

О ВОЗМОЖНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ САМООБУЧАЮЩЕЙСЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

С.А.Виткалов, И.М.Суслов

Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН
117924, Москва

Поступила в редакцию 26 мая 1992 г.

Предложена физическая реализация самообучающейся связи между нейроноподобными элементами.

В последнее время в физической литературе широко обсуждается (напр., ¹) модель нейронной сети Хопфилда ². В этой модели n -й нейрон описывается переменной V_n , принимающей значения 0 и 1; изменение V_n со временем описывается уравнением

$$V_n(t + \Delta t) = \Theta\left(\sum_m J_{nm} V_m(t) - U_0\right), \quad (1)$$

где $\Theta(x)$ – ступенчатая функция, J_{mn} – связи между нейронами, U_0 – порог возбуждения нейрона. Кроме быстрой эволюции V_n согласно (1), происходит медленное изменение связей J_{mn} :

$$\Delta J_{nm} = C(2V_n - 1)(2V_m - 1)\Delta t, \quad C > 0. \quad (2)$$

Существенные изменения J_{nm} происходят лишь в случае, когда конфигурация V_n поддерживается постоянной в течение длительного времени (обучение). Эволюция согласно (1) приводит систему из произвольного начального состояния в одну из конфигураций, запомненных в результате обучения (распознавание образов).

Модель Хопфилда может быть положена в основу работы компьютеров нового поколения. Реализации таких нейрокомпьютеров уже существуют ³, однако обучение в них осуществляется с помощью специального блока синаптической памяти, работающего на принципах обычного компьютера. Создание "чистого" нейрокомпьютера требует физической реализации обучаемой связи между нейронами (ур. (2)). В настоящей работе предложен один из путей решения этой проблемы.

Пусть n -й нейрон (рис.1) представляет собой логический элемент с N -входами (дендриты) и одним выходом (аксон) ⁴. На m -й вход подается напряжение V_{nm} с m -го нейрона; напряжение на выходе

$$V_n = \Theta\left(\sum_m V_{nm} - U_0\right), \quad (3)$$

(такая характеристика может быть получена последовательным соединением сумматора напряжений и триггера). Со стоящих на выходе нейрона делителей напряжения (терминальные волокна), снимаются напряжения W_{nm} и опорное напряжение \bar{W}_n ; разность напряжений $V_{nm} = W_{nm} - \bar{W}_n$ подается на n -й вход m -го нейрона. Считая $R \gg r_{nm}$, \bar{r} , получим $V_{nm} = \Delta r_{nm} V_n / R$, где $\Delta r_{nm} = r_{nm} - \bar{r}$,

Конденсатор C является элементом, в котором (в виде заряда) хранится информация о J_{nm} , полученная в процессе обучения.

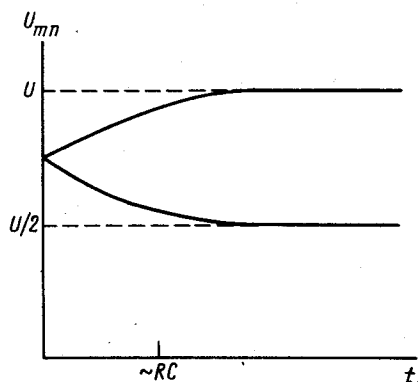


Рис.3

На реле P подаются напряжения V_n и V_m с выходов n -го и m -го нейронов¹⁾. При разомкнутом реле равновесное напряжение на конденсаторе C равно U , при замкнутом $U/2$. Выберем рабочую точку конденсатора посередине, то есть при $U_{nm} = 3U/4$. Тогда U_{nm} будет зависеть от времени, стремясь к U или $U/2$ (рис.3). Считаем постоянную времени $\tau = RC$ достаточно большой, чтобы изменение U_{nm} было достаточно медленным; тогда для $\Delta t \ll \tau$ $U_{nm} = 3U/4 \pm \Delta t U/\tau$, где верхний и нижний знак – для разомкнутого и замкнутого реле. Полагая $\bar{r} = f(3U/4)$ и линеаризуя (5), имеем

$$\Delta r_{nm} = \mp A \Delta t \quad (A > 0). \quad (6)$$

Считаем реле P нормально замкнутым; в случаях $V_n = 1, V_m = 1$ и $V_n = 0, V_m = 0$ ток через реле отсутствует и в (6) следует взять нижний знак; в случаях $V_n = 0, V_m = 1$ и $V_n = 1, V_m = 0$ реле размыкается текущим через него током и в (6) нужно взять верхний знак. Таким образом

$$\Delta r_{nm} = A(2V_n - 1)(2V_m - 1)\Delta t \quad (7)$$

и в силу (4) изменение J_{nm} оказывается таким же, как в модели Хопфилда (см. (2)). Таким образом, при малых отклонениях от рабочей точки предложенная система полностью эквивалентна модели Хопфилда. При больших временах обучения линейная зависимость от t в (2) сменяется выходом на насыщение. Однако такая ситуация имеет место и в случае реальной нейронной сети, приводя к полезным следствиям²⁾.

Выше предполагалось, что (как в реальной биологической системе) распознавание и обучение происходят одновременно, различаясь лишь скоростями процессов. Можно, однако, предусмотреть специальные режимы для распознавания и обучения. В режиме распознавания конденсатор C отключается в точке A от делителя напряжения; тогда время хранения информации опреде-

¹⁾ Реле может быть реализовано различными бесконтактными способами – на логических схемах и или, с помощью диодного моста и полевого транзистора и т.д.

ляется лишь утечками заряда с конденсатора C и теоретически может быть сделано сколь угодно большим за счет использования широкозонных диэлектриков и низких температур. Времена хранения, достижимые при современных технологиях (и разумных размерах конденсатора C) достаточны для использования в оперативной памяти.

Для долговременного хранения информации блок полевой, транзистор-конденсатор можно заменить элементом памяти⁵. Последний представляет собой МДП структуру, диэлектрический слой которой изготовлен специальным образом и содержит внутри запрещенной зоны много локализованных состояний. При приложении к затвору достаточно большого напряжения заряженные носители проникают в диэлектрик и садятся на локализованные состояния. После снятия внешнего напряжения захваченный заряд определяет напряжение U_{nm} на затворе МДП структуры, управляющее сопротивлением r_{nm} ее канала. Время хранения информации в этом случае практически неограниченно, однако ограничено число "переобучений" ($\sim 10^6$).

Авторы признательны Д.С.Чернавскому за привлечение внимания к данной проблеме и полезные обсуждения, а также Д.Н.Токарчуку за обсуждение технических аспектов работы.

-
1. Сб.: Итоги науки и техники. Сер. физ. и мат. модели нейронных сетей. М: ВИНТИ, 1990, 1.
 2. J.J.Hopfield, Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 79, 2554 (1982).
 3. Ф.В.Широков, ссылка 1, с.229.
 4. У.С.Маккалок, У.Питтс, В кн.: Автоматы. Под ред. К.Э.Шеннона, Д.Маккарти, М.: ИЛ, 1956.
 5. Труды физического института им.П.Н.Лебедева, М.: Наука, 1987, 184.