

## 基于施密特正交化的降噪多载波相关延迟键控混沌通信系统

张刚<sup>①</sup> 和华杰\*<sup>①</sup> 张鹏<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(重庆邮电大学教务处 重庆 400065)

**摘要:** 为解决传统相关延迟键控(CDSK)混沌通信系统存在的误码(BER)性能差的问题, 该文提出一种基于施密特正交化的降噪多载波相关延迟键控(NR-MC-CDSK)混沌通信系统。在发送端, 利用施密特正交化算法产生 $N$ 组完全正交的混沌载波, 并复制 $P$ 次作为参考信号, 与 $N$ 个信息信号叠加进行传输, 并利用多载波技术, 复用每帧信号传输 $MN$ 个用户信息。在接收端, 将信号经匹配滤波器解调, 然后通过滑动平均滤波器降噪, 并进行相关解调。推导了系统在加性高斯白噪声(AWGN)信道和多径Rayleigh衰落信道中的BER公式并进行了仿真分析, 结果表明系统的BER性能优于众多多载波混沌通信系统, 数据传输速率也相较CDSK系统有明显提升, 为该系统在实际通信系统中的应用提供了理论依据, 并显示了较强的应用价值。

**关键词:** 混沌通信; 延迟相关键控; 施密特正交化; 降噪; 多载波

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)07-1930-09

DOI: 10.11999/JEIT200165

## NR-MC-CDSK Chaotic Communication System Based on Schmidt Orthogonalization

ZHANG Gang<sup>①</sup> HE Huajie<sup>①</sup> ZHANG Peng<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(Office of Teaching Affairs, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In order to solve the shortcomings of high Bit Error Rate (BER) in traditional Correlation Delay Shift Keying (CDSK) chaotic communication system, a Noise Reduction Multi-Carrier Correlated Delay Shift Keying (NR-MC-CDSK) chaotic communication system based on Schmidt orthogonalization is proposed. At the transmitter, Schmidt orthogonalization algorithm is used to generate  $N$  completely orthogonal chaotic signals which are copied  $P$  times as reference signals.  $N$  information signals are added up for transmission in each group and multi-carrier is used to transmit  $MN$  user information per frame. At the receiver, the signal is demodulated by a matched filter, then the signal is averaged by a moving average filter to suppress the noise and demodulated by correlation. The BER formula of the system in Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel and multipath Rayleigh fading channel are derived and simulated. The results show that the BER performance of the system is better than that of many multi-carrier chaotic communication systems and the data transmission rate is improved obviously compared with CDSK system. Theoretical basis for the future application of the system to practical communication systems is provided in the paper and shows strong feasibilities in future engineering application.

**Key words:** Chaotic communication; Correlation Delay Shift Keying (CDSK); Schmidt orthogonalization; Noise reduction; Multi-carrier

收稿日期: 2020-03-10; 改回日期: 2020-12-01; 网络出版: 2020-12-18

\*通信作者: 和华杰 641798020@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771085), 重庆市教育委员会科研项目(KJ1600407, KJQN201900601)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771085), The Research Project of Chongqing Educational Commission (KJ1600407, KJQN201900601)

## 1 引言

为了解决无线通信容易受到天气条件、周围建筑物、反射、衰落信道、干扰等的影响和截获的问题，在过去的几十年中广大研究者提出了许多办法，其中混沌通信是其中引人注目的方法<sup>[1]</sup>。在混沌通信中，因混沌信号对初值的敏感性以及在较长时间间隔内具有良好的相关特性等优点，非周期混沌信号被广泛地用作信息载体<sup>[2-5]</sup>。在混沌通信的研究中，由于混沌信号的频谱性质，混沌数字调制技术可以抵抗信道的不良影响，如频率选择性衰落、窄带干扰等。同时使用混沌信号作为载波可以降低信号被截获的概率，而且实现电路简单，因此混沌数字调制技术在信息安全与通信领域得到了广泛关注和研究<sup>[6-9]</sup>。

根据解调器是否需要同步，将混沌数字调制技术分为相干解调和非相干解调<sup>[10]</sup>。由于相干解调要求发送端和接收端严格同步(在实际中很难满足)，目前混沌键控技术的研究主要还是针对非相干解调。差分混沌移位键控<sup>[11]</sup>(Differential Chaos Shift Keying, DCSK)系统以及相关延迟键控<sup>[12]</sup>(Correlation Delay Shift Keying, CDSK)系统是两种典型的非相干混沌通信系统<sup>[13]</sup>。前者具有较好的误码(Bit Error Rate, BER)性能，但传输速率低，后者保证了较高的传输速率，但是以牺牲BER性能为代价<sup>[14-15]</sup>。由于上述系统各具优缺点，近年来广大研究者提出了许多基于这两种典型系统的改进混沌通信系统。文献<sup>[16]</sup>提出了一种基于Walsh码序列的多用户差分混沌移位键控(MU-CDSK based on Orthogonal chaotic carrier, OMU-DCSK)系统。其利用Walsh码的正交特性以及多进制的方法，通过消除码间干扰来提升系统的BER性能并通过多进制提高系统的数据传输速率。文献<sup>[17]</sup>提出了一种多载波差分混沌移位键控(Multi-Carrier Differential Chaos Shift Keying, MC-DCSK)系统，利用多个正交的子载波在一个码片时间内传输多个用户信息，提高了传统DCSK系统的频谱效率，降低了系统能耗。文献<sup>[18]</sup>提出了一种基于子载波分配的多载波差分混沌移位键控系统。该系统将子载波以最优的方式分配给参考信号和数据信号，通过参考分集实现降噪，提升了系统的BER性能。文献<sup>[19]</sup>

提出了一种改进的正交多载波差分混沌移位键控系统。该系统利用正交调制使给定带宽下的数据速率加倍，提高系统的带宽效率，与MC-DCSK系统相比，该系统的比特率、能量以及BER性能同样得到了提高。

为解决传统CDSK混沌通信系统存在的BER性能差的问题，本文提出了一种基于施密特正交化的降噪多载波CDSK (NR-MC-CDSK)混沌通信系统。利用经过施密特正交化并复制 $P$ 次的 $N$ 路正交混沌信息作为参考信号，并利用信号的正交性，每一路信息信号为 $N$ 个信息信号的叠加，然后利用 $N + M$ 个正交的子载波进行传输，最后在接收端利用滑动平均滤波器降低相关输出中噪声的方差。在加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道和多径Rayleigh衰落信道的条件下，对系统进行了公式的推导和仿真分析，并研究了系统各项指标对系统性能的影响。最终结果表明该系统在合适的参数下，能够有效地提升BER性能和数据传输效率。

## 2 NR-MC-CDSK系统原理

图1为NR-MC-CDSK系统第 $k$ 帧的信号发送端框图。首先，由 $N$ 个混沌信号发生器产生 $N$ 个不同的混沌序列，长度为 $R$ ，为使混沌信号发生器产生不同的混沌序列，这些混沌序列可以由混沌发生器从具有不同初始条件的同一个混沌吸引子中获得，使它们线性无关<sup>[20]</sup>。其中混沌信号发生器采用Logistic映射，首先通过映射产生序列 $c_{i,k}$ ，再利用符号函数进行归一化处理，即可得到混沌序列 $y_{i,k}$ ，其中 $i = 1, 2, \dots, R$ 。同时根据经过归一化的Logistic映射的性质可得 $y_{i,k}$ 的数字特性： $E(y_{i,k}) = 0$ ， $\text{var}(y_{i,k}) = 1$ ， $\text{var}(y_{i,k}^2) = 0$ ，其中 $E(\cdot)$ 表示均值， $\text{var}(\cdot)$ 表示方差。以其中一个混沌信号发生器为例，混沌序列 $y_{i,k}$ 的生成过程为

$$\left. \begin{aligned} c_{i,k} &= 1 - 2c_{i,k}^2, \quad c_{i,k} \in (-1, 1) \\ y_{i,k} &= \text{sgn}(c_{i,k}), \quad y_{i,k} \in \{-1, 1\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

施密特正交化<sup>[21]</sup>(Schmidt orthogonalization)是求欧氏空间正交基的一种方法，在发送端框图中利用该方法可将非完全正交混沌信号转化为完全归一化正交混沌信号。那么第 $k$ 帧第 $n$ 个正交混沌序列 $x_{i,k}^n$ 可以表示为

$$x_{i,k}^n = \begin{cases} y_{i,k}^1 / \sqrt{\sum_{i=1}^R [y_{i,k}^1]^2}, & n = 1 \\ \left( y_{i,k}^n - \sum_{q=1}^{n-1} \left[ \sum_{i=1}^R y_{i,k}^n x_{i,k}^q \right] \cdot x_{i,k}^q \right) / \sqrt{\sum_{i=1}^R \left[ y_{i,k}^n - \sum_{q=1}^{n-1} \left( \sum_{i=1}^R y_{i,k}^n x_{i,k}^q \right) \cdot x_{i,k}^q \right]^2}, & n = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

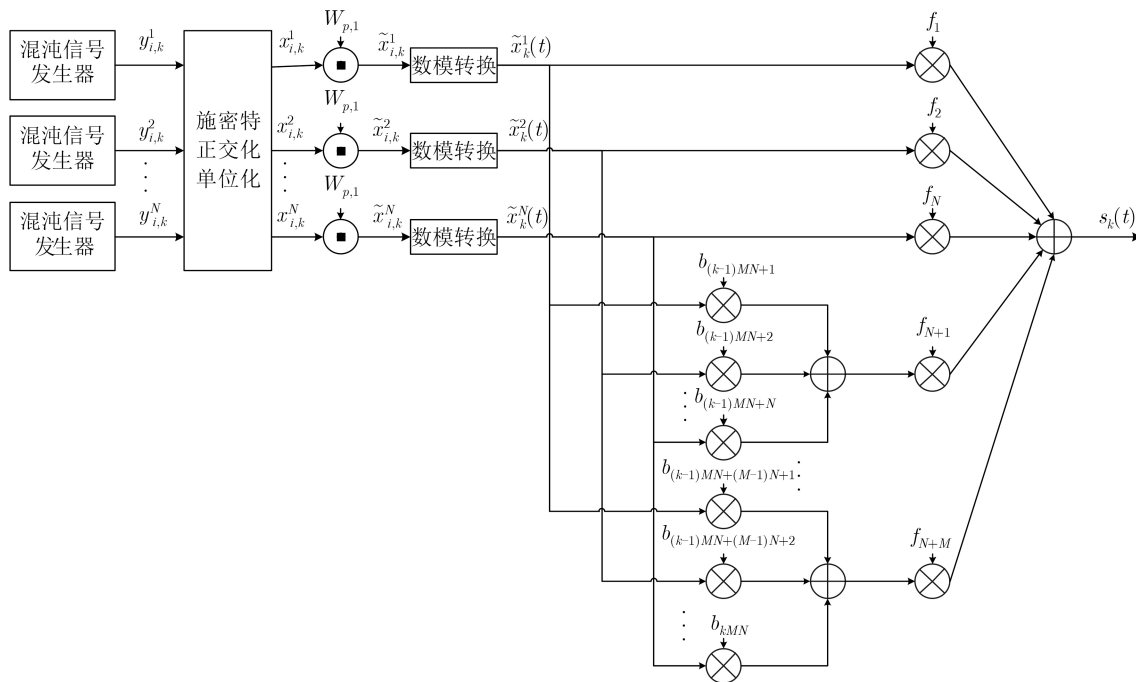


图1 NR-MC-CDSK系统发送端框图

通过式(2)，即可得到 $N$ 个两两正交的混沌序列 $x_{i,k}^n$ ，其中 $i = 1, 2, \dots, R$ ， $n = 1, 2, \dots, N$ 。接下来利用Walsh码序列 $W_{p,1}$ 对生成的 $N$ 个混沌序列 $x_{i,k}^n$ 进行克罗内克积计算，来实现对混沌序列的复制，即 $\tilde{x}_{i,k}^n = x_{i,k}^n \odot W_{p,1}$ ，其中 $\odot$ 表示克罗内克积， $p = 1, 2, \dots, P$ ， $P$ 为复制的次数，由此可得 $N$ 个长为 $\beta = PR$ 且相互正交的混沌序列 $\tilde{x}_{i,k}^n$ 。对于Walsh码序列 $W_{p,1}$ ，其是由Hadamard矩阵生成的，为Hadamard矩阵的第1行，而Hadamard矩阵为一个元素全为“+1”或“-1”的方阵，Hadamard矩阵的结构为

$$W_{2^l} = \begin{bmatrix} W_{2^{l-1}} & W_{2^{l-1}} \\ W_{2^{l-1}} & -W_{2^{l-1}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中， $l = 1, 2, \dots$ ，矩阵每一行都相当于一组Walsh码序列。随后将 $N$ 个混沌序列 $\tilde{x}_{i,k}^n$ 通过数模转换为 $N$ 个连续模拟信号 $x_k^n(t)$ ，其中 $i = 1, 2, \dots, \beta$ ， $n = 1, 2, \dots, N$ ，并将这 $N$ 个混沌信号作为参考信号。接下来将第 $k$ 帧长度为 $D = MN$ 的串行比特信息转化为 $M$ 组且每组为 $N$ 个的并行比特信息，将每一组的 $N$ 个用户比特信息 $b_{(k-1)MN+(m-1)N+n} \in \{+1, -1\}$ 与之前的 $N$ 个混沌信号 $x_k^n(t)$ 分别相乘并相加作为每一组的信息信号。最后用频率为 $f_1, f_2, \dots, f_N$ 的 $N$ 个子载波传输 $N$ 个参考信号以及频率为 $f_{N+1}, f_{N+2}, \dots, f_{N+M}$ 的 $M$ 个子载波传输 $M$ 组信息信号，可知系统一帧的信号持续时间为 $\beta T_c$ ，那么NR-MC-CDSK系统发送第 $k$ 帧的发送端信号 $s_k(t)$ 为

$$s_k(t) = \sum_{n=1}^N [x_k^n(t) \cos(2\pi f_n t + \phi_n)] + \sum_{m=1}^M \left\{ \left[ \sum_{n=1}^N b_{(k-1)MN+(m-1)N+n} x_k^n(t) \right] \cdot \cos(2\pi f_{N+m} t + \phi_{N+m}) \right\} \quad (4)$$

其中， $\phi_n$ 和 $\phi_{N+m}$ 表示载波调制过程中引入的相位角，为方便分析，本文对每个子载波的传输能量进行归一化处理。

对于多载波混沌通信系统而言，假设调制子载波在码片持续时间内是正交的<sup>[17]</sup>。因此第 $j$ 个子载波对应的基带频率为 $f_j = f_p + j/T_c$ ，其中 $f_p$ 为子载波基频，两个相邻子载波之间的最小距离为 $\Delta = (1 + \alpha)/T_c$ 。

图2为NR-MC-CDSK系统的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)，设 $B$ 为系统的总带宽，当比特持续时间 $\Delta$ 和总带宽 $B$ 已知时，码片持续时间 $\Delta$ 和扩展因子 $\beta$ 取决于子载波的数目 $N + M$ ，每个子载波频带 $B_c$ 之间的距离为 $\Delta$ 。本文中，将总带宽 $B$ 分为 $N + M$ 个带宽频带，如图2所示。

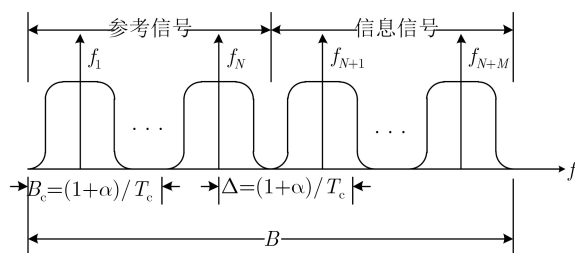


图2 NR-MC-CDSK系统的功率谱密度

通过式(4)可计算出NR-MC-CDSK系统的平均比特能量为

$$E_b = E \left[ \int_{t=0}^{T_b} (s_k(t)^2) dt \right] / MN$$

$$= PR(N + MN)E[x^2_{i,k}] / (MN) \quad (5)$$

本文利用多径Rayleigh衰落信道模型来研究NR-MC-CDSK系统的实际信号传输过程。图3为多径Rayleigh衰落信道模型，其是由L条独立的Rayleigh衰落信道组成，这L条信道的信道参数为λ<sub>l</sub>，其中l = 1, 2, ..., L，这些参数服从Rayleigh分布且相互独立，τ<sub>l</sub>为各个路径的延迟，其中l = 1, 2, ..., L，而ξ<sub>k</sub>(t)是信道中的加性高斯白噪声。那么经过多径Rayleigh衰落信道后，所接收到的信号r<sub>k</sub>(t)为

$$r_k(t) = \sum_{l=1}^L \lambda_l s_k(t - \tau_l) + \xi_k(t) \quad (6)$$

图4为NR-MC-CDSK系统第k帧的信号接收端框图。首先，设计考虑提供一个具有良好性能

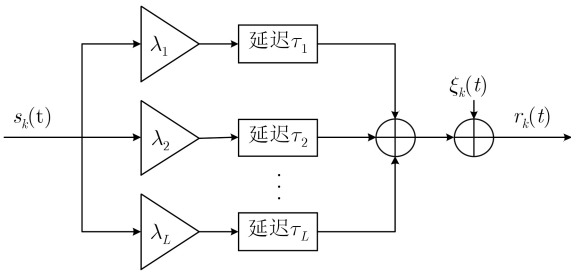


图3 多径Rayleigh衰落信道模型

接收器，因此使用一组匹配滤波器，每个滤波器解调r<sub>k</sub>(t)相应的载波频率f<sub>j</sub>的期望信号，其中j = 1, 2, ..., N + M，并每隔t = iT<sub>c</sub>对信号进行采样，便得到了离散的信号r̃<sub>i,k</sub><sup>j</sup>，其中j = 1, 2, ..., N + M, i = 1, 2, ..., β，然后将这N + M路信号分别通过滑动平均滤波器，滑动平均滤波器的原理如图5所示，滑动平均滤波器有一个大小为P的滑窗，可将通过它的信号序列每P个信号值为一组进行加和求平均，所以通过该滤波器的信号长度变为原来的1/P，即信号r̃<sub>i,k</sub><sup>j</sup>的长度为R。最后将所得的信号r̃<sub>i,k</sub><sup>j</sup>的后M个分别与前N个作相关运算即可解调出M组用户比特信息。那么第k帧解调第m组的第u个用户信息的相关器输出为

$$Z_{k,u}^m = \sum_{i=(k-1)R+1}^{kR} \tilde{r}_{i,k}^u \tilde{r}_{i,k}^{N+m}$$

$$= \sum_{i=(k-1)R+1}^{kR} \left( \sum_{l=1}^L \lambda_l x_{i-\tau_l,k}^u + \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \xi_{i+p,k}^u \right)$$

$$\cdot \left( \sum_{l=1}^L \lambda_l \sum_{n=1}^N b_{(k-1)MN+(m-1)N+n} x_{i-\tau_l,k}^n + \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \xi_{i+p,k}^{N+m} \right)$$

$$= A + B + C + D \quad (7)$$

$$A = \sum_{i=(k-1)R+1}^{kR} \left[ b_{(k-1)MN+(m-1)N+u} \left( \sum_{l=1}^L \lambda_l x_{i-\tau_l,k}^n \right)^2 \right] \quad (8)$$

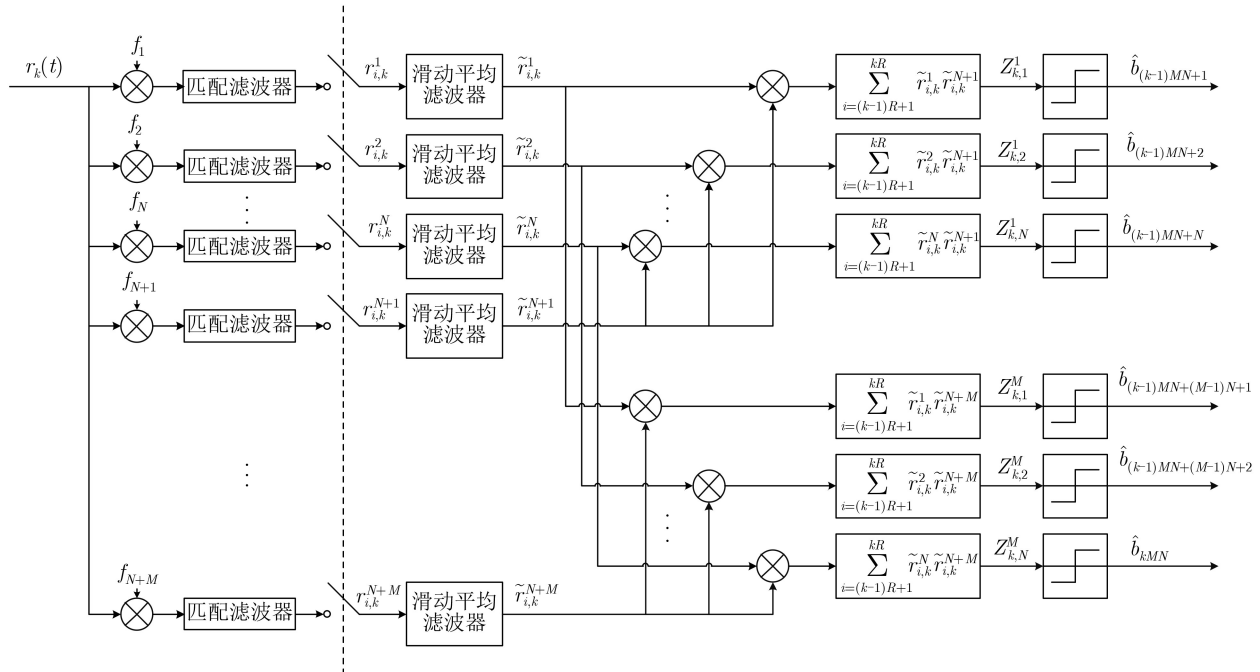


图4 NR-MC-CDSK系统接收端框图

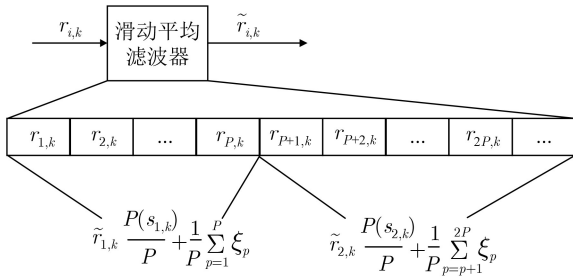


图5 滑动平均滤波器结构

$$B = \sum_{i=(k-1)R+1}^{kR} \left[ \frac{1}{P} \sum_{l=1}^L \lambda_l x_{i-\tau_l, k}^u \xi_{i, k}^{N+m} \sum_{p=1}^P \xi_{i+p, k}^{N+m} \right] \quad (9)$$

$$C = \sum_{i=(k-1)R+1}^{kR} \left[ \frac{1}{P} \sum_{l=1}^L \lambda_l \cdot \sum_{n=1}^N b_{(k-1)MN+(m-1)N+n} x_{i-\tau_l, k}^n \sum_{p=1}^P \xi_{i+p, k}^u \right] \quad (10)$$

$$D = \sum_{i=(k-1)R+1}^{kR} \left[ \frac{1}{P^2} \sum_{p=1}^P \xi_{i+p, k}^u \sum_{p=1}^P \xi_{i+p, k}^{N+m} \right] \quad (11)$$

其中,  $A$ 为有用信号项,  $B$ 与 $C$ 为参考信号及信息信号与高斯噪声之间的干扰项,  $D$ 为噪声与噪声之间的干扰项。对式(7)进行如下的门限判决, 即可解调出用户比特信息 $\hat{b}_{(k-1)MN+(m-1)N+u}$

$$\hat{b}_{(k-1)MN+(m-1)N+u} = \begin{cases} -1, & Z_{k,u}^m < 0 \\ +1, & Z_{k,u}^m \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

### 3 NR-MC-CDSK系统性能分析

#### 3.1 BER性能分析

本文使用高斯近似(Gaussian Approximation, GA)法对NR-MC-CDSK系统在多径Rayleigh衰落信道下的BER性能进行分析和推导, 下面的数学推导是基于以下假设完成的: (1)对于 $\xi_{i,k}$ 与 $\xi_{j,k}$ , 当 $i \neq j$ 时, 这两者是相互独立的。(2)对于 $\xi_{i,k}$ 与 $x_{j,k}$ , 当 $i \neq j$ 时, 这两者同样是相互独立的。(3)对于延迟 $\tau_l (l = 1, 2, \dots, L)$ , 其远远小于符号间隔, 即 $\tau_l \ll \beta$ , 因此符号间干扰(Inter Symbol Interference, ISI)可以忽略不计, 所以满足

$$x_{i-\tau_v, k}^n x_{i-\tau_l, k}^n \approx 0, v \in [1, L] \text{ 且 } l \neq v \quad (13)$$

根据中心极限定理, 当NR-MC-CDSK系统的扩频因子 $\beta$ 足够大时, 对于式(7)而言, 它是近似服从高斯分布的, 那么可将第 $k$ 帧NR-MC-CDSK系统的理论BER表示为

$$\begin{aligned} \text{BER} &= \frac{1}{2} \text{Prob}(Z_{k,u}^m < 0 | b_m = +1) \\ &+ \frac{1}{2} \text{Prob}(Z_{k,u}^m > 0 | b_m = -1) \\ &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \frac{|E[Z_{k,u}^m]|}{\sqrt{2 \text{var}[Z_{k,u}^m]}} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

式中,  $\text{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数

$$\text{erfc}(x) = 2 \int_x^\infty e^{-\mu^2} d\mu / \sqrt{\pi} \quad (15)$$

根据式(14)可知, 若要计算NR-MC-CDSK系统的理论BER需要得到相关输出 $Z_{k,u}^m$ 的均值和方差

$$\begin{aligned} E[Z_{k,u}^m] &= E[A] = \\ E \left\{ \sum_{i=(k-1)R+1}^{kR} \left[ b_{(k-1)MN+(m-1)N+u} \left( \sum_{l=1}^L \lambda_l x_{i-\tau_l, k}^n \right)^2 \right] \right\} \\ &= \sum_{l=1}^L \lambda_l^2 R b_{(k-1)MN+(m-1)N+u} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{var}[Z_{k,u}^m] = \text{var}[A] + \text{var}[B] + \text{var}[C] + \text{var}[D] \quad (17)$$

对于式(16), 由于协方差为0, 所以相关输出的方差为各项方差的和。最后根据不同混沌信号之间低相关性以及其统计特性, 可得

$$\begin{aligned} \text{var}[Z_{k,u}^m] &= 0 + \sum_{l=1}^L \lambda_l^2 R N_0 / 2P \\ &+ \sum_{l=1}^L \lambda_l^2 R N N_0 / 2P + R N_0^2 / 4P^2 \\ &= \sum_{l=1}^L \lambda_l^2 R (N+1) N_0 / 2P + R N_0^2 / 4P^2 \end{aligned} \quad (18)$$

根据式(16)和式(18), 可将式(14)化为

$$\begin{aligned} \text{BER} &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left[ \left( (N+1)(M+1)(E_b/N_0)^{-1} \right. \right. \\ &\left. \left. / \left( \sum_{l=1}^L \lambda_l^2 M \right) + R(M+1)^2 (E_b/N_0)^{-2} \right. \right. \\ &\left. \left. / \left[ 2M^2 \left( \sum_{l=1}^L \lambda_l^2 \right)^2 \right] \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

令 $\gamma_b = \sum_{l=1}^L \lambda_l^2 E_b/N_0$ , 则式(19)可化为

$$\begin{aligned} \text{BER} &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left[ \left( (N+1)(M+1)/(M\gamma_b) + R(M+1)^2 \right. \right. \\ &\left. \left. / \left[ 2(M\gamma_b)^2 \right] \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

对于 $L$ 条独立同分布的Rayleigh衰落信道而言,  $\gamma_b$ 的瞬时概率密度函数为<sup>[2]</sup>

$$f(\gamma_b) = \gamma_b^{L-1} \exp(-\gamma_b/\bar{\gamma}_c)/(L-1)! \bar{\gamma}_c^L = f(\gamma_b, \bar{\gamma}_c, L) \quad (21)$$

其中,  $\bar{\gamma}_c$ 为每条路径上信号的平均信噪比, 且定义为

$$\bar{\gamma}_c = E(\lambda_l^2) E_b/N_0 = E(\lambda_v^2) E_b/N_0, l \neq v \quad (22)$$

对于不同的信道,  $\gamma_b$ 的瞬时概率密度函数可以写为

$$f(\gamma_b) = \sum_{l=1}^L \frac{\rho_l}{\bar{\gamma}_l} \exp(-\gamma_b/\bar{\gamma}_l) = \sum_{l=1}^L \rho_l f(\gamma_b, \bar{\gamma}_c, 1) \quad (23)$$

其中

$$\rho_l = \prod_{v=1, v \neq l}^L [\bar{\gamma}_l/(\bar{\gamma}_l - \bar{\gamma}_v)] \quad (24)$$

其中,  $\bar{\gamma}_l$ 为 $\gamma_l = \lambda_l^2 E_b/N_0$ 的平均值, 而 $\gamma_l$ 表示第 $l$ 条信道的瞬时信噪比。

最终, 可得NR-MC-CDSK系统在多径Rayleigh衰落信道下的理论BER为

$$\begin{aligned} \text{BER} &= \int_0^\infty \text{BER}(\gamma_b) f(\gamma_b) d\gamma_b \\ &= \int_0^\infty \frac{1}{2} \text{erfc} \left[ \left( (N+1)(M+1)/(M\gamma_b) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + R(M+1)^2/[2(M\gamma_b)^2] \right)^{-\frac{1}{2}} \right] f(\gamma_b) d\gamma_b \end{aligned} \quad (25)$$

当式(19)中的 $\lambda_1 = 1, \lambda_l = 0 (2 \leq l \leq L)$ , 可得NR-MC-CDSK系统在AWGN信道中的理论BER公式为

$$\begin{aligned} \text{BER}_{\text{AWGN}} &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left[ \left( (N+1)(M+1)(E_b/N_0)^{-1}/M \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + R(M+1)^2(E_b/N_0)^{-2}/(2M^2) \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

### 3.2 NR-MC-CDSK系统传输速率及能量效率分析

令 $T_{b,\text{CDSK}} = \beta T_c$ 和 $T_{b,\text{NR-MC-CDSK}} = \beta T_c/(MN)$ 分别为CDSK系统以及NR-MC-CDSK系统的单位比特持续时间, 由此可得NR-MC-CDSK系统相比CDSK系统的信息率增强因子IRE以百分比形式表示为

$$\begin{aligned} \text{IRE} &= (T_{b,\text{CDSK}}/T_{b,\text{NR-MC-CDSK}} - 1) \times 100\% \\ &= (MN - 1) \times 100\% \end{aligned} \quad (27)$$

令 $E_{b,\text{CDSK}} = 2\beta T_c E[x_{i,k}^2]$ 和 $E_{b,\text{NR-MC-CDSK}} = (N+MN)\beta T_c E[x_{i,k}^2]/MN$ 为CDSK系统以及NR-MC-CDSK系统的平均比特能量, 与CDSK系统相比, NR-MC-CDSK系统的节能增强因子ESE以百

分比形式表示为

$$\begin{aligned} \text{ESE} &= (1 - E_{b,\text{NR-MC-CDSK}}/E_{b,\text{CDSK}}) \times 100\% \\ &= \frac{M-1}{2M} \times 100\% \end{aligned} \quad (28)$$

从式(27)与式(28)中, 可得NR-MC-CDSK系统当 $N > 1, M > 1$ 时, 数据传输速率一直优于CDSK系统, 而对于提高的能量效率而言, 随着组数 $M$ 的增大, 其节省的能量就越多并趋于50%。

### 4 NR-MC-CDSK系统BER性能仿真

为进一步证明第3节中BER公式推导的正确性, 以及了解不同参数对NR-MC-CDSK系统BER性能的影响, 本节对NR-MC-CDSK系统在AWGN信道及多径Rayleigh衰落信道下的BER性能进行了仿真分析。

为验证NR-MC-CDSK系统中采用施密特正交化技术的优势, 图6显示了在AWGN信道下, 当 $\beta = 256, M = 2, P = 4$ 且每组用户数 $N$ 不同时, 施密特正交化生成的正交混沌序列与不同初始条件下生成的非施密特正交化混沌序列的BER性能对比图。从图中可以明显看出, 使用施密特正交化生成正交混沌序列在不同 $N$ 的情况下相比原系统都有更优越的BER性能, 这是由于在长度 $\beta$ 有限情况下混沌序列间实际呈现弱相关性, 而经施密特正交化后呈现完全正交, 进一步减小了相关输出的方差。

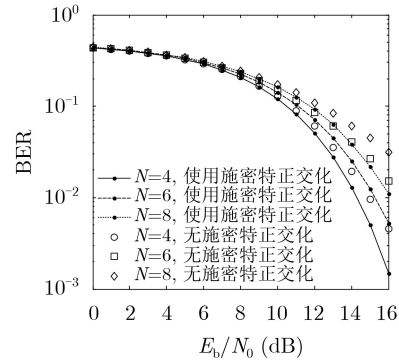


图6 AWGN信道下, 系统有无施密特正交化的BER性能对比图

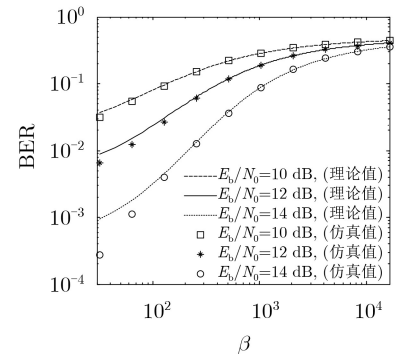


图7 AWGN信道下, 系统BER随 $\beta$ 的变化曲线

为了研究扩频因子 $\beta$ 对NR-MC-CDSK系统BER性能的影响,作了如图7所示的AWGN信道下,当 $N = 2, M = 2, P = 4$ 时,不同 $E_b/N_0$ 条件下系统BER随扩频因子变化的曲线图。图中显示了在AWGN信道下,无论 $E_b/N_0$ 的大小,系统的BER性能随着 $\beta$ 的增大而逐渐恶化,这是由于 $\beta$ 影响相关输出中干扰项方差的大小, $\beta$ 的增大将使得干扰项方差增大,以至于错判增多。另外,当 $\beta$ 较小时,理论值与仿真值符合程度不是很好,这是由GA法局限性所导致,之所以出现这种现象,是因为当 $\beta$ 较小时,信号并不符合高斯分布。

图8表示当 $\beta = 256, M = 2, P = 4$ 时,每组用户数 $N$ 的变化对NR-MC-CDSK系统的BER性能的影响曲线,将在AWGN信道下和多径Rayleigh衰落信道( $L = 3, E(\lambda_1^2) = E(\lambda_2^2) = E(\lambda_3^2) = 1/3$ )下的仿真分别为图8(a)和图8(b),从图中可以明显地看到,理论值与实验值的曲线重合得很好,证明了式(25)与式(26)的推导是正确的。其次,在两种信道条件下随着 $N$ 的增大, NR-MC-CDSK系统的BER性能随着信号与噪声干扰项的增多而逐渐恶化。

图9表示当 $\beta = 256, N = 2, P = 4$ 时,组数 $M$ 的

变化对NR-MC-CDSK系统的BER性能的影响曲线,而图7(a)和图7(b)分别为系统处在AWGN信道下和多径Rayleigh衰落信道( $L = 3, E(\lambda_1^2) = E(\lambda_2^2) = E(\lambda_3^2) = 1/3$ )情况下的曲线。从图中可知, NR-MC-CDSK系统在两种信道条件下,都体现出一点:随着 $M$ 的增大,系统BER性能逐渐变好。

图10为当 $\beta = 256, N = 2, M = 2$ 时,处于不同复制次数 $P$ 的NR-MC-CDSK系统的BER性能与传输相同用户数的SA-MC-DCSK, QMC-DCSK, MC-DCSK, DCSK和CDSK系统相比较的曲线图。将在AWGN信道下和多径Rayleigh衰落信道( $L = 3, E(\lambda_1^2) = E(\lambda_2^2) = E(\lambda_3^2) = 1/3$ )下的仿真分为图10(a)和图10(b)。从图10(a)和图10(b)可以看出,随着 $P$ 的增大, NR-MC-CDSK系统的BER性能逐渐变好,这是因为相关输出的最后一项的方差减小了,以至于错判减少, BER降低。其次,单独从图10(a)中可以看出在AWGN信道下, NR-MC-CDSK系统其BER性能一直优于QMC-DCSK, 当 $P = 8$ 时,其BER性能优于其他所有系统。而从图10(b)可以得出,在多径Rayleigh衰落信道下, NR-MC-CDSK系统的BER性能优于QMC-DCSK, MC-DCSK。当 $P = 8$ 时,甚至优于SA-MC-DCSK系统。

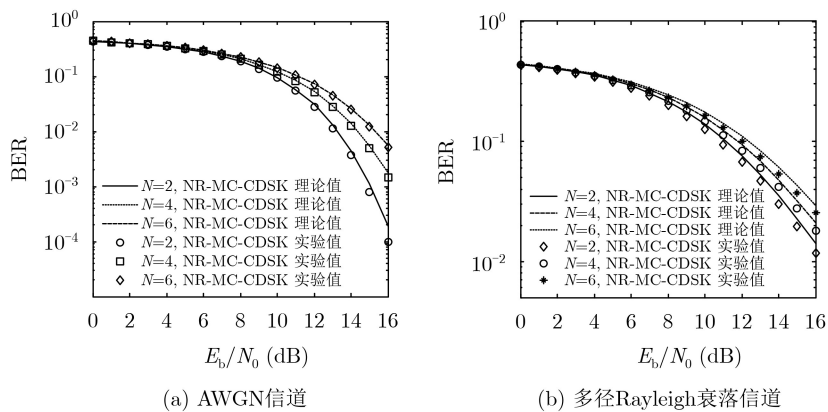


图8 每组用户数 $N$ 与系统BER性能的关系曲线图

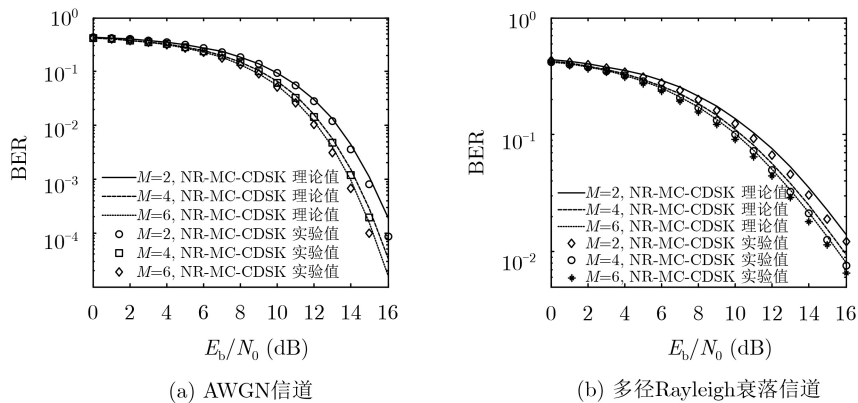
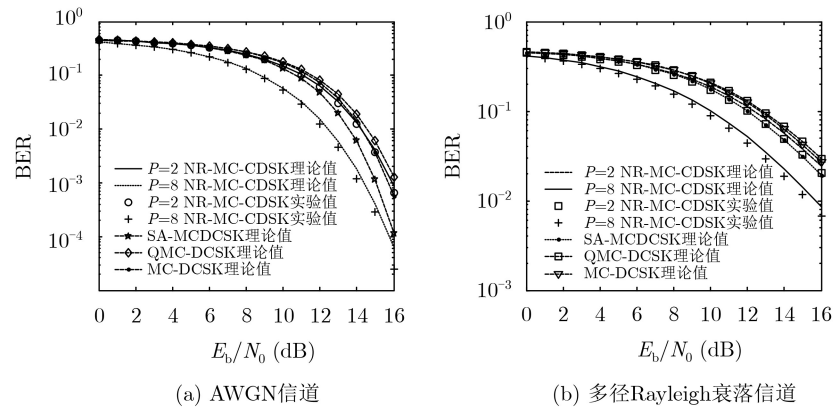


图9 组数 $M$ 与系统BER性能的关系曲线图

图 10 处于不同复制次数 $P$ 的系统BER性能与其他系统比较的曲线图

## 5 结束语

由于传统的CDSK混沌通信系统存在高误码率的缺点，本文提出一种基于施密特正交化的降噪多载波CDSK混沌通信系统。利用施密特正交化、滑动平均滤波器和多载波来提升系统的性能，对系统进行了AWGN信道下和多径Rayleigh衰落信道下的公式推导与仿真分析，结果显示NR-MC-CDSK系统相较于QMC-DCSK有较好的BER性能，在一定参数条件下，系统的BER性能甚至优于MC-DCSK和SA-MC-DCSK系统。

## 参考文献

- [1] LI Ning, MARTÍNEZ-ORTEGA J F, DÍAZ V H, *et al.* A new high-efficiency multilevel frequency-modulation differential chaos shift keying communication system[J]. *IEEE Systems Journal*, 2018, 12(4): 3334–3345. doi: [10.1109/jsyst.2017.2715661](https://doi.org/10.1109/jsyst.2017.2715661).
- [2] ZHANG Bangquan, XU Weikai, WU Yunfeng, *et al.* Design and performance analysis of multilevel code-shifted  $M$ -ary differential chaos shift keying system[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2019, 66(7): 1257–1261. doi: [10.1109/TCSII.2018.2880779](https://doi.org/10.1109/TCSII.2018.2880779).
- [3] CHEND Guixian, WANG Lin, XU Weikai, *et al.* Carrier index differential chaos shift keying modulation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2017, 64(8): 907–911. doi: [10.1109/TCSII.2016.2613093](https://doi.org/10.1109/TCSII.2016.2613093).
- [4] 曹学鹏, 吕毅博, 黄婷婷, 等. 不同混沌调制方式在基于超宽带系统的体内信道下的性能表现[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2016, 28(1): 72–77. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2016.01.011](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2016.01.011).  
CAO Xuepeng, LÜ Yibo, HUANG Tingting, *et al.* Performance of different DCSK schemes over the UWB in-body channel[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2016, 28(1): 72–77. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2016.01.011](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2016.01.011).
- [5] 张刚, 赵畅畅, 张天骐. 短参考正交多用户差分混沌键控方案的性能分析[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(9): 2055–2062. doi: [10.11999/JEIT181038](https://doi.org/10.11999/JEIT181038).  
ZHANG Gang, ZHAO Changchang, and ZHANG Tianqi. Performance analysis of short reference orthogonal multiuser differential chaotic shift keying scheme[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(9): 2055–2062. doi: [10.11999/JEIT181038](https://doi.org/10.11999/JEIT181038).
- [6] 贺利芳, 陈俊, 张天骐. 短参考多用户差分混沌移位键控通信系统性能分析[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(8): 1902–1909. doi: [10.11999/JEIT190117](https://doi.org/10.11999/JEIT190117).  
HE Lifang, CHEN Jun, and ZHANG Tianqi. Performance analysis of short reference multi-user differential chaos shift keying communication system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(8): 1902–1909. doi: [10.11999/JEIT190117](https://doi.org/10.11999/JEIT190117).
- [7] MIN X, XU W, WANG L, *et al.* Promising performance of a frequency-modulated differential chaos shift keying ultra-wideband system under indoor environments[J]. *IET Communications*, 2010, 4(2): 125–134. doi: [10.1049/iet-com.2008.0658](https://doi.org/10.1049/iet-com.2008.0658).
- [8] KOLUMBAN G. UWB technology: Chaotic communications versus noncoherent impulse radio[C]. The 2005 European Conference on Circuit Theory and Design, 2005, Cork, Ireland, 2005: II/79-II/82. doi: [10.1109/ECCTD.2005.1522997](https://doi.org/10.1109/ECCTD.2005.1522997).
- [9] HERCEG M, KADDOUM G, VRANJEŠ D, *et al.* Permutation index DCSK modulation technique for secure multiuser high-data-rate communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(4): 2997–3011. doi: [10.1109/TVT.2017.2774108](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2774108).
- [10] KADDOUM G, SOJERI E, and NIJSURE Y. Design of a short reference noncoherent chaos-based communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(2): 680–689. doi: [10.1109/TCOMM.2015.2514089](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2514089).
- [11] KOLUMBAN G, VIZVARI B, SCHWARZ W, *et al.* Differential chaos shift keying: A robust coding for chaos communication[C]. The 4th International Workshop on

- Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, Seville, Spain, 1996: 87–92.
- [12] YANG Hua, TANG W K S, CHEN Guanrong, *et al.* System design and performance analysis of orthogonal multi-level differential chaos shift keying modulation scheme[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2016, 63(1): 146–156. doi: [10.1109/TCSI.2015.2510622](https://doi.org/10.1109/TCSI.2015.2510622).
- [13] KADDOUM G. Design and performance analysis of a multiuser OFDM based differential chaos shift keying communication system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(1): 249–260. doi: [10.1109/TCOMM.2015.2502259](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2502259).
- [14] KADDOUM G and GAGNON F. Performance analysis of STBC-CSK communication system over slow fading channel[J]. *Signal Processing*, 2013, 93(7): 2055–2060. doi: [10.1016/j.sigpro.2012.12.020](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2012.12.020).
- [15] QUYEN N X, DUONG T Q, and NALLANATHAN A. Modelling, analysis and performance comparison of two direct sampling DCSK receivers under frequency non-selective fading channels[J]. *IET Communications*, 2016, 10(11): 1263–1272. doi: [10.1049/iet-com.2015.1103](https://doi.org/10.1049/iet-com.2015.1103).
- [16] 张刚, 徐联冰, 张天骐. 无信号内干扰的MAMU-CDSK混沌通信系统[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(4): 906–913. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2019.04.29](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2019.04.29).  
ZHANG Gang, XU Lianbing, and ZHANG Tianqi. MAMU-CDSK chaotic communication system with no intra-signal interference[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(4): 906–913. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2019.04.29](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2019.04.29).
- [17] KADDOUM G, RICHARDSON F D, and GAGNON F. Design and analysis of a multi-carrier differential chaos shift keying communication system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(8): 3281–3291. doi: [10.1109/TCOMM.2013.071013.130225](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2013.071013.130225).
- [18] YANG Hua, JIANG Guoping, TANG W K S, *et al.* Multi-carrier differential chaos shift keying system with subcarriers allocation for noise reduction[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2018, 65(11): 1733–1737. doi: [10.1109/TCSII.2017.2752754](https://doi.org/10.1109/TCSII.2017.2752754).
- [19] QUYEN N X and PHAM C K. Quadrature multi-carrier DCSK: A high-efficiency scheme for radio communications[C]. 2017 International Conference on Advanced Technologies for Communications, Quy Nhon, Vietnam, 2017: 186–191. doi: [10.1109/ATC.2017.8167614](https://doi.org/10.1109/ATC.2017.8167614).
- [20] YANG Hua, TANG W K S, CHEN Guanrong, *et al.* Multi-carrier chaos shift keying: System design and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2017, 64(8): 2182–2194. doi: [10.1109/TCSI.2017.2685344](https://doi.org/10.1109/TCSI.2017.2685344).
- [21] VENKATESH S and SINGH P. Performance analysis of OCV based non coherent MA chaotic communication system with adaptive multi user receivers[C]. 2011 International Conference on Devices and Communications (ICDeCom), Mesra, India, 2011: 1–5. doi: [10.1109/ICDECOM.2011.5738462](https://doi.org/10.1109/ICDECOM.2011.5738462).
- 张刚: 男, 1976年生, 博士, 教授, 主要研究方向为混沌同步、混沌保密通信。  
 和华杰: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为混沌保密通信。  
 张鹏: 男, 1980年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能科学、保密通信。

责任编辑: 马秀强