

Российская академия наук
Институт прикладной физики РАН
Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований
Российская ассоциация нейроинформатики
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Национальный исследовательский университет ВШЭ
Сургутский государственный университет ХМАО-Югры
Нижегородская государственная медицинская академия
ЗАО «Нижегородское агентство наукоемких технологий»

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2015

**ТРУДЫ
IV ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Нижегород
ИПФ РАН
2015

Экспериментальное исследование и моделирование восприятия бистабильных объектов

А.Е. Руннова¹, В.В. Грубов^{1,2}, А.Е. Храмов^{1,2}, А.А. Короновский², М.К. Куровская²

¹ Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
² Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Мозг является одним из наиболее сложных и загадочных объектов для комплексных исследований, привлекая в последние десятилетия интерес широкой научной общественности [1–3]. Динамика мозга изучается специалистами из различных областей науки, в том числе нейрофизиологии, медицины, физики, математики, нелинейной динамики и т.д., и сочетание разнообразных подходов и проведение многопрофильных исследований зачастую предоставляет возможности для более глубокого понимания механизмов, лежащих в основе его динамики, и может открыть перспективные возможности в медицине и нейротехнологиях.

Визуальное восприятие часто изучалось с помощью неоднозначных изображений (бистабильных объектов) [4–6], хотя восприятие чередующихся образов было описано и другими методами [7–9]. Для понимания визуального восприятия и распознавания объектов восприятие бистабильных изображений является лишь одной, но весьма интересной задачей среди огромного количества различных аспектов. На сегодня основной механизм определения изображения не открыт полностью, однако хорошо известно, что восприятие является продуктом процессов в распределенной сети затылочной, теменной и фронтальной области коры головного мозга [10, 11]. Существует гипотеза, что переключение восприятия какого-либо бистабильного объекта связано с шумом, присущим системе нервных клеток [12–14], чье происхождение можно объяснить как результат случайных нейронных спайков [15, 16]. В таком случае внутренний шум будет играть решающую роль, как при восприятии неоднозначных изображений, так и в других областях принятия решений.

На сегодня предложено математическое моделирование восприятия бистабильного объекта в терминах простых стохастических процессов, таких как винеровские процессы [17–19]. В настоящее время наиболее важной проблемой для расчета и уточнения свойств подобного моделирования является нахождение подходов к измерению шумовых характеристик головного мозга, поскольку точное предсказание и оценка шума могут открыть большое количество новых возможностей как в исследовании функциональности мозга, так и в диагностике его патологий.

Настоящая работа посвящена непрямому экспериментальному измерению интенсивности шума мозга, генерируемого при восприятии неоднозначных образов. Для этой цели нами разработана теоретическая модель и предложена методика экспериментальной работы по косвенному измерению «когнитивного шума».

В экспериментальных исследованиях приняли участие 25 здоровых неоплачиваемых добровольцев, мужчин и женщин, в возрасте от 20 до 45 лет, обладающих нормальным или компенсированным до нормального зрением. В качестве неоднозначного образа была использована иллюзия куба Некера [20]. В рамках эксперимента использовалось $N = 16$ модификаций куба Некера с разной интенсивностью средних линий (рис. 1). Интенсивность I трех средних линий, сосредоточенных в левом внутреннем углу, была выбрана в качестве управляющего параметра и менялась в пределах $[0; 1]$. Интенсивность трех средних линий вблизи правого внутреннего угла была установлена как $(1 - I)$. Интенсивность контура куба Некера не изменялась и была равна 1.

В ходе эксперимента добровольцу предъявлялись 16 кубов Некера с различными I в случайной последовательности. Куб демонстрировался в виде черных линий на белом фоне на экране компьютера. Между предъявлениями различных кубов участнику показывались фоновые цветные «размытые» картинки для отвлечения внимания. Время предъявления куба Некера составляла 500–700 мс, пауза между двумя различными кубами составляла 1500–2000 мс. Всем участникам эксперимента была дана инструкция нажимать левую или правую клавишу на панели управления в зависимости от первого восприятия демонстрируемого объекта (соответственно крайний слева или справа куб на рис. 1).

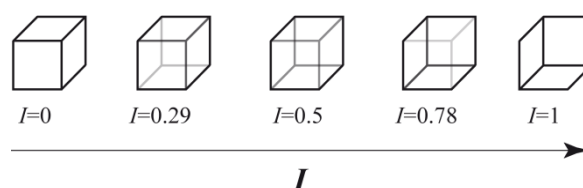


Рис. 1. Примеры иллюзий куба Некера, используемые в экспериментальной работе

В экспериментальной работе для организации визуального стимулирования и последующей записи данных было использовано программное и аппаратное оборудование «Энцефалан – ЭЭГР-19/26» («Медиком МТД»). После проведения записи экспериментальных данных для каждого из кубов, т.е. для каждого значения управляющего параметра I , была рассчитана вероятность узнавания данного куба как левого $P_1(I) = l(I)/(l(I) + r(I))$, где $l(I)$ и $r(I)$ – число нажатий на левую и правую кнопки соответственно.

Построение математической модели основано на подходе двух конкурирующих нейронных по-

пуляций [6, 21, 22], когда выбор испытуемым бистабильного объекта как ориентированного налево описывается с помощью динамической системы с биквадратичным потенциалом, обладающим двумя устойчивыми точками:

$$\dot{x} = -U'(x) + \xi(t), \quad (1)$$

где потенциальную функцию в общем виде можно записать как

$$U(x) = \frac{a_4}{4}x^4 + \frac{a_3}{3}x^3 + \frac{a_2}{2}x^2 + a_1x. \quad (2)$$

Здесь устойчивые точки $x_{l,r}$ будут соответствовать крайнему левому и крайнему правому кубам Некера на рис. 1. Пользуясь математическими подходами, разработанными в теории катастроф, удаётся упростить выражение (2), переписав его в форме

$$U(x) = \frac{x^4}{4} - \frac{x^2}{2} + bx. \quad (3)$$

В данном случае, коэффициент b остается неизвестным и индивидуальным для каждого человека. Мы связали коэффициент b со следующим эффектом, наблюдаемым нами в эксперименте. Из объективного наблюдения понятно, что куб Некера с интенсивностью граней $I = 0,5$ испытуемый должен с одинаковой вероятностью воспринимать и как левый, и как правый. Однако в эксперименте оказалось, что это значение равновероятного куба обычно не равно 0,5 и достаточно плавают с величиной ΔI , с которой и был связан исходный параметр $b = \Delta I/a$.

Переходя от уравнения (1) к записи уравнения в стохастической форме:

$$dX = -U'(x)dt + dW, \quad (4)$$

где $X(t)$ – случайный процесс, а $W(t)$ описывается винеровским процессом, получаем, что решение уравнения (4) может быть получено из уравнения Фоккера – Планка для плотности вероятности $\rho(x, t)$.

После некоторых математических выкладок мы получаем следующее теоретическое выражение для плотности вероятности $\rho(x, t)$:

$$\rho(x) = \exp\left(-\frac{2U(x)}{D}\right). \quad (5)$$

Таким образом, можно теоретически предсказать, какова будет вероятность восприятия куба с интенсивностью I как левого:

$$\dot{P}_1 = \int_{-\infty}^0 \rho(x) dx. \quad (6)$$

Подводя итог из выражений (3), (5) и (6), можно утверждать, что теоретически предсказуемая вероятность выбора \dot{P}_1 является функцией трех параметров: $\dot{P}_1 = \dot{P}_1(\Delta I, a, D)$.

Значения всех индивидуальных параметров подбирались по каждому испытуемому методами наилучшего приближения, и на рис. 2 продемонстрированы результаты теоретического моделирования и экспериментальных измерений восприятия куба Некера с различными интенсивностями граней.

Хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных является убедительным доказательством адекватности предложенного

подхода к количественной характеристике процессов когнитивной деятельности, связанной с визуальным восприятием неоднозначных изображений.

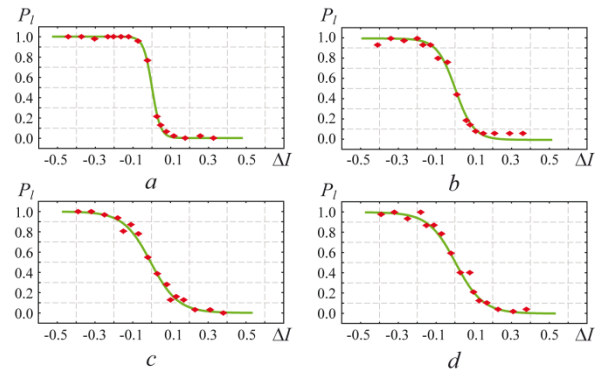


Рис. 2. Экспериментально измеренные зависимости вероятности восприятия иллюзии Некера как левоориентированного куба P_1 (точки) и соответствующие теоретические приближения \dot{P}_1 (сплошные линии): a – испытуемый 10, $D_p = 0,085$; b – испытуемый 14, $D_p = 0,175$; c – испытуемый 3, $D_p = 0,25$; d – испытуемый 17, $D_p = 0,25$.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-12-00224).

Литература

1. Hramov A.E. et al. Wavelets in Neuroscience. Heidelberg ; New York ; Dordrecht ; London : Springer, 2015. (Springer Series in Synergetics).
2. Bear M.F., Connors B.W., Paradiso M.A. Neuroscience : Exploring the brain. Woters Kluwer, 2015.
3. Chavez M. et al. // Physical Review Letters 104, 118701 (2010).
4. Leopold D.A., Logothetis N.K. // Trends in Cognitive Sciences 3, 254 (1999).
5. Blake R., Logothetis N.K. // Nature Reviews. Neuroscience 3, 13 (2002).
6. Pisarchik A.N. et al. // Biological Cybernetics 108, 397 (2014).
7. Moore B.C.J., Gockel H.E. // Philosophical transactions of the Royal Society B 367, 919 (2012).
8. Carter O. et al. // Current Biology 18, 1050 (2008).
9. Zhou W., Chen D. // Current Biology 19, 1561 (2009).
10. Tong F., Meng M., Blake R. // Trends in Cognitive Sciences 10, 502 (2006).
11. Sterzer P., Kleinschmidt A., Rees G. // Trends in Cognitive Sciences 13, 310 (2009).
12. Huguet G., Rinzel J., Hupe J.-M. // Journal of Vision 14, 1 (2014).
13. Gigante G., Mattia M., Braun J., Giudice P.D. // PLoS Computational Biology 5, e1000430 (2009).
14. Moreno-Bote R., Rinzel J., Rubin N. // Journal of Neurophysiology 98, 1125 (2007).
15. Merk I., Schnakenberg J. // Biological Cybernetics 86, 111 (2002).
16. Deco G., Rolls E.T., Romo R. // Progress in Neurobiology 88, 1 (2009).
17. Heekeren H.R., Marrett S., Ungerleider L.G. // Nature Reviews Neuroscience 9, 467 (2008).
18. Wang X.-J. // Current Opinion in Neurobiology 22, 1039 (2012).
19. Pearson B. et al. // Journal of Vision 14 (2014).
20. Necker L.A. // Philosophical Magazine. 3, 329 (1832).
21. Laing C.R., Chow C.C. // Journal of Computational Neuroscience 12, 39 (2002).
22. Wilson H.R. // Proceedings of the National Academy of Sciences 100, 14499 (2003).