

**С.ГРИЧУК<sup>1</sup>, М.Г.КУЗЬМИНА<sup>2</sup>, Э.А.МАНЬКИН<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Московский Инженерно-физический Институт  
**E-mail: t-25.ru**

<sup>2</sup> Институт прикладной математики РАН, Москва  
**E-mail: kuzmina@spp.keldysh.ru**

<sup>3</sup> Российский научный центр «Курчатовский Институт»  
**E-mail: edmany@isssph.kiae.ru**

## **СЕЛЕКТИВНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ РЕАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОСЦИЛЛЯТОРНО-СЕТЕВЫМ МЕТОДОМ**

### **Аннотация**

В разработанную модель осцилляторной сети для обработки изображений внесены следующие усовершенствования: 1) практически сняты ограничения на размер пиксельного массива изображения; 2) использована новая версия динамики сетевого осциллятора; 3) включено несколько новых вариантов сетевого связывания. Это позволяет существенно повысить точность сегментации реальных полутонных изображений. Кроме того, настоящая модель допускает простой и естественный способ селективной сегментации. Последняя, как правило, оказывается более информативной по сравнению с обычной полной сегментацией.

**E.S.GRICHUK<sup>1</sup>, M.G.KUZMINA<sup>2</sup>, E.A.MANYKIN<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Moscow Engineering Physics Institute  
**E-mail: t-25.ru**

<sup>2</sup> Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow  
**E-mail: kuzmina@spp.keldysh.ru**

<sup>3</sup> Russian Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow  
**E-mail: edmany@isssph.kiae.ru**

## **SELECTIVE SEGMENTATION OF REAL IMAGES VIA OSCILLATORY NETWORK METHOD**

### **Abstract**

The following improvements have been imposed into previously developed oscillatory network for image processing: 1) the restrictions on image pixel array size are now practically absent 2) new version of single oscillator dynamics is used; 3) several new versions of network coupling rule are introduced. These result in significant improvement of segmentation accuracy of real gray-level images. Besides, a simple and natural method of selective segmentation is now inherent to the improved model version. The selective segmentation is proved to be more informative as compared to usual complete segmentation.

**Введение.** Как было выяснено, осцилляторно-сетевой динамический метод сегментации изображений обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными вычислительными методами. Поэтому осцилляторные методы обработки изображений и анализа зрительных сцен продолжают развиваться [1-3; 6,7]. Помимо параллельного и распределенного способа обработки информации, свойственного любому нейросетевому методу, дополнительными удобствами разработанного метода являются простой и естественный способ контроля уровня фона и степени подавления шума, а также информативный способ визуализации результатов обработки. Кроме того, настоящая версия модели осцилляторной сети позволяет производить селективную сегментацию изображений - выделение множества сегментов, яркость которых заключена внутри заданного интервала.

### **Уравнения динамики осцилляторной сети.**

Обработка изображений выполняется сетью осцилляторов предельного цикла, локализованных в узлах двумерной пространственной решетки, соответствующей пиксельному массиву изображения (каждому пикселю соответствует один осциллятор). Сегментация (представление изображения в виде набора фрагментов – подмножеств пиксельного массива, отвечающих различным уровням яркости) осуществляется путем кластерной синхронизации осцилляторной сети (каждый кластер соответствует фрагменту определенной яркости).

Пусть  $M \times N$  – матрица  $[I_{jm}]$  - матрица яркостей обрабатываемого изображения. Тогда состояние осцилляторной сети определяется

$M \times N$ -матрицей  $\hat{u} = [u_{jm}]$  комплексных переменных  $u_{jm} = u_{jm}^{(1)} + iu_{jm}^{(2)}$ . Систему ОДЕ, управляющую динамикой осцилляторной сети, можно записать в виде:

$$du_{jm} / dt = f(u_{jm}; I_{jm}) + \sum_{j', m'}^N W_{jmj'm'} (u_{j'm'} - u_{jm}), \quad j = 1, \dots, M; m = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где функции  $f(u_{jm}; I_{jm})$  определяют динамику изолированных осцилляторов, а второй член уравнения (1) – вклад в динамику за счет сетевых связей. Настоящая версия динамики сетевого осциллятора, записанная для переменной  $u = u^{(1)} + iu^{(2)}$ , определяется ОДЕ вида

$$du / dt = f(u, I), \quad (2)$$

где

$$f(u, I) = (\rho^2 + i\omega)u - |u - \rho(1+i)|^2(u - \rho(1+i) - \alpha T(\rho)[u - \rho(1+i)]); \quad (3)$$

$$\rho = \rho(I), \quad T(\rho) = 0.5[th(\sigma(\rho - h_*)) - th(\sigma(\rho - h_*))]. \quad (4)$$

Предельным циклом динамической системы (2)-(4) является окружность радиуса  $\rho$ , центр которой расположен в точке  $u^{(c)} = u^{(1)} + iu^{(2)} = \rho(1+i)$  комплексной плоскости  $(u_1, u_2)$ . Система (2)-(4) содержит следующие параметры: параметр  $\rho$ , определяющий радиус предельного цикла (свободный параметр, который, в частности, можно задать в виде некоторой монотонной функции яркости  $\rho = \rho(I)$ );  $\omega$  – собственная частота автоколебаний свободного осциллятора;  $h_*$  – параметр, определяющий порог яркости, ниже которого предельный цикл бифурцирует в устойчивый фокус;  $\alpha$  – скорость затухания в фокусе;  $\sigma$  – константа, определяющая быстроту уменьшения радиуса предельного цикла в окрестности бифуркации при  $I \approx h_*$ .

Веса  $W_{jmj'm'}$ , определяющие силу связи осцилляторов  $(j, m)$  и  $(j', m')$ , построены в виде произведения двух нелинейных функций, зависящих от

радиусов предельных циклов (амплитуд автоколебаний) пары  $(j, m)$  и  $(j', m')$  и пространственного расстояния между этими осцилляторами в сети. А именно,  $W_{jmj'm'}$  имеют вид

$$W_{jmj'm'} = P_{jmj'm'}(\rho, \rho') \cdot D_{jmj'm'}(|r - r'|), \quad (5)$$

где множители  $P_{jmj'm'}$ , обеспечивающие зависимость связей от амплитуд колебаний, определены формулами

$$P_{jmj'm'}(\rho, \rho') = w_0 \cdot H(\rho_{jm} \rho_{j'm'} - h), \quad (6)$$

где  $H(x)$  - непрерывная «ступенька»,

$$H(x) = 1/(1 + e^{-2vx}),$$

$v$  - параметр, характеризующий крутизну  $H(x)$ , а  $w_0$  - константа, определяющая общую силу взаимодействия в сети. Множители  $D_{jmj'm'}(|r - r'|)$ , обеспечивающие зависимость  $W_{jmj'm'}$  от расстояния между осцилляторами, могут быть определены любой функцией  $|r_{jm} - r_{j'm'}|$ , обращающейся в нуль на конечном расстоянии. В модели  $D$  выбраны в виде  $D_{jmj'm'} = 1 - H(|r_{jm} - r_{j'm'}| - r_*)$ , где  $r_*$  - задаваемый радиус пространственного взаимодействия. В соответствии с правилом связывания (5), любые сетевые осцилляторы оказываются связанными, если обладают достаточно большими (надпороговыми) амплитудами собственных автоколебаний и разделены расстоянием, не превышающим заданный радиус пространственного взаимодействия. В противном случае связь отсутствует.

#### **Новые возможности модели.**

Работа осцилляторной сети состоит из двух стадий. Первая стадия - предварительная настройка динамики осцилляторов значениями яркостей пиксельного массива изображения (параметрическая настройка). В результате радиусу предельного цикла

каждого осциллятора приписывается определенное значение, зависящее от яркости отвечающего ему пикселя.

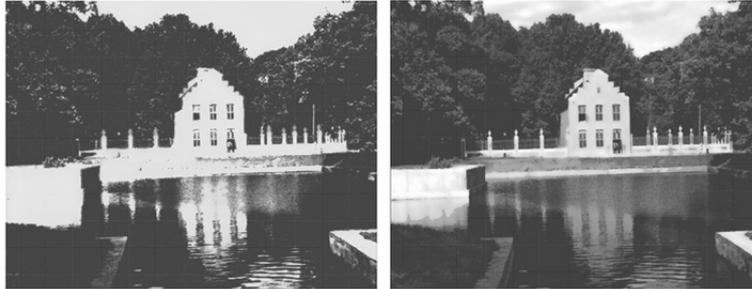
Вторая стадия – релаксация сети в состоянии кластерной синхронизации. В случае нашей модели, где правило сетевого связывания построено так, чтобы обеспечить динамическое связывание по яркости, кластерная синхронизация соответствует представлению изображения в виде разложения на множество фрагментов.

В первом варианте модели вместо (2)-(4) была использована другая, менее гибкая версия внутренней динамики изолированного осциллятора. В целях повышения точности сегментации изображения при этом вводился процесс последовательной сегментации путем постепенного усиления сетевого связывания и «отключения» уже синхронизованных кластеров. Это требовало  $L$  процессов релаксации сети в состояние синхронизации при различных связях. Хотя процедура последовательной сегментации и обеспечивала приемлемую точность, она являлась вычислительно «дорогой», особенно – в случае сегментации реальных многопиксельных изображений.

Три усовершенствования модели привели к существенному увеличению возможностей осцилляторного метода сегментации изображений. Они включают: а) снятие ограничений на размер пиксельного массива изображения; б) использование новой версии внутренней динамики сетевого осциллятора в) включение нескольких новых правил сетевого связывания. При этом было создано несколько новых вариантов гибкого и удобного интерактивного кода ONN, использующего адаптивную схему пятого порядка (Cash-Karp Runge-Kutta) для интегрирования системы ОДУ. Максимальный размер сегментируемого изображения фактически теперь ограничен только временем вычислительной процедуры. Так, сегментация изображения с пиксельным массивом порядка 250000 пикселей требует около 10 минут вычислительного времени на Intel Pentium, 4 2.8 GHz. Оптимизация программного кода и включение более быстрого алгоритма интегрирования ОДУ, как следует ожидать, приведут к ускорению процедуры обработки изображения. Влияние новой версии осцилляторной динамики (2)-(4) на качество сегментации было проанализировано на обработке реальных полутонных изображений. Примеры сегментации представлены на рис. 1 (фотография, 657×432 пикселя) и рис. 2 (гравюра, 351×481 пиксель).



a)



b)

c)

**Рис. 1**

Влияние новой версии внутренней динамики осциллятора на качество сегментации.

Здесь a) - исходное изображение, подлежащее сегментации, b) – результат сегментации с использованием предыдущей версии динамики осциллятора [4, 5], c) – то же с использованием динамики (2)-(4) при  $\rho(I) = \beta I$ . Помимо  $\rho(I) = \beta I$  ряд естественных видов  $\rho(I)$  (в том числе,  $\rho(I) = \beta I^\gamma$ ,  $0 < \gamma < 0.5$  и  $\rho(I) = \ln I$ ) включен в код ONN. Хотя даже линейная зависимость  $\rho(I)$  обеспечивает в ряде случаев хорошие результаты [7], использование функций типа  $\rho(I) = \beta I^\gamma$  дает естественное улучшение качества для изображений, содержащих области с непрерывными градиентами яркости (типа портретов).

#### **Правило сетевого связывания с использованием фильтрации.**

Желание отказаться от вычислительно дорогой процедуры последовательной сегментации привело к разработке новых правил

связывания, обеспечивающих максимальную независимость кластеров синхронизованных осцилляторов, отвечающих фрагментам изображения с близкими, но различными уровнями яркости. Один из путей решения вопроса привел к построению правила связывания на основе простейшего вида фильтрации, при котором каждому осциллятору приписывается некоторая «маска», ограничивающая его «отклик» на взаимодействие с другими осцилляторами сети. В рамках нашей модели это можно просто реализовать, используя подходящую модификацию сомножителя  $P_{jmj'm'}$ , фигурирующего в правиле связывания (5). Один из вариантов – заменить  $P_{jmj'm'}$  сомножителем

$$\tilde{P}_{jmj'm'}(\rho, \Delta; \rho', \Delta') = T(\rho, \Delta)T(\rho', \Delta')P_{jmj'm'}(\rho; \rho'), \quad (7)$$

где

$$T(\rho, \Delta) = 0.5 \cdot [th(\sigma(\rho + \Delta)) - th(\sigma(\rho - \Delta))], \quad \sigma \gg 1. \quad (8)$$

Здесь «маска»  $T(\rho, \Delta)$  ограничивает «окрестность взаимодействия» осциллятора с предельным циклом радиуса  $\rho$  интервалом  $[\rho - \Delta, \rho + \Delta]$ .

В результате, согласно правилу связывания (5) с сомножителем  $P = \tilde{P}$ , любая пара сетевых осцилляторов оказывается связанной только тогда, когда их «окрестности взаимодействия»  $[\rho - \Delta, \rho + \Delta]$  и  $[\rho' - \Delta', \rho' + \Delta']$  пересекаются. Преимущество этого дополнительного ограничения на осцилляторные связи состоит в том, что «высоко активные» осцилляторы (с большими значениями  $\rho$ ) не будут влиять на соседние «низко активные», что позволит контролировать нежелательное «постороннее» сглаживание границ фрагментов изображения. Как показывают эксперименты, модифицированное правило связывания (5) с сомножителем  $\tilde{P}$  обеспечивает более точную сегментацию изображений, содержащих пространственно мелкоструктурные контрастные фрагменты (например, сеть тонких контуров на географических картах) [7]. Если параметры  $\Delta$  в (7) выбирать зависящими от  $I$  ( $\Delta = \Delta(I)$ ), можно добиться дальнейшего улучшения качества сегментации. В целом при должном выборе параметров  $\Delta = \Delta(I)$  и радиуса пространственного взаимодействия модифицированное правило связывания (5) (с сомножителем (7)) обеспечивает хорошую точность сегментации без привлечения процесса последовательной сегментации.

### Селективная сегментация.

Осцилляторная динамика (2)-(4) позволяет простым образом производить селективную сегментацию – выделение в изображении множества фрагментов, яркости которых заключены в заранее определенном интервале. Как правило, такая сегментация является более информативной по сравнению с обычной полной сегментацией. Пример селективной сегментации представлен на рис. 3. Здесь на рис. 3b показан результат полной сегментации исходного изображения 3a, на рис. 3c в изображении выделены только наиболее яркие фрагменты (внутри некоторого узкого диапазона яркостей), на рис. 3d – фрагменты средней яркости (также внутри узкого диапазона) и на рис. 3e – наименее яркие фрагменты.

Для осуществления селективной сегментации достаточно в уравнении (3) заменить параметр  $\rho = \rho(I)$  на новый параметр  $\tilde{\rho}(I)$ , полагая

$$\tilde{\rho} = \rho(I)F(I) \quad (9)$$

где  $F(I)$  – некоторая «фильтрующая» функция. Если требуется выделить только фрагменты изображения, яркости которых заключены внутри интервала  $[I^*, I^{**}]$ , выбираем в качестве  $F(I)$  функцию, равную 1 внутри интервала  $[I^*, I^{**}]$  и обращающуюся в нуль вне  $[I^*, I^{**}]$ . Например,

$$F^{(1)}(I) = 0.5 \cdot \{th[\gamma(I - I^*)] - th[\gamma(I - I^{**})]\}, \quad \gamma \gg 1. \quad (10)$$

Очевидно, в этом случае будут активны только осцилляторы сети, соответствующие фрагментам изображения со значениями  $I \in [I^*, I^{**}]$ . Остальные осцилляторы «выпадут» из сетевого взаимодействия из-за того, что им будут «предписаны» нулевые амплитуды автоколебаний. Для выделения множества фрагментов с произвольным набором яркостей  $I^{(l_1)}, \dots, I^{(l_m)}$  достаточно использовать «фильтрующую функцию» вида

$$F^{(2)}(I) = \sum_{k=1}^m \Gamma(\gamma |I - I^{(l_k)}|), \quad \Gamma(x) = 2\exp(-x)/(1 + \exp(-2x)), \quad \gamma \gg 1. \quad (11)$$

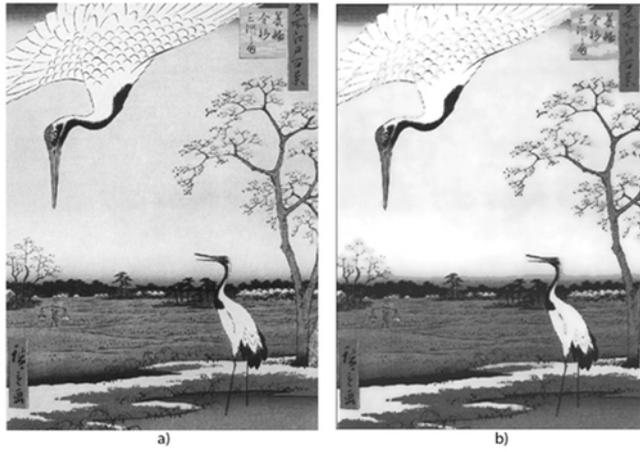


Рис. 2. Сегментация с новой версией динамики сетевых осцилляторов. ( а)- исходное, б)- сегментированное изображения )

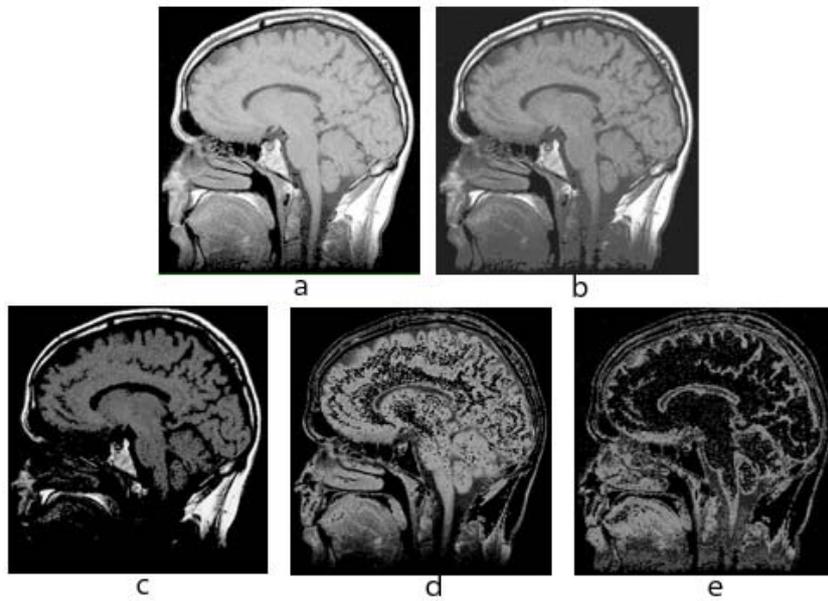


Рис. 3. Селективная сегментация: а – исходное, б - полная, с, d, e – селективная сегментация.

### **Заключительные замечания.**

Изучены возможности новой версии модели осцилляторной сети для динамической сегментации изображений. Модель содержит следующие усовершенствования:

- а) улучшенную версию внутренней динамики сетевого осциллятора, позволяющую задавать радиус  $\rho$  предельного цикла сетевого осциллятора (амплитуду его собственных автоколебаний) в виде произвольной монотонной функции  $\rho(I)$  от яркости пикселя  $I$ ;
- б) модифицированное правило сетевого связывания, основанное на фильтрации, которое обеспечивает «селективное» связывание только тех сетевых осцилляторов, окрестности взаимодействия которых пересекаются;
- в) просто реализуемую возможность селективной сегментации (выделение множества фрагментов изображения, яркости которых содержатся внутри заданного интервала).

Улучшенная версия модели демонстрирует хорошую точность сегментации реальных полутоновых изображений. Селективная сегментация, являясь более информативной по сравнению с обычной, может быть полезной при активной обработке изображений.

### **Список литературы**

1. Y. Kazanovich and R. Borisuyk "Object selection by an oscillatory neural network", *Biosystems*, vol. 67, pp. 103-111, 2002.
2. R. M. Borisuyk and Y. B. Kazanovich "Oscillatory model for attention-guided object selection and novelty detection", *Neural Networks*, vol. 17, pp. 899-915, 2004.
3. D. Wang "The time dimension for scene analysis", *IEEE Trans. On NN* (in press), 2005.
4. М.Г.Кузьмина, Э.А. Манькин, И.И.Сурина, "Осцилляторная сеть с самоорганизованными динамическими связями для сегментации изображений", *"Нейрокомпьютеры"*, № 4, с. 34-55, 2004.
5. M.G.Kuzmina, E.A.Manykin, I.I.Surina, "Oscillatory network with self-organized dynamical connections for synchronization-based image segmentation", *BioSystems*, v.76, no. 1-3, pp. 43-53, 2004.
6. M. G. Kuzmina, E. A. Manykin "Oscillatory network model for adaptive dynamical image processing", *Computation Intelligence in Modeling, Cooperation and Automation (CIMCA'05)*, Vienna, Austria, Nov. 27 - Dec. 1, 2005.
7. E.Grichuk, M.Kuzmina, E.Manykin "Oscillatory Network for Synchronization-based Adaptive Image Segmentation", *World Congress on Computation Intelligence*, July 16-23, 2006, Vancouver, Canada; WCCI 2006 Final Program and Book of Abstracts, p.347; DVD: 37726D, ISSN: 0-7803-9489-5, Technical Program Listing, p.84.