

В.Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, НТУ "ХПИ",
И.П. ХАВИНА, НТУ "ХПИ"

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Розроблена дискретна нейрона мережа адаптивної резонансної теорії, що дозволяє урахувати схожість чорно-білих зображень за усіма елементами зображень та визначати два або більш рівноцінних рішень у задачах розпізнавання.

The discrete neural network of the adaptive resonant theory was developed, allowing to define similarity of black-and-white images on all elements of images and to allocate two or more equivalent decisions in problems of recognition.

Постановка проблемы и анализ литературы. Нейронные сети успешно применяются для решения разнообразных сложных задач, в том числе, и задач распознавания. Известен целый ряд нейронных сетей, которые могут эффективно применяться при разработке различных систем распознавания при наличии полной информации о распознаваемых изображениях [1 – 6]. Требование полноты исходной информации связано с тем, что большинство нейронных сетей не обладают свойством пластичности и стабильности (т.е. способностью воспринимать новую информацию без искажения или потери уже имеющейся) [6]. Поэтому системы распознавания на основе большинства нейронных сетей нельзя дообучить распознаванию даже одного нового класса изображений, а необходимо выполнить полное переобучение сети. Очевидно, что системы распознавания на основе таких нейронных сетей весьма проблематично использовать в реальных системах управления с существенной априорной неопределенности. Кроме того, такие системы распознавания, как правило, не могут выделять новую информацию, и любое входное изображение относят к одному из уже известных классов. Проблемы стабильности – пластичности и обнаружения новой информации решены в немногих нейронных сетях, к которым относятся и нейронные сети адаптивной резонансной теории (АРТ) [6 – 8]. Появление нейронных сетей АРТ существенно расширило возможности создания эффективных систем распознавания для работы в условиях, когда необходимо оперативно выделять и запоминать новую информацию. Однако и нейронные сети АРТ обладают недостатками. В частности, дискретная нейронная сеть АРТ-1, запоминающая и распознающая черно-белые изображения, при оценке сходства входного изображения и изображения, хранящегося в весах связей сети, использует только черные элементы изображений. Это накладывает заметные ограничения на область применения. Еще один недостаток систем распознавания на основе нейронных сетей АРТ-1 связан с тем, что эти сети

выдают единственное решение даже в случаях, когда имеется два или более равноценных решения.

Цель статьи – разработка новой архитектуры и алгоритмов функционирования дискретных нейронных сетей АРТ, определяющих сходство изображений по всем элементам черно-белых изображений и позволяющих определять два или более равноценных решения в задачах распознавания.

Архитектура и алгоритмы функционирования новой дискретной нейронной сети. Архитектура новой сети, обозначенной АРТ-1*h*, приведена на рис. 1. Ее основу составляют два модуля M_1 и M_2 (показано пунктиром), являющихся дискретными нейронными сетями АРТ-1 (рис. 2), архитектура и алгоритмы функционирования которых детально описаны в работе [8]. Каждый из модулей имеет три слоя нейронов:

- входной слой чувствительных S -нейронов, воспринимающих бинарные входные векторы (или черно-белые изображения, где черное кодируется единицами, а белое – нулями);
- Z -слой интерфейсных бинарных нейронов;
- Y -слой распознающих нейронов.

Каждый модуль нейронной сети АРТ-1*h* имеет также по три управляющих нейрона R , G_1 , G_2 . Будем кодировать нейроны и сигналы в модуле M_1 верхним индексом "1", а в модуле M_2 – верхним индексом "2". Сеть имеет также слой U выходных нейронов U_1, \dots, U_d ($d \geq m$) и три управляющих нейрона G_3 , G_4 и R_2 .

Нейроны S_i^p , Z_i^p , G_1^p , G_2^p ($p = 1, 2$; $i = \overline{1, n}$), U_q ($q = \overline{1, d}$), G_3 , G_4 и R_2 в любой момент времени находятся в одном из двух состояний: 0 или 1.

Нейроны R_1^1 и R_1^2 имеют по два выхода:

- бинарный выход (первый выход нейронов), единичный сигнал с которого затормаживает нейрон-победитель Y_j своего модуля, если входное изображение и изображение, хранящееся в весах связей нейрона-победителя, не подходят к друг другу по параметру сходства (см. рис. 2);
- непрерывный выход, с помощью которого значение параметра сходства соответствующего модуля передается на вход нейрона R_2 .

Нейрон R_2 имеет два бинарных выхода, возбуждающий сигнал с первого выхода поступает на входы нейронов U -слоя, если входное изображение и изображение, хранящееся в модуле нейронной сети, похожи по параметру сходства. В противном случае тормозящий сигнал со второго бинарного выхода нейрона затормаживает нейроны-победители в Y -слоях обоих модулей сети.

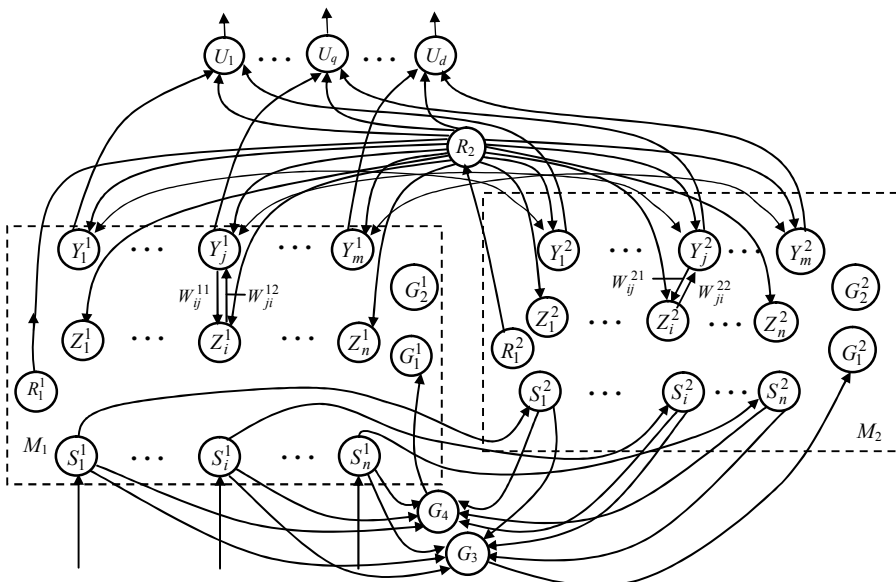


Рис. 1. Архитектура сети АРТ-1h

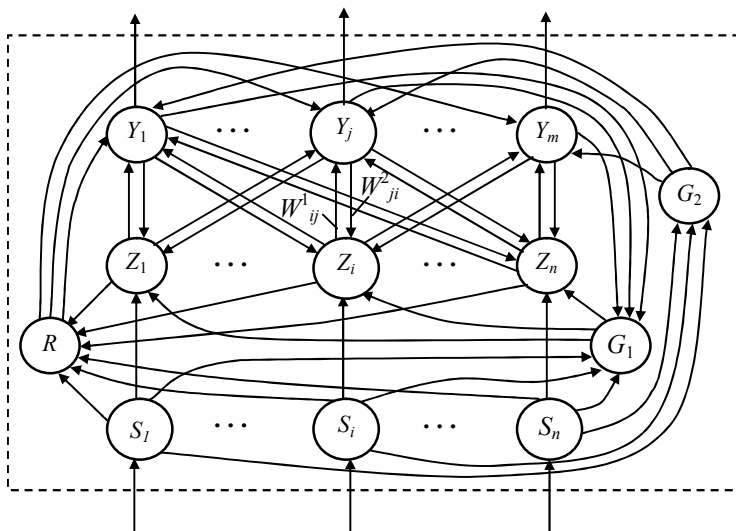


Рис. 2. Архитектура нейронной сети АРТ-1

Нейроны Y -слоев обоих модулей могут находиться в одном из следующих состояний:

– активен, модуль p ($p=1, 2$) сети функционирует в режиме определения выходных сигналов нейронов распознающего слоя, выходной сигнал $U_{\text{ВЫХ}} Y_j^p$ удовлетворяет условию $0 \leq U_{\text{ВЫХ}} Y_j^p \leq 2$ и определяется выходными сигналами Z^p -элементов;

– активен, $U_{\text{ВЫХ}} Y_j^p = 1$, нейрон Y_j^p является победителем в модуле M_p ($p=1, 2$) при текущем предъявлении входного изображения в результате латерального процесса в слое распознающих нейронов;

– активен, $U_{\text{ВЫХ}} Y_j^p = 1$, нейрон Y_j^p переведен в активное состояние нейроном-победителем соседнего модуля;

– неактивен, $U_{\text{ВЫХ}} Y_j^p = 0$, нейрон установлен в начальное состояние или проиграл соревнование с другими нейронами при текущем предъявлении входного изображения;

– заторможен, $U_{\text{ВЫХ}} Y_j^p = -1$, нейрон исключен из соревнования при текущем предъявлении входного изображения, поскольку хранящаяся в весах связей нейрона информация не удовлетворяет этому изображению.

Предположим, что сеть обучена и функционирует в режиме распознавания при предъявлении бинарного входного изображения

$U_{\text{ВХ}}^r = (U_{\text{ВХ} 1}^r, U_{\text{ВХ} 2}^r, \dots, U_{\text{ВХ} n}^r)$. Вектор входных сигналов $(U_{\text{ВХ} 1}^r, U_{\text{ВХ} 2}^r, \dots, U_{\text{ВХ} n}^r)$

поступает на входы нейронов S_i^1 ($i = \overline{1, n}$) рассматриваемой сети:

$U_{\text{ВХ}} S_i^1 = U_{\text{ВХ} i}^r$ ($i = \overline{1, n}$). Выходные сигналы этих элементов

$U_{\text{ВЫХ}} S_i^1 = U_{\text{ВХ}} S_i^1$ ($i = \overline{1, n}$) поступают на соответствующие входы нейронов

S_i^2 ($i = \overline{1, n}$). Нейроны слоя S^2 инвертируют свои входные сигналы:

$U_{\text{ВЫХ}} S_i^2 = U_{\text{ВХ}} S_i^2 \oplus 1$, где $i = \overline{1, n}$, \oplus – операция сложения по модулю два.

Сигналы с выходов всех нейронов слоя S^p ($p=1, 2$) поступают соответственно на входы нейронов G_1^p , G_2^p ($p=1, 2$), G_3 , G_4 (см. рис. 1, 2).

Нейроны G_1^p , G_2^p ($p=1, 2$) переводятся в активное состояние (т.е. полагаем, что входной вектор $U_{\text{ВХ}}^r$ содержит как единичные, так и нулевые входные компоненты). Если выполняется неравенство

$$\sum_{i=1}^n U_{\text{ВЫХ}} S_i^1 - \sum_{i=1}^n U_{\text{ВЫХ}} S_i^2 \geq 0, \quad (1)$$

то $U_{\text{вых } G_3} = 1$ и $U_{\text{вых } G_4} = 0$, и запрещающий сигнал нейрона G_3 переводит нейрон G_1^2 в неактивное состояние ($U_{\text{вых } G_1^2} = 0$). Если

$$\sum_{i=1}^n U_{\text{вых } S_i^1} - \sum_{i=1}^n U_{\text{вых } S_i^2} < 0, \quad (2)$$

то $U_{\text{вых } G_3} = 0$ и $U_{\text{вых } G_4} = 1$ и запрещающий сигнал нейрона G_4 переводит нейрон G_1^1 в неактивное состояние. Таким образом, с помощью неравенств (1) и (2) определяется – каких элементов (единиц или нулей) в черно-белом изображении больше, и, следовательно, какой из модулей M_1 или M_2 должен стать ведущим, а какой – ведомым.

Пусть выполняется соотношение (1) тогда S^1 -нейроны, получившие единичные входные сигналы, переходят в активное состояние ($U_{\text{вых } S_i^1} = 1$). Их возбуждающие выходные сигналы переводят нейроны S_i^2 ($i = \overline{1, n}$), G_1^p и G_2^p ($p = 1, 2$) в состояние “1”. Поскольку выполняется соотношение (1), то в активное состояние перейдет и нейрон G_3 , который своим единичным выходным сигналом переведет нейрон G_1^2 в состояние “0”. Поскольку нейроны Z^p -слоев ($p = 1, 2$) переходят в активное состояние по правилу “два из трех”, т.е. при наличии единичных сигналов из двух различных источников, то все Z -нейроны модуля M_2 будут иметь нулевые выходные сигналы. Возбуждающие выходные сигналы элементов S_i^1 ($i = \overline{1, n}$) поступают и на входы соответствующих интерфейсных нейронов Z_i^1 ($i = \overline{1, n}$). Элементы интерфейсного слоя Z^1 , получившие единичные сигналы от управляющего нейрона G_1^1 и нейронов S_i^1 ($i = \overline{1, n}$), по правилу “два из трех” переходят в активное состояние и посылают свои единичные возбуждающие сигналы $U_{\text{вых } Z_i^1}$ ($i = \overline{1, n}$) по связям с весовыми коэффициентами W_{ij}^{11} ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$) на входы нейронов Y_j^1 ($j = \overline{1, m}$). Нейроны распознающего Y^1 -слоя, получившие единичные сигналы, как от управляющего нейрона G_2^1 , так и от нейронов интерфейсного слоя Z^1 , по правилу “два из трех” переходят в активное состояние. Их входные и выходные сигналы определяются соотношением

$$U_{\text{вых } Y_j^1} = U_{\text{вх } Y_j^1} = \sum_{i=1}^n W_{ij}^{11} U_{\text{вых } Z_i^1}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Затем в слое распознающих нейронов происходит латеральный процесс

выделения элемента Y_j^1 с максимальным выходным сигналом. В результате этого процесса все нейроны, кроме победившего, переводятся в состояние $U_{\text{вых}} Y_j^1 = 0, j = \overline{1, m}; j \neq J$, а нейрон-победитель в состояние с единичным выходным сигналом. Единичный сигнал нейрона Y_j^1 затормаживает нейрон G_1^1 и поступает на входы всех нейронов $Z_i^1 (i = \overline{1, n})$ интерфейсного слоя. Поскольку нейроны Z^1 -слоя переходят в активное состояние по правилу “два из трех”, то единичные сигналы появляются только на выходах тех интерфейсных нейронов, которые получают возбуждающие сигналы как из слоя распознающих, так и от слоя входных нейронов. Тормозящие выходные сигналы элементов Z^1 -слоя и возбуждающие сигналы S -слоя поступают на входы нейрона R_1^1 , который по единичным компонентам входного изображения рассчитывает параметр сходства входного изображения и изображения, хранящегося в весах связей нейрона Y_j

$$p_1 = \left\| U_{\text{вых}} Z^1 \right\| / \left\| U_{\text{вых}} S^1 \right\| = \sum_{i=1}^n U_{\text{вых}} Z_i^1 / \sum_i^n U_{\text{вых}} S_i^1.$$

Если параметр сходства p_1 меньше заданного значения, то нейрон Y_j^1 затормаживается ($U_{\text{вых}} Y_j^1 = -1$) единичным выходным сигналом с первого выхода управляющего нейрона R_1^1 и начинается поиск нового нейрона-победителя в распознающем слое Y^1 -нейронов. Если параметр сходства p_1 больше или равен заданному значению, то управляющий нейрон остается пассивным по своему первому выходу ($U_{\text{вых}}^1 R_1^1 = 0$), и выходной сигнал нейрона Y_j^1 совместно с выходным сигналом нейрона G_2^2 возбуждает нейрон Y_j^2 модуля M_2 . Второй выходной сигнал нейрона R_1^1 передает на первый вход нейрона R_2 значения параметра сходства p_1 , на второй вход этого нейрона поступает значения параметра сходства p_2 со второго управляющего нейрона R_1^2 . Параметр сходства p_2 в модуле M_2 по нулевым компонентам входного вектора рассчитывается аналогично параметру p_1 в модуле M_1

$$p_2 = \left\| U_{\text{вых}} Z^2 \right\| / \left\| U_{\text{вых}} S^2 \right\| = \sum_{i=1}^n U_{\text{вых}} Z_i^2 / \sum_i^n U_{\text{вых}} S_i^2.$$

Управляющий нейрон R_1^2 функционирует аналогично нейрону R_1^1 модуля M_1 , однако его единичный сигнал с первого выхода не может затормозить нейрон Y_j^2 , поскольку на вход этого элемента поступает

возбуждающий сигнал с выхода нейрона Y_j^1 . Нейрон R_2 по входным сигналам со вторых выходов управляющих нейронов R_1^1 и R_2^1 , передающих значения параметров сходства p_1 и p_2 , рассчитывает общий параметр сходства p входного изображения и изображения, хранящегося в весах связей нейронов Y_j^1 и Y_j^2 : $p = f(p_1, p_2)$. Нейрон R_2 имеет два выхода, возбуждающий сигнал $U_{\text{возб } R_2}$ с его первого выхода поступает на входы всех распознающих нейронов U_1, U_2, \dots, U_d U -слоя, тормозящий сигнал $U_{\text{торм } R_2}$ со второго выхода нейрона R_2 поступает на входы всех нейронов слоев Y^1 и Y^2 . Если значение рассчитанного параметра сходства p равно или превосходит заранее заданное значение параметра сходства $p_{\text{зад}}$, то возбуждающий сигнал нейрона R_2 совместно с выходными единичными сигналами $U_{\text{вых } Y_j^1}$, $U_{\text{вых } Y_j^2}$ переводит в активное состояние один или несколько нейронов слоя U , т.е. нейронная сеть определяет одно или несколько решений, соответствующих входному вектору $U_{\text{вх}}^r$. Если $p < p_{\text{зад}}$, то $U_{\text{возб } R_2} = 0$, $U_{\text{торм } R_2} = 1$ и тормозящий сигнал нейрона R_2 затормаживает нейроны Y_j^1 и Y_j^2 ($U_{\text{вых } Y_j^1} = U_{\text{вых } Y_j^2} = -1$), а затем начинается поиск нового нейрона-победителя в модуле M_1 .

Рассмотрим теперь режим обучения нейронной сети. Для упрощения описания этого режима будем полагать, что обучающие изображения для нейронной сети сформированы заранее и каждому классу изображений (образу) соответствует единственное черно-белое изображение, единичные компоненты которого запоминают нейроны модуля M_1 , а нулевые – нейроны модуля M_2 . При этом обучающие изображения $U^{\text{об1}}, \dots, U^{\text{обg}}$ так расположены в последовательности, что обучение сети происходит за одну эпоху и без переобучения нейронов распознающего слоя Y^1 и Y^2 . Пусть также заданы значения параметров сходства $p_{1\text{зад}}$, $p_{2\text{зад}}$ и $p_{\text{зад}}$ для модулей M_1 и M_2 и всей нейронной сети и заданы начальные значения обучаемых весов связей модулей M_1 и M_2

$$W_{ij}^{11} = W_{ij}^{12} = \frac{1}{1+n}; \quad W_{ji}^{21} = W_{ji}^{22} = 1, \quad (i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}).$$

При подаче первого входного обучающего изображения $U^{\text{об1}} = (U_1^{\text{об1}}, U_2^{\text{об1}}, \dots, U_n^{\text{об1}})$ нейроны G_3 и G_4 , как и в режиме распознавания,

с помощью неравенств (1) и (2) определяют, какой из модулей будет ведущим. Пусть выполняется неравенства (1), тогда ведущим будет модуль M_1 и с помощью единичных выходных сигналов нейронов G_1^1 и S_i^1 ($i = \overline{1, n}$) по правилу “два из трех” будет переведена в активное состояние часть нейронов Z^1 -слоя, получивших на свои входы по два единичных сигнала. Нейроны слоя Y^1 , получившие единичные сигналы с выхода нейрона G_2^1 и Z^1 -нейронов по правилу “два из трех” переходят в активное состояние и рассчитывают свои входные и выходные сигналы по соотношениям (3). Поскольку при предъявлении первого обучающего изображения все Y^1 -нейроны имеют одинаковые веса связей и одинаковые входные сигналы, то все они будут иметь и одинаковые выходные сигналы, и победителем станет нейрон с наименьшим индексом Y_1^1 . Поскольку $W_{ji}^{12} = 1$ ($j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}$), то $\|U_{\text{ВЫХ } Z^1}\| = \|U_{\text{ВЫХ } S^1}\|$ и $p_1 = 1$. После этого происходит адаптация весов связей нейрона-победителя Y_1^1 и соответствующего ему нейрона Y_1^2 в модуле M_2 по известным соотношениям [8]. Затем аналогичным образом обучается пара распознающих нейронов Y_2^1 и Y_2^2 изображением U^{062} и т.д. пока не будут использованы все изображения обучающей последовательности.

Выводы. Таким образом, разработана дискретная нейронная сеть адаптивной резонансной теории, позволяющая при решении задач распознавания определять сходство черно-белых изображений по всем элементам изображений и выделять два и более равноценных решения.

Список литературы: 1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с. 2. Комашинский В.И., Смирнов Д.А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с. 3. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с. 4. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с. 5. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры и их применение на рубеже тысячелетий в Китае. В 2-х томах. Том 2. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 464 с. 6. Fausett L. Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications. – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. – 461 p. 7. Дмитриенко В.Д., Расрас Р.Д., Сырой А.М. Специализированное вычислительное устройство для распознавания динамических режимов объектов управления // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2002. – № 1. – С. 15 – 22. 8. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю. – Х.: ХФИ Транспорт Украины, 2003. – 248 с.

Поступила в редакцию 20.09.2007