

一种基于差分跳频转移函数的短波跳频码

甘良才 吴双元

(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

摘 要: 该文提出了一种基于 Logistic 映射的短波差分跳频转移函数算法, 利用该算法构造跳频图案, 并对跳频图案进行了数值仿真和性能检验。研究表明: 该算法所产生的跳频图案不仅具有较好的随机性、均匀性、平衡性和相关特性, 符合短波跳频图案要求, 而且, 具有大的线性复杂度, 因此, 基于混沌映射构造的短波跳频序列具有较强的抗干扰能力和安全保密性。

关键词: 短波, 差分跳频, 跳频序列, 混沌

中图分类号: TN914.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)02-0218-03

A Kind of Shortwave Frequency Hopping Code Based on DFH Transform Function

Gan Liang-cai Wu Shuang-yuan

(Institute of Electrolitics Informaton, WuhanUniversity, Wuhan 430079, China)

Abstract A new shortwave frequency hopping codes based on difference frequency hopping transform function which depended on logistic map is presented. The performance of the frequency hopping codes is researched .The results indicate that it has better randomness, uniformity, balance, and higher privacy because of the character of chaos.

Key words Shortwave, Difference Frequency Hopping, Frequency hopping sequences, Chaotic

1 引言

1995 年 2 月美国的 Signal 杂志报道了美国 Sanders 公司成功研制了 CHESS(Correlated Hopping Enhanced Spread Spectrum)^[1]系统, 它以先进的 DSP 技术为基础, 采用的是差分跳频(DFH)体制。而差分跳频的核心技术, 可归结为一种转移函数算法。但由于该转移函数算法集跳频图案、信息调制与解调于一体, 因此寻求性能优良的转移函数算法是研究这种新型跳频体制需要解决的关键技术之一。

DFH 的基本原理: 当前时刻的频率值 F_n 由上一跳的频率值 F_{n-1} 和当前时刻的信息符号 X_n 决定, 其数学表达式为

$$F_n = T(X_n, F_{n-1}) \quad (1)$$

其模型如图 1 所示。

图 1 中的转移函数是一个特定的函数, 它决定差分跳频的算法。从图中可见: 相邻跳变频率之间通过传输的数据序列 X_n 建立了一定的相关性, 即相邻频率的相关性携带了待发送的数据信息, X_n 可取 $1 \sim N$ 。在发送端, 通过频率和数据序列的相关编码, 从频率集中映射出要发送的频率。在接收端进行信号检测时, 再根据转移函数的逆函数进行信息的解调, 获取所需信息。

2 Logistic 映射的混沌特性

离散 Logistic 映射的动力学系统定义为^[2]

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

式中 u 是参数, x_n 是状态。

安排 f 将当前值 x_n 映射到下一个值 x_{n+1} , 以初值 x_1 迭代就可得到一个序列 $\{x_n: n=1,2,3,\dots\}$, 选择 u 值在 $[0,2]$ 区间内, 则式(2)将是 $I=[-1, 1]$ 到它本身的一个非线性映射, 且随 u 逐渐增大时呈现多次突变。研究表明: 当 $0 < u < 0.75$ 时, 迭代为稳定的 1 周期; 当 u 值达到 0.75 时, 迭代出现两点周期分岔; 当 u 值达到 1.25 时, 迭代出现四点周期分岔。这种 2^n 倍周期分岔随着 u 值的增大愈来愈快, 当 $u=1.4012$ 时, 迅速达到周期 $N \rightarrow \infty$, 即进入混沌状态。显然, Logistic 映射的混沌序列具有良好的随机性, 它的周期为无穷大, 对初值十分敏感, 即使初值存在微小差别, 随着迭代的进行也会不断地被放大, 随机性增强, 以至最后无法辨认。但只要每次所选取的模型、参数、初值一致, 混沌序列就会重现。

3 基于 Logistic 映射混沌短波跳频码的产生^[3-7]

差分跳频的关键是利用前后频率的相关性来携带信息,

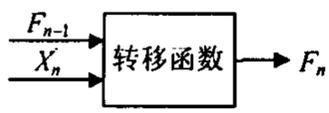


图1 差分跳频转移函数框图

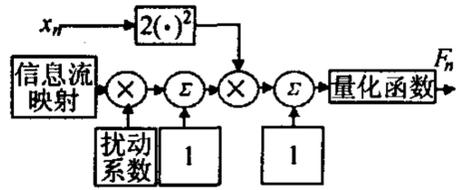


图2 跳频码产生的框图

同时要求所产生的跳频序列具有较好的均匀性和随机性。当 $u=2$ 时，式(2)称为 Logistic 满映射，即

$$x_{n+1} = f(x_n) = 1 - 2x_n^2, \quad x_n \in [-1, 1] \quad (3)$$

其轨道点的概率密度为

$$\rho(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{1-x^2}}, \quad x \in [-1, 1] \quad (4)$$

[0,1]上均匀分布的帐篷映射为

$$\theta_{n+1} = T(\theta_n) = \begin{cases} 2\theta_n, & 0 \leq \theta_n \leq 1/2 \\ 2(1-\theta_n), & 1/2 \leq \theta_n \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

显然它们是拓扑共轭的，即借助于一个连续可逆的函数 $x = -\cos(\pi\theta)$ ，使两者可以相互转换， $f(x)$ 的轨道经共轭变换后即成为 $T(\theta)$ 的轨道。

根据转移函数的要求，本文通过先映射信息数据，然后对 Logistic 满映射进行扰动，并结合 Logistic 映射与帐篷映射的共轭特性，提出了一种短波跳频码的产生方法，其原理框图如图 2 所示。由图 2 构造的跳频图案，其步骤如下：

第 1 步 确立扰动方程：

$$x_{n+1} = f(x_n) = 1 - 2x_n^2(1 + MI) \quad (6)$$

式中 M 为扰动系数， I 为信息数据映射后的值。欲使由式(6)所构造的序列具有混沌特性，由 Logistic 映射特性分析可知，当

$$1.41 < 2(1 + MI) \leq 2 \quad (7)$$

才能满足条件。

第 2 步 跳频序列的产生 欲产生频率数为 q 的跳频序列 $F = (F_0, F_1, F_2, \dots, F_{N-1})$ ，其中 N 为任意的序列长度， F_n 在整数集合 $\{1, 2, 3, \dots, q\}$ 中取值，分别代表频率 $\{f_1, f_2, f_3, \dots, f_q\}$ 。按文献[3]中第 2 部分提出的分割和量化方法，产生跳频序列。当给 x_n 不同的初始值，便可产生不同的跳频序列，显然，利用混沌序列对初值的极端敏感性，便可产生大量的跳频序列。

4 数值仿真结果及性能分析

采用 Matlab 对图 2 的差分跳频转移函数算法进行数值仿真。以每跳传 2bit 为例，取扰动系数为 $M=0.0001$ 。为使所产生的跳频序列具有混沌特性，信息流映射后的 I 值要满足式(7)，即要求满足 $-0.295 < MI \leq 0$ ，这里， I 取非正值。其映射关系为 $00 \rightarrow -4, 01 \rightarrow -2, 10 \rightarrow -1, 11 \rightarrow 0$ ，序列长度为

$N=2048$ ，由此产生的混沌跳频序列如图 3 所示。

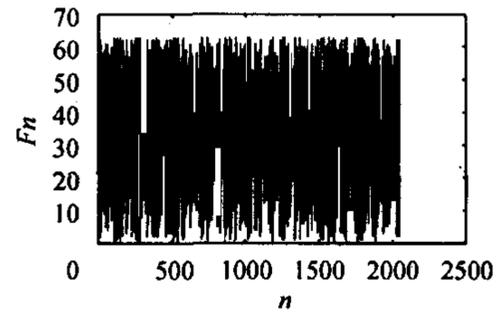


图3 短波跳频序列

对于短波跳频通信系统而言，其跳频码的周期、相关性、平衡性、随机性、线性复杂度均是重要的性能参数^[8]。实验表明：当用具有随机性的信息流对混沌序列进行扰动后，其序列周期趋于无穷大。下面将对采用本文的方法所构造的短波跳频码 ($N=2048, q=64$) 的性能进行理论分析。

4.1 混沌序列的自相关性

$$R(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x}) = \int_{-1}^1 x f^\tau(x) \rho(x) dx - \bar{x}^2 = \begin{cases} 0.5, & \tau = 0 \\ 0, & \tau \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

采用本文方法产生的混沌序列，其仿真结果如图 4 所示。从图中可见，实验结果值与理论近似值相符，混沌序列具有较好的自相关特性。

4.2 混沌序列的互相关性

$$C(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_{1i} - \bar{x})(x_{2(i+\tau)} - \bar{x}) = \int_{-1}^1 x_1 f^\tau(x_2) \rho(x_1) \rho(x_2) dx_1 dx_2 - \bar{x}^2 = 0 \quad (9)$$

式中 $f^\tau(x) = \underbrace{f(\dots f(x)\dots)}_\tau$ ， $f(x)$ 为映射函数， $\rho(x)$ 为概率密度函数， \bar{x} 为均值。采用本文方法产生的混沌序列，对其互相关值仿真的结果如图 5 所示。从图中可见，其互相关值大约在 -0.02 和 $+0.02$ 之间，接近理论计算值，具有较好的互相关特性。

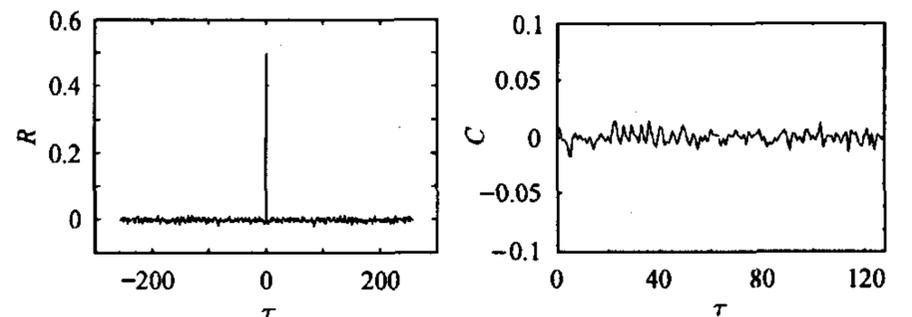


图4 混沌序列自相关值

图5 混沌序列的互相关值

4.3 跳频序列汉明相关性

跳频通信要求跳频序列具有良好的周期汉明相关性能。跳频通信中，频隙集合 $GF(q)$ 上长度为 N 的两个跳频序列 X 和 Y ，其相对时延为 τ 的周期汉明相关为^[9]

$$H_{XY}(\tau) = \sum_{i=0}^{N-1} h[x(i), y(i+\tau)], \quad 0 \leq \tau \leq N-1 \quad (10)$$

式中 $i+\tau$ 取模 N 运算, $x(i)$ 为序列 X 中第 i 时刻的值, $y(i+\tau)$ 为序列 Y 中 $i+\tau$ 时刻的值, 且

$$h[x(i), y(i+\tau)] = \begin{cases} 1, & x(i) = y(i+\tau) \\ 0, & x(i) \neq y(i+\tau) \end{cases} \quad (11)$$

由于混沌序列内在的随机性, 因此, 可以认为跳频序列近似为独立、均匀分布的序列, 其周期汉明相关服从二项分布。当 $N \gg q$ 时, 它趋向正态分布:

$$P\{H_{XY}(\tau) = l\} = \binom{N}{l} (1/q)^l (1-1/q)^{N-l} \\ \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi N(1/q)(1-1/q)}} \exp\left[-\frac{(l-N/q)^2}{2N(1/q)(1-1/q)}\right] \quad (12)$$

式中 N 为序列长度, q 为跳频频率数, l 为周期汉明相关值。

利用周期汉明相关的定义, 计算采用本文方法产生的跳频序列的相关值的正态分布曲线, 如图 6 所示。从图中可见: 实验得到的数值与理论近似值在总的趋势上是相吻合的, 实验结果表明随着 N 的增加, 其实验值越接近理论的近似值。

4.4 序列的归一化功率谱

采用本文方法所产生的短波跳频序列, 其归一化功率谱如图 7 所示。从图中可见, 虽然归一化功率谱还没有达到平坦的理想情形, 但是跳频序列已具有了较好的随机性, 对本系统是适用的。

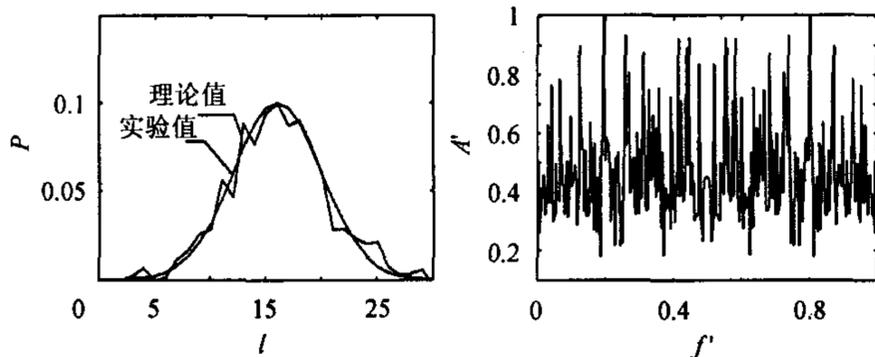


图 6 $N=1024$ 的跳频序列汉明相关的正态分布曲线

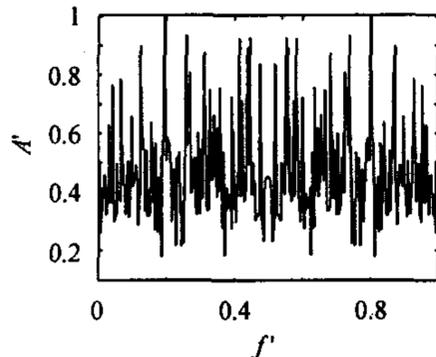


图 7 短波跳频序列归一化功率谱

4.5 跳频序列平衡指数

平衡指数 B 定义为

$$B = \frac{q}{N} \sqrt{\frac{1}{q} \sum_{i=0}^{q-1} \left(m_i - \frac{N}{q}\right)^2} \quad (13)$$

式中 m_i 为第 i 个频点在序列中出现的次数, N 为跳频序列的长度。随着 N 的增大, B 越接近于 0, 平衡性越好。采用本文方法所产生的短波跳频序列, 其平衡指数如表 1 所示。

表 1 $q=64$ 时跳频序列的平衡特性

N	256	512	1024	2048	4096
B	0.2236	0.2148	0.1801	0.0892	0.0554

从表中可见, B 值随着 N 的增大而递减, 通过与传统的跳频序列的平衡特性进行比较可以知道, 采用本文方法产生

的跳频序列平衡特性较好。

5 结论

由上述的理论分析和数值仿真表明: (1)采用本文所提出的基于 Logistic 映射混沌短波差分跳频转移函数产生的跳频序列, 其周期较长; (2)该方法产生的跳频序列具有良好的相关特性; (参见图 4,5,6); (3)该方法所产生的跳频序列具有较好的随机性 (参见图 3,7); (4)该方法产生的跳频序列具有良好的平衡特性 (参见表 1); (5)本文所提出的短波差分跳频码容易用硬件实现。显然, 采用本文方法产生的跳频序列满足跳频码的一般要求。又由于跳频序列具有较高的线性复杂度, 从而具有较好的抗破译能力。初值的敏感性及初值传递涉及到接收端的解跳的问题, 关于这个问题, 将另文讨论, 本文不再赘述。

参考文献

- [1] Herrick D L, Lee P K. CHES: A new reliable high speed HF radio. Military Communications Conference, McLean, VA, USA 21 - 24 Oct., 1996, 3: 684 - 690.
- [2] 郝柏林. 从抛物线谈起——混沌动力学引论. 上海: 上海科技教育出版社, 1993: 16 - 41.
- [3] 凌聪, 孙松庚. Logistic 映射跳频序列. 电子学报, 1997, 25 (10): 79 - 81.
- [4] Halle K, Wu C, Itoh M, Chua L. Spread spectrum communication through modulation of chaos. *Intl J. Burfication and Chaos*, 1993, 3(2): 469 - 477.
- [5] Simon Marvin K, Omura Jim K, Scholtz Robert A, Levitt Barry K. Spread Spectrum Communications Handbook. USA: McGraw-Hill Education(Asia) Co, 2002: 352 - 362.
- [6] Lin T, Chua L. A new class of pseudo-random number generator based on chaos in digital filters. *International Journal of Circuit Theory and Applicaiton*, 1993, 21(2): 473 - 480.
- [7] Heidari-Bateni G, McGillen C D. A chaotic direct-sequence spread-spectrum communication system[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1994, 42 (2/3/4): 1524 - 1527.
- [8] 查光明, 熊贤祚. 扩频通信. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 64 - 95.
- [9] 梅文华, 杨义先. 跳频通信编码地址理论. 北京: 国防工业出版社, 1996: 1 - 31.

甘良才: 男, 1942 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 自适应数字通信、扩频、跳频通信、软件无线电与移动通信。

吴二元: 男, 1977 年生, 硕士生, 研究方向是扩频通信及其 FPGA 和 DSP 实现。