光通信 (VLC, visible light communication) 作为一种新兴的无线光通信 (WOC, wireless optical communication) 技术, 将为大密度和高速率的数据交换提供完美的备选方案^[3]。VLC 以可见光谱作为传输媒介, 拥有

丰富的频谱资源, 且不需要无线传输许可; 其以广泛应用的 LED (light-emitting diode) 作为光源进行信号发射, 能有效结合节能照明和高速通信的双重功能, 应用场景广泛。VLC 无电磁辐射, 绿色环保, 安全性好, 并且能够支持高保密通信^[4-6]。目前, 关于 VLC 的研究大多集中在利用均衡、调制、复用等技术实现点对点系统的传输速率提升^[7-9], 而对于多用户接入问题的研究较少, 这就在一定程度上限制了 VLC 的应用空间和发展进程。现有的多址

收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61671055)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61671055)

接入方式主要包括码分多址 (CDMA, code division multiple access)、时分多址 (TDMA, time division multiple access)、波分多址 (WDMA, wavelength division multiple access)、空分多址 (SDMA, space division multiple access)、正交频分多址 (OFDMA, orthogonal frequency division multiple access) 和非正交多址 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 技术, 相应的多用户系统的研究目标主要是减小多址干扰 (MAI, multiple access interference) 和扩大通信容量^[10-11]。

然而, 随着大规模异构设备的采用及节能的考虑, 多样化的流量需求普遍存在于多用户系统中^[12-13], 这为 VLC 的接入提出了更高的要求。文献[14]提出了一种新型多速率 VLC 接入系统, 该系统针对高速信号和低速信号分别采用光电探测器和图像传感器进行接收。文献[15]采用开关键控 (OOK, on-off keying) 和非对称性限幅光正交频分复用 (ACO-OFDM, asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing) 的混合调制方法, 实现了高/低速信号的同时传输。WDMA 技术同样可以实现多用户系统的多速率传输, 但是引入不同颜色的滤光片会增加系统的复杂性, 并无法完全避免通道串扰^[16-17]。引入正交可变扩频因子 (OVSF, orthogonal variable spreading factor) 的 CDMA 方案同样适用于解决多用户 VLC 系统中的多速率接入问题^[18-19]。然而, 由于 VLC 的光强度调制的特点, 传统射频中的双极性编码方案无法直接被采用^[20]。文献[21-22]构造了一种适用于 VLC 系统的单极性零互相关 (ZCC, zero cross correlation) 码集, 良好的相关特性有效提升了 CDMA 系统性能, 但这种码集不能支持多速率通信。文献[23]提出了一种改进的单极性 OVSF 码集, 实现了 VLC 系统的光码分多址和高低速复用, 但是, 该改进编码方案破坏了原始扩频序列的正交性, 导致更多信道间干扰的引入。

本文针对 VLC 信号光传输和多址接入系统中用户多速率通信的实际需求, 构造了一种新的同时具有单极性、可变码长和零互相关特征的 OVSF-ZCC (orthogonal variable spreading factor zero cross correlation) 码集, 将所构造的码集应用于多速率 CDMA-VLC 系统, 并针对不同码集构造参数、传输速率、传输距离等参数对系统性能的影响做了实验仿真和分析。结果表明, 所构造的码集能够有

效提升多速率 CDMA VLC 系统的性能, 具有一定的应用前景。

2 OVSF-ZCC 码集的构造

2.1 相关定义

假设 2 个长度为 L 的序列分别为 $\mathbf{x}_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,L}]$ 和 $\mathbf{x}_j = [x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,L}]$, 它们的周期互相关函数 (PCCF, periodic cross-correlation function)^[22]为

$$\theta_{x_i, x_j}(\tau) = \sum_{l=1}^L x_{i,l} x_{j,(l+\tau) \bmod L}, \forall \tau \geq 0 \quad (1)$$

其中, τ 表示 2 个序列之间的相对位移, l 表示相应序列的第 l 位。当 $i = j$ 时, 式(1)表示周期自相关函数 (PACF, periodic auto-correlation function)。

ZCC 码集 $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_j\}_{j=1}^K$ ($x_{j,l} \in \{0,1\}, 1 \leq j \leq K$) 的相关特性应满足式(2)所示条件。

$$\theta_{x_i, x_j}(\tau) = \begin{cases} w, i = j, \tau = 0 \\ 0, i \neq j, \tau = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, w 表示序列权重, 即序列中“1”的个数; K 和 L 分别表示码集中的序列个数和序列长度。

2.2 构造方法

步骤 1 本文首先通过级联阶数为 K 的初始单位矩阵 \mathbf{I}_K , 构造一个序列数为 K 、码长为 L 、权重为 w 的 ZCC 码集 $\mathbf{H}_K^w = \{\mathbf{h}_k\}_{k=1}^K$ ($h_{k,l} \in \{0,1\}, 1 \leq l \leq Kw$), 如式(3)所示。

$$\mathbf{H}_K^w = \underbrace{[\mathbf{I}_K : \mathbf{I}_K : \dots : \mathbf{I}_K]}_w \quad (3)$$

很容易证明, 该码集是一个 ZCC 码集。

步骤 2 选用任意 ZCC 码集作为初始码集, 构造包含可变扩频因子的 OVSF-ZCC 码集。利用长度 $L_{\text{zero}} = wK$ 的零矩阵 \mathbf{M} 和序列 \mathbf{h}_k 级联生成新的序列 $\mathbf{h}_{k,1}$ 为

$$\mathbf{h}_{k,1} = [\mathbf{h}_k : \underbrace{\mathbf{M} : \mathbf{M} : \dots : \mathbf{M}}_{S^{(k-1)}}] \quad (4)$$

其中, $S (S \geq 1)$ 为可变速率因子。本文将 $\mathbf{h}_{k,1}$ 分配给系统中不同速率的用户, 第 n 个用户所采用的扩频码为 $\mathbf{u}_n = \mathbf{h}_{k,1}$ 。此时, 系统最多支持 $N = K$ 个用户和 $V = K$ 种用户速率, 用户之间的速率比为

$$1 : \frac{1}{1+S} : \frac{1}{1+2S} : \dots : \frac{1}{1+(K-1)S} \quad (5)$$

此外，本文定义用户最高速率和最低速率的比值 $R_v = 1 + (K - 1)S$ 为系统速率最大差异比。例 1 给出了用户数和单位矩阵阶数相等时 ZCC 码集的构造方法。

例 1 当初始单位矩阵阶数 $K=3$ 、码集权重 $w=1$ 时，所构造的初始 ZCC 码集可以表示为

$$\mathbf{H}_3^1 = [\mathbf{I}_3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

当可变速率因子 $S=1$ 时，根据步骤 2 得到的不同用户所采用的 OVFS-ZCC 序列为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_1 = \mathbf{h}_{1,1} = [1 \ 0 \ 0] \\ \mathbf{u}_2 = \mathbf{h}_{2,1} = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \\ \mathbf{u}_3 = \mathbf{h}_{3,1} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \end{cases} \quad (7)$$

此时，系统最多支持的用户数为 3，速率种类为 3，不同的速率比值为 6:3:2，速率最大差异比为 3。

步骤 3 为了扩大系统所能容纳的用户数，需要对 $\mathbf{h}_k (1 \leq k \leq K)$ 进行 $S(k-1)$ 次移位，得到 K 个新的扩展矩阵 \mathbf{H}_k ，如式(8)所示。

$$\mathbf{H}_k = \{\mathbf{h}_{k,i}\}_{i=1}^k = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_k & \mathbf{M} & \cdots & \cdots & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \mathbf{h}_k & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \cdots & \cdots & \mathbf{M} & \mathbf{h}_k \end{bmatrix}_{k \times SkL_{\text{zero}}} \quad (8)$$

其中， $\mathbf{H}_1 = \mathbf{h}_{1,1} = \mathbf{h}_1$ 。 \mathbf{H}_k 矩阵中的不同序列分配给具有相同速率的不同用户，此时，最大支持的相同速率用户数为 $Sk - S + 1$ 。因此，当初始单位阵的阶数为 K 时，系统最多容纳的用户数和最大速率种类分别为 $N_{\text{max}} = \frac{S}{2}K^2 + \left(1 - \frac{S}{2}\right)K$ 和 $V = K$ ，不同用户之间速率的比值和系统速率最大差异比仍可根据式(5)获得。例 2 给出了用户数目为 N_{max} 时的 ZCC 码集构造方法。

例 2 当 $K=3$ 、 $S=1$ 和 $w=1$ ，不同用户从矩阵 \mathbf{H}_1 、 \mathbf{H}_2 和 \mathbf{H}_3 得到其速率所对应的扩频序列 \mathbf{u}_n ，如式(9)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{H}_1 = [\mathbf{u}_1] = [1 \ 0 \ 0]_{1 \times 3} \\ \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 6} \\ \mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_4 \\ \mathbf{u}_5 \\ \mathbf{u}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 9} \end{cases} \quad (9)$$

此时，系统最多支持的用户数为 6，所支持的速率种类仍为 3，不同的速率比值仍为 6:3:2，系统速率最大差异比为 3。

2.3 相关性及证明

在基于 CDMA 的多速率 VLC 系统中，高速率和低速率用户分别采用较短和较长的序列完成扩频，以保证系统的码片速率相同。为了简便起见，在讨论相关性时，假设系统不同用户同时传输码字“1”。扩频矩阵 \mathbf{U} 表示为

$$\mathbf{U} = \{\mathbf{u}_n\}_{n=1}^{N_{\text{max}}} = [\mathbf{U}_1; \mathbf{U}_2; \cdots; \mathbf{U}_K] \quad (10)$$

其中， \mathbf{U}_k 为 \mathbf{H}_k 的 $\frac{L_{\text{lcm}}}{L_{\text{zero}}(1+(k-1)S)}$ 次 ($1 \leq k \leq K$) 复制， L_{lcm} 为系统中采用的所有码长的最小公倍数。很容易证明， \mathbf{H}_k 和 \mathbf{U}_k 均为 ZCC 码集^[22]。码长为 $L=L_{\text{lcm}}$ 的扩频矩阵 \mathbf{U} 的相关性可以通过式(11)计算得到。

$$\begin{aligned} \theta_{u_i, u_j}(\tau) &= \sum_{l=1}^L u_i(l)u_j(l+\tau) \forall \tau \geq 0 = \sum_{l=1}^L u_i(l)u_j(l+\tau) + \\ & \sum_{l=L+1}^{2L} u_i(l)u_j(l+\tau) + \cdots + \sum_{l=L-L+1}^L u_i(l)u_j(l+\tau) = \\ & \begin{cases} w_i, i=j, \tau=0 \\ 0, i \neq j, \tau=0 \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

因此，扩频矩阵 \mathbf{U} 仍是一个 ZCC 码集，能够灵活地为 CDMA-VLC 系统的用户提供具有不同扩频因子的正交扩频序列，进而满足多址接入 VLC 系统中不同速率用户间低 MAI 的信号传递需求。

3 多速率 CDMA-VLC 系统模型

为了对新码集的性能进一步分析，本文建立了如图 1 所示的朗伯辐射特性 LED 作为光源的多速率 CDMA-VLC 系统。假设系统中包含 N 个用户和 V 种速率，每一种速率包含的用户数为 N_v ，满足式(12)所示关系。

$$\sum_{v=1}^V N_v = N, \quad v=1, \dots, V \quad (12)$$

来自 N 个 LED 的不同光信号的总和可表示为

$$S(t) = \sum_{n=1}^N h(t) * s_n(t) = \sum_{v=1}^V \sum_{n_v=1}^{N_v} h(t) * s_{v,n_v}(t) \quad (13)$$

其中， $h(t)$ 表示 VLC 信道的单位冲激响应， $s_{v,n_v}(t)$ 表示第 v 种速率的第 n_v 个用户数据所对应的传输信号^[24]，如式(14)所示。

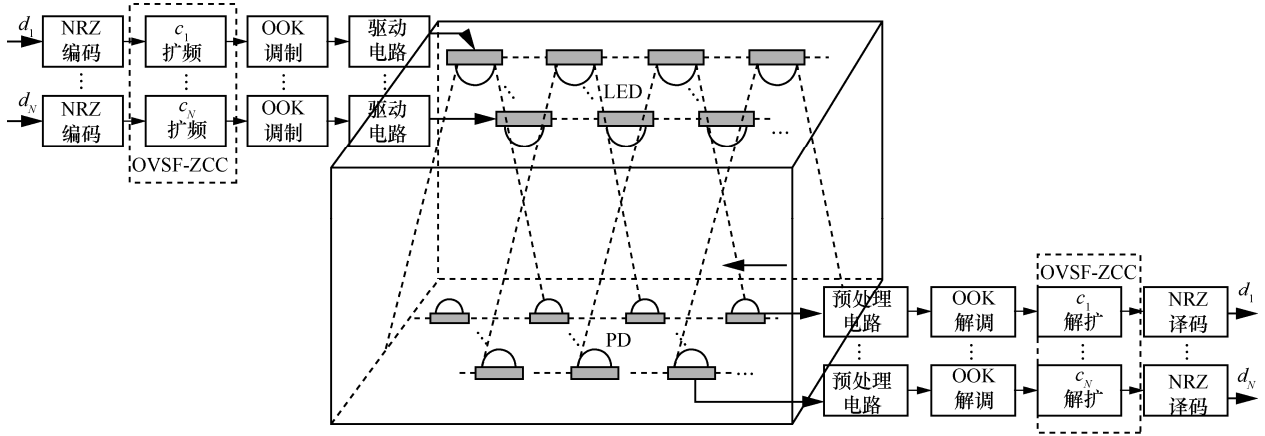


图 1 多速率 CDMA-VLC 系统模型

$$s_{v,n}(t) = P_t \sum_{i=-\infty}^{+\infty} d_{v,n}(i) c_{v,n}(t - iT_v), 0 \leq t \leq T = L_{\text{cm}} T_c \quad (14)$$

其中, P_t 表示 LED 的发射功率, T_c 表示单位码片时间间隔, $d_{v,n}(i)$ 和 $c_{v,n}(t)$ 分别表示第 v 种速率的第 n 个用户的二进制发送序列和 OVSF-ZCC 扩频码的波形, $T_v = L_v T_c$ 表示第 v 种速率的符号周期, L_{cm} 表示所采用的扩频码长度。每一个用户的 $c_{v,n}(t)$ 为

$$c_{v,n}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} u_{v,n}(i) P_{T_c}(t - iT_c) \quad (15)$$

其中, $P_{T_c}(t)$ 表示单位 T_c 持续时间的矩形脉冲, $u_{v,n}(i) \in \{0,1\}$ 表示码长为 L_v 的对应扩频码。

为了便于分析, 本文仅考虑可见光的视距信道、光滤波器增益和光集中器增益均为 1 的情况, 光电探测器 (PD, photo detector) 的接收功率 P_r [25-26] 为

$$P_r = P_t H_0 = P_t \frac{(m+1)A}{2\pi D^2} \cos^m(\Phi) \cos(\Psi) \quad (16)$$

其中, H_0 表示视距信道的直流增益; D 表示 LED 光源到 PD 的直线距离; 辐射角为 $\Phi = \cos^{-1} \frac{H}{D}$, H 表示发送机平面到接收机平面垂直距离; LED 光源的朗伯辐射系数是 $m = \frac{-\ln(2)}{\ln\left(\cos\left(\frac{\Phi_1}{2}\right)\right)}$, Φ_1 表示半角

发光功率; A 表示光探测器的实际接收物理面积。在仿真中, 本文仅考虑入射角 Ψ 和辐射角 Φ 相等的情况, PD 到每个 LED 的距离相同的情况。

在接收端, 首先采用预处理电路完成将接收到的经传输的光信号的光电转换和模数信号转换, 然后进行和发送端相反的处理过程。信号首先经过

OOK 解调, 然后进入 OVSF-ZCC 码集相关器完成解扩, 再使用 NRZ (non-return to zero) 译码模块, 最终恢复出不同用户所需要的数据。根据文献[24], 当系统完全同步时, 系统中每一个用户的信噪比 (SNR, signal to noise ratio) 为

$$\text{SNR} = \frac{I^2}{\langle i^2 \rangle} = \frac{\left(\frac{RwP_r}{L}\right)^2}{\frac{2eBRwP_r}{L} + \frac{4K_b T_n B}{R_L}} \quad (17)$$

其中, $R = \frac{\eta e}{h\nu_0}$ 表示 PD 的响应。仿真中所用到的其他参数含义和取值如表 1 所示。

表 1 实验仿真参数

参数	含义	取值
P_t	LED 发射功率/W	1.0
$\Phi_{\frac{1}{2}}$	半功率半角	70°
H	发送机平面到接收机平面垂直距离/m	2
A	光电探测器接收面积/cm ²	1
ν_0	蓝光中心频率/nm	480
B	噪声带宽/MHz	100
η	光电转换系数	0.6
T_n	接收机噪声温度/K	300
R_L	接收器负载电阻/ Ω	1 030
e	电子电荷量/C	1.602 189×10 ⁻¹⁹
K_b	玻尔兹曼常数	1.380 650 5×10 ⁻²³
h	普朗克常数	6.626 196×10 ⁻³⁴

此外, 系统中第 n 个用户的速率 $R_{b,n}$ 可以通过 $R_{b,n} = \frac{R_c}{L_n}$ 计算得出, 其中, R_c 表示系统的码片速率, L_n 表示第 n 个用户所采用的扩频码长。

4 结果分析和讨论

本文采用蒙特卡罗仿真，最低速用户发送数据量为 20 000 bit，仿真次数为 100 次。对采用新 OVSF-ZCC 码集的多速率 CDMA-VLC 系统的性能进行了分析，包括最大支持用户数和系统最大速率差异比，以及系统的误码率性能。

图 2 给出了 OVSF-ZCC 码集构造时选用的初始单位矩阵阶数 K 和可变速率因子 S 对多速率 CDMA-VLC 系统支持的最大用户数目和速率最大差异比的影响。从图 2 中可以看出，最大用户数随着初始矩阵阶数和可变速率因子 S 的增加而增大，这是由于码集中的序列数量随之增多的缘故。因此，可以通过增加初始单位矩阵阶数提升系统所能容纳的用户数量，而在其固定的情况下，调大可变速率因子也能起到扩大用户数量的作用。同时，系统速率差异比也随初始单位矩阵阶数 K 和可变速率因子 S 的增大而变大，即系统所能容许用户间速率差异也变大。然而，初始单位矩阵阶数 K 和可变速率因子的增加会增大扩频序列长度，即当系统中最小用户速率恒定的情况下，系统的码片速率会增加，进而加大对传输性能的要求。因此，需要根据多址接入系统对用户数、用户速率和速率差异需求以及系统带宽特性来选择合适的初始矩阵阶数和可变速率因子，进而构造出适合于系统的最佳码集。

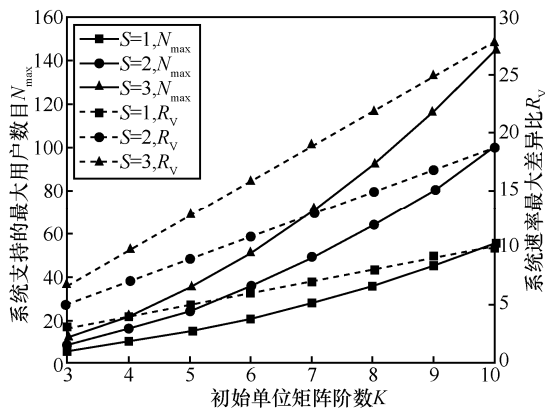


图 2 K 和 S 对 CDMA-VLC 系统的影响

图 3 给出了应用新码集的 CDMA-VLC 系统中不同速率用户误码率和系统平均误码率随传输距离的变化曲线，图 3 中的长虚线表示 FEC (forward error correction) 参考门限 3.8×10^{-3} (下同)。仿真分析中采用的 OVSF-ZCC 码集构造参数分别是 $K=3$ 、 $S=1$ 和 $w=1$ ，此时系统最多容纳 6 个不同速

率的用户数，高、中、低速率对应的用户数目比为 1:2:3，并根据 VLC 信道带宽特性假设码片传输速率 $R_c=72$ Mbit/s。从图 3 中可以看出，随着传输距离的增大，光电探测器接收的信号功率变小使接收端信噪比下降，导致单用户误码率和系统平均误码率性能下降。进而在所限定的系统条件内，传输距离在 2.6 m 以内，系统误码率能够保持在 FEC 门限范围以内。此外，从图 3 中还可以看出，采用不同长度扩频码的不同速率用户的误码率以及系统平均误码率性能基本相近，这由于具有良好正交特性的新码集能降低 MAI，单用户和整个系统的传输性能取决于码片速率，即本文所构造的 OVSF-ZCC 码集具有较强的适应性。为方便起见，以下讨论中本文均采用系统平均误码率结果作为分析依据。

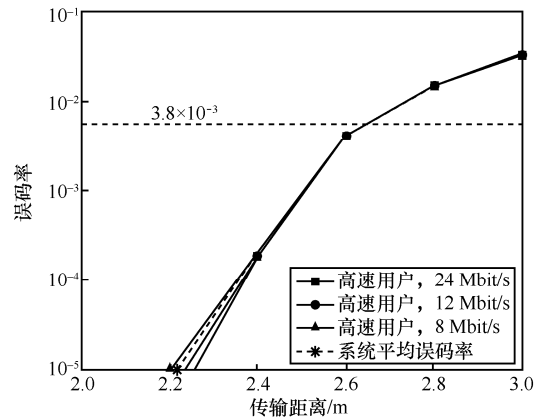


图 3 不同用户和系统平均误码率随传输距离变化的曲线

图 4 展示了 OVSF-ZCC 码集初始单位矩阵阶数 K 、可变速率因子 S 、码集权重 w 在不同传输距离的情况下对多速率 CDMA-VLC 系统平均误码率的影响。在仿真过程中，假设系统所容纳的用户数为 $N=K$ ，并根据 VLC 信道带宽特性将码片传输速率 $R_c=10$ Mbit/s。从图 4 可以看出，在码集权重不变的情况下，随着初始矩阵阶数和可变速率因子的增大，单一用户所需要的码长变长，导致了在接收功率一定的情况下，系统整体的 SNR 变小，引起了系统误码率下降。而当初始矩阵阶数和可变速率因子保持不变，码集权重的变化不会引起系统误码率的变化，这是因为码集权重的改变是通过级联单位矩阵，这不会带来码字权重和码长比值的变化，也就不会改变影响系统误码率的 SNR。因此，合理选择初始矩阵阶数和可变速率因子对改善系统误码性能同样重要。

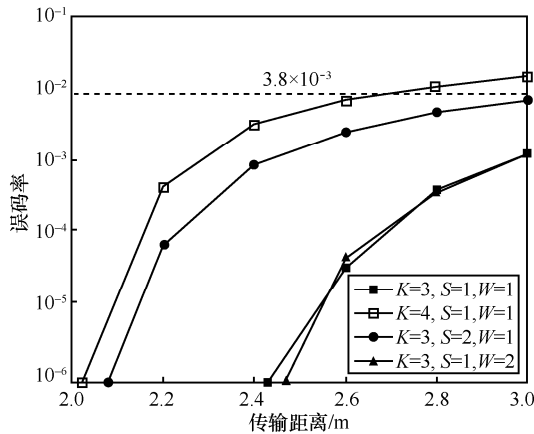


图 4 系统平均误码率随码集构造参数和传输距离变化的曲线

本文进一步研究了码片速率和系统所容纳的用户数对于系统平均误码率的影响,如图 5 所示。仿真分析中采用的 OVSF-ZCC 码集构造参数分别是 $K=4$ 、 $S=1$ 和 $w=1$, 系统所能容纳的用户数分别为 $N=K=4$ 和 $N=N_{max}$, LED 和 PD 视距距离设为 2 m。从图 5 中可以看出,随着码片速率的提升系统误码率性能下降,这是因为 VLC 信道具有高频衰落特性,造成信号码片速率较高时对应接收功率下降。此外,在码集构造参数相同的情况下,由于系统整体 SNR 保持不变,系统中所容纳的用户数目对于系统误码率性能影响很小,这将有利于增大系统支持的用户数。在码片速率 $R_c=60$ Mbit/s 且满足 FEC 门限的情况下,系统最多可以容纳 10 个用户同时以 4 种不同的速率进行数据传输,最高用户速率和最低用户速率分别为 15 Mbit/s 和 3.75 Mbit/s,能够满足多种速率需求。

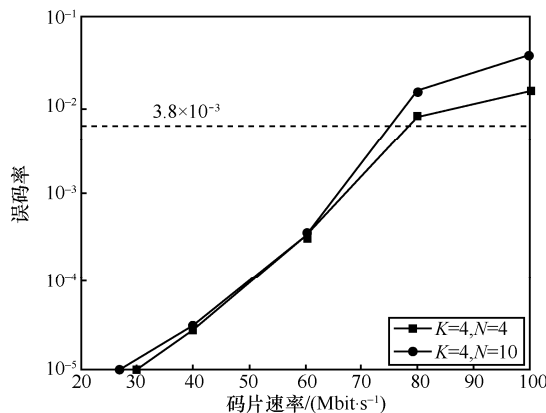


图 5 系统平均误码率随码片速率和系统用户数变化的曲线

5 结束语

本文构造了一种适用于多速率 CDMA-VLC 系

统的 OVSF-ZCC 码集,该码集可以有效降低系统的 MAI。假设 LED 光源辐射为朗伯分布,同时结合 VLC 信道特性,建立了多速率 CDMA-VLC 系统。仿真结果表明,所提码集的良好相关特性能够使其有效提升系统误码率性能,单用户和系统整体的传输性能仅取决于码片速率,适用性更强。在码集构造时,合理选择初始矩阵阶数和可变速率因子,能够有效平衡系统最大支持用户数、速率差异和误码率的关系。当码片速率为 60 Mbit/s,系统最多可以容纳 10 个用户同时以 4 种不同的速率进行数据传输,最高用户速率和最低用户速率分别为 15 Mbit/s 和 3.75 Mbit/s,因此,该方案可以被期待成为新一代无线通信中多速率通信的解决方案。

参考文献:

- [1] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987.
ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication networks: vision, challenges, and key technologies[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2019, 49(8): 963-987.
- [2] YANG P, XIAO Y, XIAO M, et al. 6G wireless communications: Vision and potential techniques[J]. IEEE Network, 2019, 33(4): 70-75.
- [3] 迟楠, 贾俊连. 面向 6G 的可见光通信[J]. 中兴通讯技术, 2020, 2: 1-14.
CHI N, JIA J L. Visible light communication towards 6G[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 2: 1-14.
- [4] 丁德强, 柯熙政. 可见光通信及其关键技术研究[J]. 半导体光电, 2006, 27(2): 114-117.
DING D Q, KE X Z. Visible light communication and research on its key techniques[J]. Semiconductor optoelectronics, 2006, 27(2): 114-117.
- [5] YANG H, ZHONG W D, CHEN C, et al. QoS-driven optimized design based integrated visible light communication and positioning for indoor IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(1): 269-283.
- [6] 贾科军. 面向下一代无线通信的高容量室内可见光通信技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
JIA K J. Research on the high capacity indoor visible light communication for the next generation of wireless communication systems[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [7] BURCHARDT H, SERAFIMOVSKI N, TSONEV D, et al. VLC: beyond point-to-point communication[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(7): 98-105.
- [8] 胡钦政, 邵宇丰, 龙颖, 等. 室内可见光通信调制与解调技术的研究进展[J]. 光通信研究, 2020(3): 12-18.
HU Q Z, SHAO Y F, LONG Y, et al. Research progress on modulation and demodulation technology in LED indoor visible light communication[J]. Study on Optical Communications, 2020(3): 12-18.
- [9] 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.
KE X Z, LEI Y, ZHANG Y. Research on OFDM system based on Hartley transform in visible light communication[J]. Signal Processing,

- 2019, 35(2):266-274.
- [10] 黄明磊. 室内高速可见光通信网络中的多址接入技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
HUANG M L. Research on novel multiple access technologies for indoor high-speed visible light communication networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [11] 杨润耀. 可见光正交频分多址传输理论与实验研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2018.
YANG R Y. Theoretical and experimental study on orthogonal frequency division multiple access for visible light communication[D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2018.
- [12] DEMIRKOL I, CAMPS-MUR D, PARADELLS J, et al. Powering the Internet of things through light communication[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(6): 107-113.
- [13] 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): 6-17.
CHI N, CHEN H. Progress and prospect of high-speed visible light communication[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(3): 6-17.
- [14] NGUYEN D T, PARK S, CHAE Y, et al. VLC/OCC hybrid optical wireless systems for versatile indoor applications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 22371-22376.
- [15] YANG F, GAO J, LIU S. Novel visible light communication approach based on hybrid OOK and ACO-OFDM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(14): 1585-1588.
- [16] 迟楠, 王哲. 可见光通信复用技术研究进展[J]. 光通信技术, 2020, 44(4): 1-7.
CHI N, WANG Z. Research progress on multiplexing techniques of visible light communication[J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(4): 1-7.
- [17] AN J, PHAM Q N, CHUNG W Y. Single cell three-channel wavelength division multiplexing in visible light communication[J]. Optics Express, 2017, 25(21): 25477-25485.
- [18] 刘美玲. 基于 MATLAB 环境下信道地址码 (OVSF 码) 的研究与功能仿真[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
LIU M L. Study and simulation of OVSF codes based on MATLAB[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009.
- [19] 冯莉芳. 广义正交扩频序列理论及其在多速率 QS-CDMA 系统中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
FENG L F. The theory of generalized orthogonal spreading code and its applications in multi-rate QS-CDMA systems[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [20] QIU Y, CHEN S, CHEN H H, et al. Visible light communications based on CDMA technology[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 25(2): 178-185.
- [21] NAWAWI N M, ANUAR M S, JUNITA M N. Cardinality improvement of zero cross correlation (ZCC) code for OCDMA visible light communication system utilizing catenated-OFDM modulation scheme[J]. Optik, 2018(170): 220-225.
- [22] ADDAD M, DJEBBARI A. A new code family for QS-CDMA visible light communication systems[J]. Journal of Telecommunications and Information Technology, 2018(3): 5-8.
- [23] MIYAZAWA T, SASASE I, YOO S J B. Multi-rate spectral phase-encoded time-spreading optical CDMA system using OVSF code sequences[C]//OFC/NFOEC 2007-2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference.

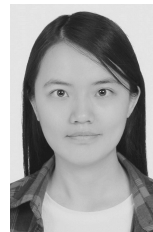
rence. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1-3.

- [24] FENG L, WANG J, HU R Q, et al. New design of optical zero correlation zone codes in quasi-synchronous VLC CDMA systems[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015(1): 120.
- [25] 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.
- [26] 张廷亮. 室内场景可见光通信信道建模及其特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
ZHANG Y L. Research on modeling and characteristics of visible light communication channel in indoor scenes[D]. Xi'an: Xi'dian University, 2019.

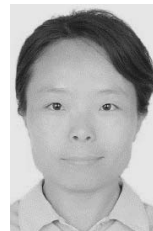
[作者简介]



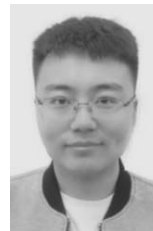
王建萍 (1974-), 女, 河北保定人, 博士, 北京科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为光纤通信理论、可见光通信、微波光子学。



陈丹阳 (1993-), 女, 河北张家口人, 北京科技大学博士生, 主要研究方向为可见光通信及其多址接入关键技术。



路慧敏 (1978-), 女, 辽宁新民人, 博士, 北京科技大学副教授, 主要研究方向为可见光通信、光学器件设计。



金建力 (1992-), 男, 河北衡水人, 北京科技大学博士生, 主要研究方向为面向可见光通信的均衡技术、6G 关键技术。

冯莉芳 (1980-), 女, 河南周口人, 博士, 北京科技大学副教授, 主要研究方向为可见光通信、无线通信编码理论、中继技术等。