

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТОЧЕК РАЗРЫВА НЕПРЕРЫВНОСТИ НА ИСКАЖЕННЫХ ПОМЕХАМИ ГРАФИКАХ ФУНКЦИЙ

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, г. Киев, Украина

Анотація. Виходячи з припущення, що феномен змінної роздільної здатності використовується у зоровому сприйнятті людини для сегментації зображень, зокрема, графіків, запропоновано новий метод визначення розривів неперервності на графіку. Графік обробляється при декількох роздільних здатностях. Визначають інтервали, що містять розриви неперервності першого роду. Остаточне рішення стосовно сегментації приймається на підставі сумісного розгляду всіх окремих відповідей при всіх роздільних здатностях. Представлені результати перевірки працездатності нового алгоритму на прикладі сегментації кардіосигналу.

Ключові слова: розрив неперервності, змінна роздільна здатність, кутові коефіцієнти відрізків прямих.

Аннотация. Исходя из предположения, что феномен переменной разрешающей способности используется в зрительном восприятии человека для сегментации изображений, в частности, графиков, предложен новый метод определения разрывов непрерывности на графике. График обрабатывается при нескольких разрешающих способностях. Определяют интервалы, содержащие разрывы непрерывности первого рода. Окончательное решение о сегментации принимается на основании совместного рассмотрения всех частных ответов при всех разрешениях. Представлены результаты проверки работоспособности нового алгоритма на примере сегментации кардиосигнала.

Ключевые слова: разрыв непрерывности, переменная разрешающая способность, угловые коэффициенты отрезков прямих.

Abstract. Based on the assumption that the phenomenon of variable resolution is used in human visual perception for image segmentation, in particular graphs, a new method for finding discontinuities in the graph is proposed. The graph is processed under several resolutions. Intervals containing jump discontinuities are located. The final decision on segmentation is made on the basis of joint consideration of all partial answers at all resolutions. The results of testing the efficiency of the new algorithm on the example of cardiac signal segmentation are presented.

Keywords: discontinuity, variable resolution, angular coefficients of straight lines segments.

1. Введение

Работа многих информационных систем связана с накоплением информации в виде изображений, различных графиков, по которым должно быть получено мнение эксперта: принято то или иное решение. Большой и постоянно возрастающий объем данных требует разработки инструментария, позволяющего снизить нагрузку на лиц, принимающих решения, путем частичной или полной автоматизации обработки исходных данных.

Обработка данных предполагает выделение характерных элементов функции, реализацией которой является график. Прежде всего, это разрывы непрерывности самой функции и ее производных, максимумы, минимумы, отрезки прямых как отдельные элементы кусочно-гладкой функции, прочее.

Как правило, графики, подлежащие обработке, искажены помехами, что затрудняет решение этих задач не только в автоматическом, но даже в полуавтоматическом режиме.

Благодаря свойствам зрительного восприятия, человек способен выделять на графике определенные элементы, несмотря на значительные помехи, то есть сегментировать график.

Задача данной работы заключается в том, чтобы проанализировать новейшие исследования механизмов зрительного восприятия, составить формальное описание их работы в части выделения указанных элементов и реализовать их в разрабатываемых средствах обработки визуальной информации.

Исследования зрительного восприятия человека показали, что каждый из нейронов зрительной системы получает информацию от множества рецепторов, составляющих рецептивное поле нейрона. В простейшем случае рецептивное поле нейрона имеет форму круга. Рецептивные поля соседних нейронов перекрываются [1]. Центральная часть рецептивных полей называется зоной возбуждения, периферийная часть (кольцо вокруг центральной части) – зоной торможения. При подаче светового стимула на зону возбуждения рецептивного поля нейрона генерируется определенное количество импульсов. Чем больше стимул, тем большее количество импульсов будет сгенерировано. Если размер светового стимула превысит диаметр зоны возбуждения, занимая часть зоны торможения, количество импульсов будет уменьшаться. Зрительное восприятие человека работает в режиме следующих друг за другом зрительных актов продолжительностью около 150 мс. По окончании зрительного акта происходит саккада (подергивание глазодвигательных мышц): изображение на сетчатке смещается и начинается следующий зрительный акт. В результате исследований размеров зон возбуждения рецептивных полей было установлено [2], что размер их не остается постоянным в течение зрительного акта. Если в начале зрительного акта (рис.1) этот размер имеет максимальное значение, то к концу зрительного акта он уменьшается до минимально возможного (1–2 рецептора). Позднее наличие этого явления было подтверждено, а само явление было исследовано уже на современном уровне [3]. Было показано, что количество активируемых нейронов тестовым стимулом уменьшается во время зрительного акта. Расположенный со смещением относительно центра рецептивного поля нейрона стимул (в пределах максимального размера рецептивного поля, но за пределами минимального размера рецептивного поля) в начале зрительного акта вызывал отклик, который затем пропадал по мере уменьшения размера зоны возбуждения рецептивного поля до минимального. В терминах обработки сигналов и изображений это означает, что обработка производится при различных значениях разрешающей способности. Под разрешающей способностью применительно к изображениям будем понимать размер (площадь) пиксела, в пределах которого определяется единственное значение яркости.

В реальной действительности доступны только последовательности измерений на конечных пространственных интервалах (например, пикселах) либо через конечные промежутки времени. Величина конечных пространственных интервалов либо конечных промежутков времени, через которые выполняются измерения, характеризуют разрешающую способность реализации сигнала или изображения.

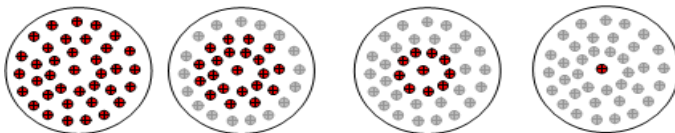


Рис. 1. Изменение размеров зоны возбуждения рецептивного поля нейрона во время зрительного акта

Известны методы обработки изображений, использующие различные значения разрешающей способности, которые получили название “coarse-to-fine”. Идея этих методов заключается в прореживании исходных данных для исключения

неподходящих объектов или нерелевантных областей изображения на ранних стадиях обработки, чтобы применить вычислительно затратную часть алгоритма к меньшему количеству данных [4]. Один из вариантов такого подхода – использование модификации известного алгоритма, реализующей подход «coarse-to-fine», подходящей для решения конкретного класса задач.

Например, в [5] модель эталонов, состоящих из отдельных частей, соединенных жесткими связями, рассматривается с разным разрешением. Сформулирован алгоритм перехода от низкого разрешения к высокому. Предлагаемый метод обработки основан на наблюдении, что поиск областей на изображении, соответствующих каждой части эталона, является наиболее вычислительно затратной операцией по сравнению с обнаружением значимых частей и расчетом их оптимальной конфигурации. Минимизация количества операций сравнения частей эталонов с изображением подразумевает ускорение операции обнаружения. Начиная с самого низкого разрешения эталонов, проводится их сравнение с изображением. Отбираются только наиболее вероятные расположения. Затем найденные локально оптимальные расположения рекурсивно распространяются на части модели с большим разрешением. Рекурсивным удалением неподходящих расположений из пространства поиска множество возможных положений уменьшается так, что на максимальном разрешении требуется провести лишь несколько сравнений эталонов с изображением. Предложенный метод позволяет добиться десятикратного ускорения вычислений по сравнению со стандартным методом динамического программирования.

Рассматриваемый в [6] алгоритм использует схожую идею исключения больших областей из пространства гипотез на ранних стадиях распознавания, однако на каждом разрешении используется последовательность детекторов объектов. Результатом работы детектора является количественная оценка рассматриваемой области, сравнивая которую с некоторым порогом принимается решение о применении следующих детекторов из последовательности к этой области. Область будет рассмотрена при следующем разрешении, если ее количественные оценки от каждого детектора превысили соответствующие пороговые значения. Все пороги устанавливаются автоматически на основании вероятностных оценок.

При распознавании лиц процедура coarse-to-fine может быть реализована путем применения разных методов распознавания для сокращения количества кандидатов на каждом шаге.

В [7] процесс принятия решения проходит несколько стадий: 1) оценка принадлежности одному из всех возможных классов (one-against-all of SVM); 2) определение принадлежности каждого кандидата одному из пары классов (one-against-one of SVM); 3) алгоритм Eigenface; 4) метод RANSAC. Стадии 1) и 2) используют характеристики всего изображения лица, полученные из дискретного косинусного преобразования. На стадии 3) рассматриваются проекции изображений лиц в пространство характеристик. Пространство лиц определяется собственными векторами множества лиц и на основании информации об интенсивности изображения лица. Метод RANSAC применяется на последней стадии, где пространственная информация, полученная методами эпиполярной геометрии для проверяемого изображения, сравнивается с двумя эталонными изображениями и выбирается изображение с наибольшим значением подобия и с кратчайшими расстояниями до соответствующих характерных точек.

Рассматриваемая в [8] задача установления соответствия между пикселями двух изображений лиц человека (нахождения разметки) эффективно решается при помощи построения «каскадов» разметок. Внутри одного каскада строится новая разметка для изображений с разрешением в 2 раза меньше относительно исходного. После этого определяется начальное приближение для исходной разметки на основании новой разметки и ищется поле движения относительно этого начального приближения, но с меньшим количеством меток. Алгоритм решения задачи, использующий один «каскад», выполняется в восемь раз быстрее, сохраняя при этом точность отыскания поля движения для двух изображений.

Динамическое программирование очень часто используется в задачах распознавания: распознавание речи, распознавание символов, поиск соответствия по шаблону для деформируемых объектов, отслеживание дороги. Однако постановки подобных задач

очень часто приводят к пространству состояний огромных размеров, из-за чего расчеты могут стать невыполнимыми даже с использованием динамического программирования. Для преодоления сложностей такого рода в [9] предлагается использовать динамическое программирование coarse-to-fine (CFDP). Основная идея такого подхода – сформировать ряд грубых приближений исходного графа динамического программирования путем объединения состояний графа в «сверх состояния». Для каждой грубой аппроксимации оптимальный путь рассчитывается с «оптимистичными» стоимостями дуг между сверхсостояниями. Сверхсостояния вдоль этого оптимального пути пересматриваются, процесс повторяется снова, пока не будет найден доказуемо оптимальный глобальный путь. Во многих случаях глобальный оптимум достигается с гораздо меньшими затратами на вычисления, чем при прямом использовании динамического программирования. Предложенный алгоритм особенно хорошо подходит для задач с большим пространством состояний. В соответствии с [10] скорость алгоритма CFDP зависит от структуры объединения и природы задачи. В наилучшем случае CFDP позволяет получить значительное сокращение вычислений по сравнению с обычным методом динамического программирования; в наихудшем случае он, фактически, будет работать медленнее.

Целью применения методов с изменяющейся разрешающей способностью в рассмотренных выше случаях является определение частей исходного изображения или частей исходного набора данных, содержащих информацию, которая является полезной для решения поставленной задачи. Сложные расчеты выполняются только над этими частями. При этом природе механизма изменения разрешающей способности, используемого в каждом конкретном случае, значения не придается.

В отличие от известных методов, вновь разработанный метод использует свойство изменения разрешающей способности, присущее системе зрительного восприятия человека, для повышения надежности принятия решения при обработке сигнала.

2. Применение переменной разрешающей способности для обработки (сегментации) графиков дискретных реализаций неизвестных функций

Обработка графика экспериментальной кривой выполняется, исходя из предположения, что экспериментальная кривая представляет собой реализацию неизвестной функции $y = f(x)$, определенной на отрезке $[a, b]$ и заданной некоторой дискретной последовательностью $y_i; i = 1, 2, \dots, I$ вида «отсчет-значение». В то же время для решения большого количества практических задач необходимо обрабатывать экспериментальные кривые, которые могут быть представлены только кусочно-гладкими функциями. Кривая, определяемая функциональной зависимостью $y = f(x), (a \leq x \leq b)$, является кусочно-гладкой, если функция $y = f(x)$ имеет конечное число разрывов на $[a, b]$ и отрезок $[a, b]$ может быть разделен точками на конечное число N частичных сегментов так, что функция $y = f(x)$ будет иметь непрерывные производные одновременно не равные нулю на каждом сегменте. То есть, для сегментации экспериментальной кривой необходимо определить множество граничных точек сегментов $T = \{t_0, t_1, \dots, t_N\}$ и их количество $N + 1$.

Алгоритм проверки условия непрерывности функции $f(x)$ в некоторой точке c , которое формулируется в математическом анализе, может быть представлен следующим образом [11]: 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 нулю. Функция $f(x)$ считается непрерывной в точке c , если окрестность $f(c)$ так же стремится к нулю: ($|f(x_1) - f(c)| > |f(x_2) - f(c)|, |f(x_2) - f(c)| > |f(x_3) - f(c)|, \dots$). То есть используется изменяющаяся окрестность точки c для анализа непрерывности функции в указанной точке.

Уменьшение размеров зоны возбуждения рецептивного поля нейрона зрительной системы может рассматриваться как уменьшение окрестности точки в центре рецептивного поля. Процесс, аналогичный алгоритму проверки условия непрерывности в точке из математического анализа, повторяется в зрительной системе человека и животных во время каждого зрительного акта. Существенное отличие между изменением разрешения в зрительной системе и анализом непрерывности функции в точке в математическом анализе заключается в том, что элементы рецептивного поля являются объектами дискретного пространства. Поэтому определение условия непрерывности из математического анализа непригодно для анализа непрерывности экспериментальных кривых, поскольку они являются реализациями неизвестных функций и задаются последовательностями значений, которые, в свою очередь, являются множествами точек в некотором дискретном пространстве. Но в начале зрительного акта зона возбуждения рецептивного поля состоит из большого количества точек (рецепторов). Пока множества рецепторов в зонах возбуждения рецептивных полей нейронов остаются не пустыми, применение определения непрерывности к функции яркости, определенной в дискретном пространстве рецепторов, не противоречит классической теории непрерывности функций. Описанный феномен, наблюдаемый в зрительной системе человека и животных, может быть использован в качестве прототипа для нового метода обработки сигналов с использованием концепции переменной разрешающей способности.

Метод сегментации на основе переменной разрешающей способности заключается в том, что задают некоторую начальную, «грубую», разрешающую способность m , характеризующую начальным значением интервала q_m , по которому определяют значение сигнала на выбранном интервале одним из известных способов. Сеткой «грубых» отсчетов называется последовательность без пропусков интервалов аргумента графика функции. Для каждой разрешающей способности задают K взаимно сдвинутых сеток «грубых» отсчетов. Под сдвигом одной сетки относительно другой одного и того же разрешения понимают смещение в пространстве точных отсчетов границ всех интервалов одной сетки относительно интервалов другой сетки на $-(q_m/K)$ точных отсчетов. Смысл смещения сеток заключается в том, чтобы наиболее точно определить совпадение значения аргумента функции, для которого наблюдается разрыв непрерывности, с границей интервала сетки. Для каждой сетки «грубых» отсчетов $I^{(m,k)}$ определяют значения сигнала $y_i^{(m,k)}$ дискретной реализации функции и в результате обработки получают значения аргументов, при которых функция, возможно, претерпевает разрыв.

Если функция $y = f(x)$ имеет разрыв непрерывности в некоторой точке c , то, по крайней мере, одна из реализаций функции $Y^{(m,k)}$ в окрестности «грубого» отсчета, содержащего точку c , испытывает резкое изменение, которое будет фиксироваться при последующих разрешающих способностях (уменьшающихся окрестностях точки c) и не будет уменьшаться [12]. Результатом совместного рассмотрения частных ответов от некоторой последовательности разрешений является определение значений аргументов разрывов функции при «грубых» разрешающих способностях.

На каждом графике в примере (рис. 2) по оси абсцисс отложены номера отсчетов. По оси ординат на графиках (а) и (б) отложены измеренные значения сигналов на каждом отсчете, на графиках (а.1) и (б.1) – номера разрешений в последовательности разрешений, которые были использованы для анализа экспериментальной кривой. Каждая горизонтальная линия на рис. 2 а.1, 2 б.1 соответствует интервалам в пространстве точных отсчетов, на которых обнаруживались разрывы непрерывности при конкретном разрешении. Непрерывными линиями обозначены резкие изменения – скачки – от меньшего к большему значению. Пунктирные линии обозначают скачки от большего к меньшему значению. Жирными вертикальными линиями по сторонам графиков на рис. 2 а.1, 2 б.1 обозначены подмножества одинаковых частных ответов от разрешений. Черным цветом выделены под-

множества ответов, которые считаются результатом сегментации. Информация о скачках экспериментальной кривой, полученная при низких разрешениях (рис. 2 б.1), позволила исключить из рассмотрения участки экспериментальной кривой, на которых были обнаружены скачки при максимальной разрешающей способности из-за влияния шума.

Таким образом, метод сегментации с переменной разрешающей способностью позволяет принимать удовлетворительные устойчивые решения по сегментации сигналов, искаженных помехами.

Покажем, что дискретная реализация непрерывной гладкой функции может быть представлена как реализация кусочно-гладкой функции в дискретном пространстве.

Обычно точки дискретной последовательности рассматриваются в математике как изолированные, но поскольку мы имеем дело с реализацией некоторой непрерывной функции, эти точки должны быть последовательно соединены отрезками прямых (рис. 3).

Реализация сигнала или функции, рассмотренная при разном разрешении, может восприниматься как непрерывная, либо как претерпевающая разрыв. Это зависит от выбора значения порога d , поскольку разрыв непрерывности первого рода для дискретной реализации функции определяется выражением $|y_{i+1} - y_i| > d$.

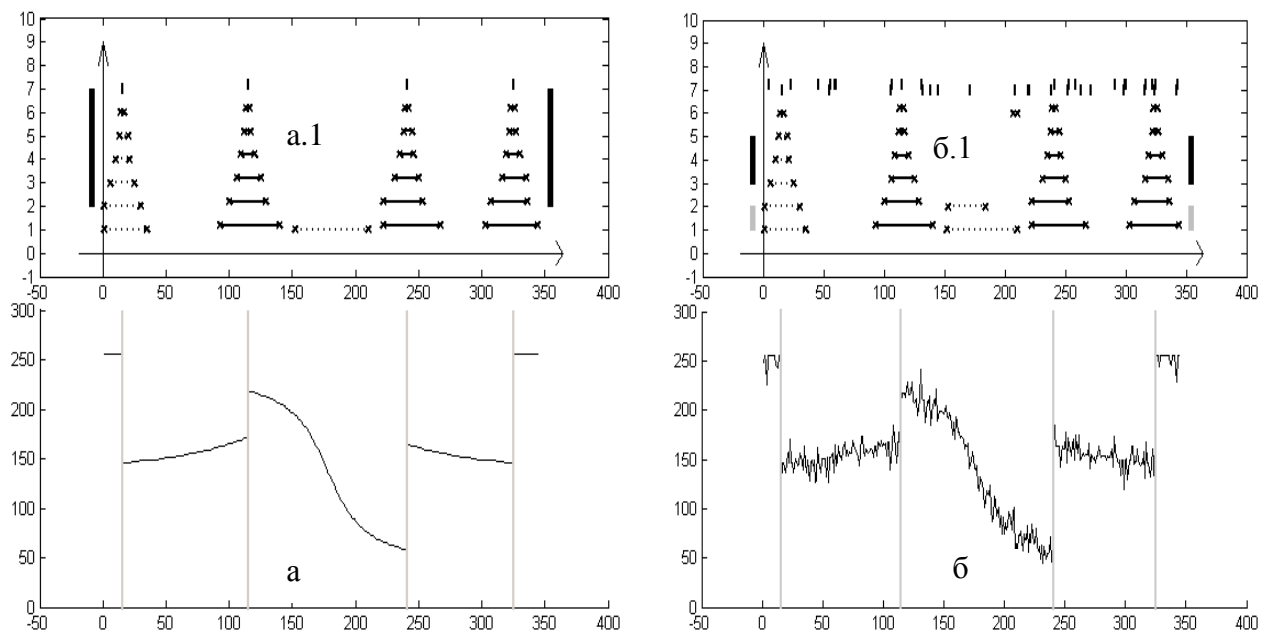


Рис. 2. Примеры сегментации графиков функций в отсутствие помех (а) и искаженных шумами (б) при изменяющейся разрешающей способности

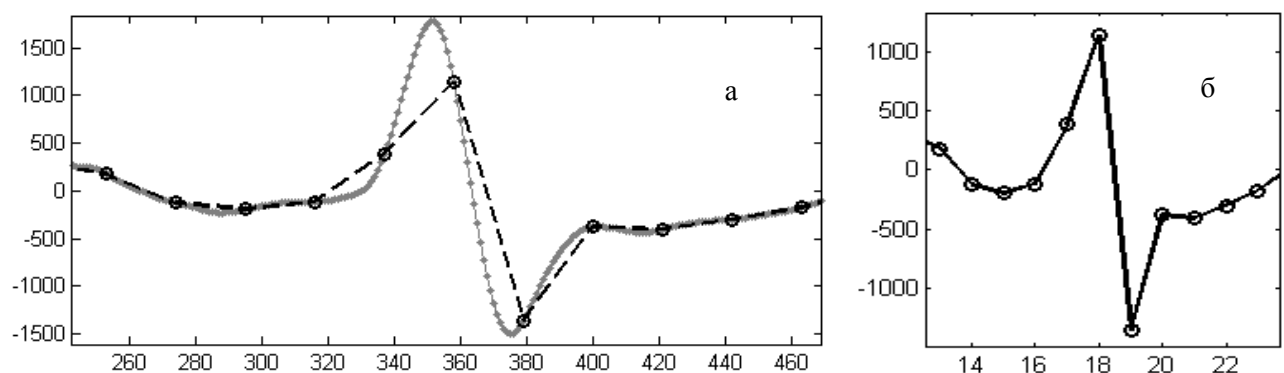


Рис. 3. Дискретная реализация функции при максимальном разрешении (а) и некотором грубом разрешении (б)

Подчеркнем, что математическое понятие «разрыв непрерывности» является абстракцией, которую в реальной действительности можно наблюдать только в некотором приближении. В самом деле, имеется в виду разрыв непрерывности некоторой функции в точке, а именно в математической точке, размер которой является бесконечно малой величиной, либо для функций, аргументом которых является время. Конечное изменение значения функции происходит в течение бесконечно малого промежутка времени.

В то же время окрестность точки дискретной реализации кусочно-гладкой функции, в которой проверяется наличие разрыва непрерывности первого рода, не может стать бесконечно малой. Минимальный размер окрестности точки в дискретном пространстве составляет 1 дискрету, а, значит, угловой коэффициент прямой, проведенной через 2 соседние точки дискретной реализации непрерывной функции, всегда конечный. ε -окрестность точки непрерывного пространства в дискретном пространстве может быть охарактеризована первой конечной разностью в точке. В силу того, что расстояние между двумя соседними отсчетами составляет 1 дискрету, угловой коэффициент отрезка прямой, соединяющего две соседние точки, (рис. 4) также может быть охарактеризован первой конечной разностью. Поэтому отыскание разрывов непрерывности функции по ее реализации в дискретном пространстве [11] может быть представлено как отыскание отрезков прямых, соединяющих 2 соседние точки дискретной реализации функции с угловым коэффициентом, превышающим заданное пороговое значение d .

Рассмотрим участок графика дискретной реализации функции совместно при максимальном и некотором грубом разрешении m (рис. 5).

Точки A и B являются точками в соседних отсчетах с номерами i и $i+1$ при максимальной разрешающей способности, точки A' и B' являются точками в соседних отсчетах i_m и i_m+1 при некотором грубом разрешении. Точки A и A' совпадают.

В треугольнике ABC угловой коэффициент φ отрезка AB определяется по формуле $\varphi = BC/AC = BC$, так как на сетке максимального разрешения расстояние $AC = 1$ (1 дискрета). Чтобы между точками A и B на сетке максимального разрешения фиксировался разрыв непрерывности, необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$BC > d. \quad (1)$$

Выполнение этого неравенства будет свидетельствовать о том, что угловой коэффициент φ отрезка AB больше порога d . Обозначим ψ угловой коэффициент отрезка $A'E'$. Тогда $\psi < \varphi$, поскольку на сетке точных отсчетов $AC' > AC$, а $BC = E'C'$.

Чтобы определить значение порога, при котором на разных разрешающих способностях будут определяться отрезки прямых с угловым коэффициентом больше заданного, рассмотрим подобные треугольники ABC и $AB''C'$. Угловые коэффициенты отрезков AB и AB'' совпадают в силу равенства углов при вершине A . Значит, выполняется равенство $BC/AC = B''C'/AC'$. На сетке максимальной разрешающей способности $AC = 1$, $AC' = q_m$, тогда $B''C' = BC \cdot q_m$ и из (1) следует $B''C' > d \cdot q_m$. Таким образом, поиск на графике отрезков прямых с угловым коэффициентом больше заданного может быть выполнен методом поиска разрывов непрерывности при изменяющейся разрешающей способности с изменяющимся значением порога $d_m \in D$, $d_m = d \cdot q_m$, индивидуальным для каждого разрешения. Если при некотором грубом разрешении m на интервале $[i_m, i_m+1]$ реализации функции $Y^{(m)}$ обнаружен отрезок прямой с угловым коэффициентом больше порогового значения $d_m \in D$, $d_m = d \cdot q_m$, то при повышении разрешения внутри отображения этого интервала на сетку отсчетов максимального разрешения так же будет обнаруживаться ми-

нимум один отрезок с угловым коэффициентом, превышающим соответствующее разрешению пороговое значение.

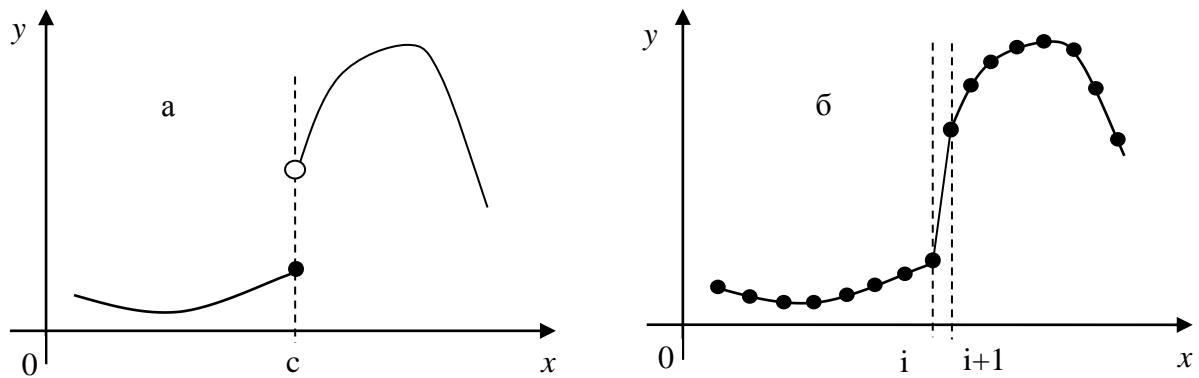


Рис. 4. Разрыв непрерывности первого рода для кусочно-гладкой функции (а) и соответствующее ему резкое изменение на ее дискретной реализации (б)

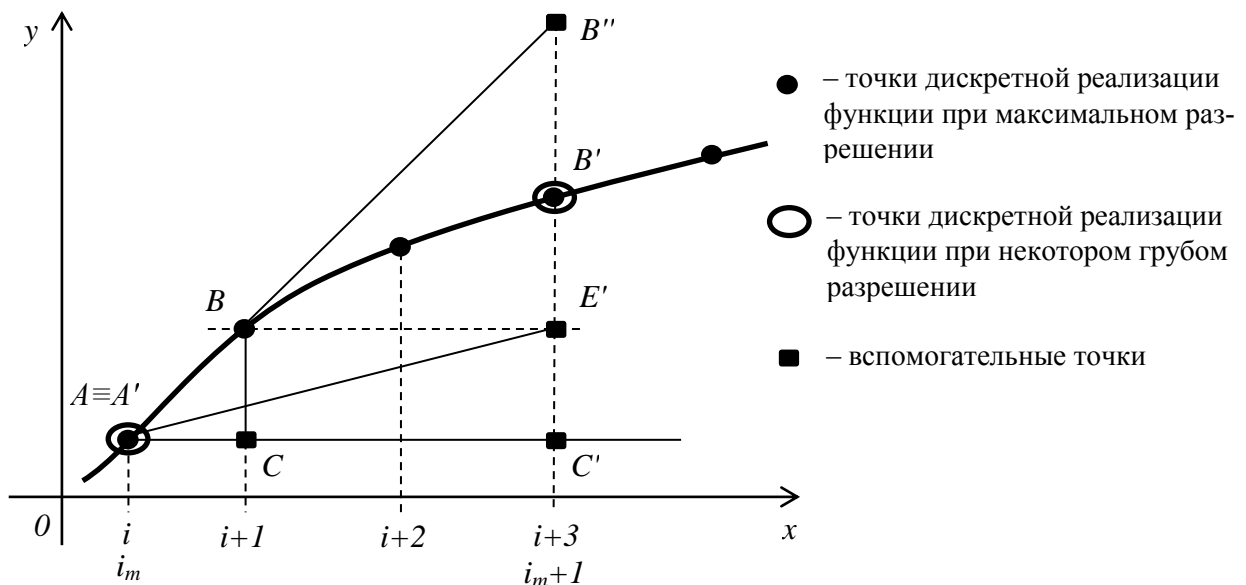


Рис. 5. Поиск участков графика, которые могут содержать отрезки прямых с угловым коэффициентом больше некоторого наперед заданного значения

Следует отметить, что при рассмотрении дискретной реализации неизвестной функции вместо производных используются конечные разности. Для поиска разрывов непрерывности (рис. 4) достаточно рассмотрения конечных разностей первого порядка. Для поиска разрывов градиента функции (разрывов первой конечной разности) должны быть рассмотрены конечные разности второго порядка.

3. Примеры обработки экспериментальных данных

Использование переменной разрешающей способности при обработке (сегментации) графиков функций представляется целесообразным и естественным, поскольку восприятие визуальной информации зрительной системой человека вообще и графиков в частности происходит в режиме изменяющейся разрешающей способности. Эффективность использования изменяющейся разрешающей способности в прикладных задачах должна быть проверена экспериментально.

Для проведения экспериментов исходные данные были взяты из проекта «Медгрид» [13]. Работа предложенного алгоритма проверялась на кардиосигналах, которые были получены в разное время и от разных пациентов. На всех графиках по оси абсцисс отложено время в миллисекундах, по оси ординат – напряжение в милливольтях. Рассматривались прошедшие предварительную фильтрацию кардиограммы продолжительностью 30 секунд и кардиограммы без предварительной обработки продолжительностью 90 секунд.

На рис. 6 – 8 представлены 5 секунд фрагменты кардиосигналов продолжительностью 30 секунд, сегментированные по R-зубцу с помощью предложенного метода. Рис. 6: сигнал визуально не искажен, отсутствуют артефакты в виде экстрасистол, незначительный шум, изолиния нулевого уровня хорошо просматривается на графике. Рис. 7 – 8: сигнал имеет незначительные искажения, обусловленные помехами, на графиках имеются экстрасистолы.

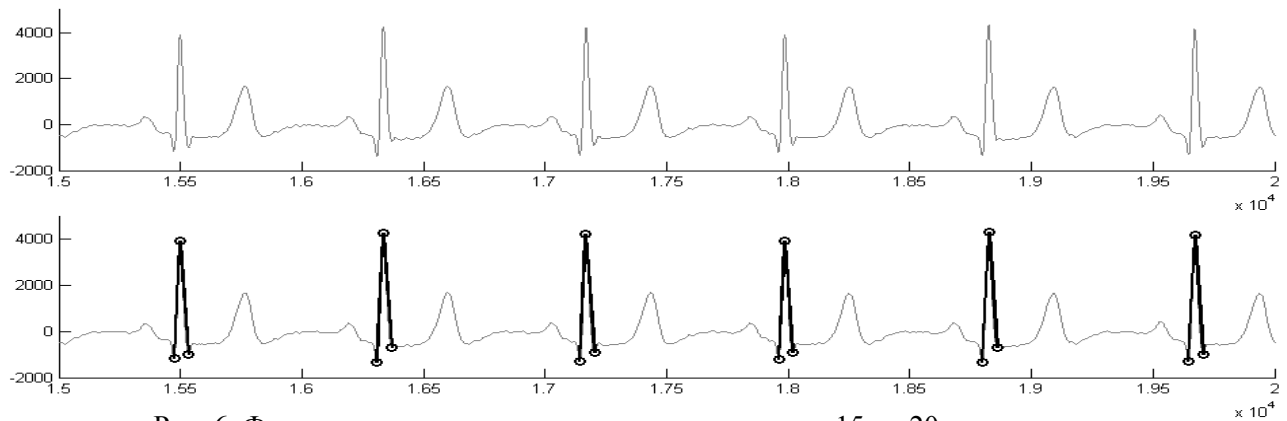


Рис. 6. Фрагмент сегментированного кардиосигнала с 15 по 20 секунду

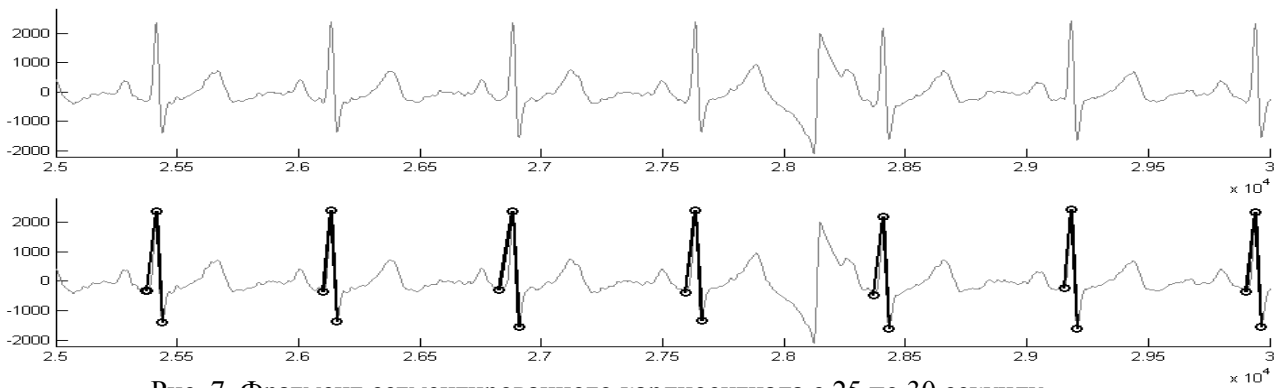


Рис. 7. Фрагмент сегментированного кардиосигнала с 25 по 30 секунду

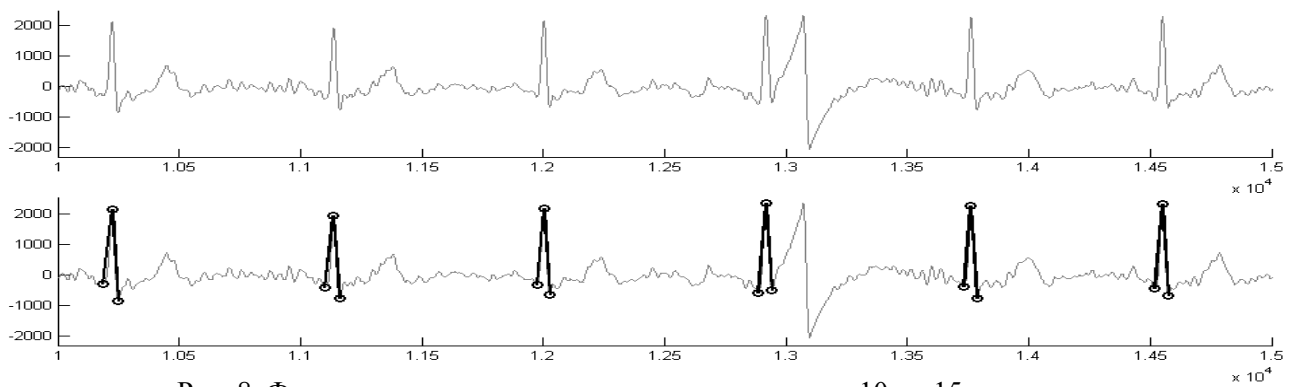


Рис. 8. Фрагмент сегментированного кардиосигнала с 10 по 15 секунду

На рис. 9 а, б и рис. 10 а, б приведены примеры сегментации кардиосигналов с помощью предложенного метода без предварительной обработки. На графиках присутствуют сильный ВЧ шум, дрейф изолинии нулевого уровня, есть испорченные циклы, амплитуды Т-зубцов превышают амплитуды R-зубцов.

4. Выводы

Предложен новый метод поиска разрывов непрерывности неизвестных функций по графикам их дискретных реализаций. Данный метод использует понятие переменной разрешающей способности и опирается на актуальные результаты, полученные в нейрофизиологии зрения. Метод пригоден для обработки искаженных помехами графиков без дополнительной априорной информации о параметрах помех. Предложена интерпретация метода, позволяющая на графиках дискретных реализаций функций устанавливать расположение отрезков прямых, соединяющих пары соседних точек, с угловым коэффициентом больше заданного порогового значения.

Выполнена программная реализация и проведена экспериментальная проверка алгоритма на примере сегментации кардиосигнала. Обработано более 100 кардиограмм различных пациентов. Получены положительные результаты.

Программа будет использована в дальнейших исследованиях кардиосигнала.

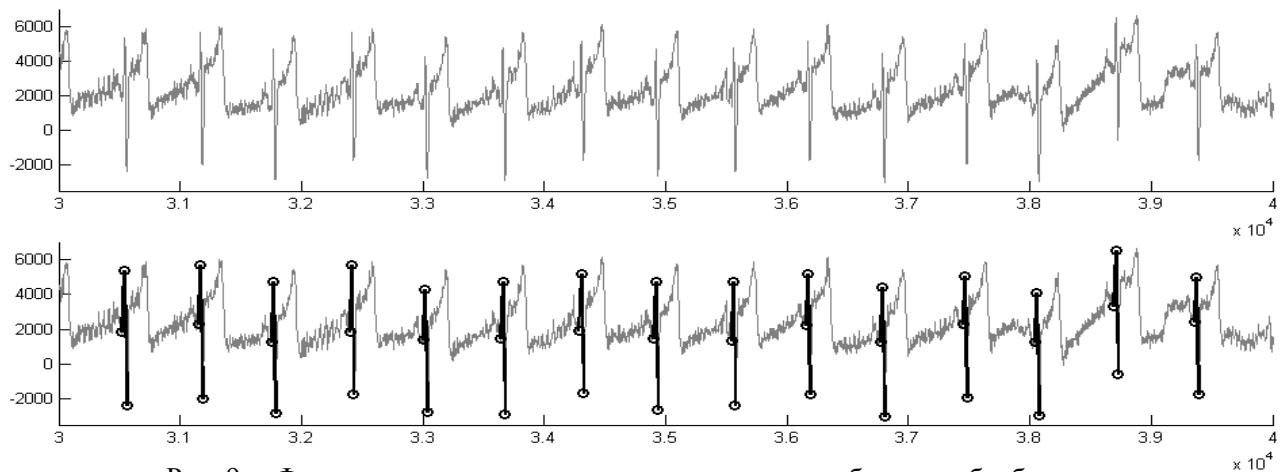


Рис. 9 а. Фрагмент сегментированного кардиосигнала без предобработки продолжительностью 90 секунд, с 30 по 40 секунду

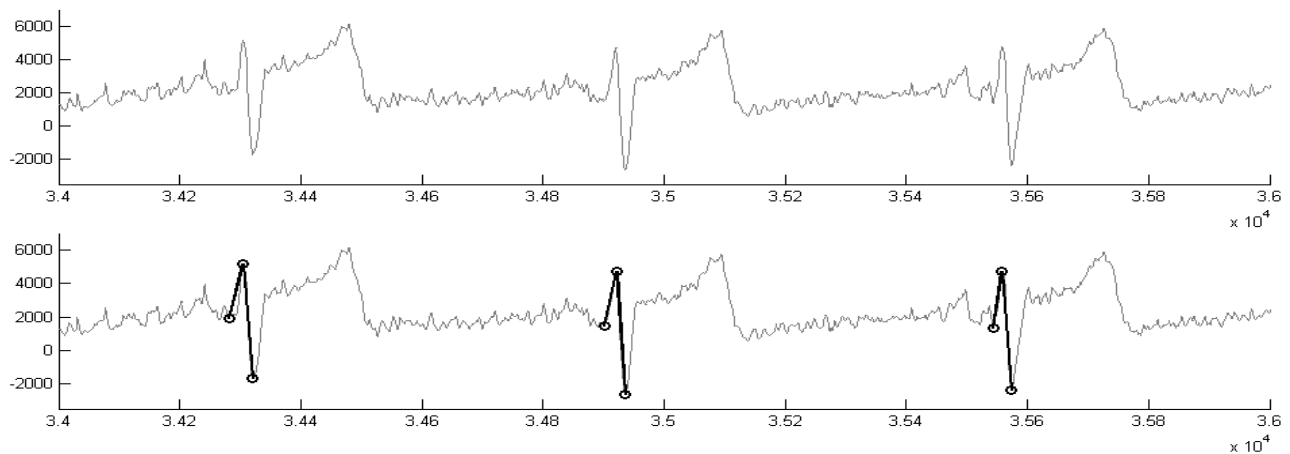


Рис. 9 б. Фрагмент сегментированного кардиосигнала без предобработки продолжительностью 90 секунд, с 34 по 36 секунду

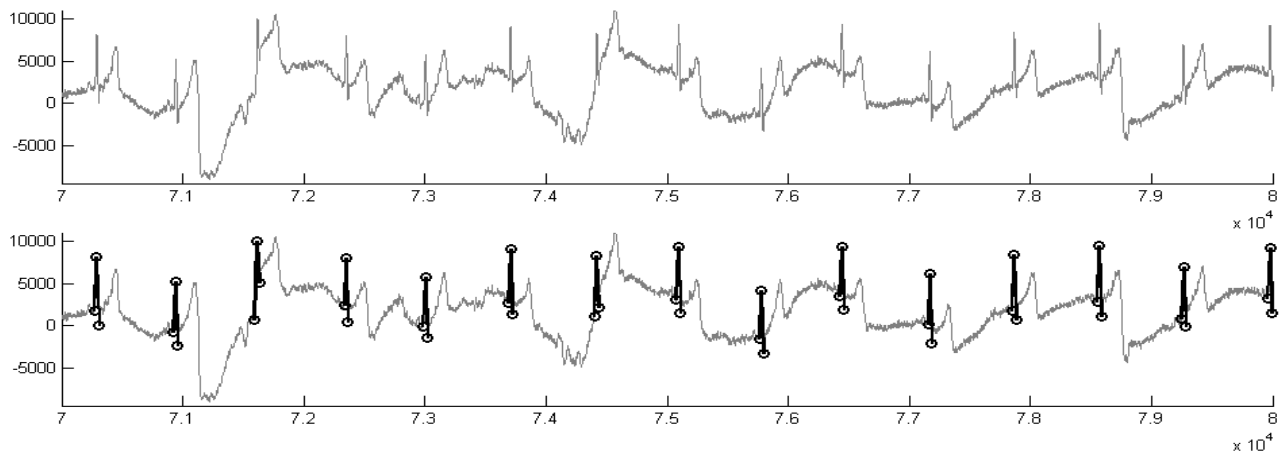


Рис. 10 а. Фрагмент сегментированного кардиосигнала без предобработки продолжительностью 90 секунд, с 70 по 80 секунду

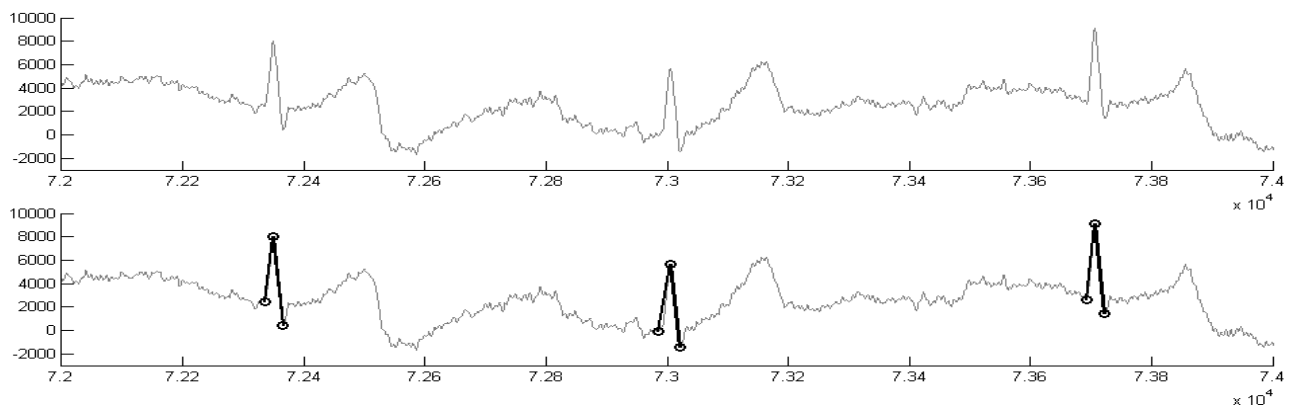


Рис. 10 б. Фрагмент сегментированного кардиосигнала без предобработки продолжительностью 90 секунд, с 72 по 74 секунду

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hubel H.D. Eye, brain, and vision / Hubel H.D. – New York: Scientific American Library; Distributed by W.H. Freeman, 1988. – 240 p.
2. Подвигин Н.Ф. Динамические свойства нейронных структур зрительной системы / Подвигин Н.Ф. – Ленинград: Наука, 1979. – 158 с.
3. Ruksenas O. Dynamics of Spatial Resolution of Single Units in the Lateral Geniculate Nucleus of Cat During Brief Visual Stimulation / O. Ruksenas, A. Bulatov, P. Heggelund // J Neurophysiol. – 2007. – N 97. – P. 1445 – 1456.
4. Sharypanov A. Joint study of visual perception mechanism and computer vision systems that use coarse-to-fine approach for data processing / A. Sharypanov, A. Antoniouk, V. Kalmykov // Information content & processing. – 2014. – Vol. 1, N 3. – P. 287 – 300.
5. Pedersoli M. A Coarse-to-fine approach for fast deformable object detection / M. Pedersoli, A. Vedaldi, J. Gonz`alez // CVPR. – 2011. – June. – P. 1353 – 1360.
6. Moreels P. Probabilistic Coarse-To-Fine Object Recognition / P. Moreels, P. Perona // Technical report. – Pasadena: California Institute of Technology, 2005. – 49 p.
7. Lee J.-D. A Multi-Stage Classifier for Face Recognition Undertaken by Coarse-to-fine Strategy, State of the Art in Face Recognition [Электронный ресурс] / J.-D. Lee, C.-H. Kuo; J. Ponce, A. Karahoca (Ed.) // Tech. – 2009. – Режим доступа: http://www.intechopen.com/books/state_of_the_art_in_face_recognition/a_multistage_classifier_for_face_recognition_undertaken_by_coarse-to-fine_strategy.

8. Тищенко М.А. Тривимірна реконструкція людського обличчя в задачах ідентифікації особи: дис. ... кандидата техн. наук / Тищенко М.А. – Київ: Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем, 2012. – 120 с.
9. Raphael C. Coarse-to-Fine Dynamic Programming / C. Raphael // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2001. – Vol. 23. – P. 1379 – 1390.
10. Lucena O.B. Dynamic Programming, Tree-width and Computation on Graphical Models: PhD thesis. – Division of Applied Mathematics / Lucena O.B. – Providence: Brown University, 2002. – 85 p.
11. Kalmykov V. Segmentation of Experimental Curves Distorted by Noise / V. Kalmykov, A. Sharypov // Journal of Computer Science Systems Biology. – 2017. – Vol. 10, Issue 3 OMICS International. – P. 50 – 55.
12. Kalmykov V. Approximation of the Experimental Curves by Piecewise Smooth Functions / V. Kalmykov, V. Vishnevsky, D. Masol // 5th International Conf. on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE – 2015), (Sofia, Bulgaria, November 13–14th 2015). – Sofia, Bulgaria, 2015. – P. 322 – 330.
13. Вишневський В.В. Еволюція технологічного задуму проекту «Медгрід» [Електронний ресурс] / В.В. Вишневський // Научно-практ. конф. «Системы поддержки принятия решений. Теория и практика», СППР'2017, (Київ, 5 июня 2017 г.). – Київ, 2017. – Режим доступу: http://conf.atsukr.org.ua/conf_files/conf_dir_38/Vishnevsky_sppr2017.pdf.

Стаття надійшла до редакції 12.03.2018