

**ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

УДК 681.7.069.32

**Ю.С. Бехтин, А.А. Брянцев****КОМПРЕССИЯ ЗАШУМЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
В БИБЛИОТЕКЕ ВЕЙВЛЕТ-КОДЕКОВ**

*Предлагается использовать библиотеку вейвлет-кодексов для компрессии зашумленных изображений при передаче по линиям связи с ограниченной пропускной способностью. Предложен алгоритм автоматического выбора кодека из библиотеки с максимально возможным пиковым отношением сигнал-шум по заданным значениям скорости кодирования и дисперсии шума. Результаты моделирования показали похожее, но не идентичное поведение кодексов при аддитивном и мультипликативном шуме на изображениях.*

**Ключевые слова:** вейвлет-преобразование, вейвлет-кодек, компрессия зашумленных изображений.

**Введение.** Довольно часто решение проблемы передачи зашумленных изображений по каналам связи с ограниченной пропускной способностью осуществляют путем их предварительной обработки. Одна из основных задач такой обработки состоит в согласовании результатов фильтрации зашумленного изображения с последующей компрессией. Недостатки такого подхода очевидны. Альтернативой является вейвлет-обработка сигналов, где и фильтрация, и сжатие данных одновременно выполняются путем порогового отсека вейвлет-коэффициентов [1-3].

В работах R.M.Mercereau [4], В.В.Лукина и др. [5] показано, что для каждого вейвлет-кодека можно найти «оптимальную рабочую точку» (*OOP* – optimal operation point) – скорость кодирования *BR* (bit rate), определяемую через среднее число бит на пиксель *BPP* (bit per pixel), при которой достигается максимальное значение пикового отношения сигнал-шум (*PSNR* – peak signal-to-noise ratio). Данное свойство объясняется тем, что все вейвлет-кодеки содержат нулевую зону (*dead zone*) – расширенный интервал квантования с нулевым центром, где вейвлет-коэффициенты обнуляются, чем и достигается эффект шумоподавления. Таким образом, если для восьмиразрядных изображений известна или оценена дисперсия шума  $\sigma^2$ , то подбором показателя *BPP* для конкретного кодека можно добиться наилучшего шумоподавления в восстановленном после компрессии изображении, то

есть  $PSNR_{\max} = 20 \lg(255 / \sqrt{\sigma^2})$ . Например, при  $\sigma^2 = 400$  имеем  $PSNR_{\max} = 22,11$  дБ. Однако при ограниченной пропускной способности канала связи теоретическое значение *OOP* может существенно отличаться от допустимой скорости кодирования для данного кодека, но может оказаться близким для другого вейвлет-кодека. В связи с этим возникает идея использовать не один вейвлет-кодек, а некоторый набор вейвлет-кодексов, где для каждой конкретной ситуации при заданных *BR* и дисперсии шума  $\sigma^2$  обеспечивается значение *PSNR* близкое к теоретическому  $PSNR_{\max}$ .

**Цель работы** – разработка алгоритма автоматического выбора вейвлет-кодека из заданной библиотеки кодексов, обеспечивающего наилучшее объективное качество восстановления зашумленных изображений в смысле максимума *PSNR* при компрессии с ограниченной скоростью кодирования. В данной статье приводятся результаты проведенных исследований для компрессии искаженных мультипликативным шумом изображений различных классов с помощью известных вейвлет-кодексов EZW (*Embedded Zerotree Wavelet coding*), JPEG2000, SPIHT (*Set Partitioning in Hierarchical Trees*) [1-3].

**Теоретическая часть.** Разработка и использование алгоритма выбора вейвлет-кодека из библиотеки для компрессии зашумленных изображений базируются на статистических данных,

полученных при моделировании и оценке эффективности кодеков для тестовых изображений. Будем предполагать, что такие данные имеются в виде усредненных зависимостей пикового отношения сигнал-шум от скорости кодирования при разных дисперсиях шума. Полученные зависимости оформлены в виде таблиц некоторой базы данных, ячейки которой содержат название применяемого кодека. Описание проведенных экспериментов для библиотеки вейвлет-кодеков, состоящей из EZW-, JPEG2000- и SPIHT-кодеков, приводится в следующем разделе данной статьи.

Алгоритм выбора вейвлет-кодека из заданной библиотеки кодеков при компрессии зашумленного изображения заключается в выполнении следующих шагов.

1. Задается значение дисперсии шума  $\sigma^2$  на изображении. Если значение дисперсии шума  $\sigma^2$  неизвестно, то необходимо провести ее оценку. Оценка дисперсии шума может быть получена различными способами. Известны «слепые» методы, например [1, 5], использующие статистики входного изображения, но требующие рутинных вычислительных процедур. Для получения экспресс-оценки дисперсии шума можно воспользоваться известным соотношением  $\sigma^2 = 0,645 \text{Median}(HH_1)$ , где находится арифметическое среднее вейвлет-коэффициентов в высокочастотной субполосе быстрого вейвлет-преобразования изображения на втором уровне [1].

2. Оператором задается максимально допустимая скорость кодирования  $BR_{зад}$ , которая определяется пропускной способностью канала связи. На практике чаще встречаются случаи сильного сжатия, когда скорость кодирования  $BR$  лежит в пределах 0,1-1,0 *BPP* (бит/пиксель).

3. По заданным значениям  $BR_{зад}$  и  $\sigma^2$  выбирается название вейвлет-кодека из таблицы, которая находится в базе данных и содержит названия вейвлет-кодеков из библиотеки, соответствующих различным комбинациям скорости кодирования и дисперсии шума.

4. Определяется скорость кодирования  $BR_{код}$ , исходя из условия  $|BR_{зад} - BR_{опт}| \leq \Delta$ , где  $BR_{опт}$  – это скорость кодирования, соответствующая  $PSNR_{max}$ , то есть в таком случае достигается  $PSNR_{max}$ ;  $\Delta$  – допустимое отклонение от  $BR_{зад}$ , задаваемое заранее оператором. Данное отклонение характеризует некоторый «запас» по пропускной способности канала связи. Проведенные исследования показали, что отклонение

от  $BR_{зад}$ , равное  $\pm 5\%$ , практически не сказывается на работоспособности большинства каналов связи. Если условие выполняется, то  $BR_{код} = BR_{опт}$ .

5. Если отклонение от  $BR_{зад}$  превышает допустимое значение  $\Delta$ , то необходимо скорректировать скорость кодирования на величину  $\Delta$  в сторону приближения к  $BR_{опт}$  для данного кодека, то есть положить  $BR_{код} = BR_{зад} \pm \Delta$ . Увеличение или уменьшение  $BR_{зад}$  определяется знаком полученного отклонения  $\Delta$ .

6. Производится кодирование с помощью алгоритма работы выбранного кодека на рассчитанной скорости кодирования  $BR_{код}$ . Сжатое изображение в виде потоков бит закодированных вейвлет-коэффициентов передается по линии связи. Передаваемые данные содержат название (номер) кодека из библиотеки, параметры кодирования для восстановления изображения на приемной стороне канала связи.

Принцип работы алгоритма иллюстрируется рисунком 1.

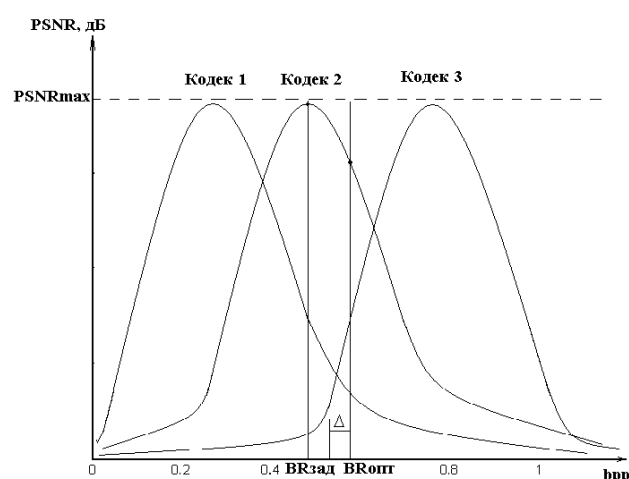


Рисунок 1 – Определение типа и скорости кодирования вейвлет-кодека

**Экспериментальная часть.** Для исследования вейвлет-кодеков EZW, JPEG2000, SPIHT при работе с зашумленными изображениями было проведено имитационное статистическое моделирование на ЭВМ в среде Matlab с использованием как собственных, так и свободно распространяемых в Интернет *m*-файлов с добавлением динамических библиотек на языке C++. С помощью датчиков случайных чисел генерировался шум с нормальной и экспоненциальной плотностью вероятности с единичным средним и дисперсией, изменяемой в ходе эксперимента. Смоделированный шум накладывался на оригинальные тестовые изображения, в частности изображение самолета «F16» (рисунок 2), кото-

рые были нормализованы. Искаженное мультипликативным экспоненциальным шумом с дисперсией  $\sigma_u^2 = 400$  изображение «F16» показано на рисунке 3. Для сравнения применялся известный алгоритм сжатия JPEG.



Рисунок 2 - Изображение «F16»



Рисунок 3 - Зашумленное экспоненциальным мультипликативным шумом изображение «F16»,  $\sigma^2 = 400$

Результаты экспериментов представлены в виде зависимостей  $PSNR$  от скорости кодирования, полученных для различных кодеков. На рисунках 4, 5 приведены зависимости  $PSNR$  от скорости кодирования для вейвлет-кодека JPEG2000 при различных дисперсиях шума с экспоненциальной и гауссовской плотностью вероятности для изображения «F16». Из рисунков 4, 5 видно, что при сильных шумах на низких скоростях кодирования ( $0,05 - 0,3 BPP$ ) наблюдается максимум кривой (оптимальная рабочая точка  $ООР$ ), где достигается наилучшее шумоподавление, а при слабых шумах среднеквадратическое отклонение уменьшается с увеличением скорости кодирования. Таким образом, поведение кодеков мало зависит от вида плотности вероятности мультипликативного шума.

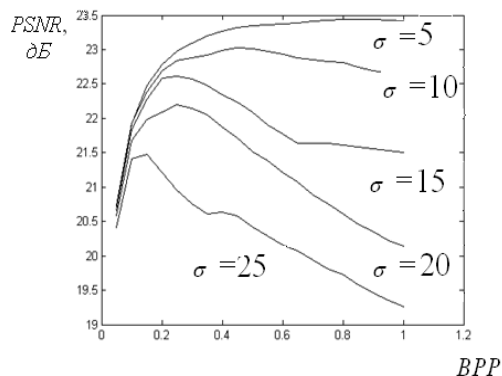


Рисунок 4 - Зависимость  $PSNR$  от скорости кодирования при разных интенсивностях экспоненциального шума для изображения «F16»

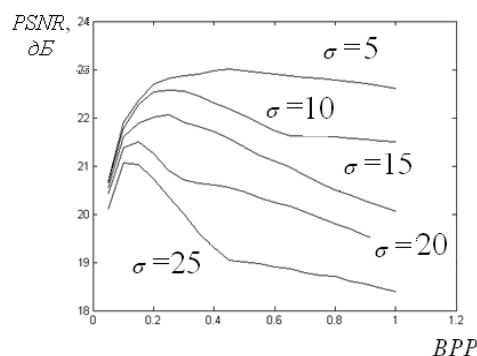
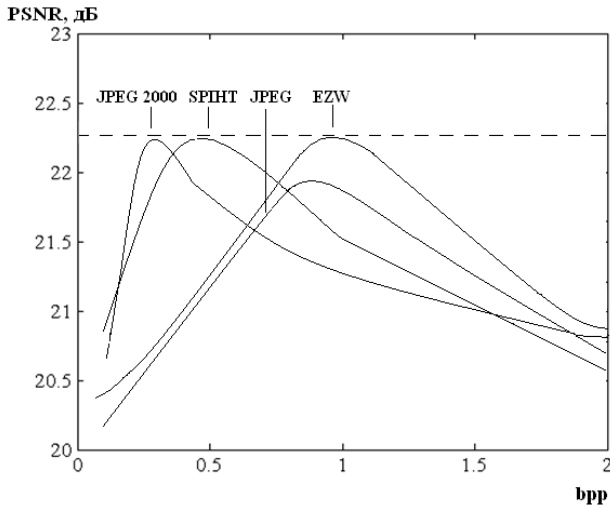


Рисунок 5 - Зависимость  $PSNR$  от скорости кодирования при разных интенсивностях нормального шума для изображения «F16»

Аналогичные данные были получены для зашумленных изображений, сохранены в формате JPEG с разными степенями сжатия и обработаны кодеками EZW, SPIHT при различных скоростях кодирования. Значения  $PSNR$  вычислялись после нормализации и усреднения данных по нескольким изображениям. На рисунке 5 показаны зависимости изменения  $PSNR$  от скорости кодирования для разных вейвлет-кодеков и алгоритма JPEG при интенсивности мультипликативного шума  $\sigma^2 = 400$ . Из рисунка 6 видно, что алгоритмы SPIHT и JPEG2000 обеспечивают максимальные значения  $PSNR$  при низких скоростях кодирования ( $0,15 \div 1,3 BPP$ ), в то время как алгоритм EZW выигрывает на высоких скоростях кодирования. У всех вейвлет-кодеков есть преимущество перед JPEG по  $PSNR$  на низких скоростях кодирования.

Визуальное качество обработки зашумленного экспоненциальным мультипликативным шумом изображения «F16» иллюстрируется рисунками 7-9, которые были получены соответствующими кодеками на оптимальной в смысле максимума  $PSNR$  скорости кодирования. Из рисунков 7-9 видно, что сильное сглаживание шума наблюдается для кодеков SPIHT и

JPEG2000. Для кодека EZW характерно наличие артефактов, излишнего подчеркивания контуров объектов. Сохранение зашумленного изображения в формате JPEG даже при степени сжатия, обеспечивающей максимальное  $PSNR$ , сопровождается появлением блочных артефактов.



**Рисунок 6 - Зависимости  $PSNR$  от скорости кодирования для разных вейвлет-кодеков при  $\sigma^2=400$**



**Рисунок 7 - Изображение «F16», обработанное алгоритмом JPEG: экспоненциальный шум,  $\sigma^2=400$ , степень сжатия 20:1**

Для оценки визуального качества восстановленных после компрессии тестовых изображений применялся индекс структурного сходства SSIM (*Structural SIMilarity*). Значения индексов для изображений, сжатых вейвлет-кодеками на скорости кодирования  $BR_{opt}$ , всегда оказывались больше значений SSIM, полученных для других скоростей кодирования.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность применения вейвлет-кодеков для компрессии искаженных мультипликативным шумом изображений без предвари-

тельной обработки (фильтрации). Для каждого вейвлет-кодека, как и при аддитивном гауссовом шуме [5], существует своя  $OOP$ , при которой достигается максимум  $PSNR$ . Закон распределения мультипликативного шума практически не влияет на достигаемое  $PSNR$ , причем с увеличением дисперсии шума при достижении  $PSNR_{max}$  происходит уменьшение скорости кодирования, то есть при сильных шумах целесообразно использовать низкие скорости кодирования. Визуальное качество восстановленных после компрессии зашумленных изображений зависит от типа вейвлет-кодека и интенсивности шума. Таблица иллюстрирует результат усреднения статистических данных по применению различных кодеков из библиотеки для обоснованного выбора вейвлет-кодека по разработанному алгоритму.



**Рисунок 8 - Изображение «F16», обработанное кодеком SPIHT: экспоненциальный шум,  $\sigma^2=400$ ; 0,3 BPP**



**Рисунок 9 - Изображение «F16», обработанное кодеком JPEG2000: экспоненциальный шум,  $\sigma^2=400$ ; 0,25 BPP**

Детальное сравнение результатов экспери-

ментальных исследований, частично представленных в данной статье, с результатами, опубликованными в [5], показывает, что в целом поведение вейвлет-кодексов практически одинаково как для аддитивного гауссовского шума, так и для мультипликативного шума с различными законами распределения. Однако о полной идентичности говорить нельзя; в частности, у кодексов EZW и JPEG2000 наблюдаются значительные расхождения в значениях  $OOP$  для изображений при шумах с одинаковой дисперсией. Поэтому на практике, если существует такая возможность, перед использованием вышеприведенного разработанного алгоритма необходимо уточнить характер искажающих воздействий на кодируемые изображения.

Таблица – Выбор вейвлет-кодека

$\sigma_{BR}$	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
0.1	JPEG 2000	JPEG 2000	JPEG 2000	JPEG 2000	JPEG 2000
0.2	JPEG 2000	JPEG 2000	JPEG 2000	JPEG 2000	SPIHT
0.3	SPIHT	SPIHT	SPIHT	SPIHT	JPEG 2000
0.4	SPIHT	SPIHT	SPIHT	SPIHT	SPIHT
0.5	SPIHT	SPIHT	SPIHT	EZW	SPIHT
0.6	SPIHT	SPIHT	EZW	EZW	EZW
0.7	SPIHT	EZW	EZW	EZW	EZW
0.8	EZW	EZW	EZW	EZW	EZW
0.9	EZW	EZW	EZW	EZW	EZW
1	EZW	EZW	JPEG 2000	JPEG 2000	JPEG 2000

**Заключение.** Проведенные в работе исследования показали возможность применения библиотеки вейвлет-кодексов для компрессии искаженных мультипликативным шумом изображений без предварительной обработки (фильтрации). Для каждого вейвлет-кодека, как и при аддитивном гауссовском шуме, существует скорость кодирования, при которой достигается максимальное значение пикового отношения сигнал-шум. Закон распределения мультипликативного шума практически не влияет на достигаемое максимальное значение пикового отношения сигнал-шум, причем с увеличением дисперсии шума при достижении максимального значения пикового отношения сигнал-шум происходит уменьшение скорости кодирования, то есть при сильных шумах целесообразно использовать низкие скорости кодирования. Следовательно, при каналах с низкой пропускной способностью нет необходимости применять предварительную фильтрацию зашумленного изображения, поскольку заданная пропускная способность канала связи оказывается близкой к оптимальной рабочей точке вейвлет-кодексов. Визуальное качество восстановленных после компрессии зашумленных изображений зависит от типа вейвлет-кодека и интенсивности шума.

Данная работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы», номер контракта П1366.

#### Библиографический список

1. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. - М.: Мир, 2005. - 671 с.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. - М.: Техносфера, 2006. - 1072 с.
3. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. - С.-Петербург. ВУС, 1999. - 204 с.
4. Al-Snaykh O.-K, Mercereau R.M. "Lossy Compression of Noisy images," IEEE Trans. on Image Processing, Vol.7, Nr.12, 1998, P.1641-1652.
5. Ponomarenko N., Lukin V., Zriakhov M., Egiazarian K., and Astola J. "Lossy compression of images with additive noise," in Proceedings of the 7th International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS '05), vol. 3708 of Lecture Notes in Computer Science, P. 381-386, 2005.

УДК 004.932:528.852

**А.Е. Кузнецов**

## СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

*Рассматриваются математические модели и алгоритмы обработки изображений и навигационной информации, лежащие в основе построения*

*систем геопривязки, каталогизации и формирования выходных информационных продуктов по данным от российских и зарубежных систем дистанционного зондирования Земли.*

**Ключевые слова:** модели геопривязки спутниковых изображений, алгоритмы сегментации облачности, формирования цветосинтезированных изображений и стереообработки.

**Введение.** В настоящее время в НИИ обработки аэрокосмических изображений РГРТУ ведутся масштабные опытно-конструкторские работы с ведущими предприятиями Федерального космического агентства и Росгидромета в части создания наземных средств обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Одно из направлений таких работ связано с проектированием систем геопривязки и каталогизации спектрально-информационной информации, а также систем формирования выходных информационных продуктов различных уровней обработки. Так, по заказам НИИ точных приборов и ЦСКБ-Прогресс разработаны системы каталогизации и формирования выходных продуктов от космических аппаратов (КА) высокодетального наблюдения земной поверхности («Аркон», «Монитор-Э», «Ресурс-ДК»). В рамках совместных работ с ОАО «Российские космические системы» проектирование аналогичных систем выполнено для КА среднего пространственного разрешения («Метеор-ЗМ», «Метеор-М» №1 и др.). По работам с НИЦ «Планета» разработаны высокоавтоматизированные технологии построения карт облачности и ледовой обстановки по данным гидрометеорологических спутников глобального наблюдения отечественного и зарубежного производства («Электро-Л», MeteoSat, NOAA и др.), а по работам с Центром Научно-технологических спроектированы системы обработки многоцелевой информации от аэросъёмочного комплекса наблюдения. В предлагаемой вниманию статье даётся обобщение проблемных вопросов, решение которых позволило спроектировать и внедрить в эксплуатацию перечисленные системы в ряде отечественных и зарубежных центров приёма и обработки информации ДЗЗ.

**Системы геопривязки и каталогизации спутниковой информации.** Для КА среднего и высокодетального наблюдения каталогизация является первой технологической операцией наземной обработки данных ДЗЗ, в ходе которой выполняется геокодирование маршрутов съёмки, оценка качества информации, формирование метаданных и их занесение в базу данных (БД) электронного каталога. После этого становятся доступными сведения об отснятых территориях и принимается решение о необходимости пов-

торной съёмки. Исследования известных систем подобного рода показали недостаточную развитость в них средств координатно-временного обеспечения, оценки качества информации с точки зрения облачного затенения и механизмов поиска и отображения хранящихся в БД изображений. В результате для последующей обработки используются маршруты съёмки, не соответствующие заданным географическим координатам, и поиск требуемой информации в БД оказывается весьма затруднительным.

В этой связи основными направлениями научных исследований по созданию эффективных систем геопривязки и каталогизации являются:

- разработка математического обеспечения геокодирования протяжённых маршрутов съёмки от различных видеодатчиков и навигационных средств КА;

- разработка высокоскоростных и надёжных алгоритмов выделения на изображении облачных объектов;

- разработка базирующихся на принципах негеографии современных средств доступа к хранилищам спутниковых изображений.

Математическая модель координатной привязки спутниковых изображений включает: геометрическую модель съёмочной системы, задаваемую вектором  $\mathbf{r}(t)$ ; модель орбитального движения центра масс КА, описываемую вектором  $\mathbf{\eta}(t)$ ; модель движения съёмочной системы вокруг центра масс и модель Земли. В общем виде модель геопривязки пикселя с координатами  $(m, n)$  для момента времени  $t$  представляется уравнениями:

$$\begin{aligned} \varphi &= \Phi_{\varphi}(m, n, h, \mathbf{r}, \mathbf{\eta}, \mathbf{\Omega}, \mathbf{e}), \\ \lambda &= \Phi_{\lambda}(m, n, h, \mathbf{r}, \mathbf{\eta}, \mathbf{\Omega}, \mathbf{e}), \end{aligned} \quad (1)$$

$$t = t_0 + \frac{m}{\nu} + nT,$$

где  $(\varphi, \lambda)$  – геодезические координаты пикселя;  $h$  – высота точки на местности;  $\mathbf{\Omega} = [\alpha, \omega, \chi]^T$  – вектор углового положения съёмочной системы,  $\mathbf{e}$  – вектор, описывающий параметры земного эллипсоида;  $t_0$  – время начала сканирования;  $\nu, T$  – строчная частота и время формирования элемента строки.

Для случая кеплеровской модели полёта КА, характерной для высокоорбитальных спутников, функции  $\Phi_\varphi, \Phi_\lambda$  находятся путем решения векторного уравнения

$$\mathbf{R}_c(t) = \mathbf{A}\mathbf{A}_G\mathbf{A}_i\mathbf{A}_u(\boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{A}_c(t)\mathbf{A}_y\mathbf{r}(t)), \quad (2)$$

где  $\mathbf{R}_c = [X, Y, Z]^T$  – вектор, задающий положение пикселя на земной поверхности в гринвичской геоцентрической системе координат, однозначно связанной с параметрами  $(\varphi, \lambda)$ ;  $\mathbf{A}, \mathbf{A}_G, \mathbf{A}_i, \mathbf{A}_u$  – матрицы переходов, учитывающие вращение Земли, наклонение орбиты, аргумент широты КА;  $\mathbf{A}_c, \mathbf{A}_y$  – матрицы, характеризующие связь систем координат камеры, конструктивных осей КА и угловых элементов внешнего ориентирования. Разработаны математические модели для однолучевых, многоэлементных и скановых сканирующих устройств, описываемых единичным вектором  $\mathbf{r}^0 = [x^0, y^0, z^0]^T$ . Так, для датчиков сканового типа МСУ-В компоненты вектора  $\mathbf{r}^0$  определяются выражением

$$\mathbf{r}^0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_x + \operatorname{tg}^2 \alpha_z}} \begin{bmatrix} -\operatorname{tg} \alpha_x + 2c \sin \beta_k \cos \beta_s \\ 1 + 2c \cos \delta \\ -\operatorname{tg} \alpha_z + 2c \sin \delta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $\beta_s, \beta_k, c, \alpha_x, \alpha_z, \delta$  – параметры, характеризующие геометрию сканирования, а для многоэлементного сканера КМСС, установленного на КА «Метеор-М», эти же компоненты равны

$$\mathbf{r}^0 = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} (x_0 + dn) \cos \alpha_0 - y_0 \sin \alpha_0 \\ (x_0 + dn) \sin \alpha_0 + y_0 \cos \alpha_0 \\ -f \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $f$  – фокусное расстояние сканера;  $\Delta$  – нормирующий множитель;  $(x_0, y_0)$  – координаты главной точки;  $d$  – размер светочувствительного элемента;  $\alpha_0$  – угол, задающий смещение линейки фотоприёмников в фокальной плоскости.

Для спутниковых систем высокоточного наблюдения, в том числе и для КА типа «Метеор-М», измерение элементов внешнего ориентирования съёмочного устройства  $(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\Omega})$  осуществляется с помощью аппаратуры GPS/ГЛОНАСС и звёздных координаторов. Поэтому для высокоточного определения параметров модели (1) необходимо решить дополнительные задачи, связанные с фильтрацией измерений и их комплексированием. Для этого варианта предложена модель геометрического функционирования сканера, описывающая в полино-

миальном виде компоненты вектора направляющих косинусов визирного луча в зависимости от номера светочувствительного элемента  $n$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_c(t) &= \boldsymbol{\eta}(t) + \left| \mathbf{r}_{c\gamma}^0 \right| \mathbf{r}_{c\gamma}^0(m, n), \\ \mathbf{r}_{c\gamma}^0(m, n) &= \mathbf{R}_K(t) \mathbf{A}_\gamma \mathbf{n}, \\ \mathbf{A}_\gamma &= [a_{\gamma 0}, a_{\gamma 1}, \dots, a_{\gamma N}], \\ \mathbf{n} &= [1, n, n^2, \dots, n^N]^T, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\gamma$  – номер спектрального канала;  $\mathbf{R}_K(t)$  – матрица, задающая ориентацию звёздного координатора в гринвичской системе координат.

В отличие от известных подходов модель (5) комплексно учитывает влияние сложных геометрических искажений, обусловленных неточным заданием компонентов вектора  $\mathbf{r}^0$ , дисторсией оптики и ошибками определения установочных углов измерительной и съёмочной аппаратуры, что позволяет сократить число неизвестных параметров, которые учитываются в ходе геометрической калибровки по опорным точкам.

Для коррекции ошибок геопривязки маршрутов съёмки разработана технология оперативного уточнения параметров модели (1). Согласно этой технологии на основе уравнений (1) для каждой опорной точки  $(\varphi, \lambda, h)_i$ , отождествлённой по карте, составляются линеаризованные уравнения

$$\boldsymbol{\Psi}_i \mathbf{P}_{\eta\Omega} = \mathbf{L}_i + \nabla_i, \quad (6)$$

где  $\boldsymbol{\Psi}_i$  – матрица частных производных измеряемых величин  $(\varphi, \lambda, h)_i$  по корректируемым параметрам, заданным векторами  $\boldsymbol{\eta}$  и  $\boldsymbol{\Omega}$ ;  $\mathbf{P}_{\eta\Omega} = [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \alpha, \Delta \omega, \Delta \chi]^T$  – вектор поправок к определяемым параметрам модели,  $\mathbf{L}_i$  – вектор свободных членов;  $\nabla_i$  – вектор, определяющий рассогласования между вычисленными и измеренными координатами опорных точек. Решая уравнение (6) методом Ньютона в сочетании со способом наименьших квадратов, находим исходные поправки к орбитальному и угловому движению КА.

Таким образом, соотношения (1) – (6) составляют основу математического обеспечения координатной привязки маршрутов съёмки от различных спутниковых систем.

Важным компонентом качества изображений ДЗЗ является коэффициент, определяющий степень покрытия наблюдаемой территории облачностью. Несмотря на кажущуюся простоту, данная задача представляет собой серьёзную проблему, поскольку требуется очень надёжно и с высокой скоростью отсегментировать на изоб-

ражении облачные объекты.

В случае спектрозональной съёмки для оценки облачных объектов был предложен колориметрический алгоритм, основная идея которого основана на распознавании облака как серого объекта с несколькими градациями яркости:

$$\bigcap_{\gamma=1,2,3} |B_{\gamma}(m,n) - \bar{B}(m,n)| < \Delta_b = TRUE, \quad (7)$$

где индекс  $\gamma$  задаёт компонент цветного снимка с нормализованным диапазоном яркости  $B_{\gamma}(m,n)$ ;  $\bar{B}(m,n) = \frac{1}{3} \sum_{\gamma=1,2,3} B_{\gamma}(m,n)$ ,  $\Delta_b$  – значение порога.

Использование данного алгоритма для панхроматических изображений показало его крайне низкую эффективность независимо от способа определения порога  $\Delta_b$ . Поэтому перспективным является подход по сегментации, основанный на модифицированном методе  $k$ -средних с обучением и использующий критериальную функцию метрической близости пикселей  $V(m_i, n_i, m_{i+1}, n_{i+1})$ , [1]:

$$\begin{aligned} V(m_i, n_i, m_{i+1}, n_{i+1}) = & \\ = & \left| \bar{B}(m_i, n_i) - \bar{B}(m_{i+1}, n_{i+1}) \right| + & (8) \\ + & k \left| E(m_i, n_i) - E(m_{i+1}, n_{i+1}) \right|, \end{aligned}$$

где  $\bar{B}(m,n)$ ,  $E(m,n)$  – средняя яркость и энтропия, рассчитанные в квадратной апертуре,  $k$  – весовой коэффициент для учёта энтропии.

В случае если при многозональной съёмке используется принцип пространственного разделения потока лучистой энергии по линейкам фотоприёмных устройств, то появляется уникальная возможность сегментации облачности с использованием стереофотометрической обработки спектрозональных снимков [2]. Идея метода будет рассмотрена ниже.

Проведённые исследования современных подходов по построению интерфейсов удалённого доступа к хранилищам видеоданных показали, что наиболее эффективным решением для пользователей является предоставление им возможности навигации по трёхмерной модели земного шара с нанесёнными на его поверхность спутниковыми изображениями. Объёмное отображение геокодированных снимков происходит путём их трансформирования в прямоугольную систему координат OXYZ по схеме:

$$B(m,n) \xrightarrow{\Phi_{\varphi, \lambda}} (\varphi, \lambda) \xrightarrow{\mathbf{F}} B^*(X, Y, Z),$$

где  $\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$  – векторная функция преоб-

разования геодезических координат  $(\varphi, \lambda)$  в прямоугольные,  $B^*(X, Y, Z)$  – спутниковое изображение в прямоугольной системе координат.

При проектировании такого интерфейса возникает необходимость решения главного вопроса, связанного с обеспечением высокой скорости отображения на компьютере пользователя сверхбольших по объёму массивов видео- и метаданных, передаваемых по сети Internet. Для решения этой задачи разработаны алгоритмы пирамидального представления разбитых на гранулы растровых изображений, кэширования отображаемой информации и её многопроцессорной обработки [3]. На рисунке 1 представлено окно апплета Internet-портала, позволяющее просматривать изображения земной поверхности от КА «Метеор-М» №1.

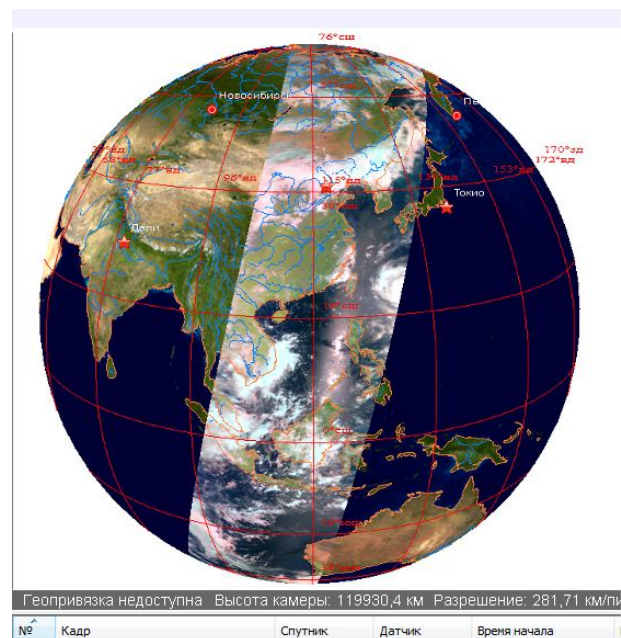


Рисунок 1 – Главное окно Internet-портала визуализации спутниковых изображений

**Системы формирования выходных информационных продуктов.** Согласно мировой практике ДЗЗ под выходным информационным продуктом понимается геокодированное изображение земной поверхности с устранёнными яркостными и геометрическими искажениями и трансформированное в картографическую проекцию согласно уравнениям  $x = F_x(\varphi, \lambda)$ ,  $y = F_y(\varphi, \lambda)$ , где  $x, y$  – картографические координаты пикселя;  $F_x, F_y$  – уравнения картографического проектирования. Дополнительно к выходным продуктам относятся 3D-модели местности и тематические карты, полученные по результатам дешифрирования материалов съём-



ки. Из всего многообразия решаемых в системах формирования выходной продукции задач рассмотрим три наиболее остро стоящие. Первая заключается в формировании цветных изображений, вторая – в получении 3D-моделей земной поверхности по данным одновитковой или конвергентной стереосъёмки. Третья задача заключается в разработке технологий получения тематических карт.

В космических системах «Метеор-М», «Ресурс-ДК», «Ресурс-П» и др. для получения спектрально-изобразительных изображений земной поверхности используются линейки (или матрицы) приёмников с зарядовой связью, установленные перпендикулярно к направлению полёта КА на некотором расстоянии друг от друга. В результате такой съёмки формируются геометрически искажённые друг относительно друга разновременные изображения  $B_\gamma(m, n)$ ,  $m = \overline{0, M_\gamma - 1}$ ,  $n = \overline{0, N_\gamma - 1}$ ,  $\gamma = 1, 2, 3$ . Технология синтеза цветного изображения  $S_\gamma(m, n)$  связана с решением двух проблемных вопросов: геометрического совмещения спектрально-изобразительных изображений  $B_\gamma$  и формирования RGB компонент снимка  $S_\gamma$  и включает следующие шаги.

Шаг 1. Уточнение моделей геопривязки  $\Phi_{\varphi\gamma}, \Phi_{\lambda\gamma}$  изображений  $B_\gamma$  по координатам одноимённых точек на базовом и совмещаемых снимках. Для высоконадёжной и быстрой идентификации одноимённых точек, имеющих случайные пространственные рассогласования значительной величины, разработан пирамидальный алгоритм корреляционно-экстремального отождествления (КЭО) фрагментов. Согласно этому алгоритму вначале по критерию дисперсии на снимке выделяются высокоинформативные фрагменты. Затем формируется пирамида разномасштабных фрагментов  $B_{\gamma s}$ , где  $s$  – уровень пирамиды, которые с помощью оператора Собела приводятся к контурному виду  $C : \rightarrow B_{\gamma s} \rightarrow \tilde{B}_{\gamma s}$ . После чего, начиная с верхнего уровня пирамиды, происходит последовательное отождествление одноимённых сюжетов с уточнением их взаимного рассогласования [4]. В конце используется комплекс проверок результатов КЭО, наиболее эффективным из которых является критерий совпадения результатов прямого и обратного корреляционного поиска.

Шаг 2. С использованием выражения (6) осуществляется уточнение моделей  $\Phi_{\varphi\gamma}$  и  $\Phi_{\lambda\gamma}$  и составляются уравнения взаимного геометрического соответствия совмещаемых изображений:

$$\begin{aligned} m_\gamma &= \Phi_{\varphi\gamma}^{-1}[\Phi_{\varphi 2}(\cdot), \Phi_{\lambda 2}(\cdot)], \\ n_\gamma &= \Phi_{\lambda\gamma}^{-1}[\Phi_{\varphi 2}(\cdot), \Phi_{\lambda 2}(\cdot)], \gamma = 1, 3, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\Phi_{\varphi\gamma}^{-1}, \Phi_{\lambda\gamma}^{-1}$  – функции обратного геодезического расчёта.

После нахождения обратных функций с помощью численных методов по соотношениям (9) осуществляется виртуальное геометрическое совмещение снимков.

Шаг 3. На данном шаге устраняются остаточные координатные рассогласования изображений, вызванные неучтёнными рельефными искажениями. Для этого на основе идентифицированных координат одноимённых точек строится триангуляционная сеть Делоне, которая автоматически загущается в областях со сложным рельефом местности. С целью исключения ошибок построения сети, вызванных движущимися объектами, предложена процедура фильтрации, основанная на анализе направления вектора смещения отождествлённых пикселей.

Для сокращения временных затрат геометрическое совмещение изображений  $B_\gamma$  по соотношениям (9) и по триангуляционной модели выполняется за один этап. При этом остаточные геометрические рассогласования спектрально-изобразительных компонент не превосходят 1-2 пикселей.

Шаг 4. Этот этап связан с формированием таких RGB компонент  $B_\gamma^*$ ,  $\gamma = \overline{1, 3}$ , которые позволяют устранить, во-первых, ложные цветовые контуры из-за остаточных геометрических рассогласований снимков и, во-вторых, цветовые артефакты, вызванные движущимися объектами. Представим геометрически совмещённые изображения  $B_\gamma^*$ ,  $\gamma = \overline{1, 3}$ , в матричном виде

$\mathbf{B}^* = [B_R^*, B_G^*, B_B^*]^T$ . Тогда алгоритм формирования нового изображения  $\mathbf{S} = [S_R, S_G, S_B]^T$  включает:

– преобразование снимка  $\mathbf{B}^*$  из цветового пространства RGB в пространство  $Y C_b C_r$ ,

$$\mathbf{Y} = \mathbf{M} \mathbf{B}^*, \quad \mathbf{Y} = [Y, C_b, C_r]^T, \quad Y = B_G^*;$$

– размытие цветовых компонент  $C_b$  и  $C_r$ , маской  $h$  размером  $j \times j$  элементов,  $C_b^* = C_b \otimes h_{j \times j}$ ,  $C_r^* = C_r \otimes h_{j \times j}$ ;

– синтез нового цветного изображения  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{S} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Y}^*$ ,  $\mathbf{Y}^* = [Y, C_b^*, C_r^*]^T$ , где  $\mathbf{M}, \mathbf{M}^{-1}$  – матрицы прямого и обратного преобразования цветового пространства.

Рассмотренная технология реализована в ряде программных систем по обработке изображений.

ражений от КА «Ресурс-ДК» и «Метеор-М». Высокие скоростные и точностные характеристики при синтезе цветных снимков позволяют значительно опередить работы других авторов в этом направлении.

Одним из новых и перспективных направлений научных исследований при создании систем формирования выходной продукции является проектирование технологий стереообработки сканерных изображений. Пусть даны два перекрывающихся геокодированных изображения  $B_1$  и  $B_2$ , снятые под разными углами к земной поверхности. Для восстановления по ним трёхмерной сцены необходимо, во-первых, установить координатное соответствие двух снимков и, во-вторых, рассчитать для каждой пары одноимённых точек их трёхмерные координаты.

Следует отметить, что для построения 3D-модели местности необходимо установить поэлементное соответствие изображений  $B_1$  и  $B_2$ . Использование для этих целей площадной взаимно-корреляционной функции  $K(B_1, B_2)$  отождествления одноимённых объектов приводит к осреднению значений взаимного смещения пикселей. Поэтому технология поиска одноимённых объектов, используемая при синтезе цветных изображений, подходит только для формирования достаточно грубых 3D-моделей. Для высокодетальной обработки необходимо уменьшать размеры отождествляемой области (в пределах до нескольких пикселей). Понятно, что при этом резко увеличивается доля ложно идентифицированных объектов и взаимные смещения пикселей находятся с ошибками. Рассматриваемая ниже технология позволяет преодолеть эти ограничения [2].

На первом этапе стереообработки выполняется геодезическое ориентирование снимков с привлечением одноимённых и опорных точек местности. В результате уточняются уравнения геопривязки изображений  $B_1$  и  $B_2$  и формируется новое изображение  $B_2^*(m_1, n_1)$ , подлежащее дальнейшему анализу:

$$B_2(m_2, n_2) \xrightarrow[n_1 = \Phi_{\lambda 1}^{-1}[\cdot]]{m_1 = \Phi_{\varphi 1}^{-1}[\cdot]} B_2^*(m_1, n_1).$$

На втором этапе определим взаимные сдвиги одноимённых объектов изображений  $B_1(m, n)$  и  $B_2^*(m, n)$  (здесь индексы у переменных  $m$  и  $n$  опущены), которые представим в виде карт диспарантностей  $D_m(m, n)$  и  $D_n(m, n)$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $n = \overline{1, N}$ , задающих в пикселях смещения в

кадровом и строчном направлениях соответственно. Для надежного отождествления используем алгоритм оптимизационного поиска, в соответствии с которым вначале сформируем изображение пространства диспарантности (ИПД)  $C(m, n, d_m, d_n)$ , где  $(d_m, d_n)$  – смещение координат точки  $(m, n)$  на изображении  $B_1$  относительно изображения  $B_2^*$ . Многомерное ИПД задает цену сопоставления каждого пикселя базового изображения с каждым пикселем сопряженного изображения в некоторой области поиска:

$$C(m, n, d_m, d_n) = 1 - K[B_1(m, n), B_2^*(m + d_m, n + d_n)]. \quad (10)$$

Затем для нахождения карт  $D_m$ ,  $D_n$  сформируем задачу минимизации:

$$(D_m, D_n) = \arg \min_{D_m, D_n} E(D_m, D_n),$$

$$E(D_m, D_n) = E_u(D_m, D_n) + E_z(D_m, D_n).$$

Здесь слагаемое  $E_u$  определяет, насколько карты  $D_m$ ,  $D_n$  согласуются с исходными изображениями:

$$E_u(D_m, D_n) = \sum_{m, n} C(m, n, D_m(m, n), D_n(m, n)).$$

Слагаемое  $E_z$  задает требование кусочной гладкости карт  $D_m$ ,  $D_n$ . Для уменьшения вычислительной сложности алгоритма функция  $E_z$  задается зависимой только от разности диспарантностей соседних пикселей:

$$\begin{aligned} E_z(D_m, D_n) = & \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^N \rho(D_m(m, n) - D_m(m+1, n), \\ & D_n(m, n) - D_n(m+1, n)) + \\ & + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N-1} \rho(D_m(m, n) - D_m(m, n+1), \\ & D_n(m, n) - D_n(m, n+1)), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\rho$  – функция штрафов.

Заметим, что данная задача является NP-полной, поэтому нахождение глобального минимума  $E$  аппроксимируем с помощью алгоритма полуглобального сопоставления, в соответствии с которым выполняется 1D-минимизация функции  $E$  с использованием принципа динамического программирования вдоль восьми направлений, задаваемых векторами  $\mathbf{u}_k = [u_{km}, u_{kn}]^T$ ,  $u_{km} \in \{0, \pm 1\}$ ,  $u_{kn} \in \{0, \pm 1\}$ . Цена  $L_k(m, n, d_m, d_n)$  для каждого пикселя вдоль направления  $k$  определяется рекурсивно:

$$\begin{aligned}
 L_k(m_j, n_j, d_m, d_n) = & C(m_j, n_j, d_m, d_n) + \\
 & + \min\{L_k(m_{j-1}, n_{j-1}, d_m, d_n), \\
 & L_k(m_{j-1}, n_{j-1}, d_m \pm 1, d_n) + p_1, \\
 & L_k(m_{j-1}, n_{j-1}, d_m, d_n \pm 1) + p'_1, \\
 & \min_{i,l} L_k(m_{j-1}, n_{j-1}, i, l) + p_2\}, \\
 m_j = & m_1 + (j-1)u_{km}, \quad n_j = n_1 + (j-1)u_{kn},
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

где  $p_1 < p'_1 < p_2$  – штрафы, накладываемые при изменении диспарантности между соседними пикселями.

Полученные для всех направлений цены суммируются, после чего для каждого пикселя выбираются диспарантности с минимальной ценой:

$$\begin{aligned}
 \Sigma(m, n, d_m, d_n) = & \sum_k L_k(m, n, d_m, d_n), \\
 (D_m(m, n), D_n(m, n)) = & \arg \min_{d_m, d_n} \Sigma(m, n, d_m, d_n).
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

На заключительном этапе на основе карт диспарантностей  $D_m, D_n$  вычислим трёхмерные координаты наблюдаемых на снимках  $B_1$  и  $B_2$  объектов. Для этого вначале значения  $(m_1 + D_m(m_1, n_1), n_1 + D_n(m_1, n_1))$  на основе функций обратного геодезического расчета преобразуем в систему координат изображения  $B_2$ :

$$\begin{pmatrix} m_1 + D_m(m_1, n_1) \\ n_1 + D_n(m_1, n_1) \end{pmatrix} \begin{matrix} \xrightarrow{m_2 = \Phi_{\phi_2}^{-1}[\cdot]} \\ \xrightarrow{n_2 = \Phi_{\lambda_2}^{-1}[\cdot]} \end{matrix} (m_2, n_2).$$

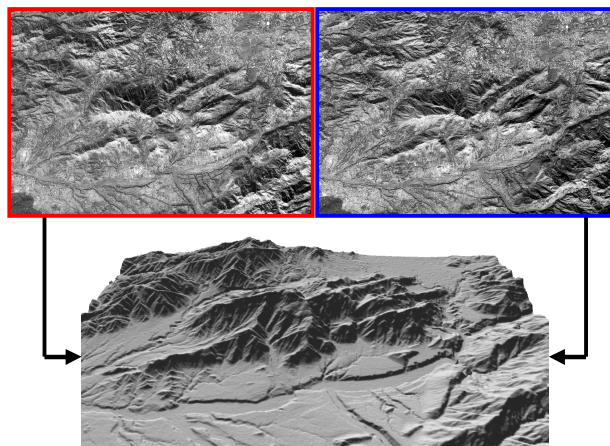
Затем для определения пространственного положения наблюдаемых объектов  $\mathbf{R}_z(X, Y, Z)$  составим систему векторных уравнений, задающих положение визирных лучей для пикселей  $B_1(m_1, n_1)$  и  $B_2(m_2, n_2)$  в гринвичской геоцентрической системе координат:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_z = \boldsymbol{\eta}_1 + |\mathbf{r}_1| \mathbf{r}_1^0, \\ \mathbf{R}_z = \boldsymbol{\eta}_2 + |\mathbf{r}_2| \mathbf{r}_2^0. \end{cases}
 \tag{14}$$

Из-за погрешностей ориентирования снимков данная система уравнений в общем случае не имеет решения. Поэтому вектор искоемых координат  $\mathbf{R}_z$  определим как среднюю точку кратчайшего отрезка  $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$ , соединяющего визирные лучи:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{r}_0 = & \frac{\mathbf{r}_1^0 \times \mathbf{r}_2^0}{|\mathbf{r}_1^0 \times \mathbf{r}_2^0|^2}, \quad \boldsymbol{\eta}_0 = \boldsymbol{\eta}_2 - \boldsymbol{\eta}_1, \\
 \mathbf{P}_1 = & \mathbf{r}_1^0 [(\boldsymbol{\eta}_0 \times \mathbf{r}_2^0) \cdot \mathbf{r}_1^0] + \boldsymbol{\eta}_1, \\
 \mathbf{P}_2 = & \mathbf{r}_2^0 [(\boldsymbol{\eta}_0 \times \mathbf{r}_1^0) \cdot \mathbf{r}_2^0] + \boldsymbol{\eta}_2, \\
 \mathbf{R}_z = & (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2)/2.
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

На рисунке 2 показан 3D-снимок местности, сформированный в результате стереообработки двух изображений от КА «Ресурс-ДК». Результаты исследований показали, что рассмотренная технология может успешно применяться при построении объёмных сцен ландшафтных территорий, а её дальнейшее развитие связано с возможностью формирования 3D-моделей инженерных объектов.

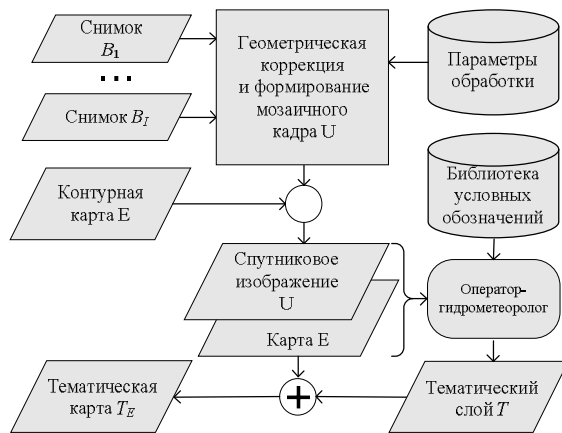


**Рисунок 2 – Пример 3D-модели местности, сформированной по изображениям КА «Ресурс-ДК»**

В НИЦ «Планета» уже несколько лет успешно функционируют реализованные в программной системе PlanetaMeteo технологии тематической обработки снимков от КА гидрометеорологического назначения. Рассмотренная ниже технология позволяет не только организовать сквозной тракт по обработке исходных изображений, но и за счёт наличия мощного инструментария по работе с библиотеками условных обозначений наладить эффективную работу специалиста-гидрометеоролога по формированию тематических карт [5].

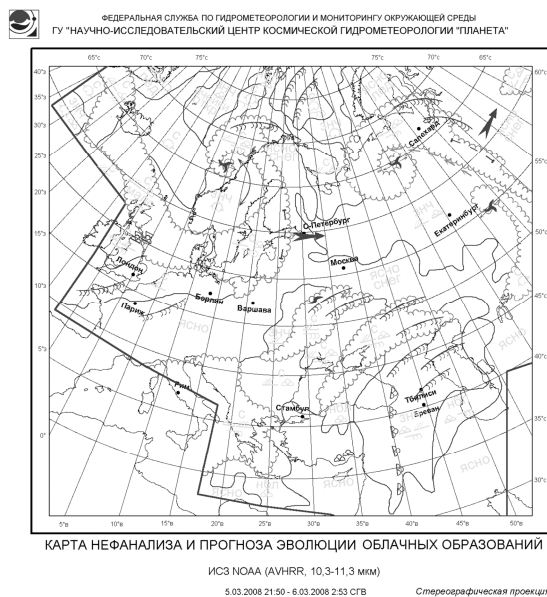
Поскольку тематическая карта формируется для конкретного региона, то первым шагом, как показано на рисунке 3, является геометрическая коррекция исходных спутниковых изображений  $B_i, i = \overline{1, I}$ , и преобразование их в картографическую проекцию. Преобразованные изображения объединяются в общий мозаичный кадр  $U$ . Далее мозаичный снимок  $U$  виртуально совмещается с растровой контурной картой  $E$  в многослойный растр, который отображается на экране монитора и анализируется оператором. Оператор, используя библиотеку условных обозначений, маркирует отдельные точки, оконтуривает интересующие области, осуществляет их «заливку текстурой» и т.п. Все условные обозначения наносятся на тематический слой  $T$ , который совпадает по размерам с изображением  $U$  и является по отношению к нему «прозрачным».

На последнем шаге формирования карты тематический слой  $T$  объединяется либо с контурной картой, либо с картой и мозаичным снимком  $U$ .



**Рисунок 3 – Технологическая схема формирования тематических карт**

На рисунке 4 приведен пример тематической карты облачных образований, которые в настоящее время формируются к заданным синоптическим срокам по данным спутников NOAA и «Метеор-М» №1.



**Рисунок 4 – Карта прогноза облачных образований**

УДК 621.382

**А.Н. Шестеркин**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ НА ГАЗОРАЗРЯДНЫХ МАТРИЧНЫХ ИНДИКАТОРАХ

*Рассмотрены аналитические методы, статистические модели и программы оценки надежности отображения информации на газоразрядных индикаторах, проведен их анализ. Сформулированы принципы построения*

**Заключение.** Рассмотренные в рамках настоящей статьи вопросы не охватывают всех направлений исследований. Так, например, активно ведутся работы по проектированию высокопроизводительных систем обработки на многомашиной и многопроцессорной вычислительной технике, созданию «безлюдных» технологий обработки данных ДЗЗ. Появление новых видов аппаратуры наблюдения, реализующих, например, кадрово-сканерный принцип съёмки и установленных на КА «Канопус-В», малом космическом аппарате фундаментальных космических исследований и др., требует развития и совершенствования методов и систем обработки получаемых материалов. Решение этих задач и составляет направление дальнейших исследований, проводимых в НИИ «Фотон».

### Библиографический список

1. *Ветров А.А., Кузнецов А.Е.* Сегментация облачных объектов на панхроматических изображениях земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2011. - № 3. - С. 17-27.
2. *Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И.* Информационная технология стереофотограмметрической обработки видеоданных от многоматричных сканирующих устройств // Цифровая обработка сигналов. 2010. - № 3. - С. 44-50.
3. *Ветров А.А., Кочергин А.М., Кузнецов А.Е.* Принципы построения геопортала спутниковых изображений, разрабатываемого в рамках международного проекта MEDEO // Цифровая обработка сигналов. 2011. - № 3. - С. 36-44.
4. *Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н.* Формирование цветных снимков по спутниковым изображениям среднего и высокого пространственного разрешения // Цифровая обработка сигналов. 2009. - № 3. - С. 36-40.
5. *Воронин А.А., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. и др.* Компьютерные технологии формирования гидрометеорологических карт по спутниковым изображениям // Исследования Земли из космоса. - 2009. - № 4. - С. 24-35.

высоконадежных способов и устройств развертывания и формирования изображений.

**Ключевые слова:** элемент отображения, время запаздывания зажигания, вероятность зажигания, подсвет.

**Введение.** Эффективное взаимодействие человека с техническими средствами обеспечивают устройства отображения информации. Основным элементом таких устройств являются индикаторы. В настоящее время одно из лидирующих положений сохраняют газоразрядные матричные индикаторы (ГМИ). На их основе строят как индивидуальные (мониторы), так и коллективные устройства отображения. Из-за значительных значений и большого разброса времени запаздывания возникновения разряда элементов отображения (ЭО) этих индикаторов, что свойственно, в первую очередь, отечественным ГМИ, в ряде случаев не обеспечивается необходимая надежность воспроизведения изображений.

Рациональное проектирование устройств отображения информации на основе ГМИ, оценка характеристик способов и устройств формирования изображений и самих индикаторов затруднены из-за отсутствия методов оценки надежности формирования изображений. *Цель исследований* – разработать методы оценки надежности изображений, воспроизводимых на ГМИ, на основе этих оценок провести анализ и предложить принципы формирования изображений, реализация которых обеспечит повышение надежности отображения информации.

**Теоретическая часть.** После подачи управляющего напряжения разряд в элементе отображения ГМИ происходит при появлении «удачного» электрона или метастабильной частицы, т. е. зажигание элемента происходит в случайный момент времени. Зажигание каждого из элементов на интервале времени  $[0, t]$  будем оценивать вероятностью того, что случайная величина задержки возникновения разряда  $\tau$  окажется меньше чем  $t$ , то есть

$$P(t) = P(\tau < t).$$

Вероятность зажигания является функцией распределения времени запаздывания зажигания, а производная от нее – плотность распределения времени запаздывания возникновения разряда  $f(t)$ . Очевидно  $P(t) = \int_0^t f(t) dt$ , а  $1 - P(t) = Q(t)$  – вероятность незажигания ЭО.

Для оценки надежности зажигания элементов используется и интенсивность зажигания элемента  $\lambda(t) = \frac{P'(t)}{Q(t)} = \frac{f(t)}{Q(t)}$ . Из последнего

выражения можно также определить вероятность зажигания  $P(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \lambda(x) dx\right]$ . Показателем надежности зажигания элементов отображения является и среднее время (математическое ожидание) запаздывания возникновения разряда, равное  $m_\tau = T_0 = \int_0^\infty Q(\tau) d\tau$ , т. е. среднее время запаздывания возникновения разряда равно площади под кривой  $Q(\tau)$ .

Надежность воспроизведения некоторого изображения на интервале времени  $[0, t]$  определяется вероятностью возникновения разряда в ЭО, участвующих в синтезе этого изображения при заданных условиях эксплуатации. Оценка надежности зажигания элементов существенно усложняется из-за влияния на возбуждаемые ЭО элементов, горевших в предыдущие моменты времени или зажженных одновременно с возбуждаемыми. Влияющий, подсвечивающий<sup>1</sup>, элемент может располагаться на различном расстоянии от возбуждаемого, он может быть зажжен или погашен в различные моменты времени относительно интервала времени  $[0, t]$  и др. Таким образом, плотность распределения времени запаздывания возникновения разряда возбуждаемого элемента  $\alpha$  зависит от подсвечивающего элемента  $\beta$  и обозначается  $f_\alpha^{(\beta)}(t)$ .

Надежность зажигания последовательно подключаемых элементов с учетом их взаимодействия рассмотрена в [1]. При последовательном возбуждении  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) элементов на интервалах  $[\tau_{i0}, \tau_{i6}]$  ( $\tau_{i0} \geq \tau_{(i-1)6}$ ;  $\tau_{i0}$  – начало,  $\tau_{i6}$  – окончание возбуждения), используемом при воспроизведении простых изображений, например графиков, вероятность зажигания последнего ЭО равна:

$$\begin{aligned} P_{ns}^{(1,2,\dots,n-1)}(\tau_{n0}, t) = & \int_{\tau_{n0}}^t \int_{\tau_{(n-1)0}}^\infty \dots \int_{\tau_{20}}^\infty \int_{\tau_{10}}^\infty f_n^{(1,2,\dots,n-1)}(\tau_n / \tau_{n-1}) \times \\ & \times f_{n-1}^{(1,2,\dots,n-2)}(\tau_{n-1} / \tau_{n-2}) \dots f_2^{(1)}(\tau_2 / \tau_1) \times \\ & \times f_1(\tau_1) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_{n-1} d\tau_n, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $f_k^{(1,2,\dots,k-1)}(\tau_k / \tau_{k-1})$  – условная плотность

<sup>1</sup>Для описания влияния горящих или горевших элементов на возбуждаемый используется термин подсвет, который отражает направленность влияния и соответствует физическим явлениям, происходящим в элементах отображения.

распределения времени запаздывания возникновения разряда  $k$ -го элемента, который подсвечивается  $1, 2, \dots, (k-1)$ -м элементами.

Так как подсвет горевшего или горящего элемента вызывает значительную деформацию плотности распределения времени запаздывания подсвечиваемого ЭО так, что при любых  $t$  справедливо следующее соотношение (равенство соответствует отсутствию влияния)

$$\int_{\tau_{n0}}^t f_n^{(1,2,\dots,n-1)}(\tau_n / \tau_{n-1}) d\tau_n \geq \int_{\tau_{n0}}^t f_n(\tau_n) d\tau_n, \quad (2)$$

то можно показать, что вероятность зажигания  $n$ -го элемента складывается из вероятности его зажигания без подсвета  $P_n(\tau_{n0}, t)$  и суммарного приращения вероятности, вызванного зажигом  $1, 2, \dots, (n-1)$ -го ранее возбуждаемых ЭО.

Вероятность зажигания  $P_{ns}^{(1,2,\dots,n-1)}(\tau_{n0}, t)$  повышается с увеличением числа влияющих элементов, последовательно возбуждаемых до подключения  $n$ -го элемента, вероятности зажигания всех ранее возбуждаемых элементов и усилением их влияния на подключаемый. Так как влияние горевших элементов усиливается с уменьшением задержки между гашением предыдущего и возбуждением текущего, то для повышения надежности зажигания очередного ЭО его необходимо подключать непосредственно после окончания возбуждения предыдущего.

Если вероятности зажигания всех взаимодействующих ЭО и влияние каждого предыдущего элемента на последующие одинаковы, то при равных временах возбуждения каждого из них вероятность зажигания  $n$ -го элемента будет расти с увеличением числа взаимодействующих элементов, а наибольшее приращение вероятности зажигания текущего ЭО вносится предыдущим.

При параллельном возбуждении  $n$  элементов на интервале  $[\tau_0, t]$  возможны  $L$  благоприятных несовместных событий (гипотез), приводящих к их зажиганию [2]. Эти гипотезы отличаются лишь порядком зажигания элементов, а их число равно числу перестановок из  $n$ , то есть  $L = n!$ .

Если найти вероятность осуществления каждой из  $L$  благоприятных гипотез, то вероятность совместного зажигания  $n$  элементов на интервале  $[\tau_0, t]$

$$P_{np}^{(\in n)}(\tau_0, t) = \sum_{j=1}^L P_j(H_{j,\beta,\dots,\varphi}). \quad (3)$$

Здесь  $H_{j,\beta,\dots,\varphi}$  – благоприятная гипотеза, заключающаяся в том, что на интервале  $[\tau_0, t]$  зажигание всех элементов происходит в последовательности  $j, \beta, \dots, \varphi$ .

Выражение для определения вероятности осуществления гипотезы  $H_{1,2,\dots,n}$  при параллельном возбуждении  $n$  элементов имеет вид [2]:

$$P(H_{1,2,\dots,n}) = \int_{\tau_0}^t f_1(\tau_1) \frac{\prod_{i=2}^n Q_i(\tau_0, \tau_1)}{\prod_{i=2}^n Q_i^{(1)}(\tau_0, \tau_1)} \times \\ \times \int_{\tau_1}^t f_2^{(1)}(\tau_2) \frac{\prod_{i=3}^n Q_i^{(1)}(\tau_0, \tau_2)}{\prod_{i=3}^n Q_i^{(1,2)}(\tau_0, \tau_2)} \times \dots \times \frac{Q_n^{(1,2,\dots,n-2)}(\tau_0, \tau_{n-1})}{Q_n^{(1,2,\dots,n-1)}(\tau_0, \tau_{n-1})} \times \\ \times \int_{\tau_{n-1}}^t f_n^{(1,2,\dots,n-1)}(\tau_n) d\tau_n \dots d\tau_2 d\tau_1,$$

где  $Q_i^{(1,2,\dots,k)}(\tau_0, \tau_k)$  – вероятность незажигания  $i$ -го элемента на интервале  $[\tau_0, \tau_k]$  при подсвете его элементами  $1, 2, \dots, k$ .

При выполнении условия (2) можно показать, что вероятность осуществления гипотезы  $H_{1,2,\dots,n}$  при наличии взаимодействия между ЭО не меньше, чем при его отсутствии. Повторив данные рассуждения для всех благоприятных гипотез, вновь получим, что подсвет зажженных элементов приводит к увеличению вероятности зажигания возбуждаемых элементов.

Как и при последовательном подключении, взаимодействие между ЭО усиливается с уменьшением расстояния между ними, а наибольшее влияние на возбуждаемый оказывает рядом расположенный элемент. Если считать, что исходные (без подсвета) плотности распределения всех параллельно возбуждаемых ЭО на заданном интервале  $[\tau_0, \tau_n]$  одинаковы, то наибольший вклад в вероятность зажигания  $n$  параллельно возбуждаемых ЭО будут давать гипотезы, в соответствии с которыми очередные возбуждаемые элементы расположены рядом с зажженными. Если первым загорается крайний элемент, то процесс зажигания будет распространяться в одну сторону, в остальных случаях в обе. Так как некоторые возбуждаемые элементы имеют в исходном состоянии большую вероятность зажигания по сравнению с остальными, то наибольший вклад будут давать те благоприятные гипотезы, согласно которым эти элементы зажигаются первыми, то есть порядок зажигания ЭО в основном определяется расположением остальных элементов относительно них.

Соотношение

$$\frac{\int_{\tau_{n-1}}^t f_n^{(1,2,\dots,n-1)}(\tau_n) d\tau_n}{Q_n^{(1,2,\dots,n-1)}(\tau_0, \tau_{n-1})} \geq \frac{\int_{\tau_{n-1}}^t f_n(\tau_n) d\tau_n}{Q_n(\tau_0, \tau_{n-1})}$$

имеет наибольшую силу в области малых  $t$  [до момента перехода через ноль функции  $\Delta f_n^{(1,2,\dots,n-1)}(\tau_n) = f_n^{(1,2,\dots,n)}(\tau_n) - f_n(\tau_n)$ ].

Правая и левая части этого соотношения представляют собой условные вероятности за-

жигания  $n$ -го ЭО на интервале  $[\tau_{n-1}, t]$ , если до момента  $\tau_{n-1}$  он оставался погашенным, соответственно, при подсвете его 1, 2, ...,  $(n-1)$ -м элементами и при отсутствии взаимодействия между ними. Тогда в области указанного времени благодаря подсвету загоревшихся элементов в начале параллельного возбуждения происходит быстрый рост вероятности осуществления всех благоприятных гипотез и, следовательно, взаимодействие между элементами приводит к более быстрому зажиганию всех элементов.

Экспериментальные исследования показывают, что плотности распределения времени запаздывания зажигания ЭО, расположенных на расстоянии 1-3 шагов по координатной сетке индикатора от постоянно горящего элемента, значительно деформируются. Время запаздывания этих постоянно подсвечиваемых ЭО практически равно времени формирования разряда  $\tau_{\phi}$ , которое во много раз меньше времени запаздывания зажигания в обычном режиме (без подсвета). Значительно деформируются и кривые плотностей распределения запаздывания зажигания постоянно подсвечиваемых ЭО, расположенных на расстоянии 4-7 шагов по координатной сетке (математическое ожидание и дисперсия уменьшаются). Так как зажженный элемент оказывает влияние одновременно на все близлежащие элементы, то при параллельном возбуждении рядом расположенных элементов происходит значительный рост вероятности их зажигания.

Вероятность зажигания ЭО при последовательно-параллельном возбуждении можно определить, применяя формулы (1) и (3).

Анализ надежности формирования изображений показывает, что для ГМИ любого типа в любых режимах работы происходит увеличение вероятности зажигания подсвечиваемого ЭО. Вероятность зажигания элемента тем больше, чем более сильное взаимодействие между ЭО, больше длительность их подключения, меньше интервал между гашением подсвечивающего и зажиганием очередного. Она растет также при увеличении числа зажигаемых элементов.

На основе этих заключений сформулированы принципы построения высоконадежных способов формирования и развертывания изображений на ГМИ, в соответствии с которыми следует:

– формировать непрерывные в пространстве и во времени изображения, в которых очередной или очередные зажигаемые ЭО находятся в «зоне подсвета» другого или других элементов, участвующих в синтезе изображения. Для создания эффекта «непрерывности» использо-

вать дополнительные элементы, не соответствующие входным сигналам;

– возбуждать элементы, по возможности, с минимальными промежутками времени между подключениями;

– фрагменты изображений, которые являются элементами одной строки или столбца, формировать при параллельном возбуждении.

Очевидно, что при большом числе возбуждаемых ЭО рассмотренные формулы достаточно громоздки, и поэтому численные значения вероятности зажигания элементов при заданных конкретных видах плотностей распределения можно вычислить только при небольшом количестве взаимодействующих элементов или для предельных расположений ЭО.

В частности, достаточно простые формулы получены для определения вероятности зажигания элементов, расположенных рядом друг с другом (сильное влияние) или удаленных далеко друг от друга (влияние отсутствует). Вероятность зажигания ЭО при сильном взаимодействии между ними равна вероятности зажигания одного из них. Если плотность распределения времени запаздывания зажигания ЭО в исходном состоянии описывается экспоненциальным распределением, то распределение времени запаздывания совокупности возбуждаемых элементов также будет экспоненциальным. При других распределениях времени запаздывания лучшую аппроксимацию распределения времени запаздывания совокупности ЭО обеспечивает распределение Вейбулла - Гнеденко.

Если возбуждаемые элементы не влияют друг на друга, то для описания плотности распределения совокупности таких возбуждаемых элементов следует использовать распределение максимального значения. Среднее значение и дисперсию времени запаздывания совокупности возбуждаемых ЭО, не влияющих друг на друга, просто можно определить только для экспоненциальных распределений времени запаздывания с одинаковыми параметрами.

Менее громоздки формулы для определения показателей надежности, а главное – запись их с помощью простых формальных правил, можно получить, используя метод, основанный на системе дифференциальных уравнений Колмогорова. В этом методе случайный процесс зажигания ЭО представляют в виде графа, вершины которого воспроизводят все возможные состояния элементов, а ребра – переходы из состояния в состояние. При параллельном возбуждении  $n$  элементов возможно  $2^n$  различных состояний:  $S_{123\dots n}$ ,  $S_{\bar{1}23\dots n}$ , ...,  $S_{\bar{1}\bar{2}\bar{3}\dots\bar{n}}$ . Черточка

над знаком индекса показывает, что в данном состоянии  $i$ -й элемент зажжен.

Состояние  $S_{123\dots n}$  соответствует гипотезе, характеризующей вероятность незажигания всех ЭО –  $P_0(t)$ , состояние  $S_{\bar{1}23\dots n}$  – гипотезе, характеризующей вероятность зажигания первого ЭО (или вероятность незажигания элементов 2, 3, ..., n) –  $P_1(t)$ , состояние  $S_{\bar{1}\bar{2}3\dots n}$  гипотезе  $P_{123\dots n}(t)$ , характеризующей вероятность зажигания всех ЭО. Переход из состояния  $S_{12\dots\bar{\alpha}\dots i\dots n}$  в состояние  $S_{12\dots\bar{\alpha}\dots i\dots n}$  характеризуется интенсивностью зажигания  $\lambda_i^{(\alpha)}(t)$ . Ветвь графа, характеризующего процесс зажигания  $n$  ЭО в последовательности  $\alpha\beta\gamma\dots\rho\varepsilon$ , показана на рисунке 1.

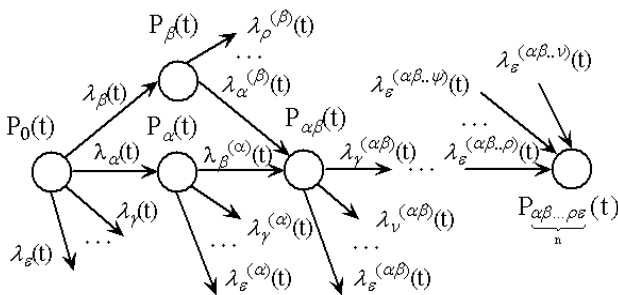


Рисунок 1 – Ветвь графа, характеризующего зажигание элементов отображения

На основе известного правила запишем дифференциальные уравнения Колмогорова для каждого состояния

$$\begin{aligned}
 P'_0(t) &= -\sum_{i=1}^n \lambda_i(t) P_0(t), \\
 P'_\alpha(t) &= \lambda_\alpha(t) P_0(t) - \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(\alpha)}(t) P_\alpha(t), \quad j \neq \alpha, \quad \alpha = 1, 2, \dots, n, \\
 P'_{\alpha\beta}(t) &= \lambda_\beta^{(\alpha)}(t) P_\alpha(t) + \lambda_\alpha^{(\beta)}(t) P_\beta(t) - \\
 &- \sum_{k=1}^n \lambda_k^{(\alpha\beta)}(t) P_{\alpha\beta}(t), \quad k \neq \alpha, \quad k \neq \beta, \quad \alpha, \beta = 1, 2, \dots, n, \\
 &\dots\dots\dots (4) \\
 P'_{\alpha\beta\dots\rho\varepsilon}(t) &= \lambda_\varepsilon^{(\alpha\beta\dots\rho)}(t) P_{\alpha\beta\dots\rho}(t) + \dots + \lambda_\varepsilon^{(\alpha\beta\dots\psi)}(t) \times \\
 &\times P_{\alpha\beta\dots\psi}(t) + \lambda_\varepsilon^{(\alpha\beta\dots\nu)}(t) P_{\alpha\beta\dots\nu}(t).
 \end{aligned}$$

Эти уравнения образуют систему дифференциальных уравнений Колмогорова, которую можно дополнить условием нормировки:

$$P_0(t) + P_\alpha(t) + \dots + P_{\alpha\beta}(t) + \dots + P_{\alpha\beta\gamma}(t) + \dots + P_{\alpha\beta\dots\rho\varepsilon}(t) = 1.$$

Так как в момент подключения ЭО ни один из них не горит, то начальными условиями решения системы уравнений являются

$$P_0(0) = 1, \quad P_\alpha(0) = \dots = P_{\alpha\beta}(0) = \dots = P_{\alpha\beta\gamma}(0) = \dots = P_{\alpha\beta\dots\rho\varepsilon}(0) = 0.$$

Очевидно, даже последовательное нахождение значений вероятностей зажигания элементов на основе приведенных уравнений, является весьма

трудной задачей. Исключением является определение вероятности начального состояния – вероятности незажигания ни одного ЭО, которая равна  $P_0(t) = \exp(-\sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha)$ .

Исследования ГМИ показывают, что в большом числе случаев интенсивности зажигания ЭО в сходных режимах отличаются незначительно или вообще одинаковы. В частности, интенсивности зажигания элементов в автономном режиме (без подсвета) отличаются лишь из-за технологического разброса. Весьма схожи и характеристики ЭО при подсвете их равным числом элементов.

Тогда граф зажигания  $n$  элементов и система дифференциальных уравнений упрощаются [3] и принимают вид (на рисунке и в формулах верхние индексы характеризуют число ЭО):

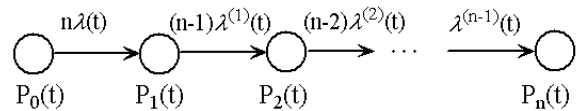


Рисунок 2 – Упрощенный граф, характеризующий зажигание  $n$  элементов отображения

$$\begin{cases}
 P'_0(t) = -n \lambda P_0(t); \\
 P'_1(t) = -(n-1) \lambda^{(1)} P_1(t) + n \lambda P_0(t); \\
 \dots\dots\dots \\
 P'_{n-1}(t) = -\lambda^{(2)} P_{n-1}(t) + 2 \lambda^{(n-2)} P_{n-2}(t); \\
 P'_n(t) = \lambda^{(n-1)} P_{n-1}(t).
 \end{cases} \quad (5)$$

Эта система уравнений содержит лишь  $n+1$  уравнение. Она решается при тех же начальных условиях и также может быть дополнена условием нормировки. Если интенсивности переходов постоянны, то при различных интенсивностях переходов (полюсах)  $n\lambda \neq (n-1)\lambda^{(1)} \neq \dots \neq \lambda^{(n-1)}$  вероятность зажигания ЭО равна ( $\lambda^{(0)} = \lambda$ ):

$$\begin{aligned}
 P_0(t) &= \exp(-n\lambda t); \\
 P_1(t) &= \frac{n\lambda}{[(n-1)\lambda^{(1)} - n\lambda]} [\exp(-n\lambda t) - \exp(-(n-1)\lambda t)]; \\
 &\dots\dots\dots (6)
 \end{aligned}$$

$$P_n(t) = 1 - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\exp[-\lambda^{(i)}(n-i)t]}{\prod_{j=0, j \neq i}^n [1 - \frac{\lambda^{(i)}(n-i)}{\lambda^{(j)}(n-j)}]}.$$

Исследования показывают, что вероятности зажигания всех элементов, определенные путем решения систем уравнений (4) и (5) при различных интенсивностях зажигания в автономном режиме (например, обусловленных технологическим разбросом  $\pm 10\%$ ), практически совпадают



[3], хотя при этом происходит перераспределение вероятностей зажигания элементов в различных последовательностях. Следовательно, для аналитической оценки надежности зажигания *всех* параллельно возбуждаемых элементов ГМИ в большинстве случаев можно использовать упрощенный граф и соответствующую ему систему дифференциальных уравнений, что существенно упрощает вычисление показателей надежности, создает предпосылки для автоматизации вычислений вероятности зажигания элементов.

Аналитические выражения, характеризующие вероятность зажигания уже пяти и более элементов, даже если интенсивности зажигания ЭО, находящихся в одинаковых условиях, равны, трудно обозримы. Действительно, вероятность зажигания пяти элементов, вычисленная в соответствии с выражением (6), содержит шесть экспоненциальных функций с различными интенсивностями зажигания, которые суммируются с различными весами. В то же время в некоторых случаях достаточно знать числовые характеристики совокупности возбуждаемых ЭО, например, среднее время запаздывания зажигания. Если расчетное значение этого времени существенно меньше времени подключения, то зажигание элементов можно считать практически достоверным событием.

Среднее время запаздывания зажигания равно площади под кривой, характеризующей вероятность незажигания элементов соответствующего состояния. Проинтегрировав дифференциальные уравнения (4) или (5) по времени от 0 до  $\infty$ , с учетом того, что вероятности всех состояний, кроме исходной, в момент подключения равны нулю, а вероятность исходного состояния равна единице, получим алгебраическую систему уравнений, из которой можно получить среднее время пребывания ЭО в каждом состоянии. Однако система алгебраических уравнений после интегрирования уравнений (4) является громоздкой, а при интегрировании уравнений (5) результат получают все-таки приближенным. Кроме того, более достоверные результаты оценок надежности зажигания ЭО можно получить, если кроме среднего значения вычислить и дисперсию времени запаздывания зажигания совокупности элементов.

Эта задача может быть решена методом начальных моментов [4]. Начальный момент времени запаздывания зажигания одновременно возбуждаемых ЭО  $k$ -го порядка может быть определен путем суммирования вспомогательных величин  $a_k(S_i)$ , вычисленных для всех

состояний, кроме поглощающего, т.е.  $a_k = \sum_{i=0}^{M-2} a_k(S_i)$ . Здесь  $M$  – число возможных состояний элементов, равное  $2^n$ .

Для определения среднего значения вспомогательные величины  $a_1(S_i)$  равны:

$$a_1(S_0) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i},$$

$$a_1(S_{\bar{\alpha}}) = \frac{\lambda_{\alpha}}{\sum_{j=1, j \neq \alpha}^n \lambda_j^{(\alpha)}} \cdot a_1(S_0), \dots,$$

$$a_1(S_{\bar{\alpha}\bar{\beta} \dots \bar{\epsilon} \rho}) = \frac{\lambda_{\rho}^{(\alpha\beta \dots \epsilon)}}{\sum_{v=1, v \neq \alpha, \dots}^k \lambda_v^{(\alpha\beta \dots \epsilon)}} \cdot a_1(S_{\bar{\alpha}\bar{\beta} \dots \bar{\epsilon}}).$$

Вспомогательные переменные для определения второго момента

$$a_2(S_0) = \frac{2a_1(S_0)}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{2}{(\sum_{i=1}^n \lambda_i)^2},$$

$$a_2(S_{\bar{\alpha}}) = \frac{2\lambda_{\alpha}}{(\sum_{j=1, j \neq \alpha}^n \lambda_j^{(\alpha)})^2} \cdot a_1(S_0) + \frac{\lambda_{\alpha}}{\sum_{j=1, j \neq \alpha}^n \lambda_j^{(\alpha)}} \times$$

$$\times a_2(S_0), \dots,$$

$$a_2(S_{\bar{\alpha}\bar{\beta} \dots \bar{\epsilon} \rho}) = \frac{2\lambda_{\rho}^{(\alpha\beta \dots \epsilon)}}{(\sum_{v=1, v \neq \alpha, \dots}^n \lambda_v^{(\alpha\beta \dots \epsilon)})^2} \cdot a_1(S_{\bar{\alpha}\bar{\beta} \dots \bar{\epsilon}}) +$$

$$+ \frac{\lambda_{\rho}^{(\alpha\beta \dots \epsilon)}}{\sum_{v=1, v \neq \alpha, \dots}^n \lambda_v^{(\alpha\beta \dots \epsilon)}} \cdot a_2(S_{\bar{\alpha}\bar{\beta} \dots \bar{\epsilon}}).$$

Несмотря на громоздкость этих выражений, вычисление начальных моментов производится достаточно просто. Вычислим два первых момента времени запаздывания зажигания при возбуждении двух ЭО. Интенсивности зажигания первого и второго элементов равны  $\lambda_1, \lambda_2$ , а при под свете первого (второго) вторым (первым) –  $\lambda_1^{(2)} (\lambda_2^{(1)})$ . Элементы могут находиться в четырех состояниях: начальном  $S_0$ , когда ни один элемент не горит, зажжен один элемент, соответственно,  $S_1$  – первый и  $S_2$  – второй и горят оба элемента  $S_{12}$ . Вероятность начального состояния  $P_0(0) = 1$ , остальных состояний – нулю.

Первый и второй моменты равны:

$$a_1 = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \left[ 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2^{(1)}} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1^{(2)}} \right];$$

$$a_2 = \frac{2}{\lambda_1 + \lambda_2} \left[ \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{\lambda_1}{(\lambda_2^{(1)})^2} + \frac{\lambda_2}{(\lambda_1^{(2)})^2} \right].$$

Математическое ожидание  $m$  равно первому моменту, а дисперсия –  $\dot{a}_2 - m^2$ .

При интенсивностях зажигания элементов в автономном режиме  $3 \cdot 10^4$  1/сек, а в режиме под света  $15 \cdot 10^4$  1/сек среднее значение и среднее квадратичное отклонение времени запаздывания зажигания этих двух параллельно возбуждаемых

ЭО соответственно равны  $2,3 \cdot 10^{-5}$  и  $1 \cdot 10^{-5}$  сек (по сравнению с автономным режимом эти показатели уменьшаются в 1,4 и 3,3 раза).

Если математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение времени запаздывания зажигания ЭО окажутся значительно меньше, чем длительность их возбуждения, то вероятность возникновения разряда в них можно считать равной практически единице и вычисленных значений достаточно для оценки надежности зажигания элементов.

При сложных аналитических описаниях распределений времени запаздывания зажигания ЭО вычислить показатели надежности зажигания при любом взаимном расположении элементов и взаимодействии между ними можно методом статистического моделирования [5]. При моделировании процесса зажигания возможные пути перехода в конечное состояние  $S_{\bar{1}, \bar{2}, \dots, \bar{n}}$  определяются соотношением между выпавшими (разыгранными) случайными значениями времени запаздывания элементов в соответствующих условиях, причем очередной переход всегда осуществляется в направлении минимального времени задержки.

Моделирование процесса зажигания осуществляют следующим образом. Исходя из необходимой достоверности (точности) исследований определяется число циклов моделирования  $m$ . Затем формируются случайные значения времени запаздывания зажигания всех  $n$  элементов в автономном режиме  $\tau_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ). Из этих значений выбирается минимальная длительность, которая определяет направление перехода и начальное значение длительности запаздывания зажигания всех возбуждаемых ЭО. Допустим, из разыгранных значений времени запаздывания зажигания элементов в автономном режиме минимальная длительность выпала для элемента  $k$  и, следовательно, элементы отображения перешли в состояние  $S_{\bar{1}, \bar{2}, \dots, \bar{k}, \dots, \bar{n}}$ . На следующем шаге генерируются длительности запаздывания зажигания незажженных элементов при подсвете их элементом  $k$ , то есть  $\tau_i(k)$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n; i \neq k$ ). Очевидно, число этих значений равно  $n-1$ . Из разыгранных значений  $\tau_i(k)$  вновь определяется минимальное, которое определяет следующий шаг, и это значение длительности запаздывания прибавляется к начальной длительности запаздывания разряда всех возбуждаемых элементов. Считаем, на этом шаге минимальную длительность запаздывания зажигания имел элемент  $s$  и, следовательно, элементы отображения перешли в состояние  $S_{\bar{1}, \bar{2}, \dots, \bar{k}, \bar{s}, \dots, \bar{n}}$ .

Далее генерируются случайные значения времени запаздывания для незажженных ЭО при подсвете их элементами  $k$  и  $s$  –  $\tau_i(k, s)$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n; i \neq k, s$ ). Число этих значений равно  $n-2$ . Из значений  $\tau_i(k, s)$  определяется минимальное, оно прибавляется к длительности запаздывания зажигания всех возбуждаемых элементов, выбирается следующий шаг и так далее. После перехода в предпоследнее состояние генерируется случайное время запаздывания незажженного элемента при подсвете его всеми зажженными, которое после прибавления к вычисленной на предыдущем шаге длительности запаздывания разряда всех возбуждаемых элементов образует искомый результат для текущего ( $r$ -го) цикла моделирования  $\tau_j$  ( $j=1, 2, 3, \dots, m$ ).

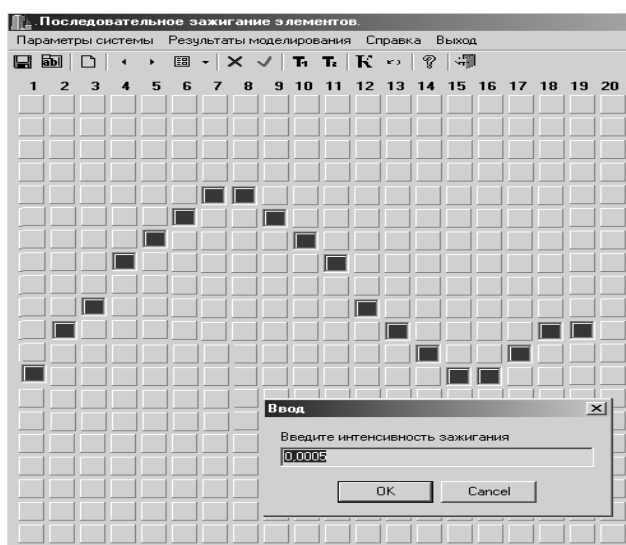
Выполнив необходимое число циклов моделирования, получим массив случайных значений времени запаздывания всех возбуждаемых элементов  $\tau_j$ . Каждое из этих значений равно сумме минимальных значений времени запаздывания зажигания на каждом шаге моделирования. Обработав массив  $\tau_j$  традиционными способами, получим необходимые численные характеристики надежности зажигания  $n$  возбуждаемых элементов.

Рассмотренные методы расчета надежности воспроизведения изображений позволяют определить численные значения вероятностей зажигания при любом способе подключения элементов. При проведении расчетов для каждого конкретного случая – способа подключения элементов, их числа, характеристик в исходном состоянии и в условиях подсвета (расстояния между элементами) – необходимо провести подготовительную работу: определить соответствующие уравнения, исходные данные, затем провести вычисления, как правило, с помощью ЭВМ. При этом большая часть времени тратится на выполнение подготовительной работы, ввод данных.

Уменьшить время вычислений, сделать доступным вычисление показателей надежности при проведении инженерных исследований можно за счет использования специальных программ с удобным пользовательским интерфейсом, позволяющим достаточно просто устанавливать и модифицировать исходные данные: число и взаимное расположение элементов отображения, их интенсивность зажигания в исходном состоянии, влияние элементов друг на друга. Помимо вычисленных значений вероятностей зажигания ЭО можно проиллюстрировать (визуализировать) процессы зажигания элементов в удобном для пользователя масштабе времени. Эти задачи успешно решаются программами, построенными на основе как аналитических методов

определения показателей надежности, так и методов статистического моделирования.

Пользовательский интерфейс программы для определения вероятности зажигания элементов ГМИ при последовательном подключении представляет собой макет фрагмента информационного поля с  $20 \times 20$  элементами (рисунок 3). С помощью координатного манипулятора на этом поле выбираются необходимые элементы. При выборе элементов выводится окно диалога, в котором пользователь соглашается с предлагаемой интенсивностью зажигания или может определить ее значение путем набора на клавиатуре. Далее пользователь может установить или согласиться с предлагаемыми программой числом циклов моделирования, длительностью подключения элементов, коэффициентами, характеризующими влияние зажженных ЭО двух предыдущих столбцов.



**Рисунок 3 – Основное окно программы определения надежности последовательно возбуждаемых элементов**

Результаты расчетов представляются в виде массивов времени горения каждого элемента. В конце вычислений определяется оценка вероятности зажигания каждого элемента за время подключения элементов и среднее время их горения. Для иллюстрации процессов зажигания ЭО можно установить необходимую частоту воспроизведения изображения (временной масштаб). При этом на макете информационного поля зажженные элементы представляются окаймленными.

По такому же принципу построена программа определения вероятности зажигания элементов при параллельном возбуждении элементов. Выбор числа возбуждаемых ЭО и их взаимное расположение осуществляются на макете строки, содержащей 20 элементов. Обе программы используют метод статистического моделирования.

Программа расчета вероятности зажигания произвольного числа параллельно возбуждаемых ЭО использует выражения (6). Пользовательский интерфейс программы основан на графе, показанном на рисунке 2. Результаты вычислений представляются в виде таблицы и автоматически масштабируемой графической зависимости вероятности зажигания совокупности ЭО от времени.

Вычислить вероятность зажигания элементов, среднее время запаздывания зажигания совокупности параллельно возбуждаемых ЭО, наблюдать процессы их зажигания позволяет программа, реализованная в системе MatLab [5]. Возможные состояния элементов представляются с помощью диаграммы Stateflow. Для ввода исходных данных используются окна диалога.

Все разработанные программы определения показателей надежности зажигания ЭО позволяют сохранить исходные данные и результаты вычислений для последующей обработки и анализа, содержат справочную систему.

**Заключение.** Разработанные методы, алгоритмы и программы определения показателей надежности зажигания элементов ГМИ позволили сформулировать принципы формирования высоконадежных изображений, осуществлять объективную оценку надежности зажигания элементов при использовании различных устройств формирования изображений, узлов коммутации шин и самих индикаторов. Разработанные на основе проведенных исследований методы и устройства развертывания и формирования изображений защищены десятками авторских свидетельств СССР и патентов РФ, успешно используются в ряде устройств отображения информации.

#### **Библиографический список**

1. Смяров А.М., Шестеркин А.Н. Анализ надежности работы газоразрядной индикаторной панели при последовательном возбуждении ее ячеек // Управляющие системы и машины. 1978. - № 4. - С. 83-85.
2. Зимин А.М., Шестеркин А.Н. Определение надежности зажигания элементов отображения газоразрядного индикатора // Электронная техника. Сер.4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1988. - Вып.4. - С. 30-34.
3. Гусев Е.В., Шестеркин А.Н. Определение вероятности зажигания газоразрядных элементов отображения при одинаковых условиях возбуждения // Вестник РГРТА. Вып. 20. Рязань. 2007. С. 40-43.
4. Зимин А.М., Шестеркин А.Н. Оценка надежности зажигания элементов отображения матричных индикаторов на основе начальных моментов // Электронная техника // Сер.4 Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1989. - Вып.3. - С. 44-48.
5. Шестеркин А.Н. Определение надежности воспроизведения изображений методом статисти-

ческого моделирования // Вестник РГРТА. Вып. 11. Рязань. 2003. С. 40-43.

6. Гусев Е.В., Шестеркин А.Н. Оценка показателей надежности зажигания элементов газораз-

рядных индикаторов с помощью системы Simulink-Stateflow. Отраслевой фонд алгоритмов и программ. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки №11202 от 30. 06. 2008.

УДК 004.925.83

**Р.М. Ганеев**

## ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЛА ПЕРСОНАЖЕЙ

*Предложена методика трехмерного моделирования тела персонажей на основе фотографических изображений оригинала и схем пластической анатомии на примере моделирования девушки. Приведены обобщающие рекомендации трехмерного моделирования четвероногих персонажей, птиц и др. типов персонажей. Показаны результаты использования данной методики в учебном процессе.*

**Ключевые слова:** ортографические проекции, трехмерная сетка, полигоны, пластическая анатомия.

**Введение.** Трехмерная компьютерная графика в последние два десятилетия благодаря качественному изменению компьютерной геометрии достигла огромных успехов в визуализации трехмерных сцен.

Сегодня на первый план выходят задачи наполнения трехмерных сцен объектами и, что самое сложное, персонажами. Эффективность конечного результата зависит от точности трехмерной модели тела и адекватной анимации персонажа. При этом не ограничивается поле деятельности для дизайнера персонажа.

**Анализ погрешностей исходных данных.** Наблюдая за окружающими нас трехмерными объектами, мы видим их двумерную проекцию на плоскость. Трехмерное моделирование персонажа начинают с решения обратной задачи – построения трехмерной оболочки тела по его проекциям на взаимно ортогональные плоскости. Для получения модели тела оболочку оснащают скелетом, учитывая (для адекватной анимации) анатомическое строение оригинала.

Точность моделирования тела и адекватность анимации персонажа зависят от погрешностей исходных данных. На практике мы в лучшем случае имеем дело с фотоизображениями, полученными одновременно с двух камер.

Перечислим источники погрешностей этих данных на примере съемки головы человека.

1. Оси объективов камер могут оказаться не в одной горизонтальной плоскости.

2. Из-за поворота головы или смещения камеры спереди ось ее объектива может оказаться вне вертикальной плоскости симметрии головы.

3. Фотоизображения представляют собой результат центральной проекции и содержат неизбежные перспективные искажения.

Первые две погрешности можно уменьшить до приемлемых размеров установкой камер и человека. А третья погрешность имеет более сложную природу. Рассмотрим ее отдельно.

**Искажения перспективы.** Пусть отрезок (рисунок 1) с концами в точках  $(r_1, z_1)$  и  $(r_2, z_2)$  параллелен оси наблюдения  $z$  ( $r_1 = r_2$ ).

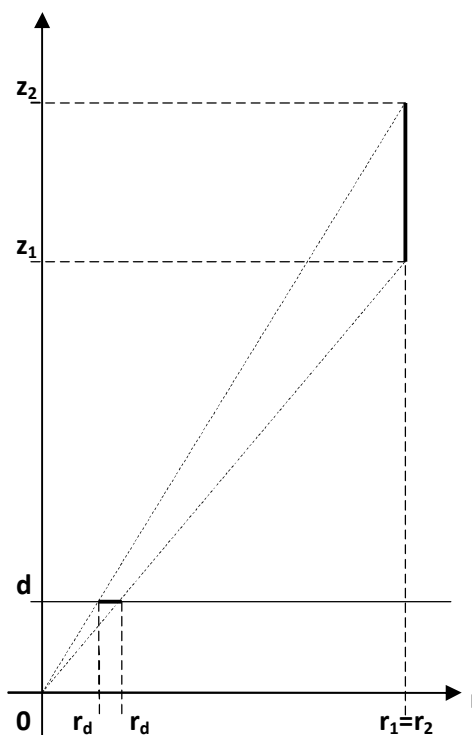


Рисунок 1 - Схема центральной проекции

Проекции точек  $(r_1, z_1)$  и  $(r_2, z_2)$  на плоскость  $z = d$  можно вычислить следующим образом:

$$r_{d1} = \frac{d}{z_1} r_1, \quad r_{d2} = \frac{d}{z_2} r_2.$$

В идеальном случае ортографической проекции эти же точки имели бы проекции в точке  $(r_1, d) = (r_2, d)$ .

Масштабируем результаты центральной проекции по размеру ортографической проекции:

$$r_{d1} \times m = r_1, \quad m = \frac{z_1}{d} \quad \text{и} \quad r_{d2} \times m = \frac{z_1}{z_2} r_2.$$

Тогда величину перспективного искажения проекции точки  $(r_2, z_2)$  можно вычислить по формуле:

$$\Delta r_2 = r_1 - \frac{z_1}{z_2} r_2 = r_2 \frac{\Delta z_2}{z_2}$$

или, опуская индексы, по формуле:

$$\Delta r = r \frac{\Delta z}{z}.$$

Определим теперь приемлемое (в смысле погрешностей перспективного искажения) расстояние фотосъемки лица человека.

Представим лицо человека в цилиндре радиусом  $r=8$  см и высотой  $\Delta z=8$  см (рисунки 2 и 3).

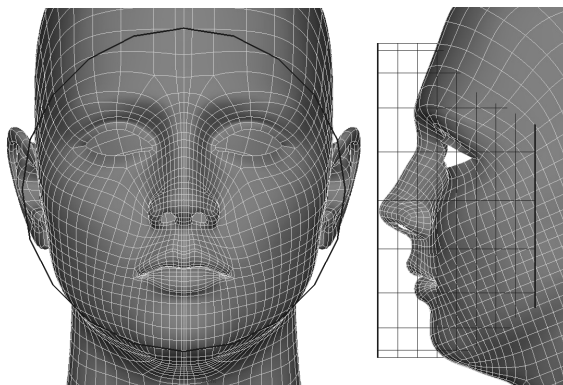


Рисунок 2 - Вид спереди и сбоку лица и цилиндра

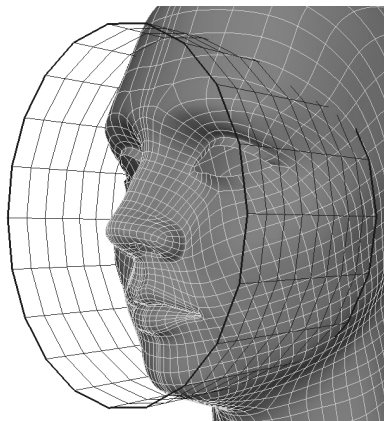


Рисунок 3 - Общий вид лица и цилиндра

Нетрудно вычислить, что для съемок лица с перспективными искажениями не более  $\Delta r=1$  мм расстояние от камеры до лица должно быть не менее 7 м. При этом искажения тех частей лица, которые выражают индивидуальность (нос, глаза, губы) человека, не превышают 0,5 мм.

Вспомним теперь, что нам нужны съемки одновременно с двух камер. На рисунке 4 показана схема установки объектива для съемки лица сбоку с такими же перспективными искажениями. Как видно на рисунке 4, для съемок с такими же искажениями расстояние от боковой камеры до лица может быть меньше – от 6 до 7 м.

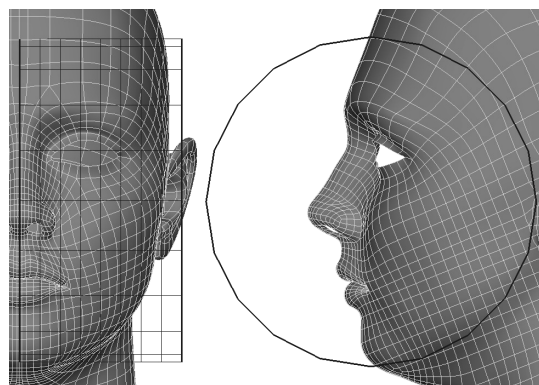


Рисунок 4 - Схема съемки лица сбоку

Для съемок частей тела (высотой около 50 см) крупным планом с таких расстояний понадобится объектив с фокусным расстоянием около 200 мм. На краях кадра (например, на плечах) при этом искажения будут больше.

То есть перспективные искажения в исходных данных будут присутствовать всегда. Для уменьшения их размера нужны дорогостоящее фотооборудование и большое помещение.

**Методика моделирования человека.** Все знают, как копировать изображение, закрепив на нем полупрозрачную бумагу (кальку). Если таким способом нужно построить копию многоугольников, то задача сводится к копированию вершин многоугольников в точках  $(x, y)$ .

Трехмерное моделирование подобно построению трехмерной полигональной копии поверхности объекта путем «копирования» вершин многоугольников в точках  $(x, y, z)$ . Для этого понадобится еще одно изображение объекта (чаще вид сбоку). Второе изображение устанавливают перпендикулярно к первому изображению и настраивают положения и масштабы изображений. Тогда по некоторой точке первого изображения (обычно на виде спереди) устанавливают координаты  $(x, y)$  вершины. Затем на втором изображении находят ту же точку и по ней устанавливают координату  $z$  вершины. Третье изображение (если оно есть) играет

вспомогательную роль для уточнения координат в плохо видимых на изображениях спереди или сбоку зонах. Его устанавливают перпендикулярно и настраивают положение и масштаб по отношению к предыдущим двум изображениям.

Копируя на кальку, мы ориентируемся по тем или иным четко выраженным линиям исходного изображения. Но на теле человека нет таких линий. Кроме того, положения анатомических элементов, учитываемых при настройке скелета модели, не видны на изображениях. Поэтому до съемок на тело человека наносят границы значимых (с точки зрения деформации тела при движении) анатомических элементов (рисунок 5). Затем наносят сетку линий для построения оболочки (рисунок 6).

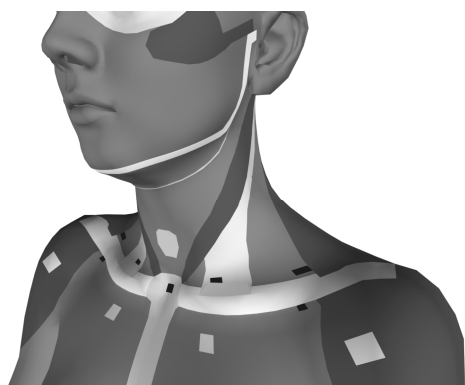


Рисунок 5 - Анатомические элементы

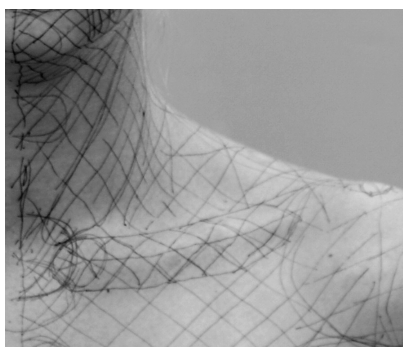


Рисунок 6 - Пример линий на теле

На рисунке 7 показан пример построения полигональной копии части тела. На сетке оболочки выделены те участки тела, которые не видны на изображении вида сбоку.

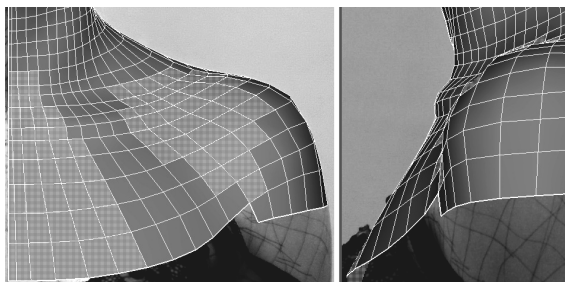


Рисунок 7 - Трехмерная копия части тела

Если человек моделирует самого себя, то эти углубления он может измерить и учесть при построении оболочки. Но лучше измерить на этапе разметки тела и записать на теле. В других случаях придется пользоваться приближенными описаниями из пластической анатомии.

После построения всей оболочки приступают к оснащению модели тела скелетом. На этом этапе для настройки положения основных костей скелета ориентируются по линиям их границ на изображениях (рисунок 8, работа Смирницкой Светланы, гр. 7311).



Рисунок 8 - Настройка костей плечевого пояса

Такая методика построения оболочки и оснащения тела скелетом позволяет получить модели человека с очень реалистичным внешним видом и адекватным поведением.

**Требования к оболочке.** Построение трехмерной полигональной оболочки представляет собой самую трудоемкую и самую ответственную часть моделирования.

Причин этому несколько.

Во-первых, для многих разработчиков (например, в учебном процессе) это первый этап работы, когда еще не выработались устойчивые навыки применения интегрированной среды моделирования.

Во-вторых, топология сетки оболочки требует соблюдения множества ограничений.

Рассмотрим только два главных требования.

1. Вблизи любого значимого анатомического элемента (например, ключицы на рисунке 6-8) линии ребер должны лежать вдоль границ этого элемента. Это так называемые продольные линии. А поперечные ребра должны лежать перпендикулярно к продольной линии.

Это необходимо для корректного учета степени влияния костей скелета на деформацию оболочки при анимации модели.

2. Сетка оболочки должна быть построена из четырехугольников.

**Моделирование четвероногих персонажей.** Из-за мехового покрытия, иногда крупных размеров тела и других особенностей животных трудно подготовить необходимые для моделирования изображения. Поэтому используют описания их пластической анатомии, которые можно в большом количестве найти в специальной литературе для художников.

Но нужно учитывать, что это усредненные описания, и модели на основе пластической анатомии будут похожими друг на друга.

Например, модель кошки на рисунке 9 построена на базе различных источников из пластической анатомии. Она похожа на кошку, но любые попытки совместить эту модель с фотоизображениями кошек закончатся неудачей.

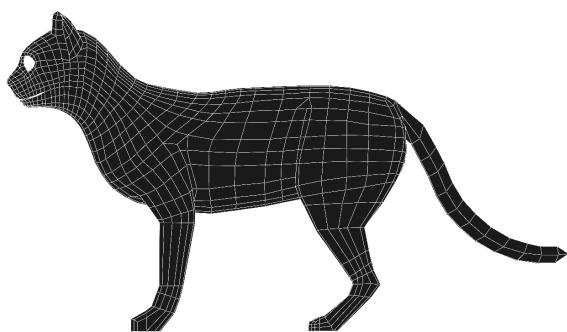


Рисунок 9 - Пример модели кошки

Для построения моделей с требуемыми индивидуальными особенностями нужно поступить следующим образом.

1. Подобрать необходимые изображения видов для своего персонажа и построить грубую модель с необязательным подчеркиванием анатомических элементов хотя бы потому, что эти элементы могут быть скрыты мехом.

2. Настроить отдельные участки модели по описаниям из пластической анатомии персонажа и уточнить анатомические элементы для этих участков, не нарушая полученных на первом шаге общих пропорций тела.

Естественно, подбирая изображения, нужно учитывать сюжет. Если в сюжете фигурирует наивный медвежонок, нужно подбирать изображения медвежонка, а не взрослого медведя. А описания пластической анатомии в пределах отдельных участков тела пригодны для уточнения строения медведей всех возрастов.

**Моделирование птиц.** Птицы отличаются перьевым покрытием тела и иногда доступностью всех необходимых изображений.

Как и при моделировании животных, сначала строят грубую модель с соблюдением общих пропорций (рисунок 10).

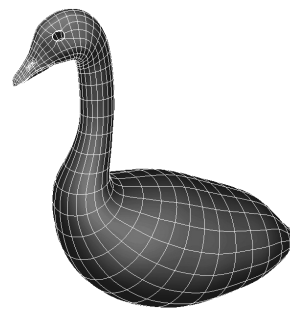


Рисунок 10 - Модель туловища гуся

Затем уточняют строение значимых анатомических элементов тела (рисунок 11).

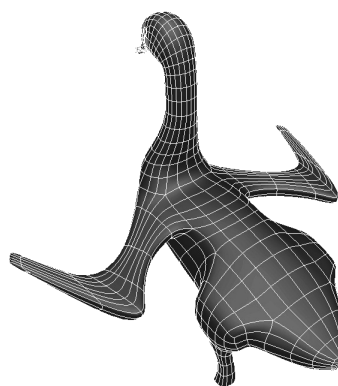


Рисунок 11 - Уточненная модель

**Пример полной модели.** Модель содержит множество деталей - глаза, элементы ротовой полости, меховое или иное покрытие и т.д.



Рисунок 12 - Детализированная модель свиньи

Детализация моделей обычно не требует сложных технологических приемов – достаточно описания детализируемых участков и кропотливая настройка параметров (рисунок 12, работа Стариковой Евгении, гр. 6310).