

УДК 621.391.01

ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ХАОСОМ КАК СРЕДА ДЛЯ ЗАПИСИ, ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

*Ю. В. Андреев, Ю. Л. Бельский, А. С. Дмитриев,
Д. А. Куминов*

В статье демонстрируется возможность применения нелинейных систем со сложной динамикой для обработки информации. Описываются принципы записи и восстановления информации на основе устойчивых циклов одномерных отображений; обсуждается возможность реализации метода с помощью нейронных сетей, а также приложения к обработке текстовой информации.

ВВЕДЕНИЕ

Недавние исследования природы электроэнцефалограмм мозга человека и животных, экспериментальный анализ и математическое моделирование информационных процессов в биологических подсистемах (в частности, в обонятельной системе) выявили фундаментальную роль хаоса и сложной динамики в обработке информации биологическими системами.

Эти результаты естественным образом приводят к захватывающей идеи использования явлений сложной динамики в детерминированных системах, известных как детерминированный хаос, для развития информационных технологий.

В статье мы обсуждаем часть этой проблемы, связанную с записью и извлечением информации. Основными типами рассматриваемых динамических систем являются одномерные отображения.

Использование одномерных динамических систем (ОДС) для записи и восстановления информации было предложено в [1–2]. Идея метода заключается в том, что заданному набору информационных блоков ставится в соответствие набор предельных циклов одномерной динамической системы с дискретным временем. Здесь и далее под информационным блоком подразумевается конечная последовательность символов из некоторого алфавита. Каждому символу последовательности ставится в соответствие значение переменной динамической системы. Таким образом, информация хранится в динамической системе в виде ее предельных циклов. Для извлечения информации необходимо задать начальные условия на одном из циклов и производить итерирование динамической системы

до полного извлечения записанного информационного блока. В [3-8] рассмотрены различные аспекты, связанные с динамикой подобных систем. В частности, показано, что в случае записи информации на устойчивых предельных циклах и задании произвольных начальных условий на отрезке $[0, 1]$, выходу фазовой траектории на предельный цикл предшествует переходный хаотический процесс (переходный хаос). Там же показано, что подобные системы с записанной информацией на неустойчивых предельных циклах могут быть использованы для хаотического сканирования памяти и распознавания записанной информации. Для этого используются соответственно режим перемежающегося хаоса и переход от устойчивого хаоса к паре "метастабильный хаос – устойчивый предельный цикл".

Метод записи информации на предельных циклах ОДС может быть обобщен на двумерный и многомерный случай. Соответствующие отображения были введены и исследованы в работе [9]. Использование двумерных и многомерных отображений позволяет существенно повысить информационную емкость динамической системы как среды для хранения и обработки информации.

В разделе 1 мы даем краткую сводку полученных ранее результатов по проблеме записи и извлечения информации с использованием одномерных отображений. Здесь же приводится пример, иллюстрирующий основные принципы записи последовательностей, в которых встречаются повторяющиеся фрагменты.

Во втором разделе рассматривается реализация динамики одномерных отображений с помощью рекуррентных нейронных сетей, содержащих единственный внутренний слой. Показывается, что обучение сети сводится к простым расчетным формулам при однократном представлении последовательности точек, описывающей отображение. Приводятся иллюстративные примеры.

Записи и извлечению текстовой информации с помощью рекуррентных нейронных сетей с хаосом посвящен третий раздел. Приводятся простые примеры предварительного кодирования текстовых строк, формирования отображений, в которых строкам отвечают устойчивые предельные циклы и реализация динамики этих отображений в рекуррентных нейронных сетях. Показывается отсутствие ограничений при записи на вид последовательности. В частности, возможна запись двух или более последовательностей незначительно отличающихся друг от друга. Далее на примере записи и извлечения текстовой информации показывается вычислительная эффективность процессов: получения отображения, обучения нейросети с числом элементов до 25000 и извлечения информации при ее функционировании.

Наконец, в заключении суммируются результаты, полученные в работе, и даются некоторые выводы.

1. ЗАПИСЬ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЦИКЛОВ

Процедура записи и восстановления информации на основе предельных циклов одномерных динамических систем, предложенная в [1-2] и получившая дальнейшее развитие в [3-8], сводится к следующему.

Пусть задана последовательность символов (информационный блок)

$$a_1 a_2 \dots a_n, \quad (1)$$

каждый элемент которой a_i принадлежит алфавиту из N символов.

Для нее конструируется одномерное отображение отрезка в себя, обладающее устойчивым предельным циклом периода n , элементы которого находятся во взаимно-однозначном соответствии с элементами последовательности (1). В простейшем случае каждому элементу алфавита соответствует свое значение переменной отображения и интервал значений итерируемой в отображении переменной, длина которого $1/N$.

Извлечение информационного блока осуществляется путем задания начальных условий внутри одного из интервалов на отрезке $[0, 1]$, соответствующих символам информационного блока и последующего преобразования возникающей в результате итерирования отображения последовательности чисел в последовательность символов. Если начальные условия для итерирования отображения выбираются произвольно, то выходу траектории на устойчивый цикл предшествует переходный процесс.

В принципе, таким же образом может быть сконструировано отображение содержащее не один, а несколько устойчивых предельных циклов, элементы которых находятся во взаимно-однозначном соответствии с элементами записываемых последовательностей типа (1). При этом, однако, возможности записи информации оказываются весьма ограниченными. Например, нельзя записать последовательности, содержащие хотя бы два одинаковых символа. Для преодоления этого ограничения вводится понятие уровня записи, и конструируются отображения, в которых значение переменной соответствует не одному элементу последовательности (1), а q стоящим один за другим элементам. Такое обобщение конструкции отображения позволяет записать любые последовательности символов, в которых отсутствуют одинаковые фрагменты, состоящие из q и более элементов. В противном случае запись на этом уровне невозможна. Естественным способом обойти это ограничение является переход на более высокие уровни записи. Однако этот путь имеет принципиальные ограничения. Дело в том, что при превышении некоторого уровня записи, длина информативных интервалов становится очень малой, и при расчетах на ЭВМ приходится переходить от одинарной точности вычислений к вычислениям с двойной точностью, со всеми вытекающими отсюда последствиями (замедление скорости счета, увеличение требуемого объема памяти и т. д.).

Радикально вопрос о возможности записи произвольных последовательностей решается путем специального кодирования [3–6]. Суть его такова. Пусть в последовательностях, которые предполагается записать на q -ом уровне, имеется несколько идентичных фрагментов длины q . Тогда в исходный алфавит вводится новый дополнительный элемент, представляющий собой этот фрагмент, и во всех записываемых последовательностях производится замена таких фрагментов на новый элемент алфавита. При обнаружении в новом представлении последовательностей (с использованием дополнительно введенного элемента алфавита) идентичных фрагментов длины q вновь производится замена этих фрагментов на еще один дополнительный элемент алфавита. Процедура расширения алфавита продолжается до тех пор, пока в записываемых информационных последовательностях не останется ни одного повторяющегося фрагмента длины большей или равной q .

Использование данного метода кодирования позволяет записывать любой информационный блок на любом уровне записи, начиная со второго.

Пример 1. Рассмотрим подробнее последовательность действий при кодировании информации на примере одновременной записи двух последовательностей “ $abc\dots dxyw\dots$ ” и “ $cde\dots kxyz\dots$ ”, состоящих из символов латинского алфавита. Пусть для определенности выбран уровень записи $q = 2$. Возьмем первый фрагмент “ ab ” из первого информационного блока и просмотрим записываемые последовательности. Если в этих последовательностях второго такого фрагмента нет, то берем следующий фрагмент “ bc ” и повторяем просмотр и т. д. Допустим на i -ом шаге процедуры выяснилось, что анализируемый фрагмент “ xy ” встречается еще раз в записываемых последовательностях. Тогда вводим в исходный алфавит новый дополнительный элемент $\beta = "xy"$, и осуществляем замену “ xy ” на β в записываемых последовательностях. После замен, последовательности принимают вид: “ $abc\dots d\beta w\dots$ ” и “ $cde\dots k\beta z\dots$ ”. Далее продолжаем процесс поиска одинаковых фрагментов с фрагмента “ βw ”. При выявлении очередных фрагментов, встречающихся в последовательностях как минимум дважды, каждый раз добавляем к алфавиту новый дополнительный элемент, соответственно заменяя им повторяющийся фрагмент. Процесс заканчивается при достижении последнего фрагмента второй записываемой последовательности. В результате сформируется новый расширенный алфавит. Представленные в этом алфавите исходные последовательности не содержат повторяющихся фрагментов длины большей или равной q .

2. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ЗАПИСИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Одномерные отображения с записанной информацией могут быть реализованы с помощью рекуррентных нейронных сетей.

Рассмотрим нейронную сеть состоящую из трех слоев нейронов (входной слой, внутренний слой и выходной слой) и цепи обратной связи между выходным и входным слоями (рис. 1). Три слоя нейронной сети используются для реализации функции отображения, а цепь обратной связи с единичным запаздыванием — для организации итерационного процесса. Входной и выходной слой содержат по одному элементу. Связи между элементами внутреннего слоя отсутствуют.

Выходной слой

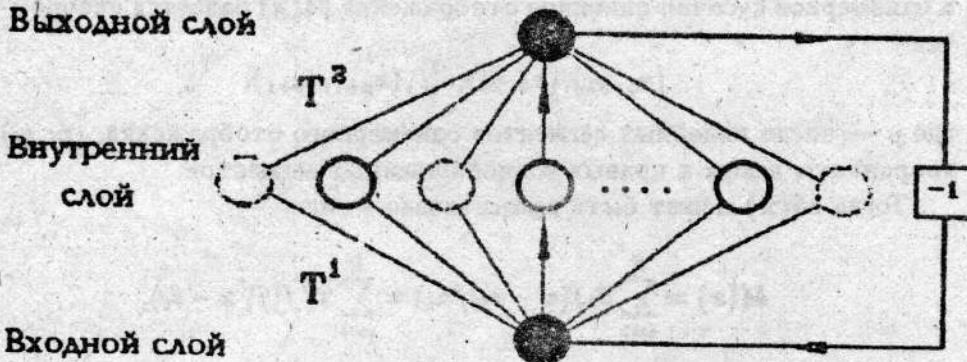


Рис. 1. Нейронная сеть, реализующая одномерное кусочно-линейное отображение.

На входной элемент подается сигнал соответствующий начальным условиям. С выхода данного элемента сигнал поступает на нейроны внутреннего слоя. Сумма сигналов с нейронов внутреннего слоя поступает на вход нейрона выходного слоя. Коэффициенты связей между слоями нейронной сети определяются видом реализуемого отображения с записанной информацией. Сигнал на выходе сети соответствует значению следующей итерации отображения.

Все нейроподобные элементы имеют одинаковую структуру и кусочно-линейную характеристику. Значения порогов элементов входного и выходного слоя равны нулю, значения порогов элементов внутреннего слоя определяются видом реализуемого отображения.

Известно [10, 11], что произвольное отображение $R^m \rightarrow R^l$ (R^m и R^l — действительные m -мерные и l -мерные пространства соответственно) может быть с любой степенью точности аппроксимировано с помощью многослойной рекуррентной нейронной сети, состоящей из элементов

сигмоидальной безинерционной характеристикой. Нетрудно убедиться в том, что произвольное одномерное кусочно-линейное отображение $M(x)$, заданное на отрезке $I = [0, 1]$

$$M: [0, 1] \rightarrow [0, 1] (I \rightarrow I) \quad (2)$$

может быть точно реализовано в виде нейронной сети, состоящей из элементов с одинаковыми кусочно-линейными характеристиками.

Действительно, пусть каждый элемент внутреннего слоя имеет характеристику

$$f(z) = \begin{cases} 0, & z \geq 0 \\ z, & 0 < z \leq 1 \\ 1, & z > 1, \end{cases} \quad (3)$$

а одномерное кусочно-линейное отображение $M(x)$ задается набором точек

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{p+1}, y_{p+1}), \quad (4)$$

где p — число линейных сегментов одномерного отображения, (x_i, y_i) — координаты левых и правых концов линейных сегментов.

Тогда $M(x)$ может быть представлено в виде

$$M(x) = \sum_{i=1}^p \beta_i f(x - x_i) / \alpha_i = \sum_{i=1}^p T_i^2 f(T_i^1 x - \theta_i), \quad (5)$$

где $\alpha_i = x_{i+1} - x_i$, $\beta_i = y_{i+1} - y_i$, $T_i^1 = 1/\alpha_i$ — связи от входного слоя к внутреннему, $T_i^2 = \beta_i$ — связи от внутреннего слоя к выходному слою, $\theta_i = x_i/\alpha_i$ — пороги элементов внутреннего слоя.

Пример 2. Пусть имеется алфавит, состоящий из 10 цифр 0, 1, 2...9, и требуется построить нейронную сеть, реализующую динамику одномерного отображения, в котором произведена на первом уровне запись одного информационного блока 174. Искомое отображение будет иметь вид, приведенный на рис. 2, а. Нейронная сеть, реализующая динамику этого отображения, содержит семь элементов ($2 \times 3 + 1$) во внутреннем слое при трех информативных участках в отображении. Коэффициенты связей между входным элементом и нейронами внутреннего слоя, а также коэффициенты связей между нейронами внутреннего слоя и выходным элементом, рассчитываются по формуле (5) и приведены в таблице 1. На рис. 2, б графически показан вклад каждого нейрона внутреннего слоя в формирование функции отображения. Из рисунка видно, что каждый нейронный элемент отвечает за формирование одного линейного участка отображения. Запуск нейронной системы осуществляется путем подачи начальных условий на входной элемент при разомкнутой обратной связи. После чего обратная связь замыкается.

Таблица 1

Параметры нейронной сети, реализующей отображение, с записанным на первом уровне информационным блоком 174

N	T_N^1	T_N^2	θ_N
1	10	0.745	0
2	10	0.01	1
3	5	-0.61	1
4	10	0.01	4
5	5	0.29	2.5
6	10	0.01	7
7	5	-0.455	4

Пример 3. Тот же блок информации, что и в примере 1, записывается на втором уровне. Требуется построить нейронную сеть, реализующую динамику этого одномерного отображения. Искомое отображение будет иметь вид, приведенный на рис. 3. Структура нейронной сети, реализующей динамику этого отображения, та же, что и в предыдущем случае. Соответствующие коэффициенты связей приведены в таблице 2. Следует отметить, что в силу уменьшения длины информативных участков при записи информационного блока на втором уровне, требования к точности характеристики нейронных элементов и выставлению коэффициентов связи являются более жесткими, чем при записи на первом уровне.

Таблица 2

Параметры нейронной сети, реализующей отображение, с записанным на втором уровне информационным блоком 174

N	T_N^1	T_N^2	θ_N
1	5.88	0.743	0
2	100	0.005	17
3	4.34	-0.57	0.78
4	100	0.005	41
5	3.13	0.24	1.31
6	100	0.005	-74
7	4	-0.42	3

В следующем разделе рассматриваются возможности применения метода записи и извлечения информации с использованием нейронных сетей на более сложном примере: записи и воспроизведения текстовой информации.

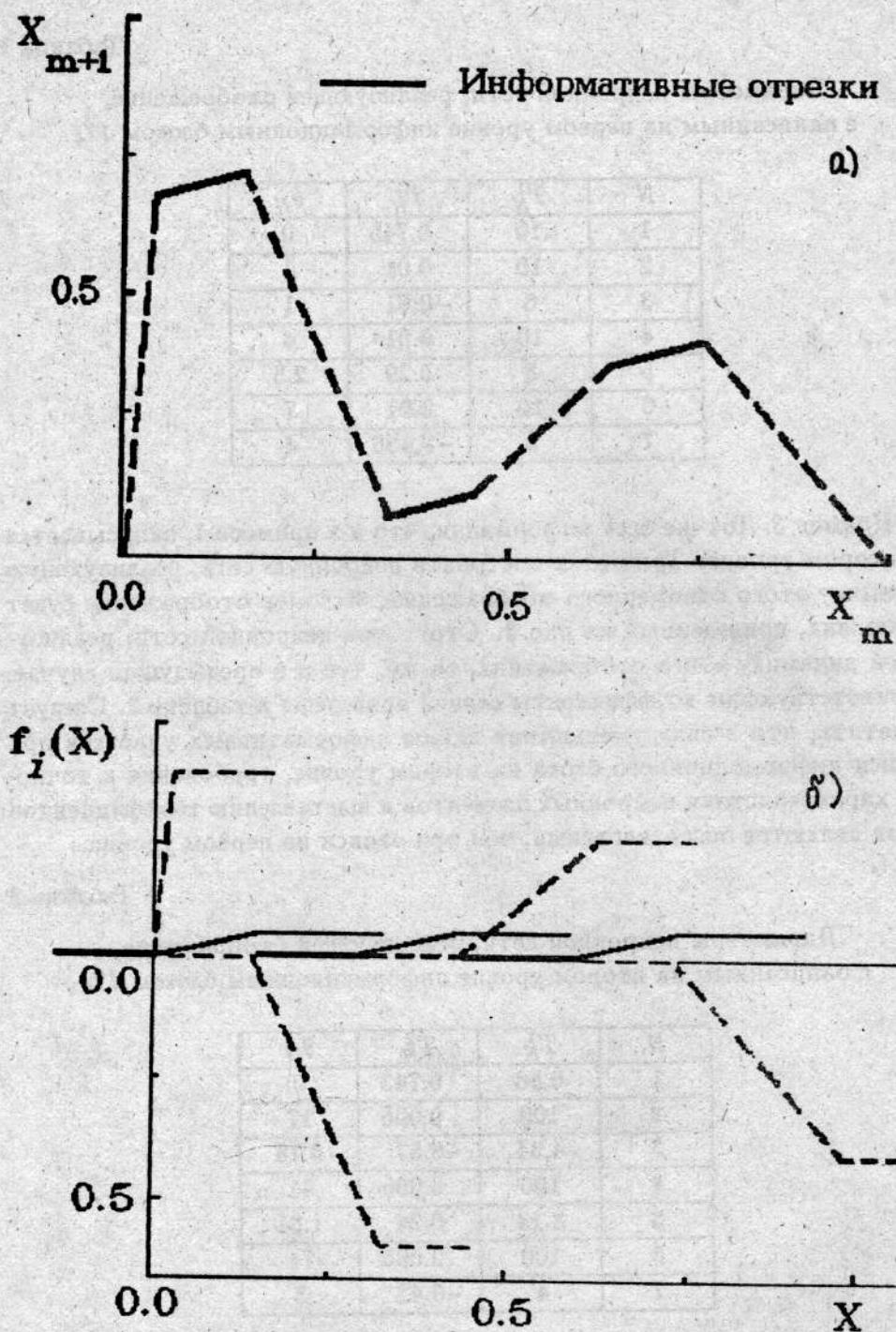


Рис. 2. Динамическая система с записанным на первом уровне информационным блоком 174: а) отображение; б) разложение отображения по функциям нейронных элементов..

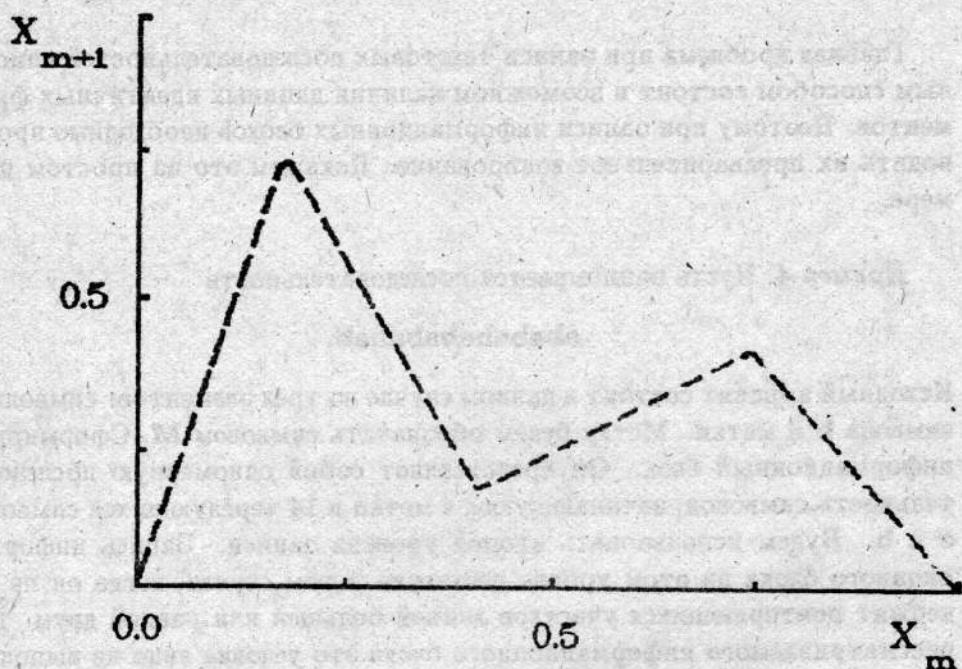


Рис. 3. Отображение с записанным на втором уровне информационным блоком 174.

3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЦИКЛОВ К ОБРАБОТКЕ ТЕКСТОВ

Будем рассматривать текстовую информацию как последовательность ASCII кодов, каждый символ которой представляется одним байтом (8 бит). Таким образом, исходный алфавит состоит из 256 символов. Любой последовательности таких символов можно сопоставить в соответствие предельный цикл одномерного отображения, как это делалось в разделе 1. Однако следует отметить, что этот цикл соответствует также всем циклическим сдвигам информационного блока. Это создает проблему при восстановлении текстовой последовательности по значениям переменной динамической системы, поскольку отсутствует информация о том, какой элемент цикла соответствует началу последовательности. Для преодоления этой проблемы в алфавит вводится специальный дополнительный символ — метка, который ставится в начало информационного блока. Когда в процессе итерирования системы появляется метка, следующий за ней символ считается первым элементом текста и неоднозначность в воспроизведении информации таким образом снимается.

Главная проблема при записи текстовых последовательностей описанным способом состоит в возможном наличии длинных идентичных фрагментов. Поэтому при записи информационных блоков необходимо производить их предварительное кодирование. Покажем это на простом примере.

Пример 4. Пусть записывается последовательность

ababababababab.

Исходный алфавит состоит в данном случае из трех элементов: символа **a**, символа **b** и метки. Метку будем обозначать символом **M**. Сформируем информационный блок. Он представляет собой одномерную последовательность символов, начинающуюся с метки и 14 чередующихся символов **a** и **b**. Будем использовать второй уровень записи. Запись информационного блока на этом уровне возможна в том случае, когда он не содержит повторяющихся участков длиной большей или равной двум. Для рассматриваемого информационного блока это условие явно не выполняется. Действительно, пара из символов **a** и **b**, многократно повторяется в информационном блоке. Расширим алфавит, введя новый, четвертый, элемент, соответствующий паре **ab**, и обозначим пару через **c₁**. Произведем необходимые замены во всем информационном блоке. После этих замен он примет вид

Mc₁c₁c₁c₁c₁c₁c₁.

Число элементов информационного блока сократилось с 15 до 8, но при этом имеются повторяющиеся фрагменты **c₁c₁**, **c₁c₁c₁** длины большей или равной уровню записи. Введя в алфавит элемент **c₂ = c₁c₁**, мы сокращаем длину информационного блока с 8 до 5 элементов

Mc₂c₂c₂c₁.

Но этого снова недостаточно для выполнения условий возможности записи на втором уровне. Последовательно вводим новые элементы алфавита. Введя элемент **c₃ = c₂c₂**, получаем

Mc₃c₂c₁.

Таким образом, в процессе кодирования алфавит расширился с 3 символов (**a**, **b** и метка) до 6, а длина информационного блока сократилась с 15 элементов (при представлении в исходном алфавите) до 4 элементов в итоговом алфавите.

Как описанная процедура кодирования будет "работать" при записи мало отличающихся друг от друга информационных блоков? Оказывается, что в этом случае происходит своеобразная "ортогонализация" информационных блоков, то есть после кодирования они записываются так,

что в них отсутствуют одинаковые фрагменты длиной больше или равной q . Для того, чтобы наглядно представить процесс "ортогонализации" образов при кодировании, рассмотрим следующий пример.

Пример 5. Пусть требуется записать на одно и то же отображение два близких образа: текстовую последовательность $ababababababab$ и текстовую последовательность с "дефектом" $abbbbabababab$.

Как и в примере 4, исходный алфавит в данном случае состоит из трех элементов: символа **a**, символа **b** и метки. Сформируем два информационных блока. Первый из них представляет собой последовательность символов, начинающуюся с метки, и содержащую еще 14 чередующихся символов **a** и **b**. Второй блок имеет вид

Mabbbbababababab.

Расширим алфавит, введя новый, четвертый, элемент, соответствующий паре **Ma** и обозначим его через d_1 . Произведем необходимые замены в обоих информационных блоках. В результате получим

$d_1babababababab$

и

$d_1bbbababababab.$

Элемент d_1b повторяется в этих блоках, поэтому заменяем его на элемент $d_2 = d_1b$ и получаем

$d_2abababababab,$
 $d_2bbababababab.$

Далее вводим элементы $d_3 = ab$, $d_4 = d_3d_3$, $d_5 = d_4d_4$ в итоге получаем

$d_2d_5d_4$
 $d_2bbd_5d_3.$

В окончательном виде первый блок состоит из 3 элементов, второй — из 5. Расширенный алфавит содержит 8 элементов. Из них в итоговых информационных блоках используется 4 элемента. Отображение, соответственно, содержит два цикла длиной 3 и 5 элементов. Нейронная сеть, реализующая динамику этого отображения, содержит 17 элементов во внутреннем слое.

Пример 6. Теперь рассмотрим возможности и особенности метода записи и извлечения текстов на более сложном примере. В качестве записываемой текстовой информации ниже используется английский текст

книги A. A. Miln "Winnie-the-Pooh" [12], общий объем записываемой информации ~ 100 Кбайт. Каждая из десяти глав книги представляется в виде информационного блока и записывается на отдельный цикл. Исходная длина всех записываемых информационных блоков составит при этом 127806 элементов.

Использование алгоритма кодирования с расширением алфавита приводит к уменьшению длины записываемых информационных последовательностей (информационных блоков), представленных в расширенном алфавите по отношению к их исходной длине. На рассматриваемом тексте уменьшение длины происходит примерно в пять раз и, следовательно, в среднем для кодирования одной буквы текста в исходном алфавите требуется не 8 бит (ASCII код) а примерно 1,5 бита. Это значение близко к информативности одной буквы текста на английском языке, которая составляет ~ 1 бит/символ.

При использовании алгоритма записи с расширенным алфавитом, кроме самих информационных последовательностей, представленных в этом алфавите, необходимо хранить дополнительную информацию о самом расширенном алфавите. С учетом этого общий коэффициент сжатия будет около трех.

Ch	Wi	Many
Chri	Win	Many happy
Chris	Winn	Many happy r
Christ	Winni	Many happy ret
Christo	Winnie	Many happy retu
Christop	Winnie —	Many happy retur
Christoph	Winnie — t	Many happy return
Christophe	Winnie — the	Many happy returns
Christopher	Winnie — the — P	Many happy returns of the
Christopher	Winnie — the — Po	Many happy returns of the day
Christopher R	Winnie — the — Poo	
Christopher Ro	Winnie — the — Pooh	
Christopher Rob	Winnie — the — Pooh.	
Christopher Rabi		
Christopher Robin		
Christopher Robin.		
Christopher Robin.		

a)

б)

в)

Рис. 4. Формирование элементов нового алфавита в процессе кодирования последовательностей: а) формирование элемента нового алфавита "Christopher Robin"; б) "Winnie-the-Pooh"; в) "Many happy returns of the day".

Процесс формирования элементов расширенного алфавита обладает рядом закономерностей [13]. На рис. 4 показано, как в процессе работы алгоритма происходит выделение характерных опорных словосочетаний типа имен собственных (Christopher Robin, Winnie-the-Pooh) или часто

встречающихся фраз, например, "Many happy returns of the day". Процесс образования таких структур из исходного алфавита происходит путем накопления новой текстовой информации и использования информации, полученной на предыдущих этапах операции кодирования, причем промежуточные образования (Winnie-, Christopher R и т. д.) редко используются в свернутых последовательностях.

При записи информации на устойчивых циклах динамических систем без использования расширенного алфавита вопрос о восстановлении информации решался достаточно просто [1]. Выбирался фрагмент информационного блока длины большей или равной уровню записи и задавался в качестве начального условия одномерной динамической системы. Путем итерирования отображения система воспроизводила весь записанный информационный блок. В случае применения процедуры кодирования с расширением алфавита эта ситуация полностью сохраняется при работе с фрагментами последовательности, представленными в новом, расширенном алфавите. Если же на этапе восстановления информации предъявляется фрагмент информационного блока в исходном алфавите, необходимо перейти к представлению этого фрагмента в расширенном алфавите.

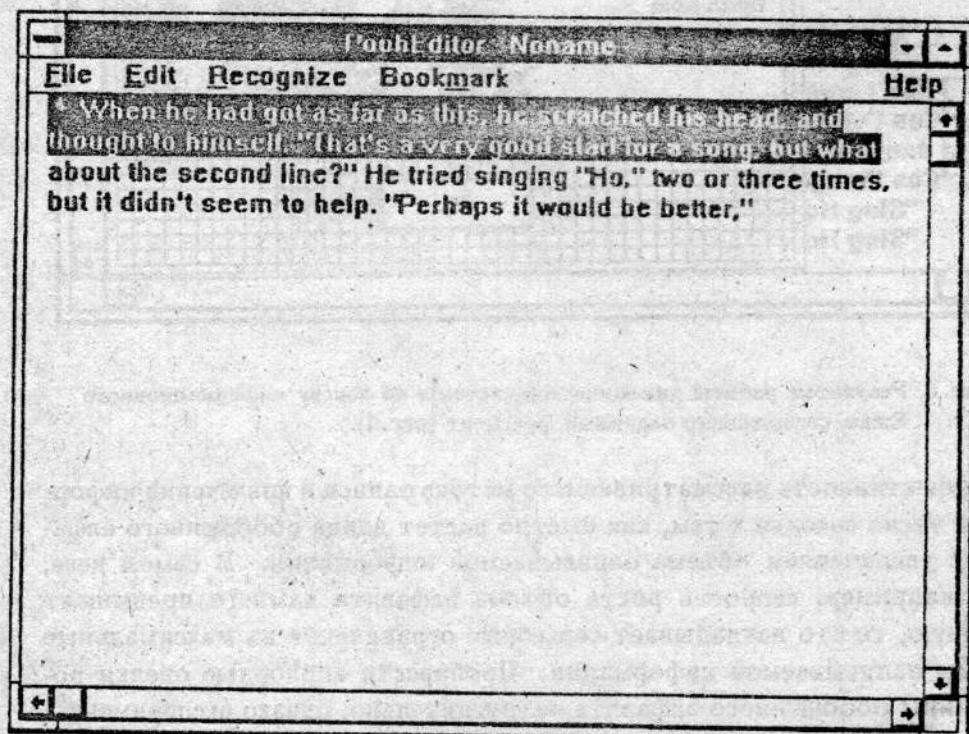


Рис. 5. Фрагмент текста, по которому осуществляется поиск записанной информации.

На рис. 5 приведен пример фрагмента текста, по которому производится поиск записанного текстового образа. На рис. 6 показан информационный блок, который был найден по исходному предъявленному фрагменту. Темным цветом выделена часть фрагмента, по которой был найден этот образ. Нахождение записанного текста возможно не только при безошибочном задании фрагмента, но и при наличии некоторого количества ошибок.

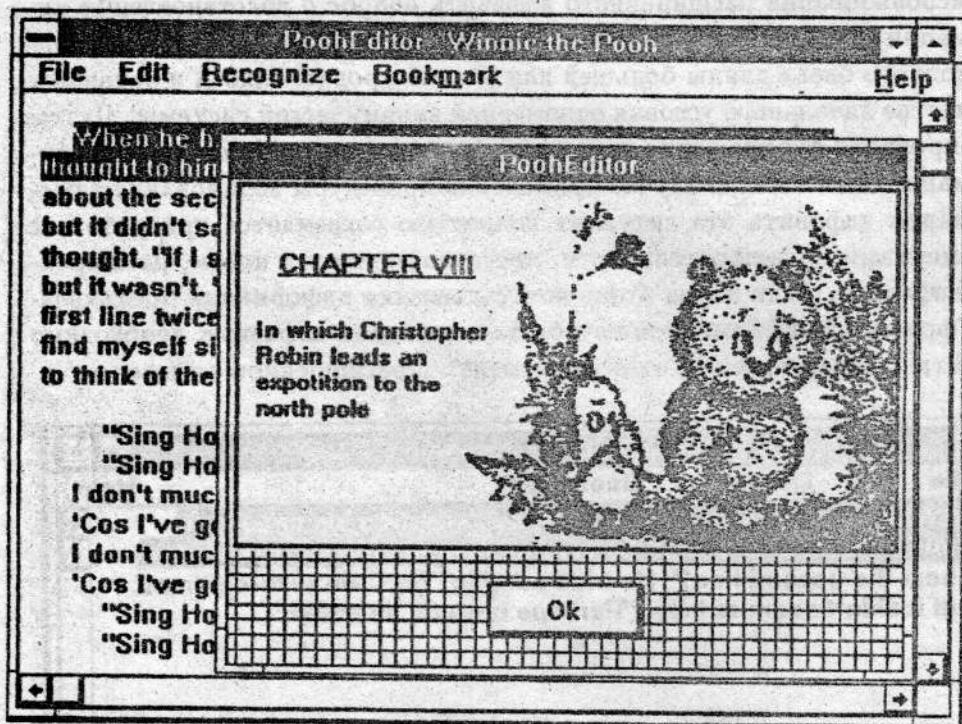


Рис. 6. Результат работы динамической системы по поиску информационного блока, содержащего заданный фрагмент (рис. 5).

Эффективность рассматриваемого метода записи и извлечения информации тесно связана с тем, как быстро растет длина обобщенного алфавита с увеличением объема записываемой информации. В самом деле, если, например, скорость роста объема алфавита намного превышает линейную, то это накладывает серьезные ограничения на максимальные объемы записываемой информации. Произвести априорные оценки роста длины обобщенного алфавита затруднительно, однако эксперименты по кодированию текстовой информации показывают, что длина обобщенного алфавита для связных текстов (например, при записи текста книги A. A. Miln "Winnie-the-Pooh") растет приблизительно линейно с увеличением объема записываемой информации.

Пример 7. В случае реализации динамической системы примера 6 в виде нейронной сети, внутренний слой нейросети при кодировании информационных блоков на втором уровне записи содержит 25561 элемент. При нейросетевом представлении скорость извлечения информации в 15 раз ниже, чем при непосредственном моделировании отображения. Однако, если нейронную сеть реализовать аппаратно, ситуация изменится на противоположную, поскольку теперь для извлечения каждого символа закодированного информационного блока понадобится всего один такт работы сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ряде работ уже обсуждалась возможность использования хаоса и сложной динамики в нейронных сетях для решения задач, связанных с обработкой информации. В частности, в работах [14–15] рассматривались вопросы записи и извлечения временных последовательностей в нейронных сетях, в работе [16] исследовалось обучение последовательной структуре в простых рекуррентных сетях, широкий круг проблем обработки информации, связанный с хаосом, обсуждался Фриманом с соавторами (см. [17] и ссылки там) и т. д.

Следует однако отметить, что в большинстве работ, связанных с использованием хаоса и сложной динамики в нейронных сетях, сама нейронная сеть выступает в роли некоторого "черного ящика", который тренируется по определенным правилам с тем, чтобы, подавая на его вход некоторый входной сигнал, получать на выходе желательный отклик.

В данной работе речь шла о применении сложной динамики и хаоса к записи и обработке информации в рекуррентных нейронных сетях, используемых в качестве аппаратной реализации простых математических моделей типа одномерных кусочно-линейных отображений в себя. Очевидно, что эта концепция существенным образом отличается от концепции рассмотрения нейронной сети как "черного ящика". Следует отметить, что наличие математической модели, которую реализует нейронная сеть подобного типа, приводит к впечатляющей вычислительной эффективности. Еще одним важным свойством таких сетей является ограниченное число межнейронных связей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код 93-012-730).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев А. С. // Радиотехника и электроника, 1991. Т. 36. N 1. С. 101.

2. Dmitriev A. S., Panas A. I., Starkov S. O. // Phys. Lett. A., 1991. V. 155. N'8-9. P. 494.
3. Андреев Ю. В., Бельский Ю. Л., Дмитриев А. С. // Международный семинар "Нелинейные цепи и системы", 1992. С. 51.
4. Andreyev Y. V., Dmitriev A. S., Chua L. O., Wu C. W. // International Journal of Bifurcation and Chaos, 1992. V. 3. N 2. P. 483.
5. Андреев Ю. А., Дмитриев А. С., Старков С. О. Препринт ИРЭ РАН N 2 (584). — Москва, 1993.
6. Андреев Ю. А., Дмитриев А. С. // Радиотехника и электроника, 1994. Т. 39. N 1. С. 104.
7. Дмитриев А. С. // Радиотехника и электроника, 1993. Т. 38. N 1. С. 1.
8. Дмитриев А. С. // Радио, 1993. N 8. С. 3.
9. Андреев Ю. В., Бельский Ю. Л., Дмитриев А. С. // Радиотехника и электроника, 1994. Т. 39. N 1. С. 114.
10. Hornik K., Stinchcombe M., White H. // Neural Networks, 1989. V. 2. P. 359.
11. Hornik K., Stinchcombe M., White H. // Neural Networks, 1990. V. 3. P. 551.
12. Milne A. A. Winnie-the-Pooh. — Methuen & Co. Ltd. London, 1963.
13. Дмитриев А. С., Куминов Д. А., Павлов В. В., Панас А. И. Препринт ИРЭ РАН N 3 (584). — Москва, 1993.
14. Guyon I., Personnaz L., Nadal J.-P., Dreyfus G. // Phys. Rev. A., 1988. V. 38. N 12. P. 6365.
15. Dehaene S., Changeux J. P., Nadal J.-P. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1987. V. 84. P. 2727.
16. Servan-Schreiber D., Cluremans A., McCleland J. L. Advances in Neural Information Processing Systems I. (Carnegie Mellon University). — Morgan Publishers. Inc. Palo Alto, 1989. P. 643.
17. Freeman W. J. // International Journal of Bifurcation and Chaos, 1992. V. 2. N 3. P. 451.

Институт радиоэлектроники РАН

Поступила в редакцию

9 декабря 1993 г.

После переработки

9 марта 1994 г.

DYNAMIC SYSTEMS WITH CHAOS AS A MEDIUM FOR STORING AND
PROCESSING INFORMATION

*Yu. V. Andreev, Yu. L. Belsky, A. S. Dmitriev,
D. A. Kuminov*

The aim of this paper is to demonstrate an ability of an application of complex dynamics to storing and processing information in recurrent neural networks, used as a hardware realization of simple mathematical models of a kind of 1-D piecewise linear maps of a segment into itself.

In Section 1 we give a brief summary of the earlier obtained results on the problem of storing and retrieving information using 1-D maps.

In the second Section a realization of 1-D map dynamics by a recurrent neural network with a single hidden layer is discussed. The network training for a single production of the sequence of the points describing the map function is shown to reduce to simple calculation formulas.

The third Section is devoted to storing and retrieving text patterns using recurrent neural networks.