

# 一种基于正交调制的新型降噪差分混沌键控系统

张刚 刘金惠\* 张天骐

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

**摘要:** 针对降噪差分混沌键控(NR-DCSK)传输速率低的缺点, 该文提出一种基于正交调制的新型降噪差分混沌键控(QM-NRDCSK)系统。发生器产生两路混沌序列, 每一路的参考信号是信息承载信号的 $P$ 次重复, 不同用户信息通过不同时间区分, 两路信号使用正交调制在相同频带上传输。接收端通过滑动平均滤波器对每一路的参考信号进行 $P$ 次平均后与信息信号进行非相干解调。通过在AWGN和多径Rayleigh衰落信道下的仿真, 验证了理论推导的正确性, 并表明该系统在具有较高频谱利用率的同时, 能有效提高传输速率且拥有较好的误码性能。

**关键词:** 差分混沌键控; 滑动平均滤波器; 降噪; 传输速率; 比特误码率

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)02-0445-09

DOI: 10.11999/JEIT190955

## A Novel Noise Reduction Differential Chaos Shift Keying System Based on Quadrature Modulation

ZHANG Gang LIU Jinhui ZHANG Tianqi

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

**Abstract:** To overcome the shortcomings of low transmission rate of Noise Reduction Differential Chaos Shift Keying (NR-DCSK), a novel Noise Reduction Differential Chaos Shift Keying system based on Quadrature Modulation (QM-NRDCSK) is proposed. The generator generates two chaotic sequences, the reference signal of each channel is  $P$ -time repetition of the information-bearing signal. The information of different users is distinguished by different time slots, and the two signals are transmitted on the same frequency band by using quadrature modulation. The reference signal of each channel is averaged  $P$  times by the moving average filter at the receiving end, and then non-coherently demodulated with the information signal. The correctness of the theoretical derivation is verified by simulations in AWGN and multi-path Rayleigh fading channels, and it shows that the system can effectively improve the transmission rate and has better bit error performance while having high spectrum utilization.

**Key words:** Differential Chaos Shift Keying (DCSK); Moving average filter; Noise reduction; Transmission rate; Bit Error Rate (BER)

### 1 引言

对初始条件的敏感依赖性, 是非线性系统的特性, 也是混沌的起源<sup>[1]</sup>。自从具有非周期特性并且易于生成的混沌信号被应用于数字通信以来, 混沌调制方案已经引起了广泛的研究兴趣, 在数字通信领域, 混沌信号具有很大的应用优势<sup>[2-5]</sup>。目前在

数字通信中, 混沌主要有利用混沌系统的复杂性对数字信息加解密、在扩频和解扩环节中充当扩频码以及在数字调制解调环节充当载波<sup>[6-8]</sup>这3个方面的应用。

因为混沌同步相干检测性能很差, 在基于混沌的解调方面表现不佳, 具有相干接收的通信系统所需要的同步技术在嘈杂的环境中难以实现, 因此, 采用非相干接收的通信系统在实际环境中更具可行性和吸引力<sup>[9]</sup>。作为非相干接收的典型, 差分混沌移位键控(Differential Chaos Shift Keying, DCSK)系统有一半的比特持续时间来传输参考信号, 所以数据传输速率和能量效率较低<sup>[10]</sup>, 相关延迟移位键控(Correlation Delay Shift Keying,

收稿日期: 2019-11-25; 改回日期: 2020-09-15; 网络出版: 2020-12-08

\*通信作者: 刘金惠 1342343570@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771085, 61371164), 重庆市教育委员会科研项目(KJQN201900601)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771085, 61371164), The Research Project of Chongqing Educational Commission (KJQN201900601)

CDSK)系统虽然相比于DCSK系统传输速率有所提高,但是由于其参考信号和信息信号加和在一起传输导致误码率有所上升<sup>[11]</sup>。为了解决这些问题,文献[12]提出了降噪DCSK(Noise Reduction DCSK, NR-DCSK)通信系统,该系统将复制后的混沌序列作为参考信号和信息承载信号,接收到的信号经过平均后与其延时的信号进行非相干解调,通过对信号的平均提高了系统误码性能;文献[13]提出了一种基于频分复用的高效DCSK(a High Efficient DCSK based on Frequency Division Multiplexing, FDM-HEDCSK)通信系统,该系统将两个混沌信号的线性组合用作参考信号,并在其上调制4bit数据,每个分支通过FDM的方式发送信号,这使比特速率加倍并提高了数据安全性。文献[14]提出了多用户正交DCSK(Multi-User Orthogonal DCSK, OMU-DCSK)通信系统,发射端的正交混沌信号发生器产生的两路正交混沌信号之和用作参考信号,通过延时来区分不同的信息时隙,每个时隙传输经Walsh码调制的 $N$ 用户信息,通过使用正交混沌信号发生器,信号内干扰被彻底消除,因此系统误码性能得以提高;文献[15]提出了一种新的基于码索引调制的多载波多进制DCSK(Multi-Carrier M-ary DCSK system with Code Index Modulation, CMIMC-M-DCSK)通信系统,在该系统中,使用正交正弦载波同时发送每个子载波的参考和信息承

载信号,为了充分利用系统能量资源,所有子载波中的参考信号都通过Walsh码进行编码,以携带更多的信息比特,并且信息承载信号采用M-DCSK调制以进一步提高数据速率。

为了进一步提高信息传输速率以及改善多用户系统误码性能,在其他学者的研究基础上,本文提出一种基于正交调制的新型降噪DCSK(QM-NRDCSK)系统。发射端产生两路长度为 $\beta/P$ 的混沌序列作为信息承载信号,每一路将信息承载信号复制 $P$ 次作为参考信号,两路信号分别在同相和正交支路中同时传输,理论推导和仿真实验证明,本方案利用正交调制同时传输 $2N$ 用户信息,提高了频谱利用率,并且接收端通过使用滑动平均滤波器降低了噪声项方差,有效改善了系统误码性能。

## 2 QM-NRDCSK系统原理

QM-NRDCSK系统发送第 $k$ 帧信号的框图如图1所示。由于系统发送的两路信号是等效的,以其中一路信号为例,发送端首先利用logistics映射<sup>[16]</sup>生成一段长度为 $\beta/P$ 的混沌序列 $y_{i,k}$ ,经过符号函数归一化处理得到信息承载信号 $x_{i,k}$ ,如式(1)所示

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

其中,  $i = 1, 2, \dots, \beta/P$ , 并且 $E[x_{i,k}] = 0, \text{Var}[x_{i,k}] = 0$ ,

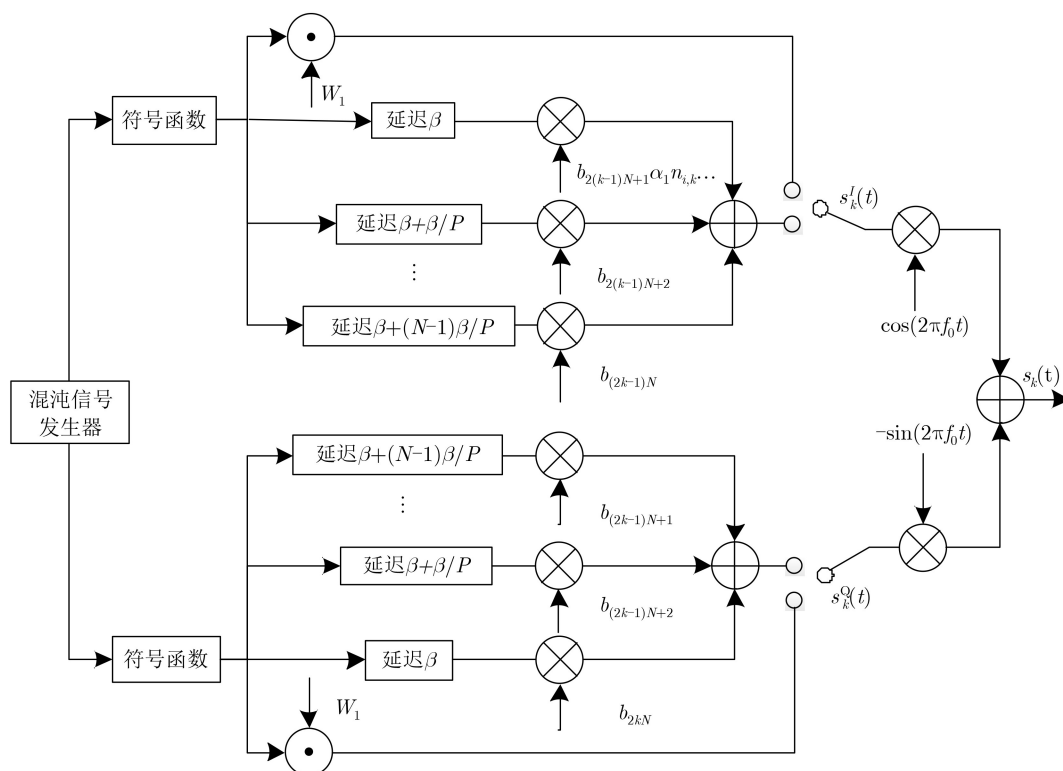


图1 QM-NRDCSK系统第 $k$ 帧发送端框图

$\text{Var}[x_{i,k}^2] = 1$ 。然后将 $x_{i,k}$ 与一段长度为 $1 \times P$ 的全“+1”矩阵 $\mathbf{W}_1$ 进行克罗内克积运算后复制 $P$ 次,得到长度为 $\beta$ 的参考信号 $x'_{i,k}$ 。具体运算过程如下:假设信息承载信号 $x_{i,k}$ 为 $[x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{\beta/P,k}]$ ,  $\mathbf{W}_1$ 为 $[111]$ , 则经过复制后的参考信号 $x'_{i,k}$ 为 $[x_{1,k}, x_{1,k}, x_{1,k}, \dots, x_{\beta/P,k}, x_{\beta/P,k}, x_{\beta/P,k}]$ 。参考信号在第1个时隙中传输, 不同用户信息通过延时不同的时隙区分, 因此, 在同相支路上发送前 $N$ 用户信息的信号 $s_k^I(t)$ 为

$$s_k^I(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{\beta} x'_{i,k} h_T(t - iT_C), 0 < t \leq \beta T_C \\ \sum_{j=1}^N \sum_{i=\beta}^{(P+1)\beta/P} b_{2(k-1)N+j} x_{i-[\beta+\frac{(j-1)\beta}{P}],k} \cdot h_T(t - iT_C), \beta T_C < t \leq \left(\beta + \frac{N\beta}{P}\right) T_C \end{cases} \quad (2)$$

在正交支路上发送后 $N$ 用户信息的信号 $s_k^Q(t)$ 为

$$s_k^Q(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{\beta} x'_{i,k} h_T(t - iT_C), 0 < t \leq \beta T_C \\ \sum_{j=1}^N \sum_{i=\beta+1}^{(P+1)\beta/P} b_{2(k-1)N+j} x_{i-[\beta+\frac{(j-1)\beta}{P}],k} \cdot h_T(t - iT_C), \beta T_C < t \leq \left(\beta + \frac{N\beta}{P}\right) T_C \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $T_C$ 为码片周期, 一般取1,  $h_T(t)$ 是持续时间

为 $T_C$ 的脉冲信号, 其形状可以是矩形, 升余弦或者其它形状, 在这里定义为平方根升余弦滤波器的脉冲响应, 经过标准化后具有单位能量, 如式(4)所示

$$\int_{iT_C}^{(i+1)T_C} h_T^2(t - iT_C) dt = 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

最后将这两路信号分别调制到正交和同相的正弦载波 $-\sin(2\pi f_0 t)$ 和 $\cos(2\pi f_0 t)$ 上, 以最大限度地减少前 $N$ 用户和后 $N$ 用户之间的干扰, 并且提高频谱利用率和信息传输速率。发射的信号 $s_k(t)$ 可以表示为

$$s_k(t) = s_k^I(t) \cos(2\pi f_0 t) - s_k^Q(t) \sin(2\pi f_0 t), \quad 0 < t \leq \left(\beta + \frac{N\beta}{P}\right) T_C \quad (5)$$

其中,  $f_0$ 是正弦载波的频率, 假设 $f_0$ 是 $1/T_C$ 的倍数并且 $f_0 \gg 1/T_C$ 。

由式(5), 可以计算出系统的平均比特能量 $E_b$ 为

$$E_b = \frac{\mathbb{E} \left[ \int_{t=1}^{\left(\beta + \frac{N\beta}{P}\right) T_C} s_k^2(t) dt \right]}{2N} = \frac{(P+N)\beta}{PN} \mathbb{E} [x_{i,k}^2] \quad (6)$$

QM-NRDCSK系统解调第 $k$ 帧信号的框图如图2

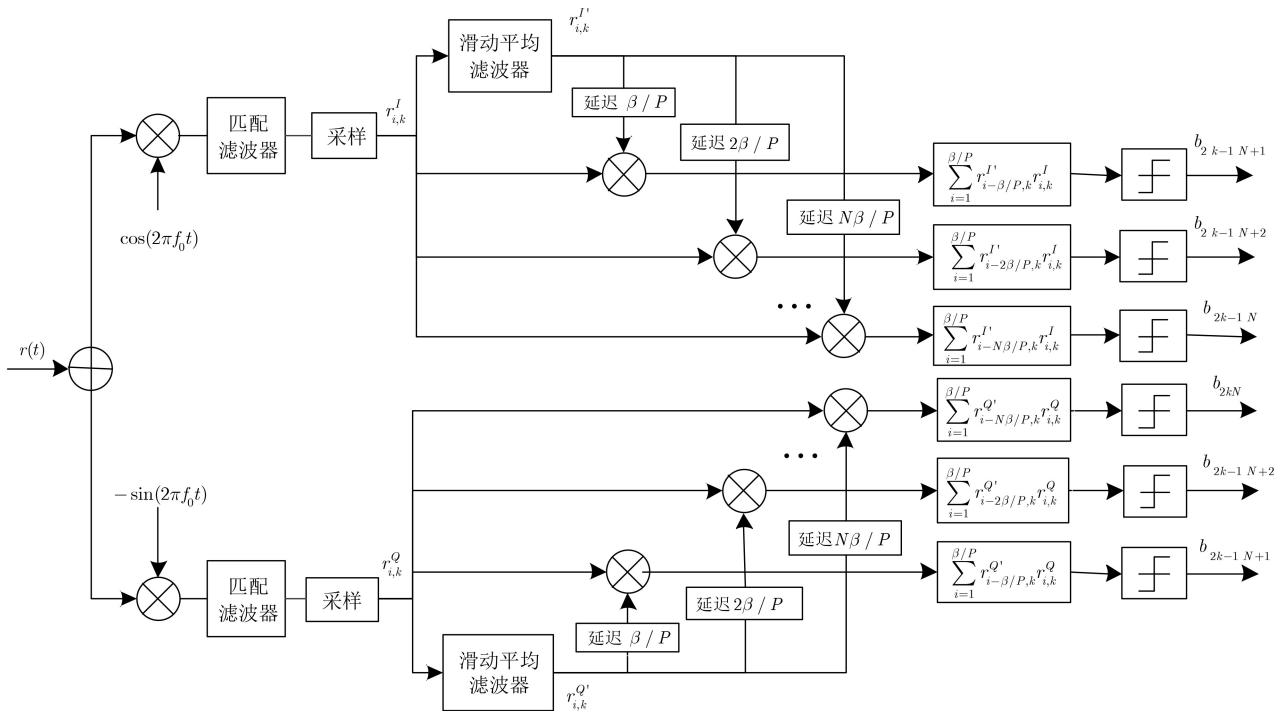


图2 QM-NRDCSK系统第 $k$ 帧接收端框图

所示。接收到的信号 $r(t)$ 首先与对应的正弦信号相乘移除载波，然后将得到的信号分别输入两个相同的匹配滤波器，这两个匹配滤波器都设计为与脉冲信号 $h_T(t)$ 相匹配，用于在每个采样时间 $t = iT_C$ 最大化输出峰值脉冲信噪比<sup>[17]</sup>，然后每隔 $iT_C$ 时间对两个匹配滤波器的输出进行采样，得到离散信号 $r_{i,k}^I$ 和 $r_{i,k}^Q$ 。由于两路信号的解调方式一致，以解调前 $N$ 用户为例， $r_{i,k}^I$ 首先经过窗口长度为 $P$ 的滑动平均滤波器，经过平均后的参考信号 $r_{i,k}^I$ 长度变为原来的 $1/P$ ，然后将参考信号经过不同的延时分别与对应的信息信号进行非相干解调，则解调第 $k$ 帧同相支路第 $u$ 个用户信息时，相关器的输出 $Z_{2(k-1)N+u}$ 可以表示为

$$Z_{2(k-1)N+u} = \sum_{i=1}^{\beta/P} r_{i-u\beta/P,k}^I r_{i,k}^I \quad (7)$$

解调正交支路第 $u$ 个用户信息时相关器的输出 $Z_{(2k-1)N+u}$ 可以表示为

$$Z_{(2k-1)N+u} = \sum_{i=1}^{\beta/P} r_{i-u\beta/P,k}^Q r_{i,k}^Q \quad (8)$$

根据式(6)的判决规则，可以恢复出信息信号 $b_{2(k-1)N+u}$ 和 $b_{(2k-1)N+u}$ 。

$$b_{2(k-1)N+u} = \begin{cases} -1Z_{2(k-1)N+u} < 0 \\ +1Z_{2(k-1)N+u} \geq 0 \end{cases}, \quad (9)$$

$$b_{(2k-1)N+u} = \begin{cases} -1Z_{(2k-1)N+u} < 0 \\ +1Z_{(2k-1)N+u} \geq 0 \end{cases}$$

### 3 QM-NRDCSK系统性能分析

#### 3.1 误码性能分析

信号在无线信道传输过程中会受到噪声、衰落以及时延的影响，因此分析信号在Rayleigh衰落信道下的误码性能更具有现实意义。如图3，以多径Rayleigh衰落信道模型为例， $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L$ 是相互独立并服从Rayleigh分布的衰落因子， $n_{i,k}$ 为 $E[n_{i,k}] = 0$ ,  $\text{Var}[n_{i,k}] = N_0/2$ 的加性高斯白噪声，假设延时 $\tau$ 等于 $T_C$ 的整数倍，并且远小于比特周期，即 $\tau \ll T_b$ ，因此，与多径延时在每个比特持续时间内产生的干扰相比，符号间干扰可以忽略不计<sup>[18]</sup>。

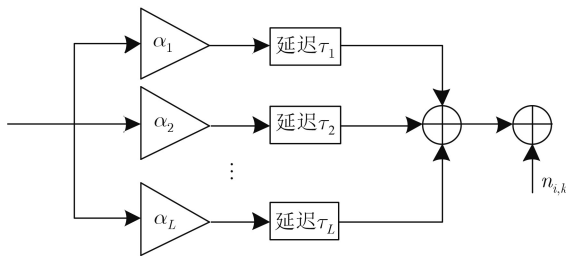


图3 多径Rayleigh信道模型

则接收到的信号 $r(t)$ 可以表示为

$$r(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l s(t - \tau_l) + n(t) \quad (10)$$

由于解调同相支路和正交支路的分析方法相同，以同相支路为例，接收端相关器的输出 $Z_{2(k-1)N+u}$ 可以展开为

$$Z_{2(k-1)N+u} = \sum_{i=1}^{\beta/P} \left[ \left( \sum_{l=1}^L \alpha_l x_{i-u\beta/P-\tau_l,k} + \frac{1}{P} \sum_{P=1}^P n_{i-u\beta/P,k} \right) \cdot \left( \sum_{l=1}^L \alpha_l b_u x_{i-u\beta/P-\tau_l,k} + n_{i-u\beta/P,k} \right) \right] = A + B + C \quad (11)$$

$$A = \sum_{i=1}^{\beta/P} \sum_{l=1}^L \alpha_l^2 b_u x_{i-u\beta/P-\tau_l,k}^2 \quad (12)$$

$$B = \sum_{i=1}^{\beta/P} \left( \sum_{l=1}^L \alpha_l x_{i-u\beta/P-\tau_l,k} n_{i-u\beta/P,k} + \sum_{l=1}^L \alpha_l b_u x_{i-u\beta/P-\tau_l,k} \frac{1}{P} \sum_{P=1}^P n_{i-u\beta/P,k} \right) \quad (13)$$

$$C = \sum_{i=1}^{\beta/P} \left( n_{i-u\beta/P,k} \frac{1}{P} \sum_{P=1}^P n_{i-u\beta/P,k} \right) \quad (14)$$

其中， $A$ 为能恢复出用户信息的有用项， $B$ 为信号与噪声干扰项， $C$ 为噪声间干扰项。假设 $i \neq j$ 时， $n_{i,k}$ 和 $n_{j,k}$ 相互独立，并且 $i \neq j$ 时， $n_{i,k}$ 和 $x_{i,k}$ 同样独立。当 $\beta$ 较大时，混沌信号自相关项的分布近似于高斯分布，并且此时不同混沌序列之间互相关性较低，有

$$\sum_{i=1}^{\beta/P} (x_{i-u\beta/P-\tau_m,k} x_{i-u\beta/P-\tau_n,k}) \approx 0, m \neq n \quad (15)$$

因此，式(11)的均值可以表示为

$$E[Z_{2(k-1)N+u}] = \frac{\beta}{P} \sum_{l=1}^L \alpha_l^2 E[x_{i,k}^2] = \sum_{l=1}^L \alpha_l^2 \frac{NE_b}{(P+N)} \quad (16)$$

方差可以表示为

$$\begin{aligned} \text{Var}[Z_{2(k-1)N+u}] &= \frac{\beta}{P} \sum_{l=1}^L \alpha_l^2 E[x_{i,k}^2] \frac{N_0}{2} \\ &+ \frac{\beta}{P} \sum_{l=1}^L \alpha_l^2 E[x_{i,k}^2] \frac{1}{P} \cdot \frac{N_0}{2} \\ &+ \frac{1}{P} \cdot \frac{N_0^2}{4} \\ &= \sum_{l=1}^L \alpha_l^2 \frac{(P+1)NE_b N_0}{2P(P+N)} + \frac{\beta N_0^2}{4P^2} \end{aligned} \quad (17)$$

由于系统平均比特误码率公式可以表示为

$$\text{BER}_{\text{QM-NRDCSK}} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \frac{|E [Z_{2(k-1)N+u}]|}{\sqrt{2\text{Var} [Z_{2(k-1)N+u}]}} \right) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \frac{|E [Z_{(2k-1)N+u}]|}{\sqrt{2\text{Var} [Z_{(2k-1)N+u}]}} \right) \quad (18)$$

其中,  $\text{erfc}$ 为补误差函数, 其表达式为 $\text{erfc}(\varphi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\varphi}^{\infty} \exp(-x^2) dx$ 。

根据式(16)–式(18), 可以计算出解调QM-NRDCSK系统第 $k$ 帧第 $u$ 个用户的误码率为

$$\text{BER}_{\text{QM-NRDCSK}} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left\{ \left[ \frac{(P+1)(P+N)}{\sum_{l=1}^L \alpha_l^2 PN} \left(\frac{E_b}{N_0}\right)^{-1} + \frac{\beta(P+N)^2}{\left(\sum_{l=1}^L \alpha_l^2\right)^2 2P^2 N^2} \left(\frac{E_b}{N_0}\right)^{-2} \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} \quad (19)$$

令 $\gamma_b = \sum_{l=1}^L \alpha_l^2 (E_b/N_0)$ , 则式(19)可以化简为

$$\text{BER}(\gamma_b) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \frac{(P+1)(P+N)}{PN} \gamma_b^{-1} + \frac{\beta(P+N)^2}{2P^2 N^2} (\gamma_b)^{-2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (20)$$

根据文献[19], 对 $L$ 条独立同分布, 且每条路径的平均信道增益相等的Rayleigh衰落信道,  $\gamma_b$ 服从式(21)分布

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

其中,  $\bar{\gamma}_c = (E_b/N_0) E[\alpha_l^2]$ , 为不同路径上传输信号的平均信噪比。

当每条路径的平均信道增益不相等时,  $\gamma_b$ 服从式(22)分布

$$f(\gamma_b) = \sum_{l=1}^L \frac{\rho_l}{\bar{\gamma}_l} \exp\left(-\frac{\gamma_b}{\bar{\gamma}_l}\right) \quad (22)$$

其中,  $\bar{\gamma}_l = \alpha_l^2 (E_b/N_0)$ , 为第 $l$ 条路径上传输信号的瞬时信噪比, 且

$$\rho_l = \prod_{v=1, v \neq l}^L \frac{\bar{\gamma}_v}{\bar{\gamma}_l - \bar{\gamma}_v} \quad (23)$$

根据式(21)和式(22), QM-NRDCSK系统误码率可以表示为

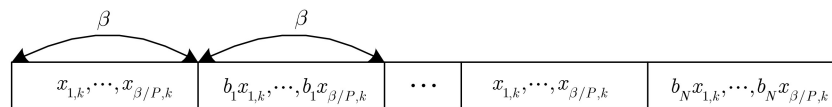
$$\text{BER} = \int_0^{\infty} \text{BER}(\gamma_b) f(\gamma_b) d\gamma_b \quad (24)$$

当 $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = \dots = \alpha_L = 0$ 时, 对应于QM-NRDCSK系统在AWGN信道下的理论误码率公式为

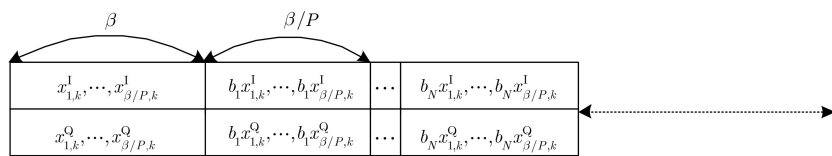
$$\begin{aligned} \text{BER} [Z_{2(k-1)N+u}] &= \text{BER} [Z_{2(k-1)N+u}] \\ &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \left[ \frac{(P+1)(P+N)}{PN} \left(\frac{E_b}{N_0}\right)^{-1} + \frac{\beta(P+N)^2}{2P^2 N^2} \left(\frac{E_b}{N_0}\right)^{-2} \right]^{-\frac{1}{2}} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

### 3.2 效率分析

频谱效率(Spectral Efficiency, SE)可以用比特传输速率与占据的带宽之比来评估, 由图4的系统帧结构可知, NR-DCSK系统传输 $2N$ 用户信息所需要的时间为 $T_{\text{NR-DCSK}} = 4N\beta T_C$ , QM-NRDCSK系统利用正交调制, 并且每支路传输 $N$ 用户信息时共用一个参考信号, 所以传输 $2N$ 用户信息需要的时间为 $T_{\text{QM-NRDCSK}} = (P+N)\beta T_C/P$ , 由于NR-DCSK与QM-NRDCSK系统占据的带宽均为 $1/T_C$ , 则两系统的频谱效率可以分别表示为



(a) NR-DCSK系统帧结构



(b) QM-NRDCSK系统帧结构

图4 系统帧结构

$$SE_{NR-DCSK} = \frac{2N/T_{NR-DCSK}}{1/T_C} = \frac{1}{2\beta} \quad (26)$$

$$SE_{QM-NRDCSK} = \frac{2N/T_{QM-NRDCSK}}{1/T_C} = \frac{2N}{(\beta + \beta N/P)} \quad (27)$$

根据式(26)和式(27)可知,当 $P = N$ 时, QM-NRDCSK系统的频谱效率是NR-DCSK系统的 $2N$ 倍,充分证明了QM-NRDCSK系统利用正交调制提高频谱效率的显著性。

能量效率(Energy Efficiency, EE)可以用数据承载能量与总传输比特能量之比来评估,则NR-DCSK与QM-NRDCSK系统的能量效率可以分别表示为

$$EE_{NR-DCSK} = \frac{1}{2} \quad (28)$$

$$EE_{QM-NRDCSK} = \frac{N}{N+1} \quad (29)$$

由于NR-DCSK系统每比特持续时间只传输1 bit信息,并且有一半的时间传输不包含信息的参考信号,导致其能量效率不高。由式(29)可知,在 $N$ 值较大的情况下, QM-NRDCSK系统的能量效率接近于1,说明该系统可以使用更少的能量发送更多的比特信息。

#### 4 系统仿真与分析

本节先讨论在AWGN信道下,用户数 $N$ 、重复次数 $P$ 以及扩频因子 $\beta$ 对QM-NRDCSK系统误码率的影响,然后给出不同路径数 $L$ 以及不同信道增益下的Rayleigh衰落信道下系统BER曲线,最后与其他系统进行比较。图中所有Monte Carlo仿真曲线都是取 $10^5$ 次仿真结果的平均值得到的。

图5给出了QM-NRDCSK系统在 $\beta = 256$ ,  $P = 2$ , 用户数 $N$ 分别为2, 4, 6时,系统误码率随着 $E_b/N_0$ 的增加而变化的曲线。从图中可以看出,由式(25)得到的系统BER曲线与Monte Carlo仿真曲线重合程度较好,说明了理论推导的正确性。当 $N$ 一定时,随着 $E_b/N_0$ 增加,输出信号所占的比重增加,系统BER性能越好,在相同 $E_b/N_0$ 条件下, $N$ 越大,系统BER越小。

图6表示当 $\beta = 512$ ,  $P = 2$ 时,系统BER随用户数 $N$ 变化的曲线。随着 $N$ 的增加,系统BER表现出先减小后逐渐趋于稳定的趋势,这是由于当传输的 $N$ 增加时,系统平均比特能量 $E_b$ 逐渐减小,导致BER减小,但是当 $N$ 增加到一定数量时, $E_b$ 的减小不再对BER起主导作用,并且在较高的 $E_b/N_0$ 条件下,系统误码性能更好,体现了该QM-NRDCSK系统在多用户传输时的优越性。

图7表示在 $\beta = 256$ ,  $N = 3$ , 复制次数 $P$ 分别为2, 4, 8时,系统误码率随 $E_b/N_0$ 变化的曲线。从图中可以看出,在 $E_b/N_0$ 较小时, $P = 8$ 使系统BER最低,但是随着 $E_b/N_0$ 的增加, $P = 4$ 使系统误码性能达到最佳。

为了进一步探究复制次数 $P$ 对系统误码性能的影响,在 $\beta = 256$ 时,绘制了如图8所示系统BER随 $P$ 变化的曲线。由于接收端通过对参考信号的 $P$ 次平均降低了噪声的方差,从图中可以看出,随着 $P$ 的增加,BER呈现先减小后增大的趋势,即对于不同的用户数 $N$ ,存在一个最佳复制次数 $P$ 使系统BER性能达到最佳,同时可以看出,在传输相同的用户数时, $E_b/N_0$ 较高并且 $P$ 较小时系统误码性能更好。

图9表示当 $N = 3$ ,  $P = 2$ ,  $E_b/N_0$ 分别为8 dB,

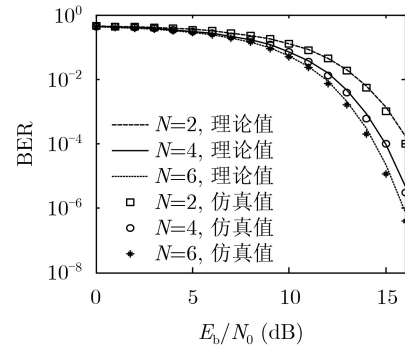


图5 不同 $N$ 值下系统BER随 $E_b/N_0$ 变化曲线

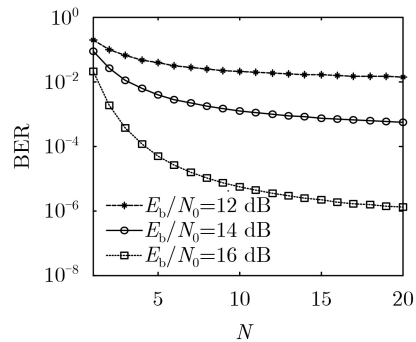


图6 不同 $E_b/N_0$ 下系统BER随 $N$ 值变化曲线

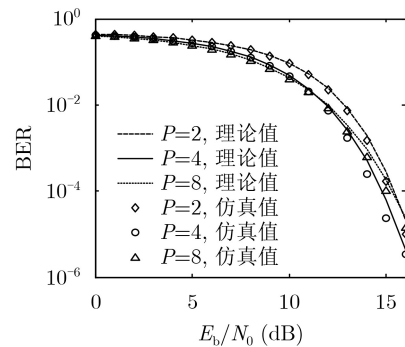


图7 不同 $P$ 值下系统BER随 $E_b/N_0$ 变化曲线

10 dB, 12 dB时, 系统BER随 $\beta$ 变化的曲线, 从图9可以看出, 随着 $\beta$ 的增加, 系统BER变大, 这是因为系统干扰项求和的区间增大, 导致误码性能恶化; 并且在 $\beta$ 较小时, 仿真值与理论值有一定的差距, 因为根据中心极限定理, 此时混沌信号自相关项的实际分布情况与高斯分布差距较大, 只有在 $\beta$ 足够大时, 判决器变量的输出才近似服从高斯分布<sup>[20]</sup>。

图10表示在多径Rayleigh衰落信道中,  $N = 4$ ,  $P = 4$ ,  $\beta = 256$ , 当路径数 $L = 2$ ,  $E[\alpha_1^2] = E[\alpha_2^2] = 1/2$ ,  $L = 3$ ,  $E[\alpha_1^2] = E[\alpha_2^2] = E[\alpha_3^2] = 1/3$ ,  $L = 4$ ,  $E[\alpha_1^2] = E[\alpha_2^2] = E[\alpha_3^2] = E[\alpha_4^2] = 1/4$ 时, 系统BER随 $E_b/N_0$ 变化的性能曲线。从图中可以明显看出, 随着 $L$ 的增加, 系统BER越来越小, 显示了该系统抗多径衰落的优越性, 并且表明了我们可以利用具有Rayleigh衰落等无线信道的多径分集特性来提高系统BER性能。

图11和图12主要分析了QM-NRDCSK系统在两径Rayleigh衰落信道中的BER性能, 其中情况1:

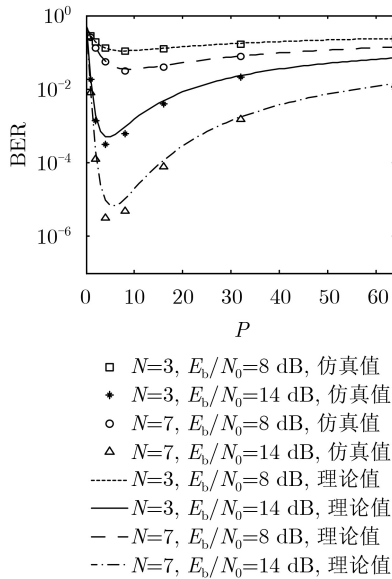


图8 不同 $N$ 值下系统BER随 $P$ 变化曲线

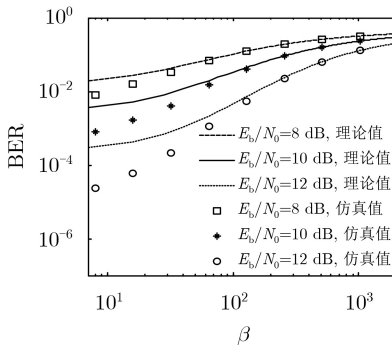


图9 不同信噪比下系统BER随 $\beta$ 变化曲线

$E[\alpha_1^2] = E[\alpha_2^2] = 1/2$ , 即两路径的平均信道增益相等; 情况2:  $E[\alpha_1^2] = 1/11$ ,  $E[\alpha_2^2] = 10/11$ , 即两路径的平均信道增益相差10 dB。

图11表示复制次数 $P = 4$ , 传输用户数 $N = 5$ , 扩频因子 $\beta$ 分别为128和256时, QM-NRDCSK系统的BER随 $E_b/N_0$ 变化的仿真曲线。从图中可以看出, 由Monte Carlo仿真得到的误码性能曲线与由式(24)计算得到的结果基本吻合, 并且系统在两路径信道增益相等时的误码性能总是优于信道增益不等时的误码性能。

图12表示当 $\beta = 256$ ,  $P = 2$ ,  $N = 5$ 时, QM-NRDCSK系统与OMU-DCSK以及DCSK系统的BER性能比较曲线。从图中可以看出, 在两路径等增益以及非等增益的情况下, QM-NRDCSK系统误码性能均优于其它两个系统, 这是由于接收端使

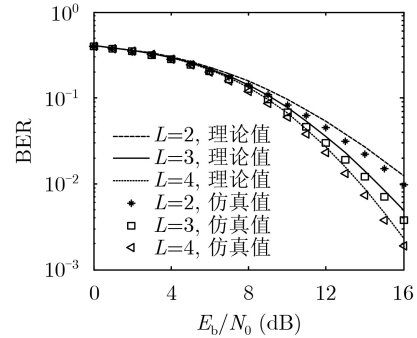


图10 不同路径下系统BER随 $E_b/N_0$ 变化曲线

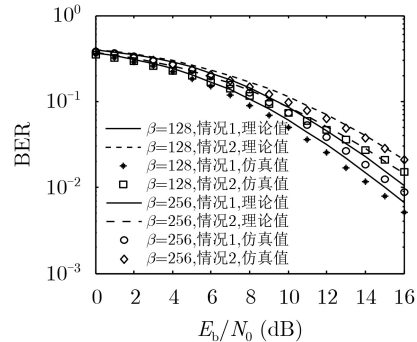


图11 不同信道增益下系统BER随 $E_b/N_0$ 变化曲线

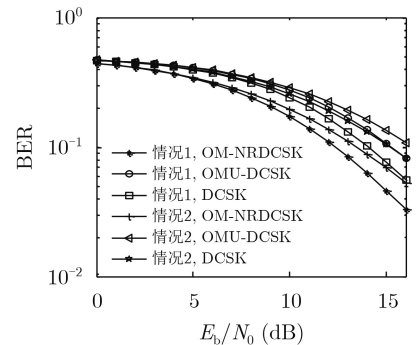


图12 Rayleigh信道下不同系统误码性能对比

用滑动平均滤波器对参考信号进行 $P$ 次平均时噪声也得到了平均,因此减小了噪声项的方差,系统性能得以提高。

## 5 结束语

本文提出了一种基于正交调制的新型降噪差分混沌键控系统,该QM-NRDCSK系统在发射端产生两路长度为 $\beta/P$ 的混沌序列作为信息承载信号,每一路的参考信号是信息承载信号的 $P$ 次重复,多用户信息通过延时的不同区分,两路信号分别在同相和正交支路中同时传输。接收端通过滑动平均滤波器对参考信号进行平均,噪声也因此得到平均,最后与信息信号进行非相干解调,恢复出信息信号。虽然QM-NRDCSK系统引入了过多延时结构,增加了系统复杂度,但这种牺牲是值得的,理论分析与仿真结果表明,该系统利用正交调制提高了传输速率,与NR-DCSK系统相比,QM-NRDCSK的能量效率和频谱效率均有所提高,并且其误码性能优于DCSK和OMU-DCSK系统。至于如何降低系统实现的复杂性成本以及进一步提高系统误码性能,依然是未来研究的方向。

## 参考文献

- [1] KADDOUM G, TRAN H V, KONG Long, *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): 431–443. doi: [10.1109/TCOMM.2016.2619707](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2619707).
- [2] 张琳,徐位凯,王琳,等.码复用差分混沌键控性能分析与同步算法[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2016,28(3): 330–336. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2016.03.008](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2016.03.008).  
ZHANG Lin, XU Weikai, WANG Lin, *et al.* Performance analysis and synchronization algorithm for CS-DCSK system[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2016, 28(3): 330–336. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2016.03.008](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2016.03.008).
- [3] HU Wei, WANG Lin, and KADDOUM G. Design and performance analysis of a differentially spatial modulated chaos shift keying modulation system[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2017, 64(11): 1302–1306. doi: [10.1109/TCSII.2017.2697456](https://doi.org/10.1109/TCSII.2017.2697456).
- [4] KADDOUM G, SOUJERI E, ARCILA C, *et al.* I-DCSK: An improved noncoherent communication system architecture[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2015, 62(9): 901–905. doi: [10.1109/TCSII.2015.2435831](https://doi.org/10.1109/TCSII.2015.2435831).
- [5] LIU Lidong, LI Yi, ZHANG Zhaolun, *et al.* High-efficiency and noise-robust DCSK approach based on an analytically solvable chaotic oscillator[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(24): 1384–1385. doi: [10.1049/el.2018.6054](https://doi.org/10.1049/el.2018.6054).
- [6] YANG Hua and JIANG Guoping. Reference-modulated DCSK: A novel chaotic communication scheme[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2013, 60(4): 232–236. doi: [10.1109/TCSII.2013.2251949](https://doi.org/10.1109/TCSII.2013.2251949).
- [7] FANG Yi, XU Jing, WANG Lin, *et al.* Performance of MIMO relay DCSK-CD systems over Nakagami fading channels[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013, 60(3): 757–767. doi: [10.1109/TCSI.2012.2215755](https://doi.org/10.1109/TCSI.2012.2215755).
- [8] LEE T F. Enhancing the security of password authenticated key agreement protocols based on chaotic maps[J]. *Information Sciences*, 2015, 290: 63–71. doi: [10.1016/j.ins.2014.08.041](https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.08.041).
- [9] FANG Yi, HAN Guojun, CHEN Pingping, *et al.* A survey on DCSK-based communication systems and their application to UWB scenarios[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(3): 1804–1837. doi: [10.1109/COMST.2016.2547458](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2547458).
- [10] 张刚,许嘉平,张天骐.基于希尔伯特变换的多用户DCSK通信系统性能分析[J].电子与信息学报,2018,40(11): 2744–2751. doi: [10.11999/JEIT180110](https://doi.org/10.11999/JEIT180110).  
ZHANG Gang, XU Jiaping, and ZHANG Tianqi. Performance analyze for multiuser-DCSK communication system based on Hilbert transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(11): 2744–2751. doi: [10.11999/JEIT180110](https://doi.org/10.11999/JEIT180110).
- [11] DUAN Junyi and YANG Hua. Phase-orthogonality CDSK: A reliable and effective chaotic communication scheme[J]. *IET Communications*, 2018, 12(9): 1116–1122. doi: [10.1049/iet-com.2017.1239](https://doi.org/10.1049/iet-com.2017.1239).
- [12] 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).
- [13] WANG Shaonan, LIU Yingjie, and MA Weijiao. Design of a novel frequency division scheme for DCSK chaos communication system[C]. The 3rd International Conference on Information Management (ICIM), Chengdu, China, 2017: 317–321. doi: [10.1109/INFOMAN.2017.7950400](https://doi.org/10.1109/INFOMAN.2017.7950400).
- [14] 张刚,陈和祥,张天骐.多用户正交差分混沌键控通信系统[J].系统工程与电子技术,2019,41(3): 667–673. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2019.03.28](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2019.03.28).  
ZHANG Gang, CHEN Hexiang, and ZHANG Tianqi. Multiuser orthogonal differential chaos shift keying communication system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(3): 667–673. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2019.03.28](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2019.03.28).
- [15] CAI Guofa, FANG Yi, WEN Jinming, *et al.* Multi-carrier M-ary DCSK system with code index modulation: An

- efficient solution for chaotic communications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, 13(6): 1375–1386. doi: [10.1109/JSTSP.2019.2913944](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2019.2913944).
- [16] QUYEN N X. Bit-error-rate evaluation of high-efficiency differential-chaos-shift-keying system over wireless channels[J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2018, 27(1): 1850008. doi: [10.1142/S0218126618500081](https://doi.org/10.1142/S0218126618500081).
- [17] YANG Hua, JIANG Guoping, and DUAN Junyi. Phase-separated DCSK: A simple delay-component-free solution for chaotic communications[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2014, 61(12): 967–971. doi: [10.1109/TCSII.2014.2356914](https://doi.org/10.1109/TCSII.2014.2356914).
- [18] QUYEN N X. On the study of a quadrature DCSK modulation scheme for cognitive radio[J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2017, 27(9): 1750135. doi: [10.1142/S0218127417501358](https://doi.org/10.1142/S0218127417501358).
- [19] YANG H, TANG W K S, CHEN Gangrong, *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).
- [20] XU Weikai, WANG Lin, and CHEN Guanrong. Performance analysis of the CS-DCSK/BPSK communication system[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2014, 61(9): 2624–2633. doi: [10.1109/TCSI.2014.2312477](https://doi.org/10.1109/TCSI.2014.2312477).
- 张刚：男，1976年生，博士，教授，研究方向为混沌同步、混沌保密通信。
- 刘金惠：女，1996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，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。

责任编辑：陈倩