

Актуализация опыта как возможная причина фрактальной структуры поискового поведения

А.К. Крылов

Институт психологии РАН, Москва
neuru@mail.ru

Значение фрактальной структуры поведения

Феномен фрактальной структуры поведения [1–3] бросает вызов рефлекторной теории и может даже рассматриваться как аргумент в пользу наличия свободы выбора [2, 4, 5]. Поэтому структура поведения животных в однородной среде, т. е. в отсутствие внешних стимулов [1, 2, 6], представляет парадигмальный интерес [4, 5, 7, 8].

Проведенный нами анализ теории рефлекса позволил дать следующее определение ее парадигмального ядра: с точки зрения парадигмы реактивности и теории рефлекса «организм в своем действии и состоянии объективно отражает предшествующий внешний сигнал», т. е. рефлекторный агент является преобразователем внешних сигналов, что можно моделировать в виде [9]

$$\text{Действие}(t+1) = F(\text{Ситуация}(t)). \quad (1)$$

Для рефлекторного агента невозможна зависимость текущего действия от прошлого действия, так как рефлекс признает детерминацию действия исключительно текущим внешним стимулом [9]. Поэтому теория рефлекса не рассматривает эффект последовательности, зависимость текущего действия от прошлого действия испытуемого и эффекты преднастройки, для объяснения которых используется системная психофизиология [10]. Феномен автокорреляций в поведении – когда следующее действие с большей вероятностью совпадает с предыдущим [6], означает наличие внутренних детерминант и не рассматривается в парадигме реактивности. Фрактальная структура поведения в однородной среде также не поддается объяснению в рефлекторной теории [1, 2, 5]. Действительно, если организм в своих реакциях отражает внешний сигнал, как это предполагает теория рефлекса, то реакция не может быть сложнее, чем входной сигнал, а фрактальная структура поведения максимально сложна и не может быть получена простым преобразованием входного однородного сигнала (константы) по уравнению (1) [2, 4, 5]. Например, в поисковом поведении в однородной среде статистика длительностей движения в одном направлении имеет степенной характер [1, 2] (как график на рис. 1 «ДИН»), такой же, как у фракталов, т. е. не является случайным. Рефлекторный агент, совершающий действия (рефлексы) с фиксированными вероятностями, не может генерировать такую статистику поведения (получится, как на рис. 1 «ФИКС», подробнее ниже). Поэтому наличие фрактальной структуры поведения или хотя бы наличие степенной формы распределения длительностей действий (как на рис. 1 «ДИН» и далее на рис. 2–4) доказывает их внутреннюю причинность [2, 4, 5].

Аналогичные фрактальные структуры были обнаружены: на уровне нейронов – в спайковой активности нейронов [4, 11, 12], в ЭЭГ – суммарной активности мозга [13–16], в психологической структуре опыта [17], поведении [3], социальных процессах [18]. Таким образом, этот феномен сложности структуры обнаруживается на разных уровнях организации активности. Строго говоря, для обнаружения именно фрактальной структуры необходимо использовать методы типа анализа фактора Фано и перемешивания последовательности данных [4, 11], но в большинстве работ фокусируют внимание на степенной зависимости в статистике данных, которая легко видна на графиках как прямая в логарифмических координатах (см. рис. 1 «ДИН» и далее рис. 2–4). Как будет показано ниже, уже эта форма кривой не может генерироваться рефлекторным агентом, и поэтому ее моделирование заслуживает внимания.

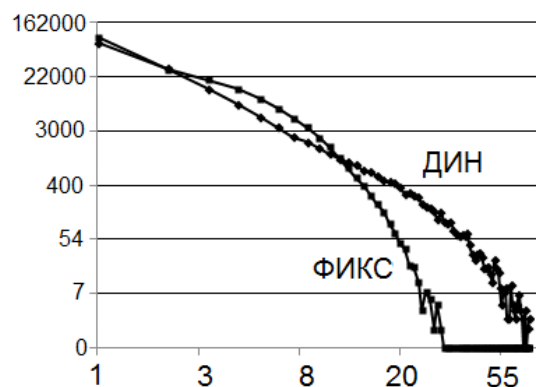


Рис. 1. Статистика длительностей цепочек однотипных действий в модели динамики актуализации опыта («ДИН») и с фиксированной вероятностью совершения действия («ФИКС»). Кривую «ДИН» можно аппроксимировать прямой, что означает степенную зависимость и возможную фрактальность. У «ФИКС» этого свойства нет. По горизонтали – длительность цепочки действий. По вертикали – количество случаев. Оси в логарифмическом масштабе

Системный подход

В настоящей работе проверяется гипотеза о том, что системная структура опыта, в отличие от набора рефлексов, может быть причиной фрактальности структуры поведения. С точки зрения системной психофизиологии, основанной на парадигме активности и системном подходе, поведение организма и активность нейронов не подчиняются принципам рефлекса и парадигмы реактивности, но имеют внутреннюю причину своей целенаправленности и активности [9, 19–22], а опыт формируется

не как набор рефлексов, а как системная структура [22]. При освоении нового навыка в процессе поведенческих проб постепенно формируется и затем фиксируется новый элемент структуры опыта [21]. Элемент опыта фиксирует новый способ взаимодействия индивида с предметной областью. Любому элементу опыта можно сопоставить степень его актуализации в данный момент $A(t)$. Физиологически актуализация элемента опыта реализуется активностью нейронов, образующих этот элемент опыта [20], и степень актуализации отражается в величине спайковой активности этих нейронов в данном акте [23]. Поэтому актуализация элемента опыта является одновременно психологическим и физиологическим явлением, которое может быть зарегистрировано объективным методом – регистрацией активности нейронов [19–23]. Поэтому моделирование в терминах актуализации элементов опыта решает психофизиологическую проблему, а не порождает ее, как при построении моделей в непсихофизиологических терминах. Актуализация элемента опыта $A(t)$ вариативна в последовательных реализациях [10, 23].

Модель формирования элемента опыта

Ранее нами построена модель [24] формирования нового элемента опыта при освоении нового навыка, отражающая статистику кривых научения в эксперименте по обучению животных [25]. Изменение актуализации в простой задаче с одним элементом опыта можно описать экспоненциальным ростом (2) [22. С. 283]. Вероятность совершения данного действия принимаем равной степени актуализации $A(t)$ этого элемента опыта. После совершения правильного действия степень актуализации возрастает:

$$A(t+1) = A(t) + 0,15 \cdot (1 - A(t)). \quad (2)$$

В этом эксперименте правильное действие животного всегда подкреплялось [25], поэтому правильное в данной задаче действие всегда успешно, а вместо неудач возможны лишь паузы – когда животное выполняет другие действия. Возможность неуспеха осваиваемого действия отсутствует, поэтому актуализация этого формируемого элемента опыта только растет (2). Когда $A(t)$ достигает порога 0,9, считается, что элемент фиксируется и обучение завершено [24, 26]. Стартовое значение $A(0) = 0,05$. Далее оценивалась статистика длительностей обучения в 34 таких экспериментах и сравнивалась с обучением 34 животных. Оказалось, что кривые обучения и их статистика совпадают численно и по форме [24], т. е. эта модель (2) достаточно хорошо описывает динамику обучения навыку в таком классе экспериментов.

Рефлекторная модель

По сравнению с описанным обучением дефинитивному поведению поисковое поведение имеет принципиальное отличие – в процессе поиска все действия, кроме последнего, не приводят к достижению успеха. В стандартных задачах на поиско-

вое поведение в однородной среде, когда агент (или животное) не может знать, совершая очередное действие, приближается ли к цели, «неуспешность» действий при поиске является нормой и все действия, кроме самого последнего, не подкрепляются. Тем не менее в парадигме моделей обучения с подкреплением (reinforcement learning) модель рефлекторного агента (1) [27] успешно обучается поисковому поведению, например поиску пищевых объектов в двумерной среде, обладая очень ограниченными визуальными сенсорами и обучаясь набору рефлексов вида «с вероятностью P_{ij} в ситуации i совершить действие j ». При этом поисковое поведение может организовываться даже не одним действием, а несколькими почти равновероятными действиями: в этой модели [27] агент научается в ситуации «нет объектов в поле зрения» совершать поисковое действие «поворот левого колеса» с определенной вероятностью (порядка 0,5) и действие «поворот правого колеса» с противоположной вероятностью. После совершения действия в следующий момент времени опять применяются те же вероятности. Если описать эту рефлекторную модель (1) в терминах актуализации элементов опыта, то здесь вероятность актуализации оказалась бы фиксированной, т. е. не зависящей от актуализации этого элемента в предыдущий момент (чего быть не может с точки зрения системной психофизиологии [10, 19–23]). Такая модель по (1) [27], с фиксированной актуализацией $A(t) = A(0)$ дает статистику длительностей цепочек одинаковых действий не степенной формы (рис. 1, «ФИКС»). Эта статистика не соответствует экспериментальным данным [1, 3].

Модель динамики актуализации

При поиске в однородной среде, «успешно» действие или «неуспешно» с точки зрения животного, можно оценить так: если животное продолжает движение в избранном направлении, то считает это действие успешным; а если меняет направление, то считает неуспешным [1]. С позиций системной психофизиологии происходит либо продолжение актуализации элемента опыта (реализующего рассматриваемое действие) и продолжение этого действия, либо деактуализация и прекращение этого действия. Но поскольку никаких событий во внешней среде не происходит в данной поисковой задаче, продолжается ли актуализация этого элемента опыта, зависит только от самой степени актуализации. Поэтому, аналогично уравнению (2), будем считать, что признание действия успешным в данной пробе и продолжение этого действия пропорционально $A(t)$. Тогда изменение актуализации аналогично (2):

$$A(t+1) = A(t) + k \cdot (0,9 - A(t)), \text{ если «успех»}; \quad (3)$$

$$A(t+1) = A(0), \text{ если «неуспех»}.$$

Если же происходит деактуализация текущего активного элемента опыта, иными словами – действие признано неуспешным в данный момент, то в модели величина актуализации сбрасывается к начальному значению $A(0)$. Величина $A(0)$ отражает

количество N альтернативных действий в данной ситуации и может быть равно $1/N$ с тем, чтобы все возможные поисковые действия оказались снова равновероятны. Статистика длительностей цепочек одинаковых действий в этой модели имеет степенной вид (рис. 1, «ДИН»). Эта статистика соответствует экспериментальным данным [1, 3].

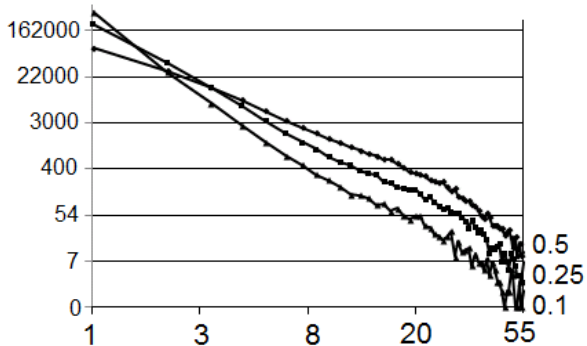


Рис. 2. Зависимость статистик длительностей цепочек действий от начальной актуализации $A(0)$ (показаны справа). Обозначения как на рис. 1. Форма кривых не меняется, может быть аппроксимирована прямой, меняется только наклон прямой (уменьшается с ростом $A(0)$). Это означает, что статистика имеет степенной вид и, возможно, фрактальную структуру.

При варьировании значения величины начальной актуализации $A(0)$ форма кривых сохраняется, меняется только угол наклона (рис. 2). Величина наклона соответствует экспоненте степенной функции и равна 1,9; 2,38; 2,76 соответственно. Для проверки степенной или фрактальной зависимости также используют логарифмический размер бинов [14] – в этом случае форма кривых сохраняется и имеет степенную зависимость (рис. 3). Величина наклона здесь должна получиться на 1,5 меньше чем на рис. 2, и это примерно так: на рис. 3 она равна 0,54; 0,87; 1,12 соответственно.

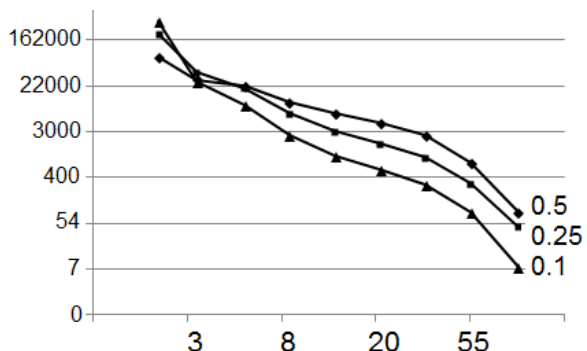


Рис. 3. Те же кривые, что на рис. 2, но в логарифмических бинах (каждая точка здесь суммирует соответствующий интервал на рис. 2). Форма кривых сохранилась – они аппроксимируются прямой линией, т. е. имеют степенной вид и, возможно, фрактальную структуру.

При варьировании скорости изменения актуализации (параметр k) от 0,15 до 0,6 распределение длительностей цепочек действий сохраняет степенную зависимость (рис. 4).

Итак, при варьировании обеих переменных, k и $A(0)$, в модели (3) статистика поведения имеет степенную зависимость длительности цепочек

действий, а значит, является свойством модели. Конечно, это еще не означает наличие фрактальной структуры поведения, но дает статистику, аналогичную фрактальной.

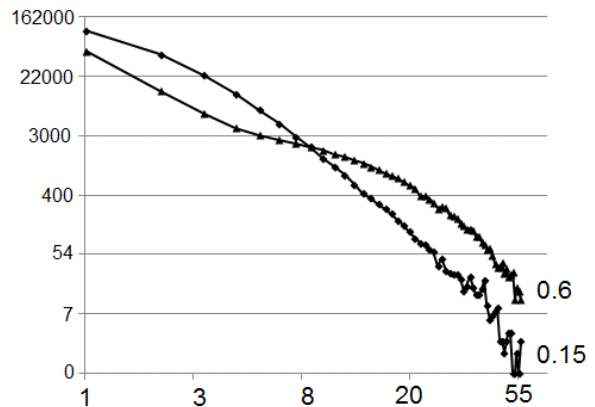


Рис. 4. Статистика длительностей цепочек действий в модели при разных скоростях изменения актуализации k (показаны справа). Обозначения как на рис. 1. Форма кривой сохраняет линейный вид, изменяется наклон.

Обсуждение

Принятие решений – не вероятностный выбор из набора альтернативных рефлексов [27], а процесс актуализации элементов опыта, величина актуализации которых закономерно меняется (или сохраняется) от акта к акту [10, 22, 23]. Длительность цепочки однотипных действий определяется длительностью актуализации этого элемента опыта, и статистика интервалов длительностей действий порождается закономерностями актуализации элементов системной структуры опыта. В настоящей работе показано, что простая модель актуализации дает статистику поведения, имеющую степенную зависимость, аналогичную фрактальной.

Другая модель, математически сходная с нашей, позволила объяснить наличие автокорреляций в поведении [28]. В ней используется динамика «мотивации», сходная с (3). Заметим, что «мотивация» психофизиологически выражается именно актуализацией соответствующего элемента опыта, что физиологически отражается в форме текущей активности нейронов этого элемента опыта, поэтому наша модель представлена в системных психофизиологических терминах.

Если элементами опыта являются «правила поиска», обнаруживаемые в этологии [29], динамика актуализации может объяснить длительные повторные применения правила [29], автокорреляции поведения [6].

Представляется, что наличие автокорреляций в поведении [6] (нарушающих случайность вероятностного принятия решения) показывает, что элементы опыта являются активными (системами) подобно организму (надсистеме), и, находясь в системных отношениях друг с другом, каждый элемент «сам решает» продолжать ли активацию.

Поскольку элемент опыта можно сопоставить с «правилом» в ИИ, это означает, что у животных и человека правило «само решает», когда ему

применяться и продолжать ли применение, при этом находясь в логических отношениях с другими правилами. В мозге нет гомункула, который бы решал, какое правило активировать.

Работа выполнена в рамках исследовательской программы Ведущей научной школы РФ «Системная психофизиология» (НШ-9808.2016.6).

Литература

1. *Непомнящих В.А.* Фрактальная структура поведения золотых рыбок *Carassius auratus L.* (Cyprinidae: Pisces) // Журнал общей биологии. 1998. Т. 59, № 5. С. 513–530.
2. *Maye A., Hsieh Ch., Sugihara G., Brembs B.* Order in Spontaneous Behavior // PLoS ONE, 2007. V. 2(5). Art. e443.
3. *Proekt A., Banavar J.R., Maritan A., Pfaff D.W.* Scale invariance in the dynamics of spontaneous behavior // Proc. Natl Acad. Sci. USA, 2012. V. 109. P. 10564–10569.
4. *Крылов А.К.* Нелинейные и фрактальные свойства нейронной активности – следствия для моделирования // Материалы XV Международной конференции по нейрокибернетике. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2009. Т. 1. С. 105–108.
5. *Непомнящих В.А.* Изменчивость поведения беспозвоночных и проблема свободы воли // Журнал общей биологии. 2012. Т. 73, № 6. С. 435–443.
6. *Непомнящих В.А.* Увеличение изменчивости поведения животных вследствие автокорреляций // Журнал общей биологии. 2012. Т. 73, № 4. С. 243–252.
7. *Крылов А.К.* Фрактальный анализ активности нейронов и поведения модели // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 109–116.
8. *Крылов А.К.* Роль модельного эксперимента и фрактального анализа данных в психологическом исследовании // Экспериментальная психология в России: традиции и перспективы. М. : Институт психологии РАН, 2010. С. 106–110.
9. *Крылов А.К.* Поведение и активность нейронов: целенаправленность или реакция // Когнитивные исследования : Сборник научных трудов. Вып. 5. М. : Институт психологии РАН, 2012. С. 32–43.
10. *Безденежных Б.Н.* Динамика взаимодействия функциональных систем в структуре деятельности. М. : Институт психологии РАН, 2004.
11. *Бибиков Н.Г., Дымов А.Б.* Факторы Фано и Аллана, характеризующие процессы спонтанной импульсной активности слуховых нейронов продолговатого мозга лягушки // Сенсорные системы. 2009. Т. 23, № 3. С. 246–259.
12. *Teich M.C. [et al.]* Temporal correlation in cat striate-cortex neural spike trains // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. 1996. V. 15(5). P. 79–87.
13. *Меклер А.А., Горбунов И.А., Болотова С.Ю.* Особенности динамики фрактальной размерности ЭЭГ при протекании эмоциональных процессов, относящихся к различным уровням психической иерархии у больных шизофренией, совершивших социально опасные поступки // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2013 : труды 3-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2013. С. 104–105.
14. *Грубов В.В. [и др.]* Переменяемость в поведении таламокортикальных осцилляторных паттернов на ЭЭГ крыс с предрасположенностью к абсанс-эпилепсии // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 68–70.
15. *Вохмина Ю.В. [и др.]* Хаотическая динамика параметров электроэнцефалограмм // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 55–57.
16. *Дмитриева Л.А. [и др.]* Развитие и применение методов мультифрактального анализа для исследования ЭЭГ в состоянии фона и медитации // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 75–77.
17. *Максимова Н.Е., Александров И.О., Турубар Д.С.* Топологические свойства семантической сети, представляющей структуру знания: неоднородность и безмасштабность // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 144–146.
18. *Петров В.М., Яблонский А.И.* Математика социального неравенства: гиперболические распределения в изучении социокультурных процессов. М. : Либроком, 2013.
19. *Швырков В.Б.* Введение в объективную психологию : Нейрональные основы психики / под ред. Ю.И. Александрова. М. : Институт психологии РАН, 1995.
20. *Alexandrov Y.I. [et al.]* Formation and realization of individual experience in humans and animals: a psychophysiological approach // Complex Brain Functions: Conceptual Advances in Russian Neuroscience. Amsterdam, 2000. P. 181–200.
21. *Александров Ю.И., Горкин А.Г., Созинов А.А., Сварник О.Е., Кузина Е.А., Гаврилов В.В.* Консолидация и реконсолидация памяти: психофизиологический анализ // Вопросы психологии. 2015. № 3. С. 133–144.
22. *Александров И.О.* Формирование структуры индивидуального знания. М. : Институт психологии РАН, 2006.
23. *Александров Ю.И., Шевченко Д.Г., Горкин А.Г., Гринченко Ю.В.* Динамика системной организации поведения в его последовательных реализациях // Психологический журнал. 1999. Т. 20, № 2. С. 82–89.
24. *Крылов А.К.* Моделирование динамики научения при формировании и реорганизации навыка // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 129–131.
25. *Арутюнова К.Р., Гаврилов В.В., Александров Ю.И.* Научение и поведение в отсутствие зрительного контакта со средой у крыс // Экспериментальная психология. 2014. Т. 7, № 3. С. 31–43.
26. *Крылов А.К.* Моделирование динамики формирования и актуализации элементов опыта разного уровня дифференциации при научении // Седьмая международная конференция по когнитивной науке : тезисы докладов. М. : Институт психологии РАН, 2016. С. 361–363.
27. *Крылов А.К.* Оценка применимости рефлекторной модели нейронной сети к поведенческой задаче // Труды VI Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2004». Ч. 2. М. : МИФИ, 2004. С. 108–116.
28. *Непомнящих В.А., Редько В.Г.* Метод формирования поискового поведения // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 1. С. 49–54.
29. *Непомнящих В.А., Осипова Е.А., Панкова Н.А.* Спонтанная организация исследовательского поведения рыб // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 149–151.