

**М.Г.КУЗЬМИНА<sup>1</sup>, Э.А.МАНЬКИН<sup>2</sup>, И.И.СУРИНА<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт прикладной математики РАН, Москва

**E-mail: kuzmina@spp.keldysh.ru**

<sup>2</sup> Российский научный центр «Курчатовский Институт»

**E-mail: edmany@issph.kiae.ru**

## **ОСЦИЛЛЯТОРНАЯ СЕТЬ С УПРАВЛЯЕМОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

### **Аннотация**

Осцилляторная сеть, моделирующая самоорганизованное коллективное поведение подмножества ориентационно-селективных клеток зрительной коры мозга в процессе обработки зрительной информации была ранее построена авторами. Внутренняя динамика сетевых осцилляторов настраивается характеристиками зрительного изображения. В конструкции правила сетевого связывания отражена гипотеза о существовании в коре динамических связей. Разработан метод сегментации полутоновых нецветных яркостных и текстурных изображений, основанный на управляемой синхронизации в осцилляторной сети. В работе представлены новые результаты обработки яркостных и текстурных изображений, демонстрирующие возможности метода. При обработке яркостных изображений метод обеспечит последовательное выделение всех фрагментов изображения. В числе задач сегментации текстурных изображений решается задача интеграции гладких контуров изображения.

<sup>1</sup> **M.G.KUZMINA, E.A.MANYKIN<sup>2</sup>, I.I.SURINA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow

**E-mail: kuzmina@spp.keldysh.ru**

<sup>2</sup> Russian Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow

**E-mail: edmany@issph.kiae.ru**

## **OSCILLATORY NETWORK WITH CONTROLLED SYNCHRONIZATION AND DYNAMICAL METHOD OF IMAGE SEGMENTATION**

### **Abstract**

Oscillatory neural network was designed by the authors as a model of self-organized collective behavior of orientation-selective cell subset of the brain visual cortex during visual information processing. Internal dynamics of single oscillator is tunable by visual image characteristics. The hypothesis on existence of dynamical binding in the visual cortex has been reflected in construction of network connectivity rule. Dynamical method of gray-level brightness and texture image segmentation based on controlled synchronization in the oscillatory network was developed. New results on brightness and texture image processing, demonstrating the method capabilities, are presented in the paper. In the case of brightness image segmentation the method provides sequential extraction of all image fragments. Texture segmentation problems include a contour integration task.

**Введение.** Целью создания модели было построение примера нейросети из нелинейных осцилляторов с самоорганизованными динамическими связями, осуществляющей обработку изображений посредством колебательной динамики, синхронизации и десинхронизации. Имеются два свидетельства в пользу гипотезы о существовании динамического связывания (dynamical binding) при обработке зрительной информации зрительной корой мозга. Первое -- экспериментально открытые колебательная нейронная активность и синхронизация в зрительной коре мозга кошки и обезьяны в 1988-1989 гг. Второе --- факт использования явлений синхронизации и резонанса в качестве "рабочего инструмента" другими структурами мозга --- обонятельной корой, гиппокампом, таламо-кортикальной системой, новой корой. Поэтому не удивительно, что идеи о вероятном существовании динамического связывания в зрительной коре были высказаны задолго до экспериментального открытия синхронизованных колебаний в зрительной коре [1]. Интерес к этой тематике не угасает и в настоящее время [2,3]. Попытки разобраться, как именно могли бы колебания и синхронизация эксплуатироваться зрительной системой мозга в процессе обработки зрительной информации, стимулировали построение целого ряда моделей нейронных сетей с колебательной динамикой и нейроморфных алгоритмов обработки изображений [4-13]. Видна следующая естественная роль, которую могло бы играть динамическое связывание в функционировании нейронных структур мозга: 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 текущем времени.

**Исходная трехмерная осцилляторная сеть.** Две осцилляторные сети фигурируют в нашем подходе. Первая --- исходная трехмерная сеть, которую можно рассматривать как биологически мотивированную осцилляторную модель зрительной коры. Динамика этой сети моделирует самоорганизованное коллективное поведение подмножества ориентационно-селективных (простых) клеток зрительной коры на низшем уровне (preattentive stage) обработки зрительной информации. Вторая сеть --- двумерная осцилляторная сеть (редуцированная), полученная как предельная версия исходной трехмерной. Именно она пока испытывается в задачах сегментации изображений. Трехмерная сеть уже была описана ранее [11, 12]. Здесь мы лишь кратко напомним основные принципы ее построения. Модель следует рассматривать как связанную систему сетчатки (моделируется прямоугольником) и зрительной коры (трехмерная осцилляторная сеть). Осцилляторы сети локализованы в узлах трехмерной решетки, расположенной внутри параллелепипеда и находящейся в соответствии с двумерной решеткой, расположенной в прямоугольнике-сетчатке. В прямоугольнике предполагается заданным пиксельное представление изображения так, что центры пикселей совпадают с узлами двумерной решетки. Основание параллелепипеда идентично прямоугольнику сетчатки. Трехмерная решетка рассматривается как состоящая из колонок, ориентированных вдоль высоты параллелепипеда (ортогонально плоскости сетчатки), что имитирует колончатую архитектуру зрительной коры. Таким образом, каждому пикселю изображения отвечает точно одна колонка осцилляторов. Полное число осцилляторов сети равно  $MNK$ , где  $MN$  -- число пикселей изображения, а  $K$  --- число осцилляторов в колонке. Для каждого пикселя предполагаются заданными две характеристики --- яркость пикселя  $I_{jm}$  и ориентация элементарного направленного сегмента, определенная единичным вектором  $\mathbf{s}_{jm}$ , лежащим в плоскости сетчатки. Векторы  $\mathbf{s}_{jm}$  можно естественным образом связать с градиентом яркости внутри пикселя. Далее вводятся внутренние параметры сети --- ориентации рецептивных полей, определенные единичными векторами  $\mathbf{n}_{jm}^k$ . Эти векторы определены в каждом узле трехмерной решетки и расположены в плоскости, параллельной плоскости сетчатки. В соответствии с нейробиологическими данными векторы  $\mathbf{n}_{jm}^k$  ориентированы вдоль

колонки в виде винтовой лестницы с постоянным шагом. Массив  $\{ I_{jm}, s_{jm}, \mathbf{n}_{jm}^k \}$  определяет полный набор параметров трехмерной осцилляторной сети. Эти параметры используются для настройки внутренней динамики сетевых осцилляторов.

**Сетевой осциллятор.** Биологически мотивированная модель нейронного осциллятора, образованного парой связанных нейронов зрительной коры, была построена Ли [5]. Предварительно изучив особенности динамики этого осциллятора, мы построили модель релаксационного осциллятора с качественно сходной динамикой. Имитируя отклик простых клеток зрительной коры, осциллятор, в зависимости от значений параметров  $I_{jm}, s_{jm}, \mathbf{n}_{jm}^k$  может демонстрировать либо состояние активности (устойчивые незатухающие колебания), либо "молчание" (быстро затухающие колебания). Осциллятор находится в состоянии активности, если выполняется комбинация двух условий: а) яркость пикселя изображения достаточно велика (превышает заданный порог); б) ориентации  $\mathbf{s}$  и  $\mathbf{n}$  достаточно близки. В противном случае осциллятор находится в состоянии "молчания". Заданное на сетчатке изображение осуществляет преднастройку осцилляторной сети: сеть оказывается разбитой на подансамбли осцилляторов, находящихся в различных колебательных режимах. Внутренняя синхронизация этих подансамблей (т.е. их динамическое связывание) и обеспечивается надлежащим правилом сетевого связывания.

**Динамические связи.** Состояние трехмерной сети, определяется трехмерным массивом  $[u_{jm}^k]$  состояний всех осцилляторов. Систему ОДУ, управляющую сетевой динамикой, можно записать в виде [12, 13]:

$$\frac{du_{jm}^k}{dt} = f(u_{jm}^k, \mu_{jm}^k) + S_{jm}^k$$

где функции  $f(u_{jm}^k, \mu_{jm}^k)$  определяют внутреннюю динамику осцилляторов, а члены  $S_{jm}^k$  ---- взаимодействие осцилляторов, обусловленное сетевым связыванием. В нашей модели член взаимодействия выбран в виде

$$S_{jm}^k = \sum_{j', m', k'} W_{jj' mm'}^{kk'}(u_{jm}^k, u_{j'm'}^{k'}) (u_{j'm'}^{k'} - u_{jm}^k),$$

Элементы матрицы связей  $W$  построены в виде произведения трех нелинейных функций, зависящих от осцилляторных активностей, ориентаций рецептивных полей и пространственного расстояния между осцилляторами в сети:

$$W_{jj' mm'}^{kk'}(u, u') = P_{jj' mm'}^{kk'}(\rho, \rho') Q_{jj' mm'}^{kk'}(\mathbf{n}, \mathbf{n}') D_{jj' mm'}^{kk'}(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)$$

Зависимость  $P$  от осцилляторных активностей  $\rho$  и  $\rho'$  построена таким образом, что  $P$  близки к нулю, если хоть один из осцилляторов взаимодействующей пары находится в состоянии низкой активности (амплитуда колебаний мала). Зависимость  $Q$  от  $\mathbf{n}$  и  $\mathbf{n}'$  такова, что  $Q$  отличны от нуля лишь при условии, что  $\mathbf{n}$  и  $\mathbf{n}'$  близки. Наконец,  $D$  введены для возможности "обрезания" связей на некотором заранее предписанном конечном расстоянии. В результате, в соответствии с построенным правилом сетевого связывания любая пара осцилляторов сети оказывается динамически связанной, если следующие три условия выполняются одновременно: 1) оба осциллятора достаточно активны; 2) они обладают близкими ориентациями рецептивных полей; 3) они разделены расстоянием, не превышающим заданный радиус пространственного взаимодействия.

#### **Редуцированная сеть. Управление синхронизацией.**

Двумерная редуцированная сеть получена как предельная упрощенная версия исходной трехмерной модели зрительной коры. Эта сеть локализована на двумерной пространственной решетке, находящейся во взаимно однозначном соответствии с массивом пикселей изображения. Внутренняя динамика осциллятора здесь параметрически зависит только от яркости пикселя, а правило сетевого связывания включает зависимость от разности ориентаций направленных сегментов изображения  $\mathbf{s}$  и  $\mathbf{s}'$  [13]. Как оказалось, редуцированная сеть позволяет производить сегментацию как чисто яркостных изображений (когда яркость пикселя является единственной его характеристикой), так и текстурных изображений простейшего типа (с текстурами, определяемыми множеством направленных элементов). Для повышения качества сегментации яркостных изображений был введен метод управления синхронизацией, который позволил осуществлять последовательную синхронизацию кластеров сети, соответствующих фрагментам изображения различных уровней яркости. Метод управления состоит в постепенном усилении общесетевой связи, начиная со столь слабой, при которой сеть полностью десинхронизована. При постепенном усилении связи кластеры сети, отвечающие различным фрагментам изображения, синхронизируются один за другим и отделяются, начиная с кластера, отвечающего фрагменту наибольшей яркости. В конце концов сеть оказывается разложенной на совокупность внутренне синхронизованных, но взаимно десинхронизованных кластеров, соответствующую полному набору

фрагментов изображения. При этом кластеры осциллируют с несколько различными частотами и поэтому ясно различимы.

**Сегментация яркостных изображений.** Редуцированная сеть была испытана в ряде задач сегментации синтетических яркостных изображений. Во всех случаях три основных стадии реализации сегментации изображения сетью можно наблюдать в процессе усиления сетевого взаимодействия: полную десинхронизацию, частичную синхронизацию (когда только несколько кластеров, отвечающих наиболее ярким фрагментам изображения, синхронизовано) и полную синхронизацию (когда вся сеть разложена на совокупность полностью синхронизованных кластеров) [13]. Следует подчеркнуть, что осцилляторный характер сегментации, доставляемый сетью, оказывается весьма информативным, поскольку полный набор состояний сетевой динамики содержит целый ряд различных версий сегментируемого изображения. Эта дополнительная информация особенно важна для выявления трудно различимых фрагментов изображения (например, слабоконтрастных контуров). Примеры таких версий изображения приведены на рис.1. Три типичных версии изображения в состоянии частичной синхронизации сети показаны на рис.1a и семь его типичных версий в конечном состоянии полной кластерной синхронизации --- на рис.1b.

**Сегментация текстур. Интеграция контуров.** При сегментации изображений, обладающих текстурой, мы рассматривали только случай однородной средней яркости, поскольку он является наиболее показательным для демонстрации работы сети. Результаты обработки показаны на рис. 2,3. Изображения, подлежащие сегментации, представлены в левых квадратах. На рис. 2 изображение содержит три простых фрагмента одной и той же яркости, но разной мононаправленной текстуры, а на рис. 3 изображение содержит сложный контур, выделенный только текстурой. Сегментация достигается за счет взаимной десинхронизации кластеров сети, отвечающих фрагментам с различной текстурой. В обоих случаях показаны две типичных версии изображения. Пример выделения "невидимого" контура изображения, осуществляемого сетью, представлен на рис.4. Изображение содержит пару замкнутых гладких контуров, яркость которых совпадает с яркостью фона. Контурные отмечены только текстурой непрерывно изменяющейся ориентации (направленные сегменты текстуры аппроксимируют локальное направление касательной к контурам). Как видно, сеть производит четкое "выявление" двойного контура.

**Заключительные замечания.** Упомянем о возможностях дальнейшего развития модели и метода. Помимо чисто технических аспектов усовершенствования модели (таких как увеличения числа пикселей сегментируемого изображения, ускорения интегрирования динамической системы ) видны следующие возможные направления ее дальнейшей разработки:

a) испытание новых видов сетевого связывания; b) разработка методов сегментации движущихся изображений; c) распространение метода на задачи сегментации цветных изображений; d) развитие подходов к моделированию активного зрения.

### *Список литературы*

1. C.von der Malsburg. The correlation theory of brain function. Max-Plank-Institut for Biophys. Chem., G"ottingen, Germany, Internal Rep. 81-2, 1981.
2. Kreiter A.K., Singer W. On the role of neural synchrony in primate visual cortex. Brain Theory, A.Aertsen, V.Braitenberg (eds), pp. 201-226, 1996.
3. Gray, C.M. The temporal correlation hypothesis is still alive and well. Neuron 24, 31-47, 1999.
4. W.Gerstner, R.Ritz, and J.L.van Hemmen, A biologically motivated and analytically soluble model of collective oscillations in the cortex: I. Theory of weak locking. Biol. Cyb. v. 68, p. 363, 1993.
5. Li Z. A neural model of contour integration in the primary visual cortex. Neur. Comp. V. 10, pp. 903-940, 1998.
6. Li Z. Pre-attentive segmentation in the primary visual cortex. Spatial Vision 13, 25-50, 2000.
7. Li Z. Computational design and nonlinear dynamics of a recurrent network model of the primary visual cortex. Neural Comp. , v. 13/8, pp.1749-1780, 2001.
8. Chen K., Wang D.L., Liu X. Weight adaptation and oscillatory correlation for image segmentation. IEEE Trans. NN , v. 11, pp. 1106-1123, 2000.
9. Casmeli E., Wang D.L., Texture egmentation using Gaussian-Markov random fields and neural oscillator networks. IEEE Trans. NN , v. 12, pp. . 394-404, 2001.
10. Kuzmina M.G., Manykin E.A., Surina I.I. Spatially distributed oscillatory networks related to modeling of the brain visual cortex. Proc. of NOLTA'2000, Dresden, Germany, 1, pp. 335-338, 2000.
11. Kuzmina M.G., Manykin E.A., Surina I.I. Tunable oscillatory network for visual image segmentation. Proc. of ICANN'2001, Vienna, Austria. Lecture Notes in Comp. Sci, v. .2130, pp. 1013-1019, 2001.
12. Кузьмина М.Г., Маныкин Э.А., Сурина И.И. Модель осцилляторной сети, имитирующая основанное на синхронизации функционирование зрительной коры. Нейроинформатика-2001, т.1, с. 191-200, 2001.
13. Kuzmina M.G., Manykin E.A., Surina I.I. Oscillatory network with self-organized dynamical connections for synchronization-based image segmentation. Proc. of IPCAT'2003, Lausanne, Switzerland, pp. 123-137, 2003 (to be published in BioSystems).

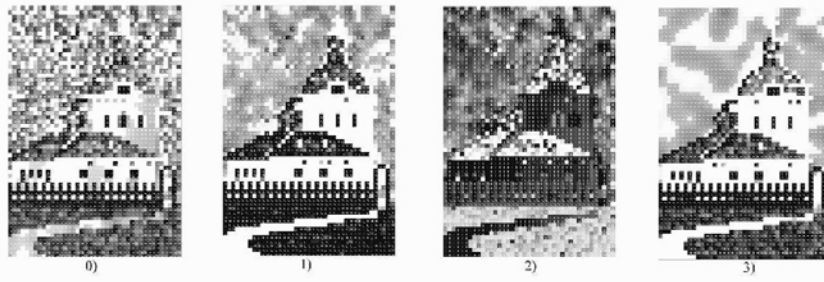


Рис. 1а. Три характерных примера мгновенного состояния изображения ( 1) - 3) ), возникающих в общем множестве состояний сети при частичной синхронизации ( 0) - начальное состояние)

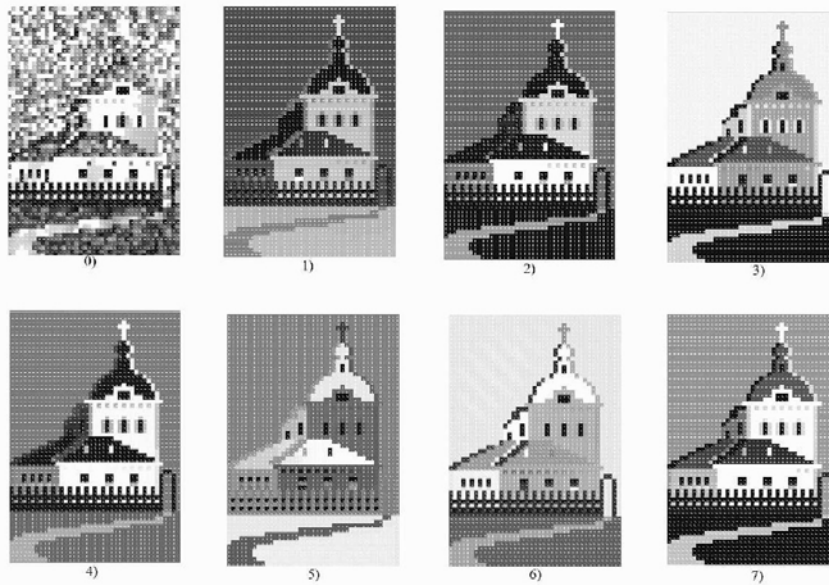


Рис. 1б. Семь характерных примеров мгновенного состояния полностью сегментированного изображения, возникающих при динамике сети в состоянии полной синхронизации.



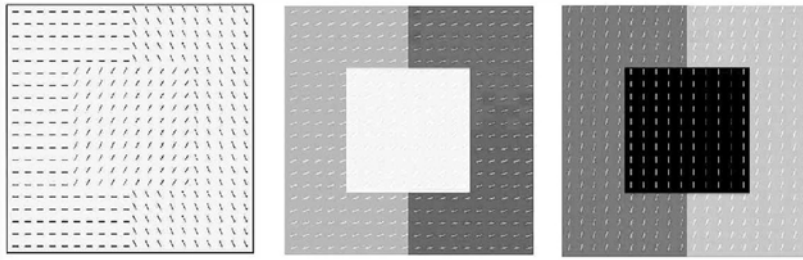


Рис. 2. Сегментация изображения, состоящего из трех фрагментов одинаковой яркости, но различной мононаправленной текстуры.

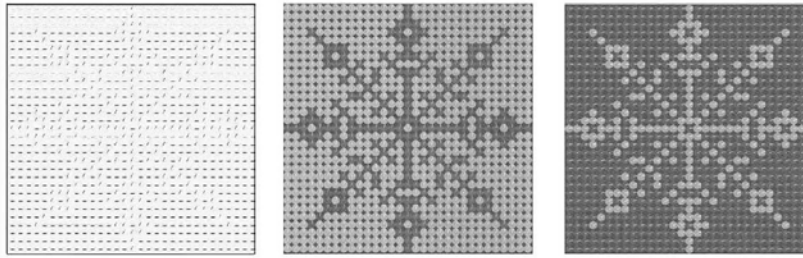


Рис. 3. Сегментация сложного контура, обладающего совпадающей с фоном яркостью, но отличной от фона мононаправленной текстурой.

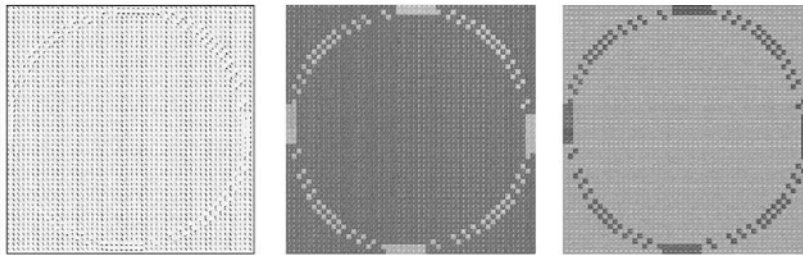


Рис. 4. Сегментация двойного замкнутого контура, выделенного из фона только текстурой медленно меняющегося направления ("contour integration").