

УДК 004.021

СЕГМЕНТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕМЕННОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

В.Г. Калмыков¹, А.В. Шарыпанов²

¹Институт проблем математических машин и систем НАН Украины,

²Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины

e-mail: vl.kalmykov@gmail.com

Работа многих информационных систем тесно связана с накоплением исходных данных в виде различных экспериментальных кривых, которые в дальнейшем анализируются специалистами с целью принятия некоторого решения. Экспериментальные кривые представляют собой результаты измерений, как правило, искаженные помехами. Самым основным признаком экспериментальной кривой является ее форма, которая отображает функцию, порождающую наблюдаемую реализацию кривой и характеризует параметры отображаемого объекта или процесса. Предполагается, что измеренные значения являются реализацией некоторой неизвестной функции, существующей на данном интервале измерения, а результатом измерения является конечная последовательность пар вида «номер отсчета - значение». Иначе говоря, имеется реализация таблично заданной функции. Поскольку разные кривые, относящиеся к одному и тому же объекту, могут отличаться друг от друга по масштабу, уровню помех, количеству измерений и т.д., прямое использование нейросетевых методов или методов статистического распознавания образов для решения задачи сравнения формы графиков или кривых не представляется возможным. В этом случае неизвестные функции, определяющие экспериментальные кривые, должны быть аппроксимированы функциями, инвариантными к аффинным преобразованиям для их последующей обработки и сравнения.

Пригодное для дальнейшей обработки аналитическое представление функции, аппроксимирующей экспериментальную кривую, может быть получено, например, в виде параметрически заданного сплайна с учетом предположения, что экспериментальная кривая порождается процессом, который определяется неизвестной гладкой функцией. Тем не менее, в общем случае большое количество практических задач предполагает обработку экспериментальных кривых порождаемых процессами, которые определяются неизвестными кусочно-гладкими функциями. Кривая, определяемая функцией $y = f(x), (a \leq x \leq b)$, является кусочно-гладкой если функция $y = f(x)$ имеет конечное число разрывов на $[a, b]$ и отрезок $[a, b]$ может быть разделен на конечное число частичных сегментов так, что функция $y = f(x)$ будет иметь непрерывные производные одновременно не равные нулю на каждом сегменте. Таким образом, для выделения сегментов экспериментальной кривой, которые могут быть аппроксимированы гладкими функциями, необходимо найти точки, в которых экспериментальная кривая терпит разрыв. Феномен выделения определенных участков на графиках по своей природе является актом зрительного восприятия. Разрывы непрерывности функции или ее градиента легко находятся человеком на графике и используются для принятия решений. Предположительно, процессы сегментации изображений (выделение контуров в изображении) в зрительной системе и процессы сегментации графиков функций имеют одну и ту же природу.

С другой стороны, человеческое зрение решает задачи, связанные с определением формы объекта в поле зрения, без видимых затруднений, на подсознательном уровне, даже для сильно зашумленного сигнала (рис. 1). Следовательно, создание информационных технологий для автоматизированной обработки визуального представления различных сигналов и исследования в области зрительного восприятия

должны рассматриваться как взаимосвязанные области человеческой деятельности, ведь предметом исследования в обеих дисциплинах является зрительное восприятие. Для нейрофизиологии зрения это зрительное восприятие людей и животных, в то время как для компьютерных наук это создание средств технического зрения.

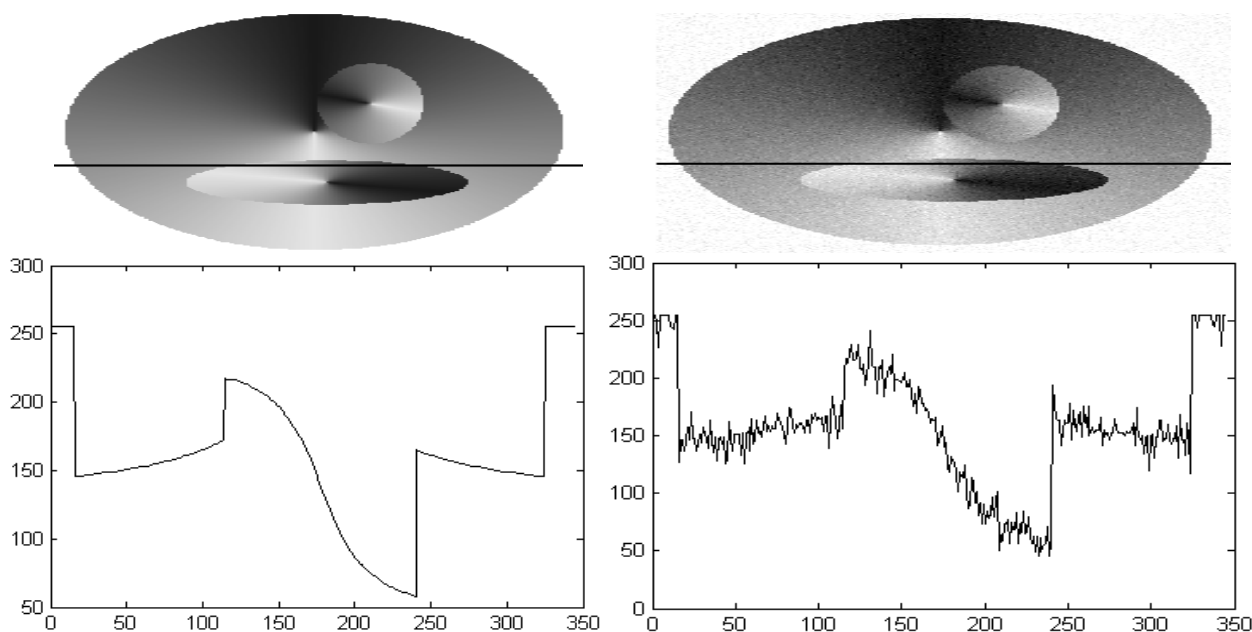


Рис.1. Примеры экспериментальных кривых, как отображений функции яркости строки обычного и зашумленного изображения

Одним из способов эффективного решения задач большой вычислительной сложности, возникающих при обработке визуального представления сигналов, является использование переменной разрешающей способности. Такой подход позволяет исключить из рассмотрения неподходящие объекты или неинформативные участки сигнала на ранних стадиях обработки и применить ресурсоемкую с точки зрения вычислений часть алгоритма к редуцированному объему данных. В [1] представлен обзор методов, использующих идею переменной разрешающей способности для экономии вычислительных ресурсов при обработке сигналов. В то же время, в области нейрофизиологии зрения проводятся исследования, показывающие наличие подобного механизма в зрительной системе живых существ.

Исследования человеческого зрения и процессов, протекающих в зрительной системе человека, показали, что нейроны зрительной системы обрабатывают сигналы от

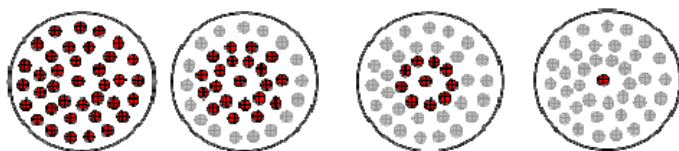


Рис. 2. Изменение размеров зоны возбуждения рецептивного поля нейрона во время зрительного акта

некоторого количества рецепторов, образующих рецептивное поле нейрона. Рецептивные поля простых нейронов имеют форму круга. Рецептивные поля соседних нейронов перекрываются, т.е. каждый рецептор может быть связан с несколькими нейронами. Центральная часть рецептивных полей называется зоной

возбуждения, периферийная часть (кольцо вокруг центральной части) - зоной торможения. При попадании светового стимула в зону возбуждения рецептивного поля нейрона, генерируется определенное количество импульсов. Зрительная система человека работает в режиме следующих друг за другом зрительных актов. Зрительный акт длится примерно 150 мс. После чего происходит саккада - подергивание глазодвигательных

мышц, в результате чего изображение на сетчатке смещается и начинается следующий зрительный акт. В 70-х годах прошлого века было открыто явление изменения размеров зон возбуждения рецептивных полей нейронов зрительной системы во время зрительного акта [2], которое позднее было исследовано и подтверждено уже на современном уровне [3]. Если в начале зрительного акта рецептивное поле состоит из максимального количества (десятков, иногда сотен) рецепторов, то к концу зрительного акта это количество уменьшается до минимально возможного - 1-2 рецептора (рис. 2). Таким образом, можно считать, что

1) для зрительной системы существует изменяемая в течение зрительного акта, переменная разрешающая способность, определяемая размером зоны возбуждения рецептивного поля нейрона в каждый момент времени.

2) рецептивное поле нейрона является дискретным аналогом окрестности точки в непрерывном двумерном пространстве.

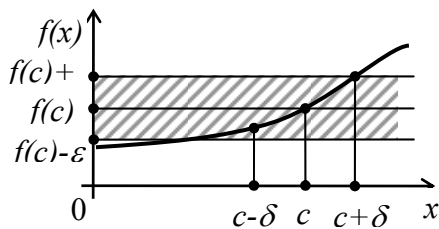


Рис. 3. Определение непрерывности функции в форме “ ε - δ ”

Для анализа непрерывности функции в непрерывном двумерном пространстве успешно применяется классическое определение непрерывности функции в форме $\varepsilon - \delta$: если для каждого $\varepsilon > 0$ существует такое $\delta > 0$, что для любого значения переменной x , принадлежащей ε -окрестности точки c , то значения функции $f(x)$ принадлежат ε -окрестности $f(c)$ (рис.3). Следует обратить внимание на то, как выполняется проверка непрерывности функции в точке.

Начиная с некоторого значения $|x_1 - c|$ окрестность точки c уменьшается ($|x_1 - c| > |x_2 - c|, |x_2 - c| > |x_3 - c|, \dots$) стремясь к 0. При этом $f(x)$ считается непрерывной в точке c если окрестность $f(c)$ так же стремится к 0:

($|f(x_1) - f(c)| > |f(x_2) - f(c)|, |f(x_2) - f(c)| > |f(x_3) - f(c)|, \dots$). То есть для анализа непрерывности функции в точке используется изменяющаяся окрестность этой точки.

Уменьшение размера зоны возбуждения рецептивного поля может рассматриваться как уменьшение величины окрестности точки, находящейся в центре рецептивного поля. Процесс, который используется при анализе непрерывности функции в точке в классическом математическом анализе, повторяется в зрительной системе человека и животных при каждом зрительном акте. Существенное отличие процесса изменения разрешающей способности в зрительной системе от анализа непрерывности функции в точке заключается в том, что элементы рецептивного поля являются объектами дискретного пространства. Аналогично, классическое определение непригодно для анализа непрерывности экспериментальных кривых, поскольку они являются отображением неизвестных функций и представлены в виде последовательностей значений, которые, в свою очередь, являются множеством точек в некотором дискретном пространстве. Однако в начальные моменты зрительного акта зоны возбуждения нейронов содержат много точек (рецепторов) и до тех пор, пока множества рецепторов в зонах возбуждения рецептивных полей не являются пустыми, применение определений непрерывности к функции яркости определенной в дискретном пространстве рецепторов не противоречит классической теории непрерывности.

Разработан и программно реализован алгоритм сегментации экспериментальной кривой с использованием переменной разрешающей способности (рис. 4) При этом множество отсчетов делится на интервалы («грубые отсчеты»), на каждом из которых рассчитывается агрегированное значение по всем значениям попавших в него значений

отсчетов экспериментальной кривой. При переходе к следующему разрешению интервалы, определяющие «грубые» отсчеты уменьшаются, моделируя уменьшение окрестности точки. Если экспериментальная кривая имеет разрыв в некоторой точке, то начиная с некоторого разрешения, в окрестности этой точки будет фиксироваться разрыв, который не будет исчезать с уменьшением окрестности точки. На рис.4 а.1, б.1 по оси абсцисс отложены номера отсчетов экспериментальной кривой, по оси ординат – номера разрешений, при которых исследуется экспериментальная кривая. Отрезки на рис.4 а.1, б.1 соответствуют интервалам в области точных отсчетов, на которых обнаружены разрывы непрерывности экспериментальной кривой. На рис.4 б.1 видно, что информация об имеющихся скачках экспериментальной кривой, полученная на низких разрешениях, позволяет исключить из рассмотрения области, в которых на максимальном разрешении обнаруживаются скачки, обусловленные наличием помех.

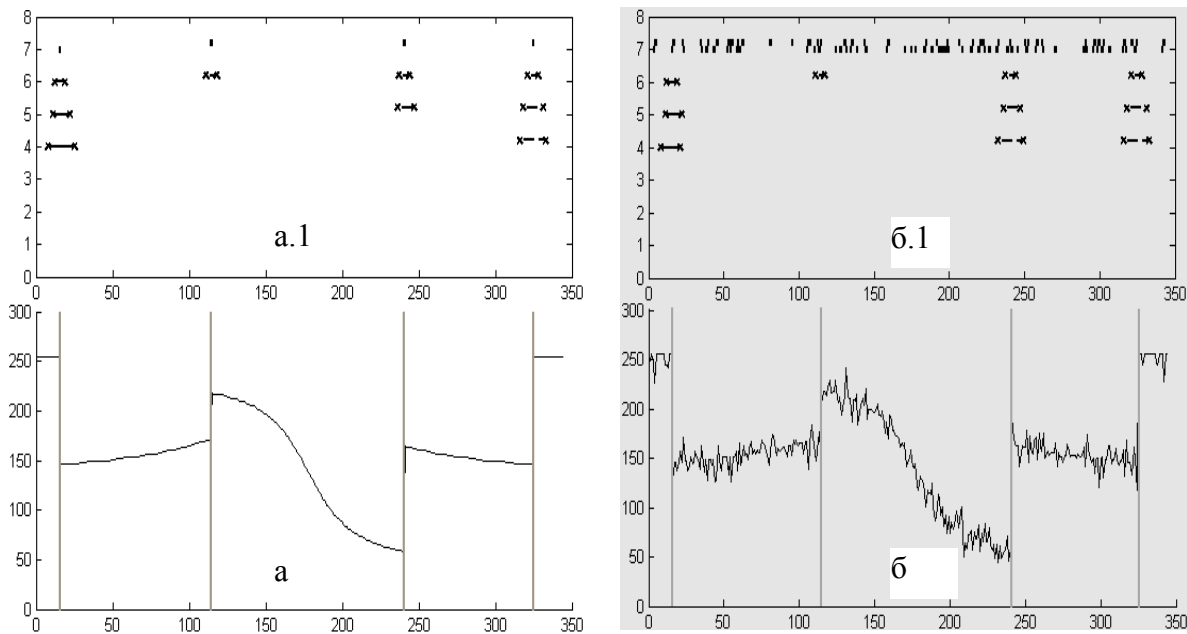


Рис. 4. Пример сегментации идеального (а) и зашумленного сигнала (б) с использованием переменной разрешающей способности

Таким образом, сегментация экспериментальной кривой может проводиться как поиск точек разрыва породившей ее кусочно-гладкой функции, а опираясь на классическую теорию непрерывности функций и актуальные достижения в области нейрофизиологии зрения можно конструировать новые методы сегментации экспериментальных кривых с применением понятия переменной разрешающей способности. Работоспособность алгоритма подтверждена обработкой сигналов и графиков, искаженных помехами.

Список литературы

1. Anton Sharypanov, Alexandra Antoniouk, Vladimir Kalmykov. Joint study of visual perception mechanism and computer vision systems that use coarse-to-fine approach for data processing // International Journal “Information content & processing”. – Sofia. – 2014. – v. 1, № 3 – P.287-300.
2. Н.Ф. Подвигин Динамические свойства нейронных структур зрительной системы Ленинград: Наука, 1979, 158 с.
3. Ruksenas O, Bulatov A, Heggelund P. Dynamics of Spatial Resolution of Single Units in the Lateral Geniculate Nucleus of Cat During Brief Visual Stimulation. J Neurophysiol 97:1445-1456, 2007.