

基于改进型 Logistic 混沌序列的 SPC-TDCS 多址接入研究

李 楠, 任清华, 苏玉泽

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

摘要 为提高变换域通信系统多址接入性能,降低系统误比特率,提出基于改进型 Logistic 混沌序列的变换域扩频编码通信系统。利用扩频序列优选原则,选取改进型 Logistic 混沌序列作为扩频序列,对 m 序列产生的随机相位矢量进行相位编码形成扩频基函数的扩频随机相位矢量。仿真结果表明,该扩频基函数具有更好的随机性,产生的扩频随机相位矢量互(自)相关性能优于传统基函数产生的随机相位矢量;在 2 个用户和多用户条件下,其信噪比增益和误比特性能都要优于传统基函数和基于 Gold 序列的扩频基函数,显著提高系统抗干扰性能,能更好地实现 TDCS 多址接入。

关键词 变换域通信系统;扩频随机相位矢量;多址接入

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.009

中图分类号 TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)03-0045-06

Research on Multiple Accesses of SPC-TDCS Based on Modified Logistic Chaotic Sequence

LI Nan, REN Qinghua, SU Yuze

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: To improve the multiple access performance of Transform Domain Communication System, and reduce the bit error rate of system, SPC-TDCS (Spread Phase Coding based TDCS) is proposed based on modified Logistic chaotic sequence. Taking modified Logistic chaotic sequence as a spread sequence in accordance with the principle of the optimized sequence, the random phase vector generated by m sequence is utilized by phase encoding vector to form spread random phase vector (SRPV). The simulation results show that the spread basic function has still more randomness, and the generated SRPV is superior in relative performance to the traditional random phase vector. No matter in the condition of single-user or multi-users, the spread basic function based on modified Logistic chaotic sequence (SBF-ML) has an improved gained SNR, and its performance is better than that of the traditional basic function and the spread basic function based Gold sequence. By doing so, this significantly enhances anti-jamming capability and realizes further TDCS multiple access capability.

Key words: transform domain communication system; spread random phase vector; multiple accesses

收稿日期: 2015-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(60972042;61571460;61401499)

作者简介: 李楠(1992-),女,陕西咸阳人,硕士生,主要从事变换通信系统宽带压缩频谱感知研究.E-mail:244945348@qq.com

引用格式: 李楠,任清华,苏玉泽.基于改进型 Logistic 混沌序列的 SPC-TDCS 多址接入研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(3):45-50.LI Nan, REN Qinghua, SU Yuze. Research on Multiple Accesses of SPC-TDCS Based on Modified Logistic Chaotic Sequence[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(3): 45-50.

变换域通信系统(Transform Domain Communication System, TDCS)作为认知无线电一项重要候选技术,以独特的抗干扰方式保证了传输信号低检测、低截获的优良特性,保证了通信可靠性^[1]。由于 TDCS 基函数彼此正交且与信道干扰信号正交,从而避免了信道干扰,使得信号以“机会式接入”方式进行多址通信^[2]。

TDCS 多址通信性能由基函数的随机相位矢量性能决定。多址通信时,不同用户使用 PN 序列产生的不同随机相位矢量即可实现 TDCS 多址接入。文献[3]选取 m 序列作为 PN 序列,该方法实现简单,但 m 序列互相关特性不理想。文献[4]提出使用 Gold 序列代替 m 序列,并证明其自相关、互相关性能优于 m 序列。然而 Gold 序列与 m 序列都存在系统容量有限的问题。前面的研究工作主要针对单一序列,文献[5]提出基于扩频相位编码的变换域通信系统(Spread Phase Coding based TDCS, SPC-TDCS),从序列选取上证明基于 Gold 序列的扩频基函数具有良好的多址接入能力,但并未对扩频基函数相关性能进行分析。

针对上述问题,通过对基函数序列优选原则及互(自)相关性分析,选取相关性能更加优良的改进型 Logistic 混沌序列作为扩频序列,对传统变换域通信系统进行改进,提出一种基于改进型 Logistic 混沌序列扩频编码的 SPC-TDCS,并对该系统多址接入性能及抗干扰性能进行验证

1 传统变换域通信系统

1.1 TDCS 基本原理

为抑制干扰对信号的影响,TDCS 通过基函数对数据源产生的数据进行调制。基函数由 2 部分组成:一是通过频谱感知、门限判决与谱值估计生成的幅度谱矢量;二是由随机相位发生器生成的与幅度谱矢量等长的随机相位矢量。将二者点乘形成基函数频域形式,之后进行功率调整和逆变换,最终形成基函数时域波形。

1.2 TDCS 多址性能分析

TDCS 使用 PN 序列经过线性反馈移位寄存器(Linear Feedback Shift Register, LFSR)和相位映射器生成基函数随机相位矢量,使载波调制特性具有类噪声特性。这不仅有利于减少其他用户的干扰,也降低了传输信号被窃听和被截获的概率。变换域通信系统多址接入技术是建立在基函数随机相位矢量编码方案上的重要应用^[6],为避免多用户之间干扰重叠,TDCS 要求不同地址的基函数之间正

交,即要求不同随机相位矢量的互相关性尽可能小。TDCS 系统的干扰主要有噪声干扰、多址干扰和多径干扰,其中,噪声干扰不可避免。多址干扰是由于不同序列的不同相位造成的,多径干扰主要是同一序列的不同相位形成的^[7]。基函数正交性良好,则多址干扰小,多址通信可靠,因此,基函数波形设计是 TDCS 降低干扰影响,实现抗干扰、低截获和提高多址性能的重要前提。

在 TDCS 系统中,基函数定义为^[8]:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_b(\omega) &= C\mathbf{A}'(\omega)e^{j\theta(\omega)} \\ \mathbf{A}'(\omega) &= \begin{cases} 0, & \mathbf{A}(\omega_i) \geq \mathbf{A}_T \\ 1, & \mathbf{A}(\omega_i) \leq \mathbf{A}_T \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}'(\omega)$ 为采样后频谱估计的幅度谱矢量 $\mathbf{A}(\omega)$ 与门限 \mathbf{A}_T 进行比较得到的变换域幅度谱矢量,是由 0,1 组成的幅度序列; C 为功率调整系数; $C = \sqrt{N/N_k}$,其中, N 为基函数周期内总采样点数, N_k 为基函数频谱中幅值为 1 的个数; $e^{j\theta(\omega)}$ 是与幅度谱矢量等长的随机相位矢量。

利用 IDFT 变换产生的时域基函数形式为:

$$\begin{aligned} b(n) &= \text{IDFT}[\mathbf{B}_b(\omega)] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{B}_b(\omega) e^{j\frac{2\pi kn}{N}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} CA_k e^{j\frac{2\pi mk}{M}} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $n=0,1,\dots,N-1$,为经过门限剔除之后的频谱幅度,其值为 0 或 1。 $\varphi \in [0,2\pi]$,服从均匀分布。

自相关函数定义为:

$$\begin{aligned} R_m &= E[b(n)b(n+m)] = \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^{N-m-1} \sum_{k=0}^{N-1} |A_k|^2 e^{j\frac{2\pi km}{N}} \end{aligned} \quad (3)$$

互相关函数定义为:

$$\begin{aligned} R_{xy}(m) &= E[b_x(n)b_y(n+m)] = \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^{N-m-1} \sum_{k=0}^{N-1} |A_k|^2 e^{j(\theta_{xk}-\theta_{yk})} e^{j\frac{2\pi km}{N}} \end{aligned} \quad (4)$$

基函数的归一化部分互相关函数为:

$$R(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} g[b(n),b(n+m)] = \begin{cases} 1, & m=0 \\ 0, & m \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

根据式(3~5)推导可知: $R(m)=0$,表明基函数具有理想的相关性能。多址通信时,相关性关联着码间串扰,相关系数越大,用户间的码间串扰越大,由于非零互相关的存在会引起多址干扰。因此当以系统误比特率作为多址通信的衡量指标时,应尽可能选取满足多址通信的相关性能优良的序列。本文提出的基于改进型 Logistic 混沌序列扩频编码的 SPC-TDCS 经验证是一种可行的方案。

2 基于扩频编码的 SPC-TDCS 系统及扩频序列选取

2.1 SPC-TDCS 原理

基于扩频编码的 SPC-TDCS,是在传统 TDCS 基础上加入一种性能优良的序列作为扩频序列,将该扩频序列与传统使用 m 序列产生的随机相位矢量按元素逐点相乘来生成扩频随机相位矢量。扩频基函数(Spread Basic Function, SBF)幅度谱矢量产生过程与传统 TDCS 系统相同。SPC-TDCS 系统利用扩频基函数对信号进行调制。其优点是性能优良的扩频序列产生的扩频相位之间正交性强,则与随机相位矢量点乘后相关性增强,不同用户间基函数能够保持较强的正交性。各用户间只需扩频相位不同,而无需给每个用户分配不同的随机相位矢量。使用这种算法所有用户可以采用相同的随机相位矢量,无需对 LFSR 及相位映射器一一配置,满足 TDCS 多址需求,且硬件上降低了复杂度。图 1 为基于扩频编码的 SPC-TDCS 系统原理框图。

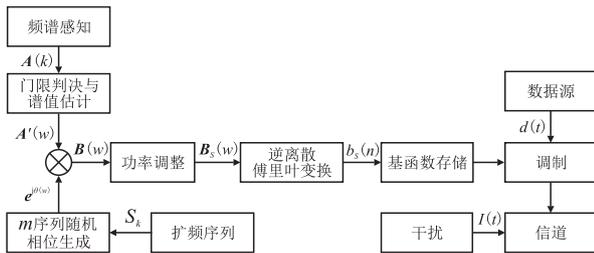


图 1 基于扩频编码的 SPC-TDCS 系统原理框图

Fig.1 Principle diagram of SPC-TDCS based spread encoding

在改进的 SPC-TDCS 系统中,扩频随机相位矢量为:

$$e^{j\theta_s(\omega)} = S e^{j\theta(\omega)} = [s_0 e^{j\theta_0(\omega)}, s_1 e^{j\theta_1(\omega)}, \dots, s_{N-1} e^{j\theta_{N-1}(\omega)}] \quad (6)$$

式中: $s_k \in \{-1, 1\}$, $e^{j\theta_s(\omega)}$ 为通过 m 序列映射得到的随机相位矢量。

其经过 IDFT 变换时域信号形式为:

$$b(n) = \text{IDFT}[B_b(\omega)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} B_b(\omega) e^{j\frac{2\pi kn}{N}} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} C A_k s_k e^{j\frac{2\pi mk}{M}} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (7)$$

自相关函数定义为:

$$R_m = E [b_s(n) b_s(n+m)] = \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^{N-m-1} \sum_{k=0}^{N-1} |A_k|^2 e^{j\theta_s(k)} \quad (8)$$

互相关函数定义为:

$$R_{s_i s_j}(m) = E [b_{s_i}(n) b_{s_j}(n+m)] = \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^{N-m-1} \sum_{k=0}^{N-1} |A_k|^2 e^{j(\theta_{s_i}(k) - \theta_{s_j}(k))} e^{j\frac{2\pi km}{N}} \quad (9)$$

由式(7~8)可知:扩频基函数互相关性能由其扩频随机相位矢量决定,因此选取合适的扩频序列是决定扩频基函数性能的重要标准。

2.2 改进型 Logistic 混沌扩频序列

作为 SPC-TDCS 系统扩频序列,需要具有良好的相关特性。其中,自相关特性越高,抗多径干扰能力越强;互相关性能越高,抗多址干扰能力越强。文献[5]选用 Gold 序列作为扩频序列主要存在 2 个问题:一是 Gold 序列的数量较少,不能满足大量用户的多址通信需要;二是 Gold 序列互相关特性并非最佳,多址应用时会产生相互干扰^[11]。为解决上述问题,本文选用改进型 Logistic 混沌序列作为扩频序列。其具有良好的高斯白噪声特性,并具有理想的自相关和互相关特性,且生成方式简单,通过量化优选后的混沌序列性能优良,可以更好地实现 TDCS 多址接入能力。

混沌序列有单一式结构和复合式结构。单一结构中的典型混沌序列有 Logistic 型、Chebyshev 型以及 Tent 型混沌序列。在扩频通信中每个信息比特所含的扩频序列码段长度是一定的,混沌序列作为扩频序列时就只能截取一段。因此产生序列时,可按照系统最小初始敏感度,选定相当数量的初始值,来产生一定长度的混沌序列^[9]。

单一式混沌序列模型为:

$$x_{n+1} = a_0 + a_1 x_n + a_2 \cos(k_1 \cos^{-1} x_n) + a_3 x_n^2 + a_4 \cos(k_2 \cos^{-1} x_n)^2 \quad (10)$$

式中: $a_0=1, a_3=2, a_1=a_2=a_4=0$ 时改进型 Logistic 混沌序列模型为:

$$x_{n+1} = 1 - 2x_n^2 \quad (11)$$

文献[10]中通过对 Logistic 混沌序列进行研究,表明在混沌模型中,此混沌序列具有更小的互相关值和均方误差。当初值 $x_0=0.23, 0.37$ 或 0.7 时,均方误差分别为 $0.097\ 95, 0.082\ 61$ 和 $0.089\ 51$ 。因此本文在构造扩频序列时,选取 $x_0=0.37$ 产生的改进型 Logistic 混沌序列。

复合式混沌序列是将 2 种或是 2 种以上的单一式结构进行内嵌或采用其他序列与混沌单一序列进行组合形成新的混沌序列。例如四阶 Chebyshev 型嵌入到 Logistic 型混沌序列:

$$x_{n+1} = 1 - 2(\cos(4 \cos^{-1} x_n))^2 \quad (12)$$

由于复合式结构的混沌序列产生复杂,运行时间长导致时延较大,因此选取改进型 Logistic 混沌序列作为 TDCS 的多址序列是一种折中的最优解,本文采用改进型 Logistic 进行扩频序列并进行性能验证。

混沌序列平衡性也是其多址应用的一个重要指

标。平衡性表示如下：

$$E = |M - N| / L \quad (13)$$

式中： M 、 N 分别代表混沌扩频序列中“1”和“0”的个数； L 代表序列长度。改进型 Logistic 混沌序列作为扩频序列的概率分布密度函数为：

$$p(x) = \begin{cases} 1/\pi\sqrt{1-x^2}, & x \in (-1,1) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式(13)表明改进型 Logistic 混沌映射产生的序列服从伯努利(Bernoulli)分布,具有很好的统计特性和平衡稳定性。

3 仿真分析

3.1 类噪声特性验证

TDCS 基函数为复数形式,为了验证使用改进型 Logistic 混沌序列作为扩频序列生成的扩频基函数具有类噪声特性,可以利用 MATLAB 软件 hist-fit 函数绘制高斯白噪声信道模型下的基函数实部以及虚部的分布直方图,观察基函数是否服从类高斯分布。仿真条件设置为:扩频基函数幅度谱矢量由传统 TDCS 方式产生,选取 40% 门限为参考门限。扩频随机相位矢量采用改进型 Logistic 混沌序列与 m 序列点乘形成的序列生成。参数设置如下:选取 8 阶线性移位反馈寄存器产生周期为 255 的 m 序列,设置改进型 Logistic 混沌序列初值为 0.37,经过优选截取长度为 255,对 m 序列产生的随机相位矢量进行相位编码。 m 序列的本原多项式为 $[0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]$,移位寄存器初始状态 $[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]$,连续抽取序列数为 3,间隔序列为 8。仿真结果见图 2、图 3。

从图 2 和图 3 中可以看出,TDCS 扩频基函数的虚部与实部均服从高斯分布且具有相同的方差与均值,具有很好的伪随机特性和类噪声特性,达到很好的隐蔽性效果,因此可以作为 TDCS 多址接入的调制波形。

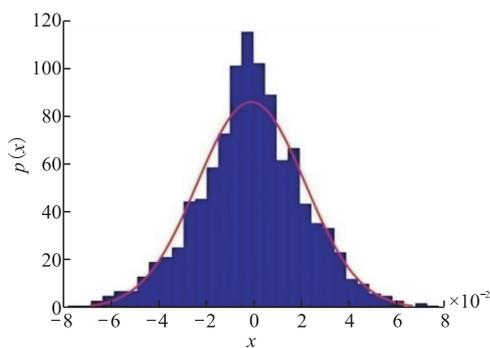


图 2 扩频基函数实部高斯分布直方图

Fig.2 Gaussian distribution histogram of Real-SBF

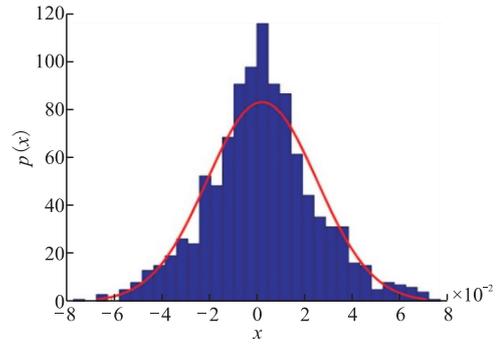


图 3 扩频基函数虚部高斯分布直方图

Fig.3 Gaussian distribution histogram of Ima-SBF

3.2 性能仿真

针对提出的选取改进型 Logistic 混沌序列产生扩频相位矢量, m 序列产生随机相位矢量再进行点乘的方法,对该扩频基函数的随机相位矢量性能进行仿真。仿真中基函数采样点数为 $N = 255$,噪声为高斯白噪声,扩频序列初始值为 0.37,经过优选后依次移入 8 级线性移位寄存器中, m 序列也为 8 级移位寄存器。产生的扩频基函数相关性能见图 4、图 5。

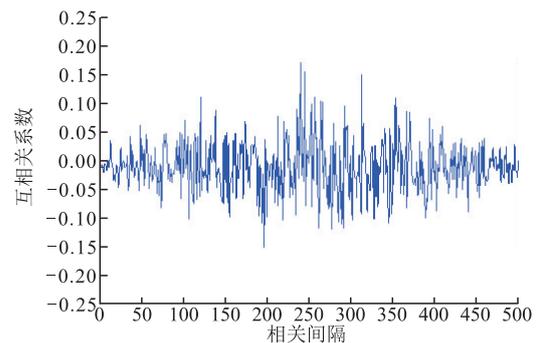


图 4 基于改进型 Logistic 混沌序列的扩频基函数互相关性能

Fig.4 Mutual coherence of SBF-Modified Logistic

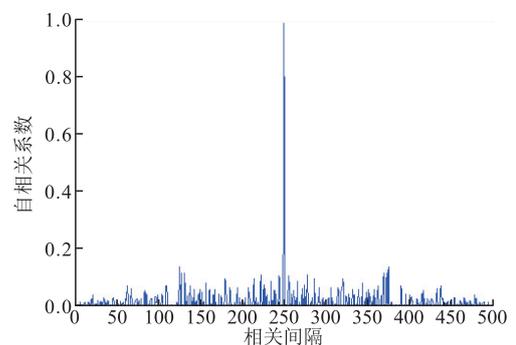


图 5 基于改进型 Logistic 混沌序列的扩频基函数自相关性能

Fig.5 Auto coherence of SBF-Modified Logistic

将本文提出的扩频基函数性能与文献[5]选取的基于 Gold 序列的扩频基函数性能进行仿真对比,基于 Gold 序列的扩频基函数相关性能见图 6、图 7。

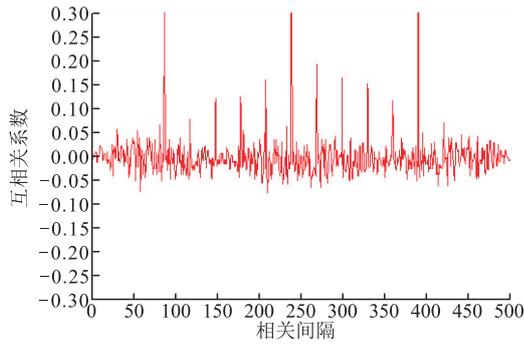


图 6 基于 Gold 序列的扩频基函数互相关性能

Fig.6 Mutual coherence of SBF-Gold

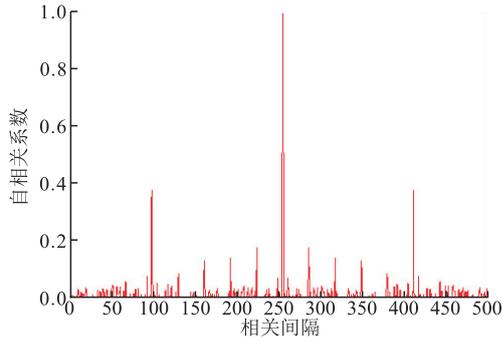


图 7 基于 Gold 序列的扩频基函数自相关性能

Fig.7 Auto coherence of SBF-Gold

在 TDCS 多址系统中某个用户所受到的多址干扰主要取决于该用户与系统中其他用户的部分互相关函数平方和。图 6 所示的使用基于改进型 Logistic 混沌序列生成的扩频基函数互相关值以 0 为水平线上下浮动不明显,具有良好正交性,图 7 所示的基于 Gold 序列生成的扩频基函数互相关值浮动较大,且有明显多处“尖峰”,造成某用户与系统中其他用户的部分互相关函数平方和较大,产生较大的误码率。结果表明本文提出的基于改进型 Logistic 混沌序列生成的扩频基函数性能明显优于基于 Gold 序列生成的扩频基函数,具有更好的多址接入能力,改进型 Logistic 混沌序列成为 TDCS 多址应用的优良扩频序列。

3.3 扩频基函数与传统基函数多址误码性能比较

由上述仿真可知,使用改进型 Logistic 混沌序列生成的扩频基函数具有良好的类噪声性能,为进一步确定其在多址环境下的有效性,比较在不同的信噪比条件下,传统基函数与改进基函数的相关性导致的多用户多址误码性能差异,并通过误码率来体现相关性能对多址可靠性的影响,实验选取信噪比范围为 1~10 dB,调制方式为双极性调制,对在无干扰条件的理论值与有 2 处任意位置单音干扰条件下扩频基函数与传统基函数的多址能力进行比较验证,比较结果见图 8。

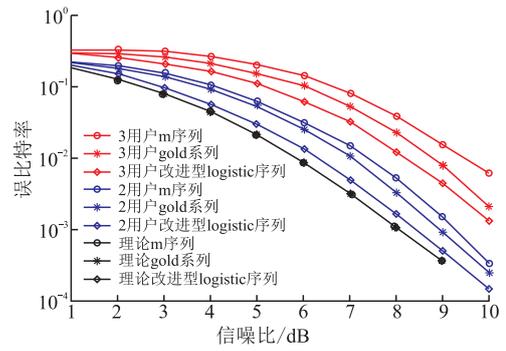


图 8 扩频基函数与传统基函数的多址能力比较

Fig.8 Multiple access comparison of traditional basic function with SBF

由图 8 可知,随着信噪比的增大,误比特率曲线均呈下降趋势。信噪比越高,系统抗干扰性能越好。在不存在人为干扰的理想条件下,不管采用何种基函数,其传输性能都是相同的;在 2 用户通信时,由于基函数本身的相关性能影响,传输质量受到影响,导致了误码率加大;在 2 用户、信噪比为 5 dB 条件下,基于改进型 Logistic 混沌序列生成的扩频基函数误比特率为 0.46×10^{-1} ,基于 Gold 序列生成的扩频基函数误比特率为 0.72×10^{-1} ,m 序列基函数误比特率高达 0.81×10^{-1} ;由此可验证扩频基函数抗干扰性能优于传统基函数。

由于多用户通信对基函数相关性能的影响,3 种序列的多用户误比特率均比单用户误比特率高,但改进型 Logistic 混沌序列多用户性能最优。在信噪比为 8 dB 时,基于改进型 Logistic 混沌序列的扩频基函数相对传统基函数误比特率明显减小,相对基于 Gold 序列的扩频基函数误比特率减小了 36%。实验数据可以证明,基于改进型 Logistic 混沌序列生成的扩频基函数具有优良的多址性能,满足 TDCS 无线系统要求。

4 结语

本文提出了基于改进型 Logistic 混沌序列作为扩频序列的 SPC-TDCS,验证了改进型 Logistic 混沌扩频序列的行互(自)相关性,仿真分析了扩频基函数的多址能力。实验结果表明,扩频基函数具有更好的随机性,生成的扩频随机相位矢量具有更好的正交性,多用户通信误比特率更低,保证了多址通信的要求,提高了抗干扰特性。

参考文献(References):

[1] RADCLIFFE Rodney A. Design and Simulation of a Transform Domain Communication System [D].Ohio: Air Force Institute of Technology,1996.

- [2] BERLEMANN L, MANGOLD S. Cognitive Radio and Dynamic Spectrum Access [M]. New Jersey: John Wiley and Sons, 2009.
- [3] MEXTORF Henning, KNöCHEL Reinhard. Simultaneous Measurement of Multiple Impulse Responses with A Single Receiver[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Seattle, WA: IEEE, 2013: 1-3.
- [4] SUN Haixin, BI Guoan, GUAN Yongliang, et al. Novel Pseudorandom Phase Generation in Transform Domain Communication Systems[C]//Proceeding of International Conference on Innovation in Information Technology. Abu Dhabi: IEEE, 2011: 18-22.
- [5] 孙海欣, 石要武, 于晓辉. 基于扩频相位编码的变换域通信系统多址接入能力[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(1): 223-228.
SUN Haixin, SHI Yaowu, YU Xiaohui. Multiple Access Capability for Spread Coding Based Transform Domain Communication Systems[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013, 43(1): 223-228. (in Chinese)
- [6] SU Hu. TDCS-Based Cognitive Radio Networks with Multiuser Interference Avoidance [J]. IEEE Transaction on Communication, 2013, 61(12): 18-22.
- [7] 张琪, 郑君里, 简相超. 采用混沌扩频序列的异步码分多址通信系统仿真[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(7): 901-904.
ZHANG Qi, ZHENG Junli, JIAN Xiangchao. A-CDMA System Simulation with Chaotic Spreading Sequences[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2002, 42(7): 901-904. (in Chinese)
- [8] 史军, 迟勇钢, 张乃通. 变换域通信系统: 原理、技术与发展趋势[J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2009, 29(1): 87-94.
SHI Jun, CHI Yonggang, ZHANG Naitong. Principle Technology and Tendency of Transform Domain Communication System[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2009, 29(1): 87-94. (in Chinese)
- [9] 余振标, 冯久超. 一种混沌扩频序列的产生方法及其优选算[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1409-1415.
YU Zhenbiao, FENG Jiuchao. A Method for Generating Chaotic Spread-Spectrum Sequences and Their Optimized Selection Algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3): 1409-1415. (in Chinese)
- [10] 凌聪, 孙庆庚. Logistic映射扩频序列相关分布[J]. 电子学报, 1999, 27(1): 140-141.
LING Cong, SUN Qingeng. Correlative Distribution of Logistic Map Spreading Sequences[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(1): 140-141. (in Chinese)
- [11] 任清华, 李正刚. 变换域通信系统及抗干扰性能仿真[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(2): 86-90.
REN Qinghua, LI Zhenggang. Transform Domain Communication System and Anti-Jamming Performance Simulation [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2009, 10(2): 86-90. (in Chinese)
- [12] 何智青. 变换域通信系统设计、建模与仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
HE Zhiqing. The Transform Domain Communication System Design, Modeling and Simulations [D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2003. (in Chinese)
- [13] 谢铁城, 达新宇, 褚振勇, 等. 采用时频分析的变换域通信系统基函数设计[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(6): 42-47.
XIE Tiecheng, DA Xinyu, CHU Zhenyong, et al. Design of Basis Function in Transform Domain Communication System Using Time-Frequency Analysis Technique[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(6): 42-47. (in Chinese)
- [14] 王舒, 达新宇, 褚振勇, 等. 一种新的 TDCS 基函数随机相位产生方法及性能分析[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2014, 12(01): 12-16.
WANG Shu, DA Xinyu, CHU Zhenyong, et al. A New Method of Pseudorandom Phase Generation of Basis Function in TDCS and Its Performance Analysis[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2014, 12(1): 12-16. (in Chinese)
- [15] BEARD T W, TEMPLE M A, MILLER J O, et al. Using Genetic Algorithms for Spectrally Modulated Spectrally Encoded Waveform Design [C]//International Waveform Diversity and Design Conference. Pisa, Italy: IEEE, 2007: 265-269.
- [16] YANG Zeyi, TAO Ran, WANG Yue, et al. A Novel Multi-Carrier Order Division Multi-Access Communication System Based on TDCS with Fractional Fourier Transform Scheme [J]. Wireless Personal Communications, 2014, 79(2): 1301-1320.
- [17] 李正刚, 任清华, 赵峰. 频谱编码、频谱调制及其在变换域通信中的应用[J]. 通信技术, 2013, 41(11): 4-5, 53-54.
LI Zhenggang, REN Qinghua, ZHAO Feng. Application of Spectrally Modulation, Spectrally Encoded Theory in Transform Domain Communication System [J]. Communications Technology, 2013, 41(11): 4-5, 53-54. (in Chinese)
- [18] HU S, GUAN Y L, BI G, et al. Improved Spectrum Efficiency for Transform Domain Communication System[C]//Wireless and Optical Communication Conference. Chongqing: IEEE, 2013: 18-22.

(编辑: 徐楠楠)