

АДАПТИВНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ВИДЕ ВИРТУАЛЬНОГО НОСИТЕЛЯ ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ (ВНЦД)

М. В. Харинов

Санкт–Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
199178, Санкт–Петербург, 14 линия В.О., д. 39
<khar@iias.spb.su>

УДК 681.3

М. В. Харинов. **Адаптивное представление изображения в виде виртуального носителя цифровых данных (ВНЦД)** // Труды СПИИРАН. Вып. 2., т. 1. — СПб.: СПИИРАН, 2004.

Аннотация. Изображение описывается суммой инвариантного и произвольного представлений. При этом первое представление (ВНЦД) не зависит от второго представления в определенных для каждой точки пределах произвольного яркостного изменения изображения. Объем данных произвольной компоненты изображения трактуется как детерминированная адаптивная оценка количества информации. Приводятся примеры приложений — Библ. 15 назв.

UDC 681.3

M. V. Kharinov. **Object–fitting image representation as Virtual Carrier of Numeric Data (VCND)** // SPIIRAS Proceedings. Issue. 2, vol. 1. — Spb.: SPIIRAS, 2004.

Abstract. Image is presented as the superposition of invariant and arbitrary representations. In accordance with invariance condition the first representation (VCND) does not depend on the second one in prescribed limits of arbitrary intensity variation for each image pixel. The total volume of arbitrary representation is treated as non–probabilistic adaptive estimation of information amount. Some experiments are described — Bibl. 15 items.

1. Введение

Несмотря на существенный прогресс вычислительной техники в течение последних 10–15 лет, практически любая задача хранения, передачи и анализа изображений оказывается проблематичной, если касается произвольных изображений из заранее не ограниченной предметной области. Обычно программно–алгоритмические решения опираются на заранее известные особенности рассматриваемых изображений, используют многочисленные параметры или обучающие данные и уступают естественному зрительному восприятию, прежде всего, по универсальности. Для моделирования универсального зрительного восприятия и решения задач автоматизации разрабатываются адаптивные методы обработки сигналов [1–4], которые избегают использования не зависящих от изображения параметров, трудоемкого обучения и особенно эффективны в условиях неопределенной предметной области, поскольку опираются на общие свойства изображений и описывают изображение через соотношения его вычисляемых компонент.

Характерным свойством изображения является его избыточность. Избыточность изображения явно выражается повторениями яркостных отсчетов в алгоритмах сегментации, обеспечивающих уменьшение числа сегментов, амплитудных градаций и пр. Сегментация является одной из основных процедур преобразования изображения, которая позволяет улучшить качество зрительного восприятия и упростить автоматическую обработку. Иерархическая сег-

ментация позволяет учесть неоднозначность интерпретации изображения и расширяет возможности обычной за счет аппроксимации изображения представлениями с различным числом повторений отсчетов. Если число повторений отсчетов в иерархии представлений изменяется, по крайней мере, в геометрической прогрессии, то иерархическая сегментация считается компактной. Компактная сегментация содержит ограниченное число представлений изображения, что позволяет оптимизировать вычисления. Если сегментация изображения не задается заранее, а определяется некоторым алгоритмом слияния пикселей (минимальных клеточных полей) изображения, либо обратной процедурой разделения исходного изображения на части, то сегментация считается адаптивной. Применение компактной иерархической адаптивной сегментации оправдывается тем, что она позволяет адаптировать обработку изображения к предметной области и условиям задачи.

Классической задачей обработки сигналов, в частности — изображений, и предметом исследований ряда монографий СПИИРАН является изучение понятия информации, а также ее количественной оценки [5–9]. В настоящей работе предлагается детерминированная адаптивная (не вероятностная) оценка количества информации, которая в классификации [6] может характеризоваться как «мера произвольности» изменений изображения при условии сохранения его контекста. Оценка строится на основе компактной иерархической адаптивной сегментации и обосновывается возможностью буквального применения в задачах встраивания в изображение произвольных цифровых данных [10–12].

Изображение рассматривается как виртуальный носитель цифровых данных (ВНЦД) с некоторой информацией «сообщения», которая «записана» с сохранением контекста изображения и извлекается при «чтении» сообщения. Адаптивная детерминированная оценка количества информации (естественной, встроенной, шумовой и пр.) сводится к вычислению объема произвольно изменяемых цифровых данных при неизменном результате сегментации изображения по определенному алгоритму, описывающему сохранение контекста. При этом сегментированное изображение содержит информацию исходного в стилизованном виде, а исходное изображение за вычетом сегментированного содержит оцениваемую дополнительную информацию сообщения (рис. 1).

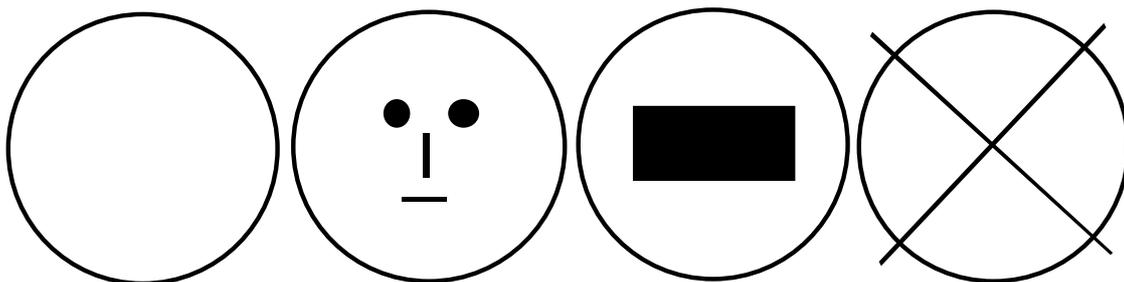


Рис. 1. Адаптивная детерминированная оценка количества информации изображения (геометрическая интерпретация)

Рис. 1 на примере четырех изображений схематично поясняет идею адаптивной детерминированной оценки количества информации сигнала.

Пусть для простоты рассуждений алгоритм сегментации сводится к стиранию всех объектов, кроме самого протяженного. Тогда неизменным результатом сегментации первых трех изображений слева является окружность (крайнее изображение слева на рис. 1). Количество бит адаптивной оценки информации для любого из трех рассматриваемых изображений совпадает с оценкой площади изображения по числу пикселей, не принадлежащих окружности. Для

сравнения справа приведено изображение, выполненное с нарушением геометрии допустимых яркостных изменений. Результат сегментации крайнего правого изображения рис. 1 отличается от окружности, и адаптивная оценка количества информации имеет меньшую величину, поскольку производится относительно более сложного стилизованного представления.

Адаптивная оценка количества информации поясняется рис. 1 на упрощенном примере графического изображения, для которого возможные диапазоны яркости ограничены тремя вариантами $[0, 0]$, $[0, 1]$, $[1, 1]$, а число произвольно изменяемых бит, в зависимости от координат, сводится к двум значениям 0 и 1. В случае полутонового изображения число бит с произвольной информацией, вообще говоря, превосходит 1 и описывается нетривиальным образом.

Для адаптивной оценки количества информации полутонового изображения допустимые диапазоны произвольных амплитудных изменений и число бит для встраивания цифровых данных устанавливаются из соображений инвариантности сегментированного представления изображения, которое независимо от встраивания данных воспроизводится в заданном алгоритме сегментации. Если в качестве исходного изображения используется предварительно сегментированный сигнал (крайнее левое изображение на рис. 1), то при чтении сообщения воспроизводится как сообщение, так и изображение. При этом, достигается точное разделение изображения и сообщения, но без промежуточного частичного сжатия информации и сопутствующих ограничений [10–11] на объем сообщения.

Таким образом, благодаря тому, что при неизменном сегментированном представлении яркость каждого пиксела в определенном, зависящем от координат диапазоне может изменяться произвольно, изображение представляется в виде сообщения, записанного на виртуальный носитель цифровых данных (ВНЦД). ВНЦД рассматривается в виде некоторой среды существования информации, подобной ячейкам памяти, ленте, диску с изменяющимся от ячейки к ячейке, вообще говоря, не целым числом бит. Подобно обычному диску виртуальный носитель может быть «размечен» с различной емкостью. Ненулевые диапазоны произвольного изменения яркости, в зависимости от координат, определяют емкость или количество информации значащих пикселей изображения, а измеренная в битах или байтах сумма указанных диапазонов дает зависящую от контекста оценку количества информации или емкости изображения в целом. Компактная иерархическая сегментация изображения позволяет построить иерархию ВНЦД и порождает последовательность адаптивных детерминированных оценок количества информации, что позволяет в момент применения выбрать подходящую оценку или последовательность оценок в зависимости от условий конкретной задачи.

2. Иерархия виртуальных носителей цифровых данных (ВНЦД)

Пример получения иерархии ВНЦД сводится к следующему.

Построим последовательность аппроксимаций сигнала изображения сверху и снизу итеративным приближением по яркости (рис. 2).

Для каждой итерации установим пределы изменения изображения, при которых произвольное изменение яркости в определенном диапазоне влияет только на последующую итеративную аппроксимацию (пунктир на рис. 2) и не

влияет на аппроксимацию изображения на текущей и предыдущих итерациях. Тогда на текущей итерации аппроксимация изображения сверху и снизу определит искомым виртуальный носитель цифровых данных (ВНЦД).

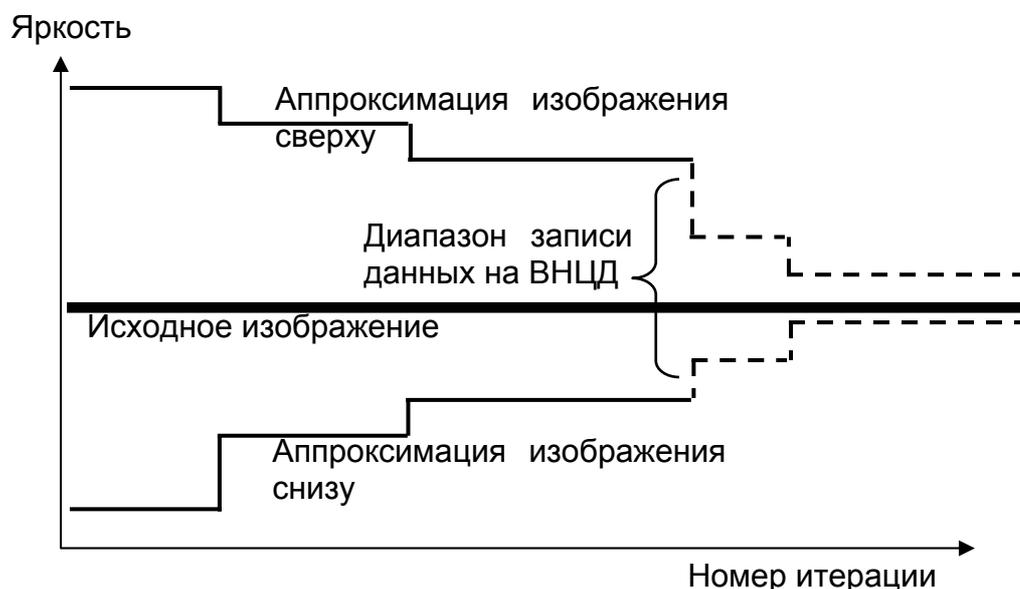


Рис. 2. Последовательность аппроксимаций изображения в точке снизу и сверху

Результат построения иерархии виртуальных носителей цифровых данных на примере обработки в качестве контейнера стандартного изображения «Лена» иллюстрируется рис. 3.

Первая и третья колонка рис. 3 иллюстрируют итеративную аппроксимацию изображения снизу и сверху, построенную в алгоритмах компактной иерархической сегментации. Под ВНЦД в упрощенном виде понимается любая из двух или некоторая промежуточная аппроксимация сигнала, а лучше — их сочетание.

Во второй колонке на рис. 3 показан виртуальный носитель цифровых данных (ВНЦД) с записанным сообщением из одинаковых символов, который аналогичен диску, размеченному для записи цифровых данных с возможными пропусками. Возможность пропуска записи данных предусматривается для оптимизации встраивания информации и достигается за счет того, что один-два записываемых на ВНЦД (служебных) числовых значения резервируются для обозначения отсутствия сообщения. Жирным шрифтом над изображениями второй колонки для данной итерации указана оценка полной емкости ВНЦД в байтах, определяемой объемом данных, которые можно встроить в изображение, не нарушая ВНЦД. При этом на рис. 3 указана интервальная оценка емкости. Верхняя — теоретическая граница емкости вычислена для записи данных сообщения в полные яркостные диапазоны, содержащие нецелое число бит. Нижняя оценка отражает объем реальных произвольных данных, записываемых в целое число бит емкости ВНЦД. Интервальная оценка емкости выполнена для избыточной записи данных без дублирования в пределах сегментов. Повторение данных в пределах сегментов уменьшает емкость, но способствует восстановлению сообщения при повреждении в процессе передачи.



Рис. 3. Построение ВНЦД и оценка емкости для изображения.
 Первая колонка — приближения изображения снизу, вторая колонка — виртуальный носитель, размеченный служебными символами; третья колонка — приближения сверху; четвертая колонка — представление емкости ВНЦД

В последней, четвертой колонке приведены представления емкости ВНЦД, показывающие для каждой точки величину диапазона возможных значений амплитуды. Яркости визуальных картин нормализованы на весь амплитудный диапазон. Под каждой картиной в фигурных скобках выписаны амплитудные градации исходного представления. Перечисленные амплитуды соответствуют эквидистантной последовательности яркостей картины.

3. Детерминированная адаптивная оценка количества информации

Алгоритм комбинированного чтения/записи данных за счет изменения яркости в данной точке сигнала состоит в следующем.

Верхняя и нижняя граница допустимого изменения яркости вычисляются для данной итерации адаптивной сегментации и зависят от сигнала и рассматриваемой точки. Изменение яркости считается допустимым, если не влияет на вычисление границ изменения яркости. По границам допустимого изменения яркости для искомым данным вычисляется начало отсчета и диапазон чтения/записи сообщения. Вслед за вычислением начала отсчета выполняется считывание ранее записанных (или случайных) данных и вместо них встраиваются данные текущего сообщения.

Рассмотрим виртуальный носитель цифровых данных (ВНЦД) как результат преобразования $Pu\{x\}$ яркости изображения $u\{x\}$ в каждой точке x на фиксированной итерации адаптивной сегментации.

Пусть изображения $u\{x\}$ отличается от сегментированного представления $Pu\{x\}$ в пределах допустимых изменений яркости $[m\{x\}, M\{x\}]$ на величину $\delta\{x\}$

$$u\{x\} = Pu\{x\} + \delta\{x\} \quad m\{x\} \leq u\{x\} \leq M\{x\},$$

где $m\{x\}, M\{x\}$ — нижняя и верхняя границы изменения яркости изображения.

Пусть результат сегментации $Pu\{x\}$ произвольного изображения при повторном вычислении остается неизменным

$$P(Pu\{x\}) \equiv P^2 u\{x\} = Pu\{x\}.$$

В этом случае преобразование $Pu\{x\}$ называется проективным.

Для кодирования сообщения посредством изменения амплитуды $\delta\{x\}$ получаем

$$P(Pu\{x\} + \delta\{x\}) = Pu\{x\} \quad m\{x\} \leq Pu\{x\} + \delta\{x\} \leq M\{x\}.$$

Здесь $Pu\{x\} + \delta\{x\}$ описывает изображение со встроенным сообщением, для которого сообщение $\delta\{x\}$ оказывается известным благодаря вычислению $Pu\{x\}$ по установленному алгоритму сегментации.

Емкость или количество информации $I\{x\}$ отсчета изображения оценивается как число модифицируемых бит (крайняя правая колонка представлений изображения на рис. 3), а количество информации I изображения в целом вычисляется, как сумма емкостей отсчетов изображения

$$I\{x\} = \log_2 \{ 1 + M\{x\} - m\{x\} \}, \quad I = \sum_x I\{x\}.$$

По крайней мере, для задач обратимого встраивания данных [10–11] выписанные формулы представляются более прозрачными, чем классические оценки количества информации [13–15], однако, применение предлагаемой не вероятностной адаптивной количественной оценки опирается на новое понятие виртуального носителя цифровых данных (ВНЦД), которое подлежит уточнению и экспериментальному изучению в задачах, связанных с моделированием естественного восприятия и автоматической обработкой информации.

Проективные представления изображения могут строиться различным образом, причем вне условия метрической близости, но с сохранением и улучшением качества изображения. Замещение исходного изображения тем или иным проективным представлением влияет как на зрительное восприятие, так и на последовательность оценок емкости (рис. 4–5).

Рис.4 демонстрирует пример проективного представления цветového изображения.

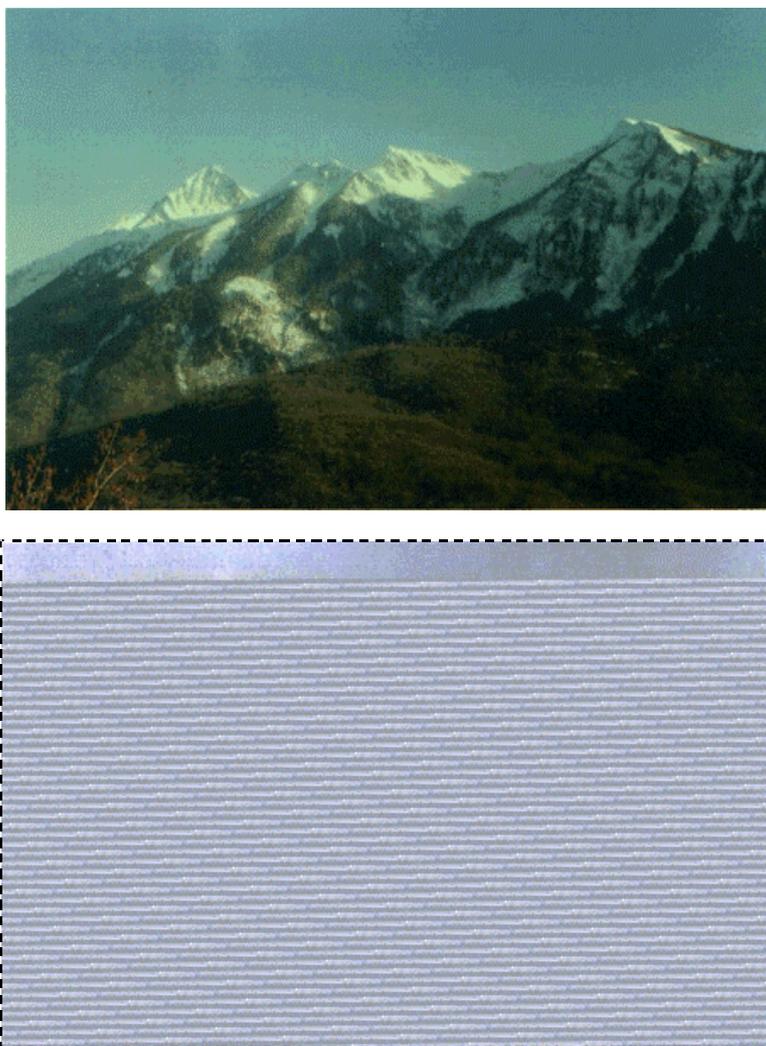


Рис. 4. Оптимизация изображения посредством замещения проективным представлением. Вверху — исходное цветное изображение. Внизу — проективное представление, построенное с использованием всего рабочего диапазона яркости

На рис. 4 внизу показано проективное представление, которое построено с использованием всего рабочего диапазона яркости по каждой цветовой компоненте. Для подобных представлений полутоновых и цветových изображений характерно, что они превосходят исходные изображения по качеству зрительного восприятия за счет оптимизации распределения яркостей в рабочем диапазоне и усиления резкости. Характерно также, что помимо улучшения качества наглядного восприятия при замещении изображения проективным представлением достигается некоторое увеличение емкости (рис. 5).

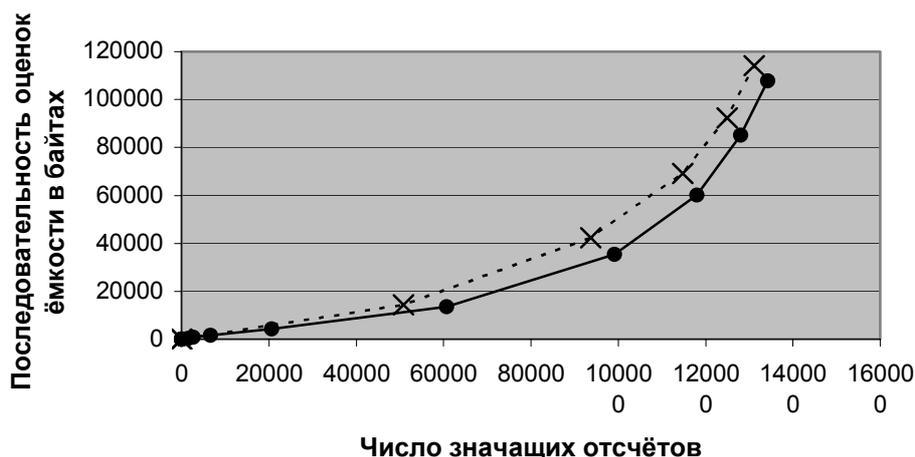


Рис. 5. Последовательность адаптивных оценок емкости в зависимости от числа значащих отсчетов для изображения (сплошная линия) и проективного представления (пунктир). Оценки емкости выполнены по R-компоненте

Рис. 5 иллюстрирует увеличение емкости изображения при его замещении проективным представлением (рис. 4). Для изображения и проективного представления приведены графики адаптивной оценки емкости I в зависимости от числа значащих отсчетов с ненулевой емкостью $I\{x\} \neq 0$. Поскольку графики для R, G, B – компонент практически сливаются между собой, зависимости показаны для одной цветовой компоненты. Графики оценок для остальных компонент опущены, чтобы не загромождать рисунок.

Оценка количества информации в каждой точке изображения позволяет выделить его основное содержание (контекст) и заодно добиться сжатия по объему.

Рис. 6 демонстрирует результат выделения контекста, выполненного посредством детектирования информативных зон распределения значащих пикселей. Подобные алгоритмы составляют альтернативу традиционным пороговым преобразованиям изображения по яркости, которые применяются для выделения объектов. По вычислительным затратам детектирование информативных зон изображения сравнимо с пороговыми преобразованиями и при современном аппаратном обеспечении может применяться в реальном времени для потока изображений, например, для кадров телевизионной или ультразвуковой съемки.

4. Заключение

Как показывают эксперименты, детерминированная адаптивная оценка количества информации и ее интерпретация посредством виртуального носителя цифровых данных (ВНЦД) применима в стандартных задачах встраивания данных, улучшения качества изображений, выделения и распознавания объектов, текстурного анализа, упаковки и сжатия изображений, а также оказывается полезной для имитации стереоэффекта, подавления произвольных шумов, классификации изображений неопределенной структуры и др.

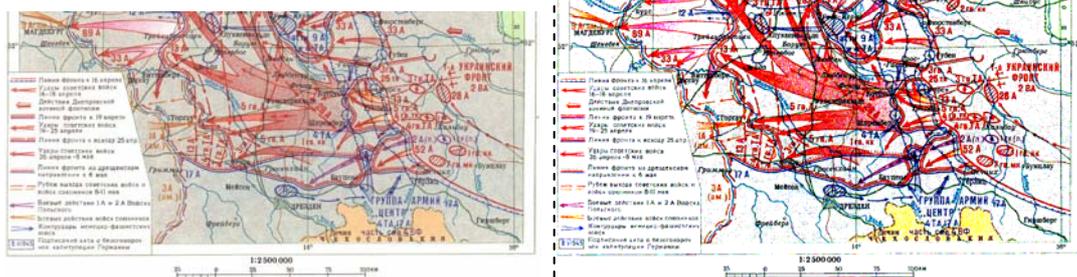


Рис. 6. Результат выделения контекста изображения.

Слева — изображение карты боевых действий размером 1204×1843.

Справа — результат автоматического выделения и упаковки обозначений диспозиции войск в 1 бит каждой цветовой компоненты (сжатие в 8 раз)

В некоторых задачах алгоритмы обработки изображений оказываются непосредственно применимыми к аудиосигналам, которые обрабатываются как одномерное изображение.

В настоящей работе изложена общая идея детерминированной адаптивной оценки количества информации изображений (аудиосигналов), которая разработана при решении задач моделирования зрительного восприятия и автоматизации распознавания изображений. Программно–алгоритмическая реализация опирается на формализм компактной иерархической адаптивной сегментации изображений, который включает:

- структуру данных «динамических» деревьев, поддерживающую иерархическую адаптивную сегментацию изображения [1];
- «псевдотроичную» систему счисления [2, 4];
- аппарат синтеза инвариантных проективных представлений изображения [3–4].

При этом общие приемы сегментации изображений отражают способность человека при «чтении» информации игнорировать несущественные детали. Эквивалентная небинарной логике «псевдотроичная» система счисления в алгоритмах разделения множеств отсчетов предусматривает нейтральное решение в случае равноправных альтернатив и отражает способность человека безошибочно представлять и описывать результаты анализа информации «на пальцах». Аппарат синтеза инвариантных проективных представлений в условиях неопределенной предметной области обеспечивает использование изображения как виртуального носителя цифровых данных, поддерживает обратимое встраивание сообщения и способствует моделированию универсальности зрительного восприятия.

Разумеется, предлагаемая детерминированная адаптивная оценка количества информации и ее интерпретация требует дальнейшего экспериментального, а также теоретического обоснования. Основным предметом текущих исследований являются результаты экспериментов с элементарными носителями информации (элементами ВНЦД), которыми помимо отдельных отсчетов могут служить множества отсчетов одинаковой яркости, а также множества отсчетов связанных сегментов изображения. Аппарат динамических деревьев позволяет выполнять расчеты с различными элементами ВНЦД в единой программной реализации. Установление характерных закономерностей детерминированной адаптивной количественной оценки информации изображений и аудиосигналов определяет основное направления продолжения работ.

Литература

- [1] *Харинов М. В.* Разработка динамических структур данных системы автоматизированного распознавания изображений: Автореф. дис. канд. техн. наук. / Рук. В. В. Александров. СПб., 1993. 20 с.
- [2] *Kharinov M. V., Nesterov M. M.* Intelligent Program for Automatic Image Recognition based on Compact Object-Fitting Hierarchical Image Representation in Terms of Dynamic Irregular Ramified Trees // *Международ. Академия: Вестн.* СПб.: МАИСУ, 1997. № 12. С 1–35. (Шифр БРАН: I 06481)
- [3] *Levachkine S., Velazquez A., Alexandrov V., Kharinov M.* Semantic Analysis and Recognition of Raster-Scanned Color Cartographic Images // *LNCS. Vol. 2390 Graphics Recognition.* Springer-Verlag, 2002. P. 171–182.
- [4] *Харинов М. В., Горохов В. Л.* Псевдотричная система счисления и анализ изображений // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника.* СПб., 2003. Вып. 2. С. 49–53.
- [5] *Юсупов Р. М., Заболотский В. П.* Научно-методологические основы информатизации. СПб.: Наука, 2000. 455 с.
- [6] *Полонников Р. И.* Феномен информации и информационного взаимодействия. СПб.: Ана-толия, 2001. 190 с.
- [7] *Воробьев В. И.* Математическое обеспечение ЭВМ в науке и производстве. Л.: Машиностроение, 1998. 195 с.
- [8] *Лачинов В. М., Поляков А. О.* Информодинамика или Путь к Миру открытых систем. СПб.: СПбГТУ, 1999. — 432 с.
- [9] *Свиньин С. Ф.* Базисные сплайны в теории отсчетов сигналов. СПб.: Наука, 2003. 118 с.
- [10] *Mehmet U. Celik, Gaurav Sharma, A. Murat Tekalp, Eli Saber.* Reversible Data Hiding // *IEEE Proceed. of the Intern. Conf. on Image Processing (ICIP).* 2002. P. 157–160.
- [11] *Fridrich J., Goljan M., Du R.* Lossless data embedding — new paradigm in digital watermarking // *EURASIP Journ. Appl. Sig. Proc.* 2002. No. 02. P. 185–196.
- [12] *Gorodetsky V. I., Samoilov V. I.* Simulation-Based Exploration of SVD-Based Technique for Hidden Communication by Image Steganography Channel, Proc. of the Second Int. Workshop on Mathematical Methods, Models, and Architectures for ComputerNetwork Security MMM-ACNS, St. Petersburg, Sep. 2003. ISSN: 0302-9743, ISBN: 3-540-40797-9. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. P. 349–359,
- [13] *Шеннон К. Э.* Работы по теории информации и кибернетике / Пер. с англ. М.: Иностран. лит. 1963. 829 с.
- [14] *Колмогоров А. Н.* Теория передачи информации: Сес. АН СССР по науч. пробл. автоматиз. произв. Пленар. заседание. М.: АН СССР, 1957. 15 с.
- [15] *Хартли Р. Л.* Передача информации: Теория информации и ее применения. М., 1959. 350 с.