

Я.Б. Казанович

**Моделирование внимания на основе
осцилляторных нейронных сетей**

**Институт математических проблем биологии РАН – филиал
Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН**

**XIX научная школа «Нелинейные волны – 2020»
Нижний Новгород, 29 февраля – 6 марта 2020 г.**

Аннотация

- Лекция посвящена сетям фазовых осцилляторов с центральным элементом и возможности их применения для реализации процедуры "победитель получает все" в нейронных сетях. В качестве примера будет описана модель зрительного поиска, основанная на синхронизации электрической активности между информационными и управляющими областями коры мозга.

План

- 1. Биологические предпосылки для моделирования.
- 2. Фазовые осцилляторы.
- 3. Модель зрительного поиска на основе фазовых осцилляторов.

Ритмы мозга

- В электрической активности мозга присутствуют ритмические компоненты в различных частотных диапазонах. Колебания активности коррелируют с физиологическими состояниями организма и внешними воздействиями. Устойчивые паттерны колебательной активности регистрируются на уровне активности отдельных нейронов, нейронных популяций и структур мозга. Соответствующие экспериментальные данные были получены в первичных зонах зрительной коры, обонятельной коре, сенсомоторной коре, в таламусе, гиппокампе и других структурах.

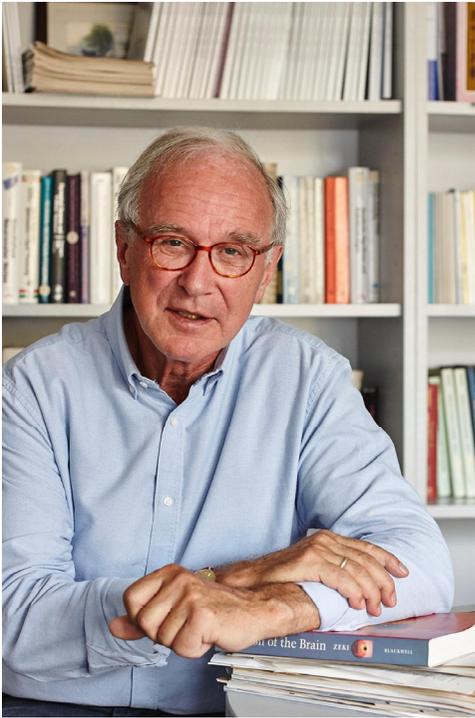
Колебания, зачем они нужны мозгу?

- Периодические движения: дыхание, сердцебиение, ходьба, плавание.
- Патологическая осцилляторная активность: болезнь Паркинсона, эпилепсия.
- Когнитивные функции мозга: связывание признаков в цельный образ (байндинг), внимание, детекция новизны, формирование памяти, вспоминание, восприятие, сознание.

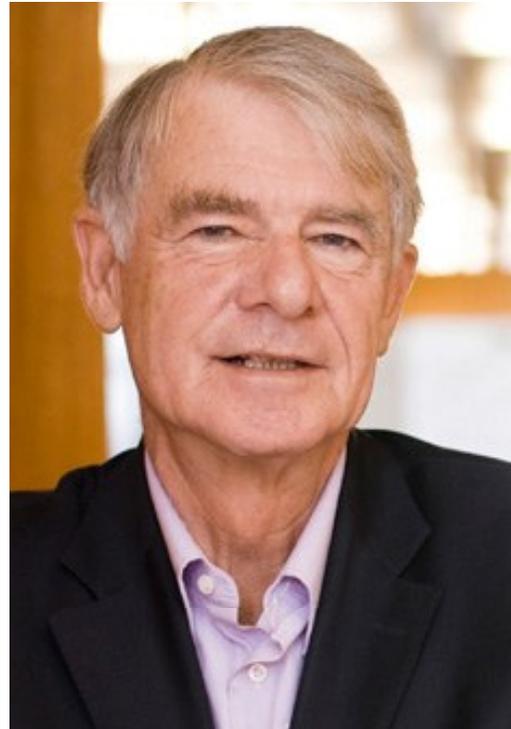
Теоретические концепции

- Теория временной коррелиции (von der Malsburg, Singer, Gray): индивидуальные объекты представляются в мозге ансамблями синхронно работающих нейронов. Синхронизация между ансамблями, представляющими различные объекты, отсутствует. Это нейронный механизм связывания признаков (интеграции различных признаков объектов в цельные образы в соответствии с их принадлежностью объектам).
- Теория центрального управляющего элемента (ЦУЭ) системы внимания (Baddeley, Cowan). Внимание – это результат взаимодействия ЦУЭ (нейронная сеть в префронтальной коре) с нейронными ансамблями, кодирующими признаки отдельного объекта, который в текущий момент времени находится в фокусе внимания.

Фото (1)



Кристоф фон дер Мальсбург
Chrisoph von der Malsburg
• (ФРГ)



Вольф Зингер
Wolf Singer
(ФРГ)



Алан Бэддли
Alan Baddeley
(Великобритания)

Фото (2)



• М.Н. Ливанов



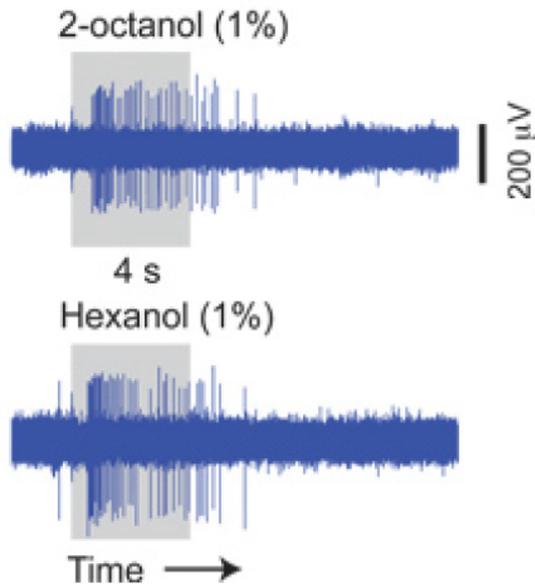
О.С. Виноградова



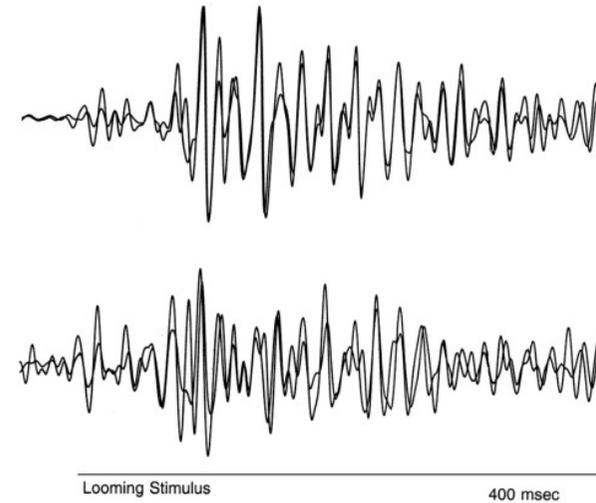
П.К. Анохин

Регистрация электрической активности

Olfactory receptor neuron recordings

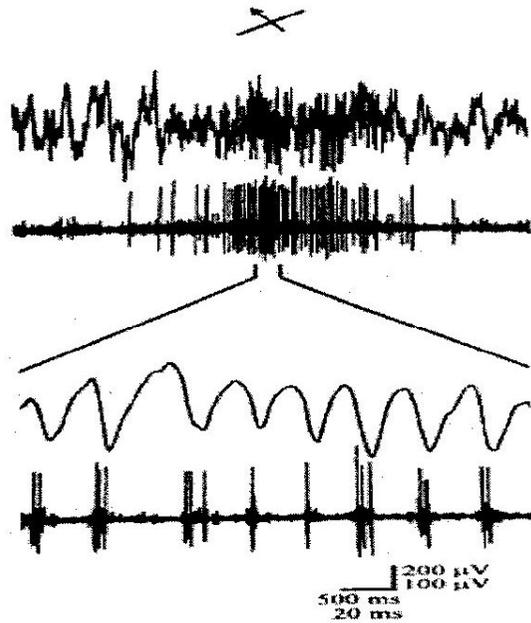


- Множественная нейронная активность (МНА) в обонятельной коре



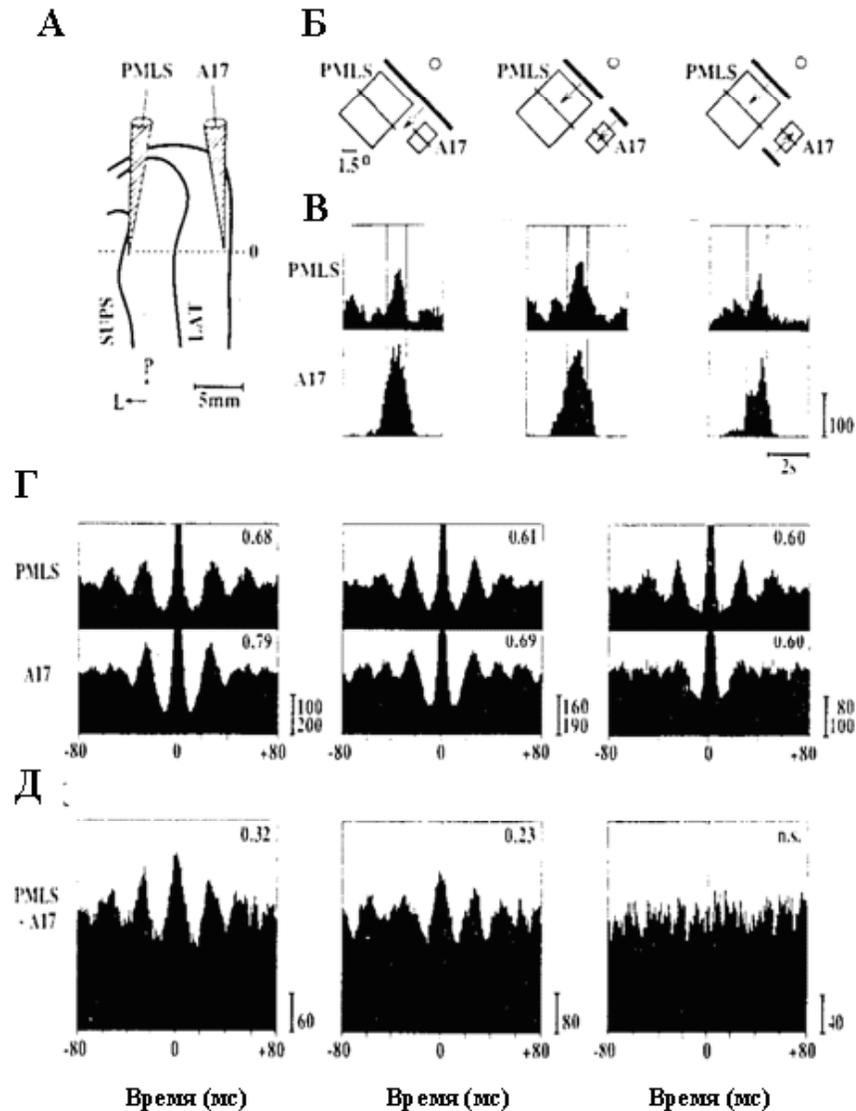
- Локальный полевой потенциал (ЛПП). Сравнение сигнала окраски, чувствительного к напряжению, и ЛПП при стимуляции светом

Колебательная активность в зрительной коре



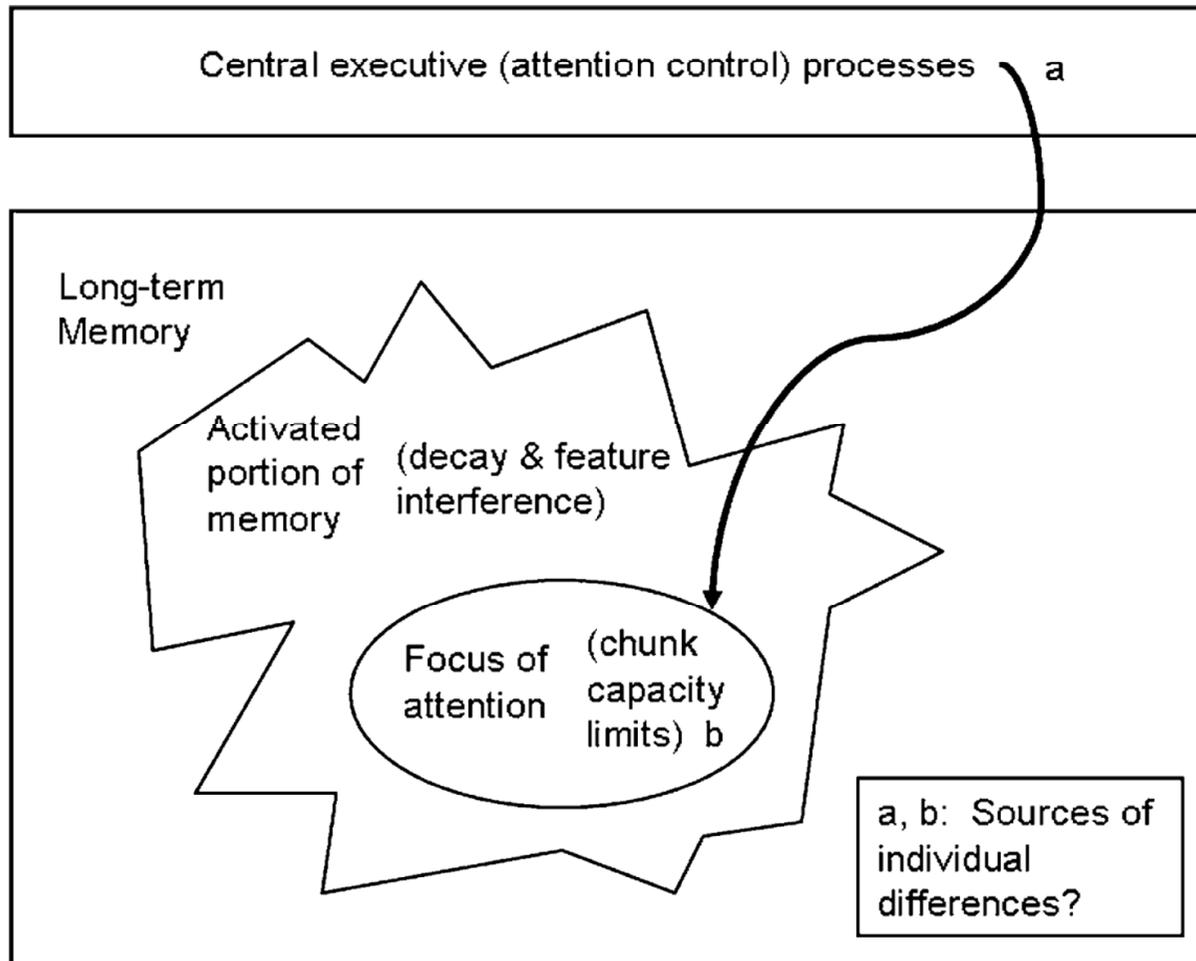
- ЛПП и МНА, записанные в поле 17 зрительной коры кошки в ответ на предъявление светлой полоски с оптимальной ориентацией, перемещающейся через рецептивное поле записываемых нейронов. Два нижних графика показывают те же данные для уменьшенного временного интервала. Отметим высокую степень синхронизации между импульсами нейронной активности и минимумами ЛПП [Gray, 1994].

Синхронизация и байндинг

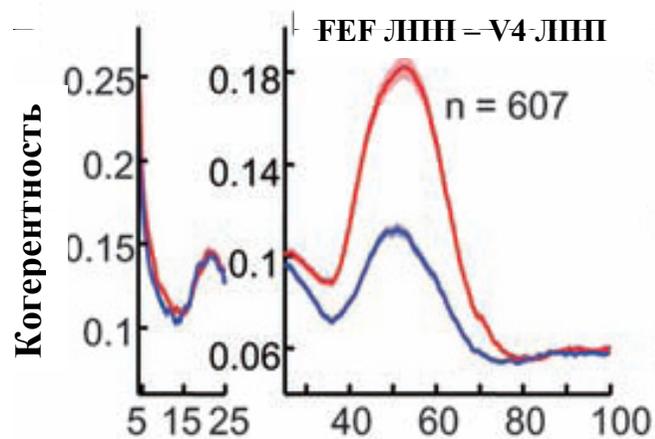
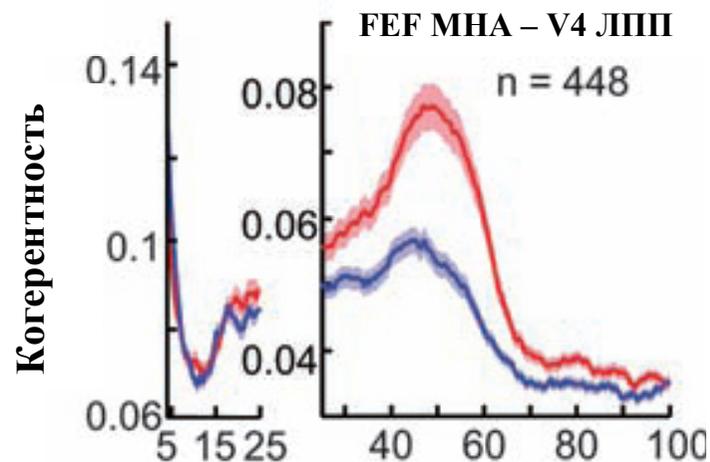


- Синхронизация нейронной активности между полями A17 (поле 17) и PMLS (posteromedial lateral suprasylvian area - область теменной коры) кошки при воздействии различными зрительными стимулами, **А**. Расположение электродов. LAT – lateral external sulcus (латеральная внешняя борозда), SUPS - suprasylvian sulcus (супрасильвиева борозда), P – постериорное, L – латеральное направления. **Б**. Типы стимулов и расположение рецептивных полей в A17 и PMLS. Маленьким кружком обозначен центр поля зрения. **В**. Постстимульные гистограммы для трех рассматриваемых стимулов. **Г**. Автокорреляционные функции для трех видов стимулов. **Д**. Кросскорреляционные функции для трех видов стимулов [Gray, 1994].

Центральный управляющий элемент (Cowan, 1988, 2008)



Синхронизация и внимание



- Уровень синхронизации между активностью во фронтальном глазном поле и поле V4 при внимании на зрительный стимул (красные кривые) и при отсутствии внимания на стимул (синие кривые). Синхронизация имеет место на частоте ~50 Гц. В области тета- и бета-ритмов синхронизация, связанная с вниманием, отсутствует (Gregoriou et al., 2009).

Математические принципы моделирования

В качестве элементов моделей используются фазовые осцилляторы (обобщенные фазовые осцилляторы). Фазовые осцилляторы представляют ансамбли биологических нейронов (кортикальные колонки), кодирующие признаки объектов. ЛПП таких ансамблей описываются непрерывными кривыми.

Динамика фазового осциллятора описывается единственной переменной, фазой колебания. Взаимодействие между фазовыми осцилляторами описывается как процесс фазовой синхронизации

Фазовый осциллятор с внешним входом

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega + a \sin(\Omega t - \theta)$$

- θ – текущая фаза,
- $d\theta/dt$ – текущая частота колебаний,
- ω – собственная частота осциллятора,
- Ω – частота внешнего входа,
- \sin – синусоидальная функция взаимодействия,
- a – параметр взаимодействия (сила взаимодействия).

Условия синхронизации с внешним входом

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega + a \sin(\Omega t - \theta), \quad \frac{d\theta}{dt} = \Omega,$$

$$\varphi = \Omega t - \theta, \quad \frac{d\varphi}{dt} = \Omega - \omega - a \sin(\varphi) = 0 \quad \Rightarrow$$

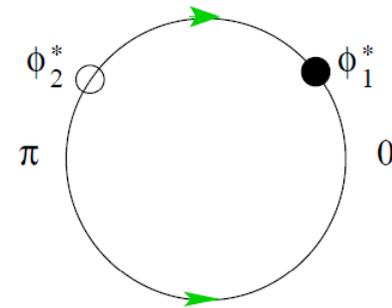
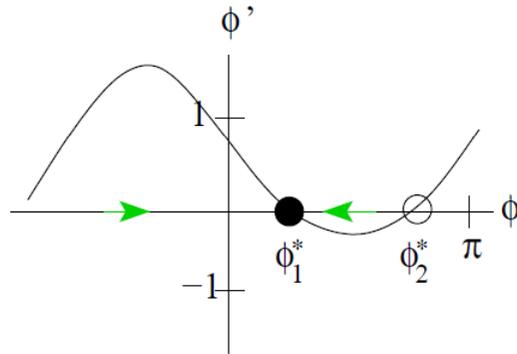
$$\varphi_1^* = \arcsin\left(\frac{\Omega - \omega}{a}\right), \quad \varphi_2^* = \pi - \arcsin\left(\frac{\Omega - \omega}{a}\right)$$

$$a \geq |\Omega - \omega|, \quad \theta = \Omega t - \varphi^*,$$

Устойчивость

$$a > \Omega - \omega > 0$$

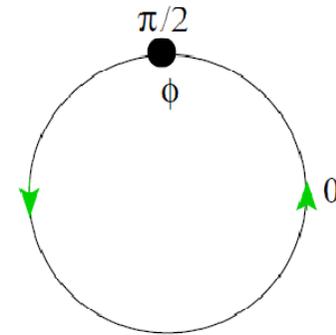
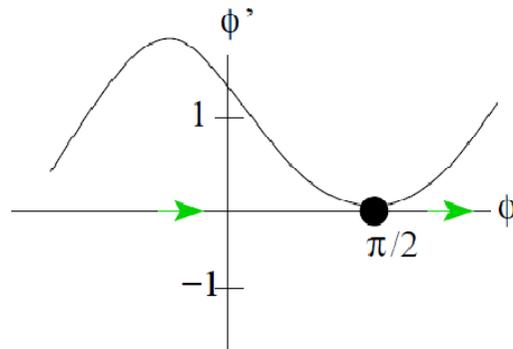
$$0 < \varphi_1^* < \frac{\pi}{2} < \varphi_2^* < \pi$$



$$a = \Omega - \omega$$

Бифуркация седло-узел

$$\varphi_1^* = \varphi_2^* = \frac{\pi}{2}$$



Система Курамото

- Глобальные связи (все-на всех)

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} f(\theta_j - \theta_i), \quad i = 1, \dots, n$$

- Локальные связи

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \sum_{j \in N_i} a_{ij} f(\theta_j - \theta_i), \quad i = 1, \dots, n$$



Йошики Курамото рассказывает о своей модели
<https://www.youtube.com/watch?v=lac4TxWyBOg>

Сеть фазовых осцилляторов с центральным элементом

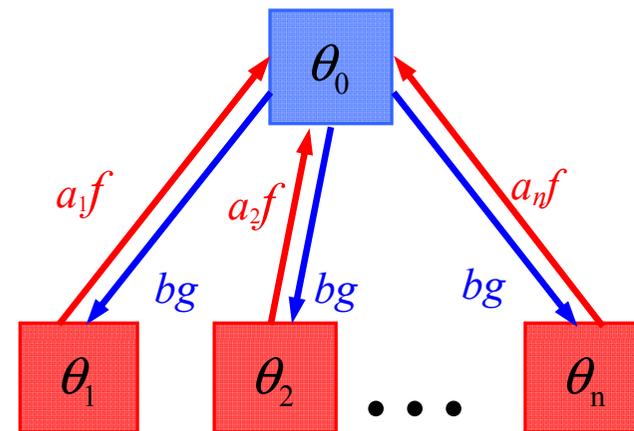
Уравнения динамики

$$\frac{d\theta_0}{dt} = \omega_0 + \frac{a}{n} \sum_{j=1}^n f(\theta_j - \theta_0)$$

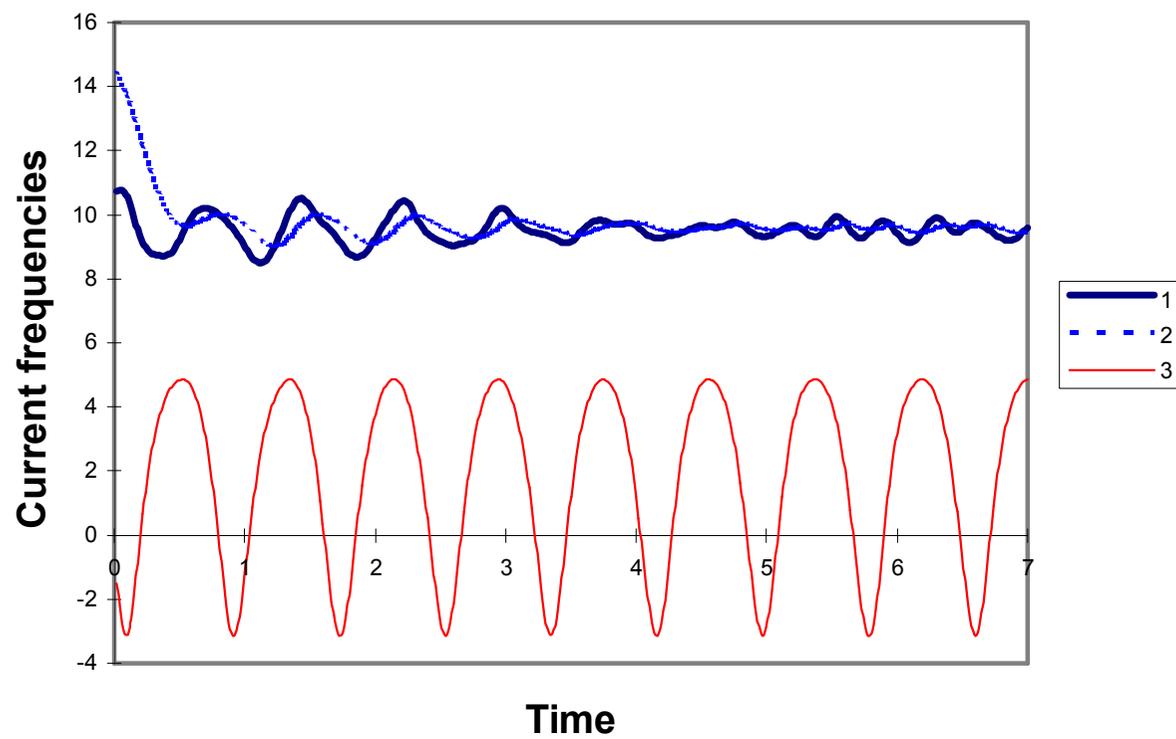
$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + b g(\theta_0 - \theta_i)$$

$$i = 1, \dots, n$$

Архитектура связей



Частичная синхронизация. Динамика текущих частот осцилляторов



Обобщенные фазовые осцилляторы

Функции взаимодействия

и резонанса

$$g(x) = \sin(x)$$

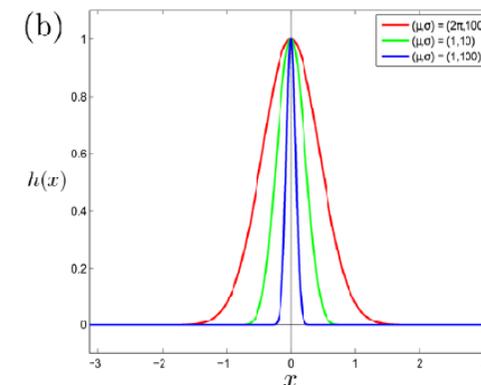
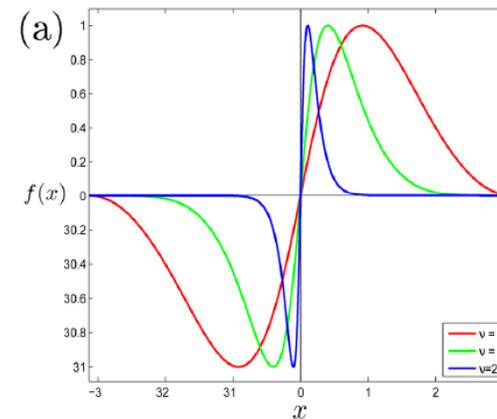
Уравнения динамики

$$\frac{d\theta_0}{dt} = \omega_0 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_j f(\theta_i - \theta_0)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + b g(\theta_0 - \theta_i), \quad i = 1, \dots, n$$

$$\frac{d\omega_0}{dt} = \frac{\alpha}{n} \sum_{i=1}^n a_j f(\theta_i - \theta_0) = \alpha \left(\frac{d\theta_0}{dt} - \omega_0 \right)$$

$$\frac{da_i}{dt} = \beta (-a_i + c + \gamma h(\theta_i - \theta_0))$$



Динамика амплитуд периферических осцилляторов

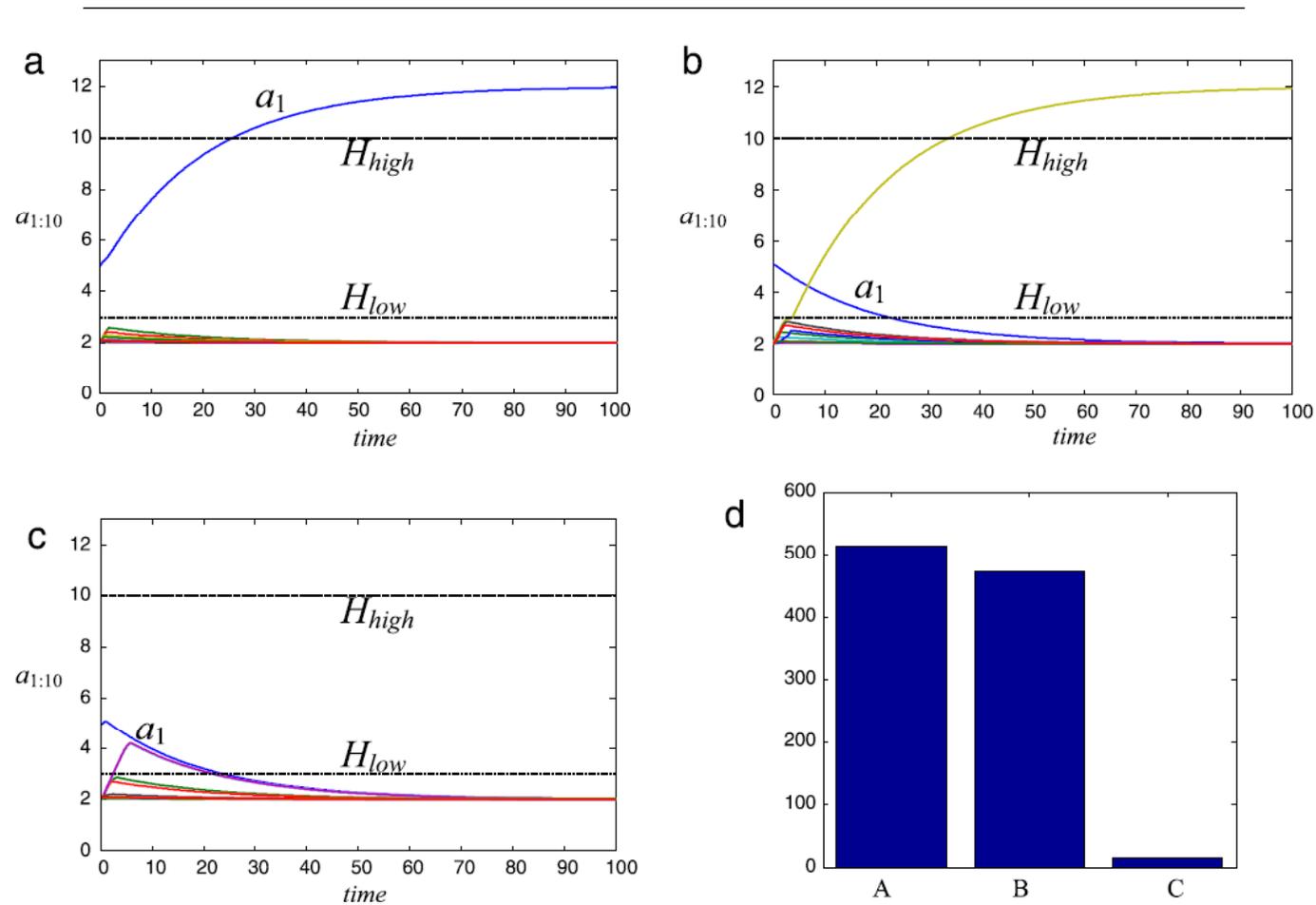
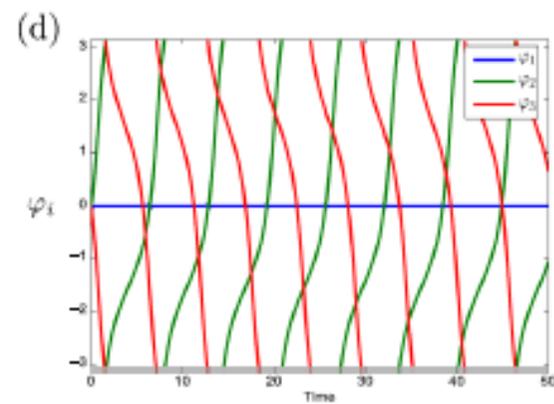
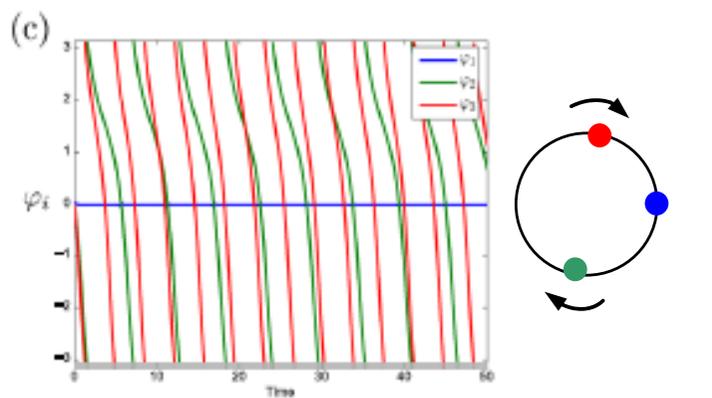
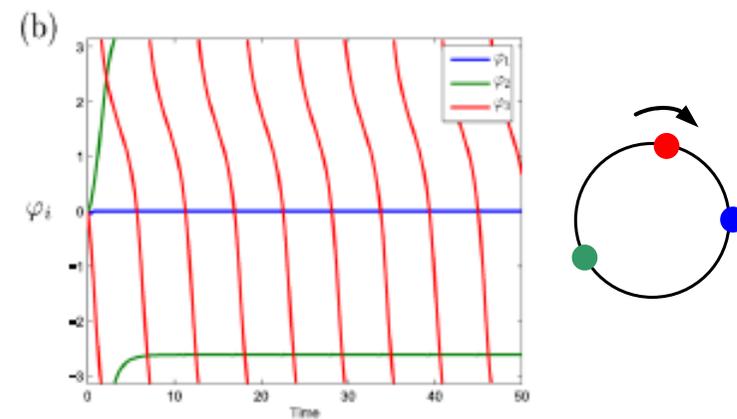
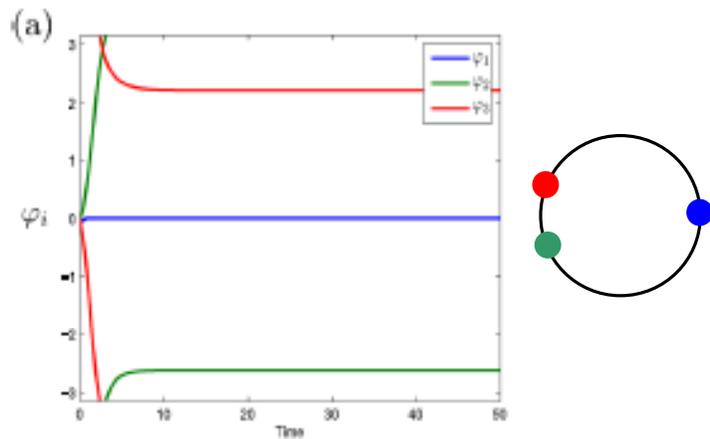


Fig. 3. The types of dynamics: (a) target selection; (b) distractor selection; (c) FOA is not formed; (d) histogram of dynamical modes. Parameter values: $n = 10$, $a_1(0) = 5$, $a_i(0) = 2$ ($i = 2, \dots, 10$).

Динамика разностей фаз между центральным осциллятором и периферическими осцилляторами



Задачи зрительного поиска

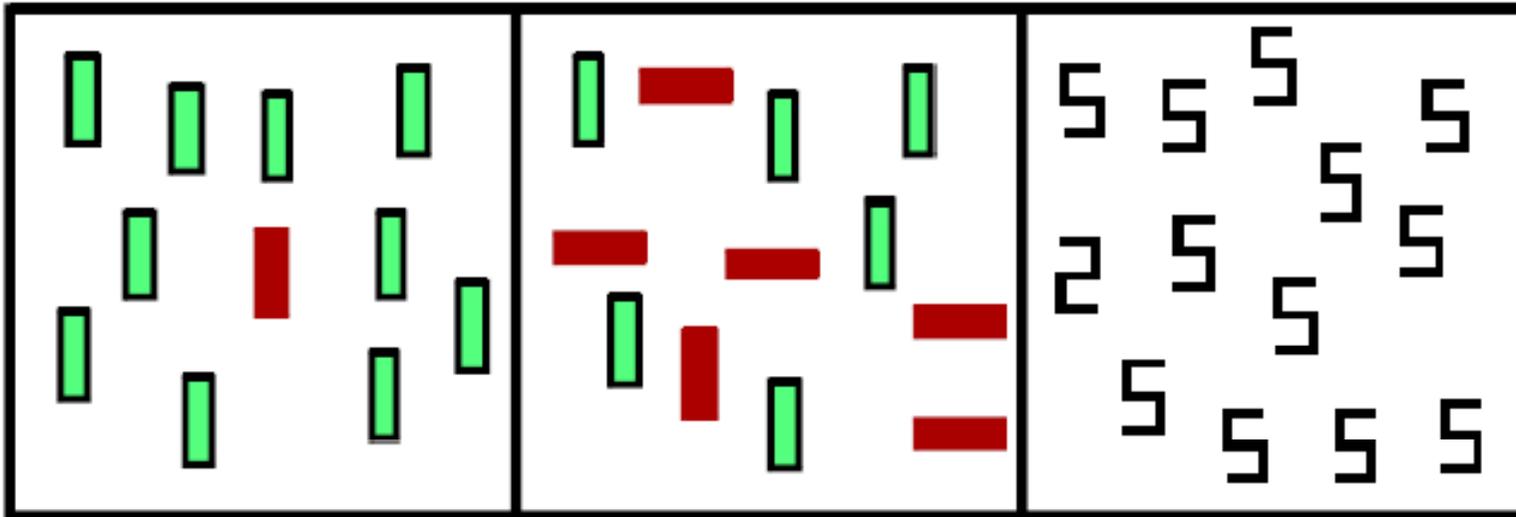
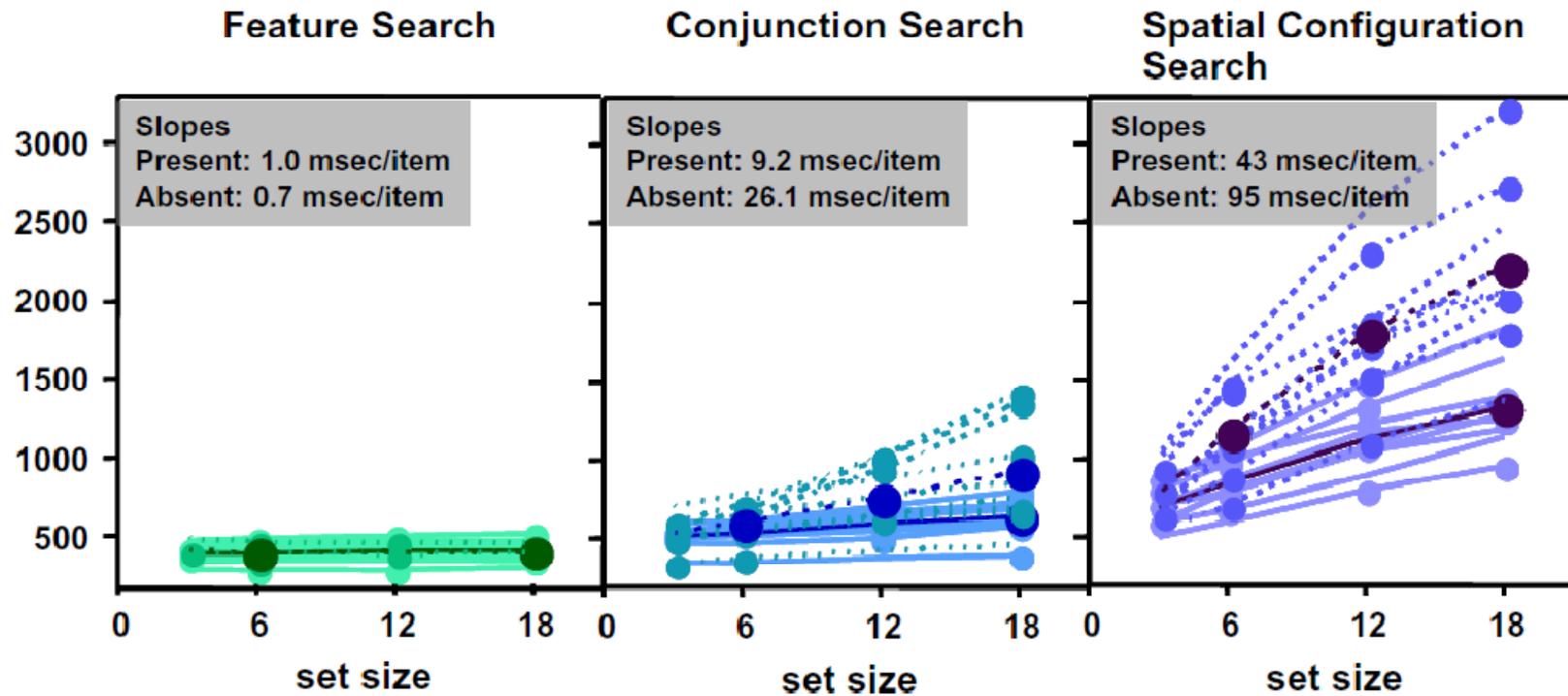
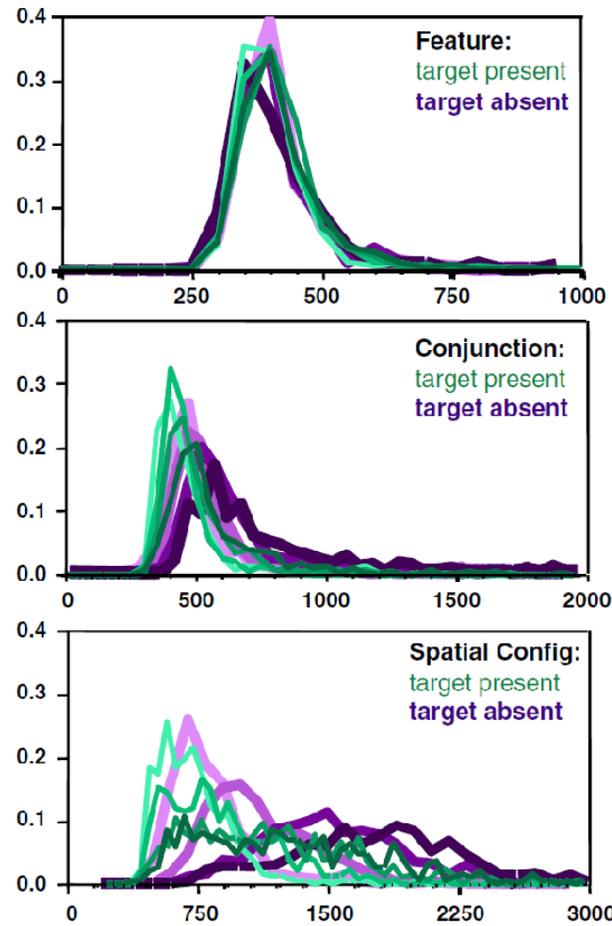


Fig. 1. Search displays corresponding to the three tasks. Experimental displays were presented on a black background. On the left, participants searched for a red (solid) vertical rectangle among green (outline) vertical rectangles (Feature Search). In the middle, participants searched for a red vertical rectangle among green vertical and red horizontal rectangles (Conjunction Search). On the right, participants searched for a digital 2 among digital 5 s (Spatial Configuration Search).

Время реакции



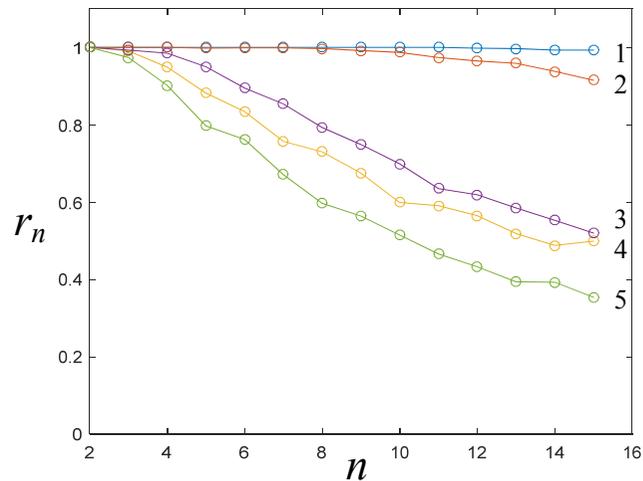
Распределение вероятностей времен реакции



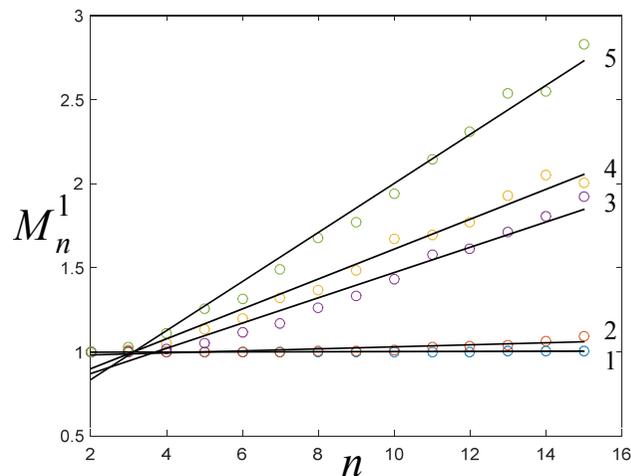
Формулировка модели

- 1. В качестве модели зрительного поиска используется сеть обобщенных фазовых осцилляторов с центральным элементом.
- 2. Центральный осциллятор играет роль ЦУЭ системы внимания. Периферические осцилляторы играют роль ансамблей осцилляторов, кодирующих различные объекты одновременно присутствующие в поле зрения.
- 3. Внимание реализуется в результате синхронизации работы центрального осциллятора с одним из периферических осцилляторов в режиме «победитель-получает-все».
- 4. Периферический осциллятор, синхронизованный с центральным осциллятором и работающий в режиме резонансной амплитуды, представляет объект, находящийся в фокусе внимания.
- 5. Заметность объекта кодируется начальной амплитудой периферического осциллятора. Чем больше заметность, тем выше начальная амплитуда и, тем самым, больше вероятность выбора более заметного объекта в фокус внимания.
- 6. Зрительный поиск осуществляется в результате нескольких попыток захвата объектов в фокус внимания до тех пор, пока не будет выбран целевой объект. Выбор объектов может быть осуществлен с возвратом или без возврата (т.е. с подавлением повторного выбора).

Результаты численных экспериментов



- Вероятность выбора целевого объекта в зависимости от числа объектов на изображении при разной «заметности» целевого объекта



- Среднее число попыток M , необходимое для выбора целевого объекта в зависимости от числа объектов на изображении при разной «заметности» целевого объекта. Время реакции пропорционально M .

Обсуждение

- Отличить системы, функционирующие на основе глобальных или локальных связей, от систем с центральным элементом нелегко. До сих пор вопрос о наличии ЦУЭ системы внимания не решен..
- Если система достаточно сложная, иерархически организованная, имеет конвергентные связи и реализует функционирование по принципу «победитель-получает-все», имеет смысл поискать, нет ли в этой системы центрального элемента.
- Следует продолжать поиск осцилляторных режимов и синхронизации, сопровождающих различные психофизические эксперименты. model studies.
- Результаты, полученные для абстрактных моделей, необходимо перепроверять на более детальных моделях. Выяснение роли многочастотных колебаний и фазовых соотношений в активности различных нейронных популяций только начинается.

Литература

- Bertram R. Phase oscillators.
<https://www.math.fsu.edu/~bertram/lectures/phase.pdf>
- Bertram R. Synchronization and phase oscillators.
https://www.math.fsu.edu/~bertram/presentations/workshops/MBI_08/sync.pdf
- Kuramoto Y. *Chemical oscillations, waves and turbulence*. Springer-Verlag, Berlin, 1984 (2012).
- Acebron J.A., Bonilla L.L., Perez Vicente C.J., Spigler R. The Kuramoto model: a simple paradigm for synchronization phenomena. *Rev. Modern Phys.*, 77: 137-185, 2005.
- Bick C., Goodfellow N., Laing C.R., Martens E.A. Understanding the dynamics of biological and neural oscillator networks through mean-field reductions: a review. arXiv:1902.05307v2 , 2019.
- Burylko O., Kazanovich Y., Borisyuk R. Winner-take-all in a phase oscillator system with adaptation. *Scientific Reports*, 8(1): 416, 2018 .
- Kazanovich Y., Borisyuk R. Reaction times in visual search can be explained by a simple model of neural synchronization. *Neural Networks*, 87: 1-7, 2017 .
- Kazanovich Y. Modeling brain cognitive functions by oscillatory neural networks. *Optical Memory & Neural Networks / Information Optics*, 28(3): 175-184, 2019 .

Соавторы



Александр Бурилко.
Институт математики
Национальной академии наук
Украины



Роман Борисюк
Институт математических
проблем биологии РАН.
Плимутский университет

Спасибо за внимание!



Пуцино