

МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С ВИРТУАЛЬНОЙ ПАМЯТЬЮ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОТРОИЧНОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ

М. В. ХАРИНОВ[♦]

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

СПИИРАН, 14-я линия ВО, д. 39, Санкт-Петербург, 199178

<khar@iias.spb.su>

УДК 681.3

Харинов М. В. Модель цифрового изображения с виртуальной памятью на основе псевдотроичной системы счисления // Труды СПИИРАН. Вып. 4. — СПб.: Наука, 2007.

Аннотация. В статье развивается модель растрового изображения, в которой атрибутом сигнала считается «виртуальная» цифровая память, подобная памяти компьютера. В дополнение к операции модификации вводится операция фиксирования («прошивания») значений запоминающих элементов виртуальной памяти. Перечисляются используемые в модели представления изображения и поясняется их практический смысл. — Библ. 14 назв.

UDC 681.3

Kharinov M. V. Model of Digital Image Attributed with Virtual Memory Basing on Pseudo-Ternary Number System // SPIIRAS Proceedings. Issue 4. — SPb.: Nauka, 2007.

Abstract. A model of digital image attributed with virtual memory by analogy with computer memory is developed. In addition to operation of storage element reset the fixation (weaving) operation of virtual storage element is defined. The basic model image representations are described and their practical interpretations are discussed. — Bibl. 14 items.

1. Введение

В настоящей статье на принципиальном уровне завершается построение модели сигнала (изображения) с виртуальной памятью, начатое в трудах СПИИРАН [1–3] и продолженное в монографии [4] (по проекту РФФИ 06-07-95007), а также в совместной заявке на изобретение [5], поданной от имени СПИИРАН и компании «Самсунг Электроникс Ко., Лтд.».

В указанном изобретении растровое изображение рассматривается как запоминающая среда и используется как средство или специфическое устройство для кодирования и передачи информации, которая уподобляется передаче сигнала вместе с физическим носителем данных. Элементами сигнала, которые содержат единицы информации, считаются яркости пикселей (элементарные клетки) изображения, рассматриваемые в последовательности вложенных яркостных диапазонов. Последовательности единиц информации образуют коды, вычисляемые для каждого пикселя изображения. В [6] рассматривается предположение, что коды информации изображения содержатся в его *инвариантном* представлении, которое не меняется при стандартных линейных и нелинейных преобразованиях (растяжение, упаковка, эквидистантная нормировка изображения по яркости и др.). Тем самым достигается инвариантность информации относительно предусмотренных преобразований. При известном законе повторения единиц информации по координатам и вложенным диапазонам яркости обеспечивается ее устойчивость к возможным искажениям в процессе

[♦] Исследования, результаты которых представлены в настоящей работе, в 2007 г. поддержаны грантом международного фонда «Научный потенциал» <<http://www.hcfoundation.ru/>>.

хранения и передачи, связанном, например, со сжатием сигнала, возникновением шумов, несанкционированным доступом и пр. воздействиями.

Смысл вышесказанного становится прозрачен, если представить, что единицы информации хранятся в запоминающих элементах виртуальной памяти, ячейки которой сопоставляются пикселям и содержат коды информации изображения подобно тому, как элементы его матричного представления содержат коды значений яркости. Разумеется, для того чтобы аналогия виртуальной и реальной цифровой памяти была правомерной, необходимо уметь заполнять ее ячейки желаемыми последовательностями единиц информации, что можно выполнять по различным алгоритмам, например как в [4–5].

Общей особенностью нашей модели является разделение в виртуальной памяти кодированной информации на две компоненты — наблюдаемую (видимую) и неявную, которая менее заметна. При не разрушающей обработке изображения адаптивной обработке явную информацию оставляют неизменной, а неявную заменяют любой другой, подобно тому как перезаписывают данные в реальной памяти на физическом носителе. Адаптивная обработка выполняется посредством операций чтения кодов явной и неявной информации изображения, а также записи кодов неявной информации некоторого, в простейшем случае [4–5] — двоичного, сообщения в виртуальную память. Виртуальная память в нашей модели получается троичной, т. е. состоящей из запоминающих элементов — тритов со значениями ± 1 и 0. Триты подразделяются на два типа — модифицируемые (read-write), значения которых можно менять при записи сообщения, и фиксированные (read-only), значения которых можно только читать. Полагается, что в модифицируемых тритах содержится неявная информация, а явная информация содержится в фиксированных тритах, которые как бы «прошиты» в виртуальной памяти и не доступны для записи кодов нового сообщения.

Коды неявной информации сообщения, извлекаемые из фиксированных тритов, считаются кодами с неопределенным значением, и считываемое с виртуальной памяти неявное сообщение трактуется как троичное. В настоящей статье рассматривается общий случай троичного сообщения, нейтральные (нулевые) значения тритов которого при записи в виртуальную память кодируют пропуск встраивания бинарного сообщения из ± 1 .

2. Вариант модели сигнала с виртуальной памятью

Идея виртуальной памяти довольно проста и реализуется посредством итеративного разделения шкалы яркости изображения по обобщенному алгоритму дихотомии [4–5] на диапазоны так, чтобы в них попадало примерно равное число яркостей пикселей изображения. При этом если рассматривать яркость изображения данного пикселя, то на каждом шаге к ней приближается одна из границ диапазона, который содержит рассматриваемую яркость.

При каждом разбиении шкалы яркости на диапазоны вычисляются триты очередного разряда. Если яркость данного пикселя изображения при разделении рассматриваемого диапазона оказывается в числе больших яркостей, то соответствующему триту виртуальной памяти приписывается положительное значение, если оказывается в числе меньших — то отрицательное. Для единственной яркости вырожденного (неделимого) диапазона значение трита виртуальной памяти считается нулевым. Формальное изменение значения трита на

* Наглядная схема вычисления виртуальной памяти приведена в [3–4].

противоположное обеспечивается переносом значения яркости пиксела в альтернативный диапазон. К фиксированным относят триты, которые сопоставляются пикселам с яркостями, ограничивающими диапазоны рассматриваемого разбиения шкалы яркости, а остальные триты считаются модифицируемыми. Для фиксирования («прошивания») значения трита в данном разряде виртуальной памяти яркость пиксела замещается одной из граничных яркостей диапазона, который содержит эту яркость.

При видимой простоте описанной схемы ее программная реализация не очевидна, поскольку виртуальная память вычисляется по изображению, а оно меняется при встраивании сообщения. Для компенсации влияния модификации изображения на виртуальную память процесс записи кодов информации сообщения необходимо циклически повторять, и возникает проблема сходимости последовательности получаемых представлений изображения.

Сходимость итеративной записи сообщения понимается в смысле существования строгого предела указанной последовательности, который достигается, когда результирующее представление перестает меняться при записи сообщения: при нарушении сходимости аналогия виртуальной и реальной памяти теряет точный смысл.

Следует иметь в виду, что при использовании алгоритмов [4–5] запись сообщения в старшие разряды виртуальной памяти вызывает эффект проявления сообщения «в негативе» в младших разрядах. Текущая программная реализация обеспечивает подавление указанного эффекта без нарушения сходимости алгоритмов. При этом изменение значения трита виртуальной памяти на противоположное фактически выполняется как составная операция, которая индуцирует модификацию значения яркости во вложенных диапазонах, сопоставляемых тритам последующих разрядов.

Характерные для расчетов в двоичной системе счисления ошибки округления исключаются благодаря использованию псевдотроичной системы [1, 4]. По сравнению с троичной системой псевдотроичная система счисления оказывается также удобнее для кодирования амплитудных значений информации, содержащейся в виртуальной памяти, поскольку указанные значения выражаются меньшими числами.

3. Основные представления изображения

Интерпретация модели изображения с виртуальной памятью существенно упрощается и становится наглядней в предположении, что информация содержится в определенном инвариантном представлении изображения, алгоритм построения которого относится к алгоритмам улучшения качества изображения с выравниванием гистограммы [7] и наиболее подробно описан в [5]. В этом случае матрица записанных в ячейках виртуальной памяти амплитудных значений совпадает с указанным представлением, которое в свою очередь с точностью до изоморфного преобразования совпадает с изображением.

Преобразование изображения в некоторое представление считается *изоморфным* по яркостному порядку, если указанное представление получается из изображения замещением одних значений яркости другими с сохранением между ними прежних соотношений больше/равно/меньше. Результирующее представление называется *изоморфным* представлением информации исходного изображения.

Изоморфное представление информации, хотя и является результатом изоморфного преобразования изображения, но от изоморфных преобразований изображения не зависит, в частности, не меняется при линейном растяжении, упаковке шкалы яркости и др. стандартных линейных и нелинейных преобразованиях, которые могут вызываться, например, затуханием сигнала при передаче изображения. В этом смысле обсуждаемое изоморфное представление считается *инвариантным*.

Важным свойством преобразования изображения в инвариантное представление информации является *идемпотентность*, которая заключается в том, что взятый в качестве исходного изображения результат преобразования не меняется при преобразовании в инвариантное представление, то есть при повторном преобразовании преобразуется сам в себя. Условие идемпотентности обсуждаемого инвариантного представления логически следует из предположения о том, что в нем содержится информация изображения.

Полноцветное (24-битовое) изображение обрабатывается по цветовым компонентам как три полутоновых. Инвариантное изоморфное представление информации задает иерархию представлений изображения в 1, 3, 7, ... градациях яркости*, вычисляемых посредством арифметического преобразования значений яркости его пикселей, и рассчитывается так, что пиксели одинаковой яркости из числа модифицируемых яркостей в каждом представлении с тем или иным числом градаций покрывают приблизительно равные площади [3—5]. Разность яркостей представления в рассматриваемом числе градаций и удвоенных яркостей предыдущего представления определяет значения тритов очередного разряда виртуальной памяти, которые в границах изображения составляют тернарную плоскость инвариантного представления информации изображения. Последовательность указанных *тернарных* плоскостей, кодируемых в псевдотрочичной системе, образует само инвариантное представление информации (рис. 1), подобно тому как последовательность битовых плоскостей значений яркости образует матрицу яркостей пикселей изображения в исходном двоичном представлении.

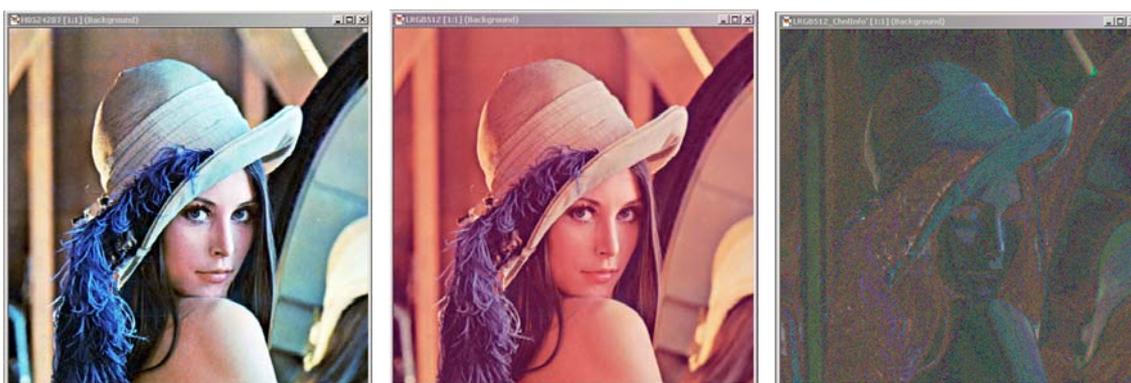


Рис. 1. Инвариантные представления изображения.

В центре — изображение, слева — представление информации (в линейной нормировке**), справа — представление количества информации (в эквидистантной нормировке).

Инвариантное представление информации изображения показано на рис. 1, слева. Характерно, что число тернарных плоскостей (разрядов вирту-

* Количество градаций яркости в общем случае описывается числами Мерсенна [8].

** Линейная нормировка обеспечивает сохранение восприятия представлений изображения в различном числе градаций.

альной памяти) обычно превышает в полтора–два с половиной раза разрядность исходного представления яркостей пикселей изображения.

На рис. 1, справа, показано представление количества информации изображения, амплитудные значения которого указывают для каждого пиксела число модифицируемых тритов виртуальной памяти, которое в отдельных пикселах превышает разрядность представления яркостей изображения, но в среднем имеет меньшее значение; в данном эксперименте на пиксел цветовой компоненты приходится приблизительно пять модифицируемых тритов виртуальной памяти. Иными словами, приведенная оценка означает, что в каждые восемь битов изображения можно встроить в среднем по пять битов произвольного двоичного сообщения, что не противоречит эксперименту при минимальных требованиях к сохранению изображения в сегментированном виде, которое регулируется предусмотренными в модели параметрами [4].

Подобно представлению информации, представление ее количества инвариантно относительно изоморфных преобразований изображения. Представление количества информации сохраняется также при инверсии изображения по яркости, т. е. преобразовании изображения «в негатив». Поскольку в представлении информации «пропечатываются» следы обработки и контуры исходного изображения (интересно, что для рис. 1 — «в негативе» по R-компоненте), оно может использоваться в качестве обычного представления для выделения объектов, особенно в комбинации со снижением числа градаций яркости [4].

Более развитая интерпретация представления количества информации, точнее редукции его амплитудных значений, состоит в том, что она описывает «прошивание» (фиксирование) значений тритов виртуальной памяти. При этом фиксирование значения трита некоторого разряда виртуальной памяти для данного пиксела изображения отображается уменьшением количества содержащейся в данном пикселе информации, а уменьшение количества информации в данной координате изображения задает «прошивание» младших тритов виртуальной памяти начиная с некоторого разряда.

Фиксирование или «прошивание» тритов виртуальной памяти приводит к уменьшению числа различных пикселей изображения. При этом в зависимости от разряда каждого фиксируемого трита ячейки виртуальной памяти пикселу изображения, сопоставляемому этой ячейке, присваивается одно из 2, 4, 8, ... встречающихся на изображении значений яркости.

Смысл «прошивания» значений тритов виртуальной памяти в рамках интерпретации модели состоит в том, что в заданные триты виртуальной памяти заносится явная информация изображения, которая фиксируется при кодировании сообщения в младших разрядах.

В задачах распознавания изображений эффект «прошивания» значений тритов на относительно больших участках изображения аналогичен пороговому преобразованию, которое используется для выделения объектов [7]. При этом представление количества информации изображения (рис. 1) задает пределы изменения порогового значения в зависимости от координат.

В задачах стеганографии [9] операция «прошивания» полезна для подавления нежелательного проявления следов встроеного сообщения на тех или иных участках изображения и вложенных диапазонах яркости, которое достигается за счет блокирования встраивания сообщения из ± 1 или кодирования в изображении пропуска бинарного сообщения. Особенностью предлагаемого решения является то, что пропуск встраивания сообщения выполняется без пе-

редачи получателю дополнительной информации о размещении кодов сообщения по координатам и диапазонам яркости.

Следует обратить внимание, что кодирование пропуска бинарного сообщения обеспечивает самостоятельную возможность встраивания информации (рис. 2).

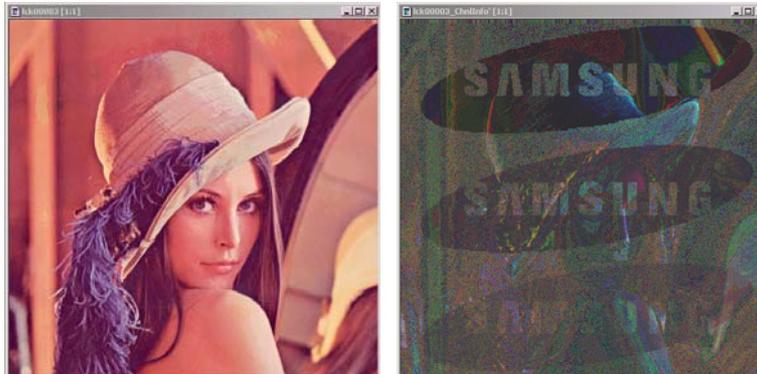


Рис. 2. Кодирование сообщения в последовательных разрядах виртуальной памяти посредством чередования фиксированных и модифицируемых тритов.

Рис. 2 демонстрирует возможность использования блокировки записи сообщения для встраивания рисованного сообщения (водяного знака) в виде логотипа компании «Самсунг Электроникс Ко., Лтд.». Слева на рис. 2 показано изображение с экземплярами логотипа, которые упорядочены сверху вниз и неявно встроены в три последовательных разряда виртуальной памяти. Справа показано проявление водяных знаков в представлении количества информации изображения. Для приложений существенно, что проявление водяного знака в данном случае выполняется без использования сведений о встроеном сообщении, а также исходных характеристиках изображения, которые оно имело до встраивания сообщения.

4. Преобразование изображения для записи сообщения

В рамках предположения о том, что информация содержится в инвариантном представлении изображения, запись кодов сообщения в модифицируемые триты виртуальной памяти может выполняться по различным алгоритмам при заданном алгоритме чтения информации из ячеек виртуальной памяти. Поэтому конкретный алгоритм записи сообщения в виртуальную память выбирается из дополнительных соображений.

В [3–6] для инвариантности сообщения относительно изоморфного преобразования сигнала в процессе передачи оно встраивалось непосредственно в инвариантное представление, которым замещалось исходное изображение. В текущей программной реализации модели сообщение встраивается в изображение, которое посредством кусочно-линейного преобразования шкалы яркости предварительно улучшается по качеству зрительного восприятия и одновременно упрощается для автоматической обработки за счет некоторого снижения числа градаций яркости при неизменном яркостном диапазоне изображения по каждой цветовой компоненте (рис. 3, сравните с рис. 1).



Рис. 3. Улучшение качества изображения при одновременном упрощении для автоматической обработки. В центре — упрощенное изображение, слева — представление информации (в линейной нормировке), справа — представление количества информации (в эквидистантной нормировке).

На упрощенном изображении (центральный на рис. 3) по сравнению с исходным (рис. 1) несколько улучшается соотношение цветовых тонов, вызванное, вероятно, влиянием JPEG-преобразования при передаче исходного изображения. Инвариантное представление информации упрощенного изображения выглядит практически так же, как и исходного. Заметное различие между представлениями количества информации на рис. 1 и рис. 3 вызвано уменьшением числа разрядов виртуальной памяти более чем в два раза. Количество информации в упрощенном представлении уменьшается приблизительно на 20% и составляет четыре модифицируемых трита виртуальной памяти в расчете на пиксел каждой цветовой компоненты изображения.

Важной особенностью преобразования изображения (рис. 1) в упрощенное представление (рис. 3) является то, что оно является *идемпотентным*, то есть при повторной обработке упрощенное представление не меняется. Более того, обсуждаемое преобразование фактически представляет собой последовательность идемпотентных преобразований, выполняемых при формировании каждого разряда виртуальной памяти. При этом изображение в упрощенном представлении (рис. 3) оказывается защищенным от искажений, которые обнаруживаются при повторении итеративной обработки и оцениваются по величине посредством установления разрядов виртуальной памяти, для которых возобновляется идемпотентная обработка.

Для текущей программной реализации модели сигнала с виртуальной памятью описанное упрощение изображения удобно тем, что позволяет использовать для встраивания сообщения предложенную в [3–4] схему с зеркальным отражением значения яркости пиксела относительно центра рассматриваемого диапазона яркости. Тем не менее представляется перспективным испытать также и другие способы встраивания сообщения в контексте решения различных прикладных задач.

5. Пример применения

Следует подчеркнуть, что модель сигнала с виртуальной памятью опирается на возможность своей экспериментальной верификации, при которой, например, обеспечивается проверка оценки количества информации с точностью до бита. При этом программно-алгоритмическая реализация модели рассматривается в качестве ее неотъемлемой части. Точные вычисления в модели, а

также упрощение ее алгоритмов достигается благодаря программной реализации инвариантных представлений изображения в псевдотроичной системе счисления, идемпотентных преобразований изображения и ряда описанных в [4] структур данных, которые трудно заменить доступными стандартными процедурами обработки сигналов. Поэтому для внедрения модели в современных условиях крайне важно указать практические приложения, в которых усилия программистов по ее освоению окажутся рентабельными.

В качестве доступного примера применения модели имеет смысл обсудить задачу защиты обычных денежных знаков (рис. 4).



Рис. 4. Встраивание водяного знака в изображение. Верхний ряд: изображение (слева) и водяной знак в младшем разряде виртуальной памяти (справа); нижний ряд: изображения в старших разрядах виртуальной памяти.

На рис. 4, в левом верхнем углу, показано изображение денежной купюры со встроенным водяным знаком. В качестве водяного знака используется представление стандартного изображения (рис. 1) в ограниченном числе градаций. В левом нижнем, правом нижнем и правом верхнем углах показано содержимое последовательных разрядов виртуальной памяти (тернарные плоскости представления информации изображения). Достоинство модели сигнала с виртуальной памятью состоит в том, что в ней не предполагается и не используется разделение тернарных плоскостей на физическом носителе информации, а также предусматриваются нетривиальные механизмы влияния на визуальное сокрытие или, наоборот, проявление сообщения (водяного знака), которые не сводятся к манипулированию величиной амплитудной модификации сигнала.

При современном развитии и компьютеризации полиграфического оборудования предельно упрощается высококачественное копирование денежных знаков и других документов, подлинность которых, вероятно, в ближайшем будущем можно будет установить только техническими средствами. Для исключения подделок имеет смысл ориентироваться на индивидуальную защиту каждого конкретного документа. Например, защитить банкноту можно, неявно встраивая в изображение в качестве водяного знака ее номер, номинал, время выпуска, состав краски, скопировать в изображение реальный водяной знак или просто запомнить в нем структуру бумаги и пр. признаки, которые при проверке сравниваются с фактическими.

Область применения виртуальной памяти не ограничена изображениями и задачами защиты информации. С тем же успехом можно записывать сообщения в виртуальную память оцифрованного звука (аудиосигнала) и, например, без существенного изменения конструкции передающих или приемных устройств неявно встраивать в аудиосигнал видеосопровождение. Специалисты по современной стеганографии указывают на полезность ее использования для повышения пропускной способности каналов связи за счет «уплотнения каналов передачи (устройств хранения)» [9]. Простота программной реализации и прозрачность интерпретации модели сигнала с виртуальной памятью позволяет помимо задач стеганографии и распознавания изображений рассчитывать на ее эффективное применение в фундаментальных задачах передачи информации.

6. Заключение

В настоящей статье мы на примере изображений обосновываем конструктивное понимание информации в общедоступном смысле — как последовательности символов, кодов, следов или иных «отпечатков», которые можно записать на бумаге, в памяти компьютера или иного физического носителя информации, а также в виртуальной памяти изображения. Возможно, со временем виртуальная память окажется не менее «реальна» в приложениях, чем, скажем, спектр сигнала. По крайней мере модель виртуальной памяти расширяет возможности аппроксимации сигнала конечным множеством дискретных амплитудных отсчетов.

Вычислительную интерпретацию понятия информации мы строим в рамках комбинаторного подхода А. Н. Колмогорова, который подчеркивал [10], что понятие информации необязательно связывать с понятием вероятности. Количество информации мы оцениваем в соответствии со структурным подходом к информатике Ф. Е. Темникова [11–12], в котором оно сводится к подсчету структурных элементов сигнала.

Идея «сконструировать» троичную виртуальную память из компонент изображения или аудиосигнала является неожиданной. Однако то, что для обработки цифровой информации эффективно использовать именно троичную память, давным-давно показано. В те же годы, когда А. Н. Колмогоров сформулировал подходы к количественной оценке информации, и даже в той же организации (МГУ им. М. В. Ломоносова), Н. П. Брусенцовым была создана троичная ЭВМ «Сетунь» [13]. По надежности она превосходила машины своего времени и превосходит также современные компьютеры по простоте программирования благодаря минимальному числу базовых команд. Тем не менее считается, что идея троичной ЭВМ не вполне согласуется с теорией информации. Вероятно, если окончательно решить проблему формализации понятия элементов информации, окажется верным как раз обратное.

Опыт создания троичной ЭВМ уникален для нашей страны, поскольку попытки создания троичных ЭВМ за рубежом не увенчались успехом. Однако, несмотря на усилия Н. П. Брусенцова по развитию троичной техники [14], этот опыт используется пока недостаточно, что ограничивает возможности информатики как «науки о компьютерах». Тем не менее в последнее время число аргументов в пользу реализации информационных технологий на основе не двоичных устройств растет и настоящая статья согласуется с современными тенденциями развития решений в информатике.

Литература

1. *Харинов М. В.* Псевдотроичная система счисления и анализ изображений // Труды СПИИРАН. СПб.: Наука, 2002. Вып. 1, т. 2. С. 269–275.
2. *Харинов М. В.* Адаптивное представление изображения в виде виртуального носителя цифровых данных (ВНЦД) // Труды СПИИРАН. СПб.: Наука, 2004. Вып. 2, т. 1. С. 135–144.
3. *Харинов М. В.* Инвариантное троичное кодирование информации в цифровом изображении // Труды СПИИРАН. СПб.: Наука, 2006. Вып. 3, т. 2. С. 169–183.
4. *Харинов М. В.* Запоминание и адаптивная обработка информации цифровых изображений / Под ред. Р.М. Юсупова. СПб.: Изд-во С.Петербур. ун-та, 2006. 138 с.
5. Заявка на патент РФ 2006119273. 2006. Адаптивное встраивание водяных знаков по нескольким каналам.
6. *Kharinov M. V.* Representation of image information for computer calculations // Pattern Recognition and Image Analysis. 2007. Vol. 17, № 1. P. 117–124. (ISSN 1054-6618).
7. *Прэнтт У.* Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Том 1-2. 1200 с.
8. *Кнут Д. Е.* Искусство программирования для ЭВМ. Получисленные алгоритмы. М.: Мир, 1977. Т. 2. 724 с.
9. *Оков И. Н.* Аутентификация речевых сообщений и изображений в каналах связи / Под ред. В.Ф. Комаровича. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2006. 392 с.
10. *Колмогоров А. Н.* Три подхода к определению понятия «Количество информации» // Проблемы передачи информации. 1965. Вып. 1, т. 1. С. 3–8.
11. *Темников Ф. Е.* Информатика // Известия вузов. Электромеханика. 1963. № 11. С. 1277.
12. *Темников Ф. Е., Афонин В. А., Дмитриев В. И.* Теоретические основы информационной техники. М.: Энергия, 1979. 512 с.
13. *Брусенцов Н. П.* Вычислительная машина "Сетунь" Московского государственного университета. // Новые разработки в области вычислительной математики и вычислительной техники. Киев, 1960. С. 226–234.
14. *Брусенцов Н. П.* Реставрация логики. М.: Новое тысячелетие, 2005, 165 с.