

СОВРЕМЕННАЯ ВИДЕОИНФОРМАТИКА: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2012 г. В. Н. Васильев, член-корреспондент РАН, доктор техн. наук;
И. П. Гуров, доктор техн. наук; А. С. Потапов, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: gurov@mail.ifmo.ru

Рассмотрены современные проблемы видеоинформатики в области формирования, передачи, обработки, анализа и визуализации видеоинформации. Отличительная особенность видеоинформатики состоит в рассмотрении данных проблем с единых теоретических позиций, что позволяет проводить разработку и оптимизацию характеристик видеоинформационных систем как единого целого. Показана эффективность использования теоретико-информационного подхода для анализа и оптимизации видеоинформационных систем, начиная от оптического канала распространения излучения в свободном пространстве при формировании изображений или многомерных видеоданных и заканчивая системой визуализации. Выделены перспективные направления дальнейшего развития методов видеоинформатики.

Ключевые слова: видеоинформатика, теория информации, формирование изображений, представление изображений, визуализация.

Коды OCIS: 100.2000, 110.2990, 110.3055

Поступила в редакцию 30.07.2012

Введение

Информационные технологии – наиболее активно развивающаяся область высоких технологий. Ввиду существенного расширения информационной емкости запоминающих устройств и пропускной способности каналов связи в общем объеме информации, хранимой и передаваемой в информационно-телекоммуникационных системах, заметно возросла доля информации, приходящейся на изображения [1].

Изображения наиболее информативны. Видеоинформация широко используется в таких областях, как компьютерное зрение, дистанционное зондирование, отображение трехмерных объектов, системы дополненной реальности, наблюдательные системы и системы безопасности, биомедицина и биометрия, диагностика

ценных предметов искусства и др. Видеоинформатика объединяет методы, применяемые в этих областях, и новые современные технологии, интегрированные с компьютерными технологиями и технологиями программирования – от формирования до анализа, классификации, распознавания и визуализации изображений – с привлечением эффективных математических методов и высокопроизводительных вычислительных алгоритмов обработки информации.

Видеоинформатика – область информатики, ориентированная на формирование, передачу, обработку и визуализацию информации, представленной в форме изображений.

Обобщенная структура информационной системы иллюстрируется на рис. 1а. В информационной системе источник порождает сообщения, которые должны быть переданы через канал передачи получателю. Во многих слу-

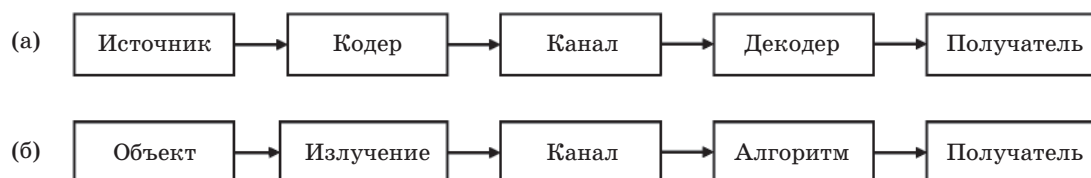


Рис. 1. Блок-схемы информационной системы (а) и системы передачи видеоинформации (б).

чаях сообщения не могут быть переданы непосредственно, и требуется кодирование сообщения для передачи по каналу с последующим декодированием. В видеотрансмиссионной системе (рис. 1б) кодирование осуществляется при взаимодействии оптического излучения с объектом, а для декодирования используют специальные технические средства и алгоритмы, обеспечивающие извлечение информации для получателя.

В настоящей статье проведено рассмотрение проблематики видеотрансмиссионных систем, относящейся ко всем этапам от формирования до визуализации изображений.

Формирование видеотрансмиссионной информации

Этапы от формирования изображений до их визуализации можно описать в информационных терминах. При автоматическом анализе и преобразовании изображений этот подход оказывается эффективным и приобретает все большую популярность. Действительно, в методах автоматического анализа изображений всегда используются некоторые представления, или способы описания изображений, при этом к представлениям могут применяться информационные критерии качества. Гораздо менее распространенным является применение информационного подхода к процессу формирования изображений. Но и здесь этот подход является не только применимым, но и весьма перспективным, позволяющим с помощью единой системы понятий описать основные элементы видеотрансмиссионных систем.

Источники видеотрансмиссионной информации можно разделить на две группы: абстрактные, такие как объекты виртуальной реальности, и объекты реальной физической природы. Основное различие между этими группами объектов состоит в степени влияния шума, который для объектов первой группы выражается погрешностями описания объектов при их дискретном представлении, тогда как объекты второй группы подвержены существенному влиянию внешних факторов, например, фоновых засветок, изменений условий наблюдения и др.

Источники видеотрансмиссионной информации в большинстве случаев характеризуются высокой степенью избыточности данных, поэтому весьма актуальна проблема оптимального представления (или эффективного кодирования) данных об объектах уже на этапе формирования изображений. Описание объектов реальной фи-

зической природы определяется особенностями конкретной решаемой задачи. Рассмотрим в качестве примера задачу представления трехмерной геометрической формы объекта [2].

Форму большинства реальных объектов можно представить гладкой поверхностью (т. е. низкими частотами пространственного спектра) и сравнительно малой составляющей, описывающей высокочастотные детали.

При применении классической теории информации [3, 4] к проблеме эффективного кодирования трехмерных данных на этапе их формирования естественным является представление формы объекта $z(x, y)$ как реализации случайного процесса $\{z(x, y)\}$ с автокорреляционной функцией $R_{zz}(x, y)$ и спектральной плотностью мощности $G_{zz}(f_x, f_y)$. Требуется выполнить такое преобразование данных, чтобы (в идеальном случае) обеспечить равномерную спектральную плотность мощности $G'_{zz}(f_x, f_y) = \text{const}$ в частотной полосе пропускания канала передачи информации. Однако большинство оптических систем не обеспечивают требуемого “отбеливания спектра”.

Один из возможных подходов состоит в выполнении пространственного дифференцирования функции $z(x, y)$ [2], обеспечивающего получение более равномерного спектра за счет повышения относительного уровня составляющих с высокими частотами (рис. 2). При этом принципиально важно выполнить дифференцирование оптическими методами до передачи информации в канал с шумом. Подходящим

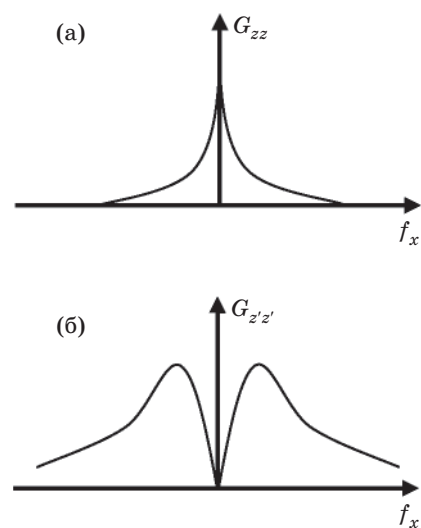


Рис. 2. Модификация исходной спектральной плотности мощности в области пространственных частот (а) в результате оптического дифференцирования (б).

методом является метод формирования теневых изображений (shape from shading) [5].

Классическая (Шенноновская) теория информации [6] предполагает знание истинной статистической модели источника данных. Однако в большинстве случаев априорная информация о наблюдаемых объектах весьма ограничена или отсутствует. Здесь более адекватным средством может служить алгоритмическая теория информации [7], в рамках которой выводится принцип минимальной длины описания для выбора оптимальной модели источника данных и оптимального представления информации (в том числе, изображений). В настоящее время данный принцип используется в методах автоматического анализа изображений (о чем будет сказано ниже), однако его применение в целях повышения эффективности систем формирования изображений является перспективным, хотя и малоисследованным направлением.

Канал передачи видеоинформации

Отличительная особенность видеоинформационных систем выражается в структуре канала передачи информации (рис. 3), который включает оптический канал распространения излучения в свободном пространстве, электронный канал с преобразованием оптического излучения в электрические сигналы и дискретный канал преобразования аналоговых сигналов в дискретные (цифровые) значения. Канал передачи информации должен обеспечивать требуемую пропускную способность при минимизации стоимости.

Известно [3, 4], что канал передачи информации характеризуется пропускной способностью (бит/с)

$$C_T = B \log_2 \left(1 + \frac{S_{in}}{N} \right) = B \log_2 \left(\frac{S}{N} \right), \quad (1)$$

где B – односторонняя ширина частотной полосы полезного сигнала, S_{in} – мощность сигнала



Рис. 3. Блок-схема канала передачи видеоинформации.

на входе канала, N – средняя мощность шума в канале, $S = S_{in} + N$ – мощность выходного сигнала, доступного для регистрации. Согласно теореме Шеннона [3, 4, 6] для канала с помехами, представляющими собой аддитивный гауссов шум, информация может быть передана по каналу со сколь угодно высокой степенью верности, если производительность источника сообщений $H' = H/t$ (бит/с) не превышает пропускной способности канала (1). Количество информации, переданной за время ΔT , составляет

$$C = \Delta T B \log_2(S/N).$$

Пропускная способность оптического канала передачи информации определяется в форме [2]

$$C_{OB} = 2\Delta X \Delta Y B_x B_y \log_2(S_O/N_O) = -4\Delta X \Delta Y B_x B_y \log_2 \mu, \quad (2)$$

где $\Delta X \times \Delta Y$ – размеры фотодетектора,

$$B_x B_y = \frac{\pi D^2}{16 \langle \lambda \rangle^2 f^2}$$

– ширина полосы в области пространственных частот, D – диаметр линзы объектива, $\langle \lambda \rangle$ – среднее значение длины волны излучения, f – фокусное расстояние объектива. Отношение сигнал-шум в оптической системе

$$\frac{S_O}{N_O} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\sigma_I^2} \approx \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_I^2} = \frac{1}{\mu^2} \quad (3)$$

определяется, главным образом, шумом спеклов [2, 8]. В выражении (3) σ_I^2 – дисперсия шума спеклов, μ – контраст спеклов.

Учитывая преобразование изображений объективом оптической системы, пропускную способность можно охарактеризовать выражением [2]

$$C_O = -\frac{\Sigma_p \Sigma_d}{\langle \lambda \rangle^2 f^2} \log_2 \mu, \quad (4)$$

где Σ_p – площадь зрачка оптической системы, Σ_d – площадь фотодетектора. Это выражение показывает, что для повышения пропускной способности оптического канала требуется источник излучения с наименьшей когерентностью ($\mu \ll 1$) и необходимо использовать объективы с увеличенной апертурой и фотодетектор большой площади.

Обратимся к оценке пропускной способности электронного канала.

Оптическое излучение регистрируется при помощи фоточувствительной матрицы форма-

том $M \times N$ элементов. Учитывая критерий Найквиста, ширина полосы пропускания при дискретизации изображения с шагом ΔX вдоль координаты X определяется как

$$B_x = \frac{M}{2\Delta X}.$$

Используя аналогичное соотношение для второй координаты, определим пропускную способность электронного канала передачи информации в форме

$$C_E = \frac{1}{2} MN \log_2 \left(\frac{S_E}{N_E} \right). \quad (5)$$

Мощность регистрируемого излучения, приходящегося на один чувствительный элемент фотодетектора, является малой величиной, поэтому шум в электронном канале определяется в основном фотонным шумом фотодетектирования с пуассоновской статистикой фотоотсчетов. При этом, как известно [8], дисперсия шума σ_n^2 равна среднему количеству фотоотсчетов $\langle n \rangle$, поэтому

$$\frac{S_E}{N_E} = \frac{\langle n^2 \rangle}{\sigma_n^2} \approx \frac{\langle n \rangle^2}{\sigma_n^2} = \langle n \rangle. \quad (6)$$

Тогда из (5) получим

$$C_E = \frac{1}{2} MN \log_2 \langle n \rangle. \quad (7)$$

Согласно (7), количество информации, получаемой фотодетектором, линейно возрастает с увеличением числа фоточувствительных элементов и логарифмически увеличивается с ростом числа фотонов, регистрируемых каждым элементом. Ограничение пропускной способности при увеличении мощности излучения определяется порогом насыщения фоточувствительных элементов.

Таким образом, характеристики оптической системы, параметры фотодетектирования и дискретизации играют определяющую роль в отношении пропускной способности видеoinформационной системы, что может быть количественно охарактеризовано в рамках информационного подхода.

Методы и алгоритмы обработки видеoinформации

Методы и алгоритмы автоматической обработки, анализа и преобразования изображений в видеoinформатике основываются на формализованном оптимальном описании изображе-

ний. Наиболее распространены низкоуровневые, контурные и структурные представления изображений. В каждом классе существует большое многообразие конкретных представлений и алгоритмов описания изображений в рамках того или иного представления (соответствующий обзор представлен в [1]). На практике в большинстве случаев используют эвристические алгоритмы, применимость которых если и обоснована, то для весьма частных случаев. В первую очередь, эта ситуация связана с проблемой априорной неопределенности изображений.

Общее теоретическое решение данной проблемы дано в рамках алгоритмической теории информации [9]. Если имеется строка данных D от неизвестного источника информации, то количество информации в этой строке может быть определено через алгоритмическую сложность K :

$$K(D) = \min_H [l(H) | U(H) = D], \quad (8)$$

где U – универсальная машина Тьюринга (УМТ), H – программа для УМТ (описание источника данных), которая представлена строкой длины $l(H)$ двоичных символов и в результате исполнения на машине U порождает строку D . Лучшее описание при этом может быть определено на основе уравнения

$$H^* = \arg \min_H [l(H) | U(H) = D]. \quad (9)$$

Поскольку данные (изображения) на практике обычно зашумлены, описание включает также случайную составляющую, при этом (9) принимает вид

$$\begin{aligned} K(D) &= \min_H [l(H) | U(H) = D] = \\ &= \min_{ME} [l(ME) | U(ME) = D] = \\ &= \min_M [l(M) + \min_E [l(E) | U(ME) = D]] = \\ &= \min_M [l(M) + K(D | M)], \end{aligned} \quad (10)$$

что ведет к принципу минимальной длины описания, в соответствии с которым лучшей является модель, позволяющая минимизировать сумму длины описания самой модели и длины описания данных в рамках этой модели [10].

На практике, однако, поиск в алгоритмически полном пространстве моделей затруднителен, и, кроме этого, всегда имеется некоторая априорная информация, которая снижает ис-

ходную неопределенность в выборе моделей и которую необходимо учитывать. Введение априорной информации может осуществляться путем выбора опорной машины U , который, по сути, позволяет задавать распределение априорных вероятностей в пространстве моделей.

Вместо выбора собственно универсальной машины удобнее использовать некоторую программу P , обладающую свойством $(\forall D \in \mathbf{D}(\exists ME \in \{0, 1\}^*)U(PME) = D$. Иными словами, для любого изображения D из некоторой выборки \mathbf{D} существует модель M этого изображения и случайная составляющая E , по которым программа P может реконструировать исходное изображение D . При этом наилучшим признается то представление, которое в среднем позволяет описывать изображения наиболее коротко [11]. Такая программа P удовлетворяет общему определению понятия представления [12]. Рассмотрим пример выбора модели изображений в рамках конкретного представления на примере задачи сегментации.

Рассмотрим изображение D , разбитое на совокупность областей G_1, \dots, G_d . Содержание каждой области может быть описано отдельно от других областей некоторой моделью. Программа P может восстановить исходное изображение по совокупности областей G_i и описаний их содержания. При этом разделение на области может быть произвольным, но эффективность сегментации может сильно различаться. Задачу оптимальной сегментации можно поставить как задачу определения такой совокупности областей, суммарная длина описаний которых достигает минимума:

$$\{G_i\}^* = \arg \min_{\{G_i\}} \sum_{i=1}^d [K(G_i) + K(D|_{G_i})], \quad (11)$$

где $K(G)$ – сложность описания области G , $K(D|_G)$ – длина описания сужения изображения на область G .

На практике представление изображения необходимо конкретизировать. При этом наилучшее представление определяется по средней длине описания изображений из некоторой выборки. Таким образом может проводиться сравнение разных методов сегментации. К примеру, если содержание каждой области (яркости пикселей в ней) описывается как совокупность отсчетов некоторой случайной величины, то длина описания будет определяться на основе энтропийного критерия. При этом лучшим окажется такое разделение на области, при котором содержание каждой области будет об-

ладать наименьшей энтропией. Стоит иметь в виду, что “штрафы” за сложность областей $K(G)$, которые также должны быть описаны, препятствуют чрезмерной сегментации на малые области с низкой энтропией.

Однако описание яркостей пикселей как независимых отсчетов некоторой случайной величины, очевидно, не позволяет учесть всех закономерностей, которые могут содержаться в распределении яркостей. В представлении могут учитываться разные закономерности, например, путем аппроксимации распределений яркостей с помощью функций некоторых классов и т. п. Эффективность выбранного класса функций будет также отражаться критерием длины описания.

Аналогичным образом может решаться задача оптимизации описаний изображений в задачах классификации и распознавания при использовании различных типов представлений изображений. В частности, задачи компьютерного зрения, включающие анализ движения, восстановление трехмерной формы и дальности до объектов и т. д. могут решаться как задачи построения оптимальных моделей изображений в рамках некоторых представлений с использованием информационного критерия качества [13].

Эффективность представлений играет очевидную роль и в методах компрессии изображений, определяя степень сжатия. При компрессии с потерями размеру сжатого изображения соответствует сложность модели $l(M)$, тогда как объему информационных потерь – величина $l(E)$. Поскольку истинная модель некоторого изображения априорно неизвестна (и может быть неизвестен даже класс, к которому эта модель принадлежит), задача оптимального сжатия изображений связана с задачей построения наилучшей модели, тогда как традиционно методы сжатия разрабатываются в рамках классической теории оптимального кодирования, строящейся для случая известных моделей источников сообщений [14].

Таким образом, методы видеoinформатики позволяют ввести единый теоретический базис для самых разных задач от формирования до визуализации изображений.

Особенности применения видеoinформационных систем

Информационный подход весьма перспективен при рассмотрении особенностей форми-

рования, обработки и анализа многомерных и векторных данных в современных видеоинформационных системах.

Изображение можно представить значениями интенсивности

$$\mathbf{S} = \{s_{i,j}; 1 \leq i \leq N; 1 \leq j \leq M\}, \quad (12)$$

где \mathbf{S} – матрица размером $N \times M$. В современных видеоинформационных системах регистрируют набор видеок кадров \mathbf{S}_k , где k – номер видеок кадра. При этом информация представляется в трехмерной форме значениями $\{s_{i,j,k}\}$.

В зависимости от области применения и используемых технических средств набор видеок кадров может формироваться различным образом. В томографических системах отдельному видеок кадру соответствует информация, полученная в сечении исследуемого объекта, при этом совокупность видеок кадров характеризует внутреннюю объемную структуру объекта [15, 16]. При решении задач дистанционного зондирования Земли последовательность видеок кадров может включать информацию об отдельных наблюдаемых участках [17]. В современных гиперспектральных системах дистанционного зондирования [18] матрица (12) определяется положением x_i наблюдаемой точки объекта и длиной волны λ_j регистрируемого излучения. В свою очередь, набор видеок кадров содержит информацию, получаемую для ряда (k) линий сканирования в пространственной области. При видеонаблюдении динамических объектов последовательность видеок кадров позволяет получить информацию об изменениях наблюдаемого объекта и т. д.

Следует выделить ряд важных особенностей видеоинформационных систем, оперирующих с многомерными данными. Прежде всего, оказывается доступным значительно больший объем информации, чем при визуальном наблюдении, иными словами, видеоинформационные системы обеспечивают принципиально новые возможности. Однако при этом возрастают требования к пропускной способности канала передачи информации и вычислительной мощности подсистемы обработки данных [19, 20].

Другая особенность состоит в том, что многомерные данные обеспечивают возможность эффективного решения задач автоматического анализа информации. Действительно, визуальное наблюдение единственного изображения, например, в медицинской диагностике, часто недостаточно для надежного принятия решения, тогда как автоматический анализ много-

мерных данных об объемной структуре объекта обеспечивает высокую вероятность правильного решения.

Формирование и анализ многомерных данных позволяют более эффективно использовать априорную информацию об исследуемых объектах и процессах за счет включения в многомерную модель взаимных корреляционных характеристик, использования неразделимых по координатам математических преобразований, основанных на априорном знании и т. д.

Многомерные данные, регистрируемые при наблюдении быстропротекающих процессов, либо процессов в широком диапазоне длин волн, включая участки спектра вне видимого диапазона, открывают широкие перспективы для научных исследований и инновационных разработок [21, 22].

Перспективные методы визуализации видеоинформации

Широко используемые методы формирования объемного трехмерного изображения представляют собой разновидности стереоскопических и многокурсовых методов. Со второй половины 90-х гг. получили распространение плоские панельные дисплеи, что способствовало развитию технологий трехмерного отображения объектов: стереоскопических дисплеев, дисплеев на основе использования параллакса, так называемого “интегрального отображения” и технологий матриц микролинз [23].

В настоящее время хорошо разработаны технологии трехмерного отображения объектов (стереоскопические дисплеи) для наблюдения при помощи специальных очков, основанные на эффекте бинокулярной диспаратности изображений, воспринимаемых глазами человека. Наиболее распространены очки с использованием жидкокристаллических затворов и поляризационного разделения изображений для каждого глаза. Использование очков вызывает ощущение дискомфорта [23, 24], поэтому проводятся активные исследования возможностей восприятия трехмерных изображений непосредственно на плоском дисплее.

Для этого возможно использовать набор линз, формирующих различные изображения при наблюдении под различными углами (рис. 4), либо ограничивать угол наблюдения при помощи набора вертикальных щелей (рис. 5), так что под разными углами отображаются различные изображения [23]. Подобные

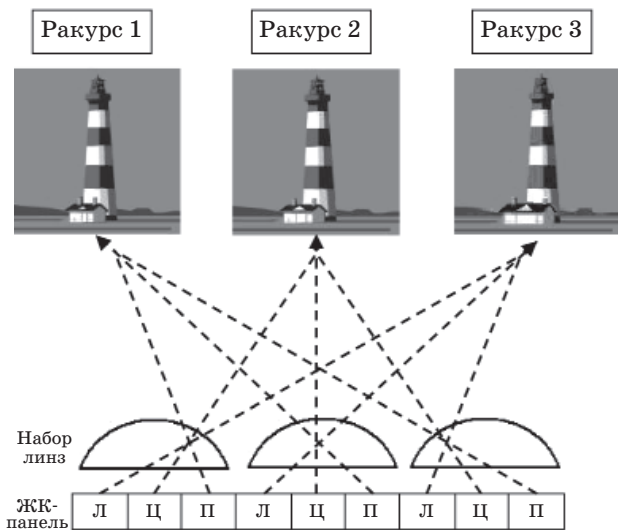


Рис. 4. Формирование трехмерных изображений при наблюдении с различных ракурсов.

методы характеризуются недостаточно высокой разрешающей способностью, поскольку требуется мультиплексирование ряда изображений при ограниченном разрешении дисплея. Тем не менее, известны коммерческие разработки дисплеев с трехмерным отображением для мобильных телефонов компаний Samsung и LG Electronics [23].

Перспективной технологией трехмерного отображения является интегральное отображение или “интегральная фотография” на основе метода Липпмана [25]. Для реализации метода используется матрица микролинз, обеспечивающая выполнение условий вертикального и горизонтального параллакса. Изначально для этой цели применялась матрица малых отверстий (пинголов), изготовление которой технологически более просто. Известны разработки, обеспечивающие трехмерное отображение динамических объектов [26].

Каждая микролинза отображает собственное “микроизображение”, при этом множество изображений регистрируется ПЗС-матрицей (рис. 6) [23]. При обратном отображении через матрицу микролинз выполняется пространственная реконструкция объекта, который можно наблюдать только в пределах определенного ограниченного угла, что является недостатком метода [27].

Основное преимущество большинства трехмерных дисплеев рассмотренных выше видов состоит в их совместимости с технологиями плоских панелей. Однако при этом углы обзора

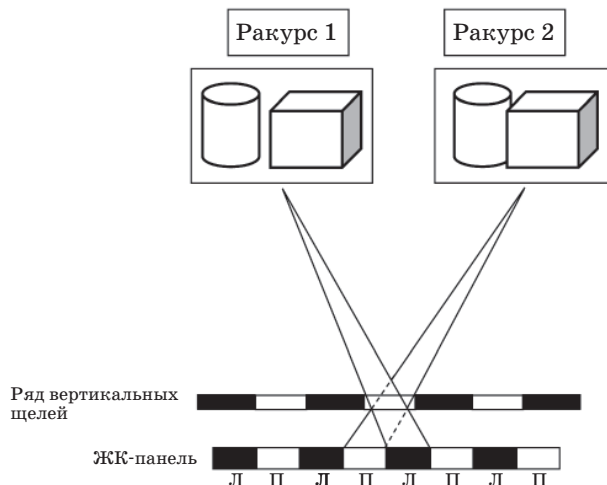


Рис. 5. Принцип визуализации трехмерных изображений с использованием ограничения параллакса.

изображения ограничены и глубина наблюдаемого объема незначительна.

В последние годы получили активное развитие методы цифровой голографии [28, 29], обеспечивающие запись голограмм при помощи видеокамеры с последующей компьютерной реконструкцией трехмерных изображений. Несмотря на успехи в разработках трехмерных голографических дисплеев [23, 30, 31], им присущи существенные недостатки: необходимость весьма высокой разрешающей способности при записи (синтезе) голограмм, влияние спекл-шума, сложность записи голограмм динамических объектов. Тем не менее, известны отдельные лабораторные разработки голографических дисплеев [32, 33].

Прозрачные трехмерные дисплеи можно разделить на две группы: дисплеи в виде индивидуального шлема и проекционные дис-

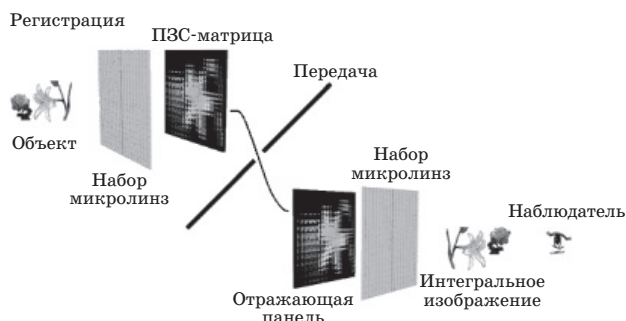


Рис. 6. Структура видеоинформационной системы визуализации 3D изображений с использованием матриц микролинз.

плеи. Дисплеи первой группы [23, 34] имеют ограниченное применение для специальных задач (например, в пилотируемой авиационной технике), поэтому обратимся к современным технологиям проекционных дисплеев.

Разработки проекционных дисплеев основываются главным образом на использовании полупрозрачных стекол и нашли применение в автомобильной промышленности [35]. Дисплеи этого вида удобны для отображения сцен дополненной реальности (augmented reality), когда реальная наблюдаемая сцена дополняется фрагментами в виде искусственно синтезированных изображений.

Известны специальные разработки трехмерных проекционных дисплеев, в которых изображения проецируются на поток мелких частиц, подобных дыму, и на поток мелких капель воды [36]. Разработан дисплей на основе эффекта эмиссии плазмы в точке фокусировки лазерного луча для отображения 3D изображений, состоящих из массивов точек в воздушном пространстве [37]. Предложено также применение рассеивающих экранов [38], при этом обеспечивается возможность адекватного восприятия глубины наблюдаемой сцены.

Перспективные технологии визуализации видеоинформации весьма востребованы в трехмерном телевидении, поскольку обеспечивают возможность одновременного коллективного просмотра 3D сцены под разными углами зрения, полупрозрачность сцены и видимость внутренней структуры сложных объектов.

Впервые система трехмерного телевидения была продемонстрирована институтом Fraunhofer HHI (Fraunhofer Nachrichtentechnik Heinrich-Hertz-Institut) на Международной конвенции по радио- и телевидению (International Broadcasting Convention – IBC) в 2004 г. [20]. Первые разработки систем трехмерного телевидения выполнены компанией Dynamic Digital Depth Ltd. (Австралия), а также в рамках европейского проекта IST (система AT-TEST, Advanced Three-Dimensional Television Systems Technologies) [39].

Известны разработки трехмерных объемных дисплеев с использованием механического сканирования вращающимся зеркалом, что обеспечивает возможность наблюдения объектов с любого ракурса в пределах 360° [40], а также ряд других разработок, подробно рассмотренных в обзорных статьях [23, 31, 41, 42].

Следует отметить современную коммерческую разработку трехмерного дисплея Helio-

display, которая представлена компанией IO2 Technology (США) [43]. Устройство обеспечивает отображение 3D изображений размерами от нескольких сантиметров до нескольких метров, при этом никакие экраны не требуются, так как изображение “висит в воздухе”.

Несмотря на значительные успехи в разработках систем визуализации трехмерных объектов и принятие стандартов для трехмерного телевидения [31], ряд важных проблем остаются еще не решенными [23]. К ним можно отнести необходимость обеспечения полной достоверности отображения при повышенном разрешении, в том числе для динамических сцен, расширения диапазона углов при много-ракурсном наблюдении, обеспечения высококачественной цветопередачи и др., что определяет направления дальнейших исследований и перспективных разработок.

Заключение

Проведенное рассмотрение проблем и перспектив видеоинформационных технологий показывает комплексность и сложность решаемых научно-технических задач, направления дальнейших исследований и инновационных разработок. При этом следует отметить ряд аспектов, которые, по мнению авторов, представляют особую важность для современной видеоинформатики.

Прежде всего, необходимо учитывать, что первичное кодирование источника информации осуществляется в видеоинформационных системах при взаимодействии оптического излучения с объектом на основе законов физической (в ряде случаев квантовой) оптики. Иными словами, информация об объекте становится доступной в форме отраженных электромагнитных волн различного спектрального состава и различной степени когерентности, и требуется обеспечить сбор и извлечение полезной информации на основе соответствующих методов и алгоритмов.

Ввиду широкого разнообразия наблюдаемых объектов первичное кодирование и сбор информации оптической системой исключительно важны с точки зрения пропускной способности системы и снижения избыточности данных. Разнообразие объектов изначально вносит высокую априорную неопределенность, что не позволяет создать универсальную видеоинформационную систему с высокими показателями качества на основе фиксированных

правил. Определенная гибкость обеспечивается выбором адекватной математической модели, например, с использованием принципа минимальной длины описания, что позволяет адаптировать алгоритмы обработки и отображения видеoinформации к конкретному объекту.

Перспективы развития видеoinформатики связаны в значительной мере с возможностью регистрации и обработки многомерных и векторных данных, когда может быть эффективно учтена априорная информация, например, исходя из факта, что наблюдаемый объект представляет собой единое целое, либо наоборот, состоит из независимых частей и т. п. В первом случае возможно использование неразделимых по координатам многомерных преобразований, исключающих взаимное смещение частей объекта, во втором – использование, например, взаимных корреляций, характеризующих вероятности смещения отдельных частей относительно друг друга. В обоих случаях адекватное представление данных позволяет значительно снизить объем обрабатываемой информации без снижения показателей качества видеoinформационной системы.

Наряду с закономерностями и ограничениями фундаментального характера, оптимизация технических и технологических решений имеет на практике ключевую роль, что наглядно проявляется в разработках систем визуализации и трехмерного отображения видеoinформации, рассмотренных в статье. В этой связи следует особо выделить важность структурной оптимизации систем обработки видеoinформации, в том числе на кристалле фотоприемной матрицы, применительно к многомерным

сигналам для обеспечения эффективного кодирования информации для передачи по электронному каналу (кодирования канала).

Перспективное развитие видеoinформатики обеспечивается значительным прогрессом технологий фотоники, прежде всего, источников излучения для активных систем, например, на основе структурированного освещения и цифровой голографии, оптоэлектроники, особенно в части управляемых транспарантов, матриц микролинз и микрозеркал, видеокамер большого формата невысокой стоимости при широком диапазоне спектральной чувствительности и компьютерных технологий, обеспечивающих высокую вычислительную мощность и возможность использования новых алгоритмов и параллельных вычислений, в том числе с использованием графических процессоров (Graphic Processing Units, GPU).

В статье ввиду ее ограниченного объема не рассмотрены отдельные методы видеoinформатики, такие как определение формы из фокусировки [44, 45], активные системы структурированного освещения [46–48], использование излучения в виде набора длин волн для формирования гиперспектральных изображений [49, 50], методы на основе использования нескольких видеокамер [51, 52] и ряд других. Авторы выражают надежду, что материалы статьи дают общее представление о современных методах видеoinформатики, и заинтересованный читатель сможет ознакомиться с отдельными вопросами при изучении публикаций, приведенных в списке литературы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев В.Н., Гуров И.П., Потанов А.С. Математические методы и алгоритмическое обеспечение анализа и распознавания изображений в информационно-телекоммуникационных системах / Федеральный портал по научной и инновационной деятельности. Режим доступа http://www.sci-innov.ru/articles/itcs/contest_its/?entry_id=62325.
2. Wagner C., Häusler G. Information theoretical optimization for optical image sensors // Appl. Opt. 2003. V. 42. P. 5418–5426.
3. Теория электрической связи / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 1999.
4. Хромов Л.И., Цицулин А.К., Куликов А.Н. Видеoinформатика. Передача и компьютерная обработка видеoinформации. М.: Радио и связь, 1991.
5. Shape from Shading / B. Horn, M. Brooks, eds. Cambridge: MIT Press, 1989.

6. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1963.
7. Колмогоров А.Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука, 1987.
8. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: Мир, 1988.
9. Solomonoff R. Does algorithmic probability solve the problem of induction? // Oxbridge Research, P.O.B. 391887, Cambridge, Mass. 02139. 1997.
10. Vitanyi P.M.B., Li M. Minimum description length induction, Bayesianism, and Kolmogorov complexity // IEEE Trans. on Information Theory. 2000. V. 46. № 2. P. 446–464.
11. Потапов А.С. Выбор представлений изображений на основе минимизации репрезентационной длины их описания // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 7. С. 3–7.
12. Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987.
13. Петерсон М.В., Потапов А.С. Применение принципа репрезентационной минимальной длины описания для сенсомоторной калибровки // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2011. С. 221–225.
14. Окунев В.В., Потапов А.С. Анализ фрактального представления изображений по критерию репрезентационной минимальной длины описания // Труды научно-исследовательского центра фотоники и оптоинформатики: Сб. статей / Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. В. 2. С. 315–325.
15. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990.
16. Уэбб С., Дане Д., Эванс С. Физика визуализации изображений в медицине / Под ред. С. Уэбба. М.: Мир, 1991.
17. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001.
18. Попов М.А., Станкевич С.А. Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли. М.: ИКИ РАН, 2006. Т. 1. С. 106–112.
19. Каримов Р.Н., Большаков А.А. Методы обработки многомерных данных и временных рядов. М.: Горячая линия – телеком, 2007.
20. Чобану М. Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов. М.: Техносфера, 2009.
21. Lowrance J.L., Mastrocola V.J., Renda G.F., Swain P.K., Kabra R., Bhaskaran M., Tower J.R., Levine P.A. Ultrahigh-frame CCD imagers. In: Ultrahigh- and High-Speed Photography, Photonics, and Videography / D.R. Snyder, ed. // Proc. SPIE. 2004. V. 5210. P. 521067.
22. Bai Y., Bajaj J., Beletic J.W., Farris M.C., Joshi A., Lauxtermann S., Petersen A., Williams G. Teledyne imaging sensors: silicon CMOS imaging technologies for X-ray, UV, visible and near infrared // Proc. SPIE. 2008. V. 7021. P. 702102.
23. Hong J., Kim Y., Choi H.-J., Hahn J., Park J.-H., Kim H., Min S.-W., Chen N., Lee B. Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues // Appl. Opt. 2011. V. 50. № 34. P. H87–H115.
24. Kooi F. L., Toet A. Visual comfort of binocular and 3D displays // Displays. 2004. V. 25. P. 99–108.
25. Lippmann G. La photographie integrale // C. R. Acad. Sci. 1908. V. 46. P. 446–451.
26. Okano F., Hoshino H., Arai J., Yuyama I. Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography // Appl. Opt. 1997. V. 36. P. 1598–1603.
27. Lee B., Park J.-H., Min S.-W. Three-dimensional display and information processing based on integral imaging. In: Digital Holography and Three-Dimensional Display, T.-C. Poon, ed. Springer, 2006. Chap. 12. P. 333–378.
28. Schnars U., Jueptner W. Digital Holography. Digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
29. Балтийский С.А., Гуров И.П., Де Никола С., Коппола Д., Ферраро П. Современные методы цифровой голографии. В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики / Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2004. С. 91–117.
30. Frauel Y., Naughton T.J., Matoba O., Tajahuerce E., Javidi B. Three-dimensional imaging and processing using computational holographic imaging // Proc. IEEE. 2006. V. 94. № 3. P. 636–653.
31. Bove V.M. Display holography's digital second act // Proc. IEEE. 2012. V. 100. № 4. P. 918–928.
32. Stanley M., Bannister R.W., Cameron C.D., Coomber S.D., Cresswell I.G., Hughes J.R., Hui V., Jackson P.O., Milham K.A., Miller R.J., Payne D.A., Quarrel J., Scattergood D.C., Smith A.P., Smith M.A., Tipton D.L., Wat-

- son P.J., Webber P.J., Slinger C.W. 100 mega-pixel computer generated holographic images from active tiling—a dynamic and scalable electro-optic modulator system // Proc. SPIE. 2003. V. 5005. P. 247–258.
33. Takaki Y., Yokouchi M. Speckle-free and grayscale hologram reconstruction using time-multiplexing technique // Opt. Express. 2011. V. 19. P. 7567–7579.
 34. Cakmakci O., Rolland J. Head-worn displays: a review // J. Disp. Technol. 2006. V. 2. P. 199–216.
 35. Wu W., Blaicher F., Yang J., Seder T., Cui D. A prototype of landmark-based car navigation using a full-windshield head-up display system // Proc. Workshop on Ambient Media Computing. ACM 2009. P. 21–28.
 36. Barnum P.C., Narasimhan S.G., Kanade T. A multilayered display with water drops // ACM Trans. Graph. 2010. V. 29. P. 76.
 37. Сайт Advanced Institute of Science and Technology. Режим доступа http://www.aist.go.jp/aist_e/latest_research/2006/20060210/20060210.html.
 38. Suyama S., Ishigure Y., Takada H., Nakazawa K., Hosohata J., Takao Y., Fujikao T. Apparent 3-D image perceived from luminance-modulated two 2-D images displayed at different depths // Vision Res. 2004. V. 44. P. 785–793.
 39. Redert A., de Beeck M.O., Fehn C., Ijsselsteijn W., Pollefeys M., Van Gool L., Ofek E., Sexton I., Surman P. Advanced three-dimensional television systems technologies // Proc. First Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization and Transmission. 2002. P. 313–319.
 40. Otsuka R., Hoshino T., Horry Y. Transpost: 360-viewable three-dimensional display system // Proc. IEEE. 2006. V. 94. № 3. P. 629–635.
 41. Matsushima K., Arima Y., Nakahara S. Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects // Appl. Opt. 2011. V. 50. P. H278–H284.
 42. Son J.-Y., Javidi B., Kwack K.-D. Methods for displaying three-dimensional images // Proc. IEEE. 2006. V. 94. № 3. P. 502–523.
 43. Сайт компании IO2 Technology. Режим доступа <http://www.io2technology.com/media/heliodisplay-brochure.pdf>.
 44. Subbarao M., Choi T.S. Accurate recovery of three dimensional shape from image focus // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1995. V. 17. №. 3. P. 266–274.
 45. Minhas R., Mohammed A.A., Wu Q.M.J. Shape from focus using fast discrete curvelet transform // Pattern Recognition. 2011. V. 44. № 4. P. 839–853.
 46. Gorthi S.S., Rastogi P. Fringe projection techniques: Whither we are? // Opt. Lasers Eng. 2010. V. 48. P. 133–140.
 47. Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques // Opt. Lasers Eng. 2010. V. 48. P. 149–158.
 48. Huntley J.M., Ogundanaa T., Burgueteb R.L., Coggravec C.R. Large-scale full-field metrology using projected fringes: some challenges and solutions // Proc. SPIE. 2007. V. 6616. P. 66162C-1.
 49. Richards J.A., Jia X. Remote sensing digital image analysis, an introduction. Berlin: Springer-Verlag, 1999.
 50. Gruninger J., Sundberg R.L., Fox M.J., Levine R., Mundkowsky W.F., Salisbury M.S., Ratcliff A.H. Automated optimal channel selection for spectral imaging sensors. In: Algorithms for Multispectral and Hyperspectral Imagery VII // Proc. SPIE. 2001. V. 4381. P. 4381–07.
 51. Fantin A.V., Albertazzia A., Pintoa T.L. An efficient mesh oriented algorithm for 3D measurement in multiple camera fringe projection // Proc. SPIE. 2007. V. 6616. P. 66161B-1.
 52. Mackay M., Fenton R.G., Benhabib B. Time-varying-geometry object surveillance using a multi-camera active-vision system // Int. J. Smart Sensing and Intelligent Systems. 2008. V. 1. № 3. P. 679–704.
-