



文章编号:1001-9081(2019)05-1425-04

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2018081760

多用户正交相关延迟键控方案性能分析

张刚, 黄南飞*, 张天骐

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

(*通信作者电子邮箱 815838321@qq.com)

摘要:为了改善混沌信号的传输性能,在相关延迟移位键控(CDSK)方案和多载波相关延迟移位键控(MC-CDSK)方案的基础上,提出一种多用户正交相关延迟移位键控(MU-OCDSK)方案。该方案利用多载波对混沌信号进行调制,得到的结果相对于CDSK,不仅有更高的频谱效率,而且误码率也得到了一定的改善。对该方案进行了理论仿真和蒙特卡洛仿真,结果表明相对于MC-CDSK,该方案不仅提高了1倍的传输速率,而且改善了误码率;且理论仿真和蒙特卡罗仿真结果一致。

关键词:差分混沌移位键控;多载波相关延迟移位键控;多用户;传输速率;频谱效率;误码率

中图分类号:TN911.3 **文献标志码:**A

Performance analysis of multi-user orthogonal correlation delay keying scheme

ZHANG Gang, HUAGN Nanfei*, ZHANG Tianqi

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to improve the transmission performance of chaotic signals, a Multi-User Orthogonal Correlation Delay Shift Keying (MU-OCDSK) scheme was proposed based on Correlation Delay Shift Keying (CDSK) scheme and Multi-Carrier Correlation Delay Shift Keying (MC-CDSK) scheme. The multi-carrier was used to modulate chaotic signals. Compared with CDSK, the proposed scheme not only has higher spectral efficiency, but also improves bit error rate. Theoretical simulation and Monte Carlo simulation show that compared with MC-CDSK, the proposed scheme not only doubles the transmission rate, but also improves the bit error rate. The results of theoretical simulation and Monte Carlo simulation are consistent.

Key words: Differential Chaos Shift Keying (DCSK); Multi-Carrier Correlation Delay Shift Keying (MC-CDSK); multi-user; transmission rate; spectrum efficiency; Bit Error Rate (BER)

0 引言

随着无线通信在现代通信中占据着越来越重要的地位,不管是以太网、电视广播、全球定位系统、移动通信系统,还是无线网络连接,自然界复杂的电磁环境对信号传输存在较大的干扰,不能稳定和快速地传输信号。在非线性动力学中,混沌在确定性动力学系统中具有长期行为不可预测、初值条件敏感的特点^[1]。尤为明显的是,混沌信号特别适合于扩频通信,因为其功率谱密度分布情况与白噪声类似,同样都有带宽比较宽的特性。混沌信号还有良好的自相关和互相关特性。

目前在混沌应用中,差分混沌移位键控(Differential Chaos Shift Keying, DCSK)系统和相关延迟键控(Correlation Delay Shift Keying, CDSK)系统的研究最为广泛。其中DCSK系统的调制部分采用的调制方式为传输-参考(Transmit-Reference, T-R)模式,所以误码性能很好,但是在每比特周期内只有一半的时间用于传输参考信号,所以存在传输效率低的缺点^[2-3]。CDSK系统方案的提出克服了信息传输速率低的缺点,但CDSK系统误码性能却很差。为了满足现代通信对于通信系统的传输速率、误码率和保密性能越来越高的要求,对于混沌键控技术的改进与研究一直在进行,其中,为了

提高传输速率和降低误码率,多进制、多用户和减少码间干扰技术被广泛地采用^[4-5]。

多载波技术的出现和使用改善了DCSK系统传输速率低的缺点,继而提出了多载波混沌键控(Multi-Carrier DCSK, MC-DCSK)^[6],然后出现了MUMC-DCSK(Multi-User Multi-Carrier DCSK)^[7]。为了进一步提高多载波混沌键控系统的信息比特速率,出现了正交多载波混沌键控(Quadrature Multi-Carrier DCSK, QMC-DCSK)系统^[8]和多载波相关延迟键控(Multi-Carrier CDSK, MC-CDSK)^[9]。在MC-CDSK系统中,载波中的一个子载波用来传输参考信号,参考信号是由混沌信号和它的延迟信号相加而来,其他的子载波作为信息承载信号用来传输比特信号。MC-CDSK系统在先前系统中提高了信息传输速率,也降低了误码率;2012年Kaddoum等^[10]提出了一种关于安全方面的多载波混沌键控方案,2015年,又提出了使用模拟网络编码来调制混沌信号,采用频域复用技术分离不同用户的数据载波和参考信号来消除干扰^[11];2017年Long等^[12]和Yang等^[13]在多载波混沌通信的基础上分别设计了改善型和关于噪声消除消除的通信系统方案;2018年,Duan等^[14]提出了一种混沌信号相位正交的相关延迟键控方案,提高了混沌信号的传输速率;Quyen等^[15]又提出一

收稿日期:2018-08-23;修回日期:2018-10-15;录用日期:2018-10-22。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61771085, 61371164);信号与信息处理重庆市市级重点实验室建设项目(CSTC2009CA2003);重庆市教育委员会科研项目(KJ1600427)。

作者简介:张刚(1976—),男,四川巴中人,教授,博士,主要研究方向:混沌同步、混沌保密通信、微弱信号检测;黄南飞(1995—),男,江西丰城人,硕士研究生,主要研究方向:混沌保密通信;张天骐(1971—),男,四川眉山人,教授,博士,主要研究方向:语音信号处理、通信信号的调制解调、盲处理、神经网络实现、FPGA、VLSI实现。



种重复扩频序列的混沌通信方案,明显改善了通信系统的误码性能。

在传输速率和误码率这两个性能指标上进行改善,提出了一种多用户正交相关延迟键控系统,该系统在相同的频带宽度上相对于MC-CDSK系统有2倍的信息传输速率,并且误码率也有一定的改善。在系统的发送端,混沌序列和它的延迟序列相加之后再作为参考信号通过子载波进行发送;信息比特流通过串并变换分别与混沌序列及其延迟序列进行相乘的总和通过子载波发送。

1 相关延迟移位键控方案

相关延迟键控系统(CDSK)与差分混沌键控(DCSK)系统一样,都需要传输混沌信号和信息承载信号。它们之间不同的是,DCSK分为两个时隙传输信号,而CDSK在一个时隙中传输混沌信号。CDSK系统发送和接收框图如图1。

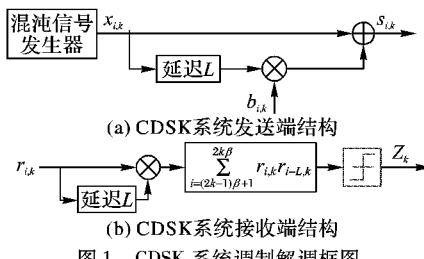


Fig. 1 Block diagram of CDSK system modulation and demodulation

图1(a)表示第*k*比特信息发送的CDSK系统的发送框图,图1(b)表示第*k*比特接收框图。在图(a)中,混沌信号发生器产生混沌信号,混沌序列与其延迟版本的信息承载序列相加得到发送信号为:

$$s_{i,k} = x_{i,k} + b_{i,k}x_{i-L,k} \quad (1)$$

其中*L*是混沌序列延迟的长度。

若发送的信号只受到高斯白噪声的影响,接收信号记为,

$$r_{i,k} = s_{i,k} + \xi_{i,k} \quad (2)$$

系统对接收到的信号进行解调,接收信号与其延迟长度*L*的信号进行相乘,得出解调的输出*Z_k*为:

$$\begin{aligned} Z_k &= \sum_{i=2(k-1)b+1}^{2kb} r_{i,k}r_{i-L,k} = \\ &\sum_{i=2(k-1)b+1}^{2kb} (x_{i,k} + b_{i,k}x_{i-L,k} + x_{i,k})(x_{i-L,k} + b_{i,k}x_{i-2L,k} + \\ &x_{i-L,k}) = \sum_{i=2(k-1)b+1}^{2kb} [b_{i,k}x_{i-L,k}^2 + x_{i,k}x_{i-L,k} + b_{i,k}x_{i,k}x_{i-2L,k} + \\ &x_{i-L,k}b_{i,k}x_{i-2L,k}(x_{i,k} + x_{i,k}) + x_{i,k}x_{i-L,k} + b_{i,k}x_{i-L,k}x_{i-L,k} + \\ &x_{i-L,k}x_{i,k} + b_{i,k}x_{i-2L,k}x_{i,k} + x_{i,k}x_{i-L,k}] \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中,第一项为有用信号,其他项是干扰信号。对*Z_k*进行判决得出信息信号*b_{i,k}*:

$$b_{i,k} = \begin{cases} +1, & Z_k \geq 0 \\ -1, & Z_k < 0 \end{cases} \quad (4)$$

2 多用户正交相关延迟移位键控

本章对提出的方案进行一个详细的阐述。系统是利用Logistic映射产生的混沌序列,然后经过符号函数映射产生混沌序列*x_i*:

$$\begin{cases} y_{i+1} = 1 - 2y^2; y \in (-1, 1) \\ x_i = \text{sgn}(y_i); x_i \in \{+1, -1\} \end{cases}$$

系统的多用户发送框图和接收框图如图2(a)和2(b)所示,本文所用到的是加性高斯白噪声信道(Additive White Gaussian Noise, AWGN),其噪声均值为0、方差为*N₀/2*。

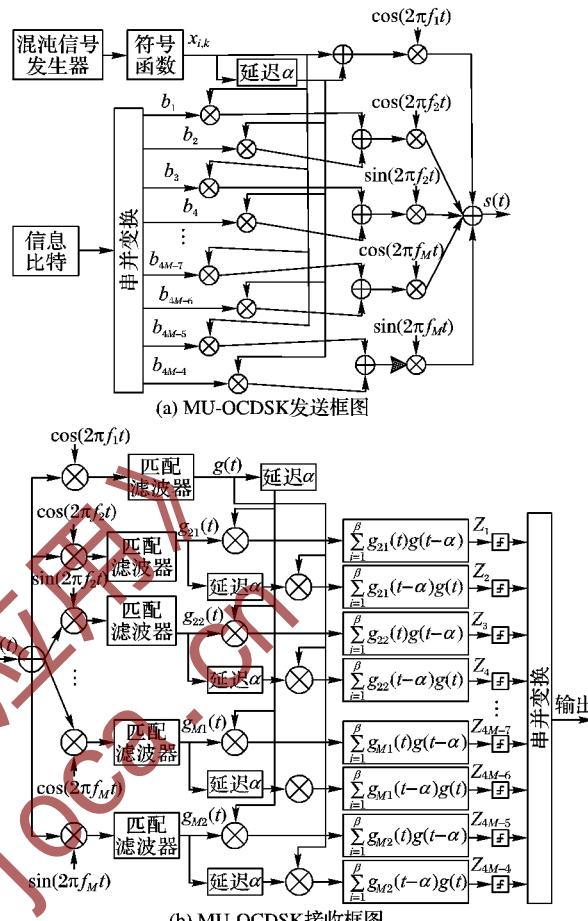


图2 MU-OCDSK的发送和接收框图

Fig. 2 Transmission and reception block diagram of MU-OCDSK

2.1 发送机

混沌信号发生器产生一个切片周期为*T_c*的混沌序列经过符号函数调制,然后加上它的延迟序列*x_{i-α}*(*α*是一个延迟时间长度)。相加得到的和*d(t)*作为参考序列在帧结构的第一个时隙传输,通过载波*f₁*调制传输。同时,信息数据比特流经过串并变换与混沌序列*x(t)*和延迟长度为*α*的*x(t-α)*进行相乘,然后将两路信号相加,通过子载波*f_m*(*m*=2,3,⋯,M)调制传输,一共有*M*个子载波,每个子载波分为正弦和余弦,可以调制4个信息比特。比特持续时间为*T_b*,扩频因子*β*=*T_b*/*T_c*;则参考信号的表达式为:

$$d(t) = x_i + x_{i-α} \quad (5)$$

第*m*路用来传输信息的信号的表达式为:

$$d_m(t) = (b_{4m-7}x_i + b_{4m-6}x_{i-α})\cos(2πf_m t) + (b_{4m-5}x_i + b_{4m-4}x_{i-α})\sin(2πf_m t) \quad (6)$$

2.2 接收机

接收信号框图如图2(b),接收到的信号先用相应的频率进行调制,然后通过匹配滤波器,达到滤除高频信号的效果。得到的参考信号为:

$$g(t) = x_i + x_{i-α} + n_{i,1} \quad (7)$$

信息承载信号为:

$$g_{m1}(t) = b_{4m-7}x_i + b_{4m-6}x_{i-α} + n_{i,m1} \quad (8)$$

$$g_{m2}(t) = b_{4m-5}x_i + b_{4m-4}x_{i-α} + n_{i,m2} \quad (9)$$



参考信号与信息承载信号延迟 α 之后的信号进行相关;同时,信息承载信号与参考信号延迟之后的信号进行相关;相关之后的信号求和判决,再经过串并变换得到输入的信息数据。信号经过相关器的输出为:

$$Z_{4m-7} = \sum_{t=1}^{\beta} g(t) * g_{m1}(t - \alpha) \quad (10)$$

$$Z_{4m-6} = \sum_{t=1}^{\beta} g(t - \alpha) * g_{m1}(t) \quad (11)$$

$$Z_{4m-5} = \sum_{t=1}^{\beta} g(t) * g_{m2}(t - \alpha) \quad (12)$$

$$Z_{4m-4} = \sum_{t=1}^{\beta} g(t - \alpha) * g_{m2}(t) \quad (13)$$

其中 $m = 2, 3, \dots, M$ 。

3 误码率性能分析

本章对提出的系统误码率进行了理论推导和数值分析。由于噪声和其延迟噪声,信号和其延迟信号可以看成等价的,其判决变量如式(14)和(15) :

$$\begin{aligned} Z_{4m-7} = Z_{4m-5} &= \sum_{i=1}^{\beta} g(i) * g_{m1}(i - \alpha) = b_{4m-7}x_{i-\alpha}^2 + \\ &b_{4m-7}x_i x_{i-\alpha} + b_{4m-6}x_i x_{i-2\alpha} + b_{4m-6}x_{i-\alpha} x_{i-2\alpha} + \\ &(b_{4m-7}x_{i-\alpha} + b_{4m-6}x_{i-2\alpha})n_{i,1} + (x_i + x_{i-\alpha})n_{i-\alpha,m} + \\ &n_{i,1}n_{i-\alpha,m} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Z_{4m-6} = Z_{4m-4} &= \sum_{i=1}^{\beta} g(i - \alpha) * g_{m1}(i) = b_{4m-6}x_i^2 + \\ &b_{4m-7}x_i x_{i-\alpha} + b_{4m-7}x_i x_{i-2\alpha} + b_{4m-6}x_{i-\alpha} x_{i-2\alpha} + \\ &(b_{4m-7}x_i + b_{4m-6}x_{i-\alpha})n_{i-\alpha,1} + (x_{i-\alpha} + x_{i-2\alpha})n_{i,m} + \\ &n_{i-\alpha,1}n_{i,m} \end{aligned} \quad (15)$$

根据系统的发送框图,可以得到:

$$\begin{cases} E_r = 2\beta E(x^2) \\ E_d = (4m-4)\beta E(x^2) \\ Z_{4M-7} = Z_{4M-6} = \Phi + \Gamma + \Omega + \Psi \end{cases} \quad (16)$$

其中将随机变量 $\Phi, \Gamma, \Omega, \Psi$ 定义为:

$$\Phi = b_{4m-7}x_i^2 \quad (17)$$

$$\Gamma = b_{4m-7}x_i x_{i-\alpha} + b_{4m-6}x_i x_{i-2\alpha} + b_{4m-6}x_{i-\alpha} x_{i-2\alpha} \quad (18)$$

$$\Omega = (b_{4m-7}x_{i-\alpha} + b_{4m-6}x_{i-2\alpha})n_{i,1} + (x_i + x_{i-\alpha})n_{i-\alpha,m} \quad (19)$$

$$\Psi = n_{i,1}n_{i-\alpha,m} \quad (20)$$

式(14)的均值为:

$$E(Z_{4m-7}) = E(\Phi) + E(\Gamma) + E(\Omega) + E(\Psi) \quad (21)$$

其中 $E(\Phi) = b_{4m-7}\beta E(x_{i-\alpha}^2)$ 。

$$E(\Gamma) = E(\Omega) = E(\Psi) = 0 \quad (22)$$

$$E(Z_{4m-7}) = b_{4m-7}\beta E(x_{i-\alpha}^2) \quad (23)$$

由于混沌序列是先经过 Logistic 映射,再经过符号函数调制后的混沌序列产生。它的均值和方差为: $E(x_i) = 0$; $E(x_i^2) = \text{var}(x_i) = 1$; $\text{var}(x_i^2) = 0$; $x_i \in (+1, -1)$ 。发送的混沌信号的方差如式(24)~(28) :

$$\text{var}(\Phi) = \text{var}(b_{4m-7}x_i^2) = 0 \quad (24)$$

$$\text{var}(\Gamma) = 3\beta \text{var}(x_i^2) = 3\beta E^2(x_i^2) \quad (25)$$

$$\text{var}(\Omega) = 4 \times (N_0/2) \cdot \text{var}(x_i) \quad (26)$$

$$\text{var}(\Psi) = N_0^2/4 \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \text{var}(Z_{4M-7}) &= \text{var}(\Phi) + \text{var}(\Gamma) + \text{var}(\Omega) + \text{var}(\Psi) = \\ &3\beta \text{var}(x_i^2) + 2\beta N_0 \text{var}(x) + (\beta N_0^2)/4 \end{aligned} \quad (28)$$

每比特信息发送所用的能量为:

$$E_b = \frac{E_r + E_d}{4m - 4} = \frac{2m - 1}{2m - 2} \beta E(x_i^2) \quad (29)$$

$$E(Z_{4m-7}) = b_{4m-7} \beta E(x_{i-\alpha}^2) \quad (30)$$

系统的误码率公式可以计算为:

$$\begin{aligned} \text{BER} &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{|E(Z_{4m-7})|}{\sqrt{2 \operatorname{var}(Z_{4m-7})}} \right) = \\ &\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3 \beta \operatorname{var}(x_i^2) + 2\beta N_0 \operatorname{var}(x) + (\beta N_0^2)/4}{(b_{4m-7} \beta E(x_{i-\alpha}^2))^2}} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (31)$$

将平均每比特能量 E_b 代入式(31) :

$$\begin{aligned} \text{BER} &= \\ &\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{6}{\beta} + 2 \times \frac{2m - 1}{m - 1} E_b N_0^{-1} + \frac{1}{2} \times \frac{(2m - 1)^2 \beta}{(2m - 2)^2} E_b N_0^{-2}} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (32)$$

4 仿真与分析

本章将 MU-OCDSK 系统的蒙特卡洛仿真得到的结果和理论仿真的结果进行分析和对比。在 β 一定时,不同 M 值情况下比特误码率随着 E_b/N_0 变化的曲线,如图 3 所示;在 M 一定时,不同信噪比情况下 BER 随着 β 变换的曲线,如图 4 所示;本章还比较了 MU-OCDSK 和其他系统(CDSK、DCSK 和 MC-CDSK 系统)在不同 β 值得情况下 BER 随着信噪比变化的曲线,如图 5 所示。本文采用归一化 Logistic 映射,仿真结果均采用 10^5 次蒙特卡洛仿真所得到的结果。

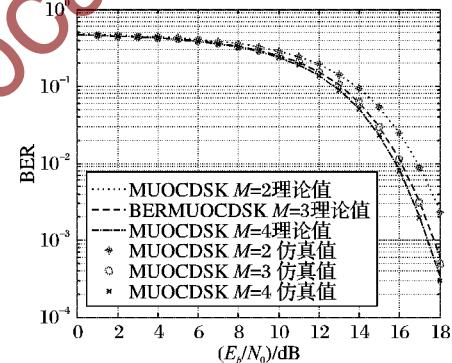


图 3 $\beta=512$ 用户数分别为 2,3,4 时的比特误码率
随着信噪比变化的理论值和蒙特卡洛仿真

Fig. 3 Theoretical value of bit error rate varying with SNR and Monte Carlo simulation with 2,3,4 users ($\beta=512$)

... MUOCDSK $E_b/N_0=10$ 理论值	* MUOCDSK $E_b/N_0=10$ 仿真值
- - - BERMUOCDSK $E_b/N_0=12$ 理论值	○ MUOCDSK $E_b/N_0=12$ 仿真值
- - - MUOCDSK $E_b/N_0=14$ 理论值	× MUOCDSK $E_b/N_0=14$ 仿真值
- - - MUOCDSK $E_b/N_0=16$ 理论值	△ MUOCDSK $E_b/N_0=16$ 仿真值

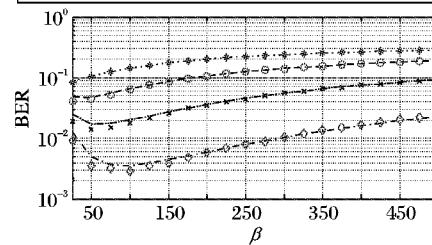


图 4 $M=2$ 比特误码率在信噪比 (E_b/N_0) 分别为
10, 12, 14, 16 时随扩频因子的变化曲线

Fig. 4 Bit error rate with varying spreading factor
when SNR (E_b/N_0) is 10,12,14,16 ($M=2$)

如图 3 所示,提出的方案在 $\beta=512$ 的条件下,用户数分



别为2、3、4时,刻画了BER随 E_b/N_0 的变化曲线。由图中可以看出,在同一条曲线上,系统BER随着 E_b/N_0 的增大而减小。同样,在相同的条件下,随着M的增多,系统的BER性能越好。通过Montecarlo仿真的结果与推导BER性能公式相吻合。

如图4所示,在 $M=2$ 时,在 E_b/N_0 分别为10、12、14、16时,系统MU-OCDISK的BER随着 β 值在25~500的变化曲线。由图可以看出在 E_b/N_0 等于10 dB和14 dB时,系统BER随 β 在25~150时扩频因子的增大而减小,在150~500时BER不断增大。而 E_b/N_0 等于10 dB和16 dB时系统BER随着 β 的增大而增大。在图4中也可以看出在相同的条件下, E_b/N_0 越大,系统BER越小。

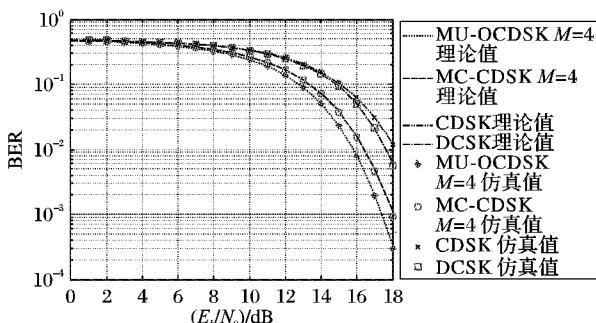


图5 在 $\beta=512$ 时,MU-OCDSK与MC-CDSK,DCKS和CDSK在不同信噪比的误码率相比

Fig. 5 BER compared between MU-OCDSK and MC-CDSK, DCSK and CDSK at different SNR ($\beta=512$)

DCKS and CDSK at different SNR ($\beta=512$)

如图5所示, $M=4$, $\beta=512$ 时,本方案提出的系统MU-OCDSK与MC-CDSK、DCSK、CDSK系统相比较,从图5中可以看出MUOCDSK的BER性能比其他的三个系统的BER性能要好,并且随着 E_b/N_0 的增大,BER性能的优势越来越明显。

5 结语

本文设计和分析了多用户正交相关延迟键控系统,该系统的框图完全可以实现。该方案在混沌信号传输系统中解决了传输速率慢和误码率高的问题,可以应用在无线传播领域。但是由于使用了较多的延迟线和参考信号的多次使用,不太利于成本和信息安全。在该方案的基础上可以引入多输入多输出技术,进一步提高信息的传输性能。

参考文献 (References)

- [1] LARSON L E, LARSON L E, LARSON L E, et al. Digital Communications Using Chaos and Nonlinear Dynamics[M]. Berlin: Springer, 2006: e2958 - e2964.
- [2] RUSHFORTH C K. Transmitted-reference techniques for random or unknown channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1964, 10(1): 39 - 42.
- [3] QUYEN N X, DUONG T Q, 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.
- [4] YANG H, JIANG G P. Simple intra-signal-interference removing detector for HE-DCSK[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2013, 20(6): 102 - 108.
- [5] COULON M, ROVIRAS D. Multi-user adaptive receivers for a multiple-access system based on random permutations on time-varying frequency-selective channels with unknown delays and coefficients [J]. IET Communications, 2012, 6(11): 1562 - 1572.
- [6] KADDOUM G, RICHARDSON F D, 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.
- [7] 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.
- [8] QUYEN N X, PHAM C K. Quadrature multi-carrier DCSK: a high-efficiency scheme for radio communications[C]// Proceedings of the 2017 International Conference on Advanced Technologies for Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 186 - 191.
- [9] QUYEN N X. On the design of a multi-carrier correlation delay-shift keying system[J]. Physical Communication, 2017, 22(22): 49 - 57.
- [10] KADDOUM G, GAGNON F, RICHARDSON F D. Design of a secure multi-carrier DCSK system[C]// Proceedings of the 2012 International Symposium on Wireless Communication Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 964 - 968.
- [11] KADDOUM G, SHOKRANEH F. Analog network coding for multi-user multi-carrier differential chaos shift keying communication system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(3): 1492 - 1505.
- [12] LONG N H, QUYEN N X, YEM V V. Design of an improved multi-carrier DCSK system for digital communications[C]// Proceedings of the 2017 International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 211 - 216.
- [13] YANG H, JIANG G P, TANG W K S, et al. Multi-carrier differential chaos shift keying system with subcarriers allocation for noise reduction[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems II: Express Briefs, 2018, 65(11): 1733 - 1737.
- [14] DUAN J Y, YANG H. Phase-orthogonality CDSK: a reliable and effective chaotic communication scheme[J]. IET Communications, 2018, 12(9): 1116 - 1122.
- [15] QUYEN N X. Multi-carrier differential chaos-shift keying with repeated spreading sequence[J]. Journal of Communications & Networks, 2018, 20(3): 299 - 308.

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61771085, 61371164), the Project of Key Laboratory of Signal and Information Processing of Chongqing (CSTC2009CA2003), the Research Project of Chongqing Educational Commission (KJ1600427).

ZHANG Gang, born in 1976, Ph. D., professor. His research interests include chaos synchronization, chaotic secure communication, weak signal detection.

HUANG Nanfei, born in 1995, M. S. candidate. His research interests include chaotic secure communication.

ZHANG Tianqi, born in 1971, Ph. D., professor. His research interests include voice signal processing, modulation and demodulation for communication signal, blind processing, neural network implementation, FPGA, VLSI implementation.