

ТВОРЧЕСТВО МОЛОДЫХ

Александр Дмитриевич БЕКМАН —
студент 5 курса факультета
математики и компьютерных наук

УДК 517. 518. 34

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА ФОТОГРАФИИ КЕРНА

АННОТАЦИЯ, Методами кратномасштабного анализа с фотографии керна удалены высокочастотные помехи и систематическое искажение, связанное с неравномерной освещенностью. Вычислена пористость как отношение белых пикселей к их общему числу.

Using multiresolution analyses from a photo of litological sample high-frequently noise and distortion caused by uneven light was deleted. Approximate porosity as the amount of light pixels divided on its total amount was calculated.

При решении практических задач петрофизики исследователи часто сталкиваются с необходимостью автоматической обработки результатов микрофото- и видеосъемки. Особенностью обработки при этом является то, что желаемый результат представляет собой контрастную двухцветную карту, характеризующую присутствие на снимке двух фаз с различными свойствами. Так, например, на микрофотоснимке керна, насыщенного некоторым флюидом (например нефтью), существует необходимость выделить контрастными цветами области, относящиеся к скелету породы и к флюиду. Это делает возможным дальнейшее исследование снимка, например, позволяет вычислить просвет и, следовательно, пористость образца. Исходные данные представляют собой черно-белое изображение, на котором исследователь визуально способен обнаружить скелет по контрастным (хотя и довольно расплывчатым) переходам от более темных оттенков к более светлым. Простейший алгоритм, который можно реализовать в компьютере, состоит в том, чтобы задать некоторое пороговое значение для освещенности пикселей на снимке и провести обработку снимка попиксельно, т. е. окрашивать пиксель в белый цвет, если его освещенность превышает пороговое значение, и в черный — иначе. Однако описанный метод не всегда дает удовлетворительные результаты, т. к. на практике фотографии обязательно в той или иной мере искажены помехами. Эти помехи связаны с неоднородной освещенностью снимков, следовательно, влияет качество осветительных приборов и их положение в пространстве. Возможны блики и прочие эффекты, связанные с несовершенством фотоаппарата. Как следствие, значительные области, занимаемые флюидом, могут быть ошибочно отнесены к скелету и наоборот.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходим метод обработки, позволяющий выделять локальные перепады освещенности на границах флюида и скелета вне зависимости от общего уровня освещенности снимка. При этом требуемый уровень детализации в разных случаях может быть различным, поэтому метод должен позволять регулировать этот уровень. Всеми этими свойствами обладает предложенный ниже метод, в основе которого лежит кратномасштабный вейвлет-анализ (КМА).

Приведем классическое определение:

Определение 1. Кратномасштабным анализом называется последовательность вложенных функциональных пространств

$$\dots \subset V^{-1} \subset V^0 \subset V^1 \subset V^2 \subset \dots \subset L_2(R),$$

удовлетворяющих следующим условиям:

а) $\overline{\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V^j} = L_2(R)$;

б) $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V^j = \{0\}$;

в) $f(x) \in V^j \Leftrightarrow f(2x) \in V^{j+1}$;

г) найдется такая функция $\varphi \in V^0$, которую называют масштабирующей (scaling function), что множество ее сдвигов $\varphi(x-n)$ образует ортонормированный базис пространства V^0 .

Важнейшими для практического применения свойствами КМА являются:

1) Пункт а) гарантирует возможность сколь угодно точной аппроксимации любой функции $f \in L_2(R)$ с помощью функций, принадлежащих пространствам V^j .

2) В каждом пространстве V^j имеется ортонормированный базис, порожденный сдвигами одной функции. Для V^0 это с очевидностью следует из пункта г) определения 1), а с учетом пункта в) можно сделать вывод, что ортонормированный базис пространства V^j образуют функции вида $2^{\frac{j}{2}} \cdot \varphi(2^j \cdot x - n)$ $n \in \mathbb{Z}$. Множитель $2^{\frac{j}{2}}$ необходим для нормировки базисных функций в смысле нормы $L_2(R)$.

3) Из вложения $V^0 \subset V^1$ и предыдущего пункта следует справедливость функционального уравнения

$$\varphi(x) = \sqrt{2} \sum_{n \in \mathbb{Z}} h_n \varphi(2x - n), \quad (1)$$

которое называется масштабирующим. Действительно, т. к. $\varphi(x)$ принадлежит пространству V^1 , то она представима в виде разложения по базисным функциям этого пространства. Масштабирующее уравнение позволяет получить набор коэффициентов (фильтр) $h = \{h_n\}_{n=-1}^{\infty}$. Функциональному уравнению (1) удовлетворяет не единственный набор $(\varphi(x), h = \{h_n\}_{n=-1}^{\infty})$. Существует множество таких наборов, каждый из которых может оказаться более пригодным в своем конкретном случае.

4) Ортогональное дополнение пространства V^0 до V^1 обозначают W^0 и называют пространством всплесков. Можно показать [1], что оно также имеет ортонормированный базис, порожденный сдвигами одной функции $\psi(x)$, причем эта функция может быть определена из уравнения

$$\psi(x) = \sqrt{2} \sum_{n \in \mathbb{Z}} g_n \varphi(2x - n).$$

Функция $\psi(x)$ называется всплеском (wavelet) и является однозначным следствием выбора масштабирующей функции (scaling function) $\varphi \in V^0$, где коэффициенты $g = \{g_n\}_{n=-1}^{\infty}$ вычисляются по формуле $g_n = (-1)^{1-n} \bar{h}_{1-n}$, а черта означает операцию комплексного сопряжения.

5) Аналогично пространству W^0 можно ввести пространство W^j как ортогональное дополнение V^j до V^{j+1} , для любого $j \in \mathbb{Z}$. При этом оказывается, что набор функций $\{2^{\frac{j}{2}} \cdot \psi(2^j \cdot x - n)\}_{n=-1}^{\infty}$ задает ортонормированный базис в пространствах W^j .

6) Ни одно из пространств V^j и W^j не является полным в $L_2(R)$, поэтому разложение функции (сигнала) в метрике $L_2(R)$ по базису какого-либо из этих пространств является лишь проекцией этого сигнала на это пространство. И только некоторое разумное объединение этих проекций гарантирует возможность сколь угодно точной аппроксимации любого сигнала $f \in L_2(R)$ с помощью функций, принадлежащих пространствам V^j . Существуют быстродействующие алгоритмы получения коэффициентов сигнала в пространствах V^{j-1} и W^{j-1} по его коэффициентам в V^j . Другими

словами, данные алгоритмы позволяют получить из проекции сигнала на пространство V^j его более «низкочастотную» составляющую, т. е. проекцию на V^{j-1} , а также «высокочастотный остаток» (всплески), принадлежащий W^{j-1} . Существуют и обратные алгоритмы, позволяющие по проекциям сигнала на V^{j-1} и W^{j-1} восстановить исходный вид сигнала в пространстве V^j , но в данной работе они не приводятся, хотя и используются в расчетах.

Упомянутые алгоритмы привлекательны для реализации на ЭВМ своим быстрым действием, т. к. не содержат операций интегрирования, которые необходимы в метрике $L_2(R)$ для получения разложения сигнала по некоторому базису. В основе алгоритмов преобразования лежат свертки с фильтрами g и h . Пусть проекция исследуемого сигнала на некоторое пространство V^j с достаточно высоким номером известна и задается формулой

$$f_j = \sum_{n \in Z} c_n^j \cdot \varphi_n^j(x),$$

где $\varphi_n^j(x) = 2^{\frac{j}{2}} \cdot \varphi(2^j \cdot x - n)$,

то наборы коэффициентов, определяющие разложения f_j в пространствах V^{j-1} и W^{j-1} , задаются свертками [1],[2]:

$$c_k^{j-1} = \sum_{n \in Z} c_n^j \cdot \bar{h}_{n-2k}, \quad d_k^{j-1} = \sum_{n \in Z} c_n^j \cdot \bar{g}_{n-2k}, \quad (2)$$

а соответствующие проекции $f_{j-1} \in V^{j-1}$ и $\Phi_{j-1} \in W^{j-1}$ — формулами:

$$f_{j-1} = \sum_{n \in Z} c_n^{j-1} \cdot \varphi_n^{j-1}(x), \quad \Phi_{j-1} = \sum_{n \in Z} d_n^{j-1} \cdot \psi_n^{j-1}(x), \quad (3)$$

Заметим, что исходное разложение должно быть известным и достаточно хорошо приближающим начальный сигнал, следовательно, на его получение должны быть потрачены некоторые усилия. Сигнал в рассматриваемой задаче (цифровая фотография), не является функцией из $L_2(R)$, а задается таблицей чисел, характеризующих освещенность массива пикселей. Однако данные можно рассматривать как набор коэффициентов, задающих проекцию некоторой функции из $L_2(R \times R)$ на пространство V^0 некоторого КМА $L_2(R \times R)$. Выбор базиса, порождающего данное пространство, в практических задачах является весьма трудным и определяется, как правило, свойствами сигнала и требуемого результата. В описываемой задаче наиболее приемлемым представляется простейший базис, известный как базис Хаара. Поясним основные идеи предлагаемого метода для одномерного случая (т. е. для исследования функции $f(x)$), особенности связанные с исследованием функций двух переменных оговорим позже.

Полный в $L_2(R)$ базис может быть получен объединением всех базисов пространств всплесков. Так, и базис Хаара является суммой базисов пространств всплесков, порожденных КМА, определяемым конкретной масштабирующей функцией

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0,1) \\ 0 & x \in [0,1). \end{cases}$$

Посредством всех целочисленных сдвигов эта конкретная масштабирующая функция (ступенька) $\varphi(x)$ образует ортонормированный набор функций вида $\varphi(x-n)$ $n \in Z$. Если его взять за базис и на его основе построить функциональное пространство V^0 , то нетрудно видеть, что оно будет состоять из всех кусочно-постоянных функций с возможными скачками в целочисленных точках.

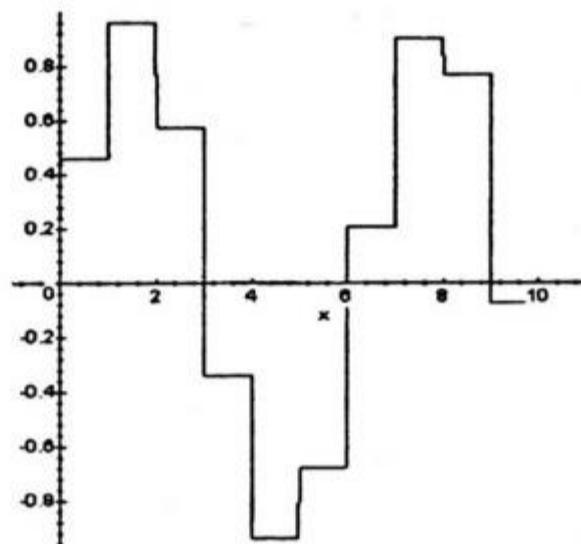


Рис. 1. Ступенчатый сигнал

Решая масштабирующее уравнение, получим фильтры h и g :

$$h_n = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & n \in \{0,1\} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad g_n = \begin{cases} -1/\sqrt{2}, & n = 0 \\ 1/\sqrt{2}, & n = 1 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (4)$$

которые позволяют по формулам (1)–(4) получить разложение сигнала (рис. 1) на его «низкочастотную» (проекция на V^{-1}) и «высокочастотную» (проекция на пространство всплесков W^{-1}) составляющие.

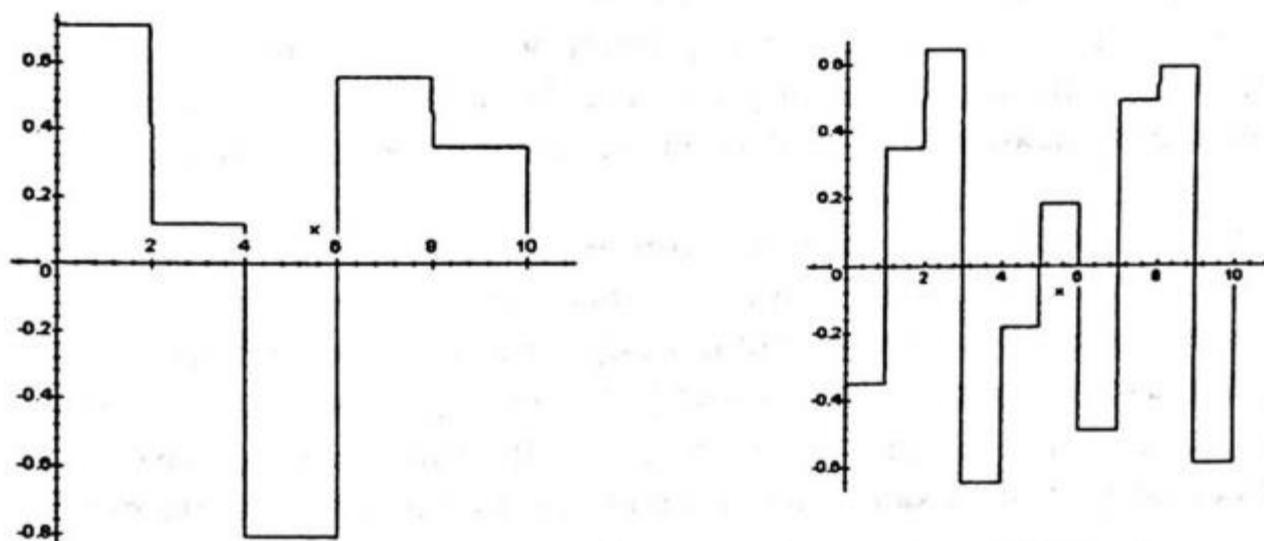


Рис. 2. Низкочастотная и высокочастотная составляющие сигнала

Всплеск-функция, соответствующая ступеньке и порождающая полный в $L_2(\mathbb{R})$ базис Хаара (набор функций $\{2^{j/2} \cdot \psi(2^j \cdot x - n)\}_{n=1}^{\infty}$, $j \in \mathbb{Z}$), определяется формулой

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0, 1/2) \\ -1, & x \in [1/2, 1) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}.$$

Так как носители базисных функций в пространствах W^{-1} и V^{-1} в 2 раза шире, чем в V^0 , то для хранения коэффициентов проекций сигнала на эти два пространства требуется ровно столько же памяти, сколько и для хранения исходного сигнала, за-

данного в пространстве V^0 , что важно для практики. Аналогичным образом раскладывается и полученная проекция сигнала в пространстве V^{-1} на два сигнала в пространствах W^{-2} и V^{-2} . Этот процесс можно продолжать и далее, получая все более низкочастотные составляющие исходного сигнала и их отщепившиеся части в пространствах всплесков W .

Пользуясь вышеизложенными свойствами КМА, можно предложить следующую схему решения поставленной задачи в одномерном случае:

1) Считаем, что исходный сигнал задан в пространстве V^0 . Разлагаем его на составляющие в W^{-1} и V^{-1} , затем составляющую V^{-1} снова разлагаем в пространствах W^{-2} и V^{-2} и т. д. до нужного уровня V^j , определяемого эмпирически. Этот процесс разложения известен как алгоритм Малла [1,2].

2) Обнуляем все коэффициенты, задающие проекцию на V^j , тем самым мы избавляемся от «низкочастотной» медленно меняющейся составляющей сигнала (в задаче обработки фотографии она как раз и порождается неравномерно распределенной освещенностью картинки).

3) «Срезаем шум», т. е. обнуляем в пространствах всплесков W^{-1}, \dots, W^j все коэффициенты, значения которых не превосходят некоторого эмпирически подбираемого значения. Тем самым мы избавляемся от случайных пятен, для которых перепады освещенности не велики, и оставляем только резкие перепады освещенности.

4) Восстанавливаем исходный сигнал, используя уже обработанные проекции.

5) Сортируем полученные значения сигнала, относя к скелету точки с положительными значениями и к флюиду — с отрицательными.

6) Находим отношение количества отрицательных точек к общему количеству пикселей, вычисляя тем самым просветленность для данного ядра, которую затем можно пересчитать в коэффициент пористости.

Описанный метод легко распространяется на случай двумерного сигнала, что позволяет решить исходную задачу анализа фотографии. Ниже изложены некоторые общие (не зависящие от выбора базиса) особенности обработки двумерного сигнала.

В качестве масштабирующей функции можно использовать функцию вида

$$\Phi(x, y) = \varphi(x) \cdot \varphi(y),$$

где φ — некоторая одномерная масштабирующая функция, одинаковая для каждой координатной оси. Тогда пространство V_j будет порождаться базисом $\{2^j \Phi(2^j x - k, 2^j y - n)\}$, где k, n — целые числа. В отличие от одномерного случая в случае двух измерений на каждом шаге разложения будет возникать три пространства всплесков. Первое, W_{LH}^j , порождается базисом $\{2^j \Psi_{LH}(2^j x - k, 2^j y - n)\}$, где $\Psi_{LH}(x, y) = \varphi(x) \cdot \psi(y)$, а $\psi(y)$ — вейвлет, соответствующий функции $\varphi(x)$. Проекция на W_{LH}^j сигнала, заданного в пространстве V_{j+1} , получается сверткой сигнала с фильтром $h_x \otimes g_y$ (т. е. к столбцам сигнала сперва применяется фильтр g , затем к строкам полученного результата применяют фильтр h). Проекция сигнала на пространство W_{LH}^j будет характеризовать его перепады в направлении y . Второе пространство всплесков, W_{HL}^j , порождается базисом $\{2^j \Psi_{HL}(2^j x - k, 2^j y - n)\}$, где $\Psi_{HL}(x, y) = \psi(x) \cdot \varphi(y)$, соответствующий ему фильтр — $g_x \otimes h_y$, а проекция на W_{HL}^j будет характеризовать перепады сигнала в направлении x . Третьему пространству, W_{HH}^j , соответствуют базис $\{2^j \Psi_{HH}(2^j x - k, 2^j y - n)\}$, порожденный сдвигами функции $\Psi_{HH}(x, y) = \psi(x) \cdot \psi(y)$, и фильтр $g_x \otimes g_y$; элементы проекции сигнала на это пространство можно воспринимать как величину перепадов сигнала в диагональном направлении.

Ниже приведены результаты обработки сигнала предлагаемым методом.

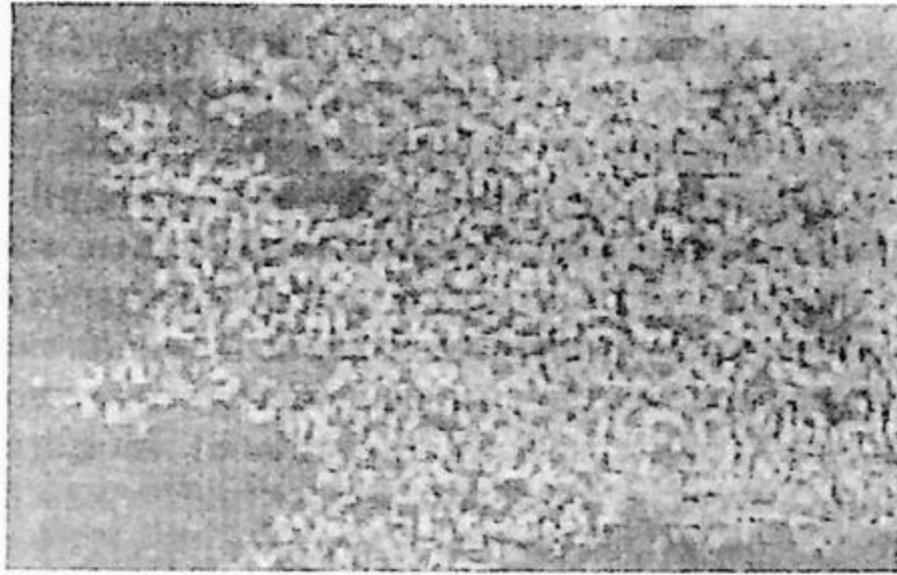


Рис. 3. Исходная фотография

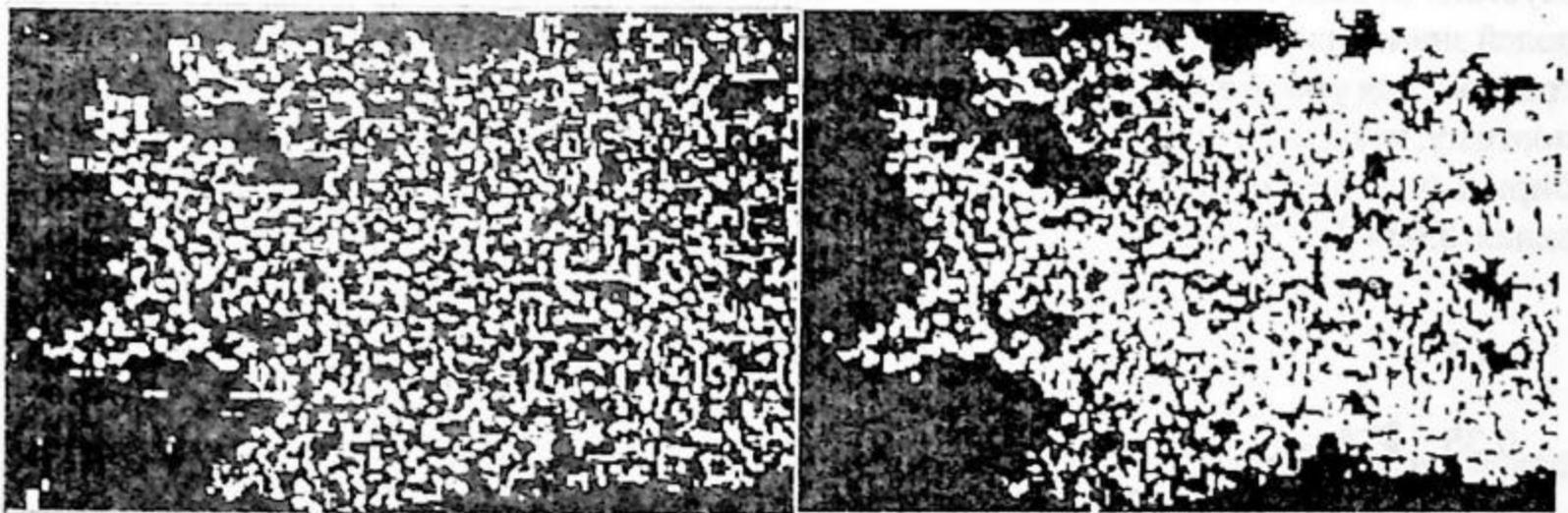


Рис. 4. Обработка с помощью техники вейвлетов (слева) и методом простой сортировки (справа)

Отчетливо видно, что вследствие неоднородной освещенности исходной картинки при простой сортировке большие области, занимаемые в действительности скелетом, отнесены к флюиду (правый верхний угол). Метод кратномасштабного анализа фотографии позволил правильно отобразить и эту область.

При обработке изображения предложенным методом два параметра подбираются эмпирически. Первым является параметр j , определяющий глубину проработки сигнала (пункт 1) и, тем самым, определяющий момент, начиная с которого отбрасывается низкочастотная составляющая. Вторым параметр определяет минимальную величину коэффициентов разложений в пространствах всплесков, которые не следует занулять. Этим определяется чувствительность метода к высокочастотной составляющей (задается пороговая величина срезаемого шума — пункт 3). Очевидно (и это подтверждается практикой), что эти величины различны для различных сигналов, а неудачный выбор параметров искажает сигнал. Универсального критерия, определяющего однозначно эти параметры по исходному сигналу, найти пока не удалось. Тем не менее на практике выбор параметров может производиться заранее из некоторых априорных сведений. Например, если известно, что диаметр поровых отверстий на фотографии не превышает 16 пикселей, то очевидно из особенностей метода, что глубина проработки сигнала $j=3$ достаточна, т. к. учет более глубоких проекций может привести только к появлению клеток со стороной более 15 пикселей, что заведомо неверно.

Рассмотрим пример возможного критерия для уровня срезаемого шума в задаче, описанной в начале статьи, для случая, когда по результатам обработки снимка оценивается «пористость» — отношение белых точек к их общему числу. Критерий может быть использован в случае, когда каждый из полученных наборов коэффициентов, задающих проекции сигнала на пространства всплесков, обладает следую-

щим свойством: можно указать два интервала $[0, a]$ и $[b, M]$ (где M — максимальный коэффициент), в которых содержатся все коэффициенты кроме «сравнительно малого» их числа. Степень «малости» может выбираться из различных соображений практики. Если интервал (a, b) имеет «достаточно большую» длину (также выбираемую из практических соображений), то представляется разумным посчитать, что коэффициенты из интервала $[0, a]$ являются шумом, а коэффициенты из $[b, M]$ — полезным сигналом. Таким образом, уровень шума выбирается для данной всплеск-проекции из интервала (a, b) произвольно: различные значения из этого интервала будут мало изменять пористость, так как интервал содержит малое количество коэффициентов. Попытка авторов применить этот критерий на практике отражена на приведенных ниже графиках, которые представляют собой результат численного эксперимента.

В эксперименте были получены значения «пористости» при различных уровнях глубины обработки фотографии в зависимости от порога шума, который задавался долей значения максимального всплеска для каждой всплеск-проекции. Как видно из графика для уровня 4, «пористость» менялась незначительно на интервале $[0, 2, 0, 3]$, поэтому, исходя из описанного критерия, пороговый уровень шума необходимо выбирать из этого интервала, а, следовательно, «пористость» будет находиться в пределах 33-34%.

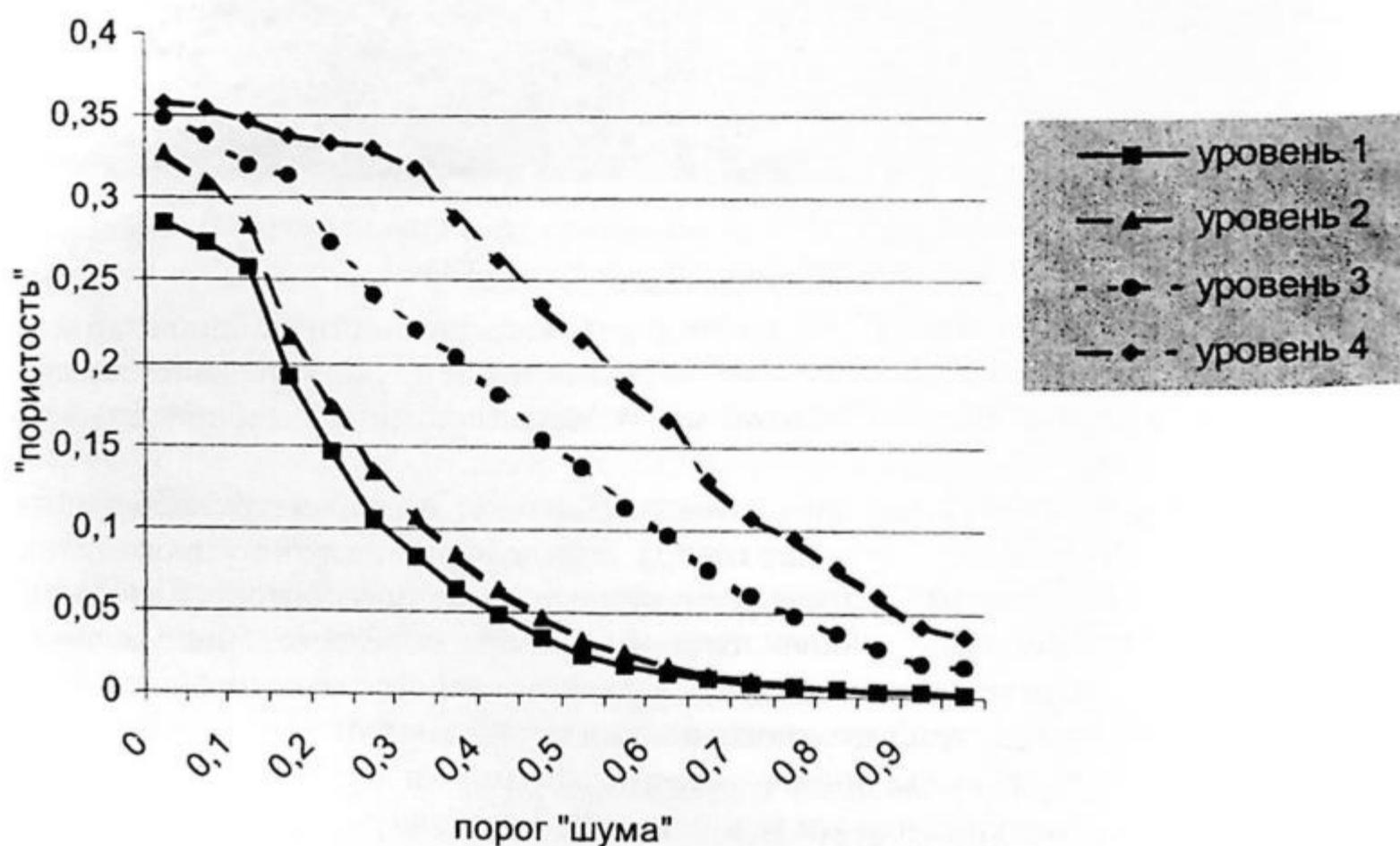


Рис. 5. Зависимость «пористости» от уровня срезаемого «шума»

Таким образом, хотя описанный метод уже позволяет получать удовлетворительные результаты, для его полноценного применения на практике, необходимо изобретение своих критериев выбора параметров для каждой задачи. Разработка таких критериев даст возможность получать приемлемые результаты без участия человека. Впрочем, тот факт, что метод позволяет эксперту влиять на ход обработки, в некоторых случаях может быть расценен как преимущество метода.

В заключение заметим, что описанный в пунктах 1)–6) метод обработки растровых изображений, благодаря особенностям базиса Хаара, может быть при необходимости модифицирован. Например, возможна обработка изображения на какой-то части фотографии отдельно от остального изображения. Это позволяет использовать различные параметры обработки в разных частях фотографии. Кроме того, можно

заранее повысить контрастность отдельных участков фотографии, что в конечном итоге отразится на качестве результата.

Таким образом, хотя описанный метод уже позволяет получать удовлетворительные результаты, для его полноценного применения на практике необходимо усовершенствовать его таким образом, чтобы он мог давать приемлемый результат без участия человека.

Научный руководитель — проф. В. Н. Кутрунов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск, 2001. 464 с.
2. Петухов А. П. Введение в теорию базисов всплесков. СПб., 1999. 132 с.
3. Левкович-Маслюк Л., Переберин А. Введение в вейвлет-анализ. www.graphicon.ru/1998/cd/tutorial/leo_lev/lecture1/

*Андрей Викторович ЛИФАНОВ —
студент 4 курса факультета
математики и компьютерных наук*

УДК 658.012.011.56: 622.32

АВТОМАТИЗАЦИЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ

АННОТАЦИЯ. В работе описан программный модуль Мнемосхема групповой замерной установки, являющийся составной частью программного комплекса автоматизации добычи нефти.

The author describes a program module, called the mnemonic diagram of gagging group unit, which is the compound part of software application of oil production automation.

Добыча нефти — сложный, многоступенчатый процесс. Он включает подъем нефти из недр, отделение попутного газа, обезвоживание и др. Нефть добывают из скважин — специально пробуренных отверстий, глубина которых может достигать нескольких километров. В зависимости от различных факторов, для этого используются различные насосы. В 95 % случаев это ЭЦН (электроцентробежный насос). Далее нефть поступает на автоматизированную групповую замерную установку (ГЗУ), где выборочно происходит замер дебита по жидкости и по газу, а затем нефть передается на объекты предварительной обработки нефти: ДНС, ЦППН, РВС, УПСВ и др.

Состояние нефтяных скважин при эксплуатации установками ЭЦН отслеживается станциями управления, которые обеспечивают включение и выключение установки, самозапуск после появления исчезнувшего напряжения и аварийное отключение (перегрузки, короткое замыкание, колебания давления, отсутствие притока в насос и др.). Режим работ электродвигателя контролируется амперметром, находящимся на станции управления. Для того чтобы снять показания прибора, необходимо регулярно совершать объезд фонда (нефтяных объектов), которые могут быть удалены на многие километры друг от друга. При этом адресность объезда недостаточно точна, т. к. существующие технические средства, выведенные на систему телеметрии, не дают достаточно аналитического материала, а информация, полученная ручными замерами, сопряжена с высокими транспортными расходами и людскими затратами, что, в свою очередь, сказывается на себестоимости продукции. Это и обуславливает необходимость автоматизации добычи нефти.

Система автоматизация добычи нефти в целом строится по трехуровневому иерархическому принципу. Система функционирует в непрерывном круглосуточном режиме реального времени.