

УДК 004.8

РЕКУРРЕНТНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ С ДВУМЯ СИГНАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ

В. Ю. Осипов,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Предложен подход к наделению рекуррентной нейронной сети с управляемыми синапсами второй сигнальной системой, позволяющей обрабатывать сигналы в отрыве от непосредственного восприятия действительности. Рассмотрена модель такой сети с расширенными функциональными возможностями. Приведены результаты моделирования, показывающие возможность существенно увеличить глубину обработки информации в нейронной сети.

Ключевые слова — нейронная сеть, модель, вторая сигнальная система.

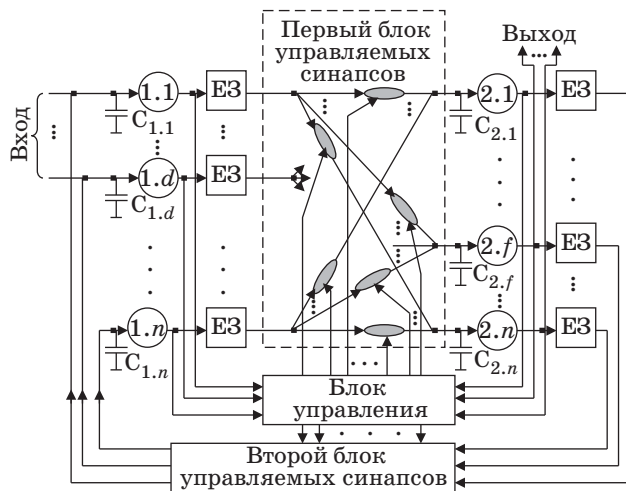
Введение

Искусственные рекуррентные нейронные сети (РНС) продолжают оставаться в центре внимания ученых. Главное свойство РНС — ассоциативное запоминание информации. Однако одной ассоциативности недостаточно для наделения РНС способностью мыслить. Это подтверждают все известные попытки повышения интеллектуальности РНС. В какой-то мере обобщенные возможности РНС пока можно сравнить лишь со свойствами первой сигнальной системы человека и животных. С биологической точки зрения — это формирование условно рефлекторных связей и самих рефлексов по результатам воздействия раздражителей на рецепторы. Несомненно, даже в этих рамках удастся решать с помощью известных РНС ряд полезных прикладных задач распознавания образов и речи, прогнозирования событий и др. Однако для наделения РНС мышлением они должны обладать не только первой, но и второй сигнальной системой, свойственной мозгу человека. Рекуррентные нейронные сети должны иметь возможность обрабатывать информацию в отрыве от непосредственного восприятия действительности. Входные непрерывные воздействия на сеть не должны подавлять обратные результаты распознавания сигналов. Из-за этого подавления глубина обработки информации в РНС остается низкой.

Анализируя известные решения, отметим ряд важных результатов, на которые можно опереться при совершенствовании РНС. Среди них — по-

ложения, касающиеся динамических аспектов РНС, баланса энергии, типов ассоциативной памяти, условий изменения весов синапсов и др. [1–7]. Важным шагом в развитии РНС является введение в состав сетей управляющих элементов [6–8]. Продуктивным оказался учет расстояний между нейронами РНС и их топологической окрестностью [9, 10].

В работах [11, 12] предложена двухслойная РНС с управляемыми синапсами. Особенность этой РНС в том, что в ней при передаче совокупностей единичных образов (ЕО) от слоя к слою их сдвигают вдоль слоев. Посредством этого сеть наделяется логической структурой. Показано, что за счет таких пространственных сдвигов можно реализовать различные схемы продвижения совокупностей ЕО вдоль слоев (линейную, спиральную и др.). Путем моделирования доказано, что наилучшими ассоциативными возможностями обладает сеть со спиральной структурой слоев с изменяемым диаметром спирали [13, 14]. Получены решения, позволяющие сети настраиваться на входные сигналы [15]. Для исключения перегрузки долговременной памяти сети и обеспечения ее устойчивости при обработке сигналов в реальном времени предложено частично отражать совокупности ЕО от слоев сети и частично стирать отраженными совокупностями ранее запомненные результаты [16]. В этой РНС за счет приоритетности коротких связей обеспечивается однозначное соответствие между входом и выходом. Один из вариантов структуры такой РНС приведен на рис. 1, где 1.1, ..., 1.*n*, 2.1, ..., 2.*n* —



■ Рис. 1. Рекуррентная нейронная сеть с управляемыми синапсами

нейроны соответственно первого и второго слоя; $C_{1.1}, \dots, C_{1.n}, C_{2.1}, \dots, C_{2.n}$ — входные емкости нейронов; n — число нейронов в каждом слое; ЕЗ — единичная задержка; синапсы нейронов показаны в виде овалов.

Несмотря на ряд интересных свойств, эта РНС, как и другие известные решения, по возможностям не выходит за пределы первой сигнальной системы человека и животных. Необходимо усовершенствовать эту РНС, наделить ее второй сигнальной системой.

Метод наделения РНС второй сигнальной системой

Для наделения известной РНС [11–16] второй сигнальной системой предлагается дополнительно подавать на ее вход сформированный и преобразованный в последовательные совокупности ЕО специальный групповой сигнал. Этот сигнал должен состоять из полезного сигнала, просуммированного с первой частью предварительно сформированного шума, и из второй такой же части этого шума. В качестве последнего необходимо использовать маломощный по отношению к полезному сигналу шум в полосе частот этого сигнала. Примером его может выступать шум с равномерной спектральной плотностью. Первая и вторая части этого шума могут формироваться путем разветвления его от соответствующего генератора. Такой групповой сигнал представляют в сети в виде последовательных групповых совокупностей ЕО в соответствии с предварительно заданными правилами его распознавания с учетом обратных результатов обработки. Каждая из групповых совокупностей состоит из сигнально-шумовой и шумовой групп.

При передаче групповых совокупностей от слоя к слою копируют из сигнально-шумовых групп ЕО, относящиеся к полезному сигналу, в соответствующие этим группам шумовые группы. В результате из шумовых групп формируют копии сигнально-шумовых групп ЕО. Формирование этих копий и их обработку предлагается осуществлять с учетом изменения форм поперечных сечений расходящихся ЕО и поворотов этих образов вокруг направлений их передачи в зависимости от текущих состояний слоев.

За счет непрерывной подачи в сеть параллельно двух одинаковых частей предварительно сформированного маломощного шума (как при наличии, так и при отсутствии полезного сигнала) между одинаковыми сигнально-шумовыми и шумовыми составляющими устанавливаются и поддерживаются прочные ассоциативные связи через соответствующие синапсы. Посредством этих связей и осуществляется рассматриваемое копирование. В случае, когда за счет изменения форм поперечных сечений расходящихся ЕО и (или) поворотов образов вокруг направлений их передачи функции ослабления этих синапсов стремятся к нулю, такое копирование становится невозможным. Когда оно уже произошло, то копии сигнально-шумовых групп при функциях ослабления соответствующих синапсов, близких к нулю, отрываются от оригиналов и обрабатываются независимо от них с учетом обратных результатов распознавания копий и воздействий на сеть второй части маломощного шума. В этом случае маломощный шум лишь стимулирует функционирование сети и порождает новые условия обработки этих копий. Так как шумовые последовательности ЕО по сравнению с сигнальными последовательностями очень редкие, существенного влияния шум на полезные сигналы не оказывает.

В итоге должно исключаться подавление обратных результатов распознавания копий потоком входных сигналов. Должна увеличиваться глубина обработки информации в нейронной сети, так как увеличивается число циклов обработки обратных результатов распознавания. В качестве основных результатов предлагается использовать результаты обработки последовательных копий сигнально-шумовых групп ЕО на выходном слое сети после обратного преобразования в соответствующие им исходные сигналы.

Пример логической структуры рассматриваемой РНС со сдвигами групповых совокупностей ЕО вдоль слоев представлен на рис. 2 а–в. На рис. 2, а приняты следующие обозначения: $2d$ — величина сдвига совокупностей ЕО по координате X вдоль первой строки (для второй и третьей строк эта величина равна d); q — величина еди-

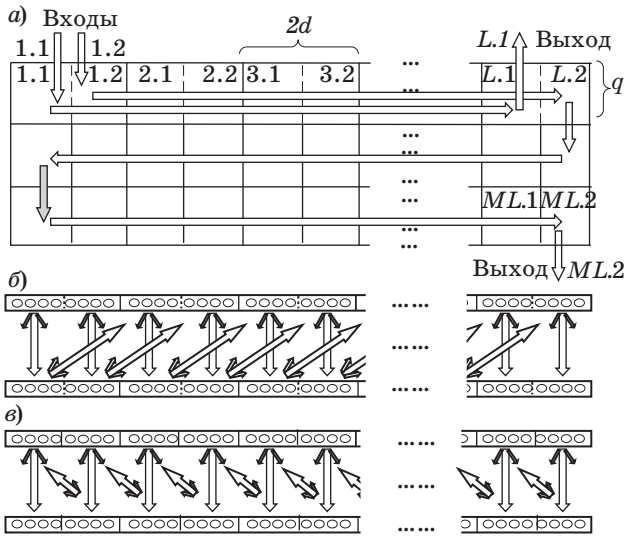


Рис. 2. Логическая структура нейронной сети: а — вид сверху на сеть; б, в — разрезы сети по двум слоям, соответственно, по первой и второй строкам

ничного сдвига совокупностей ЕО по координате Y ; 1.1 и 1.2, 2.1 и 2.2, 3.1 и 3.2, ..., $L.1$ и $L.2$, $ML.1$ и $ML.2$ — одинаковые подполя первой строки и поля второй и третьей строк в слоях сети, формируемые за счет сдвигов групповых совокупностей ЕО вдоль слоев при передаче от слоя к слою. Стрелками на рисунках показаны направления продвижения совокупностей ЕО и составляющих их сигнально-шумовых и шумовых групп. Заметим, что сигнально-шумовые группы ЕО, согласно этим рисункам, подаются на первое подполе первого поля первого слоя (вход 1.1), а шумовые группы — на второе подполе (вход 1.2). Основным выходом сети выступает не выход $L.1$, а выход $ML.2$. Если смотреть на это формально с позиции приоритетности коротких связей между нейронами, то выходные сигналы формируются из второй части шума. Однако это не совсем так. Одинаковый маломощный шум, подаваемый на первый и второй входы сети, формирует необходимые ассоциативные связи для копирования сигнально-шумовых групп ЕО в шумовые группы. При наличии полезного сигнала и соблюдении ряда условий по направленности ассоциативного взаимодействия ЕО такое копирование осуществляется по общим правилам ассоциативного вызова информации из памяти сети. Пример групповой совокупности ЕО, поясняющий копирование, показан на рис. 3, а, б.

Примеры сглаженных, ориентированных на 90° в плоскости принимающего слоя эллиптических форм поперечных сечений расходящихся ЕО представлены на рис. 4. Здесь 1 — нейрон передающего слоя, формирующий ЕО, относящийся

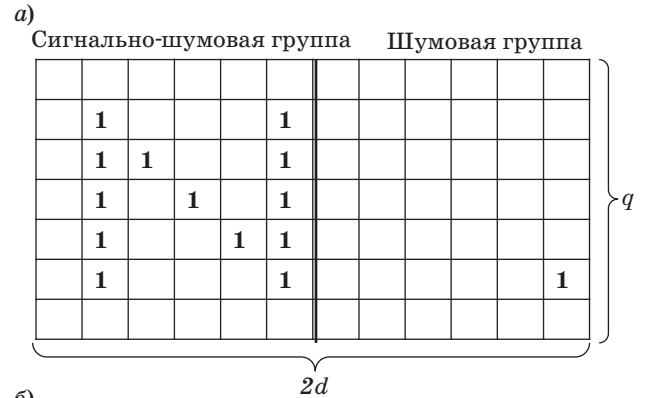


Рис. 3. Пример копирования ЕО из одной группы в другую: а — до передачи групповой совокупности от одного слоя к другому; б — после передачи

ся к сигнально-шумовой группе; 2 — нейрон передающего слоя, формирующий ЕО, относящийся к шумовой или к копии сигнально-шумовой группы; 3, 4 — короткие синапсы, для которых функция ослабления равна единице; 5, 9 — нейроны принимающего слоя, в направлении которых соответственно, от нейрона 1 и нейрона 2, передаются расходящиеся ЕО; 6 — сглаженная форма поперечного сечения расходящегося ЕО; 7 — ось максимальной протяженности распределения плотности мощности в поперечном сечении расходящегося ЕО, передаваемого от нейрона 1 в направлении нейрона 5; 8 — штрихпун-

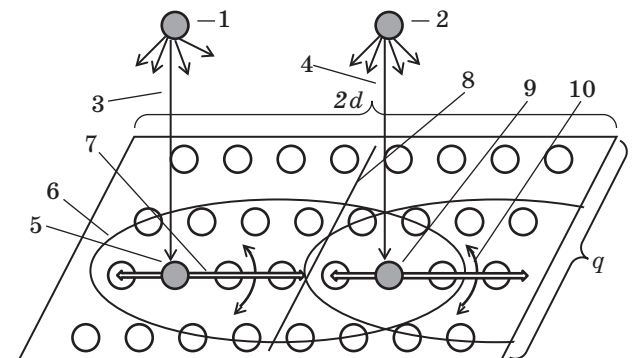


Рис. 4. Сглаженные эллиптические формы поперечных сечений расходящихся ЕО

ктирная линия, разделяющая поля принимающего слоя на подполя; 10 — направления поворота оси максимальной протяженности распределения плотности мощности в поперечном сечении расходящегося ЕО. Точками, вокруг которых осуществляются повороты, в рассматриваемом случае выступают нейроны 5 и 9 , в направлении их, соответственно от нейрона 1 и нейрона 2 , передаются расходящиеся ЕО.

Путем изменения форм поперечных сечений расходящихся ЕО и за счет поворотов этих образов вокруг направлений их передачи с учетом текущих состояний слоев можно существенно влиять на взаимосвязь обрабатываемых в сети полезных сигналов и их копий, что видно из рис. 4.

Применение предлагаемых решений позволяет наделить РНС второй сигнальной системой. Под второй сигнальной системой в нашем случае понимается совокупность элементов сети и связей между ними, способных обрабатывать сигналы в отрыве от непосредственного восприятия действительности. Эта система функционирует параллельно с первой сигнальной системой. Несмотря на относительную простоту предлагаемой второй сигнальной системы, ей свойственны возможности обобщения бесчисленных сигналов первой сигнальной системы. Сеть со второй сигнальной системой может не только воспринимать, запоминать и ассоциативно вызывать из памяти запомненные сигналы, но и глубоко их обрабатывать без подавления входным потоком, генерировать новые сигналы. При этом выход сети всегда остается совместим с входом.

В качестве результатов функционирования РНС используют результаты обработки копий сигнально-шумовых групп с выхода $ML.2$ сети после обратного преобразования в соответствующие им исходные сигналы.

Рассмотрим особенности математической модели РНС с двумя сигнальными системами.

Усовершенствованная математическая модель РНС

В рассматриваемой нейронной сети различают прямые $w_{ij}(t)$ и обратные $w_{ji}^*(t)$ веса синапсов. Их предлагается определять с учетом коэффициентов $G_{ij}(t)$ направленности форм поперечных сечений расходящихся ЕО в направлении от i -х к j -м нейронам как $w_{ij}(t) = k_{ij}(t) \cdot \beta_{ij}(r_{ij}(t), G_{ij}(t))$ и $w_{ji}^*(t) = k_{ji}^*(t) \cdot \beta_{ji}(r_{ji}(t), G_{ij}(t))$, где $k_{ij}(t)$, $k_{ji}^*(t)$ — весовые коэффициенты соответственно прямых и обратных весов синапсов; $\beta_{ij}(r_{ij}(t), G_{ij}(t))$ — функция ослабления синапсов, зависящая от $G_{ij}(t)$; $r_{ij}(t)$ — удаленность связываемых через синапсы нейронов (расстояние между ними на плоскости X, Y).

Полагая, что расстояние между взаимодействующими слоями нейронной сети стремится к нулю, функцию $\beta_{ij}(r_{ij}(t), G_{ij}(t))$ предлагается задавать в виде

$$\beta(r_{ij}(t), G_{ij}(t)) = 1 / (1 + \vartheta \cdot r_{ij}^h(t) / G_{ij}(\varphi_{ij} + \psi_i(\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t}))),$$

$$i = \overline{1, N}; j = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где ϑ — положительный постоянный коэффициент; h — степень; $\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t}$ — текущие состояния первого и второго слоев сети; N — число нейронов в каждом слое РНС.

Входящая в (1) величина $r_{ij}(t)$ в единицах нейронов в зависимости от реализуемых пространственных сдвигов групповых совокупностей ЕО вдоль слоев определяется по формуле

$$r_{ij}(t) = ((\Delta x_{ij} + n_{ij}(\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t}) \cdot d)^2 + (\Delta y_{ij} + m_{ij}(\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t}) \cdot q)^2)^{1/2}, \quad (2)$$

$$n_{ij}(\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t}) = \pm 0, 1, \dots, L-1;$$

$$m_{ij}(\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t}) = \pm 0, 1, \dots, M-1,$$

где $\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}$ — проекции связи i -го нейрона с j -м на оси X, Y без учета пространственных сдвигов; d, q — величины единичных сдвигов, соответственно, по координатам X, Y ; L, M — число столбцов и строк соответственно, на которые разбивается каждый слой нейронной сети за счет сдвигов. Произведение $d \times q$ определяет площадь рабочего поля каждого слоя сети. Эта площадь равна числу входящих в поле нейронов.

Коэффициент $G_{ij}(t)$, присутствующий в (1), для эллиптической формы поперечного сечения расходящегося ЕО с поворотом его вокруг одного из полюсов можно определить как $G_{ij}(t) = (1/r_0)(x_{ij}^2(t) + y_{ij}^2(t))^{1/2}$, где r_0 — единичный радиус;

$$x_{ij}(t) = a_i \sin(\varphi_{ij} + \psi_i(\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t})) - C_i; \quad (3)$$

$$y_{ij}(t) = b_i \cos(\varphi_{ij} + \psi_i(\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t})). \quad (4)$$

Здесь a_i — большая полуось эллипса как формы поперечного сечения расходящегося ЕО от i -го нейрона; b_i — малая полуось этого эллипса; C_i — сдвиг формы по оси X ; $\varphi_{ij} = \arcsin(\Delta x_{ij}/r_{ij})$, при этом r_{ij} определяется согласно (2) при условиях $n_{ij} = 0$ и $m_{ij} = 0$; $\psi_i(\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t})$ — угол поворота сформированного i -м нейроном расходящегося ЕО вокруг направления его передачи (поворота формы поперечного сечения) в зависимости от текущих состояний $\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t}$ первого и второго слоев сети. Речь в рассматриваемом случае идет о предельно возможных формах поперечных сечений расходящихся ЕО, определяемых при условии

стремления весовых коэффициентов синапсов к единице.

Весовые коэффициенты $k_{ij}(t)$, $k_{ij}^*(t)$ прямых $w_{ij}(t)$ и обратных $w_{ij}^*(t)$ весов синапсов являются функциями числа $g_{ij}(t)$, запомненных на них ЕО. Значения весовых коэффициентов $k_{ij}(t)$, $k_{ij}^*(t)$ рассчитываются по формулам [16]

$$k_{ij}(t) = 1 - \exp(-\gamma \cdot g_{ij}(t));$$

$$k_{ij}^*(t) = 1 - \exp(-\gamma \cdot (g_{ij}(t) - g_0)),$$

где γ — постоянный положительный коэффициент; $(g_{ij}(t) - g_0)$ — число запомненных ЕО, которые могут быть стерты с синапса, $g_0 = \text{const}$. Все $k_{ij}^*(t)$ при $g_{ij}(t) < g_0$ считаются равными нулю.

При протекании тока от возбужденных нейронов через одни синапсы в прямом направлении на них запоминаются текущие результаты распознавания. Такому запоминанию соответствует увеличение прямых и обратных весов (прямой и обратной проводимости) этих синапсов. В этом случае $g_{ij}(t) = g_{ij}(t-1) + B(I_{ij}(t))$, где $g_{ij}(t-1)$ — число ЕО, запомненных на синапсе на предыдущем временном такте; $B(I_{ij}(t))$ — эффект от взаимодействия нейронов при протекании тока $I_{ij}(t)$ через синапс в прямом направлении.

При прохождении тока встречно через другие синапсы их прямые и обратные веса (обратные и прямые проводимости) уменьшаются. Величину $g_{ij}(t)$ в зависимости от этого тока $I_{ij}^*(t)$ стирания, при условии, что $g_{ij}(t-1) - g_0 \geq B^*(I_{ij}^*(t))$, можно определить как $g_{ij}(t) = g_{ij}(t-1) - B^*(I_{ij}^*(t))$, иначе $g_{ij}(t) = g_{ij}(t-1)$, где $B^*(I_{ij}^*(t))$ — эффект от взаимодействия нейронов при протекании тока $I_{ij}^*(t)$ через синапс в обратном направлении. В частном случае $B(I_{ij}(t)) = AI_{ij}(t)$, а $B^*(I_{ij}^*(t)) = DI_{ij}^*(t)$, где A, D — константы, причем D должно быть больше A .

Для определения токов $I_{ij}(t)$, $I_{ij}^*(t)$ допускается, что количество заряда Q , переносимого от каждого элемента единичной задержки (на которые поступают ЕО (импульсы)) к синапсам, постоянно, не зависит от того, как изменяются их веса. Тогда можно оперировать некоторой средней амплитудой тока \bar{I}_0 , переносящего заряд Q за некоторый средний промежуток времени Δt : $Q = \bar{I}_0 \cdot \Delta t = \text{const}$.

С учетом этого амплитуду импульсного тока, проходящего в прямом направлении через каждый синапс относительно момента времени t , можно определить как

$$I_{ij}(t) = \bar{I}_0 \cdot w_{ij}(t) \cdot \delta_i(t) / \sum_{j=1}^n w_{ij}(t),$$

где $w_{ij}(t)$ — прямые веса (проводимости) синапсов; $\delta_i(t)$ — функция, принимающая значение 1, когда i -й нейрон возбужден, и 0 — в других слу-

чаях; n — число нейронов в каждом слое. Полагается, что входное сопротивление нейронов существенно меньше сопротивления отдельных синапсов.

На вход каждого j -го нейрона принимающего слоя от возбужденных нейронов передающего слоя на текущем такте функционирования сети поступает суммарный импульсный ток

$$I_{j\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n I_{ij}(t).$$

Поступающие на входы j -х нейронов ЕО (импульсы) частично воспринимаются этими нейронами и частично отражаются к передающему слою с коэффициентом отражения $K_j(t) = I_{j\Sigma}^*(t) / I_{j\Sigma}(t)$, который можно определить в зависимости от параметров цепи как искусственной длинной линии, связывающей возбужденный нейрон с возбуждаемым нейроном, где $I_{j\Sigma}^*(t)$ — суммарный ток отражения ЕО от j -го нейрона. В частном случае

$K_j(t) = 1 - 2 / \left(1 + \sqrt{\chi / R_{j\Sigma}^*(t)} \right)$, где $\chi = \pi \cdot R_{\text{вх}}^2 \cdot \bar{N} / \tau_e = \text{const}$; $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление нейрона; C — емкость цепи; τ_e — длительность ЕО (импульса). Видно, что изменение $K_j(t)$ во времени зависит

только от изменения $R_{j\Sigma}^*(t) = 1 / \sum_{i=1}^n w_{ij}^*(t)$.

Зная $K_j(t)$ и $I_{j\Sigma}(t)$, можно найти суммарный ток $I_{j\Sigma}^*(t)$ отражения ЕО от j -го нейрона: $I_{j\Sigma}^*(t) = I_{j\Sigma}(t) \cdot K_j(t)$. Токи, протекающие встречно через отдельные синапсы, можно определить как

$$I_{ij}^*(t) = I_{j\Sigma}^*(t) \cdot w_{ij}^*(t) \cdot \bar{\delta}_i(t) / \sum_{i=1}^n w_{ij}^*(t),$$

где $\bar{\delta}_i(t)$ принимает значение 0, когда i -й нейрон возбужден, и 1 — в других случаях.

Ток, протекающий через входное сопротивление j -го нейрона, равен $I_{j\text{вх}}(t) = I_{j\Sigma}(t) - I_{j\Sigma}^*(t)$. В случае, когда j -й нейрон находится в состоянии ожидания и $I_{j\text{вх}}(t) \geq I_{\text{пор}}$ или $I_{j\text{вх}}(t) \cdot R_{\text{вх}} \geq U_{\text{пор}}$, нейрон возбуждается и на его выходе формируется ЕО ($I_{\text{пор}}$ — пороговое значение входного тока; $U_{\text{пор}}$ — пороговое значение напряжения).

Изменять ориентацию распределения плотности мощности в поперечных сечениях расходящихся ЕО (поворачивать эти образы вокруг направлений их передачи) с учетом текущих состояний слоев можно в зависимости от числа ассоциативно вызываемых из памяти сети ЕО. Примером предварительно заданных жестких правил поворотов выступают повороты ЕО на заданные углы тогда, когда ЕО формируются нейронами заданных полей, строк или столбцов нейронов в слоях сети. Изменение формы поперечных сечений в рассматриваемом случае осуществимо через задание новых значений параметров a_j , b_j и C_j в (3), (4). При $a_j = b_j$ имеем круговую форму.

В соответствии с этими правилами повороты расходящихся ЕО вокруг направлений их передачи и изменение форм поперечных сечений этих образов позволяют исключать подавление входным потоком обратных результатов распознавания копий сигнально-шумовых групп во второй сигнальной системе нейронной сети.

Результаты моделирования

Для подтверждения наличия у предлагаемой двухслойной РНС отмеченных новых возможностей была разработана ее программная модель. В этой модели за счет пространственных сдвигов передаваемых совокупностей ЕО от слоя к слою каждый слой сети, состоящий из 2016 нейронов, разбивался на три строки по 8 логических полей размером 12×7 нейронов в каждом. При этом дополнительно каждое поле условно делилось на два подполя по 6×7 нейронов.

Последовательные сигнально-шумовые группы ЕО вводились в сеть через первое подполе первого поля, а шумовые группы — через его второе подполе. Сигнально-шумовые и шумовые группы совместно продвигались вдоль слоев только с первого по восьмое поле. Затем сигнально-шумовые группы покидали сеть, а шумовые группы со скопированными в них (из сигнально-шумовых групп) ЕО, относящимися к полезным сигналам, продвигались вдоль слоев сети дальше до последнего поля. Направления продвижения всех этих групп ЕО вдоль слоев сети такие же, как и на рис. 2. Результаты обработки входных сигналов снимались с последнего поля сети. Была предусмотрена возможность изменения форм и направленности поперечных сечений расходящихся ЕО, передаваемых от слоя к слою в нейронной сети. При переходе от круговой к эллиптической форме этих сечений предоставлялась возможность задания ее ориентации из четырех значений углов: 0, 90, 180, 270°.

Для подтверждения возможностей копирования ЕО из сигнально-шумовых групп в шумовые группы на вход сети сначала подавались одинаковые по содержанию группы. Затем в сеть вводились отличающиеся друг от друга сигнально-шумовые и шумовые группы. Установлено, что при круговой форме и эллиптической форме с ориентацией 90° осуществимо успешное копирование сигнально-шумовых групп в шумовые группы. На рис. 5, а—в показаны три последовательных состояния первого слоя сети при восприятии второй сигнальной системой входных сигналов в виде последовательных копий сигнально-шумовых групп, составляющих слово «NEURON», записанное в обратном порядке. Каждой букве соответствовала только одна группа.

а) Введенные в сеть сигнально-шумовые группы единичных образов Копии

				NN		OO	
	N		E		U		R

б)

					NN		OO
N		E		U		R	

в)

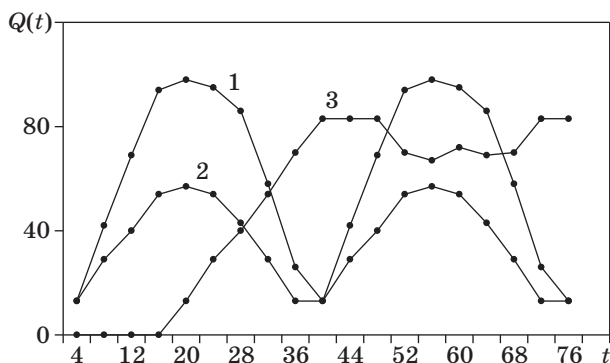
						NN	
	E		U		R		O
N							

■ Рис. 5. Первое (а), второе (б) и третье (в) последовательные состояния первого слоя сети при восприятии сигналов второй сигнальной системой

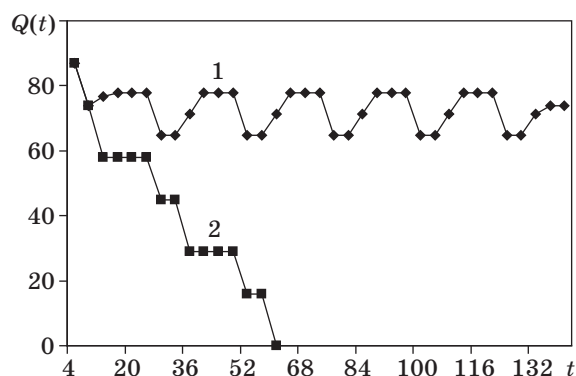
Второй сигнальной системой уже воспринята часть этого слова в виде «neur..» (см. рис. 5, а). При этом уже завершено копирование двух оставшихся букв. Результаты копирования показаны на первой строке слоя. Рис. 5, б относительно рис. 5, а отражает ситуацию сдвига сигнально-шумовых и шумовых групп вдоль слоев. Вдоль первой и третьей строк сдвиги осуществляются слева направо, а вдоль второй строки — справа налево. Согласно рис. 5, в, второй сигнальной системой воспринята очередная буква «О».

В случае ориентации эллиптических форм на 0 и 180° копирование сигнально-шумовых групп в шумовые группы на первой строке не происходило и входные сигналы не попадали во вторую сигнальную систему нейронной сети. Вторая и третья строки слоев сети не заполнялись копиями входных сигналов от первой сигнальной системы.

Зависимости числа $Q(t)$ ЕО на первой и остальных строках слоев сети от времени ее функционирования (в единицах тактов) для двух различных случаев представлены на рис. 6. Кривая 1 отражает ситуацию, при которой наблюдается успешное копирование сигнально-шумовых групп ЕО в шумовые группы. Такое копирование происходит только на первой строке слоев сети, так как оригиналы сигнально-шумовых групп, пройдя по ней, покидают сеть. Ситуации отсутствия копирования соответствует кривая 2. Провалы в середине кривых 1, 2 объясняются покиданием сети первой последовательностью сигнально-шумовых групп ЕО и последующим вво-



■ Рис. 6. Результаты заполнения слоев сети ЕО в зависимости от времени



■ Рис. 7. Результаты активности второй сигнальной системы

дом в сеть второй последовательности. Кривая 3 показывает, как заполняется вторая сигнальная система сети (вторая и третья строки слоев) копиями сигнально-шумовых групп. Если такое заполнение не прерывать, то возможности сети по обработке обратных результатов распознавания этих копий крайне ограничены.

Путем моделирования установлено, что при отрыве обработки информации во второй сигнальной системе от непосредственного восприятия действительности за счет ориентации эллиптических форм поперечных сечений расходящихся ЕО на 0° существенно увеличивается число циклов обработки обратных результатов распознавания. Зависимости от времени числа $Q(t)$ ЕО во второй сигнальной системе, оторванной от пер-

вой системы, показаны на рис. 7. Кривая 1 соответствует случаю циклического вызова информации из памяти сети текущими результатами распознавания при ориентации эллиптических форм поперечных сечений расходящихся ЕО на 0° . Кривая 2 характеризует случай отсутствия такого вызова. Введенные во вторую сигнальную систему последовательные копии сигнально-шумовых групп постепенно покидают ее.

Все эти результаты моделирования подтверждают наличие у предлагаемой РНС новых функциональных возможностей.

Заключение

Предложен подход к наделению РНС с управляемыми синапсами второй сигнальной системой. Принципиальное отличие второй сигнальной системы от первой состоит в том, что она способна обрабатывать информацию в отрыве от непосредственного восприятия действительности. Для обеспечения такого отрыва и расширения возможностей сети по избирательному запоминанию и ассоциативному вызову информации из памяти предлагается изменять форму поперечных сечений расходящихся ЕО, передаваемых от слоя к слою, и поворачивать эти образы вокруг направлений их передачи с учетом текущих состояний слоев. Это достижимо за счет изменения функций ослабления синапсов по разработанным правилам.

Наличие у РНС второй сигнальной системы позволяет существенно увеличить глубину обработки информации и в перспективе научить сеть осмысленно реагировать различными сигналами (в том числе речевыми) на происходящие события.

Предлагаемую РНС с расширенными возможностями можно отнести к процессорам, сочетающим в себе не только ассоциативное, но и адресное обращение к памяти. Адресация в них проявляется через изменение направленности ассоциативного взаимодействия сигналов (за счет изменения форм и ориентации поперечных сечений расходящихся ЕО, передаваемых от слоя к слою, с учетом текущих состояний слоев сети). Учитывая это, предлагаемую нейронную сеть можно назвать ассоциативно-адресным нейросетевым процессором.

Литература

1. Amari S. Dreaming of mathematical neuroscience for half a century // *Neural Networks*. 2013. N 37. P. 48–51.
2. Hopfield J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities //

Proc. National Academy of Science USA. 1982. Vol. 79. P. 2554–2558.

3. Palm G. Neural associative memories and sparse coding // *Neural Networks*. 2013. N 37. P. 165–171.

4. Pentti O. A. Haikonen. The Role of Associative Processing in Cognitive Computing // Cognitive Computing. 2009. N 1. P. 42–49.
5. Galushkin A. I. Neural Networks Theory. — Berlin: Springer-Verlag, 2007. — 396 p.
6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд.: пер. с англ. — М.: Вильямс, 2006. — 1103 с.
7. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с польского И. Д. Рудницкого. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 344 с.
8. Grossberg S. Adaptive Resonance Theory: How a brain learns to consciously attend, learn, and recognize a changing world // Neural Networks. 2013. N 37. P. 1–47.
9. Kohonen T. The self organizing map // Proc. of IEEE. 1990. Vol. 78. P. 1464–1479.
10. Kohonen T. Essentials of the self-organizing map // Neural Networks. 2013. N 37. P. 52–65.
11. Осипов В. Ю. Ассоциативная интеллектуальная машина // Информационные технологии и вычислительные системы. 2010. № 2. С. 59–67.
12. Осипов В. Ю. Рекуррентная нейронная сеть с управляемыми синапсами // Информационные технологии. 2010. № 7. С. 43–47.
13. Осипов В. Ю. Оптимизация ассоциативных интеллектуальных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 3. С. 35–39.
14. Осипов В. Ю. Рекуррентная нейронная сеть со спиральной структурой слоев // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6. С. 28–32.
15. Осипов В. Ю. Метод настройки ассоциативной интеллектуальной системы на входные сигналы // Информационные технологии. 2012. № 9. С. 54–59.
16. Осипов В. Ю. Стирание устаревшей информации в ассоциативных интеллектуальных системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 3. С. 16–20.

Уважаемые подписчики!

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2010 гг. в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>) и на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>). Печатную версию архивных выпусков журнала за 2003–2010 гг. Вы можете заказать в редакции по льготной цене.

Журнал «Информационно-управляющие системы» выходит каждые два месяца. Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 3600 рублей, для подписчиков стран СНГ — 4200 рублей, включая НДС 18 %, почтовые и таможенные расходы.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья) вы можете подписаться на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05, эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47, эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: Alfimov@viniti.ru, сайт: <http://www.informnauka.com>

«Гал»

Москва, тел.: (495) 603-27-28, 603-27-33, 603-27-34, сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>

«ИНТЕР-ПОЧТА-2003»

Москва, тел.: (495) 500-00-60, 580-95-80, эл. почта: interpochta@interpochta.ru, сайт: <http://www.interpochta.ru>

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, эл. почта: krasnodar@interpochta.ru

Новороссийск, тел.: (8617) 670-474

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru, сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru, сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html>

и др.