

# 一种用于扩频通信系统的 CNN 多值随机码的研究<sup>1</sup>

汪海明 郭仕德\* 赵建业 沈士洪 余道衡

(北京大学电子学系, 视觉与听觉信息处理国家重点实验室 北京 100871)

\*(北京大学, 遥感与地理信息系统研究所 北京 100871)

**摘 要** 该文结合细胞神经网络 (CNN) 和扩频通信系统 (SSS) 的特点, 利用三细胞 CNN 混沌产生了用于扩频通信系统的多值随机码, 文中给出了码的生成方法并分析了它的性能, 仿真结果表明这种码性能优越, 能够很好地用于扩频通信系统。

**关键词** 细胞神经网络, 混沌, 扩频通信系统, 混沌多值序列

**中图分类号** TN-052, TN914.5

## 1 前 言

细胞神经网络 (Cellular Neural Network, CNN)<sup>[1]</sup> 是一种能实时、高速并行处理信号的大规模非线性模拟电路, 具有易于 VLSI 实现, 能高速并行处理信息的优点。同时, 它也是一种非线性动态系统, 在一个简单的 CNN 系统中就会有有趣的分形现象以及复杂的混沌动态特性出现<sup>[2]</sup>。由于混沌信号的复杂随机性, 使用混沌系统进行扩频通信有良好的应用前景<sup>[3,4]</sup>。在扩频通信系统中, 要用到随机码, 随机码性能的好坏直接影响到通信系统的质量, 寻找好的随机码一直是扩频通信领域学者需要解决的难题。以前人们已经深入研究了  $m$  序列和其它多种码序列, 发现它们都有着不同的不足。混沌序列因为其良好的随机性和数量巨大, 是目前研究最多的一种序列, 有混沌模拟序列和混沌二元序列。混沌模拟实值序列在传输过程中有无穷多个状态, 使其抗截获和抗攻击的能力要远远强于二元序列, 这正是混沌作为地址码最突出的优点, 但是因为它有无穷多个状态, 实际通信中实现起来十分困难。由此想到了利用混沌多值序列作为随机码进行扩频通信, 文献 [5] 虽然做了这方面的研究, 但是它所采用的数字混沌扩频序列有着迭代速度慢和不利于集成的缺点, 在实际中的用处不大。本文则充分利用细胞神经网络结构简单和易于 VLSI 实现的优点, 用三细胞 CNN 对混沌多值随机序列进行了深入的研究, 并提出了一种多功能混沌多值随机码发生器。这个电路结构简单, 能够同时产生多种随机码, 满足多个不同扩频通信系统的需要。实验仿真结果表明, CNN 多值随机码是一种性能优越, 容量巨大的扩频码, 有着广阔的应用前景。

## 2 三细胞 CNN 模型中混沌的产生

CNN 由许多规则的空间分布电路单元聚集而成, 这些单元被称为细胞。每个细胞能够与相邻单元直接通信。CNN 具有两个非常好的特性: (1) 良好的连续时间特性能满足数字领域实时信号处理要求; (2) 局部互连的特征使之能够方便地用大规模集成电路 (VLSI) 实现。细胞神经网络在一定条件下可以产生混沌, 是否能够产生混沌可以用 Lyapunov 指数来判断。在  $n$  维离散系统中, 存在  $n$  个 Lyapunov 指数, 只要其中最大的 Lyapunov 指数大于 0, 则该系统就存在混沌<sup>[2]</sup>。

<sup>1</sup> 2002-03-26 收到, 2002-07-27 改回  
国家 863 计划基金 (No.2001AA136030) 资助课题

在本文中,我们采用如下所示的三细胞 CNN 模型作为混沌产生系统。具体的方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + [A] \cdot \begin{bmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ f(x_3) \end{bmatrix}, \quad f(x) = \begin{cases} -1, & x \leq -1 \\ x, & -1 < x < 1 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $A$  是输出反馈矩阵,  $f(x)$  是细胞神经网络的每个神经元输出函数。

在一定条件下,适当的选择矩阵  $A$ , 设置一定的初值, 上式的细胞神经网络中就会出现混沌现象。这里选择

$$[A] = \begin{bmatrix} 1.25 & -3.2 & -3.2 \\ -3.2 & 1.1 & -4.4 \\ -3.2 & 4.4 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

在上述参数下,计算机仿真的 CNN 二维和三维混沌相图分别见图 1 和图 2。

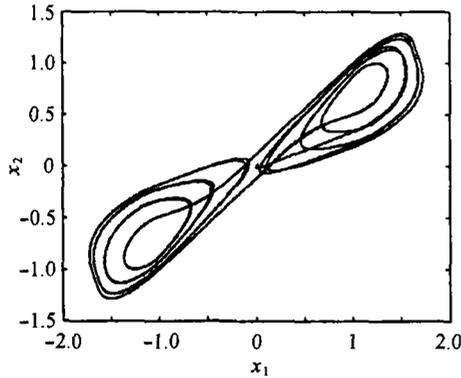


图 1 CNN 二维混沌相图

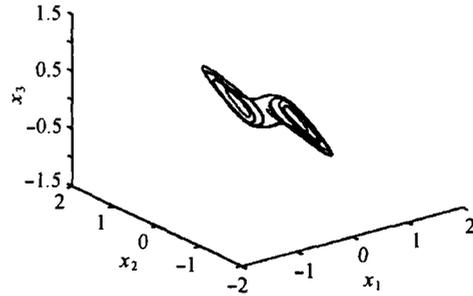


图 2 CNN 三维混沌相图

### 3 多值混沌序列的生成

图 3 是 CNN 多值混沌序列的产生框图,我们采用三细胞 CNN 产生了三路混沌信号  $x[k], k = 1, 2, 3$ 。混沌信号是被归一化到  $[-1, 1]$  之间的模拟值。实验中,采用前向欧拉法,步长取 0.01,每 400 个点采样一个点。因为 CNN 可以同时产生三路混沌信号,所以这里采用了一个三路量化器,经分析,量化曲线采用最简单的直线量化  $y = -m/M, m = 0, 1, 2, 3, \dots, M-1$  即可达到较好的效果。这个多值混沌序列可以根据要求精度的不同,采用不同的数值,这可以通过改变量化级来实现。另外,由于 CNN 可以同时产生三路混沌信号,所以我们可以利用这个特点,产生一个多功能的随机码发生器,分别为 2 值, 4 值, 8 值及任意值,可以根据实际需求同时满足多个通信系统的需要,极大地节省了硬件代价。图 4 是原理图。

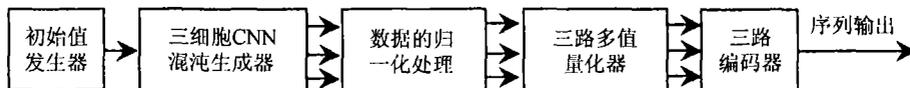


图 3 CNN 多值混沌序列的产生框图

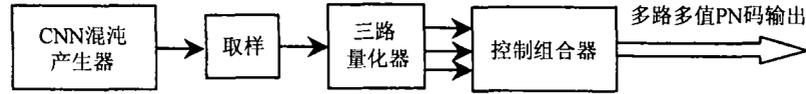


图 4 CNN 多功能 PN 码发生器

在图 4 中, 首先利用 CNN 混沌产生模块产生三路混沌信号, 然后用取样脉冲对混沌信号进行取样, 本文的实验中取样间隔为 400。三路量化器可以是二值量化, 也可以是多值量化, 二值量化把三路信号都量化为 0, 1 的 2 值信号, 而多值量化把三路信号都量化为相应的多值信号。控制组合器是这个系统最重要的部件, 它完成随机码的组合和编码生成。例如: 如果三路混沌数据都采用二值量化, 二值的随机码可以直接输出, 如果要产生四值的随机码, 则只要任意选择两路进行组合, 如果要产生八值的 PN 码, 只要把三路进行组合即可, PN 码的长度可以根据要求任意改变。如果要产生其它数值的随机码, 也只需要改变每一路的量化级数, 然后进行简单的串并等组合处理即可, 非常方便, 这就大大简化了硬件的复杂性, 增加了系统容量。实验表明, 这个设计是十分简单实用的。

## 4 CNN 多值序列的性能分析

### 4.1 初值敏感性

CNN 多值混沌序列对初值是十分敏感的。两个初值仅仅相差 0.0000000001 的序列的采样值比较见表 1, 其中采样间隔为 400。从表 1 中可以看出, 任意两个相邻的值相同的几率非常小。可见, 混沌多值数字序列并没有因非均匀量化而丧失了它对初始条件的敏感依赖性。只要稍稍改变初值, 就可以得到两个完全不同的序列, 这对大容量通信是十分有用的。

表 1 CNN 混沌多值序列对初始值的敏感性

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
初值 1(0.02)	-3	5	-3	3	-5	3	7	3	3	-3	3	-3
初值 2(0.0200000001)	-7	1	-7	-7	-3	1	3	-3	-1	3	-1	-3
序号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
初值 1(0.02)	3	1	-1	-1	5	-7	-1	-5	3	-5	-7	5
初值 2(0.0200000001)	-3	3	-5	5	-7	5	3	-7	3	5	-3	-1

### 4.2 序列的相关特性

一个地址码的特性好坏很大程度上取决于它的相关特性。

对于三细胞 CNN 来说, 状态变量  $x_1, x_2, x_3$  的均值为零, 所以取样得到的混沌序列的均值也为零, 即

$$\bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i = 0 \quad (3)$$

混沌序列的自相关函数为

$$ac(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+m} - \bar{x}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i x_{i+m} \quad (4)$$

如果在设置不同初值的情况下产生两个混沌序列  $x_1$  和  $x_2$  的互相关函数为:

$$ac_{12}(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_{1i} - \bar{x})(x_{2(i+m)} - \bar{x}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_{1i} x_{2(i+m)} \quad (5)$$

按照上面的计算方法, 我们画出了混沌序列的自相关和互相关函数, 分别见图 5 和图 6 ( $N = 512$ )。从图中我们可以看出, 用 CNN 产生的多值混沌序列自相关和互相关特性是十分好的。从图 5 看出, CNN 多值混沌序列有尖锐的自相关, 具有  $\delta$  函数的特性, 自相关的主峰值为 1。而其互相关值很小, 接近于零值, 同  $m$  序列和 gold 序列相比, CNN 多值混沌序列同样具有较为理想的自相关和互相关特性。而混沌序列由于其轨迹始终限于一定区域和永不重复的特点, 是一种周期无限长的序列, 因而具有更接近噪声的本质特征。实验中我们发现, 随着长度的增加, 序列的相关特性会变得越来越好, 见图 7 和图 8。但是, 也并不是无限地增长序列长度就能够得到理想的序列值, 同时在实际应用中也是不可能的。考察序列的自相关旁瓣及互相关函数对零均值的偏离程度, 即其均方根:

$$\sigma_{ac} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N [ac(m)]^2}, \quad m \neq N/2 \quad (6)$$

$$\sigma_{cc_{12}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N [cc(m)]^2} \quad (7)$$

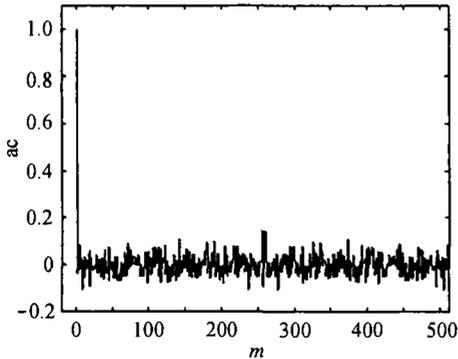


图 5 多值 CNN 混沌码的自相关特性  
( $N = 512$ )

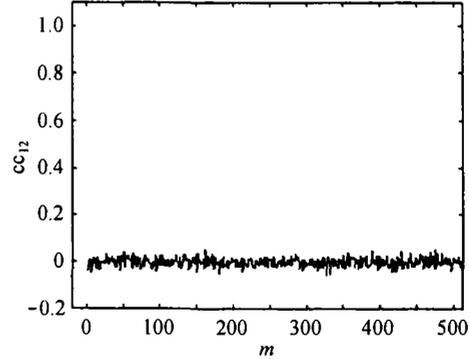


图 6 多值 CNN 混沌码的互相关特性  
( $N = 512$ )

其中  $N$  是序列的长度。这两个参数分别表征了相应 CDMA 多址通信系统的抗多径和抗多址干扰的能力的大小。由图 9 和图 10 所示的均方根值与序列长度  $N$  的关系发现, 在一定长度下, 序列的自相关旁瓣的均方根与互相关的均方根几乎相等。从曲线的趋势可以看出, 序列越长, 均方根值越小, 相关函数也就越接近理论值。但是, 不能一味地通过增加序列长度来改善系统相关特性。根据图 9 和图 10, 可以认为序列的长度取在 2000~4000 比较合适。另外, 多值 CNN 混沌序列的相关特性还和量化级数的选择有关系。图 11 和图 12 是其自相关旁瓣和互相关旁瓣与量化级数的关系, 横轴是量化的比特数, 图中是从 1bit 到 7bit, 即量化级数是从 2 到 128。纵轴是相关函数均方误差。从图中我们可以看出, 随着量化级数的增加, 量化误差也在增加。量化级数的大小和序列的抗截获能力有很大关系, 随着序列量化级数的增加, 系统可用的序列数也在呈指数的形式增加, 同时被敌方截获和破坏的可能性也越来越小<sup>[5]</sup>。由上可知, 加长序列和增加量化级数可以改变通信传输的质量。

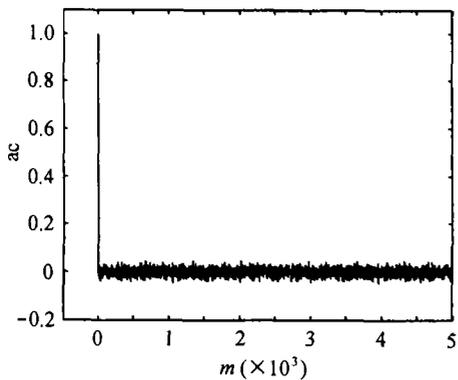


图 7 多值 CNN 混沌码的自相关特性  
( $N = 5000$ )

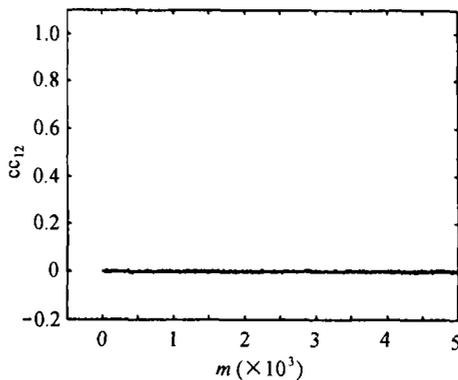


图 8 多值 CNN 混沌码的互相关特性  
( $N = 5000$ )

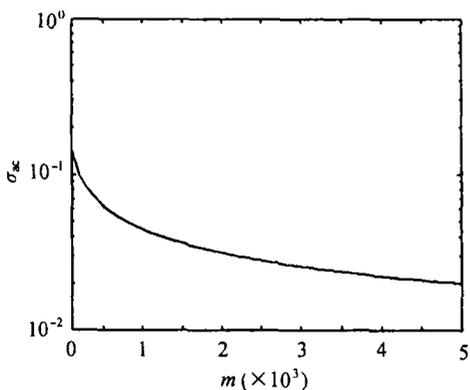


图 9 自相关均方根与序列长度曲线

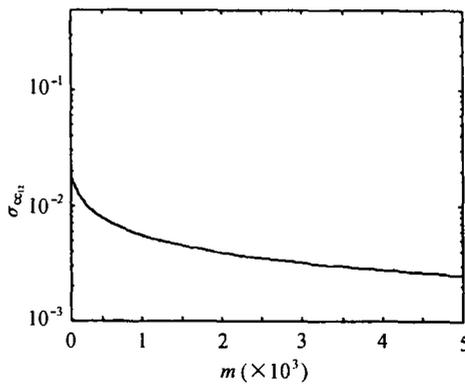


图 10 互相关均方根与序列长度曲线

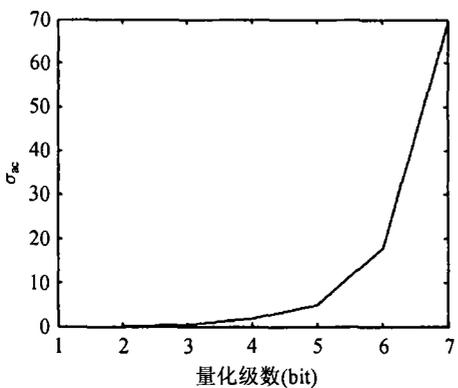


图 11 自相关均方根与量化级数曲线

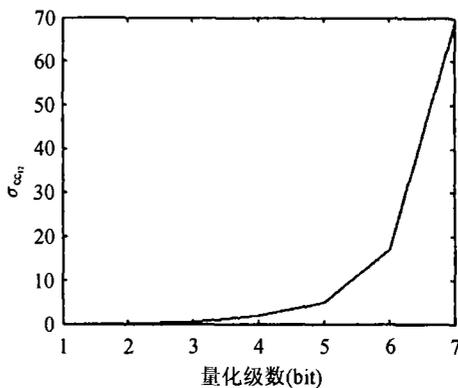


图 12 互相关均方根与量化级数曲线

## 5 二用户 CDMA 通信系统仿真

为了验证 CNN 多值随机码的性能, 我们把它应用于一个二用户的 CDMA 通信系统模型图 13 中, 并和 gold 码的通信系统性能进行了比较. 图 14 和图 15 是两种码的误码率曲线.

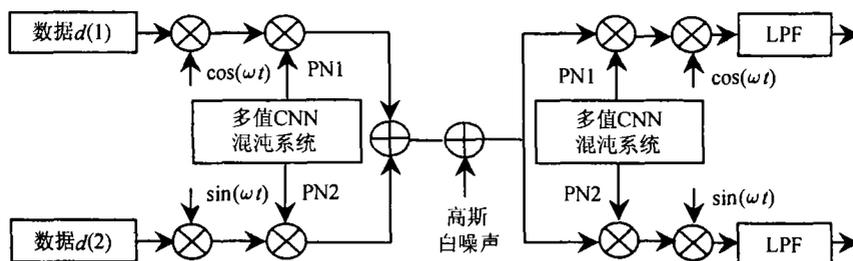


图 13 二用户扩频通信系统模型

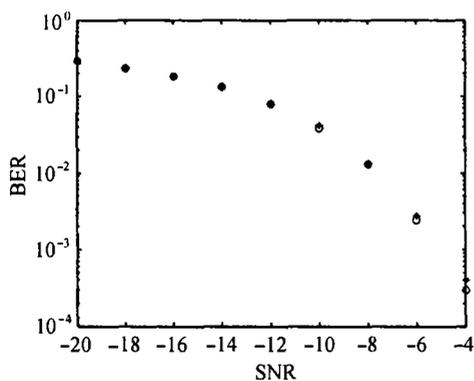


图 14 二值扩频码误码率曲线

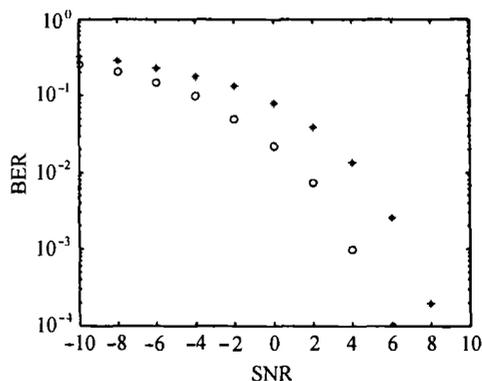


图 15 八值扩频码误码率曲线

图 14 和图 15 中星号“\*”和圈“o”分别表示的是采用 gold 码和多值 CNN 扩频码的误码率曲线。图 14 中 CNN 扩频码采用的 1bit, 31 位码, 图 15 中 CNN 扩频码采用的 3bit, 31 位码。我们看出, 在相同误码率的情况下, 二值 CNN 混沌码和 gold 码信噪比曲线比较接近, 而八值 CNN 混沌码的信噪比比 gold 码的信噪比低 2~3 个 dB。实验表明, 量化级数越多, 序列越长, 相同信噪比下的误码率改善越明显。这说明用 CNN 产生的多值扩频码能够很好地应用于扩频多用户通信系统, 但又由于混沌码通过改变初值就可以生成许多互不相关的序列, 容量特别大, 所以对于大容量通信很有优势。

## 6 结 论

本文提出了一种用 CNN 混沌产生多值随机码的方法, 并给出了一种多功能序列产生电路。实验表明, 这种多值混沌码随机性能良好, 能够很好地满足大容量的 CDMA 通信系统的要求, 从而为扩频通信找到了一种新的扩频序列的实现方法。

## 参 考 文 献

- [1] L. O. Chua, L. Yang, Cellular neural network: Theory, IEEE Trans. on CAS, 1988, 35(10), 1257-1272.
- [2] F. Zou, J. A. Nossek, Bifurcation and chaos in cellular neural networks, IEEE Trans. on CAS, 1993, 40(3), 166-173.
- [3] T. Yang, L. O. Chua, Chaotic CDMA communication systems, International Journal of Bifurcation and Chaos, 1997, 7(12), 2789-2905.
- [4] Wang Haiming, Zhao Jianye, Gu Xiaodong, Yu Daoheng, A research on DSSS based on CNN, The 8th International Conference on Neural Information Processing, Shanghai, China. 2001, 835-840.
- [5] 金红, 王可人, 薛磊, 郝士奇, 一种用于 CDMA 系统的混沌多值数字序列及其性能, 电子学报, 2000, 28(4), 131-134.

A MULTILEVEL CHAOTIC SEQUENCE BASED ON  
CNN FOR SPREAD SPECTRUM SYSTEM

Wang Haiming    Guo Shide\*    Zhao Jianye    Shen Shihong    Yu Daoheng

*(Dept. of Electron., The Nat. Lab of Mach. Perc., Peking Univ., Beijing 100871, China)**\*(The Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China)*

**Abstract** This paper puts forward a new multilevel chaotic sequence and a multifunction circuit using three-cell CNN chaos, combining the characteristic of CNN with that of the Spread Spectrum System (SSS). It also proposes a scheme of generating the Multilevel Chaotic Sequence (MCS) and analyzes its properties. Simulation results show that this kind of sequence performs quite well, which is suitable for future large-capacity SSS.

**Key words** Cellular neural network, Chaos, Spread Spectrum System (SSS), Multilevel Chaotic Sequence (MCS)

汪海明: 男, 1975 年生, 博士生, 主要研究方向: 扩频通信, 神经网络与混沌理论等.

郭仕德: 男, 1952 年生, 高工, 主要研究方向: 遥感图像与图形信息处理.

余道衡: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE 高级会员, 主要研究方向: 电路与系统, 信号与信息处理, 现代通信等.