

Определение направлений потоков информации между популяциями импульсных нейронов

Б.Б. Батуев
ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
Москва, Россия
buligarmouth@gmail.com

С.В. Сухов
УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
Ульяновск, Россия
ssukhov@ulireran.ru

Аннотация — Понимание причинно-следственных отношений между различными областями коры головного мозга может помочь раскрыть механизмы обработки информации и взаимодействия между этими областями. Понимание работы мозга поможет дальнейшему развитию когнитивных систем искусственного интеллекта. В данной работе исследуется возможность определения направления потока информации между популяциями импульсных нейронов с использованием метода попарной причинности по Грейнджеру (GC) и частичной направленной когерентности.

Ключевые слова — вычислительная нейробиология, импульсные нейронные сети, попарная причинность по Грейнджеру, частичная направленная когерентность

I. ВВЕДЕНИЕ

Для понимания предсказательных способностей мозга, процессов внимания и организации поведения необходимо изучение потоков информации в иерархии областей мозга. Несмотря на бурное развитие экспериментальных методов нейробиологии, таких как функциональная МРТ, оптогенетика, акустооптическая микроскопия и т.д., определение направления потоков информации на больших масштабах и с разрешением на уровне нейронов остается нетривиальной задачей. На помощь могут прийти методы вычислительной нейробиологии [1-4]. Настоящее исследование посвящено изучению возможных механизмов связи и передачи информации между разными частями сети в биологически правдоподобных моделях импульсных нейронных сетей.

В работе Mejias [1] построена модель взаимодействия между сигналами прямой и обратной связи, которая демонстрирует сложную динамику в различных масштабах и успешно воспроизводит нейрофизиологические данные о частотно-зависимых взаимодействиях в зрительных областях коры.

В нашей работе мы воспроизвели минимальную модель взаимодействия областей V1, V4 зрительной коры головного мозга. Каждая моделируемая кортикальная область состояла из двух слоев: надгранулярного (включающего в себя слои II и III коры) и подгранулярного (слои V и VI коры). Такая модель позволила реализовать связи между популяциями нейронов при учете слоистой структуры неокортекса.

Взаимодействия между различными областями мозга характеризуются нейрональными осцилляциями, которые представляют собой повторяющиеся паттерны нейронной активности, возникающие в мозгу.

Воздействие одной области на другую исследовано с помощью теста причинности по Грейнджеру (Granger causality, GC) и частичной направленной когерентности. GC – это статистическая концепция, используемая для определения того, можно ли использовать один

временной ряд для прогнозирования другого. Частичная направленная когерентность – это понятие, связанное с анализом данных или сигналов, которое описывает степень согласованности или корреляции между различными компонентами данных, но в определенном диапазоне или с определенными ограничениями.

II. МОДЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА

В нашем исследовании построена модель импульсной нейронной сети состоящей из нескольких популяций нейронов. Такая структура сети может моделировать часть зрительной коры (популяции, связанные области V1, V4) [1] с 3 уровнями – локальный, отмечен сплошным прямоугольником (n1-n2), контурный, отмечен пунктирным прямоугольником (n1-n4), модульный (n1-n8) (рис. 1). Исследование проводилось в симуляторе NEST для моделирования спайковых нейронных сетей [5]. В каждой из популяций использовались «leaky integrate-and-fire» нейроны. Популяции нейронов обозначены n1-n8, где n1-n4 – популяции зрительной области V1, а n5-n8 – популяции зрительной области V4. В возбуждающих популяциях по 40 нейронов, а в тормозящих популяциях по 10 нейронов. Треугольниками обозначены возбуждающие связи, а круги означают тормозящие связи. На возбуждающие популяции нейронов n1, n5, подается переменный ток (ac1) амплитудой 1000 пА с частотой 40 Гц. На возбуждающие популяции нейронов n3, n7, подается переменный ток (ac1) амплитудой 500 пА с частотой 12 Гц. vm1-v4 – вольтметры, которые измеряют мембранный потенциал на популяции.

Для надгранулярных популяций нейронов мы выбрали значения параметров так, чтобы популяции демонстрировали гамма-ритм (~40 Гц). Для подгранулярных цепей мы скорректировали значения параметров, чтобы колебания попадали в альфа- (~10 Гц) или низкочастотный бета- (~15-30 Гц) частотный

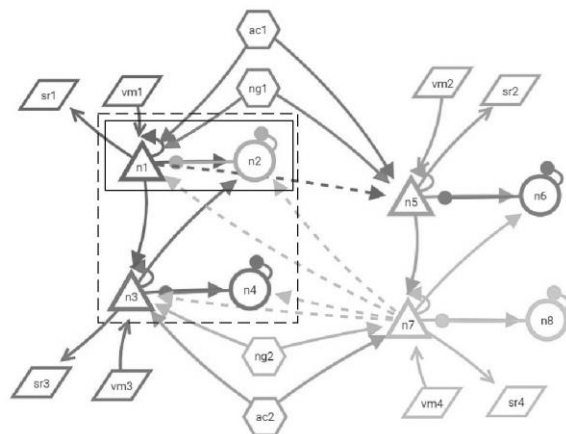


Рис. 1. Схема модели V1-V4 в NEST

диапазон. На надгранулярный и подгранулярный слой нейронов подается Гауссовский шум (ng1, ng2) со

стандартным отклонением 300 пА и 450 пА, соответственно.

Существует преобладающая возбуждающая проекция на контурном уровне от слоя 2/3 к возбуждающей популяции слоя 5/6, а также от возбуждающей популяции слоя 5/6 к тормозящей популяции слоя 2/3 [6, 7]. Альфа-модулированный вход из слоя 5/6 влияет на гамма- и альфа-ритмы в слое 2/3, вызывая фазово-амплитудную связь между ними. Это подтверждается экспериментальными данными и отражено в нашей модели на контурном уровне [8].

Проекция прямой связи вдоль визуальной иерархии исходит из надгранулярных слоев и предпочтительно нацелены на слой 4, который, в свою очередь, проецируется на слой 2/3 в этой области [9, 10]. В нашей модели это аппроксимируется проекцией, показанной пунктирными стрелками, пирамидальных нейронов слоя 2/3 в V1 на пирамидальные нейроны слоя 2/3 в V4. Напротив, проекция обратной связи, показанные пунктирными стрелками, происходят из подгранулярных слоев (преимущественно из слоя 6) и нацелены на над- и подгранулярные слои, избегая слоя 4 [1].

Перекрестная спектральная плотность, попарная причинность по Грейнджеру и частичная направленная когерентность в прямом и обратном направлении тока показаны на рис. 2. Сплошная линия показывает прямую связь между возбуждающими популяциями надгранулярных слоев ($V1 \rightarrow V4$), пунктирная линия показывает обратную связь между возбуждающими популяциями подгранулярных слоев ($V4 \rightarrow V1$). На графике попарной причинности по Грейнджеру, если значение p -уровня, меньше некоторого уровня значимости (обычно 0,05), то это может свидетельствовать о том, что один временной ряд действительно влияет на другой.

На графике с 12 до 15 Гц популяция V4 оказывает статистически значимое влияние на популяцию V1. В то время как на частоте 40 Гц популяция V1 оказывает

статистически значимое влияние на популяцию V4. Рис. 2. подтверждает идею о том, что усиленные гамма- и альфа-/низкочастотные-бета-ритмы связаны с коммуникацией в прямом и обратном направлении соответственно [1].

Код, использованный для получения результатов, представленных в этой статье, доступен по ссылке: <https://github.com/buligar/nest-v1v4.git>. Результаты нашего моделирования согласуются как с теоретическими результатами работы [1], так и с экспериментальными данными. Стоит отметить что, как и попарная причинность по Грейнджеру, так и частичная направленная когерентность, также отображает передачу в прямом ($V1, V4$) и обратном ($V4, V1$) направлении.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтверждено, что V1 является предсказанием для V4, а V4 является предсказанием для V1, и поэтому гамма- и альфа-/низко-бета-ритмы связаны с коммуникацией в прямом и обратном направлении, соответственно. Результаты исследования показывают, что причинность по Грейнджеру и частичная направленная когерентность может быть эффективным инструментом для определения причинности между различными областями мозга.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа выполнена при поддержке Научного Центра «Идея».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mejias, J.F. Feedforward and feedback frequency-dependent interactions in a large-scale laminar network of the primate cortex / J.F. Mejias, J.D. Murray, H. Kennedy, X.J. Wang // *Science advances*. – 2016. – Vol. 2(11). – P. e1601335.
- [2] Schneider, M. A mechanism for inter-areal coherence through communication based on connectivity and oscillatory power / M. Schneider, A.C. Broggin, D. Benjamin et al. // *Neuron*. – 2021. – Vol. 109(24). – P. 4050-4067.
- [3] Schmidt, M. A multi-scale layer-resolved spiking network model of resting-state dynamics in macaque visual cortical areas / M. Schmidt, R. Bakker, K. Shen et al. // *PLOS Computational Biology*. – 2018. – Vol. 14(10). – P. e1006359.
- [4] Wang, X.J. Theory of the multiregional neocortex: large-scale neural dynamics and distributed cognition / X.J. Wang // *Annual review of neuroscience*. – 2022. – Vol. 45. – P. 533-560.
- [5] Gewaltig, M.O. Nest (neural simulation tool) / M.O. Gewaltig, M. Diesmann // *Scholarpedia*. – 2007. – Vol. 2(4). – P. 1430.
- [6] Binzegger, T. A. quantitative map of the circuit of cat primary visual cortex / T. Binzegger, R.J. Douglas, K.A.C. Martin // *Journal of Neuroscience*. – 2004. – Vol. 24(39). – P. 8441-8453.
- [7] Dantzker, J.L. Laminar sources of synaptic input to cortical inhibitory interneurons and pyramidal neurons / J.L. Dantzker, E.M. Callaway // *Nature neuroscience*. – 2000. – Vol. 3(7). – P. 701-707.
- [8] Spaak, E. Layer-specific entrainment of gamma-band neural activity by the alpha rhythm in monkey visual cortex / E. Spaak, M. Bonnefond, A. Maier et al. // *Current biology*. – 2012. – Vol. 22(24). – P. 2313-2318.
- [9] Felleman, D.J. Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex / D.J. Felleman, D.C. Van Essen // *Cerebral cortex*. – 1991. – Vol. 1(1). – P. 1-47.
- [10] Markov, N.T. Anatomy of hierarchy: feedforward and feedback pathways in macaque visual cortex / N.T. Markov, J. Vezoli, P. Chameau et al. // *Journal of Comparative Neurology*. – 2014. – Vol. 522(1). – P. 225-25

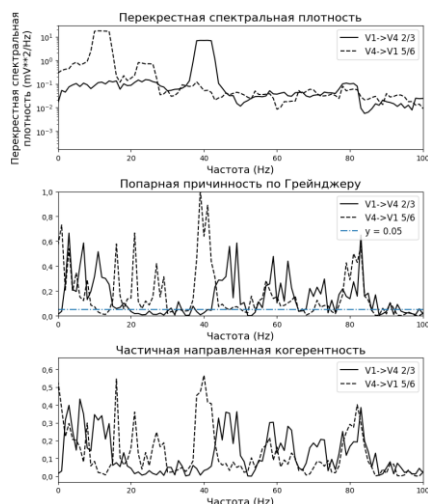


Рис. 2. Перекрестная спектральная плотность, попарная причинность по Грейнджеру и частичная направленная когерентность в прямом и обратном направлении