

时间反转短参考正交双倍速 DCSK 调制方案

隋涛^a, 李宏达^b

(沈阳理工大学 a. 自动化与电气工程学院, b. 信息科学与工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 为解决传统差分混沌移位键控(differential chaotic shift keying, DCSK)通信系统传输数据速率低以及安全性差的问题,提出一种时间反转短参考正交双倍速差分混沌移位键控通信系统(time-reversal short reference orthogonal double speed DCSK, TR-SR-ODBR-DCSK)。该方案利用 Walsh 函数产生两路正交的混沌信号调制两位数据信息,在同一个时隙内同时传输两个比特信息,信息传输速率提高了一倍,同时提高了通信系统的能量利用率;在此基础上将系统中传输的参考信号进行时间反转,消除同一时隙信号间的相关性,提高系统安全性及信号保密性。利用通用软件无线电外设(universal software radio peripheral, USRP)和LabVIEW 仿真软件搭建半实物的仿真平台,仿真结果验证了混沌通信系统的可行性和有效性。

关键词: 差分混沌移位键控;时间反转;传输速率;通用软件无线电外设

中图分类号: TN918 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2025.01.004

Research on Time-reversal Short Reference Orthogonal Double Speed DCSK Scheme

SUI Tao, LI Hongda

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: To address the issues of low information transmission rate and poor security of traditional differential chaotic shift keying communication system(DCSK), a time-reversed short reference orthogonal double speed differential chaotic shift keying(TR-SR-ODBR-DCSK) communication system scheme is proposed. The scheme uses Walsh function to generate two orthogonal chaotic signals to modulate two bit data information, and transmits two bits of information in the same time slot at the same time, which doubles the information transmission rate, and at the same time improves the energy utilization rate of the communication system. On this basis, the reference signal transmitted in the system is time reversed, which eliminates the correlation between the signals in the same time slot, and improves the system security and signal confidentiality. The feasibility and effectiveness of the chaotic communication system are verified by using universal software radio peripheral(USRP) and LabVIEW simulation software to build a semi-physical simulation platform.

Key words: differential chaotic shift keying; time reversal; transmission rate; universal software radio peripheral

混沌通信是一种以混沌信号作为载波的通信方式,由于混沌信号具有类似白噪声的宽频谱特性、初值敏感性以及非周期不可预测性等特点^[1],

混沌通信系统在对抗多径衰落和多用户干扰方面具有一定的优势^[2]。同时,混沌信号具有保密性好和低截获性的特点,传输安全性高,可满足保密

通信、扩频通信和多用户通信系统需求,在信息安全领域表现出巨大的应用前景^[3-5]。

差分混沌移位键控系统^[6]是一种典型的混沌数字调制技术,通过传输参考(transmitted-reference, T-R)^[7]的方式传输用户比特信息,发送信号分为两段,采样序列相等,利用两段信号正反幅值表示用户比特信息是“+1”还是“-1”。然而,采用 T-R 技术发送信号浪费一半时间且能量传输不携带用户数据的参考信号^[8],造成传输速率低下;参考信号与信息信号具有高相似性,信息容易暴露^[9];浪费一半功率传输参考信号,造成系统抵抗噪声干扰的能力下降,误码性能相比于传统通信不具优势^[10]。

针对 DCSK 系统传输效率低的问题,文献[11]提出短参考 DCSK 系统,通过缩短参考信号,提升了系统的传输速率。张刚等^[12]提出了高速置换索引差分混沌移位键控通信系统,该系统采用置换矩阵索引多元信息,并携带一个调制位,大大提高了系统的数据传输速率。张桐等^[13]提出了正交双倍速 DCSK 系统,误码性能和比特传输速率都得到了改善。文献[14]提出了一种短参考正交双倍速 DCSK 系统,信息传输速率和能量利用率均有提高。

本文提出一种时间反转短参考正交双倍速 DCSK 系统,主要内容包括:

1) 在短参考正交双倍速 DCSK 的基础上添加时间反转模块,消除同一时隙信号间的相关性,提高通信信号保密性;

2) 利用通用软件无线电外设(universal software radio peripheral, USRP)^[15-16]和 LabVIEW 仿真软件搭建半实物仿真平台,验证该调制方案的可行性和有效性。

1 系统基本原理

1.1 系统帧结构

TR-SR-ODBR-DCSK 及 DCSK 帧结构对比如图 1 所示,前一时隙中,参考信号的长度被缩短为 R ,后一时隙中,参考信号经过 P 次复制后,长度变为 $\beta(\beta = PR)$,用于传输 2 位数据信息。将 2 位数据信息通过 Walsh 函数在两个具有良好正交性的不同参考序列上调制。通过对比两种系统的帧结构可以明显看出,TR-SR-ODBR-DCSK 系统在节省时间和能量利用方面比 DCSK 系统效率更高。

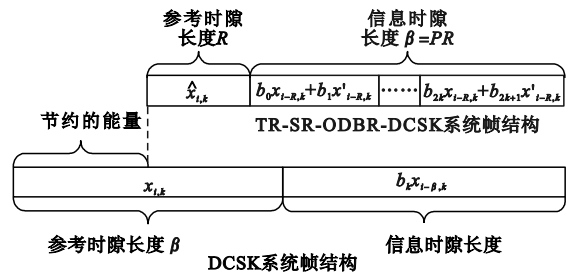


图 1 帧结构对比

Fig. 1 Comparison diagram of frame structure

图 1 DCSK 系统帧结构中: $x_{i,k}$ 表示第 k 帧的参考序列;参考序列经过延时 β 长度为 $x_{i-\beta,k}$ 。在 TR-SR-ODBR-DCSK 系统帧结构中: $\hat{x}_{i,k}$ 表示第 k 帧的时间反转参考序列;原始参考序列经过延时 R 长度为 $x_{i-R,k}$; $x'_{i-R,k}$ 表示延时 R 长度后并通过 Walsh 函数处理的正交混沌序列;第 k 对信息位分为偶数信息位和奇数信息位, b_0, b_2, \dots, b_{2k} 表示偶数信息位, $b_1, b_3, \dots, b_{2k+1}$ 表示奇数信息位。TR-SR-ODBR-DCSK 的解调帧结构如图 2 所示。延迟 k 帧信号后,将长度为 R 的第 i 帧信号的参考时隙逆时间反转后复制 P 次,与原始的参考信号相关。经过相关判定后,可以恢复原始信号。

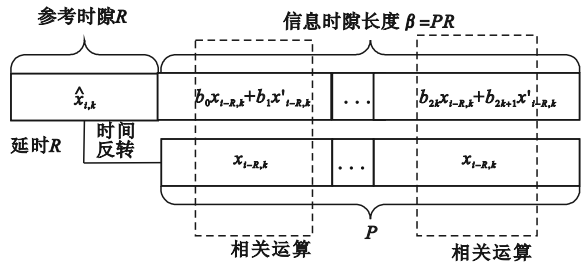


图 2 TR-SR-ODBR-DCSK 解调帧结构

Fig. 2 Demodulation structure of TR-SR-ODBR-DCSK

1.2 系统发射端结构

TR-SR-ODBR-DCSK 系统发射机结构如图 3 所示,该系统发射机是在 SR-ODBR-DCSK 系统发射机的基础上对参考时隙进行了时间反转,时间反转后既保留了 SR-ODBR-DCSK 系统的双倍信息传输速率,同时消除了参考时隙与信息时隙之

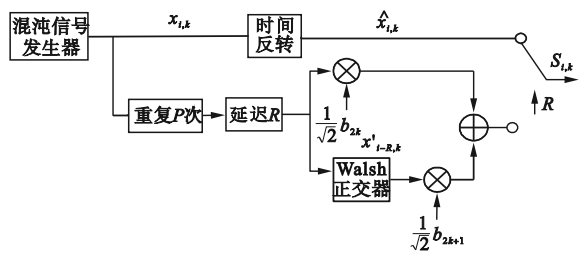


图 3 TR-SR-ODBR-DCSK 发射机

Fig. 3 TR-SR-ODBR-DCSK transmitter

间的相关性,具有更低的检测概率和更高的安全性。

在发射机中,每个信息槽同时传输 2 位数据信息。以 k 帧传输信号为例,将混沌信号发生器产生的混沌信号经时间反转后作为参考信号。未经过时间反转的混沌信号重复 P 次,时延 R 后为 $x_{i-R,k}$,作为信息信号载波。传输第 k 对信息位 b_{2k} 和 b_{2k+1} 时,延时信号分为两个通道,一个用于传输数据信息位 b_{2k} ,另一个通过 Walsh 函数产生与延时信号正交的混沌信号 $x'_{i-R,k}$,作为新的混沌载波传输数据信息位 b_{2k+1} (为了保证传输信号的平均功率不变,此处产生的两个调制后混沌信号的幅值乘以系数 $\sqrt{2}/2$),最后合并两路混沌调制信息进行传输。

因此第 i 帧中传输的 TR-SR-ODBR-DCSK 信号 $S_{i,k}$ 表达式为

$$S_{i,k} = \begin{cases} \hat{x}_{i,k}, & 0 \leq i < R \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(b_{2k}x_{i-R,k} + b_{2k+1}x'_{i-R,k}), & R \leq i \leq (1+P)R \\ x_{k-R,i} \equiv x_{0,i}, & \text{mod}(R) \end{cases} \quad (1)$$

1.3 系统接收端结构

TR-SR-ODBR-DCSK 系统接收机结构如图 4 所示。TR-SR-ODBR-DCSK 系统的接收机依旧是在 SR-ODBR-DCSK 系统接收机基础上增加时间反转模块。为了同时恢复数据信号的连续两位数据,将接收信号分为两个支路,一路接收偶数位 b_{2k} ,另一路接收奇数位 b_{2k+1} 。

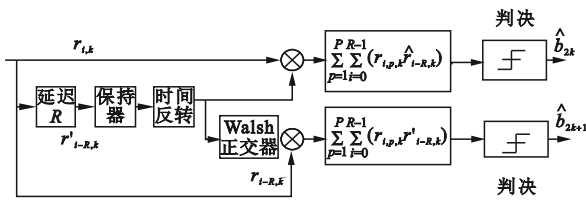


图 4 TR-SR-ODBR-DCSK 接收机

Fig. 4 TR-SR-ODBR-DCSK receiver

恢复信息时,接收端首先接收到信号 $r_{i,k}$,再接收到自身延迟信号 $r_{i-R,k}$,从而提取数据帧中 R 长度的参考信号。为了解调偶数信息位 b_{2k} ,延迟 R 并时间反转后的信号 $\hat{r}_{i-R,k}$ 与解调器实际接收到的信息 $r_{i,k}$ 进行相关运算,最后计算出 P 个独立相关值的和,将累积的信号值与决策阈值进行比较得到偶数信息位 b_{2k} 。为了解调奇数信息位 b_{2k+1} ,接收到的参考信号经过时间反转后需要用与发送端相同的 Walsh 函数进行正交处理,然后

将正交处理后的混沌参考信号与接收到的信息信号部分相关 P 次,计算 P 个独立相关值之和。将结果与决策阈值进行比较,得到奇数信息位 b_{2k+1} 。

2 系统性能分析

假设接收到的信号只受高斯信道的影响,则接收到的信号为

$$Z_{2k} = \sum_{p=1}^P \sum_{i=0}^{R-1} r_{i,p,k} \hat{r}_{i-R,k} \quad (2)$$

$$Z_{2k+1} = \sum_{p=1}^P \sum_{i=0}^{R-1} r_{i,p,k} r'_{i-R,k} \quad (3)$$

Z_{2k} 可扩展为

$$Z_{2k} = \sum_{p=1}^P \sum_{i=0}^{R-1} (S_{i,k} + n_{i,k}) \cdot (\hat{S}_{i-R,k} + \hat{n}_{i-R,k}) \quad (4)$$

式中: $n_{i,k}$ 表示均值为零、方差为 $N_0/2$ 的高斯白噪声, N_0 表示单个信号噪声功率谱密度; $\hat{n}_{i-R,k}$ 为第 p 个数据信号第 k 个样本的高斯白噪声; $\hat{S}_{i-R,k}$ 为调制信号。对式(4)进一步展开为

$$A = \sum_{p=1}^P \sum_{i=0}^{R-1} \frac{1}{\sqrt{2}} b_{2k} \hat{x}_{i-R,k}^2 \quad (5)$$

$$B = \sum_{p=1}^P \sum_{i=0}^{R-1} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} b_{2k+1} \hat{x}_{i-R,k}^2 x'_{i-R,k} + \frac{1}{\sqrt{2}} b_{2k} + \hat{x}_{i-R,k} \hat{n}_{i-R,k} + \frac{1}{\sqrt{2}} b_{2k+1} x'_{i-R,k} \hat{n}_{i-R,k} + \alpha_1 \hat{x}_{i-R,k} \hat{n}_{i-R,k} \right) \quad (6)$$

$$C = \sum_{p=1}^P \sum_{i=0}^{R-1} \hat{n}_{i,k} \hat{n}_{i-R,k} \quad (7)$$

式中: A 为有用信号分量; B 、 C 是均值为零的干扰分量,主要来自于混沌序列在不同时间段的互相关以及相关器输入的噪声干扰。根据判决规则,可以恢复出信息比特为

$$\hat{b}_{2k} = \begin{cases} +1, & Z_{2k} > 0 \\ -1, & Z_{2k} \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\hat{b}_{2k+1} = \begin{cases} +1, & Z_{2k+1} > 0 \\ -1, & Z_{2k+1} \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

选用二阶 Chebyshev 映射作为初始混沌信号,推导出在高斯信道下 TR-SR-ODBR-DCSK 的理论误码率 BER 表达式为

$$BER = \frac{1}{2} \text{erfc} \left[\left(\frac{2}{PR} + \frac{2(R+\beta)N_0}{PRE_b} + \frac{(R+\beta)^2 N_0^2}{4PRE_b^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (10)$$

式中: E_b 为单个信号能量;erfc 为互补误差函数。

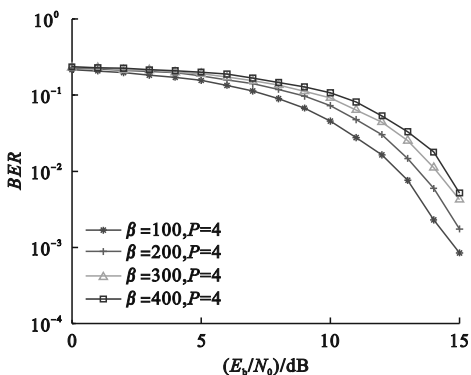
3 实验与仿真分析

3.1 半扩频因子对系统误码率的影响

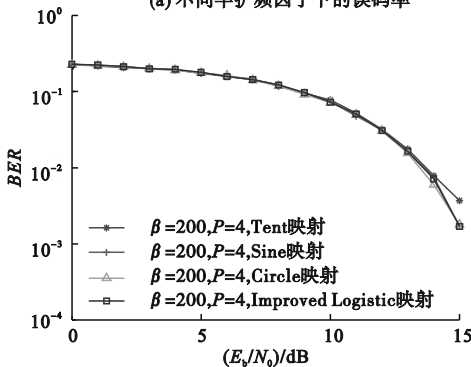
为探究半扩频因子 β 对 TR-SR-ODBR-DCSK 系统性能的影响,通信系统中的混沌映射选择改进型 Logistic 映射^[17],初值设置为 0.6,复制次数 P 为 4,在半扩频因子 β 分别选取 100、200、300、400 时进行仿真测试,如图 5(a) 所示。通过对比发现,在半扩频因子较小的情况下,系统的误码性能较好。

3.2 不同混沌映射对系统误码率的影响

为探究不同混沌映射对系统性能的影响,控制四种混沌映射的初始值均为 0.6,复制次数 P 相同,半扩频因子 β 相同。实验得到的误码率仿真结果如图 5(b) 所示。通过对比发现,在使用 Tent 映射生成的混沌信号时,系统的误码性能略差。



(a) 不同半扩频因子下的误码率



(b) 不同混沌映射下的误码率

图 5 不同条件下的误码率

Fig. 5 BER under different conditions

3.3 不同系统误码率的比较

图 6 为 DCSK、SR-DCSK、ODBR-DCSK、TR-SR-ODBR-DCSK 四种系统在高斯白噪声信道下的误码率比较。其中,半扩频因子 β 为 200、复制次数 P 为 2。从图中可以看出,ODBR-DCSK 系

统的误码率为最高,DCSK 系统与 SR-DCSK 系统的误码性能相差不大,TR-SR-ODBR-DCSK 系统的误码性能一直优于其他系统。

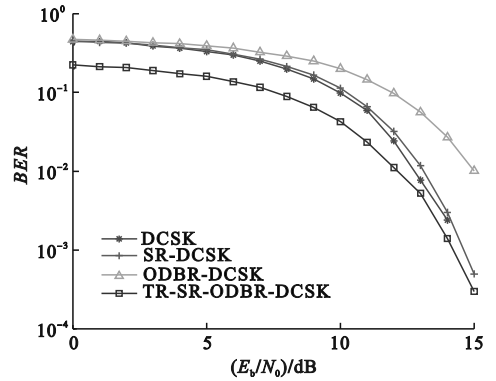


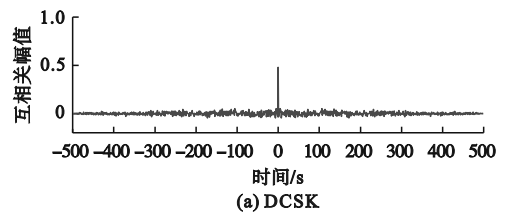
图 6 不同系统的误码率

Fig. 6 BER under different systems

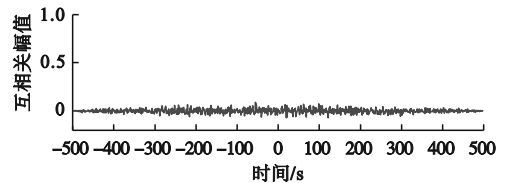
3.4 安全性分析

由于 DCSK 系统发送端采用非相干的传输参考机制,接收端利用传输信号和信息信号的相关性进行解调,非合作方也可以通过频谱分析等方式获取信号信息,因此 DCSK 系统的通信安全性较低。

DCSK 系统与 TR-SR-ODBR-DCSK 系统相邻时隙参考信号和信息信号的互相关特性仿真结果如图 7 所示,对比可知,该调制方法没有出现 DCSK 相邻时隙信号的互相关峰,对于非合作方无法通过信号相关性破解传输的信息,表明 TR-SR-ODBR-DCSK 通信系统具有更好的安全性。



(a) DCSK



(b) TR-SR-ODBR-DCSK

图 7 互相关特性

Fig. 7 Performance cross-correlation

3.5 USRP 与 LabVIEW 仿真测试

实验中利用 LabVIEW 软件和 USRP 设备搭建一个混沌通信系统半实物仿真平台,利用 USRP 设备实现 TR-SR-ODBR-DCSK 系统产生的混沌

信号在实验室环境下进行传输,实验结果验证了系统的可行性。本实验中所采用的软件版本为 LabVIEW2021,软件无线电设备型号为 USRP-2920。USRP 设备通过以太网口实现与主机的通信。搭建的实验环境如图 8 所示。

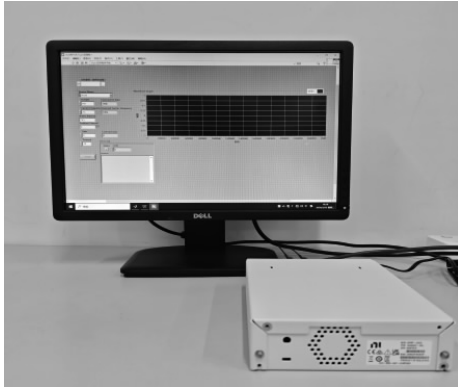


图 8 半实物仿真环境

Fig. 8 Semi-physical simulation environment

本实验的设计思路是将 Matlab 仿真产生的混沌信号整理成文本的形式,通过 LabVIEW 程序将信号写入到软件无线电平台 USRP 设备内部,USRP 设备将文本信号处理后发射到真实信道中并进行接收。LabVIEW 将接收到的信号数据存储在 Excel 表格中,将表格中的文本信号数据导入到 Matlab 工作区中,运行解调程序,得到发射机发送的信息码元。实验流程如图 9 所示。

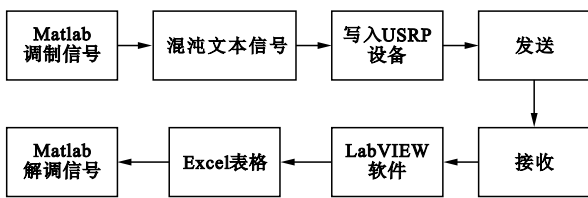


图 9 仿真测试流程

Fig. 9 Simulation test flowchart

以 TR-SR-ODBR-DCSK 系统作为通信方案,通过 Matlab 软件随机生成 1 000 个信息码元,如图 10 所示,调制后的 TR-SR-ODBR-DCSK 信号如图 11 所示。

将调制后的 TR-SR-ODBR-DCSK 信号整理成 .txt 格式的文本,再将文本信号导入到 LabVIEW 发射端程序前面板设置的文本路径中,程序参数设置如图 12 中 LabVIEW 面板所示,运行发射端程序,USRP 设备发射 TR-SR-ODBR-DCSK 信号。

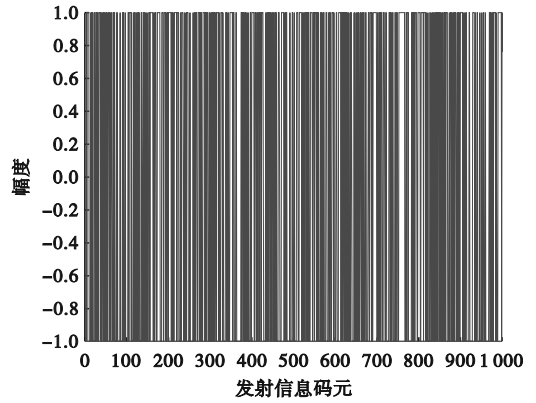


图 10 发射的信息码元

Fig. 10 Transmitted information element

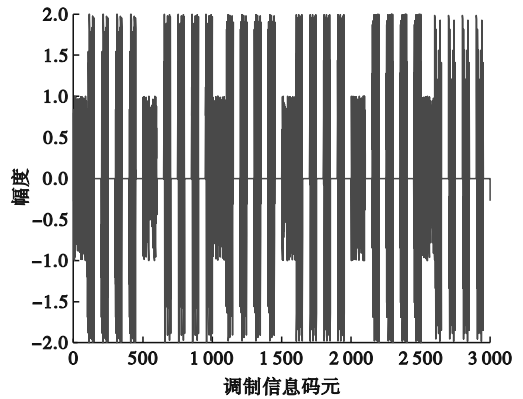


图 11 调制后的 TR-SR-ODBR-DCSK 信号

Fig. 11 Modulated TR-SR-ODBR-DCSK signal

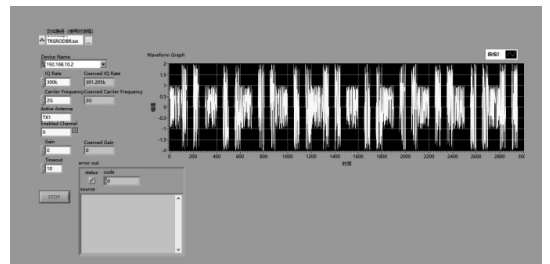


图 12 发射机面板

Fig. 12 Transmitter Panel

再经另一台 USRP 设备接收后,在 LabVIEW 接收端运行接收程序,其参数设置需和发射端一致,LabVIEW 接收端前面板如图 13 所示。从图 13 中可以看出,接收到第一个信号的时间为第 2 秒,将接收信号 Excel 表格中第 2 秒开始的信号数据导入 Matlab 工作区中,运行 TR-SR-ODBR-DCSK 解调程序,解调出的信息码元如图 14 所示。

图 14 中解调出的信息码元与图 10 中由 Matlab 仿真产生的信息码元一致,说明混沌通信系统实验成功。

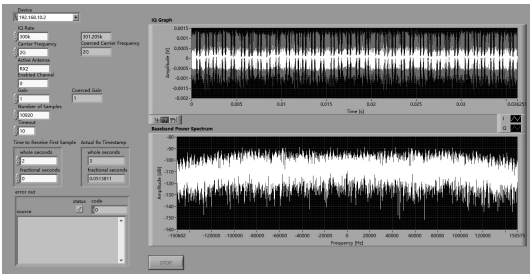


图13 接收机面板
Fig.13 Receiver panel

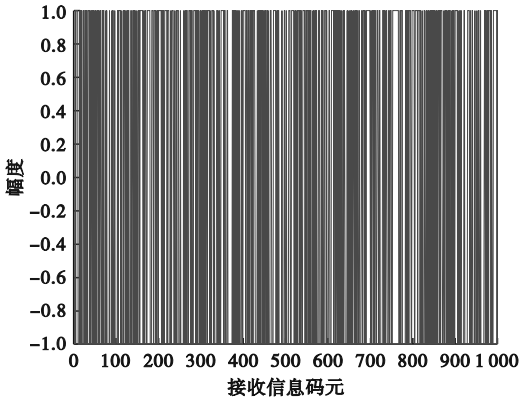


图14 接收的信息码元
Fig.14 Received information element

4 结论

本文中提出的 TR-SR-ODBR-DCSK 调制方案在原有混沌信号传输基础上对参考信号进行时间反转,消除了信号间的相关性,并通过 Walsh 函数将混沌信号分成两路相互正交的信号,分别用于调制 2 位数据信息,使传输速率提高了一倍。仿真测试结果显示,当参考信号复制次数 P 较少、信息信号长度较短时,系统的误码性能较好。在相同条件下,四种典型离散混沌映射对系统性能影响不大。此外,与其他常见的混沌移位键控系统相比,TR-SR-ODBR-DCSK 系统在相同条件下不仅误码性能更好,而且能量效率更高。在 LabVIEW 软件和 USRP 设备搭建的半实物仿真平台下,通过信息码元的传输对系统进行了测试,成功实现混沌通信系统的发射与接收,验证了混沌通信系统的可行性。

参考文献 (References):

[1] 贺利芳,何平,蒋忠均.一种正交多用户差分混沌移位键控系统[J].华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(11):97-104.
HE L F, HE P, JIANG Z J. An orthogonal multi-user differen-

tial chaotic shift keying system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(11): 97-104. (in Chinese)

[2] 张刚,何平,张天骐.改进型时间反转的多用户 DCSK 系统[J].西安电子科技大学学报,2022,49(5):25-36.
ZHANG G, HE P, ZHANG T Q. Improved time reversal multi-user DCSK system[J]. Journal of Xidian University, 2022, 49(5): 25-36. (in Chinese)

[3] HERCEG M, VRANJEŠ D, KADDOUM G, et al. Commutation code index DCSK modulation technique for high-data-rate communication systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 65(12): 1954-1958.

[4] FANG Y, HAN G J, CHEN P P, 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.

[5] HU W, WANG L, CAI G F, et al. Non-coherent capacity of M-ary DCSK modulation system over multipath rayleigh fading channels[J]. IEEE Access, 2017, 5: 956-966.

[6] 蔡和明,徐位凯,王琳.差分混沌通信研究综述:信号设计与性能优化[J].电子与信息学报,2022,44(10):3683-3696.
CAI X M, XU W K, WANG L. Survey of differential chaotic communications: signal design and performance optimization[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(10): 3683-3696. (in Chinese)

[7] 张刚,陈和祥,张天骐.多用户降噪差分混沌键控通信方案[J].电子与信息学报,2019,41(2):362-368.
ZHANG G, CHEN H X, ZHANG T Q. A multuser noise reduction differential chaos shift keying system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(2): 362-368. (in Chinese)

[8] 贺利芳,陈茜,张刚.多用户多级降噪相关延迟移位键控通信系统[J].大连理工大学学报,2023,63(2):315-324.
HE L F, CHEN X, ZHANG G. Multi-user multi-level noise reduction correlation delay shift keying communication system[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2023, 63(2): 315-324. (in Chinese)

[9] KADDOUM G. Design and performance analysis of a multi-user OFDM based differential chaos shift keying communication system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(1): 249-260.

[10] KADDOUM G, RICHARDSON F D, ADOUNI S, et al. Multi-user multi-carrier differential chaos shift keying communication system[C]//2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Sardinia, Italy: IEEE, 2013: 1798-1802.

[11] KADDOUM G, SOUJERI E, NUSURE Y. Design of a short reference noncoherent chaos-based communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(2): 680-689.

[12] 张刚,陈茜,蒋忠均.高速置换索引差分混沌移位键控通信系统[J].系统工程与电子技术,2024,46(3):1125-1133.
ZHANG G, CHEN X, JIANG Z J. High-rate permutation index differential chaos shift keying communication system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(3): 1125-1133. (in Chinese)

[13] 张桐,隋涛,虞明灯,等.ODBR-DCSK 系统调制技术研究[J].沈阳理工大学学报,2021,40(3):24-28.