

НЕЙРОННЫЕ СТРУКТУРЫ, ОБЛАДАЮЩИЕ СВОЙСТВОМ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПАМЯТИ, КАК СРЕДСТВО ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

ГЕРАСИН С.Н., ЛИЗГИН В.А.

Рассматривается вопрос о поведении нейронных структур, обладающих свойством кратковременной памяти. Изучается динамика подобных структур на основе марковской модели.

В настоящее время электрофизиология выделяет два типа организации памяти человека и животных — кратковременную и долговременную. Первая возникает как реакция нейрона на некоторое возбуждение, вторая связана с определенными структурными изменениями, возникающими между нейронами. Обычно под кратковременной памятью понимают способность нейронной сети сохранять определенные топологические конфигурации совозбужденных нейронов достаточно длительное время (порядка нескольких секунд) для того чтобы могла произойти структурная или какая-то иная перестройка межнейронных связей, задействованных в этих конфигурациях. В соответствии с этой концепцией считается, что кратковременная память нужна для записи информации в долговременную память и для того, чтобы зафиксировать в последней первоначальную конфигурацию, которая будет в дальнейшем считываться при помощи сигналов электрической активности [1].

Таким образом, представляет интерес исследовать модели нейронной сети, обладающей эффектом кратковременной памяти. При этом естественно использовать известные модели электрической активности одиночных независимых нейронов и процессов возбуждения и распространения возбуждения по нейронной сети в целом [2]. Обычно в теории нейронных цепей используется два основных метода анализа, базирующихся либо на теории нелинейных дифференциальных уравнений, либо на теории марковских процессов. Мы будем базироваться на последнем подходе [6]. Его развитие имело место в работах школы московских математиков: Ставская О.Н., Пятецкий—Шапиро И.И., Крюков В.И., Коваленко Н.И., Четаев А.Н. Ими, в частности, было строго обосновано, что длинная цепочка нейроподобных элементов, соединенных последовательно, обладает свойством неэргодичности [4,5], т.е. такая сеть имеет несколько стационарных состояний, в которые она может попасть в зависимости от начальных условий и тем самым может долго “помнить” эти начальные условия. Это позволяет принципиально моделировать механизмы памяти на базе теории многокомпонентных нейронных систем. При имитационном моделировании поведения нейроподобных структур приходится вводить некоторые упрощения и допущения [3].

1. Каждый нейрон двусторонне связан с четырьмя соседними нейронами, расположенными в узлах регулярной плоской решетки.

2. Все веса связей одинаковы и равны амплитуде скачка на которую увеличивается мембранный потенциал данного нейрона при поступлении на него возбуждающего импульса от соседей. Мембранный потенциал зашумлен стационарным нормальным шумом с параметрами $(0, \sigma^2)$. Граничные условия периодические.

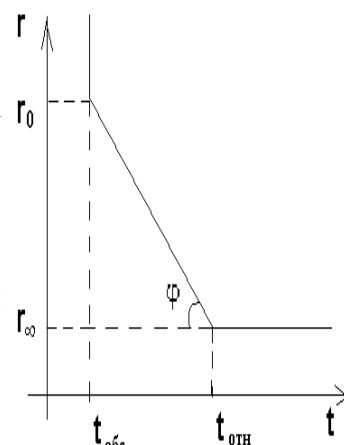
3. Поведение сети описывается многокомпонентным марковским процессом. Мембранный потенциал и σ^2 являются основными параметрами сети.

4. Порог нейрона учитывает абсолютную и относительную рефрактерность и имеет вид, изображенный на рисунке, где $t_{аб} = \Delta\tau$, $\text{tg}\varphi = 3$.

Состоянием сети называется решетчатая конфигурация из нулей и единиц, соответствующих возбужденному $x_i(t) = 1$ или невозбужденному $x_i(t) = 0$ нейрону.

Уровнем активности сети называют величину

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t),$$



где N — число нейронов в сети. Представляет интерес вопрос о том как эволюционирует активность сети при различных значениях основных параметров.

Задавая различные начальные конфигурации используя датчики случайных чисел, получаем различные реализации $\tilde{x}(t)$ для фиксированных значений параметров сети и начальной конфигурации. При этом все реализации $\tilde{x}(t)$ ведут себя следующим образом: некоторое время после начала имеется тренд уровня активности, затем тренд исчезает и $\tilde{x}(t)$ колеблется вокруг некоторого стационарного значения, зависящего от параметров сети. Оказывается, что время выхода на стационарный уровень также существенно зависит от значений параметров сети и ее топологии. Проявляется интересный эффект при некоторых критических значениях параметров, связанный с резким увеличением времени выхода на стационарный уровень.

Еще одним важным показателем динамики сети является так называемая дисперсия динамики активности. Она вычисляется по следующей формуле:

$$D(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\tilde{x}_i(t) - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \tilde{x}_j(t))^2.$$

Для некритических значений α и σ^2 дисперсия $D(t)$ вначале возрастает, а потом, по мере приближения $\tilde{x}(t)$ к стационарному режиму, убывает и становится величиной достаточно малой. Иная ситуация имеет место вблизи критического режима значений. Здесь дисперсия возрастает, сохраняясь большой и в стационарном режиме. Это объясняется тем, что стационарное значение $\tilde{x}(t)$ не единственно в критическом случае.

Эффект сохранения пятна

Опишем теперь, каким образом эволюционирует начальная конфигурация сети с течением времени. Будем считать начальным состоянием сети некоторую фигуру — “пятно”, состоящее из единиц на фоне нулей.

Результаты моделирования можно охарактеризовать и описать так:

— при обычных параметрах сети пятно расплывается, и в стационарном режиме активности сети представляет собой кластерную конфигурацию, которая изменяется во времени, или же пятно просто размывается и исчезает. По большей части такие эффекты происходят довольно быстро (приблизительно за 50 шагов времени);

— если параметры сети близки к критическим значениям, то начальная конфигурация в течение длительного времени продолжает оставаться близкой к первоначальной, т.е. сохраняет пятно. Время сохранения пятна существенно зависит от его первоначального размера. Если пятно меньше определенного размера, оно быстро размывается.

Очень схематично эти эффекты иллюстрируются приведенными булевыми матрицами.

Для большего сходства модели и реально действующих механизмов памяти усложним модель путем введения периодического внешнего воздействия, тем самым имитируя тэта-ритм. Для этого к порогу каждого элемента добавим периодическую составляющую

$$\Delta r(t) = A_{\theta} \sin(2\pi\lambda_{\theta}t + \varphi).$$

Представляет интерес вопрос, при каких условиях в течение длительного времени будет сохраняться начальная конфигурация сети. Оказывается, для этого должны выполняться следующие условия:

1. Параметры α и σ^2 близки к критическим.
2. Период модуляции $T_{\theta} = \frac{1}{\lambda_{\theta}}$ близок к времени выхода на стационарный уровень в критическом случае.

3. Начальная фаза φ принадлежит определенному диапазону. Исходная конфигурация сохраняется при нарастающем пороге, в фазе падения порога этого не наблюдается.

Сеть с нерегулярными синаптическими связями

Рассмотрим случай, когда веса связей между отдельными нейронами могут меняться с течением времени. Например, всякий раз, когда два соседних элемента возбуждались в один и тот же или в два последовательных момента времени, сила связи между ними возрастала на малую величину $\Delta a \approx 0,001 \div 0,02$.

На сеть с параметрами, близкими к критическим, подавалась начальная конфигурация в виде пятна из единиц на фоне нулей. Так как некоторое время сохраняется конфигурация, близкая к первоначальной, происходит постепенное увеличение связей между элементами пятна. В результате время сохранения пятна значительно возрастает, и состояние сети меньше отличается от начального, чем в случае сети без усиления связей.

Восстановление или проявление ранее записанного пятна происходит, во-первых, при установке параметров, близких к критическим (например, можно лишь слегка увеличить порог, сохранив остальные параметры теми же, что были при записи), и, во-вторых, при возбуждении части записанной конфигурации.

Выводы

В изначально однородной среде формируются точки фазового пространства в окрестности которых вероятность нахождения нейронной сети будет максимальна. Эти стабильные состояния можно трактовать как проявления кратковременной памяти. С увеличением количества связей между нейронами, эффект сохранения пятна усиливается.

Литература: 1. Дунин—Барковский В.Л. Информационные системы. М.: Наука, 1978. 166 с. 2. Кохонен Т. Ассоциативная память. М.: Мир, 1980. 239 с. 3. Крюков В.И. Марковские модели взаимодействия и нейронная активность // Взаимодействующие марковские процессы в биологии. Пущино, 1977. С.127-145. 4. Соколов Н.Е., Шмелев Л.А. Нейробионика. Организация нейроподобных элементов и систем. М.: Наука, 1983. 279 с. 5. Ставская О.Н., Пятецкий—Шапиро И.И. Об однородных сетях из спонтанно активных элементов // Пробл. передачи информации. 1975. Т.11. Вып.4. С.91—106. 6. Четаев А.Н. Нейронные сети и цепи Маркова. М.:Наука, 1985.

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Дикарев В.А.

Герасин Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры высшей математики ХТУРЭ. Научные интересы: теория вероятностей и ее приложения, теория процессов Маркова. Адрес: Украина, 61166, пр. Ленина 14, тел. (0572)40-93-72, (0572)72-12-38. E-mail: hm@kture.kharkov.ua

Лизгин Валерий Анатольевич, начальник отдела АСУ ЗАО “Карачаево-Черкесскгаз”. Научные интересы: теория нейронных сетей, случайный анализ. Хобби: иностранный туризм. Адрес: Россия, 357100, Карачаево-Черкесская республика, Черкесск, ул. Кавказская, 126, тел. (878)2251151.