

## ПРОБЛЕМА РАЗМЕРНОСТИ В ИНТЕГРАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ: СЕНСОРИКА И МОТОРИКА

*А.В. Вартанов*

кандидат психологических наук

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

*Г.В. Лосик*

доктор психологических наук

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

Разработка нейросетевых моделей когнитивного функционирования, в том числе, базирующихся на предложенных Е.Н. Соколовым [10] общих принципах векторного кодирования информации в мозге сталкивается с проблемой формального описания взаимодействия различных локальных анализаторов. Такое взаимодействие необходимо учитывать для понимания различных экспериментально обнаруживаемых феноменов интерференции психических процессов, например, в задаче Струпа [23], а также в эффекте МакГурка – МакДональда [16], или при различного рода конфликтах аудиовизуальной интеграции стимулов [5, 20, 19]. Обычно при формальном описании каждой из систем восприятия в отдельности предполагается наличие и определенные трансформации с векторами большой, не ограниченной заранее размерности [11]. Размерность, необходимую в каждом конкретном случае для описания входного воздействия и набора выходных реакций, можно оценить и эмпирически, например, в психофизических экспериментах с человеком, проводимых по схеме многомерного шкалирования. Однако и в этом случае получаемые оценки размерности будут зависеть не только от «устройства» соответствующего анализатора (который мы хотели бы смоделировать), но и от (1) априорно заданного экспериментатором набора объектов (и, соответственно, их физических свойств и параметров), (2) задачи, принятой испытуемым (что определяет, какие из свойств данных объектов будут для него значимыми, а какие необходимо игнорировать), а также (3) от набора возможных ответных действий, заданных по произволу экспериментатора. Все это делает задачу экспериментальной оценки размерности существенно неоднозначной.

Еще сложнее обстоит дело при попытке смоделировать взаимодействие разных анализаторов – ведь их размерности в общем случае могут не совпадать! Но в природе, у различных видов животных и у человека координация различных анализаторов обнаруживается очень часто, это скорее общее правило, главный принцип организации нервной системы, чем единичные исключения. Причем такая координация складывается на основе

опыта действий организма (и животных, и человека), она формируется не только в сензитивный период, так сказать, на постоянной основе, но может возникать, корректироваться и модифицироваться весьма быстро. Как же наш мозг решает в таком случае проблему несогласованности размерности разных анализаторов? Самый простой ответ, который мы попытаемся обосновать в данной статье, это ограниченность и унификация всех анализаторов по своей «рабочей» размерности, тогда и согласовывать их будет существенно проще. Унификация возможна за счет звена, которое присутствует во всех анализаторах и связано с их «выходом» – моторным действием. Наличие множества параллельно работающих, но в необходимой степени координированных анализаторов (при наличии общей моторной цели), позволяет организму в целом учитывать огромное количество различных признаков окружающей среды и действовать в ней различными способами, демонстрируя огромный, возможно не ограниченный репертуар реакций.

Накопленные к настоящему времени экспериментальные данные об организации и свойствах мозга человека и животных позволяют обосновать выдвинутую гипотезу и оценить «рабочую» размерность всех анализаторов. Во-первых, это обнаружение «зеркальных» нейронов, отвечающих не столько за действие, сколько за полимодальное восприятие, кодируемое через движение [9]. При этом зрительное кодирование действий производится на чрезвычайно высоком уровне сложности, имеются нейроны, способные объединять получаемую при наблюдении информацию о направлении взгляда визави и выполняемых им движениях. В результате авторы [9] приходят к выводу, что объекты вокруг нас и содержащее их пространство могут быть описаны как *точки приложения потенциальных действий и система связей между ними*, которая формируется благодаря этим действиям и привязана к различным частям тела. Причем зеркальные нейроны могут быстро перестраиваться в зависимости от некоторых условий выполнения действия, например, когда обезьяна пользуется орудием, позволяющем ей дотянуться до более далеких предметов, соответствующее рецептивное поле руки (тактильное) увеличивается пропорционально этому и нейрон начинает также реагировать на более далекие зрительные стимулы, на которые он раньше не реагировал [9].

Во-вторых, большое значение имеют результаты исследования систем пространственной ориентировки и открытие нейронов «места», нейронов «цели» и нейронов «координатной сетки» [18], а также механизмов формирования и трансформации бимодальной системы пространственной ориентировки (на примере мозга совы) [21]. Так, клетки «координатной сетки» крысы организуются в шестигранные массивы, которые покрывают мозаикой все локальное поле ее действий. Нейроны «координатной сетки» группируются в дискретные модули, которые организованы также и в анатомическом

пространстве соответствующей области мозга (дорсальной части медиальной энторинальной коры), где масштаб сетки систематически возрастает с анатомическим расстоянием от дорсальной границы этой области мозга [12]. При этом обнаруживается зрительно-обусловленная адаптация данной координатной сетки по отношению к ближайшей стене (границе поля действия), которая может искажаться (отклоняться примерно на 7.5 град.) в связи с оптическим эффектом ее удаления [18]. Показано, что мозг совы-сипухи (*Tyto alba*) и многих млекопитающих (включая человека) определяет направление на источник звука на основе сравнения двух копий звукового сигнала, получаемых от каждого уха, создавая карту слухового пространства во внешнем ядре *inferior colliculus* [15]. Для каждого нейрона пространство специфицировано благодаря комбинированной селективности по отношению к разнице во времени прихода сигнала и разницы в громкости, а также частотной конвергентности. Последние работы представили огромное количество данных, доказывающих, что эти сигналы перемножаются в узких частотных каналах и интегрируются по частотному диапазону с использованием линейного порогового механизма [13, 21], что характерно для функционирования «вдвойного синапса» (ди-синаптического входа или синапса на синапсе). С точки зрения механизмов кодирования следует обратить особое внимание на обнаруживаемые изоморфные отношения между пространством воспринимаемого данным анализатором качества и пространством соответствующей области мозга [17, 24, 21]. Совы имеют также отличные возможности ночного видения. Интеграция зрительной и слуховой информации происходит в зрительной покрывке (*optic tectum*), которая является самым высоким уровнем среднего мозга совы, где слуховая пространственная карта интегрируется с визуальной картой пространства. Эксперименты по искусственному искажению зрительного восприятия посредством специальной призмы, которая отклоняет направление взгляда на определенный угол в определенную сторону, дали интересные результаты по нейронным механизмам формирования аудиовизуальной интеграции. Вживление призмы первым делом нарушает зрительно-моторную ориентировку поведения совы, в результате она систематически промахивается при нападении на жертву и при посадке на дерево. В первых пробах это не отражается на слуховой системе, однако зрительно-моторная регулировка быстро восстанавливает точность реакции при достижении визуальных целей. Но в результате этого эффекта быстрой пластичности теперь достижение только слуховых целей нарушается, становится систематически неточным. Однако практика в течение недель или месяцев позволяет сове решить эту дилемму посредством изменения связи слуховых ориентиров и движения так, что теперь оптически смещенный взгляд падает на слуховую цель [21]. Это реализуется за счет обратной связи, которая

является топографической по своей природе (по пространству мозга). Она выходит из промежуточных и глубоких слоев зрительной покрывки (optic tectum), от нейронов, дендритная архитектура которых ориентирована таким образом, чтобы получать сразу оба входа – и слуховой, и зрительный, а заканчивается в области, где найдены конкретные пространственные нейроны слуховой карты [21]. Это процесс, когда неизменный сигнал от одной сети используется для регулирования свойств отклика другой, демонстрирует, что индуцированная призмой адаптационная пластичность является формой обучения «по инструкции» (сеть с «учителем»), которая реализуется с помощью роста новых синапсов, систематического «сдвига» синаптических контактов, компенсирующих оптический сдвиг [14].

Большое значение для понимания необходимости и механизма координации также имеет обнаружение возможности переключения нейронов сенсорной (зрительной) коры (на примере мозга кошки) с анализа сенсорной (зрительной) информации во время бодрствования на анализ висцеральной информации во время сна, а также механизмов быстрого синаптического модулирования активности нейронов [6, 7]. Эта модуляция базируется на корково-подкорковых связях, главный управляющий центр при этом находится в подкорковых ядрах – хвостатом ядре и бледном шаре [6, 7], которые ранее относились к моторной системе. Причем в последнее время доказан механизм такого оперативного – сильного и точного в пространственно-временном отношении нервного входа от восходящего нейромодуляторного центра. Оказалось, что селективная стимуляция серотониновых нейронов среднего шва производит быструю активацию интернейронов гиппокампа. На сетевом уровне, это подкорковое влияние проявлялось в виде паттерна из эффективного ди-синаптического ГАМК-ергического торможения [25].

Все эти факты доказывают возможность и необходимость единого кодового описания различных сенсорных и моторных «данных», наличие параллельно функционирующих общих систем координат единой размерности, привязанных как к различным частям тела, так и к «абсолютному» внешнему пространству. Но сами зеркальные нейроны всего лишь итог работы координированных анализаторов, командные нейроны, получающие вход от детекторов, образующих условно называемый «когнитивный экран» сенсорных репрезентаций, синхронизированных по размерности и «коду» с возможными моторными представлениями. Налицо редукция и полимодальная координация бесконечного разнообразия зрительных, слуховых и тактильных паттернов к системе моторных команд, обусловленных возможностями определенной системы органов тела (рук, рта, шеи и проч.), с учетом использования этой системы для достижения определенных целей. Причем в общем случае моторная размерность ограничена и определяется размерностью нашего

физического пространства, т.е. равна трем. Однако, с точки зрения моторного управления, в связи со спецификой функционирования моторной системы позвоночных, это четырехмерный нормированный вектор (используются вырожденные полярные координаты – три угла четырехмерной сферы). Мышечно-суставный аппарат позвоночных характеризуется наличием жесткой кости, что определяет движение конечности по сфере фиксированного радиуса; при этом мышцы могут только сокращаться, а не толкать. Поэтому для движений с одной степенью свободы требуется две мышцы (движение по полукругу – один угол). Для движения с двумя степенями свободы необходимы 3 мышцы (движение по полусфере, изменения по двум углам), а для движения с максимальными тремя степенями свободы необходимо 4 мышцы – движение в трехмерном пространстве закодировано тремя углами, это полярная система координат с константным радиусом [1, 2, 3, 4]. Наличие системы сочлененных рычагов, хотя и повышает число возможных степеней свободы, но это повышение избыточно, т.к. сказывается лишь на разных способах достижения цели в одном и том же трехмерном физическом пространстве, а нервной системе приходится решать проблему подавления этой избыточности. При этом в верховном моторном центре мозга кодируется не столько набор необходимых для движения мышечных сокращений (какое мышечное волокно и в какой момент времени должно сокращаться), а локационно отображена определенная точка самого внешнего пространства, конечная цель движения [2, 3]. Это возможно, так как многоуровневое управление осуществляется, в первую очередь, модуляцией (перенастройкой) сенсорной чувствительности регулятора системы управления нижележащего уровня, которая, в частности, автоматически поддерживает положение органа движения в заданной точке пространства, компенсируя все случайные отклонения от него (например, гамма-мотонейроны спинного мозга) [8]. Целенаправленное изменение чувствительности (в первую очередь проприоцептивной) под влиянием управляющего воздействия даже в отсутствие фактического изменения положения органа движения воспринимается нижележащей системой как отклонение от цели и автоматически приводит к переводу этого органа в новую точку поддержания равновесия в соответствии с новым паттерном чувствительности. В связи с задачами управления такое кодирование более эффективно, поскольку обеспечивает автоматическую подстройку нижележащей системой управления и «освобождает» вышележащую систему управления от знания начального (текущего) положения управляемого органа и упрощает кодовое представление координатами одной конечной цели.

Разрабатываемая концептуальная модель координации (см. также [4]) представляет собой координированную систему локальных многослойных перцептронов (анализаторов), выходы которых согласованы за счет



одинакового кода и размерности (четырёхмерный нормированный «сферический» вектор). Каждый локальный анализатор (также, как и в картах самоорганизации Кохонена) преобразует непрерывное входное (сенсорное) пространство образов активации с помощью процессов конкуренции между отдельными нейронами (и их группами) в дискретное пространство топологически упорядоченных нейронов, организованных в «вычислительную» карту, в которой пространственно кодируется конкретная область признаков данных. Но при этом, за счет внутреннего промежуточного слоя (детекторы) происходит нормализация и ортогонализация входного сигнала. Также предполагается двойное соответствие: во-первых, данная нейрональная карта (детекторы) прямо соотносится и с картой командных нейронов, а через него и с внешним пространством (т.е. согласуется с его кодовой формой – полярными координатами командного вектора для достижения с помощью движения любой точки внешнего трехмерного пространства). При этом связи между этими двумя нейрональными пространственно упорядоченными картами могут оперативно перенастраиваться (корректироваться) за счет полисинаптической кратковременной пластичности ди-синаптически регулируемого синапса, что в математическом смысле соответствует трансформации системы координат (в первую очередь вращению, которое реализуется перемножением матриц) в результате чего базисы этих пространственных «карт» становятся одинаково ориентированными. Это обеспечивается процессом самоорганизации в комбинации двух механизмов долгосрочной модификации соответствующих синапсов (связей): 1) на основе принципа Хебба в соответствии с гипотезой ковариации [22] когда связь в синапсе усиливается, если отклонения пресинаптического сигнала от своего среднего значения коррелируют с отклонением активности постсинаптического нейрона, и ослабляется в противоположном случае; 2) на основе обратной связи реализуется механизм «обучения с учителем», когда сигнал ошибки может формироваться по отклонению от метрической упорядоченности рассогласования текущего вектора активации и команды действия выходного вектора (и соответствующего вектора коррекции) необходимого, например, для поддержания константности при полной компенсации сенсорных изменений, вызванных собственным действием системы (своего рода «самоучитель»).

Во-вторых, в процесс формирования связей вовлекается еще и необходимость согласования двух (или нескольких) локальных анализаторов, которые могут систематически влиять друг на друга (например, тормозить). При этом один анализатор может также выступать в качестве «учителя» для второго анализатора с целью перенастройки его связей в процессе коррекции ошибок (как это экспериментально наблюдается в мозге совы). В итоге такая система получает возможность не только самоорганизации за счет

закономерной подстройки весов связей во всех слоях (изначально имеется большая избыточность этих связей) для достижения такой двойной упорядоченности, но и с целью достижения взаимной двойной упорядоченности. Важной особенностью такой конструкции является использование в качестве процесса «обучения» сенсорного распознавания принципов моторного управления.

*Исследование поддержано РФФИ, проект № 13-06-00553*

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн, Н.А. Общая биомеханика / Н.А. Бернштейн. – М., 1926. – 416 с.
2. Бернштейн, Н.А. О ловкости и ее развитии / Н.А. Бернштейн. – М.: Изд во «Физкультура и спорт», 1991. – 288 с.
3. Бернштейн, Н.А. Физиология движений и активность / Н.А. Бернштейн. – М.: Наука, 1990. – 494 с.
4. Вартанов, А.В. Механизмы семантики: человек – нейрон – модель / А.В. Вартанов // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение.* – 2011. – № 12. – С. 54-64.
5. Вартанов, А.В. Феномен семантического конфликта в системе искусственно сформированных бимодальных знаков / А.В. Вартанов, И.В. Пасечник // *Вест.Моск.Ун-та. Сер. 14 Психология.* – 2010. – №4. – С. 165-180.
6. Пигарев, И.Н. Висцеральная теория сна / И.Н. Пигарев // *Журн. высш. нервн. деят.* – 2013. – Том 63. – № 1. – С. 86–104.
7. Пигарев, И.Н. Сон и контроль висцеральных функций / И.Н. Пигарев, М.Л. Пигарева // *Рос. физ. журн. им. И.М.Сеченова.* – 2011. – Т. 97. – № 4. – С. 374- 387.
8. Прибрам, К. Языки мозга / К. Прибрам. – М.: Прогресс, 1975. – 464 с.
9. Риццоллатти, Дж. Зеркала в мозге: О механизмах совместного действия и сопереживания / Дж. Риццоллатти, К. Синигалья — М.: Языки славянских культур, 2012. – 208 с.
10. Фомин, С.В. Искусственные органы чувств. Моделирование сенсорных систем / С.В. Фомин, Е.Н. Соколов, Г.Г. Вайткявичус. – М.: Наука, 1979. – 180 с.
11. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2008. – 1104 с.
12. Brun, V.H. Progressive increase in grid scale from dorsal to ventral medial entorhinal cortex / V.H. Brun, T. Solstad, K.B. Kjelstrup, M. Fyhn, M.P. Witter, E.I. Moser, M.B. Moser // *Hippocampus.* – 2008. – Vol.18. – P. 1200–1212.
13. Fischer, B.J. Multiplicative auditory spatial receptive fields created by a hierarchy of population codes / B.J. Fischer, C.H. Anderson, J.L. Peña // *PLoS One.* – 2009. – Vol.4. – e8015.
14. Knudsen, E.I. Supervised learning in the brain / E.I. Knudsen // *J Neurosci.* – 1994. – Vol.14 – P. 3985–3997.
15. Konishi, M. Coding of auditory space / M. Konishi // *Annu. Rev. Neurosci.* – 2003. –Vol. 26. – P. 31–55.
16. McGurk, H. Hearing lips and seeing voices / H. McGurk, J.MacDonald // *Nature.* – 1976. – Vol. 264. – P. 746-748.
17. Mogdans, J. Representation of interaural level difference in the VLVp, the first



- site of binaural comparison in the barn owl's auditory system / J. Mogdans, E.I. Knudsen // *Hear Res.* – 1994. – Vol. 74. – P. 148–164.
18. Moser, E.I. Grid cells and the entorhinal map of space / E.I. Moser / Nobel Prize in Physiology or Medicine Nobel Lecture 071214
  19. Pasechnik, I.V. Integration mechanisms of local analyzers / I.V. Pasechnik, A.V. Vartanov // *International Journal of Psychophysiology.* – 2008. – Vol. 69. – No. 3. – P. 265.
  20. Pasechnik, I.V. Audiovisual integration: the experimental facts and neurocomputer modeling / I.V. Pasechnik, A.V. Vartanov / *Neural Networks and Artificial Intelligence (ICNNAI-2008): Proceedings of the Fifth International Conference (27-30 May, 2008, Minsk, Belarus).* – Minsk: Propilei, 2008. – P. 151-154.
  21. Peña, J.L. Auditory Processing, Plasticity, and Learning in the Barn Owl / J.L. Peña, W.M. DeBello // *ILAR J.* – 2010. – Vol. 51(4). – P. 338–352.
  22. Sejnowski, T.J. Strong covariance with nonlinearly interacting neurons / T.J. Sejnowski // *J. Mattheoretical Biology.* – 1977. – Vol.4. – P. 303-321.
  23. Stroop, J. Studies of interference in serial verbal reactions / J. Stroop // *J. Exp. Psychol.* – 1935. – Vol. 18. – P. 643-662.
  24. Takahashi, T.T. An anatomical substrate for the inhibitory gradient in the VLVp of the owl / T.T. Takahashi, C.L. Barberini, C.H. Keller // *J. Comp. Neurol.* – 1995. – Vol. 358. – P.294–304.
  25. Varga, V. Fast Synaptic Subcortical Control of Hippocampal Circuits / V. Varga, A. Losonczy, B.V. Zemelman, Z. Borhegyi, G. Nyiri, A. Domonkos, B. Hangya, N. Holderith, J.C. Magee, T.F. Freund // *Science.* – 2009. – Vol. 326. – No. 5951. – P. 449 – 453.