

# Задача выделения объекта на изображении: хаотично-фазовая синхронизация и асинхронность в осцилляторных нейронных сетях

Мартынов Семён

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

*semen.martynov@gmail.com*

16 декабря 2014 г.

- 1 Базовые понятия
- 2 Синхронизация и зрительное внимание
- 3 Хаотично-фазовая синхронизация
  - Аттрактор Рёсслера
- 4 Осцилляторные сети и распознавание
- 5 Результаты симуляции
- 6 Заключение
- 7 Ссылки
- 8 Вопросы

## Нейронная сеть (1)

Сложная совокупность нейронов, функционально объединенных в нервной системе и обеспечивающих взаимосвязанное поведение всех систем организма.

## Нейронная сеть (2)

Упрощенная (математическая/программная/аппаратная) модель биологической нейронной сетей.

## Осцилляторная нейронная сеть

Класс нейронных сетей, в котором рассматриваются колебательные аспекты их функционирования. Функциональной единицей осцилляторных нейронных сетей, как правило, является осциллятор, т. е. объект с колебательными свойствами.

# Синхронизация и зрительное внимание

Какие объекты находятся на рисунке 1?



Рис. 1 : Площадь Тяньаньмэнь

# Синхронизация и зрительное внимание

Что позволяет их выделить объекты на рисунке 2?



Рис. 2 : Площадь Тяньаньмэнь с выделенными объектами

Идея динамического связывания (dynamical binding):

- Колебательная нейронная активность и синхронизация в зрительной коре мозга кошки и обезьяны.
- Использование явлений синхронизации и резонанса в других структурах мозга (обонятельной корой, гиппокампом, таламокортикальной системой, новой корой).

Идея динамического связывания (dynamical binding):

- Колебательная нейронная активность и синхронизация в зрительной коре мозга кошки и обезьяны.
- Использование явлений синхронизации и резонанса в других структурах мозга (обонятельной корой, гиппокампом, таламокортикальной системой, новой корой).

В отличие от медленной адаптации нейронных сетей под действием алгоритмов обучения, динамическое связывание способно обеспечить *немедленную* реакцию сети, необходимую при выполнении задач обработки информации в режиме реального времени!

Существуют два базовых подхода к построению компьютерной модели формирования внимания:

- на основе места (location-based model) - активируется одним (сигнальным) нейроном, акцент на одну точку;
- на основе объекта (object-based model) - базовым юнитом, конкурирующим за внимание является целый объект (либо его часть).



Существуют два базовых подхода к построению компьютерной модели формирования внимания:

- на основе места (location-based model) - активируется одним (сигнальным) нейроном, акцент на одну точку;
- на основе объекта (object-based model) - базовым юнитом, конкурирующим за внимание является целый объект (либо его часть).

Биологические системы обучились вычленять из окружающей среды максимально релевантную информацию (WTA), и подавлять второстепенную. Объект, захвативший внимание, постепенно теряет *актуальность*, уступая остальным объектам.

Благодаря связи между синхронизацией и зрительным вниманием, были предложены модели распознавания объектов с полной синхронизацией между осцилляторами, используемыми для представления объектов.

Благодаря связи между синхронизацией и зрительным вниманием, были предложены модели распознавания объектов с полной синхронизацией между осцилляторами, используемыми для представления объектов.

На практике, феномен полной синхронизации встречался крайне редко.

Благодаря связи между синхронизацией и зрительным вниманием, были предложены модели распознавания объектов с полной синхронизацией между осцилляторами, используемыми для представления объектов.

На практике, феномен полной синхронизации встречался крайне редко.

Следовательно, прочие формы синхронизации должны быть рассмотрены!

# Синхронизация и зрительное внимание

## Виды синхронизаций:

- Полная (complete synchronization) - полная сходимость (во времени) соответствующих переменных всех нейронов в сети.
- Фазовая (phase synchronization) - разность фаз между элементами сети со временем должна либо вообще не меняться, либо находиться в определённых конечных границах, при этом игнорируя отношение амплитуд.
- Запаздывающая (lag synchronization) - происходит в сильно связанных колебательных системах, когда они выравниваются по фазе и амплитуде, но остаются сдвинуты во времени.
- Опережающая (anticipating synchronization) - происходит в сонаправленных системах коллективного поведения, где одна система движется с определением относительно остальных.
- Обобщенная (generalized synchronization) - подобна фазовой, только отношение между фазами должны описываться определённой функцией.

# Хаотично-фазовая синхронизация

Подход фазовой синхронизации позволяет исследовать синхронизацию сетей с осцилляторами, параметры которых могут отличаться.

Рассмотрим хаотично-фазовую синхронизацию на основе сдвоенного хаотического аттрактора Рёсслера, которая позволяет создать механизм поиска и *подсветки* объекта, на который будет обращено внимание.

В процессе работы, группа нейронов (представляющих приметный объект на снимке) фиксируется по своей фазе, т.е. каждый нейрон производит уникальную хаотическую траекторию, но вместе они оказываются фазной-связанными. В это же время, другие группы нейронов, представляющие другие объекты на снимке, двигаются в своих фазах, никак не связанных с рассматриваемой нами.

# Хаотично-фазовая синхронизация

Аттрактор - компактное подмножество фазового пространства динамической системы, все траектории из некоторой окрестности которого стремятся к нему при времени, стремящемся к бесконечности.

Аттрактор Рёсслера — хаотический аттрактор, которым обладает система дифференциальных уравнений Рёсслера:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -y - z \\ \frac{dy}{dt} = x + ay \\ \frac{dz}{dt} = b + z(x - c) \end{cases};$$

где  $a, b, c$  — положительные постоянные. При значениях параметров  $a = b = 0,2$  и  $2,6 \leq c \leq 4,2$  уравнения Рёсслера обладают устойчивым предельным циклом. При этих значениях параметров период и форма предельного цикла совершают последовательность удвоения периода.

# Синхронизация и зрительное внимание

Сразу же за точкой  $c = 4,2$  возникает явление хаотического аттрактора. Чётко определённые линии предельных циклов расплываются и заполняют фазовое пространство бесконечным счетным множеством траекторий, обладающим свойствами фрактала.

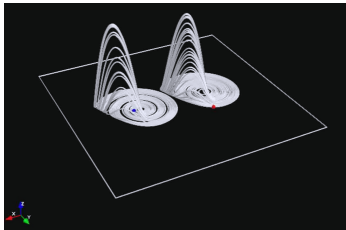


Рис. 3 : Сдвоенный хаотический аттрактора Рёсслера

Рекомендую видео: <http://www.youtube.com/watch?v=ef3M0n8MK-0>



Два осциллятора будем называть синхронными по фазе, если разность их фаз остаётся ограниченной, а амплитуда может не коррелировать.

Другими словами,  $|\phi_1 - \phi_2| < M$  при  $t \rightarrow \infty$

Фаза осциллятора  $\phi$  определяется следующим образом:

$$\phi = \Upsilon(\arctan(y/x)),$$

где  $x$  и  $y$  являются переменными осциллятора, а функция  $\Upsilon$  гарантирует рост числа  $\phi$ .

# Хаотично-фазовая синхронизация

Два связанных осциллятора Рёсслера также могут быть синхронными по фазе, если обеспечивается достаточная *сила* связности!

Массив из  $N$  (попарно) связанных осцилляторов Рёсслера представлен следующим уравнением:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= -\omega_i y_i - z_i + k(2x_i - x_{i-1} - x_{i+1}), \\ \dot{y}_i &= \omega_i x_i - ay_i, \\ \dot{z}_i &= b + z_i(x_i - c),\end{aligned}$$

где используются три константы  $a = 0,15$ ,  $b = 0,2$  и  $c = 10$ , а значение  $\omega_i$  для каждого осциллятора выбирается случайным образом в интервале  $[0, 981, 02]$ . Параметр  $k$  отвечает за *силу* связности.

# Хаотично-фазовая синхронизация

Возьмём 50 связанных Рёсслеровских систем, и проследим по рисунку 4 переход от хаотического к синхронному состоянию.

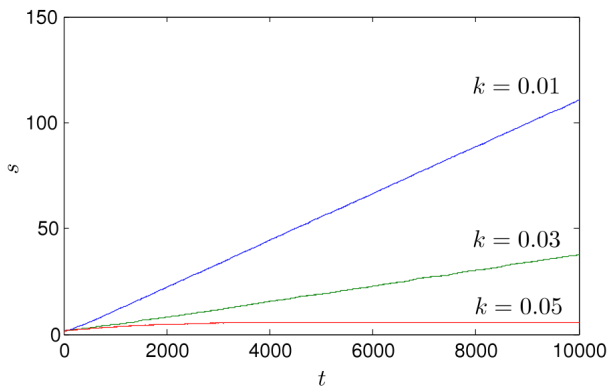


Рис. 4 : Отклонение от фазы в секундах ( $s$ ) синхронной ( $k = 0,05$ ), почти синхронной ( $k = 0,03$ ) и не синхронной ( $k = 0,01$ ) систем.

Если опустить дополнительные математические подробности (основанные на экспоненте Ляпунова), то:

- при силе связи равной нулю, синхронизации (в том числе фазовой синхронизации) не наблюдается.
- при увеличении силы связи, фазы синхронизируются, но амплитуды двух осцилляторов остаются некоррелированными.
- при дальнейшем росте силы связи, достигается полная синхронизация (с небольшой разницей между траекториями двух осцилляторов).

Рассмотрим модель двухмерной сети Рёсслеровских осцилляторов, построенной по следующим формулам

$$\begin{aligned}\dot{x}_{i,j} &= -\omega_{i,j}y_{i,j} - z_{i,j} + k_{i,j}^+\Delta^+x_{i,j} + k_{i,j}^-\Delta^-x_{i,j}, \\ \dot{y}_{i,j} &= \omega_{i,j}x_{i,j} - ay_{i,j}, \\ \dot{z}_{i,j} &= b + z_{i,j}(x_{i,j} - c),\end{aligned}$$

где:

$(i,j)$  это решётка  $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M$ ,

$k_{i,j}^+ \in [0, k_{max}^+]$  и  $k_{i,j}^- \in [0, k_{max}^-]$  положительная и отрицательная сила связывания (уст. в соответ. с пиксельными константами),

$\omega_{i,j}$  также определяется пиксельными константами,

$k_{max}^+$  и  $k_{max}^-$  выбираются в зависимости от изображения,

$\Delta^+x_{i,j}$  и  $\Delta^-x_{i,j}$  положительные и отрицательные условия связывания.

Положительные и отрицательные условия связывания определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta^{\pm}x_{i,j} = & \gamma_{i-1,j-1;i,j}(x_{i-1,j-1} - x_{i,j}) + \gamma_{i-1,j;i,j}(x_{i-1,j} - x_{i,j}) \\ & + \gamma_{i-1,j+1;i,j}(x_{i-1,j+1} - x_{i,j}) + \gamma_{i,j-1;i,j}(x_{i,j-1} - x_{i,j}) \\ & + \gamma_{i,j+1;i,j}(x_{i,j+1} - x_{i,j}) + \gamma_{i+1,j-1;i,j}(x_{i+1,j-1} - x_{i,j}) \\ & + \gamma_{i+1,j;i,j}(x_{i+1,j} - x_{i,j}) + \gamma_{i+1,j+1;i,j}(x_{i+1,j+1} - x_{i,j}),\end{aligned}$$

где

$$\gamma_{i,j;p,q} = \begin{cases} 1, & \text{если осциллятор } (i,j) \text{ связан с } (p,q) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Положительные связи  $\Delta^+$  между парами:

- с одинаковыми цветами будут сохранены;
- с различными цветами будут удалены.

Отрицательные связи  $\Delta^-$  между парами:

- всегда существуют, т.е. каждый осциллятор всегда имеет связь с 8-ю соседями (кроме крайних).

Каждый осциллятор представляет пиксель исходной картинки.

Влияние каждого пикселя на соответствующий осциллятор определяется через относительный пиксельный контраст  $R_{i,j}$ .

Для вычисления относительного контраста, требуется вычислить абсолютный  $C_{i,j}$ .



Абсолютный пиксельный контраст:

$$C_{i,j} = \frac{\sum_d w^d |F_{i,j}^d - F_{avg}^d|}{\sum_d w^d}, \text{ где}$$

$(i,j)$  - пиксельные индексы,

$F_{i,j}^d$  - свойство  $d$  для пикселя  $(i,j)$  на интервале  $[0, 1]$ ,

$w^d$  - вес свойства  $d$ ,

$F_{avg}^d$  - среднее значение свойства  $d$ , полученное по формуле

$$F_{avg}^d = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^{i=N} \sum_{j=1}^{j=M} F_{i,j}^d$$

Свойство d:

- $F^I$  - интенсивность,
- $F^R$  - красный,
- $F^G$  - зеленый,
- $F^B$  - голубой.

Вес:

- $w^I = 3$ ,
- $w^R = 1$ ,
- $w^G = 1$ ,
- $w^B = 1$ .

Относительный пиксельный контраст:

$$R_{i,j} = \exp\left(-\frac{(1-C_{i,j})^2}{2\sigma^2}\right)$$

Полученная относительная константа используется для моделирования параметров осциллятора, т.е. осцилляторы, соответствующие наиболее примечательному (контрастному) объекту будут синхронизированы к положительной связи  $k_{i,j}^+$ , а наименее примечательному - к отрицательной связи  $k_{i,j}^-$ ! Значение  $\sigma$  выбирается пользователем.

Считается, что человек не может удерживать внимание на объекте в течение длительного времени, то есть фокус должен быть смещен на другие объекты. Этот механизм переключения внимания может быть реализован в нашей модели следующим образом:

$$R_{i,j} = \exp\left(-\frac{(t/t_{end}-C_{i,j})^2}{2\sigma^2}\right), \text{ где}$$

$t_{end}$  - общее время симуляции.

Избавившись от константы в числителе, мы позволили системе выбирать различные объекты (с различной степенью контрастности).

Для экспериментов были использованы объекты с явно выделенной контрастной частью.

При проведении экспериментов, были выставлены следующие значения:

$k_{max}^+ = 0,05$  и  $k_{max}^- = 0,02$  (константы),  
 $\sigma = 0,5$  и  $\Delta_w = 0,02$  (переменные).

# Синхронизация и зрительное внимание

Следующий эксперимент проводили с использованием реального изображение с рисунка 5.



Рис. 5 : Исходный рисунок

# Синхронизация и зрительное внимание

Рисунок 6 показывает выбор 300 случайных осцилляторов (пикселей) из изображения так, что первые 150 строк соответствуют "лисам" а других 150 линий соответствуют "цветку".

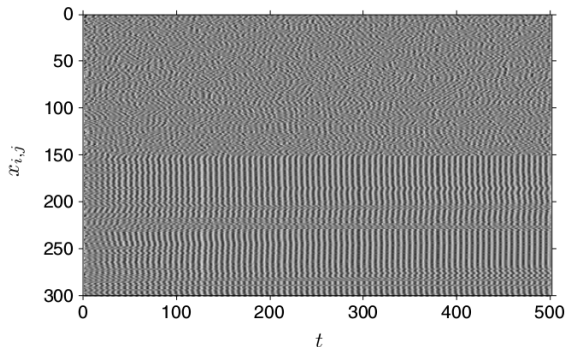


Рис. 6 : Выбор 300 случайных пикселей

# Синхронизация и зрительное внимание

Рисунки 7 и 8 показывают, что фазовая синхронизация происходит среди осцилляторов, представляющих объект "цветок" в то время как не фазовая синхронизация среди других осцилляторов не наблюдается.

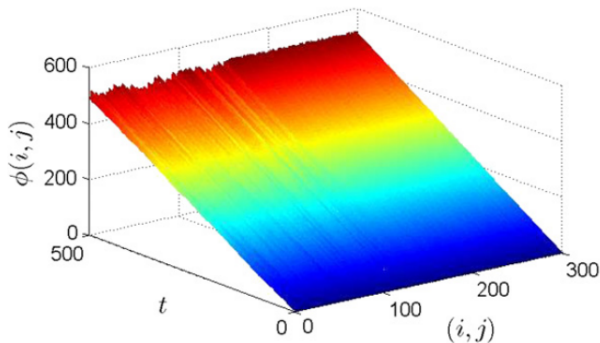


Рис. 7 : фазовая синхронизация происходит среди осцилляторов



# Синхронизация и зрительное внимание

Рисунки 7 и 8 показывают, что фазовая синхронизация происходит среди осцилляторов, представляющих объект "цветок в то время как не фазовая синхронизация среди других осцилляторов не наблюдается.

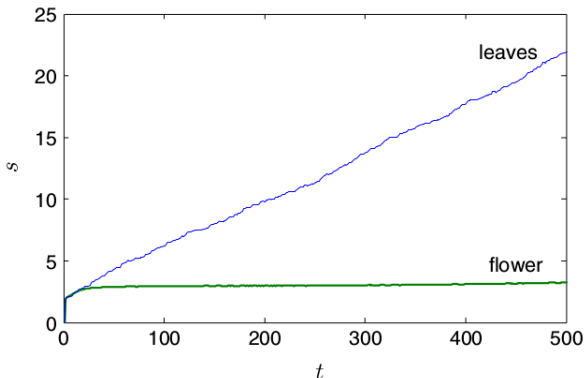


Рис. 8 : Фазовая синхронизация среди других осцилляторов не наблюдается

# Синхронизация и зрительное внимание

Теперь проведём эксперимент с использованием механизма переключения, чтобы изменить фокус внимания с одного объекта на другой. На рисунке 9 мы видим искусственное изображение с двумя спиралями. Свободные параметры устанавливаются следующим образом:  $\sigma = 0,3$  и  $\Delta_w = 0,2$ .

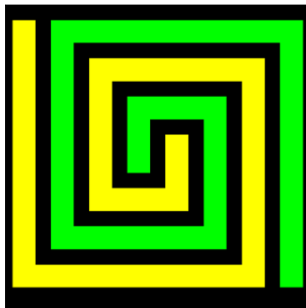


Рис. 9 : Исходный рисунок второго эксперимента

# Синхронизация и зрительное внимание

Рисунок 10 показывает поведение 150 случайно выбранных осцилляторов (пикселей) от каждого объекта, где каждая строка соответствует осциллятору. Из ряда с 1 по 150, мы можем видеть, что осцилляторы, соответствующие желтому объекта являются первой группой, которая по фазе синхронизирована. Через некоторое время она теряет синхронизацию и возникает фазовая синхронизация второй группы (линии 151 300).

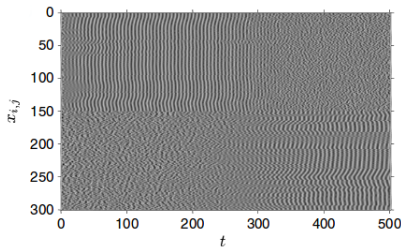


Рис. 10 : Возникает фазовая синхронизация второй группы

Рисунок 11 показывает стандартные отклонения фазы роста двух групп осцилляторов.

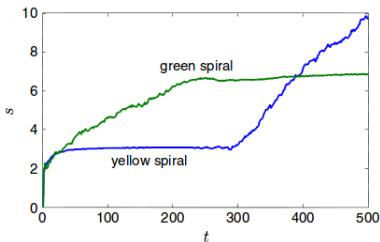


Рис. 11 : Стандартные отклонения фазы роста двух групп осцилляторов

Колебательные сети были использованы для решения задач:

- сегментации изображений,
- слуховой сегрегации сигнала,
- функций привязки,
- выбора объекта.

Этот вид моделей требует двух механизмов:

- синхронизация каждого объекта с группой
- десинхронизация, чтобы отличить один объект от другого

Сеть осцилляторов имеет явное достоинство - легкость синхронизации группы осцилляторов. Но есть и недостатки, связанные с разделением разных объектов, у которых случайно совпали траектории синхронизации.

Возможны следующие возможные направления ее дальнейшей разработки:

- испытание новых видов сетевого связывания;
- разработка методов сегментации движущихся изображений;
- распространение метода на задачи сегментации цветных изображений;
- развитие подходов к моделированию активного зрения.

- F.A. Breve, L. Zhao, M.G. Quiles, and E.E.N. Macau, "Chaotic phase synchronization and desynchronization in an oscillator network for object selection"; presented at Neural Networks, 2009, pp.728-737.
- Антон Конушин, Компьютерное зрение.  
<http://courses.graphicon.ru/main/vision>.
- Кузьмина М.Г., Маныкин Э.А., Сурина И.И. Осцилляторная сеть с управляемой синхронизацией и динамический метод сегментации изображений // Научная сессия МИФИ-2004. Ч.1  
Нейроинформатика-2004. 6 Всероссийская научно-техническая конференция. Теория нейронных сетей 1. Нейробиология.  
Применение нейронных сетей 1, стр. 29-37
- Иванченко И.В., Шалфеев В.Д. Информационная динамика сложных осцилляторных систем. Учеб. метод. пособие. — Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2006. — 113 с.

# Вопросы?