

基于希尔伯特变换的多用户DCSK通信系统性能分析

张刚 许嘉平* 张天骐

(重庆邮电大学信号与信息处理重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘要: 针对差分混沌移位键控(DCSK)传输速率低的问题, 该文提出一种基于希尔伯特变换的多用户DCSK(HMU-DCSK)通信系统。在固定阶数的Walsh码条件下, 通过希尔伯特变换将正交基信号集合提高1倍, 并确保分配给每个用户的载波信号正交。推导了在Rayleigh衰落信道下的误码率公式并进行仿真。结果表明, 相同 N 值下HMU-DCSK系统的传输速率是传统多用户DCSK系统的2倍; 相同传输速率下HMU-DCSK系统的误码性能明显优于传统多用户DCSK系统。

关键词: 混沌通信; 多用户; Walsh码; 希尔伯特变换; 传输速率

中图分类号: TN918

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)11-2744-08

DOI: [10.11999/JEIT180110](https://doi.org/10.11999/JEIT180110)

Performance Analyze for Multiuser-DCSK Communication System Based on Hilbert Transform

ZHANG Gang XU Jiaping ZHANG Tianqi

(Chongqing Key Laboratory of Signal and Information Processing, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: A multiuser Differential Chaos Shift Keying (DCSK) communication system based on Hilbert transform is proposed (HMU-DCSK), to solve the problem of low transmission rate of DCSK. Under the condition of fixed-order Walsh codes, the set of orthogonally-based signals is doubled by the Hilbert transform and the carrier signals assigned to each user are guaranteed to be orthogonal. The Bit-Error-Rate (BER) formula in Rayleigh fading channel is derived and numerous simulations are conducted. The simulation results show that the transmission rate of HMU-DCSK system is twice that of traditional multiuser DCSK system under the same N value, meanwhile, the BER performance of HMU-DCSK system is obviously better than the traditional multi-user DCSK system under the same transmission rate.

Key words: Chaotic communication; Multiuser; Walsh codes; Hilbert transform; Transmission rate

1 引言

混沌信号具有许多特殊性质及优点, 例如: 初始条件敏感性、非周期性、严格自(互)相关特性、产生设备简单等, 所以在保密通信中具有巨大的应用价值^[1-6]。混沌数字键控调制技术^[7]作为混沌保密通信的典型应用, 利用混沌信号作为载波实现数字

调制的同时并完成了频谱扩展。

混沌数字调制系统中, 差分混沌移位键控(Differential Chaos Shift Keying, DCSK)^[8]和相关延迟移位键控(Correlation Delay Shift Keying, CDSK)^[9]最为基础。DCSK系统比CDSK系统的误码性能更好, 但是DCSK系统花费了一半的时间传输参考信号, 所以传输速率较低, 文献^[10-12]提出了参考调制DCSK(RM-DCSK)系统、相分离DCSK(PS-DCSK)系统和正交载波DCSK(OM-DCSK)系统来增强有效性。文献^[13]提出I-DCSK系统, 通过引入时间反转技术提高数据传输速率, 文献^[14]研究了一种空间调制DCSK(DSMCSK)系统, 通过天线调制技术提高频带利用率。近年来, 多用户DCSK系统成为混沌通信领域研究的主题。文献^[15]提出了可变延迟多址(VDMA-DCSK)通信系统, 利用发送给每个用户的参考信号和信息信号之

收稿日期: 2018-01-25; 改回日期: 2018-07-18; 网络出版: 2018-07-30

*通信作者: 许嘉平 1309095272@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(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(KJ1600429)

Foundation Items: 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 (KJ1600429)

间的间隔均不相同来实现多用户传输。基于置换矩阵的MA-DCSK^[16]系统通过给不同用户分配不同的置换矩阵，打乱参考时隙和信息时隙中码片的顺序来区分不同用户的信息比特。然而，以上多用户系统均存在严重的用户间干扰问题，误码性能很差。为解决上述问题，Kaddoum^[17]提出了一种基于正交频分复用的多用户DCSK系统，该系统表现出较好的误码性能，但是系统设计的复杂度较高。文献[18]提出多用户分段移位DCSK(MU-SSDCSK)通信方案，通过循环移位使每个用户的信息载波各不相同并利用Walsh码确保每个用户的载波严格正交从而消除用户间干扰，但该系统的传输速率受到Walsh码阶数的影响。

为进一步提高多用户DCSK系统性能，本文提出一种基于希尔伯特变换的多用户DCSK(HMU-DCSK)系统。该系统采用传输参考(transmitted reference)模式首先传输参考信号，然后将参考信号通过希尔伯特变换器生成一个与原信号正交的信号，利用Walsh码与两个正交信号结合起来传输 $2N$ 用户信息。公式推导及仿真实验证明在相同Walsh码阶数条件下，HMU-DCSK系统的传输速率是传统多用户DCSK系统的2倍。

2 HMU-DCSK系统原理

2.1 正交基信号的设计

严格意义上讲，有限时间内混沌信号并不完全正交，为了预防用户间干扰使系统误码性能变差，将希尔伯特变换和Walsh码结合，设计出严格正交的基信号集合。首先将混沌信号 $x_{i,k}$ 和其希尔伯特变换后的信号 $\hat{x}_{i,k}$ 分为两组。希尔伯特变换技术的使用不仅有利于区分混沌信号，且能够确保两组间混沌信号严格正交。Walsh码用来定义同一组内的信号，确保每组内的混沌信号严格正交。如图1所示，利用希尔伯特变换确保第1组与第2组间的信号正交，Walsh码确保 $g_1(t)$ 与 $g_2(t)$ ， $g_3(t)$ 与 $g_4(t)$ 相互正交。所以对于固定阶数的Walsh码而言，利用希尔伯特变换技术后的正交基信号集合提高1倍，意味着系统比特传输速率也会提高1倍。

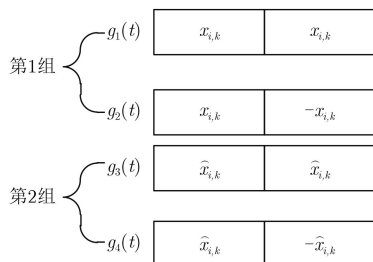


图1 正交基信号集合图

Hadamard矩阵是一种正交矩阵，Walsh码可由多阶Hadamard矩阵展开取行得到，具有完美的互相关特性，能够有效抑制甚至消除多址干扰。利用式(1)所给出的Hadamard矩阵构建一个 l 阶的Walsh码：

$$\mathbf{W}_{2^l} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{2^{l-1}} & \mathbf{W}_{2^{l-1}} \\ \mathbf{W}_{2^{l-1}} & -\mathbf{W}_{2^{l-1}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $l = 1, 2, \dots$ ，每行代表Walsh码序列，长度由阶数 l 确定。基信号集合中的任意两个信号正交，即

$$\int_0^\infty g_i(t) g_j(t) dt = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, 2, \dots \quad (2)$$

2.2 HMU-DCSK系统

假设HMU-DCSK系统发送 $2N$ 用户信息比特，图2给出了HMU-DCSK系统第 k bit周期帧结构图。每帧由两个长度为 T_s 的时隙组成：参考时隙和信息时隙。参考时隙中，传输长度为 β 的混沌序列作为参考信号；信息时隙中，传输 $2N$ 个长度相同并携带不同二进制信息的混沌序列作为信息信号。

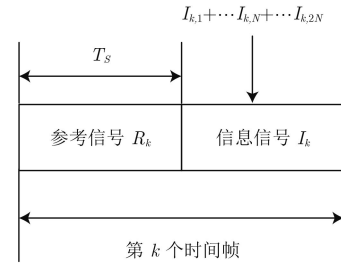


图2 HMU-DCSK系统帧结构图

HMU-DCSK系统的发射框图如图3所示。首先混沌信号发生器利用Logistic映射产生一个长度为 β 的混沌序列 $y_{i,k}$ ， $y_{i,k}$ 经过特殊符号函数产生一个能量恒定的混沌信号 $x_{i,k}$ ：

$$y_{i,k} = 1 - 2y_{i-1,k}^2, \quad y_{i-1,k} \in (-1, 1) \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{i,k} &= -1, & y_{i,k} &< 0 \\ x_{i,k} &= +1, & y_{i,k} &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中， $i = (1, 2, \dots, \beta)$ ， $y_{i,k} \in (-1, +1)$ ， $x_{i,k} \in \{+1, -1\}$ ，且： $E(x_{i,k}) = 0$ ， $\text{var}(x_{i,k}) = 1$ ， $\text{var}(x_{i,k}^2) = 0$ 。

$x_{i,k}$ 首先作为参考信号在第1个时隙中传输。 $x_{i,k}$ 延迟 β 后的混沌信号 $x_{i-\beta,k}$ 作为信息载波与Walsh码结合传输用户信息，同时经过希尔伯特变换后的混沌信号 $\hat{x}_{i-\beta,k}$ 作同样操作。则第 k 帧内的发送信号 $s_{i,k}$ 为

$$s_{i,k} = \begin{cases} x_{i,k}, & 2(k-1)\beta < i \leq (2k-1)\beta \\ \sum_{j=1}^N (b_j w_{i,j} x_{i-\beta,k} + b_{N+j} w_{i,j} \hat{x}_{i-\beta,k}), & (2k-1)\beta < i \leq 2k\beta \end{cases} \quad (5)$$

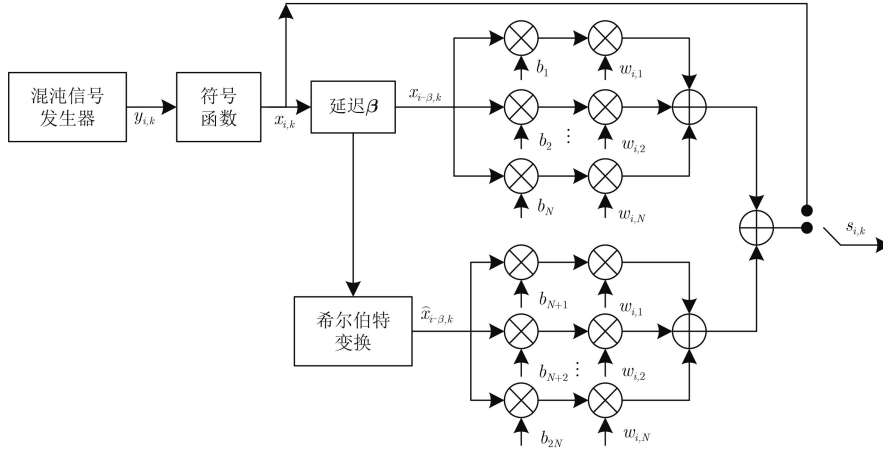


图3 HMU-DCSK系统发射框图

b_j 为第 j 用户的数据信息且 $b_j \in \{+1, -1\}$, $0 < j \leq N$ 。 $w_{i,j}$ 是第 j 用户对应的 Walsh 码。由 HMU-DCSK 系统发送信号的表达式, 可知平均比特能量 E_b 为

$$E_b = \beta(2N + 1) E[x_{i,k}^2] / (2N) \quad (6)$$

HMU-DCSK 系统的接收框图如图4所示。首先将接收信号 $r_{i,k}$ 与自身延迟 β 后的信号 $r_{i-\beta,k}$ 进行相关运算, 运算后的信号中含有前 N 用户的数据信息, 为了分别解调出第 k 帧发送的前 N 用户信息, 再将相关结果与每个用户调制时对应的 Walsh 码组相乘, 最后进行判决。与此同时信号 $r_{i,k}$ 与经过希尔伯特变换后的信号 $\hat{r}_{i-\beta,k}$ 做同样的运算来解调后 N 用户信息。第 k 帧第 j 用户的相关器输出 $Z_{2N(k-1)+j}$ 的表达式为

$$Z_{2N(k-1)+j} = \sum_{i=(2k-1)\beta+1}^{2k\beta} r_{i,k} r_{i-\beta,k} w_{i,j} \quad (7)$$

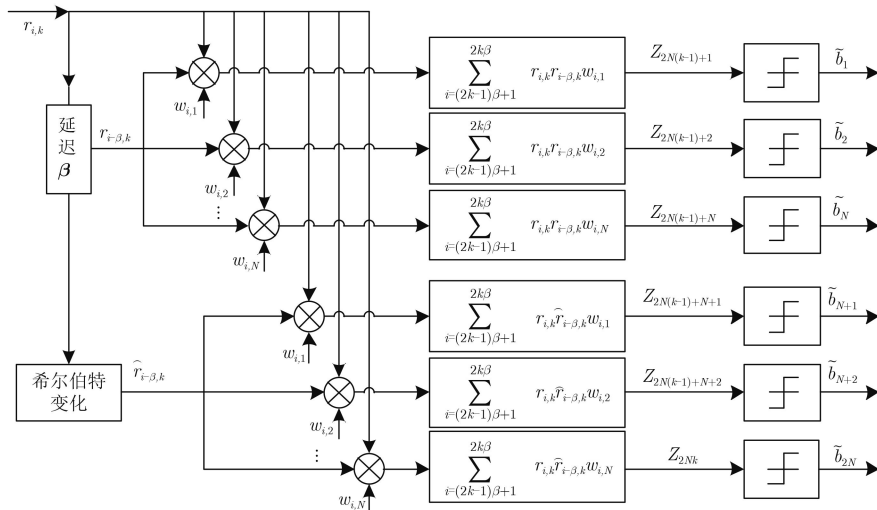


图4 HMU-DCSK系统接收框图

图5和图6分别为DCSK系统和HMU-DCSK ($N = 4$) 系统的平方幅度谱对比图。图5显示, 当采样频率为归一化比特频率的奇数倍时, DCSK 系统的采样平方幅度近似为零, 这是因为参考信号与信息信号相似(同相或者反相)造成的后果, 所以在混沌保密通信中DCSK系统的安全性较差。HMU-DCSK系统发射结构虽然也采用了传输参考的方式, 但其信息信号为 $2N$ 个正交信号之和, 与参考信号极不相似。HMU-DCSK系统的平方幅度谱表现出类噪声性, 具有很强的保密性, 应用到多用户安全通信中最为合适。

3 HMU-DCSK系统性能分析

多径Rayleigh衰落信道经常应用于无线通信系统中, 相对于高斯信道更具现实意义, HMU-DCSK系统信道模型以两径Rayleigh衰落信道为例进行分析。Rayleigh衰落信道模型如图7所示。

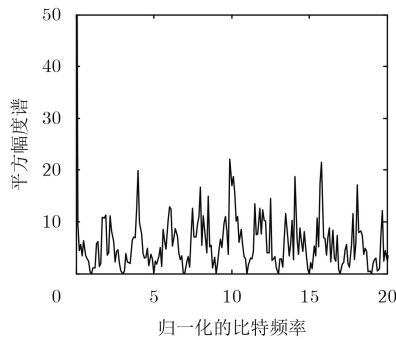


图 5 DCSK平方幅度谱

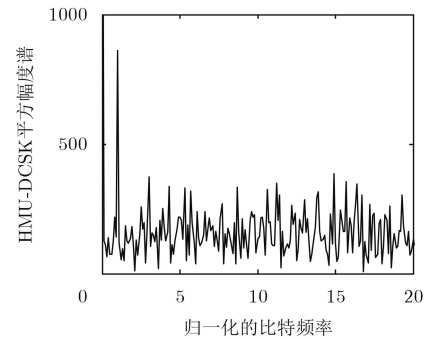


图 6 HMU-DCSK平方幅度谱

α_1 和 α_2 是满足两径Rayleigh衰落分布的随机变量且相互独立， τ 表示两路径之间的延迟且 $\tau \ll \beta$ ， $\xi_{i,k}$ 为高斯白噪声。发送信号经过两径Rayleigh衰落信道传输后，接收信号 $r_{i,k}$ 表达式为

$$r_{i,k} = \alpha_1 s_{i,k} + \alpha_2 s_{i-\tau,k} + \xi_{i,k} \quad (8)$$

由于对第 k 帧第 j 用户与第 $N+j$ 用户的分析相同，所以以下分析是对第 j 用户为例进行：

$$Z_{2N(k-1)+j} = \sum_{i=(2k-1)\beta+1}^{2k\beta} \left[\left(\alpha_1 \sum_{j=1}^N (b_j w_{i,j} x_{i-\beta,k} + b_{N+j} w_{i,j} \hat{x}_{i-\beta,k}) + \alpha_2 \sum_{j=1}^N (b_j w_{i,j} x_{i-\beta-\tau,k} + b_{N+j} w_{i,j} \hat{x}_{i-\beta-\tau,k}) + \xi_{i,k} \right) \cdot ((\alpha_1 x_{i-\beta,k} + \alpha_2 x_{i-\beta-\tau,k} + \xi_{i-\beta,k}) w_{i,u}) \right] = A + B + C \quad (9)$$

$$A = \sum_{i=(2k-1)\beta+1}^{2k\beta} \left[\alpha_1^2 b_j x_{i-\beta,k}^2 + \alpha_2^2 b_j x_{i-\beta-\tau,k}^2 + \alpha_1^2 \sum_{j=1, j \neq u}^N b_j w_{i,j} x_{i-\beta,k} x_{i-\beta,k} w_{i,u} + \alpha_2^2 \sum_{j=1, j \neq u}^N b_j w_{i,j} x_{i-\beta-\tau,k} x_{i-\beta-\tau,k} w_{i,u} \right] \quad (10)$$

$$B = \sum_{i=(2k-1)\beta+1}^{2k\beta} \left[\alpha_1 \sum_{j=1}^N (b_j w_{i,j} x_{i-\beta,k}) \xi_{i-\beta,k} w_{i,u} + \alpha_1 \sum_{j=1}^N (b_{N+j} w_{i,j} \hat{x}_{i-\beta,k}) \xi_{i-\beta,k} w_{i,u} + \alpha_1 x_{i-\beta,k} \xi_{i,k} w_{i,u} + \alpha_2 \sum_{j=1}^N (b_j w_{i,j} x_{i-\beta-\tau,k}) \xi_{i-\beta,k} w_{i,u} + \alpha_2 \sum_{j=1}^N (b_{N+j} w_{i,j} \hat{x}_{i-\beta-\tau,k}) \xi_{i-\beta,k} w_{i,u} + \alpha_2 x_{i-\beta-\tau,k} \xi_{i,k} w_{i,u} \right] \quad (11)$$

$$C = \xi_{i,k} \xi_{i-\beta,k} w_{i,u} \quad (12)$$

式(10)中前2项为系统有用信号项。由于Logistic映射的自相关旁瓣为零、Walsh码的正交性以及混沌信号与其希尔伯特变换后的信号的正交性，可以最大程度地消除用户间干扰，提高误码性能。式(11)为用户与信道噪声之间的干扰，式(12)为噪声间干扰，且均值都为零。

通过高斯近似法推导HMU-DCSK系统的误码率公式，且结果基于以下假设条件完成的：

(1) $\xi_{i,k}$ 作为Rayleigh衰落信道中的高斯白噪声干扰信号，其均值为零，方差为 $N_0/2$ ；对于 $\xi_{i,k}$ 和 $\xi_{j,k}$ ，当 $i \neq j$ 时相互独立；并且 $\xi_{i,k}$ 与混沌信号 $x_{i,k}$ 相

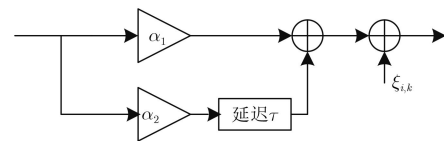


图 7 两径Rayleigh衰落信道模型

互独立。

(2) 二进制信息 $\{+1, -1\}$ 等概率出现。

混沌通信中采样点 β 的取值一般较大，所以式(9)近似服从高斯分布，则具体误码率表达式为

$$\text{BER} [Z_{2N(k-1)+j}] = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(|E [Z_{2N(k-1)+j}]| / \sqrt{2 \text{var} [Z_{2N(k-1)+j}]} \right) \quad (13)$$

根据上述假设条件及性质可以得到统计特性如式(14)和式(15)：

$$\begin{aligned} E[Z_{2N(k-1)+j}] &= E[A] + E[B] + E[C] \\ &= (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) 2NE_b / (2N + 1) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{var}[Z_{2N(k-1)+j}] &= \text{var}[A] + \text{var}[B] + \text{var}[C] \\ &= N(\alpha_1^2 + \alpha_2^2) E_b N_0 + \beta N_0^2 / 4 \end{aligned} \quad (15)$$

将式(14)和式(15)代入式(13), 则第 k 帧的第 j 用户的误码率为

$$\begin{aligned} \text{BER}[Z_{2N(k-1)+j}] &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\left[\frac{(2N+1)^2}{2N(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)^{-1} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\beta(2N+1)^2}{8N^2(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^2} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)^{-2} \right]^{-1/2} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

令 $\gamma_1 = \alpha_1^2 (E_b/N_0)$, $\gamma_2 = \alpha_2^2 (E_b/N_0)$, $\gamma_b = \gamma_1 + \gamma_2$, 式(16)可以化简为

$$\begin{aligned} \text{BER}[\gamma_b] &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\left[(2N+1)^2 / (2N\gamma_b) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \beta(2N+1)^2 / (8N^2\gamma_b^2) \right]^{-1/2} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

令 $\bar{\gamma}_1 = E[\gamma_1] = (E_b/N_0) E[\alpha_1^2]$, $\bar{\gamma}_2 = E[\gamma_2] = (E_b/N_0) E[\alpha_2^2]$, 那么 γ_b 服从式(18)分布:

$$f(\gamma_b) = \begin{cases} \gamma_b e^{-\gamma_b/\bar{\gamma}_1} / \bar{\gamma}_1^2, & E[\alpha_1^2] = E[\alpha_2^2] \\ \left(e^{-\gamma_b/\bar{\gamma}_1} - e^{-\gamma_b/\bar{\gamma}_2} \right) / (\bar{\gamma}_1 - \bar{\gamma}_2), & \\ E[\alpha_1^2] \neq E[\alpha_2^2] \end{cases} \quad (18)$$

考虑到Rayleigh衰落信道对信号幅度的衰减, 根据式(17)和式(18), 得到HMU-DCSK系统误码率为

$$\text{BER} = \int_0^\infty \text{BER}(\gamma_b) f(\gamma_b) d\gamma_b \quad (19)$$

对于第 k 帧其他用户的误码率与式(19)相同。且当 $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 0$ 特殊情况下, Rayleigh衰落信道退化为高斯信道, 相应的误码率公式可以简化为

$$\begin{aligned} \text{BER}[Z_{2N(k-1)+j}] &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left[\left((2N+1)^2 N_0 / (2NE_b) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \beta(2N+1)^2 N_0^2 / (8N^2 E_b^2) \right)^{-1/2} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

由式(17)可知, N , β 和 γ_b 是影响误码性能的重要因素。当混沌序列长度 β 和 γ_b 固定时, 存在最佳用户数 N_{op} 使得HMU-DCSK系统的误码率最小。首先定义一个函数 $f(N)$:

$$f(N) = (2N+1)^2 / (2N\gamma_b) + \beta(2N+1)^2 / (8N^2\gamma_b^2) \quad (21)$$

再对函数 $f(N)$ 关于 N 取微分, 并且令微分函数为零, 则最佳用户数 N_{op} 为

$$N_{\text{op}} = 0.25 + 0.5\sqrt{0.25 + \beta/\gamma_b} \quad (22)$$

4 效率比较

混沌数字通信中, 能量效率(Energy Efficiency, EE)可以利用传输信息比特能量(E_B)与总传输能量(E_T)之比来评估, 其能够体现出系统能量的损耗、有效利用率等情况。带宽效率(Bandwidth Efficiency, BE)可以通过比特传输速率(Bit Rate, BR)与占用信道带宽之比来评估, 是有效性的重要体现。在数字差分混沌调制键控系统中, 传输带宽都是相等的, 所以带宽效率可用比特传输速率来体现。在HMU-DCSK系统中 $2N$ bit数据信息共享一个参考信号, 所以能量效率和传输速率为

$$\begin{aligned} \text{EE}_H &= E_{H,B} / E_{H,T} = 2N / (2N + 1), \\ \text{BR}_H &= N / T_S \end{aligned} \quad (23)$$

对于DCSK系统和传统MU-DCSK系统而言, 其能量效率和传输速率为

$$\begin{aligned} \text{EE}_D &= E_{D,B} / E_{D,T} = 1/2, \\ \text{BR}_D &= 1 / (2T_S) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{EE}_M &= E_{M,B} / E_{M,T} = N / (N + 1), \\ \text{BR}_M &= N / (2T_S) \end{aligned} \quad (25)$$

由式(23)可以看出HMU-DCSK系统的能量效率是最高的, 尤其是在 N 值较大的情况小, 接近于1。证明HMU-DCSK系统充分利用了发送信号的能量, 最大程度地减小了消耗。传输速率方面, HMU-DCSK系统的传输速率是DCSK系统的 $2N$ 倍, 是MU-DCSK系统的2倍, 所以说HMU-DCSK系统更大程度地提高了系统的有效性。

5 系统仿真结果与分析

本节对HMU-DCSK系统在AWGN信道及Rayleigh衰落信道中作仿真分析。所有仿真曲线值都是在 10^6 次仿真结果取平均值得到的。

5.1 AWGN信道下系统仿真分析

图8为 $N = 4$ 时, 不同混沌序列长度($\beta = 128, 256, 512$)条件下HMU-DCSK系统误码率随信噪比变化图。图8表明式(20)得到的理论误码率与Monte Carlo仿真曲线完全匹配, 证明了系统的可操作性及理论推导的正确性, 并证实高斯近似法是一种有效的分析方法。另一方面, 在信噪比 E_b/N_0 不变时, 混沌序列 β 越小系统误码性能越好, 这是因为随着 β 的增大在相关变量输出时会引入更多的噪声干扰, 造成误码性能下降。

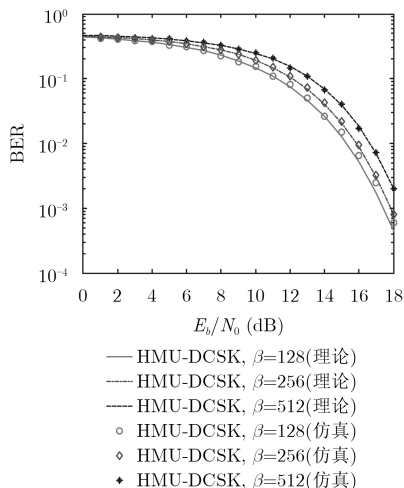


图 8 不同 β 值条件下系统理论误码率和Monte Carlo仿真比较

图9表示的是 $N = 1, 2, 4$, $\beta = 128$ 时, HMU-DCSK系统误码率随信噪比变化图。当 N 固定时, 系统误码率随信噪比 E_b/N_0 的增大而逐渐减小。同时, 当信噪比 E_b/N_0 一定时随着 N 值的增加, 系统的误码性能会变差, 这是由于随着 N 值的增加系统引入了更多的用户与噪声之间的干扰。

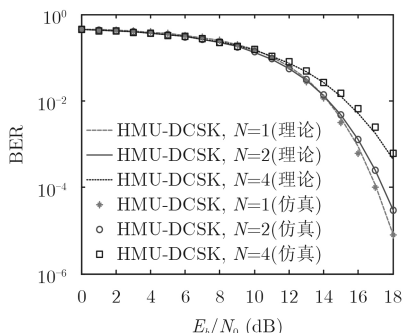


图 9 不同 N 值条件下系统误码率随信噪比变化曲线

图10表示 $\beta = 512$ 时不同信噪比($E_b/N_0 = 12$ dB, 15 dB, 18 dB)条件下, HMU-DCSK系统误码率随 N 值变化趋势图。随着信噪比 E_b/N_0 的增大, 系统的误码性能明显变好, 且随着 N 值的增大, 系统误码率呈现出先减小后增大的趋势, 存在最佳 N 值使得系统误码性能最好。从图10观察到, 当 $\beta = 512$, E_b/N_0 分别为12 dB, 15 dB, 18 dB时HMU-DCSK系统的最佳用户数 N_{op} 分别为3, 2和2, 验证了式(22)的准确性。

图11为 $N = 2$, 不同 β 值($\beta = 64, 128$)时, HMU-DCSK系统与MU-SSDCSK系统和VDMA-DCSK系统的误码性能对比图。HMU-DCSK系统的误码性能明显优于VDMA-DCSK系统, 这是由于HMU-DCSK系统利用希尔伯特变换与Walsh码消除了码间干扰, 提高了误码性能, 并且HMU-DCSK系统

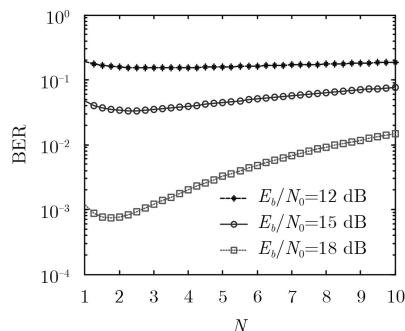


图 10 不同信噪比条件下系统误码率随 N 值变化曲线

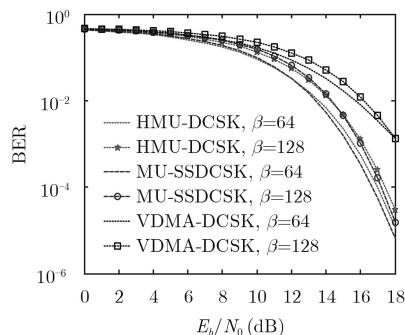


图 11 相同 N 值条件下HMU-DCSK与MU-SSDCSK、VDMA-DCSK误码性能对比图

的传输速率是VDMA-DCSK系统的两倍。从HMU-DCSK系统和MU-SSDCSK系统对比看出, 在相同 N 值条件下HMU-DCSK的误码性能稍差, 但是HMU-DCSK系统的传输速率是MU-SSDCSK系统的两倍, 即在 $N = 2$ 时HMU-DCSK系统传输了4 bit数据信息, 而MU-SSDCSK系统只有2 bit数据信息。

为了验证HMU-DCSK系统误码性能的优越性, 图12表示的是两种系统在相同传输速率条件下的误码性能对比图。HMU-DCSK系统中 $N = 2$ 时, MU-SSDCSK系统 N 值取4才能使传输速率相同, 此条件下HMU-DCSK系统的误码性能是优于MU-SSDCSK系统的, 这是由于HMU-DCSK系统对发送信号进行了特殊符号处理, 使比特能量恒

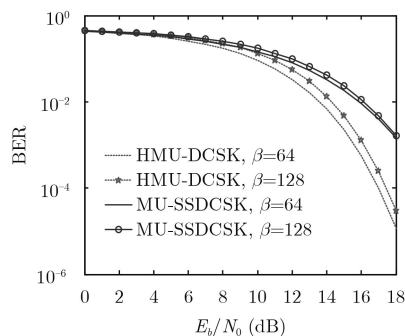


图 12 相同传输速率条件下HMU-DCSK与MU-SSDCSK误码性能对比图

定, 在接收端解调时没有引入系统误差, 所以误码性能更好。并且MU-SSDCSK系统的传输速率会受到Walsh阶数的影响, 而HMU-DCSK系统受到Walsh码的干扰影响较小, 因为利用希尔伯特变换技术后, 正交混沌基信号扩展了1倍。

5.2 Rayleigh信道下系统仿真分析

分析HMU-DCSK系统在Rayleigh衰落信道下的误码性能, 讨论以下两种不同路径增益下的情况:

情况1: 两条路径具有相同的平均能量增益。

情况2: 两条路径的平均能量增益相差10 dB。

图13显示的是在Rayleigh衰落信道中 $N = 4$ 时, 不同混沌序列长度 ($\beta = 128, 256$) 条件下HMU-DCSK系统误码性能随信噪比变化图, Monte Carlo仿真得到的比特误码率曲线和式(19)计算得到的比特误码率基本吻合。 $\beta = 256$ 时的误码性能总是劣于 $\beta = 128$ 时的性能, 这是因为 β 较大时, 信道噪声的负面影响越来越严重, 引入的噪声干扰也越来越强, 从而造成误码性能下降。并且, 情况1下的误码性能总是优于情况2, 即等增益优于非等增益的情况。图14表示的是在传输速率相同的条件下, HMU-DCSK系统与MU-SSDCSK系统的误码性能对比图, 明显看出HMU-DCSK系统的误码性能优于MU-SSDCSK系统, 证明HMU-DCSK系统具有更强的抗信道衰落能力。

6 结论

为了满足现代混沌通信需求, 提高信息传输速率和增强误码性能势在必行。针对DCSK系统传输速率低的问题, 本文提出了HMU-DCSK系统。该系统将希尔伯特变换与Walsh码结合, 使正交混沌基信号集合扩展1倍, 提高了传输速率和能量效率。HMU-DCSK系统的信息时隙中, 信号为 $2N$ 个

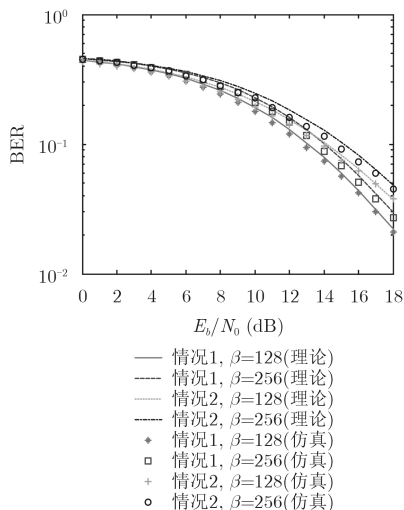


图13 理论误码率和Monte Carlo仿真比较

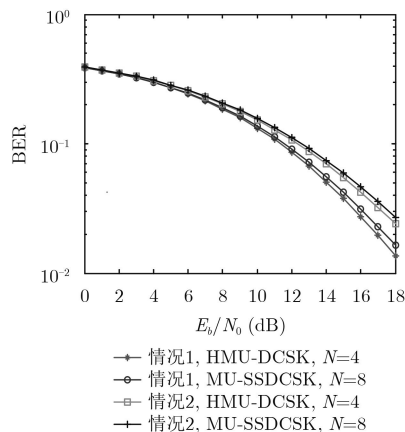


图14 HMU-DCSK与MU-SSDCSK误码性能比较

正交混沌信号之和, 与参考信号无相似关系, 其平方幅度谱表现出类噪声性, 拦截者很难获取信息, 因此HMU-DCSK系统具有很强的保密性, 应用到多用户安全通信中最合适不过。混沌信号有很强的抗多径干扰能力, 所以对复杂信道的传输表现出很强的可靠性, 比如水下通信等特殊条件, 因此HMU-DCSK系统应用于复杂信道可以更好地抵制信道干扰, 增强通信可靠性。可以说HMU-DCSK系统具有很大的研究意义和应用价值。

在有效性方面, HMU-DCSK系统相对于DCSK系统、传统多用户DCSK系统而言有很大提高, 但是HMU-DCSK系统引入了希尔伯特变换器等硬件设施, 增加了系统复杂度, 不过这种代价是值得的, 因为传输速率的提高更适应当今通信发展的需求。HMU-DCSK系统利用希尔伯特变换使正交基信号集合扩展了1倍, 受Walsh码阶数的影响较小但是仍然存在, 如何设计出更高速的多用户DCSK系统是今后研究的目标。

参考文献

- [1] 禹思敏, 吕金虎, 李澄清. 混沌密码及其在多媒体保密通信中应用的进展[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(3): 735-752. doi: 10.11999/JEIT151356.
YU Simin, LÜ Jinhua, and LI Chengqing. Some progresses of chaotic cipher and its applications in multimedia secure communications[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(3): 735-752. doi: 10.11999/JEIT151356.
- [2] 段俊毅, 蒋国平, 杨华. 无信号内干扰的相关延迟键控混沌通信方案[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(3): 681-687. doi: 10.11999/JEIT150660.
DUAN Junyi, JIANG Guoping, and YANG Hua. Correlation delay shift keying chaotic communication scheme with no intrasignal interference[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(3):

- 681–687. doi: [10.11999/JEIT150660](https://doi.org/10.11999/JEIT150660).
- [3] KADDOUM G and SOUJERI E. NR-DCSK: A noise reduction differential chaos shift keying system[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2016, 63(7): 648–652. doi: [10.1109/TCSII.2016.2532041](https://doi.org/10.1109/TCSII.2016.2532041).
- [4] CAI Guofa, FANG Yi, HAN Guojun, *et al.* A new hierarchical M -ary DCSK communication system: Design and analysis[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 17414–17424. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2740973](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2740973).
- [5] KADDOUM G, SOUJERI 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).
- [6] KADDOUM G, TRAN H V, KONG L, *et al.* Design of simultaneous wireless information and power transfer scheme for short reference DCSK communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(1): 431–433. doi: [10.1109/TCOMM.2016.2619707](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2619707).
- [7] MARTIN H and THOMAS S. Chaos communication over noisy channels[J]. *International Journal of Bifurcation & Chaos*, 2000, 10(4): 719–735. doi: [10.1142/S0218127400000505](https://doi.org/10.1142/S0218127400000505).
- [8] YANG Hua and JIANG Guoping. High-efficiency differential-chaos-shift-keying scheme for chaos-based noncoherent communication[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems II: Express Briefs*, 2012, 59(5): 312–316. doi: [10.1109/TCSII.2012.2190859](https://doi.org/10.1109/TCSII.2012.2190859).
- [9] SUSHCHIK M and TSIMRING L S. Performance analysis of correlation-based communication schemes utilizing chaos[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2000, 47(12): 1684–1691. doi: [10.1109/81.899920](https://doi.org/10.1109/81.899920).
- [10] YANG Hua and JIANG Guoping. Reference-modulated DCSK: A novel chaotic communication scheme[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems II: Express Briefs*, 2013, 60(4): 232–236. doi: [10.1109/TCSII.2013.2251949](https://doi.org/10.1109/TCSII.2013.2251949).
- [11] YANG Hua, JIANG Guoping, and DUAN Junyi. Phase-Separated DCSK: A simple delay-component-free solution for chaotic communications[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems II: Express Briefs*, 2014, 61(12): 967–971. doi: [10.1109/TCSII.2014.2356914](https://doi.org/10.1109/TCSII.2014.2356914).
- [12] YANG Hua, TANG W K S, CHEN Guanrong, *et al.* System design and performance analysis of orthogonal multilevel differential chaos shift keying modulation scheme[J]. *IEEE Transactions on Circuits & 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, SOUJERI E, ARCILA C, *et al.* I-DCSK: An improved noncoherent communication system architecture[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems II: Express Briefs*, 2015, 62(9): 901–905. doi: [10.1109/TCSII.2015.2435831](https://doi.org/10.1109/TCSII.2015.2435831).
- [14] HU Wei, WANG Lin, and KADDOUM G. Design and performance analysis of differentially spatial modulated chaos shift keying modulation system[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems II: Express Briefs*, 2017, 64(11): 1302–1306. doi: [10.1109/TCSII.2017.2697456](https://doi.org/10.1109/TCSII.2017.2697456).
- [15] LAU F C M, YIP M M, TSE C K, *et al.* A multiple-access technique for differential chaos shift keying[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems I: Fundamental Theory & Applications*, 2002, 49(1): 96–104. doi: [10.1109/81.974883](https://doi.org/10.1109/81.974883).
- [16] LAU F C M, CHEONG K Y, and TSE C K. Permutation-based DCSK and multiple-access DCSK systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems I: Fundamental Theory & Applications*, 2003, 50(6): 733–742. doi: [10.1109/TCSI.2003.812616](https://doi.org/10.1109/TCSI.2003.812616).
- [17] 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).
- [18] 张刚, 孟维, 张天骐. 多用户分段移位差分混沌键控通信方案[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(5): 1219–1225. doi: [10.11999/JEIT160795](https://doi.org/10.11999/JEIT160795).
- ZHANG Gang, MENG Wei, and ZHANG Tianqi. Multiuser communication scheme based on segment shift differential chaos shift keying[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1219–1225. doi: [10.11999/JEIT160795](https://doi.org/10.11999/JEIT160795).

张刚: 男, 1976年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为混沌同步、混沌保密通信。

许嘉平: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为混沌保密通信。

张天骐: 男, 1971年生, 博士后, 教授, 主要研究方向为扩频信号的盲处理、神经网络实现以及信号的同步处理。