

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.03.007

基于混沌映射的差分跳频频率编码^{*}

张毅^{**}, 姚富强

(南京电讯技术研究所, 南京 210007)

摘 要:针对差分跳频系统频率编码及跳频序列的设计问题,提出利用混沌映射构造差分频率编码,并分析了其频率状态转移的 Markov 性和编译码特点。最后检验了基于混沌映射的差分跳频频率编码的统计性能,结果表明,其产生的跳频序列具有较好的均匀性和随机性,不失为一种具有较高线性复杂度的有效的差分跳频转移函数。

关键词:跳频通信;差分跳频;混沌映射;频率编码

中图分类号:TN914.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)03-0265-04

Frequency Encode Based on Chaos Mapping in Differential Frequency-Hopping

ZHANG Yi, YAO Fu-qiang

(Nanjing Telecommunication Technology Institute, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to design frequency encode and frequency-hopping(FH) sequence in differential frequency-hopping(DFH) system, a differential frequency encode based on chaos mapping is provided, and Markov character of frequency state transfer in frequency encode is analyzed. The statistical results show that the frequency-hopping sequences driven by chaos differential frequency encode have better uniformity and randomness, which is effective to construct DFH transfer function with higher linear complexity.

Key words: frequency-hopping communications; differential FH; chaos mapping; frequency encode

1 引 言

美国 Sanders 公司研制的相关跳频增强型扩谱(Correlated Hopping Enhanced Spread Spectrum, CHES)电台突破了短波频段数据传输速率较低的局面,同时具有一定的抗干扰能力^[1-2],因此成为了当前短波高速数据抗干扰电台的典型代表和研究热点^[3-5]。CHES 的核心设计思想是差分跳频(Differential Frequency Hopping, DFH),在发送端,系统的当前发射频率 f_N 由当前的数据信息 D_N 和之前的发射频率 f_{N-1} 经过特定的映射确定,该映射称之为转移函数;在检测端,为了恢复数据,需要进行转移函数的逆过程,即由前后相邻的工作频率得到数据信息

D_N 。DFH 不需调制,数据信息由前后两个相关的跳频频率携带,数据码元 D_N 的比特数即为每跳携带的比特数(bit per hop, BPH),通过改变跳速和 BPH,即可获得不同的数据速率。

转移函数的设计是差分跳频的关键技术之一。从转移函数的特性和作用看,可将差分跳频的转移函数看作一种广义的频率编码,其自身具有潜在的纠错能力,与一般编码不同之处在于这种编码由信息码元和系统跳频频率共同参与,同时跳频序列必须满足特定的条件,因此在一定程度上增加了编译码设计的难度和复杂性。文献[3-5]针对转移函数作了较为深入的研究,其目标是构造出具有良好统计特性的跳频序列,但是其构造的转移函数不足之处在于线性复杂度不高,抗破译能力不强,在实际工

^{*} 收稿日期:2012-09-07;修回日期:2012-11-28 Received date:2012-09-07;Revised date:2012-11-28

^{**} 通讯作者: yee_aksu@163.com Corresponding author: yee_aksu@163.com

程应用中受到一定的限制。针对这一问题,本文提出一种基于混沌映射的差分频率编码方案,期望利用混沌系统的随机性和对初值的敏感性来构造具有较好统计性能的差分跳频码序列,与此时也具有较高的线性复杂度。

2 混沌差分频率编码模型

混沌系统最显著的优点在于确知系统表现出的随机行为,而且对初值具有高度的敏感性^[6],已被成功地用于信源编码、保密通信及信号检测等领域。在 20 世纪 90 年代中后期开始陆续出现混沌系统在扩展频谱中的应用研究,文献[7]研究了混沌系统在直接序列扩展频谱通信系统中的应用,文献[8-9]研究了混沌跳频码序列。研究表明^[8],混沌系统产生的跳频码序列具有较高的复杂度和较好的随机性,更为重要的是混沌跳频码序列具有码族多、产生速度快、抗破译性能好等优点,是跳频码序列设计的一种优选方案,特别是在军事通信中具有十分重要的应用价值。为了获得线性复杂度高的跳频序列,在文献[3]简单映射基础上引入混沌映射,构成基于混沌映射的差分跳频频率编码,其模型如图 1 所示。

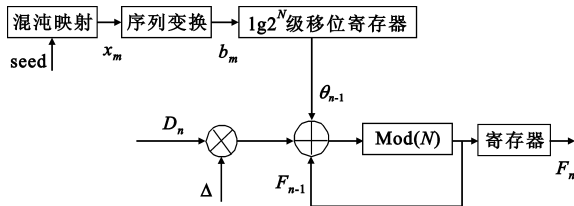


图 1 基于混沌映射的差分跳频频率编码
Fig.1 Frequency encode based on chaos mapping in the differential frequency-hopping

图 1 中, x_m 是混沌映射轨道点, seed 是混沌映射的初始值, 序列变换完成混沌实值序列(即 $x_m \in [0,1]$)到混沌二进制序列 b_m 的转换, 移位寄存器完成二进制混沌序列的串并变换并完成二进制数到十进制数的转换。 θ_n 的前一状态值 θ_{n-1} 与简单差分频率编码相加再取模完成差分频率编码:

$$F_n = (F_{n-1} + \Delta * D_n + \theta_{n-1}) \mid N \tag{1}$$

这里假定系统跳频频率数为 N , 频率号集合 $F_N = \{0,1,2,\cdots,N-1\}$, F_n 表示差分频率编码后的频率号, F_{n-1} 表示差分频率编码前的频率号, D_n 表示当前数据码元, Δ 为编码相对偏移量, 是小于 N 的自然数, $\mid$ 为取模运算, θ_n 为 $\lg 2^N$ 位二进制数, 且 $\theta_n \in F_N$ 。

不失一般性, 采用的混沌映射为较常见的一种 Logistic 映射^[6]:

$$x_n = 4x_{n-1}(1 - x_{n-1}), x \in [0,1] \tag{2}$$

式中, x_n 为映射结果, x_{n-1} 为映射迭代变量。其轨道点分布的概率密度为

$$\rho(x) = \frac{1}{\pi \sqrt{x(1-x)}}, x \in [0,1] \tag{3}$$

上式表示的轨道点概率密度曲线如图 2 所示。

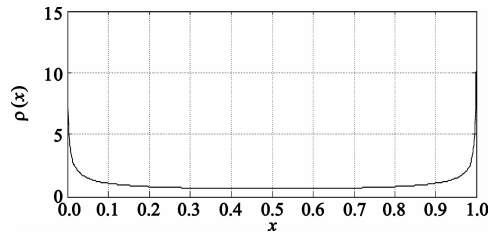


图 2 Logistic 映射的轨道点概率密度
Fig.2 Orbit probability density of Logistic map

由式(1)、图 2 可知, 该混沌映射的轨道点分布关于 $x=0.5$ 偶对称, 因此序列变换采用文献[10]的二进制混沌序列的产生方法, 选取 $\sigma_c = 0.5$ 作为门限可得到

$$b_m = \begin{cases} 0, & x_m \geq 0.5 \\ 1, & x_m < 0.5 \end{cases} \tag{4}$$

文献[7-8]已经证明了这类方法产生的二进制序列具有良好的随机性和较高的复杂度。

3 频率编码的 Markov 性

如果将 N 个频点看作 N 个状态, 组成频率状态空间集合 F_N , 那么差分跳频系统频率转移过程就可以看成是从一个状态转移到另一个状态的随机过程。令 F_n 为第 n 跳系统的频率号, 那么按照式(1), 有

$$P(F_n = j \mid F_{n-1} = i, F_{n-2} = h, \cdots, F_{n-m} = g) = P(F_n = j \mid F_{n-1} = i) \tag{5}$$

差分跳频系统的这一特点符合 Markov 链的定义, 其中式(5)即为系统的 Markov 性(或无后效性)。

根据差分频率编码构成可知 Markov 链的一步转移概率为

$$P(F_{i+1} = n \mid F_i = m) \in \begin{cases} \{0\}, & \text{按照转移规则不可能由频率号 } m \text{ 转移到 } n \\ [\frac{1}{2^{BPH}}, \frac{1}{N}], & \text{按照转移规则可能由频率号 } m \text{ 转移到 } n \end{cases} \tag{6}$$

其中, m 为当前频率号, n 为下一跳频率号。

这里, 将式(6)称为频率号 m 的扇出概率, 差分跳频频率编码方案决定了扇出概率的大小及分布特性。

对于文献[3]中简单差分跳频频率编码方案, 任

意频率号的扇出概率为

$$P(F_{i+1}=n_1|F_i=m)=\frac{1}{2^{BPH}} \tag{7}$$

$$P(F_{i+1}=n_2|F_i=m)=0 \tag{8}$$

其中, m 为当前频率号, n_1 为在该频率编码规则下可能由频率号 m 转移来的频率号之一, n_2 反之。对于任意频率号 m , 有 $N-2^{BPH}$ 个扇出概率为 0, 其他 2^{BPH} 个扇出概率均为 $1/2^{BPH}$, 由这种转移特性可以推断, 即使跳频图案具有较好的一维等分布特性, 其二维连续性分布也难以具有较好的性能, 这一特性在文献[3]中得到印证。

然而, 对于混沌差分频率编码, 假设数据码元具有理想的随机性, 由式(1)可知系统构成的 Markov 链的扇出概率和一步转移概率均为

$$P(F_{i+1}=n|F_i=m)=\frac{1}{N}, n,m\in F_N \tag{9}$$

此 Markov 链为齐次 Markov 链, 而且其平稳分布 π 为

$$\pi=\{\pi_1,\pi_2,\pi_3,\cdots,\pi_N\}=\left\{\frac{1}{N},\frac{1}{N},\frac{1}{N},\cdots,\frac{1}{N}\right\} \tag{10}$$

式中, π_i 为 i 号频率的平稳分布。混沌差分频率编码生成跳频序列的统计特性将在下一节分析。

比较这两种频率编码方案的扇出概率不难发现, 简单差分跳频频率编码较后者的频率转移具有更大的冗余度, 即在已知当前频率的条件下, 有 $N-2^{BPH}$ 个频率是冗余的, 属于非法路径, 即使这些频点存在干扰, 按照扇出概率, 这些频点也不应对译码器造成影响。反之, 混沌差分频率编码可能从当前频率转移到频率集中的任何一个频点, 它不具有冗余性, 任何频点出现干扰均会对译码器造成严重影响, 很明显, 与简单的频率编码相比, 由于频率译码空间增加, 造成频率译码的性能和抗干扰能力恶化。然而, 如果将 θ_n 也当作频率状态集中的频率号样本, 令 $F'_n=F_n+\theta_n$, 考察 F'_n 与 F_{n+1} 的关系, 那么此时系统在 n 时刻的 $F'_n=m$ 的扇出概率和一步转移概率为

$$P(F_{k+1}=n_1|F'_n=m)=\frac{1}{2^{BPH}} \tag{11}$$

$$P(F_{k+1}=n_2|F'_n=m)=0 \tag{12}$$

式中, 各变量的含义类同式(7)、(8)。

显然, 在已知当前混沌系统状态频率 θ_n 的条件下, 基于混沌映射的差分频率编码也有 $N-2^{BPH}$ 个频率是不合法的转移路径, 当混沌系统同步时, 通过已知的混沌状态与跳频频率之间的关系, 也可以有效缩小频率译码空间, 提高系统的抗干扰能力和多

址性能。

4 统计性能分析

为了便于比较, 这里采用与文献[3]相同的检验条件, 即假设跳频频点数 $N=64$, 跳频码序列长度 $L=16\,384$, 分别考察 BPH 为 1、2、3、6, 编码绝对偏移量 Δ 为 1、15、21、32 时的跳频码序列均匀性、随机性检验。表 1、表 2 分别为一维均匀性与二维连续性的 χ^2 分布拟合检验结果, χ^2 检验的显著性水平 $\alpha=0.05$ 。需要说明的是, 在所有进行混沌差分频率编码过程中, 混沌映射选取不同的初始值(吸引子 0、1 除外), 拟合检验和随机性检验结论一致。

表 1 混沌差分频率编码的一维等分布拟合检验

Table 1 1D uniform distribution test of frequency encode based on chaos mapping						
绝对偏移量 Δ	χ^2	拟合检验结果				
	理论值	$BPH=1$	$BPH=2$	$BPH=3$	$BPH=6$	
1	82.244 7	66.195 3	53.835 9	48.601 6	66.570 3	
15	82.244 7	47.304 7	49.898 4	70.585 9	65.250 0	
21	82.244 7	57.187 5	72.828 1	46.531 3	58.085 9	
32	82.244 7	67.429 7	68.968 8	74.492 2	58.898 4	

表 2 混沌差分频率编码的二维连续性拟合检验

Table 2 2D continuous distribution test of frequency encode based on chaos mapping						
绝对偏移量 Δ	χ^2	拟合检验结果				
	理论值	$BPH=1$	$BPH=2$	$BPH=3$	$BPH=6$	
1	4 244.714 2	$4.037\,3\times 10^3$	$4.055\,3\times 10^3$	$4.121\,8\times 10^3$	$3.942\,3\times 10^3$	
15	4 244.714 2	$4.109\,8\times 10^3$	$4.009\,8\times 10^3$	$4.029\,3\times 10^3$	$4.016\,3\times 10^3$	
21	4 244.714 2	$4.010\,3\times 10^3$	$4.032\,8\times 10^3$	$3.906\,3\times 10^3$	$4.135\,8\times 10^3$	
32	4 244.714 2	$4.142\,8\times 10^3$	$4.125\,8\times 10^3$	$4.119\,3\times 10^3$	$4.054\,3\times 10^3$	

由于所有检验数据的功率谱都比较相似, 因此这里仅给出 $BPH=2$ 、 $\Delta=1$ 时混沌差分频率编码所产生的功率谱, 如图 3 所示。

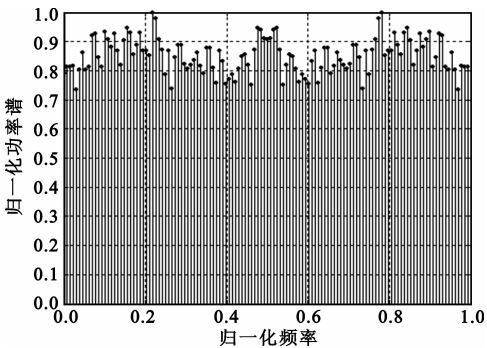


图 3 混沌频率编码跳频码序列的功率谱
Fig.3 Frequency sequence power spectrum of frequency encode based on chaos mapping

由以上分析和检验结果,可以得出关于混沌差分频率编码的几点结论。

(1)由表 1 知,所有一维检验数据的 χ^2 计算值都小于指定水平 0.05 下的理论值 $\chi_{0.05}^2(N-1)$,因此混沌差分跳频码序列具有较好的一维分布。同时,编码绝对偏移量和 BPH 对混沌差分跳频码序列的一维均匀性基本没有影响。

(2)由表 2 知,所有二维检验数据的 χ^2 计算值都小于指定水平 0.05 下的理论值 $\chi_{0.05}^2(N-1)$,因此混沌差分跳频码序列也具有较好的二维连续性。编码绝对偏移量对混沌差分跳频码序列的二维连续性也基本没有影响,这与文献[3]中差分频率编码跳频码序列二维连续性随 BPH 增大逐渐变好的特点明显不同。

(3)与文献[3]简单频率编码不同,混沌差分频率编码产生的跳频码序列较好的均匀性和随机性并不需要以 BPH 值的增大获得,同时混沌差分频率译码在混沌系统同步时,通过已知的混沌状态与跳频频率之间的关系,频率编码可以为频率译码提供辅助判决信息,有效缩小频率译码空间,提高系统的抗干扰能力和多址性能。

5 结束语

差分跳频的实质是频率编码,高性能的频率编码不仅是实现差分跳频的关键,对系统的抗干扰能力和组网能力等也有重要的影响。混沌差分频率编码产生的跳频码序列具有较好的均匀性和随机性,混沌映射的映射函数、编码规则、初始条件以及数据流共同确定一个任意长度的跳频码序列,攻击者只要不知道映射函数、初始条件、编码规则中任何一个参数都无法预测该序列,具有较强的低截获性能。因此,混沌差分频率编码不失为一种有效的差分跳频转移函数。

参考文献:

- [1] Herrick D L, Lee P K. CHESS - A New Reliable High Speed HF Radio[C]//Proceedings of 1996 IEEE Military Communication Conference. McLean, VA: IEEE, 1996: 684 - 690.
- [2] Perry B D. A new wideband HF technique for MHz-Bandwidth spread-spectrum radio communications[J]. IEEE Communications Magazine, 1983, 21(6): 28 - 36.
- [3] 姚富强, 刘忠英. 短波高速跳频 CHESS 电台 G 函数算法研究[J]. 电子学报, 2001, 29(5): 664 - 667.
YAO Fu-qiang, LIU Zhong-ying. The study of G function arithmetic of a HF high speed FH CHESS radio[J]. Atta

Electronica Sinica, 2001, 29(5): 664 - 667. (in Chinese)

- [4] 杨裕亮, 何遵文, 匡镜明. 差分跳频系统的转移函数研究[J]. 通信学报, 2002, 23(4): 103 - 108.
YANG Yu-liang, HE Zun-wen, KUANG Jing-ming. Research on the transition function of differential frequency hopping[J]. Journal on Communications, 2002, 23(4): 103 - 108. (in Chinese)
- [5] 董彬虹, 唐诚, 李少谦. 基于状态网格图的差分跳频 G 函数构造方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(4): 497 - 500.
DONG Bin-hong, TANG Cheng, LI Shao-qian. Research of G-Function Constructing Method for DFH System Based on State Trellis Diagram[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(4): 497 - 500. (in Chinese)
- [6] Edward O. Chaos in Dynamical Systems[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [7] Heidari-Bateni G, McGillem C D. A Chaotic Direct-Sequence Spread-Spectrum Communication System[J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, COM-42(2/3/4): 1524 - 1527.
- [8] Cong L, Songgeng S. Chaotic Frequency Hopping Sequences[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, COM-46(11): 1433 - 1437.
- [9] Cong L, W Xiaofu. Design and Realization of an FPGA-Based Generator for Chaotic Frequency Hopping Sequence[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 2001, 48(5): 521 - 532.
- [10] Kohda T, Tsuneda A. Pseudonoise Sequences by Chaotic Non-linear Maps and Their Correlation Properties[J]. IEICE Transactions on Communications, 1993, E76-B(8): 855 - 862.
- [11] Kohda T, Tsuneda A. Statistics of chaotic binary sequences[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1997, IT-43(1): 104 - 112.

作者简介:



张毅(1974—),男,四川梓潼人,2006 年于解放军理工大学获军事通信学博士学位,现为南京电讯技术研究所高级工程师,主要研究方向为无线通信、数字信号处理等;

ZHANG Yi was born in Zitong, Sichuan Province, in 1974. He received the Ph. D. degree in Electrical Engineering from PLA University of Science and Technology in 2006. He is now a senior engineer. His research interests include wireless communications and digital signal processing.

Email: yee_aksu@163.com

姚富强(1957—),男,安徽枞阳人,1993 年于西安电子科技大学获工学博士学位,现为首席研究员,主要研究方向为通信抗干扰技术、电磁频谱管理等。

YAO Fu-qiang was born in Zongyang, Anhui Province, in 1957. He received the Ph. D. degree in Electrical Engineering from Xidian University in 1993. He is now a chief researcher. His research interests include spread spectrum communications and spectrum management.