

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий специальный выпуск журнала знакомит читателей с работами ученых и преподавателей Курского государственного технического университета.

В ряде статей, входящих в выпуск, приводятся результаты исследований, проводимых в течение многих лет сотрудниками Курского государственного технического университета в содружестве с другими вузами России.

В соответствии с тематикой статей содержание выпуска разбито на четыре части.

В первой части „Методы цифровой обработки изображений“ рассмотрены метод автоматического кадрирования цифровых изображений, вейвлет-обработка ИК-изображений, способ автоматического определения и коррекции радиальной дисторсии на цифровых изображениях, вопросы создания рельефных карт с помощью лазерных систем.

Вторая часть „Вычислительная техника“ посвящена вопросам распараллеливания алгоритмов логического управления, обеспечения барьерной синхронизации параллельных управляющих процессов, создания акселератора планирования, размещения задач в кластерных вычислительных системах.

В третьей части „Оптико-электронные приборы и системы“ наибольшее внимание уделено применению оптико-электронных приборов для измерения параметров движения зрачков глаз человека и выявления косоглазия; повышению качества эндоскопических изображений. Интересной является статья, посвященная контролю поверхностного натяжения жидкости и оценке флотационной активности веществ.

Четвертая часть „Автоматизация измерений“ посвящена интерференционным измерениям малых угловых перемещений, а также измерениям влажности агломерата методом СВЧ.

Результаты исследований, представленные в выпуске, обсуждались и получили положительную оценку на различных международных конференциях и симпозиумах.

*Ректор Курского государственного технического университета,
доктор физико-математических наук,
профессор И. С. Захаров*

*Заведующий кафедрой вычислительной техники,
доктор технических наук,
профессор В. С. Титов*

INTRODUCTION

This special journal issue acquaints readers with works of scientists and teachers of Kursk State Technical University.

The results of cooperative investigations carried out within many years by the scientists of Kursk State Technical University and other Universities of Russia are considered in a number of articles forming this issue.

According to subjects of articles the issue content is subdivided into four parts.

In a first part named „Digital image processing methods“ there are articles devoted to a digital portrait images automatic framing method, a wavelet processing of IR images, a method of radial distortion determination and correction on digital images, a detection method of dynamic objects, moving along unknown trajectory, a problem of relief maps creation using laser-based systems.

The second part „Computer engineering“ introduces reader to problems of logic control algorithms paralleling, parallel logic control processes barrier synchronizing, creation of accelerator designed to schedule and deploy tasks in cluster computing systems.

In the third part „Optoelectronic devices and systems“ the major attention is given to optoelectronic devices application to a human’s eye pupil motion parameters measuring for strabismus diagnostics, endoscopic images enhancement. The article, describing liquid surface stress control and substance’s flotation activity estimation, can be mentioned as especially interesting.

The fourth part „Measuring automation“ is devoted to interference ranging of small angular movements and to a humidity measuring of sintering ore using microwave frequency method.

Investigation results represented in the issue were discussed and achieved the favorable reception at different international conferences and symposiums.

*Rector of Kursk State Technical University,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor I. S. ZAKHAROV*

*Chief of Computer Engineering Department of
Kursk State Technical University,
Doctor of Engineering Sciences, Professor V. S. TITOV*

С. В. ДЕГТЯРЕВ, А. В. МЕДВЕДЕВ, С. Ю. МИРОШНИЧЕНКО

Курский государственный технический университет

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО КАДРИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ПОРТРЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ФОТОАППАРАТОВ

Рассмотрен метод автоматического кадрирования цифровых портретных изображений с центрированием лица в плоскости кадра, предназначенный для встраивания в цифровые фотоаппараты. Метод основан на распознавании глаз и последующей оценке положения лица по их координатам.

На настоящем этапе развития фототехники наибольшей популярностью пользуются цифровые фотоаппараты. Данный факт обусловлен бурным развитием технологий ПЗС-фотоприемных матриц, специализированных процессоров и устройств, обеспечивающих обработку получаемых изображений непосредственно в фотоаппарате. На рынке представлено множество моделей недорогих цифровых фотоаппаратов ведущих мировых фирм-производителей: Sony, Kodak, Olympus, Nikon, Samsung и др. Качество оптики, разрешение и физические размеры ПЗС матриц, стоимость фотоаппаратов различных фирм примерно одинаковы, поэтому при выборе конкретной модели внимание акцентируется на функциональных возможностях, и в том числе на возможностях обработки получаемых изображений.

Одной из наиболее востребованных функций, встраиваемых в цифровые фотоаппараты, является автоматическое кадрирование портретных изображений с центрированием лица человека в плоскости кадра. Существующие методы выделения лица можно разделить на две основные группы: методы сегментации изображения в различных цветовых пространствах [1] и методы оценки положения лица, основанные на распознавании глаз как наиболее информативной его части. Методы первой группы обладают невысокой точностью при съемке в условиях сложного фона, тогда как методы второй группы имеют высокую сложность за счет рекурсивной организации вычислений.

Разработан метод для автоматического кадрирования цифрового портретного изображения на основании распознавания контуров глаз. Контурное описание изображения строится с помощью метода Канни [2], который предполагает свертку исходного изображения $f(x, y)$, $x = \overline{1, M}$, $y = \overline{1, N}$ с масками КИХ-фильтров, представляющих дискретные аппроксимации частных производных фильтра Гаусса:

$$G(x, y, \sigma) = \langle g(x, y, \sigma), v(x, y, \sigma) \rangle = \langle |\nabla f(x, y, \sigma)|, \arg(\nabla f(x, y, \sigma)) \rangle, \quad (1)$$

$$g(x, y, \sigma) = \sqrt{\left(\frac{\partial G_N(x, y, \sigma)}{\partial x} \cdot f(x, y) \right)^2 + \left(\frac{\partial G_N(x, y, \sigma)}{\partial y} \cdot f(x, y) \right)^2}, \quad (2)$$

$$v(x, y, \sigma) = \operatorname{arctg} \left[\frac{\frac{\partial G_N(x, y, \sigma)}{\partial y} \cdot f(x, y)}{\frac{\partial G_N(x, y, \sigma)}{\partial x} \cdot f(x, y)} \right], \quad (3)$$

где $G_N(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$ — функция отклика фильтра Гаусса, σ — полуширина функции отклика $G_N(x, y, \sigma)$.

Способ расчета маски КИХ-фильтра на основании функции отклика приведен в [3].

Полученное с использованием формул (1)—(3) градиентное изображение $G(x, y, \sigma)$ подвергается скелетизации для приведения контурных линий объектов к односвязному виду [4]. Скелетное градиентное изображение $g_s(x, y, \sigma)$ формируется следующим образом:

$$g_s(x, y, \sigma) = \begin{cases} g(x, y, \sigma), & \text{если } [g(x, y, \sigma) > g(x+i_1, y+j_1, \sigma)] \wedge [g(x, y, \sigma) > g(x+i_2, y+j_2, \sigma)] \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (4)$$

где приращения координат $\langle i_1, j_1 \rangle, \langle i_2, j_2 \rangle$ определяются как:

$$i_1 = \lfloor \sin[v(x, y, \sigma)] \rfloor, \quad i_2 = -i_1, \\ j_1 = \lfloor \cos[v(x, y, \sigma)] \rfloor, \quad j_2 = -j_1.$$

Скелетное градиентное изображение $g_s(x, y, \sigma)$ преобразуется в двуградационное изображение $b(x, y, \sigma)$ с помощью порогового оператора с гистерезисом [2], основанного на использовании двух пороговых значений

$$b(x, y, \sigma) = \begin{cases} 1, & \text{если } g_s(x, y, \sigma) > t(T_1, T_2); \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (5)$$

где T_1, T_2 — автоматически выбираемые пороговые значения ($T_2 > T_1$), $t(T_1, T_2)$ — функция выбора одного из значений в зависимости от присутствия в восьмисвязной окрестности текущей точки $\langle x, y \rangle$ контурных точек

$$t(T_1, T_2) = \begin{cases} T_1, & \text{если } \exists i \exists j : b(x+i, y+j, \sigma) = 1, \quad i, j = \overline{-1, 1}; \\ T_2, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

Пороговое значение T_1 вычисляется с помощью сигма-метода [5] при $\sigma = 1,5$; значение T_2 — с использованием метода Отсу [6].

Результат выделения контуров на портретном изображении (рис. 1) представлен на рис. 2.

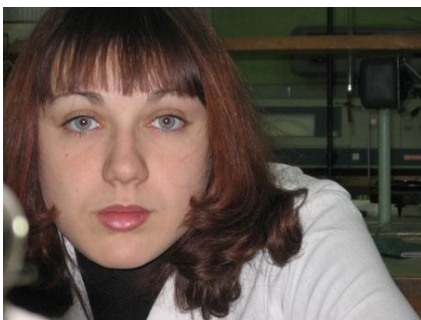


Рис. 1



Рис. 2

На основании бинарного контурного изображения $b(x, y, \sigma)$ строится векторное описание $C = \{c_i\}_{i=1, N_C}$, каждый элемент c_i которого представляет контур объекта

$$c_i = \left[\langle a_i, \bar{a}_i \rangle, \langle w_i, \bar{w}_i \rangle, \langle \Delta c_{ij} \rangle_{j=1, N_j} \right], \quad (7)$$

где $a_i = \langle x_i^{(a)}, y_i^{(a)} \rangle$ — координата начала контура; $\bar{a}_i = \langle x_i^{(\bar{a})}, y_i^{(\bar{a})} \rangle$ — координата конца контура; $w_i = \langle x_i^{(w)}, y_i^{(w)} \rangle$, $\bar{w}_i = \langle x_i^{(\bar{w})}, y_i^{(\bar{w})} \rangle$ — координаты верхней левой и нижней правой вершин описанного прямоугольника; Δc_{ij} — элементарный вектор контурной линии, описываемый приращением координат относительно предыдущей точки $\Delta c_{ij} = \langle \Delta x_{ij}, \Delta y_{ij} \rangle$.

Метод построения векторного контурного представления объектов описан в [7].

Сформированное контурное описание подвергается предварительной классификации для снижения трудоемкости процесса распознавания за счет исключения из рассмотрения заведомо неинформативных контуров.

Для предварительной классификации используются следующие признаки:

1. Отношение сторон δw_i описанного вокруг контура прямоугольника

$$\delta w_i = \begin{cases} \frac{\Delta x_i^{(w)}}{\Delta y_i^{(w)}}, & \text{если } \Delta x_i^{(w)} < \Delta y_i^{(w)} \\ \frac{\Delta y_i^{(w)}}{\Delta x_i^{(w)}}, & \text{если } \Delta x_i^{(w)} \geq \Delta y_i^{(w)} \end{cases}, \quad (8)$$

где $\Delta x_i^{(w)}, \Delta y_i^{(w)}$ — ширина и высота описанного прямоугольника

$$\Delta x_i^{(w)} = x_i^{(\bar{w})} - x_i^{(w)}, \quad \Delta y_i^{(w)} = y_i^{(\bar{w})} - y_i^{(w)}.$$

2. Относительные линейные размеры δs_i контура

$$\delta s_i = \frac{\max(\Delta x_i^{(w)}, \Delta y_i^{(w)})}{\max(M, N)}. \quad (9)$$

3. Относительное расстояние δm_i центра масс контура m_i от центра описанного прямоугольника $w_i^{(c)}$

$$\delta m_i = \frac{|m_i - w_i^{(c)}|}{\max(\Delta x_i^{(w)}, \Delta y_i^{(w)})} = \frac{\sqrt{\left(x_i^m - x_i^{(w^{(c)})} \right)^2 + \left(y_i^m - y_i^{(w^{(c)})} \right)^2}}{\max(\Delta x_i^{(w)}, \Delta y_i^{(w)})}, \quad (10)$$

$$m_i = \langle x_i^{(m)}, y_i^{(m)} \rangle = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^j \Delta c_{ik}}{N_i} = \left\langle \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^j \Delta x_{ik}}{N_i}, \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^j \Delta y_{ik}}{N_i} \right\rangle,$$

$$w_i^{(c)} = \left\langle x_i^{(w^{(c)})}, y_i^{(w^{(c)})} \right\rangle = \frac{\overline{w}_i - w_i}{2} = \left\langle \frac{x_i^{(\overline{w})} - x_i^{(w)}}{2}, \frac{y_i^{(\overline{w})} - y_i^{(w)}}{2} \right\rangle.$$

Те контуры, значение хотя бы одного из параметров (8)—(10) которых превышают априорно установленные пределы, исключаются из контурного описания С.

По окончании предварительной классификации выполняется распознавание, целью которого является поиск контуров, соответствующих открытым глазам человека. При распознавании применяются следующие признаки [8]:

1. Среднее относительное расстояние $\overline{\delta m}_i$ от центра масс m_i контура c_i до каждой его точки

$$\overline{\delta m}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \left| \left(\sum_{k=1}^j \Delta c_{ik} \right) - m_i \right|}{N_i \cdot \max(\Delta x_i^{(w)}, \Delta y_i^{(w)})}. \quad (11)$$

2. Относительный смещенный момент инерции $\delta \mu_i^{(xy)}$

$$\delta \mu_i^{(xy)} = \frac{\left| \left(\mu_i^{(xy)} \right)^2 \right|}{\mu_i^{(x)} \cdot \mu_i^{(y)}}, \quad (12)$$

где $\mu_i^{(xy)}$ — смещенный момент инерции; $\mu_i^{(x)}, \mu_i^{(y)}$ — горизонтальный и вертикальный моменты инерции соответственно:

$$\begin{aligned} \mu_i^{(xy)} &= \frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^{N_i} \left[\left(\left(\sum_{k=1}^j \Delta x_{ik} \right) - \Delta x_i^{(m)} \right) \cdot \left(\left(\sum_{k=1}^j \Delta y_{ik} \right) - \Delta y_i^{(m)} \right) \right], \\ \mu_i^{(x)} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_i} \left[\left(\left(\sum_{k=1}^j \Delta x_{ik} \right) - \Delta x_i^{(m)} \right) \right], \quad \mu_i^{(y)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_i} \left[\left(\left(\sum_{k=1}^j \Delta y_{ik} \right) - \Delta y_i^{(m)} \right) \right], \\ \Delta x_i^{(m)} &= x_i^{(m)} - x_i^{(w)}, \quad \Delta y_i^{(m)} = y_i^{(m)} - y_i^{(w)}. \end{aligned}$$

3. Сумма частот $p_i^{(e)}$ верхней части гистограммы $p[f(w_i, \overline{w}_i)]$ участка исходного изображения $f(x, y)$, ограниченного прямоугольником $\langle w_i, \overline{w}_i \rangle$

$$p_i^{(e)} = \sum_{j=T_e}^{f_{\max}} p(j), \quad (13)$$

где T_e — нижняя граница исследуемой области гистограммы $p[f(w_i, \overline{w}_i)]$, выбираемая эмпирически; f_{\max} — максимальное значение яркости изображения $f(x, y)$.

Признаки (11) — (13) не чувствительны к повороту и масштабированию распознаваемого объекта (однако линейные размеры глаза должны составлять не менее 40 точек для достижения точности распознавания не менее 95%), что обеспечивает распознавание лица при любом его положении в плоскости изображения.

В результате распознавания в контурном описании сохраняются только контуры, соответствующие открытым глазам.

В том случае, если исходное изображение содержит лицо одного человека, кадрирование выполняется следующим образом:

— определяются центры масс контуров, описывающих глаза;

— между центрами масс проводится отрезок, середина которого лежит на оси симметрии лица;

— вычисляется расстояние d_{OE} от глаза до оси симметрии (рис. 3);

— с помощью d_{OE} рассчитываются размеры кадрированного изображения d_{K1} , d_{K2} , d_{K3} (рис. 3) на основании априорно определенных зависимостей.

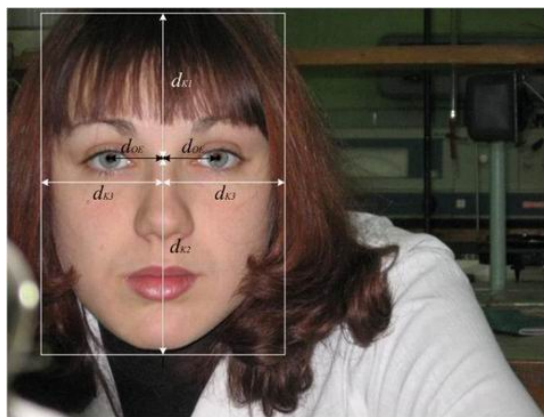


Рис. 3

Полученное кадрированное изображение масштабируется до размеров исходного с помощью метода бикубической интерполяции.

Разработанный метод позволяет автоматически кадрировать цифровое портретное изображение вне зависимости от положения лица человека и обладает низкой вычислительной сложностью, что позволяет встраивать его в цифровые фотоаппараты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kukharev G., Nowosielski A.* Fast and Efficient Algorithm for Face Detection in Color Images // Machine Graphics and Vision. 2004. Vol. 13. N. 4. P. 377—397.
2. *J.F. Canny.* A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Trans. Pattern Recognition and Machine Intelligence. 1986. Vol. 8. № 6. P. 679—698.
3. *Дегтярев С.В., Мирошниченко С.Ю., Стеценко Ю.П.* Расчет дискретных аппроксимаций низкочастотного фильтра Тихонова для обработки изображений // Известия ТулГУ. Серия. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Вып. 1. Вычислительная техника. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. С. 58—63.
4. Методы цифровой обработки изображений / *С.В. Дегтярев, С.С. Садыков, С.С. Тевс, Т.А. Ширабакина.* Курск: КурскГТУ, 2001. 167 с.
5. *Miroshnichenko S.Yu., Degtyarev S.V., Rukavitsin Yu.A.* Adaptive Choice of Global Threshold for Binarization of Gradient Images // Pattern Recognition and Image Analysis. 2005. Vol. 15. №1. P. 249—251.
6. *N.Otsu.* A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1979. Vol. 9, N 1. P. 62—66.
7. *Мирошниченко С.Ю., Мишустин В.Н., Дегтярев С.В.* Распознающий аппаратно-программный диагностирующий комплекс // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, №2. С. 22—27.
8. *Стулов Н.Н.* Способ формирования признаков объектов в СТЗ инвариантных к повороту, переносу и изменению масштаба // Системы и методы обработки и анализа информации. М.: Горячая линия — Телеком, 2005. С. 18—24.

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
20.08.07

Ю. С. БЕХТИН

Рязанский государственный радиотехнический университет

Д. В. ТИТОВ

Курский государственный технический университет

ВЕЙВЛЕТ-ОБРАБОТКА ИК-ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ДРЕЙФА ВОЛЬТОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Дрейф вольтовой чувствительности элементов матриц фотоэлектронных модулей рассматривается как мультипликативный шум на изображениях. Целью обработки является текстурная сегментация изображения на уровне вейвлет-преобразования, чтобы в зависимости от типа сегмента применять различные схемы формирования оценок вейвлет-коэффициентов.

Введение. Некоторые отечественные фотоэлектронные модули (ФЭМ) строятся на матрицах инфракрасного (ИК) диапазона, которые имеют достаточно большой (до 30%) разброс вольтовой чувствительности их элементов [1]. Неоднородность профиля чувствительности значительно искажает оригинал изображения, формируемого на выходе ФЭМ с помощью электронного коммутатора приводя, иногда к почти полной неузнаваемости объектов оператором. Чаще всего разработчики ФЭМ предлагают для компенсации разброса чувствительности (или геометрического шума чувствительности) использовать предварительную калибровку по „низкой“ и „высокой“ температурам [1], которая заключается в оценке коэффициентов передачи электронного канала для каждого элемента матрицы. К сожалению, на практике наблюдается дрейф коэффициентов передачи во время работы ФЭМ, что делает предварительную калибровку неэффективной. Эта проблема является особенно острой для КРТ-фотоприемников (кадмий — ртуть — теллур), где нет охлаждения ФЭМ жидким азотом, температура среды и ФЭМ изменяется с большой частотой и в широких пределах и где прерывания рабочего режима на калибровку производятся каждые 20-30 мин. Очевидно, чтобы увеличить интервал между калибровками, необходимо принимать дополнительные меры по удержанию коэффициентов передачи фотоэлементов в некотором допустимом диапазоне. Одним из вариантов является цифровая обработка изображений, если геометрический шум чувствительности рассматривать как мультипликативный шум с единичным средним, воздействующим на оригинальное изображение.

Поскольку размер кадра на выходе ФЭМ относительно большой, то для подавления мультипликативных помех в реальном времени желательно иметь как можно меньший объем передаваемой информации. Одним из инструментов, где и фильтрация, и сжатие данных производятся одновременно, является двумерное вейвлет-преобразование на основе сепарабельных базисов [2].

Статистическая модель геометрического шума чувствительности. В целях выявления вида закона распределения коэффициентов передачи фотоэлементов для большого числа матриц ФЭМ были проанализированы результаты оценок их параметров. На рис. 1 приведена гистограмма коэффициентов передачи фотоэлементов КРТ-матрицы ФЭМ, изготовленного одним из предприятий Москвы. Как видно из рис. 1 матрица содержит дефектные и условно-годные элементы, сигналы с которых заменяются на другие, вычисленные по какому-либо алгоритму компенсации дефектов [1], чаще всего на сигналы соседних, годных элементов.

Убирая из рассмотрения дефектные и условно-годные фотоэлементы, путем усреднения по 30 изделиям была получена типовая гистограмма коэффициентов передачи фотоэлементов матриц ФЭМ. На основании типовой гистограммы была выдвинута гипотеза о гауссовском законе распределения коэффициентов передачи с единичным средним. Гипотеза проверялась по критерию χ^2 с альтернативными гипотезами о виде закона распределения: треугольное, двойное экспоненциальное (Лапласа), логнормальное, Стьюдента. Проверка по критерию χ^2 подтвердила гауссов характер плотности вероятности коэффициентов передачи годных фотоэлементов матриц ФЭМ.

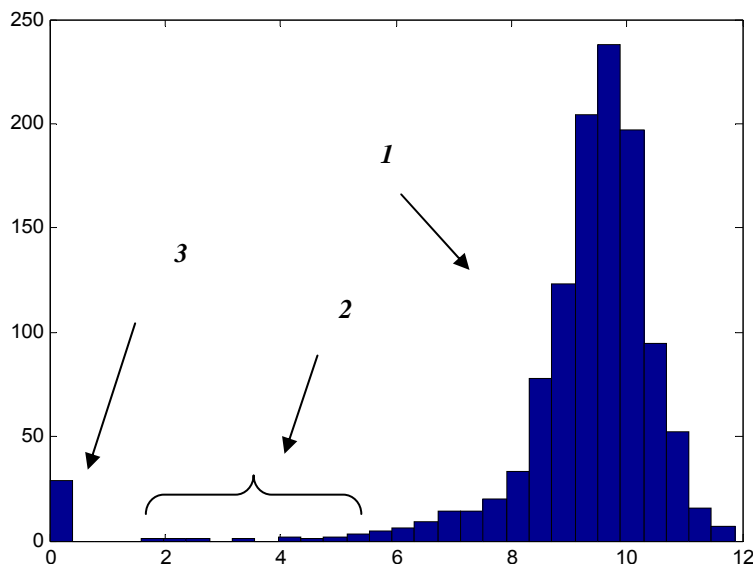


Рис. 1

Модель изображения на уровне вейвлет-преобразования. Дрейф коэффициентов передачи приводит к мультипликативной модели

$$Y = XZ, \quad (1)$$

где Y — наблюдаемое изображение, X — неизвестный оригинал, Z — мультипликативный гауссовский шум с единичным средним. Для оценки поведения трех составляющих модели (1) применяют коэффициенты вариации, которые являются индикаторами однородности изображения [2]. Коэффициент вариации вычисляется в пределах некоторого окна вокруг наблюдаемого пикселя. Поскольку переменные X и Z в (1) независимы, то можно записать:

$$\mu_Y = \mu_X \mu_Z = \mu_X, \quad (2)$$

$$C_Y = \sigma_Y / \mu_Y, \quad C_X = \sigma_X / \mu_X, \quad C_Z = \sigma_Z / \mu_Z,$$

где $C_{(\dots)}$ — коэффициенты вариации, вычисляемые с помощью оценок математических ожиданий μ_Y, μ_X, μ_Z и дисперсий $\sigma_Y^2, \sigma_X^2, \sigma_Z^2$ в пределах заданных окон. Обычно окно для оценки коэффициента вариации C_Z имеет меньший размер по сравнению с окном для оценки коэффициента вариации C_Y [2, 3].

С учетом того, что $C_Y^2 = (M[X^2]M[Z^2] - \mu_X^2) / \mu_X^2$, значение квадрата коэффициента вариации для истинной интенсивности изображения имеет вид:

$$C_X^2 = \frac{C_Y^2 - C_Z^2}{C_Z^2 + 1}. \quad (3)$$

Сравнение оценок коэффициентов вариации \mathfrak{E}_Y и \mathfrak{E}_Z позволяет различать три ситуации, возникающие при анализе зашумленного изображения, и, следовательно, проводить его обработку по следующему принципу:

$$\mathfrak{E} = \begin{cases} f(y), & \text{если } \mathfrak{E}_Z < \mathfrak{E}_Y < C_{\max} (C_X \neq 0) \\ y, & \text{если } \mathfrak{E}_Y \geq C_{\max} (C_X > 0) \\ \mu_Y, & \text{если } \mathfrak{E}_Y \leq \mathfrak{E}_Z (C_X = 0) \end{cases}, \quad (4)$$

где $C_{\max} = \max\{\mathfrak{E}_Z\}$. Если $\mathfrak{E}_Y \geq C_{\max} (C_X > 0)$, то данная ситуация соответствует попаданию в участок либо с крайне разнородной текстурой, либо ФЭМ с точечными источниками или перепадами яркостей при переходе окном границ объекта; в этом случае необходимо сохранить наблюдаемое значение сигнала без изменений, поскольку влияние шума незначительно. При $\mathfrak{E}_Y \leq \mathfrak{E}_Z (C_X = 0)$ наблюдается однородная текстура; очевидно, что усредняющий фильтр может восстановить оригинал. Наконец, ситуация $\mathfrak{E}_Z < \mathfrak{E}_Y < C_{\max} (C_X \neq 0)$ является неопределенной с точки зрения проверки на однородность текстуры, следовательно, для получения оценки оригинала должен быть применен какой-либо алгоритм фильтрации $f(y)$.

Поведение вейвлет-коэффициентов при действии шума. Если применить схему вейвлет-декомпозиции изображения Малла (Mallat) [2], где разложение идет по ветви аппроксимации, то можно определить оператор $W^{[j]}$, формирующий горизонтальные, вертикальные и диагональные коэффициенты на каждом уровне j . Поскольку вейвлет-преобразование является результатом последовательных сверток, и если после децимации размер окрестности точки (a, b) на каждом масштабе не изменяется, то

$$W^{[j]} = G^{[j]} \prod_{i=1}^{j-1} H^{[i]}, \quad W_Y(a, b) = [W^{[j]}Y]_{a,b}, \quad (5)$$

где

$$W_Y(a, b) = \sum_k \sum_l \tilde{H}_k \tilde{G}_l Y(a+k, b+l); \quad (6)$$

здесь k и l определяют величину окрестности вокруг наблюдаемого пикселя, при этом

$$\tilde{H}_k = h_k^j; \quad \tilde{G}_l = g_l^{[j-1]} h_l^{j-1}. \quad (7)$$

Тогда вейвлет-декомпозиция зашумленного изображения с мультипликативной моделью вида (1) может быть представлена следующим образом:

$$W_Y = W^{[j]}Y = W^{[j]}XZ = W^{[j]}X + W^{[j]}X(Z-1) = W^{[j]}X + W^{[j]}XZ_c = W_X + W_{\Xi}, \quad (8)$$

где $W_X = W^{[j]}X$, $W_{\Xi} = W^{[j]}(XZ_c)$ — центрированные и некоррелированные случайные процессы с нулевыми математическими ожиданиями.

Одним из авторов данной статьи в [3] показано, что на уровне вейвлет-преобразования

$$C_X^2 = \frac{C_{W_Y}^2 - C_{W_Z}^2}{K_2^{[j]}(1 + C_Z^2)}, \quad (9)$$

где $K_n^{[j]} = \sum_k \sum_l (\tilde{H}_k \tilde{G}_l)^n$, $C_{W_Y} = \sigma_{W_Y} / \mu_Y$ и $C_{W_Z} = \sqrt{K_2^{[j]}} C_Z$. Сравнивая соотношения (4) и (9), можно сделать вывод о возможности использования коэффициентов вариаций C_{W_Y} и C_{W_Z} для классификации текстуры изображения (сегментации).

Поиск оценок коэффициентов вариации \mathfrak{E}_{W_Y} и \mathfrak{E}_{W_Z} происходит в пределах окрестностей (окон) каждого вейвлет-коэффициента высокочастотных субполос и соответствующего ему пикселя из низкочастотной области (аппроксимации) на текущем уровне декомпозиции через оценки $\hat{\sigma}_{W_Y}^2(a, b) = \frac{1}{D} \sum_{(k, l) \in D} w_Y^2(k, l)$ и $\mathfrak{f}_Y(a, b) = \frac{1}{D} \sum_{(k, l) \in D} Y(k, l)$, где D — область соседних точек, определяемых окном. Оценки \hat{C}_{W_Z} можно найти аналогичным образом с меньшим окном или использовать оценки коэффициентов вариации \hat{C}_Z , вычисленные по массиву коэффициентов аппроксимации соответствующего уровня.

Следуя логике соотношения (4), определим возможные ситуации при сравнении оценок коэффициентов вариации вейвлет-коэффициентов:

- 1) если $\mathfrak{E}_{W_Z} < \mathfrak{E}_{W_Y} < C_{W_{\max}}$, то $\hat{w}_Y = f(w_Y)$, $C_{W_{\max}} = \max\{\mathfrak{E}_{W_Z}\}$;
- 2) если $\mathfrak{E}_{W_Y} > C_{W_{\max}}$, то $\hat{w}_X = w_Y$;
- 3) если $\mathfrak{E}_{W_Y} \leq \mathfrak{E}_{W_Z}$, то $\hat{w}_X = 0$.

Восстановленное (отфильтрованное) изображение \hat{X} получается в результате обратного вейвлет-преобразования над коэффициентами \hat{w}_X .

Поиск оценок вейвлет-коэффициентов при неоднородной текстуре. Пусть каким-либо образом определены априорные плотности вероятности $P_{W_X}(w_X)$ и $P_{W_Y}(w_Y)$ для случайных процессов W_X и W_Y . Тогда для обеспечения минимально возможного значения байесовского риска следует вычислять такое значение оценки вейвлет-коэффициента \hat{w}_X , при котором апостериорная условная плотность вероятности $P_{W_X|W_Y}(w_X | w_Y)$ принимает максимальное значение:

$$P_{W_X|W_Y}(w_X | w_Y) \rightarrow \max_{w_X}. \quad (10)$$

Апостериорная условная плотность вероятности определяется по соотношению Байеса [6], которая с учетом (14) принимает вид

$$P_{W_X|W_Y}(w_X | w_Y) = \frac{P_{W_Y|W_X}(w_Y | w_X) P_{W_X}(w_X)}{P_{W_Y}(w_Y)} = \frac{P_{W_{\Xi}|W_X}(w_{\Xi} | w_X) P_{W_X}(w_X)}{P_{W_Y}(w_Y)}. \quad (11)$$

Оценка вейвлет-коэффициента \hat{w}_X , при которой достигается максимум апостериорной условной плотности вероятности, вычисляется с использованием логарифмирования соотношения (11):

$$\frac{d}{dw_X} \left(\ln(P_{W_{\Xi}|W_X}(w_{\Xi} | w_X)) + \ln(P_{W_X}(w_X)) \right) \Big|_{w_X = \hat{w}_X} = 0. \quad (12)$$

Таким образом, необходимо определить априорную условную плотность вероятности для вейвлет-коэффициентов шума $P_{W_{\Xi}|W_X}(w_{\Xi}|w_X)$ и априорную плотность вероятности $P_{W_X}(w_X)$, описывающую поведение неискаженных вейвлет-коэффициентов. Для этого используем обобщенное распределение Гаусса, широко применяемое в последнее время.

Обобщенное распределение Гаусса случайной величины X с нулевым математическим ожиданием имеет вид [4]:

$$f_X(x) = B(\beta, \sigma) \exp\left\{-\left(G(\beta, \sigma)|x|\right)^{\beta}\right\}, \quad -\infty < x < +\infty, \quad \beta > 0, \quad (13)$$

где σ^2 — дисперсия, β — параметр, определяющий эксцесс для кривой распределения, при этом

$$B(\beta, \sigma) = \frac{\beta \cdot G(\beta, \sigma)}{2\Gamma(1/\beta)}, \quad G(\beta, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\Gamma(3/\beta)}{\Gamma(1/\beta)} \right]^{1/2}. \quad (14)$$

Частными случаями (14) являются распределение Лапласа ($\beta=1$) и распределение Гаусса ($\beta=2$). Таким образом, чтобы применить выражение (13) для поиска оценки $\hat{\epsilon}_X$ по оценке (12), необходимо найти оценки дисперсий и параметров β_X и β_{Ξ} для аппроксимации соответствующих плотностей вероятности вейвлет-коэффициентов $P_{W_X}(w_X)$ и $P_{W_{\Xi}|W_X}(w_{\Xi}|w_X)$. Если оценки дисперсий и параметров β_X и β_{Ξ} найдены, то оценка \hat{w}_X согласно (13) определяется через численное решение уравнения (приводится без учета знака при вейвлет-коэффициенте w_X)

$$\beta_{\Xi} G_{\Xi}|w_Y - w_X|^{\beta_{\Xi}-1} + \beta_X G_X|w_X|^{\beta_X-1} = 0. \quad (15)$$

Для общего случая оценки дисперсий и параметров β_X и β_{Ξ} могут быть найдены через соответствующие центральные моменты выборочных данных.

Параметр обобщенного распределения Гаусса β вычисляется через численное решение уравнения [4]:

$$\frac{\mu_{2,W}}{\sqrt{\mu_{4,W}}} = \frac{\Gamma(3/\beta)}{\sqrt{\Gamma(1/\beta)\Gamma(5/\beta)}}. \quad (16)$$

Для вычисления второго и четвертого моментов процессов X и Ξ используем тот факт, что оценки локальных дисперсий $\hat{\sigma}_{W_Y}^2$ найдены в процессе анализа текстуры, при этом

$$\mu_{2,W} = \sigma_{W_Y}^2, \quad \mu_{4,W} = \frac{1}{D} \sum_{(k,l) \in D} w_Y^4(k,l).$$

Результаты моделирования. Для проверки разработанного алгоритма в среде Matlab была сформирована последовательность кадров, где геометрический шум чувствительности моделировался с помощью датчика нормально распределенных случайных чисел с единичным средним и дисперсией, которая увеличивалась от кадра к кадру по линейному закону. В эксперименте использовалось быстрое трехуровневое вейвлет-преобразование, тип вейвлета — CDF 9.7.



Рис. 2



Рис. 3

На рис. 2 и 3 представлены некоторые зашумленные и обработанные кадры из видеопоследовательности соответственно. Изменения средней квадратической ошибки (СКО) для искаженных и восстановленных кадров показаны на рис. 4 где показаны изменения СКО по кадрам (в увеличенном временном масштабе): без обработки (кривая 1), с обработкой предложенным алгоритмом (кривая 2).

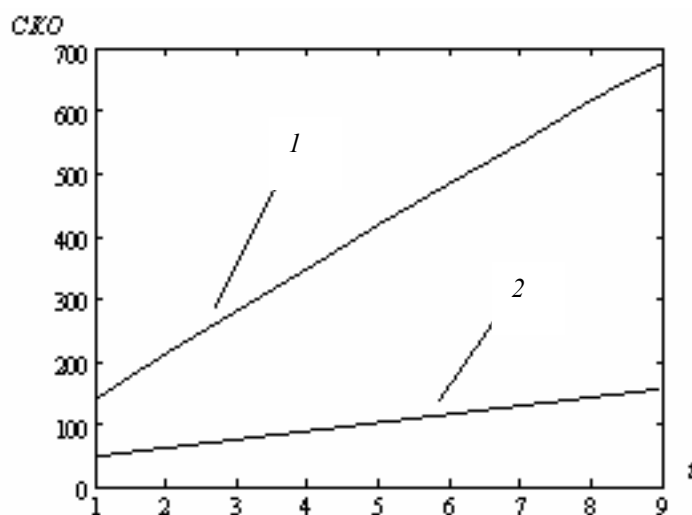


Рис. 4

Из рис. 3 и 4 видно, что предложенный алгоритм вейвлет-обработки изображений матричных ФЭМ обеспечивает относительно высокое качество восстановления оригинала, что позволяет увеличить интервал между калибровками ФЭМ до нескольких часов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кругликов С. В. Методы и средства подавления структурных помех многоэлементных фотоприемников // Аналитический обзор № 4628 за 1970—1987 гг. М., 1989.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006.
3. Бехтин Ю. С. Алгоритм вейвлет-фильтрации зашумленных изображений // Вестник РГРТА. № 15. 2004.
4. Multiresolution MAP Despeckling of SAR Images Based on Locally Adaptive Generalized Gaussian pdf Modeling / F. Argenti, T. Bianchi, L. Alparone // IEEE Trans. on Image Processing. 2006. Vol. 15, No. 11. P. 3385—3399.

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
01.09.07

Е. И. БУГАЕНКО, М. И. ТРУФАНОВ

Курский государственный технический университет

СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ РАДИАЛЬНОЙ ДИСТОРСИИ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Представлен способ определения параметров дисторсии по единственному кадру изображения, содержащему объекты с прямолинейными контурами. Способ может быть применен для коррекции дисторсии на изображениях, полученных видеодатчиками с неизвестными параметрами дисторсии.

В настоящее время на рынке цифровых фото-, видеокамер наблюдается большое разнообразие как профессионального, так и любительского оборудования. Современные камеры обладают хорошими характеристиками, но проблема влияния аберраций объектива на точность изображения в них не является решенной. Наиболее заметные геометрические искажения изображения обусловлены радиальной дисторсией.

Известны различные способы, обеспечивающие коррекцию данной аберрации, однако большинство из них основано на использовании методов, требующих участия человека, или на методах калибровки дисторсии по изображению эталонного объекта [1].

Предлагаемый способ выполняется в автоматическом режиме без участия пользователя и без использования специально созданных шаблонов и основан на автоматическом выборе объектов на изображении, по которым определяется дисторсия, вычислении коэффициента радиальной дисторсии и последующем восстановлении истинных положений всех точек искаженного изображения.

Искажения, вызванные радиальной дисторсией, определяются [2] по формуле

$$\begin{pmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots + k_n r^{2n}) \\ y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots + k_n r^{2n}) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $(\Delta x_r, \Delta y_r)$ — отклонение точки изображения от ее истинного положения, которое занимала бы точка при отсутствии радиальной дисторсии, k_1, k_2, \dots, k_n — коэффициенты радиальной дисторсии, $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ — расстояние от центра кадра до точки с координатами (x, y) . Согласно [3] для практического применения достаточно определять только коэффициент k_1 . Блок-схема общего алгоритма определения коэффициента радиальной дисторсии и коррекции изображения представлена на рис. 1. Входными данными являются цифровые изображения (блок 1 на рис. 1). Под изображением понимают матрицу значений яркостей пикселей оцифрованного изображения:

$$I = I(x, y), \quad 0 \leq I(x, y) \leq I,$$

где x, y — координаты пиксела изображения по горизонтали и вертикали соответственно, $x \in [-\frac{X}{2}; \frac{X}{2}]$, $y \in [-\frac{Y}{2}; \frac{Y}{2}]$, X, Y — размерность изображения по горизонтали и вертикали соответственно.

В блоке 2 производятся выделение контуров объектов на изображении стандартным оператором, например оператором Лапласа [3], и бинаризация.

В блоке 3 рассчитывают радиусы кривизны выделенных контуров. Анализ радиусов позволяет исключить из рассмотрения контуры, радиусы кривизны которых вследствие их больших значений не могут быть вызваны только дисторсией (т.е. контуров, уже не прямых до искажения, и которые не могут быть использованы для определения величины дисторсии) и контуров, лежащих на прямых, проходящих через центр кадра (так как согласно предлагае-

тому способу данные контуры не могут быть использованы для определения коэффициента дисторсии).

После выбора контуров осуществляют определение множества коэффициентов k_{li} радиальной дисторсии (блок 4 на рис. 1), где $i=1..n$, n — количество используемых контуров. Для этого считают, что каждый контур до искажения был прямой, а его искажение обусловлено только влиянием дисторсии. Для каждого i -го контура при определении коэффициента k_{li} получают координаты трех точек — начала, конца и точки, принадлежащей контуру и равноудаленной от его концов.

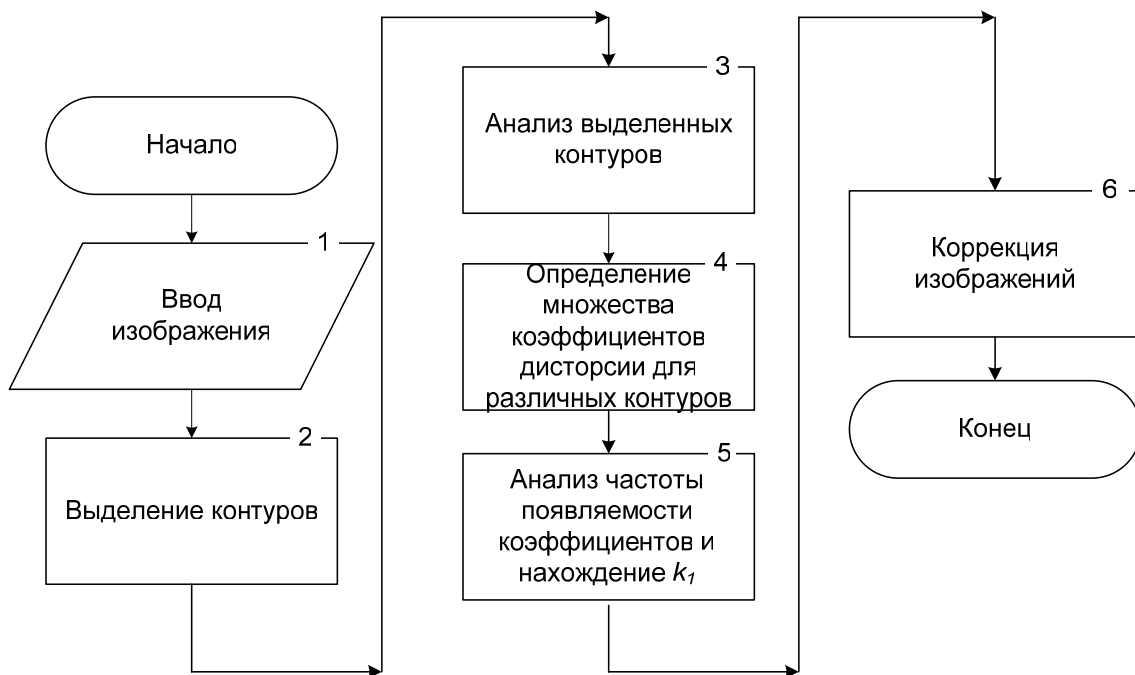


Рис. 1

Рассмотрим расчет коэффициента радиальной дисторсии. Каждый из контуров на изображении до искажения представлял собой прямую линию, которая вследствие искажения стала кривой.

Уравнение прямой имеет вид

$$y = qx + w, \quad (2)$$

где q , w — постоянные коэффициенты.

Обозначим начало контура точкой $A'(x'_A, y'_A)$, среднюю точку — $B'(x'_B, y'_B)$, конечную — $C'(x'_C, y'_C)$, и введем точку D' , которая является точкой пересечения прямой, на которой лежит контур, с осью абсцисс (рис. 2). Точка D' — вспомогательная и используется для составления системы уравнений, необходимой для вычисления коэффициента дисторсии. До искажения перечисленные точки имели расположение, обозначенное на рис. 2 точками $A(x_A, y_A)$, $B(x_B, y_B)$, $C(x_C, y_C)$, $D(x_D, y_D)$ соответственно.

Для определения коэффициента радиальной дисторсии одна из трех точек должна располагаться на оси ординат. Если ни одна из точек не расположена на оси ординат, тогда изображение поворачивают таким образом, чтобы указанное условие выполнялось.

Используя формулы аффинного преобразования в плоскости, а именно поворота относительно начала координат на угол ξ , координаты точек преобразуют:

$$\begin{aligned}
 y''_A &= -x'_A \sin(\xi) + y'_A \cos(\xi), \\
 x''_A &= x'_A \cos(\xi) + y''_A \cos(\xi), \\
 y''_B &= -x'_B \sin(\xi) + y'_B \cos(\xi), \\
 x''_B &= x'_B \cos(\xi) + y'_B \cos(\xi), \\
 y''_C &= -x'_C \sin(\xi) + y'_C \cos(\xi), \\
 x''_C &= x'_C \cos(\xi) + y'_C \cos(\xi), \\
 y'_A &= y''_A, \\
 x'_A &= x''_A, \\
 y'_B &= y''_B, \\
 x'_B &= x''_B, \\
 y'_C &= y''_C, \\
 x'_C &= x''_C,
 \end{aligned}
 \quad , \xi = \arctg\left(\frac{x'_A}{y'_A}\right),$$

где $(x''_A, y''_A), (x''_B, y''_B), (x''_C, y''_C)$ – координаты точек A', B', C' после поворота.

Для точек A, B, C, D уравнение (2) выглядит следующим образом:

$$y_A = w, \quad (3)$$

$$y_B = qx_B + w,$$

$$y_C = qx_C + w, \quad (4)$$

$$0 = qx_D + w.$$

После подстановки уравнения (3) в уравнение (4):

$$y_B = qx_B + y_A, \quad y_C = qx_C + y_A, \quad 0 = qx_D + y_A. \quad (5)$$

Так как $\triangle OBX_B$ и $\triangle OCX_C$ – прямоугольные (рис. 2), то:

$$y_B = x_B \operatorname{tg} \alpha_B, \quad (6)$$

$$y_C = x_C \operatorname{tg} \alpha_C.$$

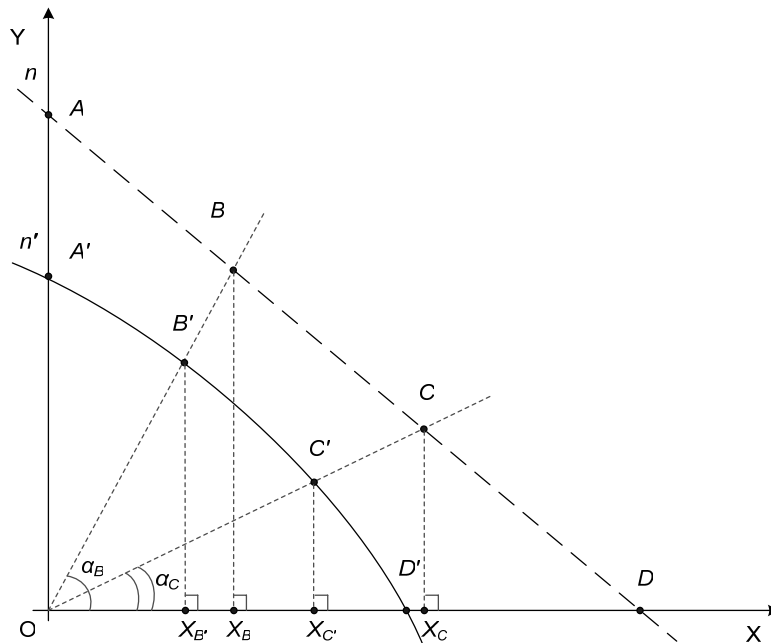


Рис. 2

Объединив уравнения (6) в (5), получим:

$$\begin{aligned}x_B \operatorname{tg} \alpha_B &= qx_B + y_A, \\x_C \operatorname{tg} \alpha_C &= qx_C + y_A.\end{aligned}\quad (7)$$

Искажения, вызванные радиальной дисторсией в декартовой системе координат, исходя из (1) определяют по формулам:

$$\begin{aligned}\Delta x &= x' - x, \\ \Delta y &= y' - y, \\ y' - y &= yk_1(x^2 + y^2), \\ x' - x &= xk_1(x^2 + y^2),\end{aligned}\quad (8)$$

где (x', y') — координаты точки, измеряемые по изображению.

Для точек A , B и C выражения (8) записывают следующим образом:

$$\begin{aligned}y_A' &= y_A^3 k_1 + y_A, \\ x_B' - x_B &= x_B k_1 (x_B^2 + y_B^2), \\ x_C' - x_C &= x_C k_1 (x_C^2 + y_C^2).\end{aligned}\quad (9)$$

После подстановки выражения (7) в выражение (9) получают:

$$\begin{aligned}x_B' - x_B &= x_B^3 k_1 (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_B), \\ x_C' - x_C &= x_C^3 k_1 (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_C).\end{aligned}\quad (10)$$

Поделив первое из уравнений (10) на второе, получим:

$$\frac{x_B' - x_B}{x_C' - x_C} = \frac{x_B^3 (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_B)}{x_C^3 (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_C)}.\quad (11)$$

Взаимосвязь истинного положения точки и ее положения на искаженном изображении в полярной системе координат определяют формулой

$$R' - R = k_1 R^3, \quad (12)$$

где R , R' — расстояния от центра координат до истинного положения точки и ее положения на искаженном изображении соответственно.

Для точки C выражение (12) примет вид

$$R_C' - R_C = k_1 R_C^3, \quad (13)$$

где R_C , R_C' — расстояния от центра координат до точки C и до точки C' соответственно.

Так как $\Delta O C X_{C'}$ — прямоугольный, то

$$R_C' = \sqrt{x_C'^2 + y_C'^2}. \quad (14)$$

С использованием выражения (7) и то, что $\Delta O C X_C$ — прямоугольный (см. рис. 2), формула расчета его гипотенузы примет вид

$$R_C = \sqrt{x_C^2 + y_C^2} = \sqrt{x_C^2 + x_C^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_C} = x_C \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_C}. \quad (15)$$

Выполнив подстановку выражения (15) в (13), получим:

$$\begin{aligned}\sqrt{x_C'^2 + y_C'^2} - x_C \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_C} &= k_1 (x_C \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_C})^3; \\ \sqrt{x_C'^2 + y_C'^2} - x_C \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_C} &= k_1 x_C^3 (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_C})^3.\end{aligned}\quad (16)$$

Используем замену:

$$\begin{aligned}a &= \sqrt{x_C'^2 + y_C'^2}, \\ b &= \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_B}, \\ c &= \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_C}.\end{aligned}\quad (17)$$

Подставив выражения (17) в выражение (16), получим:

$$c^3 k_1 x_C^3 + c x_C - a = 0. \quad (18)$$

Для определения коэффициента радиальной дисторсии составляют систему уравнений:

$$\begin{cases} qx_D + y_A = 0 \\ qx_B + y_A = x_B \operatorname{tg} \alpha_B \\ qx_C + y_A = x_C \operatorname{tg} \alpha_C \\ y_A^3 k_1 + y_A - y_A' = 0 \\ \frac{x_B' - x_B}{x_C' - x_C} = \frac{x_B^3 b^2}{x_C^3 c^2} \\ c^3 k_1 x_C^3 + c x_C - a = 0 \end{cases} \quad (19)$$

В результате решения системы уравнений (19) получают уравнение

$$z^5 + \gamma_1 z^4 + \gamma_2 z^3 + \gamma_3 z^2 + \gamma_4 z + \gamma_5 = 0, \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned}\gamma_1 &= \frac{2ac^2 \operatorname{tg} \alpha_B + 5b^2 c x_C' \operatorname{tg} \alpha_C - 5ab^2 \operatorname{tg} \alpha_C + 3ac^2 \operatorname{tg} \alpha_C - 2c^3 x_B' \operatorname{tg} \alpha_C - 3c^3 x_B' \operatorname{tg} \alpha_B}{-ac^2 + c^3 x_B' + ab^2 - b^2 c x_C'}, \\ \gamma_2 &= \frac{6c^3 x_B' \operatorname{tg} \alpha_B \operatorname{tg} \alpha_C + 10ab^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_C - 6ac^2 \operatorname{tg} \alpha_B \operatorname{tg} \alpha_C + 3c^3 x_B' \operatorname{tg}^2 \alpha_B - c^5 x_B'}{-ac^2 + c^3 x_B' + ab^2 - b^2 c x_C'} + \\ &+ \frac{c^3 x_B' \operatorname{tg}^2 \alpha_C - 10b^2 c x_C' \operatorname{tg}^2 \alpha_C + b^2 c^3 x_C' - ac^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_B - 3ac^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_C}{-ac^2 + c^3 x_B' + ab^2 - b^2 c x_C'}, \\ \gamma_3 &= \frac{10b^2 c x_C' \operatorname{tg}^3 \alpha_C - 3c^3 x_B' \operatorname{tg} \alpha_B \operatorname{tg}^2 \alpha_C - 3b^2 c^3 x_C' \operatorname{tg} \alpha_C - c^5 y_A' + 6ac^2 \operatorname{tg} \alpha_B \operatorname{tg}^2 \alpha_C + ac^2 \operatorname{tg}^3 \alpha_C}{-ac^2 + c^3 x_B' + ab^2 - b^2 c x_C'} + \\ &+ \frac{b^2 c^3 y_A' - c^3 x_B' \operatorname{tg}^3 \alpha_B - 6c^3 x_B' \operatorname{tg}^2 \alpha_B \operatorname{tg} \alpha_C + 3c^5 x_B' \operatorname{tg} \alpha_B + 3ac^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_B \operatorname{tg} \alpha_C - 10ab^2 \operatorname{tg}^3 \alpha_C}{-ac^2 + c^3 x_B' + ab^2 - b^2 c x_C'},\end{aligned}$$

$$\gamma_4 = \frac{-3ac^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_B \operatorname{tg}^2 \alpha_C + 5ab^2 \operatorname{tg}^4 \alpha_C - 5b^2 cx_C' \operatorname{tg}^4 \alpha_C + 3c^3 x_B' \operatorname{tg}^2 \alpha_B \operatorname{tg}^2 \alpha_C - 2ac^2 \operatorname{tg} \alpha_B \operatorname{tg}^3 \alpha_C +}{-ac^2 + c^3 x_B' + ab^2 - b^2 cx_C'} +$$

$$+ \frac{2c^5 y_A' \operatorname{tg} \alpha_B + 2c^3 x_B' \operatorname{tg}^3 \alpha_B \operatorname{tg} \alpha_C - 2b^2 c^3 y_A' \operatorname{tg} \alpha_C - 3c^5 x_B' \operatorname{tg}^2 \alpha_B + 3b^2 c^3 x_C' \operatorname{tg}^2 \alpha_C}{-ac^2 + c^3 x_B' + ab^2 - b^2 cx_C'},$$

$$\gamma_5 = \frac{-b^2 c^3 x_C' \operatorname{tg}^3 \alpha_C - ab^2 \operatorname{tg}^5 \alpha_C - c^3 x_B' \operatorname{tg}^3 \alpha_B \operatorname{tg}^2 \alpha_C - c^5 y_A' \operatorname{tg}^2 \alpha_B + ac^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_B \operatorname{tg}^3 \alpha_C +}{-ac^2 + c^3 x_B' + ab^2 - b^2 cx_C'} +$$

$$+ \frac{b^2 cx_C' \operatorname{tg}^5 \alpha_C + b^2 c^3 y_A' \operatorname{tg}^2 \alpha_C + c^5 x_B' \operatorname{tg}^3 \alpha_B}{-ac^2 + c^3 x_B' + ab^2 - b^2 cx_C'}.$$

Обозначим корни уравнения (20) z_1, z_2, z_3, z_4, z_5 . Нахождение корней производится численными методами [4] с заданной точностью.

Рассматриваются только действительные корни. После их нахождения рассчитывается для каждого корня ордината y_A точки A

$$y_A = \frac{-(az^3 - 3az^2 \operatorname{tg} \alpha_C + 3az \operatorname{tg}^2 \alpha_C - a \operatorname{tg}^3 \alpha_C + c^3 y_A')}{c(-\operatorname{tg} \alpha_C + z - c)(-\operatorname{tg} \alpha_C + z + c)}. \quad (21)$$

В результате находятся пять либо три, либо одно возможное значение истинной ординаты точки A и производят выбор истинного значения ординаты точки A из полученных. Для выбора применяют следующие критерии:

- ордината точки A после выполнения преобразования поворота на угол ζ относительно начала координат не может численно превосходить половины ширины изображения;
- ордината точки не может быть другого знака — истинное положение точки должно быть в той же четверти, в которой расположено и искаженное;
- при подстановке значений q и y_A в систему уравнений (19) рассчитанные координаты абсцисс и ординат точек B и C также не могут численно превосходить половины длины и ширины изображения соответственно и должны быть одинакового знака с искаженными координатами.

После анализа возможных вариантов остается значение, удовлетворяющее вышеперечисленным критериям. Используя это значение и формулу (21), вычисляют

$$k_1 = \frac{y_A' - y_A}{y_A^3}. \quad (22)$$

После расчета коэффициентов для каждого контура производится анализ частоты встречаемости коэффициентов (блок 5 на рис. 1). Для этого строится гистограмма зависимости величины коэффициента от частот его повторяемости, и определяются по гистограмме значения k_l , используемого для последующей коррекции, как среднего в окрестности значения k_{li} с максимальной частотой повторения.

После нахождения коэффициента k_l в блоке 6 по известным искаженным координатам (x', y') на изображении определяют истинное положение точки (x, y) , используя формулу (1).

Предложенный способ обеспечивает определение коэффициента и проведение коррекции радиальной дисторсии на цифровом изображении с использованием информации, которую содержит изображение, при неизвестных параметрах фото-, видеокамеры, в которой оно было получено. Способ позволяет увеличить скорость и точность определения коэффициента радиальной дисторсии и коррекции изображения за счет автоматизации этих процессов, отсутствия подбора величин и исключения визуальной оценки, а также расширить область

применения путем его использования независимо от параметров фото-, видеокамеры, в которой изображение было получено, на основе информации, содержащейся в самом изображении.

Работа выполнена при поддержке фонда „Научный потенциал“ (договор № 107, 2007 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sing Bing Kang*. Method for recovering radial distortion parameters from a single camera image. United States Patent 6101288: Publication Date: 2000-08-08.
2. *R.Y. Tsai*. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses // *IEEE Trans. Rob. Autom.*, RA-3(4). 1987. P. 323—344.
3. *Vark Reeves, Andrew J. Moore, Duncan P. Hand, Julian D.C. Jones*. Dynamic shape measurement system for laser materials processing. *Opt. Eng.* 42(10). 2003. P. 2923—2929.
4. *Демидович Б. П., Марон И. А.* Основы вычислительной математики. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1966.

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
01.09.07

УДК 681.3

В. Я. ПАНЧЕНКО, А. В. ЕВСЕЕВ, В. С. МАЙОРОВ, С. В. КАМАЕВ

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН (ИПЛИТ РАН)
г. Шатура Московской области*

В. П. САВИНЫХ, А. П. МИХАЙЛОВ, М. В. ХОРОШЕВ, В. М. КУРКОВ, А. Б. ВЕЛЕЖЕВ
Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)

СОЗДАНИЕ РЕЛЬЕФНЫХ КАРТ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ ПО ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рельефные карты (трехмерные модели местности) являются весьма востребованными. В ряде случаев, когда необходимо быстро получить реальную картину, существует настоятельная необходимость весьма оперативного изготовления таких макетов. В настоящей статье описываются разработанные и апробированные методика и технология оперативного создания таких рельефных карт, созданных в кооперации ИПЛИТ РАН с МИИГАиК.

Часто единственной возможностью получить начальную объективную информацию является аэро- или космическая фотосъемка. Компьютерная фотограмметрическая обработка этих серий снимков позволяет создать трехмерную модель объекта. На основе полученных 3D-файлов методом лазерной стереолитографии создается реальный объемный макет выбранной области. Естественно, отдельные блоки этой схемы могут быть пространственно разнесены и независимы, необходимо только обеспечить обмен информацией между ними (например, через Интернет). Настоящая статья показывает эффективность соединения информационных и лазерных технологий для решения актуальных практических задач.

Особенности фотограмметрической обработки аэроснимков. Современное аэрофотогеодезическое производство характеризуется активным использованием цифровых технологий при создании и обновлении карт различного назначения по материалам аэрокосмической съемки. Эти технологии базируются на применении цифровых фотограмметрических систем.

Одним из важных фотограмметрических процессов, выполняемых при создании карт, является создание цифровых моделей рельефа местности. Для определения координат точек местности по стереопаре снимков методом прямой фотограмметрической засечки необходимо, чтобы были известны элементы внешнего ориентирования снимков. На практике в большинстве случаев их значения неизвестны. В этом случае определение координат точек местности по стереопаре снимков выполняют методом двойной обратной фотограмметрической засечки. Решение задачи по этому методу выполняется в нижеприведенной последовательности:

1. Определяют пять элементов взаимного ориентирования снимков, которые определяют взаимную угловую ориентацию стереопары снимков и базиса фотографирования, для чего необходимо измерить не менее пяти соответственных точек на стереопаре снимков.

2. Строят фотограмметрическую модель объекта по измеренным на стереопаре снимков координатам изображений соответственных точек и значениям элементов взаимного ориентирования снимков. Построенная модель подобна сфотографированному объекту, но имеет произвольный масштаб и произвольно расположена и ориентирована относительно системы координат объекта.

3. Определяют семь элементов внешнего ориентирования фотограмметрической модели по опорным точкам, определяющим масштаб модели, ее положение и ориентацию относительно системы координат объекта. Для этого достаточно трех опорных точек, не лежащих на одной прямой. По значениям элементов внешнего ориентирования фотограмметрической модели и элементов взаимного ориентирования можно определить элементы внешнего ориентирования стереопары снимков.

4. По координатам точек, определенных в системе координат модели, и элементам внешнего ориентирования модели находят координаты точек в системе координат объекта.

Фототриангуляция выполняется в целях определения элементов внешнего ориентирования снимков, координат и высот опорных точек в системе координат объекта путем построения и внешнего ориентирования фотограмметрической модели объекта (местности) по снимкам, принадлежащим одному или нескольким перекрывающимся маршрутам. Эти данные используются в качестве опорной и контрольной информации при выполнении процессов обработки стереопар или одиночных снимков на фотограмметрических приборах и системах.

Построение фотограмметрических моделей производится в два этапа. Сначала определяют элементы взаимного ориентирования снимков, а затем строят фотограмметрические модели и определяют элементы внешнего ориентирования каждой модели и координаты точек сети в системе координат объекта. При построении и уравнивании сетей маршрутной и блочной фототриангуляции в измеренные на снимках значения координат точек вводятся поправки, позволяющие исключить систематические ошибки снимков, вызываемые дисторсией объектива съёмочной камеры, деформацией фотопленки, атмосферной рефракцией.

Наблюдение и измерение цифровых изображений. Цифровое изображение хранится в памяти компьютера в виде прямоугольной матрицы, элементы α_{ij} которой несут информацию об оптических плотностях или цвете элементарных участков изображения, а номера i строки и j столбца элемента α_{ij} показывают его положение в матрице. Координаты центров пикселей в левой прямоугольной системе координат цифрового изображения $O_c X_c Y_c$, началом которой является левый верхний угол цифрового изображения, определяются в пиксельных координатах. Для обеспечения возможности измерения координат точек цифрового изо-

бражения с подпиксельной точностью без увеличения исходного изображения разработан метод измерения цифровых изображений, в котором цифровое изображение снимка может смещаться относительно неподвижной измерительной марки с шагом, в n раз меньшим размера пикселя.

Существуют различные автоматизированные методы нахождения и отождествления соответственных точек на паре цифровых изображений, которые можно разделить на три группы:

1. Методы, основанные на анализе значений пикселей изображения в пределах некоторой области (ПМ — площадные методы);
2. Методы, основанные на выделении элементов изображения (ЭМ);
3. Методы, использующие связи между элементами изображения (СМ).

Формы представления цифровых моделей рельефа (ЦМР). Цифровая модель рельефа (ЦМР) представляет собой в общем случае трехмерную пространственную модель поверхности Земли, которая может содержать и отображать криволинейное пространство. ЦМР позволяет строить трехмерные визуализации и перспективные виды, а также служит основой для решения ряда задач.

ЦМР может представляться в виде как регулярной, так и нерегулярной сетки. В первом случае это может быть матрица высот или DEM. Матрица высот — это цифровое картографическое представление поверхности Земли в виде регулярной сетки значений высот. Высоты записываются в узлах матрицы, положение которых отсчитывается от некоторой начальной точки на местности через равные интервалы вдоль осей x и y . Интервалы между соседними узлами матрицы называются шагом. Как правило, для регулярной матрицы шаг вдоль осей x и y одинаков.

Во втором случае в виде нерегулярной сетки используется TIN (Triangulated Irregular Network) — способ цифрового представления рельефа местности с использованием нерегулярной сети треугольников и опционально встроенных структурных линий. Высоты нерегулярной матрицы записываются в узлах, имеющих координаты x , y , расстояние между которыми произвольно.

Преимуществом регулярной матрицы является то, что для ее записи требуется значительно меньший объем машинной памяти, чем для нерегулярной. Поэтому широкое распространение она получила на ранних стадиях развития компьютерной техники, когда память была дефицитом. Недостаток регулярной матрицы заключается в том, что она «слепо» описывает характер рельефа местности, не отражая ее индивидуальные особенности. Поэтому в настоящее время цифровую модель рельефа получают в основном в виде нерегулярной матрицы, узлы которой располагаются на характерных местах рельефа.

Другой способ представления ЦМР — представление в виде набора 3D точек (пикетов). Этот метод приводит к некоторому повышению производительности редактирования в связи с отсутствием треугольников. Создание ЦМР в виде пикетов происходит с использованием тех же алгоритмов, что и создание TIN. Отличием является то, что полученные пикеты не пересчитываются в TIN с помощью триангуляции и хранятся просто как набор XYZ точек. Для уточнения модели рельефа к пикетам могут быть подгружены структурные линии.

Цифровая фотограмметрическая система „Фотомод“. Цифровая фотограмметрическая станция „PHOTOMOD“ предназначена для комплексной фотограмметрической обработки одиночных стереопар, маршрутов и блоков, кадровых аэрокосмических и наземных снимков, а также одиночных и стереопар сканерных снимков, полученных оптико-электронными сканерными съемочными системами.

Система использует два вида окон для визуализации и редактирования модели рельефа и прочих видов объектов: 2D и 3D. 2D окно предназначено для визуализации и редактирования модели рельефа, векторов и горизонталей в моно/стереорежиме. 3D окно используется для просмотра модели рельефа под разными углами, ее растяжения и ориентирования в 3-мерном пространстве.

Основным видом модели рельефа в модуле PHOTOMOD DTM является нерегулярная пространственная сеть треугольников — **TIN**. Возможно создавать модель рельефа в виде произвольного набора трехмерных точек — **пикетов**. TIN может быть конвертирован в регулярную модель рельефа — **матрицу высот**. Для уточнения модели рельефа используются **структурные линии**.

Пример построения цифровых моделей рельефа местности по стереопарам аэрофотоснимков на ЦФС „Фотомод“. Обрабатываемый блок состоит из 2 маршрутов, по 3 снимка (2 стереопары) в каждом. Снимки цветные, полученные камерой WILD Aviophot RC20: фокусное расстояние — 153.406 мм, масштаб снимков — 1:5000. Высота фотографирования — 900 м. Среднее превышение местности над уровнем моря 150 м. Снимки сканировались с разрешением 20 мкм на фотограмметрическом сканере. Перед обработкой разрешение снимков было уменьшено в 2 раза и составило 40 мкм. В проекте использовались 7 планово-высотных опорных точек. На рис. 1 показаны горизонталы, построенные по общему TIN.

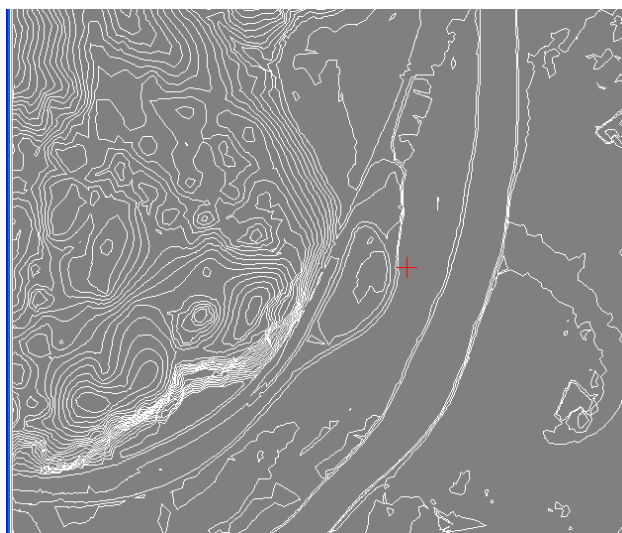


Рис. 1

Модуль PHOTOMOD Mosaic использовался для создания ортофотоплана с разрешением 0.5 м на блок исходных изображений. В качестве ЦМР для учета ошибок рельефа местности была использована матрица высот, построенная на предыдущем этапе обработки. Фотоплан показан на рис. 2.



Рис. 2

Изготовление рельефной карты местности с помощью лазерной стереолитографии.

Лазерная стереолитография, являясь одним из бурно развивающихся направлений оперативного изготовления прототипов, макетов и даже функциональных объектов по их трехмерным компьютерным моделям, реализует принцип прямого формообразования трехмерных объектов путем последовательного наращивания материала. Основой стереолитографии является локальное изменение фазового состояния однородной среды (переход жидкость — твердое тело) в результате фотоиницированной в заданном объеме полимеризации. Следствием полимеризации является изменение фазового состояния среды — в облученной области образуется твердый полимер. Так как активные центры появляются только в облученной области, то и полимеризация протекает преимущественно в этой области, т.е. достигается пространственная селективность фотоиницированной полимеризации. Активные центры образуются при взаимодействии фотополимеризующейся композиции (ФПК) с излучением из определенного спектрального диапазона. Эта спектральная селективность позволяет, в частности, проводить полимеризацию в условиях естественного освещения.

Лазерная стереолитография включает в себя создание трехмерной компьютерной модели объекта в STL формате, ее разбиение на тонкие слои, расчет траектории движения лазерного луча, заполняющего каждое сечение, и последовательное воспроизведение соответствующих поперечных сечений на поверхности жидкой ФПК сфокусированным пучком иницирующего полимеризацию лазерного излучения. В облученной области образуется пленка твердого полимера.

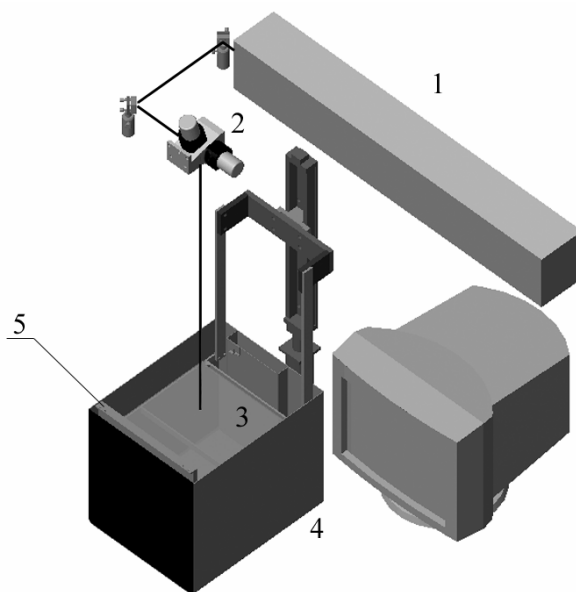


Рис. 3

Схема установки лазерной стереолитографии приведена на рис. 3. На этом рисунке 1 — лазер, 2 — двухкоординатный сканатор, 3 — платформа, 4 — емкость с ФПК, 5 — выравнивающее устройство. Излучение лазера воспроизводит на поверхности жидкой фотополимеризующейся композиции внешний контур и внутреннюю штриховку соответствующих поперечных сечений модели. Коэффициент поглощения излучения достаточно велик, так что оно практически полностью поглощается в тонком (0,1-0,2 мм) слое ФПК. В облученной области образуется пленка твердого полимера. Управляется лазерный луч двухкоординатным сканатором. Данная технология получила название „метод прямого лазерного рисования“ в отличие от других способов воспроизведения сечений на поверхности ФПК, о которых будет упомянуто ниже. Переход от одного слоя к другому осуществляется путем погружения платформы, на которой выращивается деталь, в емкость с жидкой ФПК на глубину, равную толщине следующего слоя. Выравнивающее устройство обеспечивает равномерную толщину

слоя по всей площади платформы. При полимеризации последующего слоя он приклеивается к предыдущему, что обеспечивает жесткость всего изделия. По завершении процесса модель отмывают от остатков исходного вещества, удаляют технологические подпорки. Затем изделие подвергается дополнительной полимеризации УФ излучением в специальной камере.

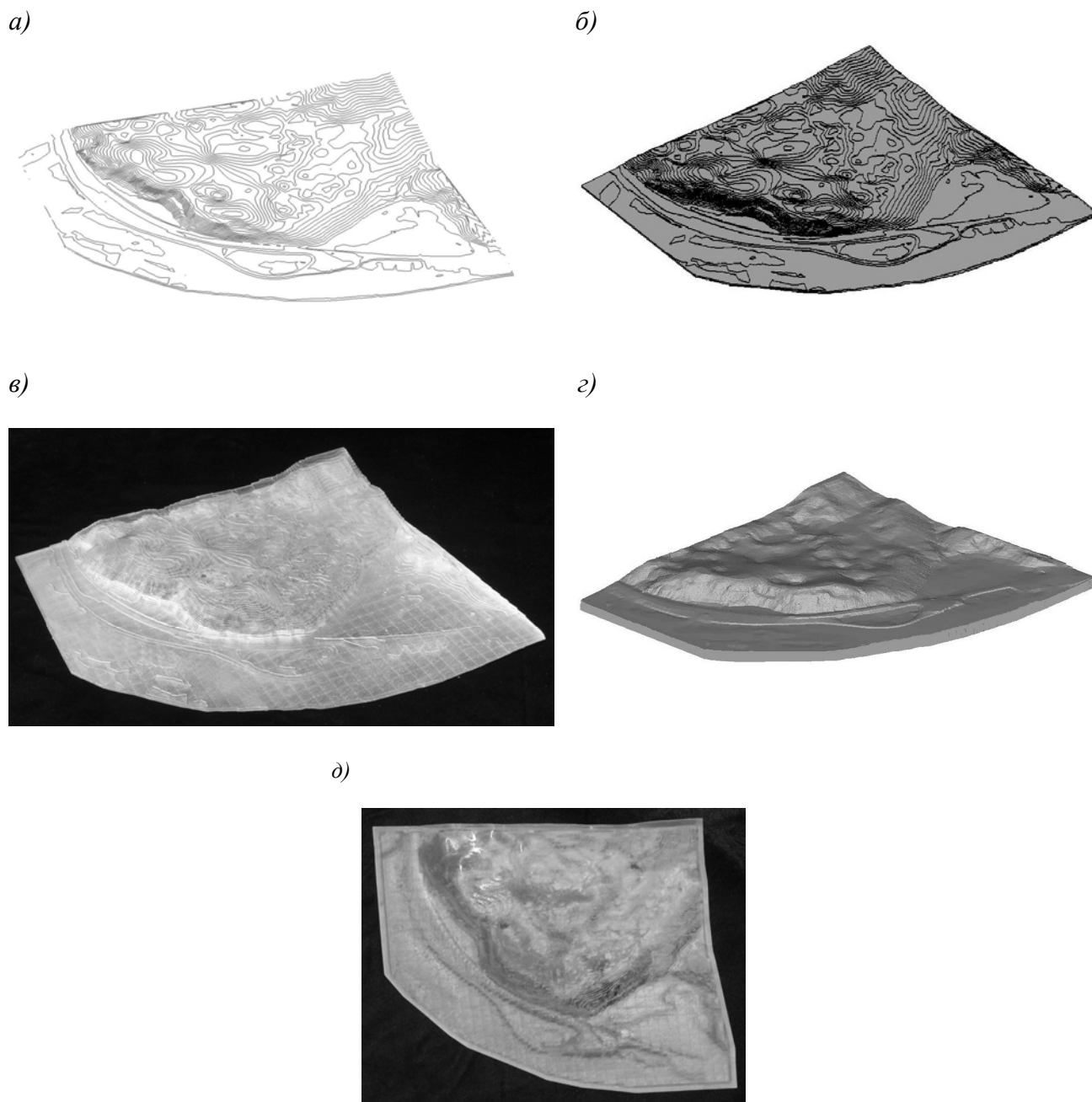


Рис. 4

Этапы создания рельефной карты показаны на рис. 4. Исходными данными для формирования трехмерной компьютерной модели участка местности был набор горизонталей, полученный в результате преобразования фотограмметрических данных. Горизонталы, проведенные через 2 м, были представлены в виде DXF-файлов. Каждая горизонталь представляла собой замкнутую или разомкнутую полилинию (рис. 4, а). На начальном этапе каждая горизонталь была обработана в целях устранения дефектов (разрывов и петель), появившихся из-за неадекватного преобразования. Файлы экспортировались в 3D CAD SolidWorks, использо-

ванный для создания трехмерной компьютерной модели. Горизонталы были размещены на наборе вспомогательных плоскостей, каждой горизонталы была придана толщина.

Полученная трехмерная модель представляла собой набор плоских слоев толщиной, равной расстоянию между горизонталями (рис. 4, б).

3D модель была экспортирована в STL формат и на установке ЛС-400Э из ФПК ИПЛИТ-3 была изготовлена пластиковая рельефная карта (рис. 4, в). Для лучшего отображения особенностей рельефа масштаб по вертикали был увеличен в два раза по сравнению с горизонтальным.

Горизонталы были преобразованы в растровый формат (РСХ), являющийся исходным для SW. Полученная трехмерная компьютерная модель и фотография соответствующей пластиковой рельефной карты, изготовленной на стереолитографической установке ЛС-400Э, представлены на рис. 4, г и рис. 4, д соответственно.

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
20.08.07

Д. Б. БОРЗОВ, Б. И. АЛЬ-МАРАЯТ, А. П. ТИПИКИН

Курский государственный технический университет

АКСЕЛЕРАТОР ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ЗАДАЧ В КЛАСТЕРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ВЫСОКОЙ ГОТОВНОСТИ

Рассмотрена проблема размещения задач в кластерных системах, сформулирован метод планирования размещения задач в матрично-торроидальных блоках кластерных мультимьюльтикомпьютеров. Приведено описание акселератора, ориентированного на кластерные системы высокой готовности. Даны оценки эффективности и быстродействия предложенного метода и устройства.

В связи с началом освоения отказоустойчивых мультимьюльтикомпьютеров и кластеров высокой готовности повышаются требования к скорости выполнения процедур планирования размещения задач [1—4]. Быстрое восстановление правильности функционирования системы путем реконфигурации ее структуры с отключением неисправного процессора и заменой его резервным, расположенным обычно вне поля обрабатываемых процессоров, приводит к существенному изменению конфигурации связей между ними и образованию длинных маршрутов передачи данных. Они могут быть уменьшены путем оперативного перераспределения задач.

В то же время процедуры планирования размещения являются комбинаторными, имеют большую вычислительную сложность и поэтому могут привести к существенному увеличению времени восстановления и снижению коэффициента готовности системы. Отказываться из-за этого от перераспределения задач перед рестартом восстановленной системы нецелесообразно, так как возросшие коммуникационные задержки могут привести к такой потере системной производительности, которая превысит ожидаемый выигрыш от применения параллельной многопроцессорной обработки комплекса взаимодействующих программ.

Поэтому для уменьшения времени восстановления многопроцессорных кластерных систем необходимо многократно снизить затраты времени на планирование размещения задач по сравнению с его программной реализацией в управляющей машине кластера. Этого можно достичь путем создания специализированного акселератора, а при разработке алгоритмов его функционирования целесообразно найти новый метод снижения вычислительной сложности процедур планирования размещения задач в матричных базовых блоках процессоров кластерных систем высокой готовности.

Подмножество задач, запланированных к обработке в базовом блоке, описывается графом взаимодействия задач

$$G = \langle X, E \rangle, \text{ где } X = \left\{ \begin{array}{cccccc} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,k} & \dots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,k} & \dots & x_{2,n} \\ \dots & & & & & \\ x_{q,1} & x_{q,1} & \dots & x_{q,k} & \dots & x_{q,n} \\ \dots & & & & & \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \dots & x_{n,k} & \dots & x_{n,n} \end{array} \right\} \quad (1)$$

множество вершин графа G , вершины $x_{qk} \in X$ которого соответствуют задачам, а дуги связей между ними $e_{ij} \in E$ при $i, j = (q-1) \cdot n + k$ взвешиваются объёмами данных m_{ij} , которые передаются между задачами и могут сведены в матрицу обмена информацией (МОИ) $M = \|m_{ij}\|_{N \times N}$, где $N = n^2 = |X|$.

Базовый блок будем представлять топологической моделью в виде графа $H = \langle P, V \rangle$, где

$$P = \left\{ \begin{array}{cccc} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,n} \\ \dots & & & \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \dots & p_{n,n} \end{array} \right\} \quad \text{—}$$

множество идентификаторов процессорных модулей базового блока, организованных в матрицу $|P|_{n \times n}$, где $|P| = N = n^2$ — число процессорных модулей базового блока, V — множество межмодульных связей, задаваемых матрицей смежности $\|W\|_{N \times N}$ размером $n^2 \times n^2$.

Размещение пакета программ (задач), описываемых графом G (1), в параллельной системе (ПС) может быть аналитически описано отображением

$$\beta_s = \left\{ \begin{array}{cccccc} x_{s_{1,1}} & x_{s_{1,2}} & \dots & x_{s_{1,k}} & \dots & x_{s_{1,n}} \\ x_{s_{2,1}} & x_{s_{2,2}} & \dots & x_{s_{2,k}} & \dots & x_{s_{2,n}} \\ \dots & & & & & \\ x_{s_{q,1}} & x_{s_{q,1}} & \dots & x_{s_{q,k}} & \dots & x_{s_{q,n}} \\ \dots & & & & & \\ x_{s_{n,1}} & x_{s_{n,2}} & \dots & x_{s_{n,k}} & \dots & x_{s_{n,n}} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{cccccc} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,k} & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,k} & \dots & p_{2,n} \\ \dots & & & & & \\ p_{q,1} & p_{q,2} & \dots & p_{q,k} & \dots & p_{q,n} \\ \dots & & & & & \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \dots & p_{n,k} & \dots & p_{n,n} \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где $s = \overline{1, N!}$, $k = \overline{1, n}$, $q = \overline{1, n}$.

Здесь s — это номер очередной перестановки задач $\{x_{qk}\}$ по процессорным модулям $\{P_{qk}\}$, соответствующий s -му варианту размещения. Мощность множества $\psi = \{\beta_s\}$ всевозможных отображений (2) равна числу всевозможных перестановок задач $\{x_{qk}\}$ в матрице $X: |\psi| = N!$. Для описания множества длин d_{ij} кратчайших маршрутов передачи данных в пределах базового блока введем матрицу минимальных расстояний (ММР) $D = \|d_{ij}\|_{N \times N}$, $N = n^2 = |P|$, которую можно построить по матрице смежности.

Пусть Ψ — множество всевозможных отображений вида (2). Тогда задачу размещения можно сформулировать как поиск такого отображения $\beta^* \in \Psi$, что

$$T_{\beta^*} = \min_{\Psi} \left\{ \max_{\beta_s \in \Psi} \left\{ T_{\beta_s} (p_{a,b}, p_{x,y}) \right\} \right\}, \quad (3)$$

где $T_{\beta_s} (p_{a,b}, p_{x,y})$ — коммутационная задержка при передаче данных между процессорными модулями $p_{a,b}$ и $p_{x,y}$, соответствующая отображению β_s и вычисляемая как произведение

$$T_{\beta_s} (p_{a,b}, p_{x,y}) = d_{ij} \cdot m_{ij}, \quad (4)$$

где $i = (a-1) \cdot n + b$ и $j = (x-1) \cdot n + y$,

$$\max_{\beta_s \in \Psi} \left\{ T_{\beta_s} (p_{a,b}, p_{x,y}) \right\} = \max \left\{ d_{ij} m_{ij} \right\} — \quad (5)$$

оценка величины коммуникационной задержки в s-м варианте размещения.

Для поиска субоптимального варианта размещения β^* , удовлетворяющего критерию (3), первоначально необходимо вычислить недостижимую минимальную оценку размещения T_{inf} (гипотетический минимум коммуникационной задержки) при допущении, что топологии графов G и H тождественны. При вычислении нижней оценки будем назначать дуги графа G с наибольшим весом m_{ij} на самые короткие маршруты в графе H, не обращая внимания на ограничения, накладываемые фактическими связями между задачами в графе G [5].

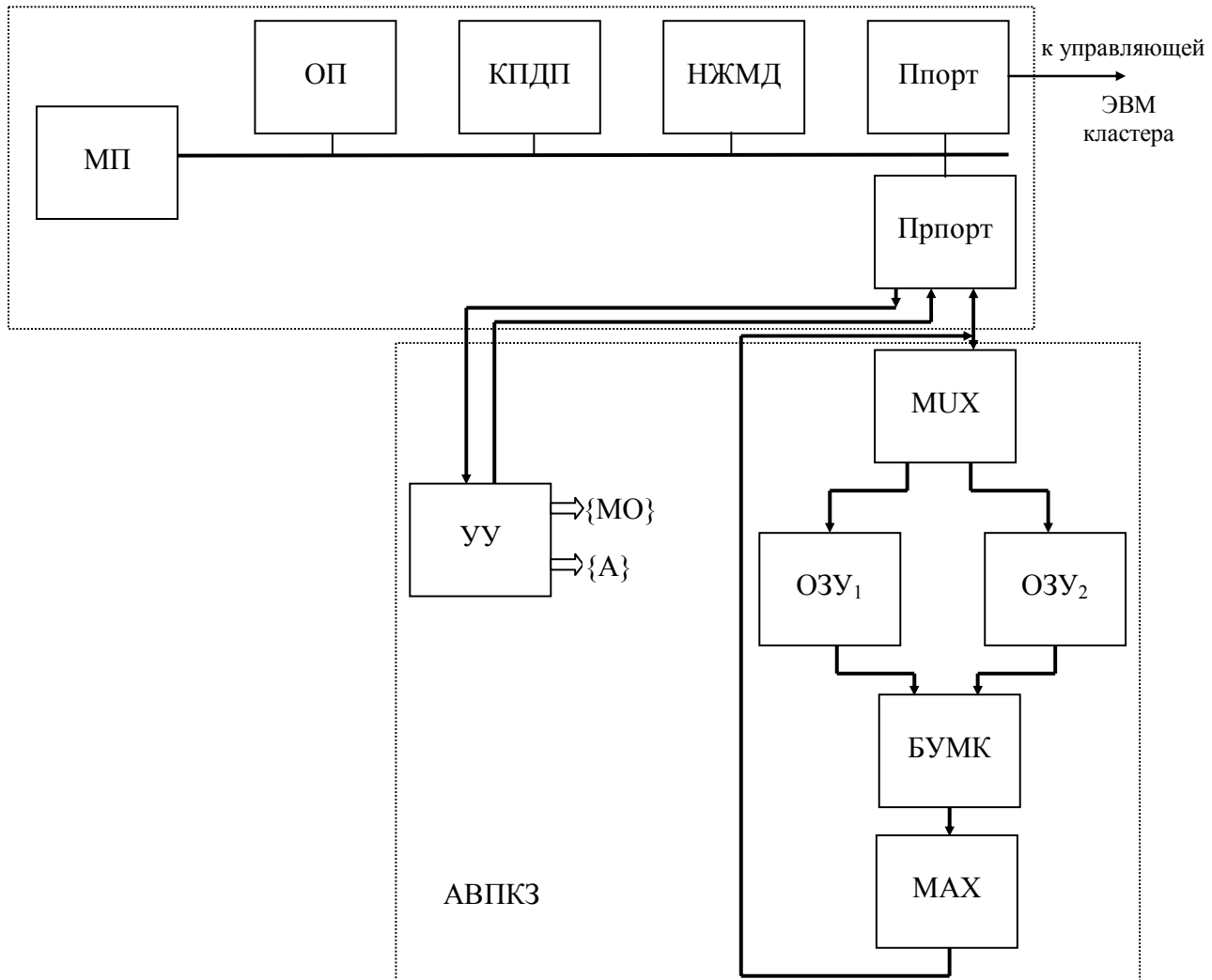
На первом этапе составляются две матрицы: обмена информацией между задачами (МОИ) и кратчайших маршрутов (ММР) между процессорами в коммуникационной среде базового блока, вычисляются гипотетический минимум коммуникационной задержки T_{inf} и коэффициент эффективности исходного произвольного размещения задач η_H , а также по порогу эффективности $\eta_H \leq 2$ принимается решение о целесообразности инициализации процедуры поиска субоптимального размещения. Под коэффициентом эффективности перестановок $\eta = T / T_{inf}$ понимается отношение реально полученной величины задержки (5) к гипотетической T_{inf} . На втором этапе выполняются шаги целенаправленных перестановок столбцов и строк матрицы обмена информацией. На третьем этапе находится максимальное значение коммуникационной задержки (5) по предыдущему варианту перестановок задач. Затем находится минимум из максимумов задержек (3) по всем вариантам перестановок и вычисляется коэффициент эффективности η . Если последний оказывается менее установленного порога эффективности $\eta \leq 2$, шаги поиска прекращаются и найденный вариант матрицы обмена информацией считается соответствующим субоптимальному размещению.

На основе описанного выше метода разработаны алгоритмы, структурные и функциональные схемы микропроцессорного акселератора планирования размещения (АПР) с двухуровневой организацией (см. рисунок).

На рисунке приняты следующие обозначения: МП — микропроцессор, ОП - оперативная память, КПДП — контроллер прямого доступа в память, Прпорт — параллельный порт, НЖМД — накопитель на жестком магнитном диске, Ппорт — последовательный порт, МUX — мультиплексор, БУМК — блок умножения матрично-конвейерный, МАХ — блок сравнения и нахождения максимума, УУ — устройство управления, АВПКЗ — акселератор вычисления показателя коммуникационной задержки.

На верхнем программном уровне выполняется перестановка строк и столбцов в матрице МОИ, анализ отношения η достигнутого минимаксного значения (3) к гипотетической минимально возможной величине T_{inf} и принятие решения о целесообразности следующего шага перестановки. На аппаратном уровне в блоке АВПКЗ, построенном в виде пятиступенчатого

конвейерного вычислительного устройства, содержащего трехступенчатый матрично-конвейерный блок умножения БУМК и рекуррентный блок выделения максимума МАХ, вычисляется оценка величины коммуникационной задержки (5).



Выполнено программное моделирование алгоритма функционирования АПР применительно к ПС с матричной топологией размерностью 8×8 . В результате моделирования были получены зависимости числа необходимых перестановок Q , степени снижения коммутационной задержки δ и коэффициента эффективности η от эффективности начального размещения $\eta_n = T_n / T_{inf}$ (см. таблицу).

η_n		3	4	5	6	7	8
При $\eta_n < 2$	Q	159	714	556	378	186	708
	δ	1.5	2	2.50	3.00	3.64	4.17
При $\eta_n = 1$	Q	51884	51468	51334	51370	50544	51322
	δ	1.78	2.47	2.98	3.70	4.17	4.94
	η	1.68	1.62	1.68	1.62	1.68	1.62

Приемлемым вариантом организации поиска субоптимального размещения является использование порогов $\eta_n < \eta_n = 2$ и $\eta < \eta_n = 2$. Такой подход позволяет значительно сократить время его поиска в среднем до $Q = 160—700$ перестановок и снизить величину коммуни-

кационной задержки в среднем в 1,5—4 раза. Причем потери выигрыша в снижении коммуникационной задержки по сравнению с гипотетически наилучшими результатами, возможными при $\eta_{\text{п}} = 1$, не превышают 16—19%. Число тактов работы АПР при размещении одинакового числа вершин $|X|$ по сравнению с методом ветвей и границ [5] снизилось примерно в 100 раз. Затраты времени на поиск субоптимального варианта размещения, возрастающие с увеличением числа связей и задач в графе G , увеличиваются не экспоненциально, как в [5], а примерно линейно.

Предложенный алгоритм поиска размещения, близкого к субоптимальному, выгодно отличается от известных относительно малым числом требуемых перестановок и сравнительно малым временем поиска. Это важно для кластерных систем высокой готовности, например в случае отказа одного из процессорных модулей, когда необходимо оперативное перераспределение задач. Применение разработанного акселератора позволит дополнительно снизить затраты времени на планирование размещения задач по сравнению с его программной реализацией в управляющей машине кластера, организовать оперативное перераспределение задач перед рестартом восстановленной системы без существенного снижения ее коэффициента готовности и сохранить степень ускорения обработки комплекса взаимосвязанных задач, ожидаемую от применения их параллельного выполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гергель А.В., Виноградов Р.В. Оценка сложности коммуникационных операций в кластерных вычислительных системах // Материалы второго Международного научно-практического семинара „Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах“. Н. Новгород, 2002. С. 3—77.
2. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ—Петербург, 2002. 608 с.
3. Таненбаум А.С. Distributed Operation Systems. 1st edition / Prentice-Hall Engineering / Science/Mathematics. 1994. 648 p.
4. Корнеев В.В. Параллельные вычислительные системы / В.В. Корнеев. М.: Нолидж, 1999. 340 с.
5. Борзов Д.Б., Зотов И.В., Титов В.С. О субоптимальном размещении процессов и данных в кольцевых сетях // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 11. С. 48—54.

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
20.09.07

Д. Б. БОРЗОВ, С. А. ДЮБРЮКС, В. С. ТИТОВ

Курский государственный технический университет

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛИЗМА ВНУТРИ ЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ И ЕГО АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Предложены метод выявления параллелизма в линейных участках последовательных программ со связями по управлению, реализующий разбиение множества операторов задачи на независимые подмножества, а также аппаратная модель соответствующего устройства. Даны оценки их эффективности и быстродействия.

В настоящее время в целях повышения производительности ЭВМ применяется параллельная обработка большого количества задач на множестве процессоров [1,2]. Ярким примером являются системы типа Origin, Cray, MVS и т.д. [3]. В них необходимо использование параллельных программ и алгоритмов, на составление которых затрачивается значительное время [4]. В то же время разработка эффективных параллельных алгоритмов, ориентированных на многопроцессорную реализацию, является сложной научно-технической задачей, требующей привлечения высококвалифицированных специалистов.

В работе предлагается метод выявления параллелизма внутри линейных участков последовательных программ со связями по управлению, ориентированный на аппаратную реализацию.

Основной задачей при выявлении возможности одновременного выполнения операторов (параллелизма между операторами) является выявление информационной зависимости между ними. В [4] предложено подразделять операторы, обрабатываемые на i -м линейном участке, на четыре категории: 1) только считываемые (W_i); 2) только записываемые (X_i); 3) сначала считываемые, потом записываемые (Y_i); 4) сначала записываемые, потом считываемые (Z_i).

Ячейки памяти (идентификаторы) переменных, которые считываются оператором p_1 , не должны портиться записью в них данных оператора p_2 . Таким образом, $(W_1 \cup Y_1 \cup Z_1) \cap (X_2 \cup Y_2 \cup Z_2) = \emptyset$.

Если через I_i обозначить входные данные (т.е. переменные правой части оператора присваивания), а через O_j — выходные (т.е. переменные, стоящие в левых частях оператора присваивания), то рассмотренные выше требования информационной независимости оператора p_i и p_j могут быть записаны в следующем виде:

$$I_j \cap O_i = \emptyset, I_i \cap O_j = \emptyset, O_i \cap O_j = \emptyset. \quad (1)$$

Предварительно введем ряд обозначений:

1. Исходная программа представляется графом взаимодействия задач: $G = \langle X, E \rangle$, где X — множество вершин графа G , вершины $x_i \in X$ которого соответствуют операторам программы, а дуги $e_{ij} \in E$ представляют информационные связи.

2. Число операторов последовательной программы обозначим N .

3. Матрица достижимости $Md = \left\| Md_{ij} \right\|_{n \times n}$, где $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N}$, (N — число операторов программы) характеризует последовательность выполнения операторов. Она формируется на основе анализа графа G следующим образом: на пересечении i -го и j -го столбцов ставится единица, если из i -го оператора можно попасть в j -й. При формировании матрицы достижимости

мости в случае появления условия оно воспринимается как оператор. В этом случае имеет место «агрессивное» исполнение алгоритма (одновременно будут вычисляться обе ветви условия). При этом в процессе выполнения алгоритма, когда переменные условия будут вычислены, заведомо ложная ветвь будет отсечена.

4. Матрица входных переменных $Min = \left\| Min_{ij} \right\|_{n \times m}$, где $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, N}$, характеризующая присутствие j -й переменной во входном наборе i -го оператора.

5. Матрица выходных переменных $Mout = \left\| Mout_{ij} \right\|_{n \times m}$, где $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, m}$, характеризующая присутствие j -й переменной в выходном наборе i -го оператора.

Тогда на основе вышесказанного и с учетом соотношения (1) можно сформировать условие проверки информационной независимости операторов p_i и p_j программы, которое записывается в следующем виде:

$$F = (Min_{ij} \wedge Mout_{ji}) \vee (Min_{ji} \wedge Mout_{ij}) \vee (Mout_{ij} \wedge Mout_{ji}). \quad (2)$$

Если полученный кортеж F нулевой, то операторы могут выполняться параллельно, так как обрабатываются разные переменные.

Выявляя информационные зависимости между операторами p_i и p_j программы, при $Md_{i,j} = 1$ получаем матрицу неполного параллелизма $MNP = \left\| MNP_{ij} \right\|_{n \times n}$, где $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, N}$, отражающую полный набор информационных зависимостей между всеми операторами программы. С учетом сказанного выше алгоритм процедуры выявления параллелизма внутри линейных участков последовательных программ со связями по управлению может выглядеть следующим образом:

1. $i=1$;
2. $k=1$;
3. Если $Md_{ik} = 1$, то п.4, иначе п. 10;
4. $p=1$;
5. $MNP_{ik}=0$;
6. $F_p = (Min_{pi} \wedge Mout_{pk}) \vee (Min_{pk} \wedge Mout_{pi}) \vee (Mout_{pi} \wedge Mout_{pk})$;
7. Если $F_p=0$, то $p=p+1$; п.9, иначе п.8;
8. $MNP_{ik} = 1$; $p = m+1$;
9. Если $p \leq m$, то п.6, иначе п. 10
10. $k=k+1$ и если $k \leq m$, то п. 3, иначе п.11;
11. $i=i+1$ и если $i \leq n$, то п.12
12. $i=1$;
13. $l_i = true$;
14. $i=i+1$ и если $i \leq n$, то п. 13, иначе п. 15;
15. $yarus = 1$, $branch = 0$;
16. $i=1$;
17. Если $l_i = true$, то $z = 0$ и $k=1$
18. Если $MNP_{i,k}=1$, то $z=z+1$
19. $k=k+1$ и если $k \leq m$, то п. 18, иначе п.20;

20. Если $z=0$, то $branch = branch + 1$ и $Pack_i \leftarrow (i, yarus, branch)$;
21. $l_i = false$;
22. $m=1$;
23. $MNP_{m,i}=0$;
24. $m=m+1$ и если $m \leq n$, то п. 23, иначе п. 25;
25. $i=i+1$ и если $i \leq n$, то п.17, иначе п. 26;
26. $i=1$;
27. Если $l_i = true$, то $yarus = yarush + 1$ и п.16, иначе п. 28;
28. $i=i+1$ и если $i \leq n$, то п.27, иначе конец.

В приведенном алгоритме пункты с первого по одиннадцатый отражают процесс нахождения матрицы неполного параллелизма MNP с использованием формулы (2). Последующие пункты направлены на формирование массива тегов $Pack$, каждый элемент которого содержит номер оператора исходной программы, а также номер яруса $yarus$ и номер ветви $branch$. Предложенный метод позволяет поставить в соответствие операторам очередности их параллельного выполнения ($yarus$) и номера независимых параллельных ветвей, в которые они входят.

На основе предложенного метода была разработана функциональная схема устройства распараллеливания линейных участков последовательных программ (далее — акселератор), представленная на рис. 1.

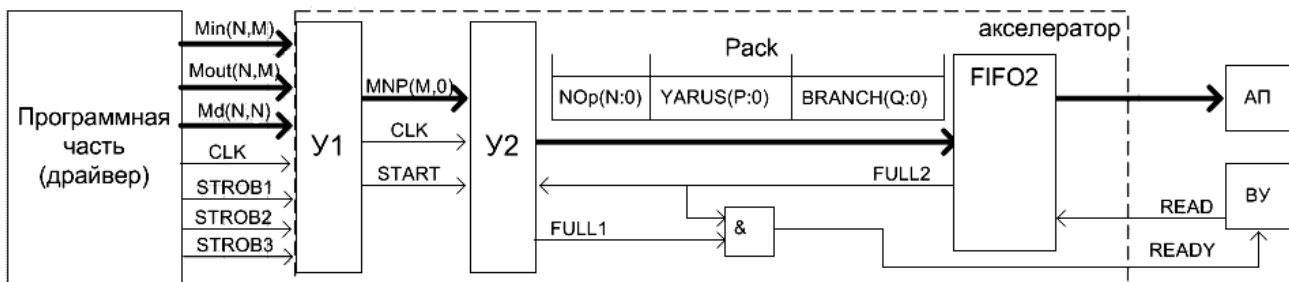


Рис. 1

На рис. 1 приняты следующие обозначения: АП—ассоциативная память, ВУ — внешнее устройство, Y1 — блок вычисления матрицы неполного параллелизма, Y2 — блок формирования тэгов, FIFO2 — буфер для хранения тэгов. Предлагаемое устройство обрабатывает поступающие в него матрицы достижимости Md , входных переменных Min и выходных переменных $Mout$. Помимо этих матриц входными данными являются стробы построчной записи матриц Md , Min , $Mout$ в ячейки соответствующих ОЗУ: STROB1, STROB2, STROB3. Выходными данными является массив тегов $Pack$, определяющих возможность параллельного выполнения операторов, а также признак готовности этих данных READY. После выдачи устройством сигнала READY этот тег считывается в ассоциативную память внешним устройством. Структурная схема устройства Y1 представлена на рис. 2.

В двухпортовые ОЗУ Memory1 и Memory2 и однопортовое ОЗУ Memory3 по соответствующим стробам STROB1, STROB2, STROB3 записываются построчно матрицы Md , Min , $Mout$. Затем начинается перебор ячеек Memory3 по переполнениям счетчика Counter2. Содержимое ячейки заносится в сдвиговый регистр SR. При нахождении внутри него единичного бита из Memory1 и Memory2 по адресам из Counter1 и Counter2 считываются ячейки, происходит вычисление, соответствующее формуле (1). Его результат компаратором comp

сравнивается с нулем. В регистре SR происходит сдвиг вправо. На место старшего бита мультиплексор μ mx записывает 1, если активируется признак $a = b$ компаратора, или 0 в ином случае. После окончания перебора содержимого ячейки Memory3 вырабатывается сигнал START и содержимое (строки получаемой матрицы MNP) сдвигового регистра SR начинает записываться в память Memory1 устройства Y2 (рис. 3). После окончания записи матрицы начинается ее построчное считывание.

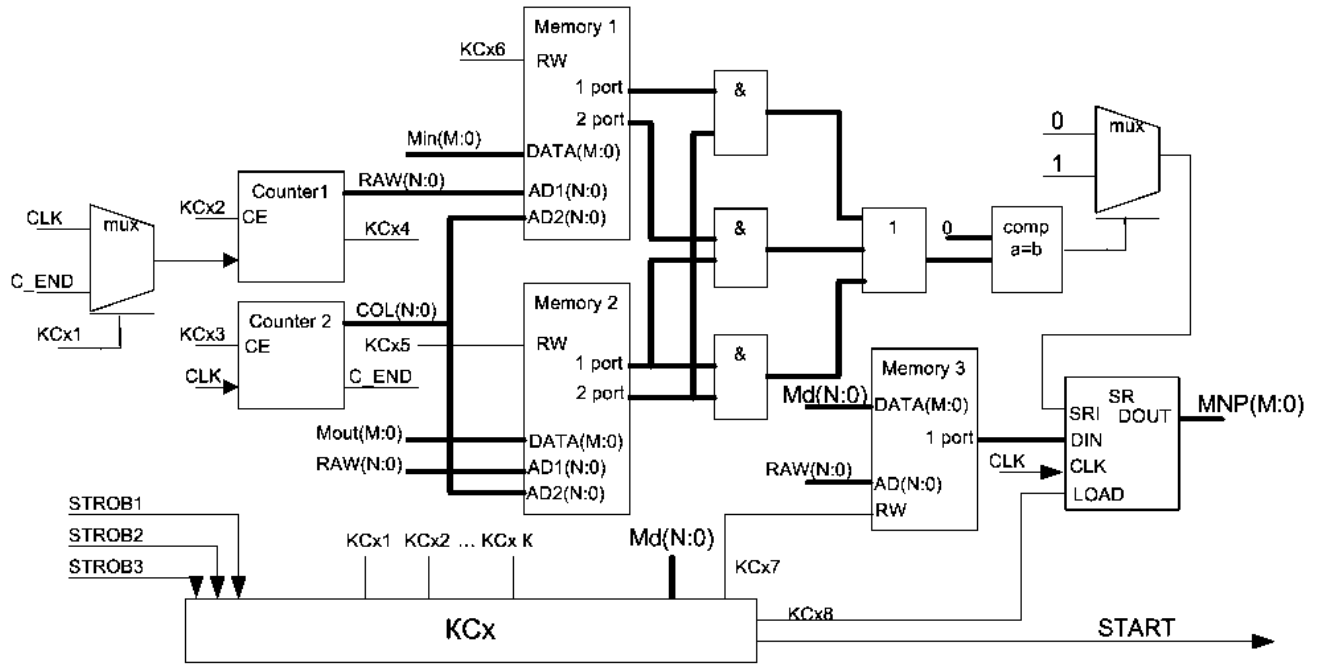


Рис. 2

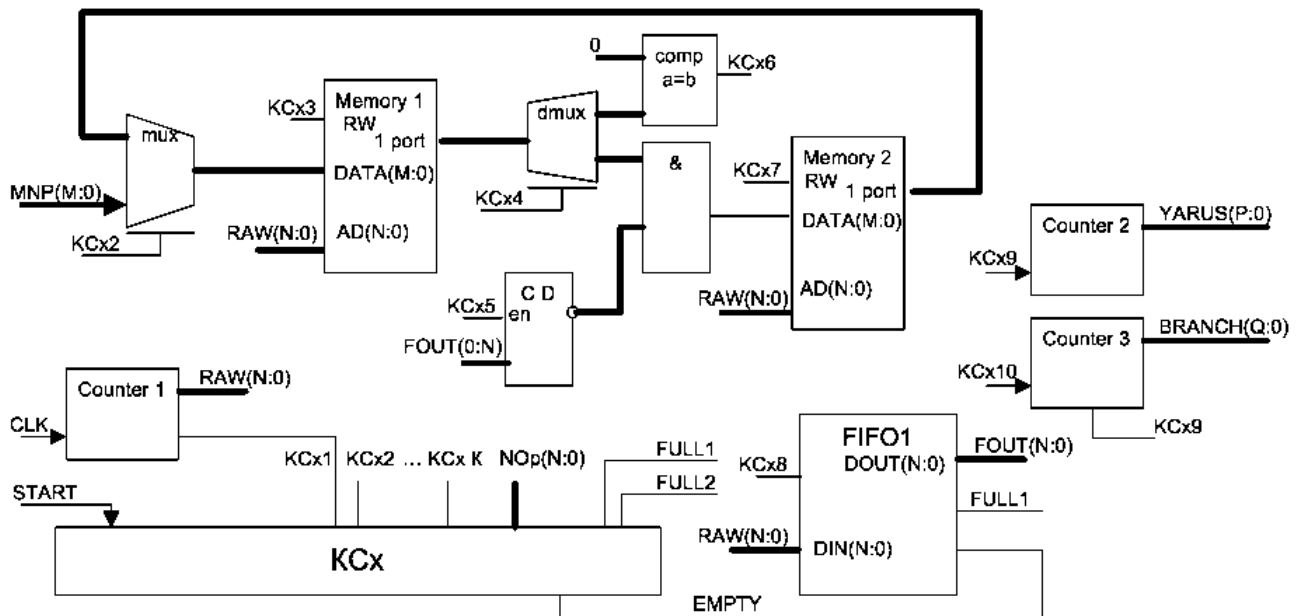


Рис. 3

Демультимплексор $dmux$ пропускает строку на компаратор $comp$, сравнивающий строку с нулевой. Если на выходе $a = b$ компаратора активный уровень, то комбинационная схема Kcx инициирует запись номера данной строки в буфер FIFO1. После того как номера всех нулевых строк будут сохранены в FIFO1, начинается их считывание. При этом снова извлекается содержимое Memory1, демультимплексор начинает пропускать информацию на второй выход, шифратор CD формирует соответствующее номеру строки из FIFO1 значение. Результат конъюнкции выхода шифратора со считанным из Memory1 значением записывается в память Memory2. Таким образом происходит обнуление столбцов матрицы Md , соответствующих нулевой строке, считанной из FIFO1. После каждого обнуления информация из Memory2 записывается в Memory1, счетчик Counter3 инкрементируется, информация в виде тега (см. рис. 1) записывается в FIFO2. Так продолжается до опустошения буфера FIFO1, после чего счетчик Counter2 инкрементируется, счетчик Counter3 сбрасывается и начинается новая процедура поиска нулевых строк в ячейках Memory1. Поиск происходит до тех пор, пока все содержимое Memory1 не станет нулевым. Сигнал готовности данных выдается на внешнее устройство (ВУ) при переполнениях FIFO1 или FIFO2.

Была проведена аналитическая оценка быстродействия разработанного акселератора, не учитывающая естественные задержки элементов. При компиляции последовательной программы со связями по управлению, состоящей из 100 операторов, данный акселератор при работе на частоте 100 МГц формирует выходные данные за промежуток времени от 1,13 до 226 мкс. При числе операторов, равном 1000, устройство выдаст сигнал готовности данных за промежуток времени от 535 мкс до 10,7 мс. Широта диапазона промежутков обусловлена особенностями компилируемой программы.

Недостаток предложенного метода — ориентация на относительно узкий класс программ, тогда как в современных продуктах активно используются циклы и рекурсии. Перспективным направлением развития предложенного метода может стать его распространение на более широкий класс программных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воеводин В.В. Математические модели и методы в параллельных системах. М.: Наука, 1986.
2. Головкин Б.А. Параллельные вычислительные системы. М.: Наука, 1980. 520 с.
3. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ—Петербург, 2002. 608 с.
4. Трахтенгерц Э.А. Введение в теорию анализа и распараллеливания программ ЭВМ в процессе трансляции. М.: Наука, 1981. С. 184—187.

Э. И. ВАТУТИН, И. В. ЗОТОВ

Курский государственный технический университет

АППАРАТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО ЧИСЛА БЛОКОВ ПРИ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Описана аппаратная модель для определения минимально возможного числа блоков разбиения при декомпозиции параллельных алгоритмов логического управления с учетом заданных ограничений на сложность блоков. Приведено описание устройства (акселератора) на ее основе. Представлены результаты оценки его быстродействия.

Декомпозиция управляющих алгоритмов на блоки является ключевым этапом структурно-функционального проектирования систем логического управления [1]. Высокая трудоемкость выбора разбиения при декомпозиции обуславливает целесообразность перехода от его программной реализации к аппаратным решениям. Одно из таких решений, основанное на упрощенной последовательной процедуре разбиения, было предложено в работе [2], в которой содержится дальнейшее развитие методологии аппаратного выбора разбиения в части схемного воплощения методов, способных дать более высокое качество решений, но в то же время обладающих существенной трудоемкостью, в частности параллельно-последовательного метода [3].

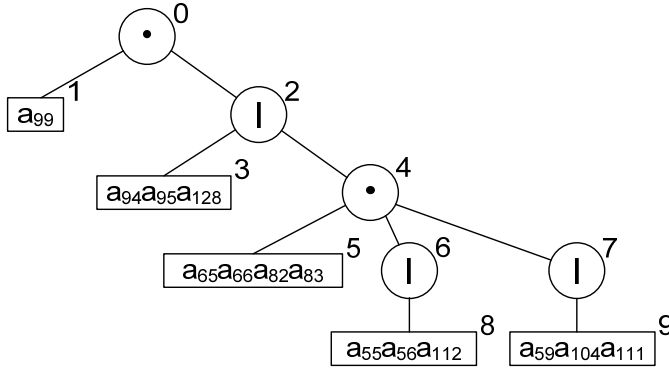
При формировании разбиения с использованием параллельно-последовательного метода необходимо находить так называемое базовое сечение алгоритма [4], позволяющее оценить минимально возможное число блоков разбиения, а также задать начальное распределение множества вершин в нескольких формируемых блоках, что способствует повышению качества решений. Для его построения применяются подстановочные правила u - и d -поглощения, основанные на редукционных преобразованиях деревьев, представляющих сечения алгоритма [5]. Пример сечения и его представление в виде дерева и таблицы приведены на рис. 1 (через a_i здесь обозначены вершины алгоритма управления). Правила u - и d -поглощения включают более простые операции над деревьями, основной из которых является определение ω -мощности сечения [4].

Аппаратной моделью сечения является схемно-реализованное дерево T (см. рис. 1), включающее набор узлов ($D_0, D_1, \dots, D_{N_T-1}$) и регистр текущего количества узлов (ТКУ). Каждый узел дерева представляется регистром со следующими полями: ТУ (тип узла), МВС (множество вершин/ссылок), СП (ссылка на предка). Каждый узел дерева также включает поле мощности узла (МУ), используемое при определении ω -мощности сечения. Здесь и далее N_T — максимальное количество узлов в дереве, L_{\max} — максимальное количество листьев в дереве (вершин в алгоритме управления), $N_R = \max(L_{\max}, N_T)$ — размер битового вектора ссылок на другие элементы дерева (или вектора листьев), ω_{\max} — максимальное значение ω -мощности сечения (дающее минимально возможное число блоков разбиения алгоритма).

Поле ТУ может принимать следующие значения: „1*“ („10“ или „11“) — узел является листом дерева, „00“ — параллельное объединение вершин (\bullet), „01“ — альтернативное объе-

динение вершин (|). Поле МВС хранит битовый вектор ссылок на потомков узла дерева, в случае если узел параллельный или альтернативный; или битовый вектор листьев, если узел является листом дерева. Поле СП хранит номер узла-предка в дереве.

$$a_{99} \bullet (a_{94} | a_{95} | a_{128} | (a_{65} \bullet a_{66} \bullet a_{82} \bullet a_{83} \bullet (a_{55} | a_{56} | a_{112}) \bullet (a_{59} | a_{104} | a_{111})))$$



№ узла	Тип узла	Множество вершин/ссылок	Ссылка на предка
0	•	1, 2	-
1	лист	99	0
2		3, 4	0
3	лист	94, 95, 128	2
4	•	5, 6, 7	2
5	лист	65, 66, 82, 83	4
6		8	4
7		9	4
8	лист	55, 56, 112	6
9	лист	59, 104, 111	7

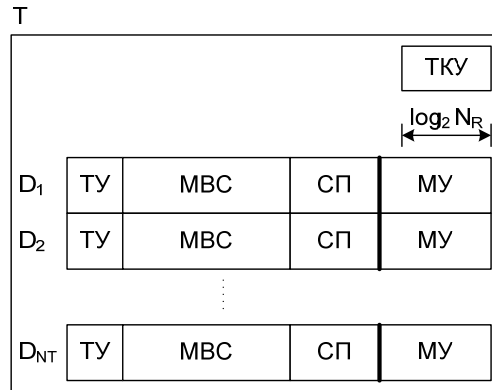


Рис. 1

Алгоритм вычисления ω-мощности сечения включает два этапа.

1. Подсчитать и записать в поля МУ листьев количество листьев в наборах листьев, предком которых является параллельный узел; записать значения „00...01“ в листья, предком которых является альтернативный узел; записать значения „00...0“ во все остальные узлы.

2. Просмотреть все узлы дерева, кроме корня, в направлении от узлов с большим номером к узлам с меньшим номером. Обновить значение поля МУ предка рассматриваемого узла: если предок является альтернативным узлом, то выбрать максимальное значение МУ текущего узла и МУ его предка; если предок является параллельным узлом, то вычислить сумму значений МУ рассматриваемого узла и МУ его предка (листом в данном случае предок не может быть, поэтому этот случай не рассматривается).

В результате выполнения описанного алгоритма в поле МУ корня дерева будет содержаться искомое значение ω-мощности сечения. Следует отметить, что при подобном итеративном способе вычисления ω-мощности (в отличие от рекуррентного, предложенного в [4] и реализованного в [5]) крайне важен порядок следования узлов дерева в его табличном представлении: узлы-предки должны иметь меньшие номера (быть записаны в табличном представлении раньше), чем их потомки. В нашем случае это требование легко обеспечивается обходом дерева по ярусам сверху вниз (см. рис. 1).

Порядок вычисления ω-мощности сечения, приведенного на рис. 1, в соответствии с описанным алгоритмом представлен в табл. 1.

Таблица 1

Пример определения ω -мощности сечения

Номер итерации	Номер рассматриваемого узла, его предок и новое значение МУ предка	Значение поля МУ узла									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	—	0	1	0	1	0	4	0	0	1	1
2.1	9→7: D7.МУ=max(0, 1)=1	0	1	0	1	0	4	0	1	1	1
2.2	8→6: D6.МУ=max(0, 1)=1	0	1	0	1	0	4	1	1	1	1
2.3	7→4: D4.МУ=0+1=1	0	1	0	1	1	4	1	1	1	1
2.4	6→4: D4.МУ=1+1=2	0	1	0	1	2	4	1	1	1	1
2.5	5→4: D4.МУ=4+2=6	0	1	0	1	6	4	1	1	1	1
2.6	4→2: D2.МУ=max(6, 0)=6	0	1	6	1	6	4	1	1	1	1
2.7	3→2: D2.МУ=max(1, 6)=6	0	1	6	1	6	4	1	1	1	1
2.8	2→0: D0.МУ=6+0=6	6	1	6	1	6	4	1	1	1	1
2.9	1→0: D0.МУ=1+6=7	7	1	6	1	6	4	1	1	1	1

С учетом принятого представления узлов дерева (см. рис. 1) аппаратная модель первого этапа алгоритма вычисления ω -мощности может быть описана схемой (рис. 2).

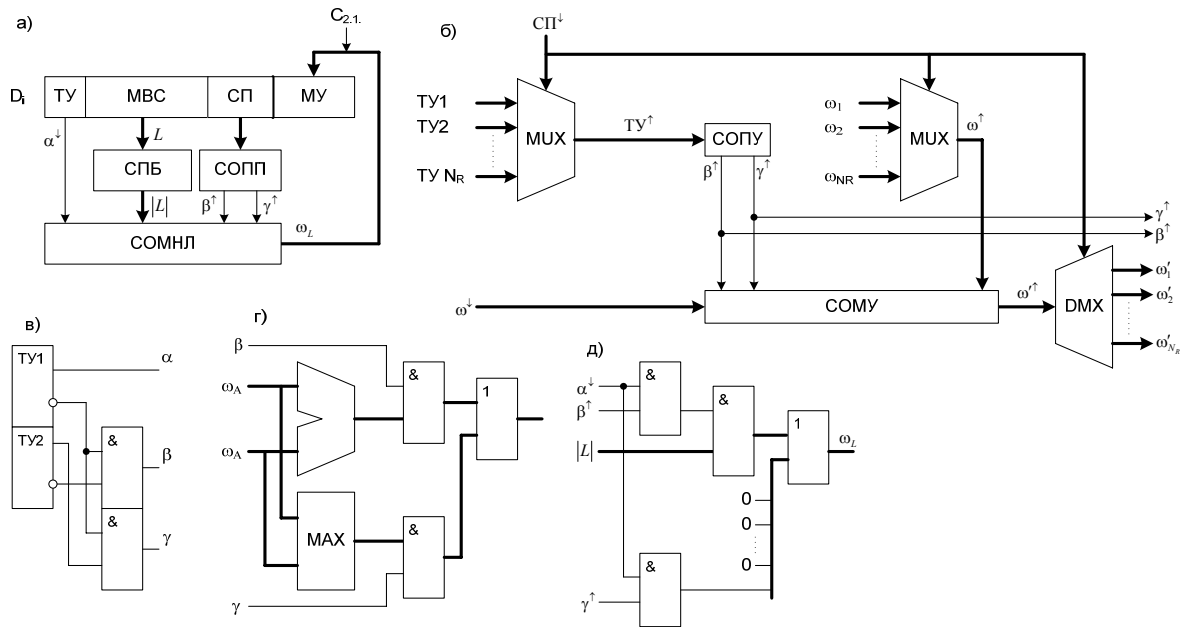


Рис. 2

Модель включает схему подсчета бит (СПБ), предназначенную для определения мощности вектора листьев, схему определения параметров предка (СОПП), используемую для определения типа узла предка (параллельный или альтернативный) и схему определения мощности набора листьев (СОМНЛ), формирующую исходное значение мощности битового вектора листьев в соответствии с типом текущего узла и его предка, где α , β , γ — двоичные признаки типа узла (лист, параллельный и альтернативный соответственно), L — битовый вектор листьев ($|L|$ — его мощность), ω_L — начальное значение ω -мощности узла, $C_{2.1}$ — синхросигнал записи значений в поля МУ узлов.

На рис. 2 символ „ \uparrow “ обозначает предка, а „ \downarrow “ — потомка. Комбинационная часть схемы вычисляет мощность битового вектора листьев и в зависимости от значения признака α^{\downarrow} рассматриваемого узла и признаков β^{\uparrow} и γ^{\uparrow} его предка выдает начальное значение мощно-

сти узла ω_L . Данное значение записывается в поле МУ по синхросигналу $C_{2.1}$, появление которого свидетельствует о завершении первого этапа алгоритма. Блок СПБ является логическим преобразователем и может быть реализован на ПЛИМ или ПМЛ.

Схема определения начальных значений мощностей узлов (*a*) и ее составляющие приведены на рис. 2, где *b* — схема определения параметров предка СОПП; *v* — схема определения признаков узла СОПУ, предназначенная для преобразования поля ТУ в признаки α , β и γ ; *z* — схема определения мощности узла СОМУ, используемая для вычисления ω -мощности узла, а также для получения признаков β^\uparrow и γ^\uparrow типа узла предка; *d* — схема определения мощности набора листьев СОМНЛ, позволяющая получить результирующее значение ω_L в соответствии с типом текущего узла и типом узла-предка.

Логика СОМНЛ достаточно проста: если $\beta^\uparrow = 1$, значение $|L|$ проходит на выход схемы через элементы И3 и ИЛИ4, так как на выходе элемента И2 присутствует сигнал логического нуля благодаря значению γ^\uparrow ; если $\beta^\uparrow = 0$ и $\gamma^\uparrow = 1$ (значения признаков β^\uparrow и γ^\uparrow ортогональны для узлов-предков, не являющихся листьями: $\beta^\uparrow \oplus \gamma^\uparrow = 0$), на выходе элемента И присутствует сигнал логического нуля благодаря нулевому значению β^\uparrow , а на выходе элемента ИЛИ4 — значение «00...01» из-за сигнала логической единицы на выходе элемента И. В случае если рассматриваемый узел не является листом, нулевое значение α^\downarrow обеспечивает нули на выходах элементов И1, 2 и, соответственно, на выходе схемы.

Второй этап алгоритма вычисления ω -мощности сечения описывается схемой, представленной на рис. 3. По синхросигналу $C_{2.1}$ счетчик СчНУ инициализируется значением поля ТКУ сечения, синхросигнал $C_{2.3}$ используется для декремента СчНУ, синхросигналы $C_{2.2.i}$ обеспечивают запись новых значений в поля МУ, признак ε сигнализирует об окончании работы схемы.

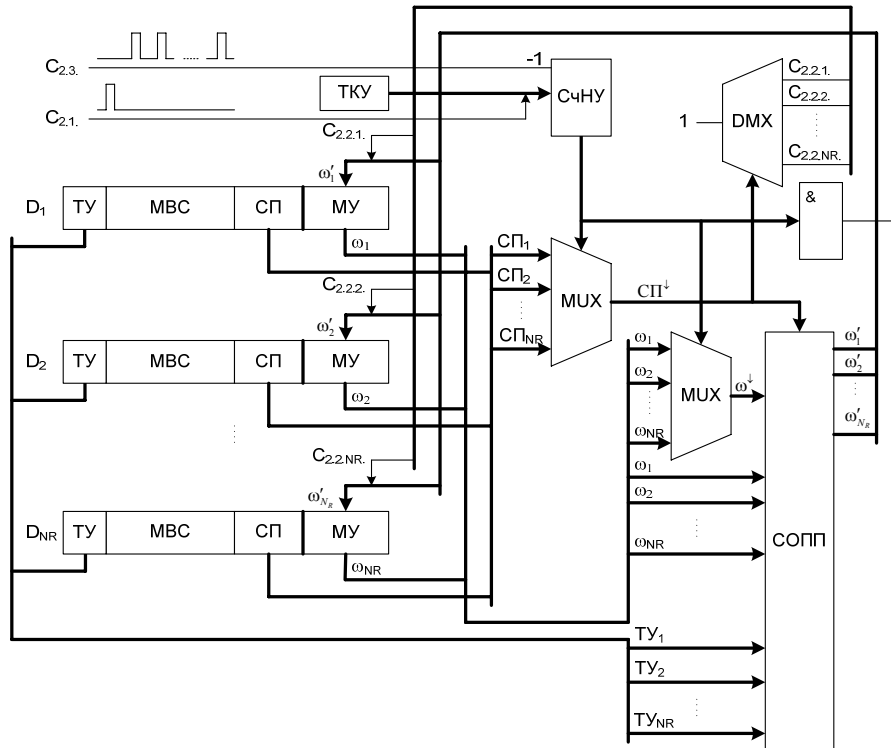


Рис. 3

Итерация работы данной схемы сводится к следующим действиям. Текущий номер узла i , выдаваемый счетчиком СЧНУ, коммутирует поля СП и МУ i -го узла, требуемые для работы СОПП, на выходы мультиплексоров 1 и 2. В результате работы СОПП на ее выходе появляются обновленные значения ω'_k полей МУ (обновленным фактически является значение для предка текущего узла, остальные равны нулю), которые записываются в соответствующие поля МУ предка i -го узла дерева посредством одного из синхросигналов $C_{2.2.k}$, получаемых с выхода демультиплексора 3 (на каждой итерации активен только один синхросигнал). В результате итеративной работы схемы поле МУ корневого узла дерева получает искомое значение ω -мощности сечения, которое может быть использовано в дальнейших преобразованиях.

Оценки асимптотической временной сложности нахождения ω -мощности сечения для программной реализации [6] и предлагаемой аппаратной модели приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Оценки асимптотической временной сложности
программной и аппаратной реализаций вычисления ω -мощности сечения**

Номер этапа	Программная реализация [6]	Аппаратная реализация
1	$O(N_T \cdot L_{\max}) \cong O(N_R^2)$	$O(1)$
2	$O(N_T) \cong O(N_R)$	$O(N_T) \cong O(N_R)$

Из табл. 2 следует, что основной выигрыш во времени наблюдается на первом этапе алгоритма за счет параллельного подсчета мощностей битовых векторов листьев и одновременной обработки всех узлов дерева. Второй этап (в предлагаемой реализации) является последовательным и не обеспечивает улучшения асимптотических характеристик при переходе с программного на аппаратный уровень. Теоретически возможна параллельная обработка нескольких поддеревьев одного дерева, однако ее практическая реализация затруднительна. При рассмотрении алгоритма в целом асимптотика программной реализации составляет величину $O(N_R^2)$, а аппаратной — $O(N_R)$, т.е. имеет место выигрыш по времени в N_R раз.

В дальнейшем предполагается аппаратное воплощение остальных этапов параллельно-последовательного метода разбиения. Планируется провести исследование не только асимптотических временных характеристик предложенных аппаратных решений, но и оценить их преимущества в абсолютных единицах времени. Кроме того, предполагается выполнить оценку их аппаратной сложности в числе эквивалентных вентилях.

Исследования И. В. Зотова выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых МК-3073.2007.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Организация и синтез микропрограммных мультимикроконтроллеров / И. В. Зотов, В. А. Колосков, В. С. Титов и др. Курск: КурскГТУ, 1999. 368 с.
2. Борзов Д. Б., Ватулин Э. И., Зотов И. В., Титов В. С. К задаче субоптимального разбиения параллельных алгоритмов // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 12. С. 34—39.
3. Зотов И.В., Колосков В.А., Титов В.С. Выбор оптимальных разбиений алгоритмов при проектировании микроконтроллерных сетей // Автоматика и вычислительная техника. 1997. № 5. С. 51—62.
4. Ватулин Э. И., Зотов И. В. Поиск базового сечения в задаче разбиения параллельных алгоритмов // Рус. деп. в ВИНТИ 24.11.03 № 2036-B2003. Курск, 2003. 30 с.
5. Ватулин Э. И., Зотов И. В. Метод формирования субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов // Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО'04). М.: Институт проблем управления, 2004. С. 884—917.
6. Ватулин Э. И., Зотов И. В. Параллельно-последовательный метод формирования субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005613091 от 28.11.05.

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
01.09.07 г.

В. М. ДОВГАЛЬ, В. С. ТИТОВ, Е. А. ТИТЕНКО

Курский государственный технический университет

СТРАТЕГИИ БЫСТРЫХ СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ИСЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Анализируются недостатки известных стратегий выводов исчислительных систем. Показано, что применение алгоритмических представительных систем порождает временную избыточность вследствие переборного с возвратами характера генерации ветвящегося пространства решений. Сущность предлагаемого подхода заключается в разработке набора комплементарных стратегий параллельных выводов с неединичным множеством равноправных исполнителей. Работа стратегий основана на исчислительных законах преобразования информации в многомерном пространстве времени.

Введение. Фундаментальным достижением теории алгоритмов конца XX века является доказательство взаимной эквивалентности известных алгоритмических и исчислительных систем, формализующих понятия „эффективная вычислимость“ и „эффективная выводимость“ соответственно. Исторически развитие теории алгоритмов шло по пути определения объема, содержания и границ между этими базовыми понятиями, сформировав тем самым дескриптивную и метрическую составляющие теории алгоритмов. В рамках дескриптивной составляющей установлено, что объем понятия „эффективный процесс“ определен в максимальном значении. Следовательно, любая новая абстрактная система должна быть соотнесена с уже существующими системами, расширив тем самым дескриптивное содержание понятия „эффективный процесс“ в целом, но не его объема. Другими словами, расширить дескриптивные рамки существующих абстрактных систем (машина Тьюринга, машина Шёнхаге, алгорифмы Маркова и др.) не представляется возможным [1].

Вместе с тем современный этап развития теории алгоритмов характеризуется двояким отношением к исчислениям и содержанию понятия „эффективная выводимость“. Дело в том, что алгоритмы и исчисления как дескрипторы, т.е. описатели, эффективных (конструктивных) процессов имеют статус самостоятельных объектов и собственные законы преобразования информации применительно к линейным и ветвящимся конструктивным процессам соответственно.

Основные недостатки существующих стратегий управления. Проблемная ситуация применительно к контексту высокоскоростной реализации ветвящихся конструктивных процессов заключается в том, что для них традиционно используются представительные алгоритмические системы в силу их исторического преобладания. Основанием этому служит взаимная эквивалентность алгоритмов и исчислений по дескриптивным возможностям. Это позволяет вести исследование дескрипторов эффективных процессов на основе прежде всего алгоритмического представления. Другими словами, статус исчисления как дескриптора эффективных процессов *de facto* нивелируется до статуса вспомогательного объекта, изучение которого подменяется исследованием алгоритмов. Функционирование исчисления при таком подходе осуществляется его моделированием на основе алгоритмических представлений ветвящихся процессов, что обуславливает непродуктивные затраты времени на перебор и *метрическую проблему* формирования ветвящегося пространства решений.

Анализ известных стратегий управления показал следующее. К традиционным стратегиям управления в исчислительных системах относят [2, 3]:

1. Стратегия „стопки книг“, заключающаяся в адаптации исчислительной системы к внешним условиям путем, например, подсчета частоты использования правил с ее положительной оценкой применимости.

2. Стратегия наиболее „длинного“ образца, заключающаяся в эвристическом выборе из конфликтного множества таких правил, у которой левая часть наиболее длинная.

3. Стратегия метаправил, заключающаяся во введении служебных правил над конфликтным множеством.

4. Стратегия „классной доски“, основанная на выделении общей рабочей области памяти для записи в нее временной информации о результатах и условиях срабатывания правил в предыдущих ситуациях.

5. Стратегия приоритетного выбора, связанная с введением статических или динамических приоритетов над рабочими правилами, причем статические приоритеты формируются, как правило, экспертами. Динамические приоритеты вырабатываются в процессе генерации решения.

6. Стратегия управления по имени, заключающаяся в задании над правилами внешней управляющей системы, определяющей очередность срабатывания правил.

Данные стратегии применительно к задачам большой размерности или при наличии жестких временных ограничений характеризуются общими сдерживающими факторами:

- принципиальная неустранимость неопределенности выбора;
- реализация по результатам выбора, как правило, единственной приоритетной продукции из конфликтного множества;
- эвристическая адаптация под имеющийся технический ресурс в ущерб равноправной реализации выбранных приоритетных правил.

Таким образом, двойственность в понимании роли и места исчислений в высокоскоростной реализации ветвящихся конструктивных процессов порождает следующие недостатки, которые можно отнести к фундаментальным недостаткам существующей теории алгоритмов:

ошибочный вспомогательный статус исчисления порождает проблему вспомогательной роли исчислительных законов преобразования информации;

несоответствие законов преобразования информации алгоритмическими и исчислительными системами обуславливает проблему временной избыточности функционирования исчислений.

В связи с этим из выявленной *актуальной метрической проблемы* формируется научная задача — разработка стратегий быстрых символьных вычислений и исследование их характеристик.

Сравнительный анализ алгоритмов и исчислений на принадлежность к конструктивным объектам, т.е. имеющим начало и систему координат, выявил ситуацию неполноты описания исчисления. Дело в том, что для исчисления, по определению, характерно отсутствие однозначных отношений между его правилами. Следовательно, ход исчислительного процесса состоит в неоднозначной (недетерминированной) последовательности срабатывания правил в соответствии с внешней системой координат и разветвленной последовательности допускаемых состояний. Подобная зависимость хода исчислительного процесса от свободы выбора текущего шага является признаком того, что пространство толкования понятие „разрешение“ через „неоднозначность“ и „недетерминированность“ является неточным и неполным и объективно требует последующего уточнения.

Стратегии быстрых (безвозвратных) символьных вычислений. Сущность подхода к уточнению содержания понятия „эффективная выводимость“ заключается в разработке представительного генератора — исчисления с неединичным классом исполнителей и самостоя-

тельными законами преобразования информации в виде исчислительных стратегий быстрых символьных вычислений для продукционных исчислительных систем.

Решение научной задачи определяется, в первую очередь, разработкой и определением условий применимости стратегий параллельных выводов: И—стратегии, ИЛИ—стратегии, И—ИЛИ—стратегии и др. Главная особенность данных стратегий определяется их взаимной комплементарностью по отношению к составу продукций и обрабатываемым данным.

Новизна подхода к разработке стратегий параллельных продукционных выводов определяется трактовкой исчисления как самостоятельного объекта с собственными законами преобразования [4]. Самостоятельность исчисления связана с уточнением термина „разрешительные правила“ как равноправных в срабатывании правил (соглашение Дейкстры). В соответствии с соглашением Дейкстры исчислению соответствует набор равноправных исполнителей, каждый из которых выполняет локальную обработку данных. Подобное уточнение исчисления обуславливает трактовку понятия „недетерминированность“ как многозначность.

Разрабатываемые стратегии параллельных выводов имеют три отличительные составляющие. Первая составляющая определяет параллельное и равноправное срабатывание подмножества продукций, каждая из которых локально применима к копии обрабатываемых данных. Вторая — определяет результат равноправного срабатывания применимых продукций, получаемый объединением локальных результатов. Третья составляющая определяет рекурсивный вызов исчисления с обновленными данными. Следствием предлагаемых составляющих является безвозвратное движение по ярусам ветвящегося пространства решений.

Разработка принципиально новых параллельных стратегий реализации ветвящихся процессов и определение условий их оптимального применения требует создания и/или модификации адекватных теоретических положений и соответственно новых программных и технических средств их поддержки и реализации. В первую очередь речь идет о расширительной модификации машины вывода, составляющей исполнительное ядро в современных и перспективных интеллектуальных системах.

Модифицированная машина вывода. Исчислительная система с точки зрения теоретического проектирования представляется как система вида [5]

$$(R, B, M), \quad (1)$$

где R — область данных в рабочем алфавите \mathfrak{R} ; B — набор продукций (база знаний); M — машина вывода (генерации решений).

Машина вывода — это абстрактная система, конкретизирующая состав и взаимодействие модулей обработки данных системой продукций.

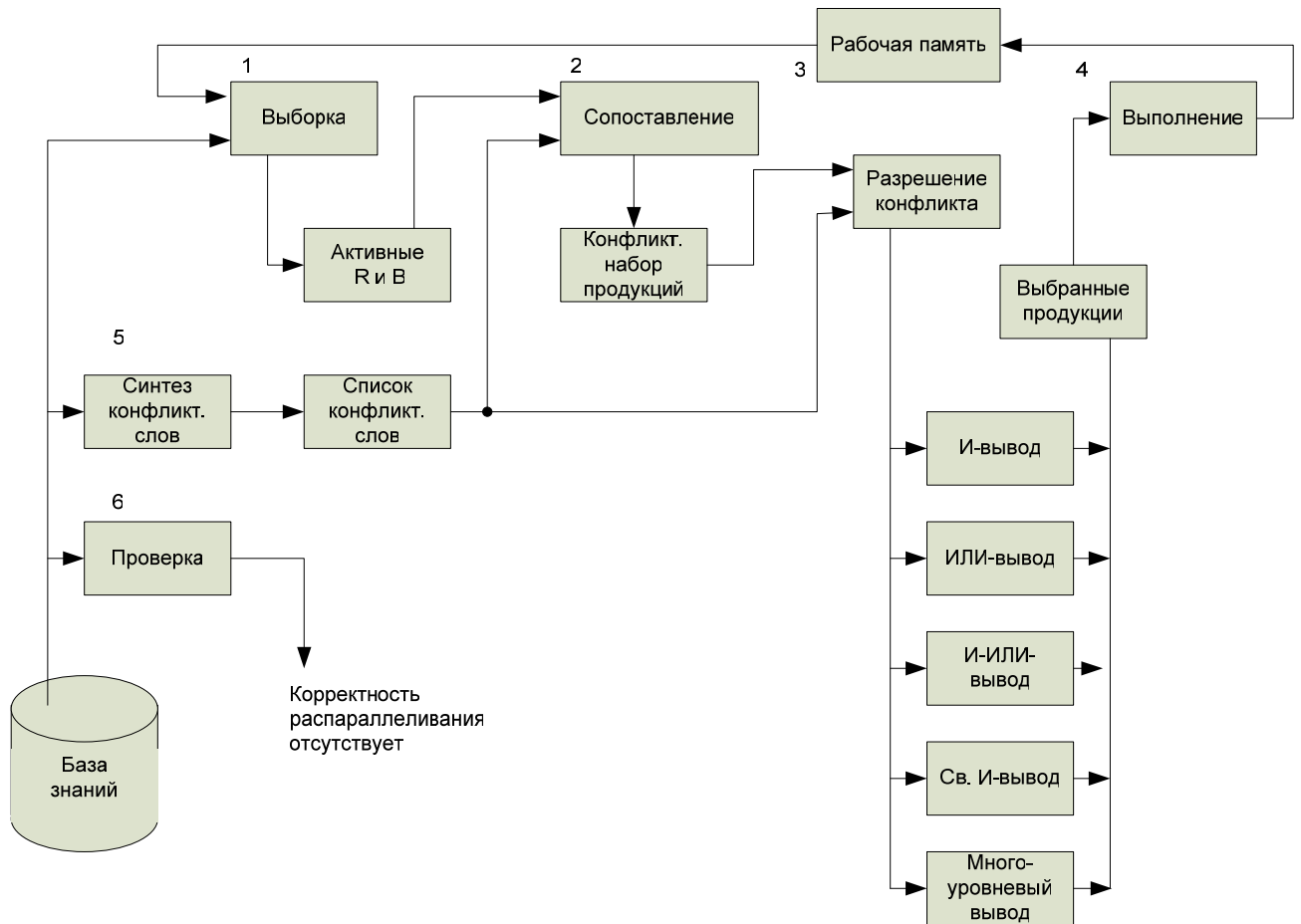
Традиционно M описывается множеством (2)

$$M = \{V, S, K, W\}, \quad (2)$$

где V — модуль выборки из R и B множества активных данных и множества активных продукций; S — модуль сопоставления, определяющий множество вхождений образцов продукций во входные символьные строки; K — модуль разрешения конфликтов при сопоставлении; W — модуль выполнения выбранных продукций.

Цикл работы машины вывода состоит в последовательном выполнении четырех модулей: выборки, сопоставления, разрешения конфликтов и модуля выполнения продукций. Вместе с тем наложение дополнительных ограничений на динамическое распараллеливание и динамическую проверку корректности распараллеливания обуславливает модификацию состава машины вывода (см. рисунок).

Введенные дополнительные модули проверки корректности распараллеливания и определения максимального коэффициента ветвления в дереве вывода реализуют необходимые вычисления однократно без использования области данных.



Расширение продукционной машины вывода позволит модифицировать наиболее критичный к скорости генерации яруса дерева модуль разрешения конфликтов с использованием быстрых продукционных вычислений.

Заключение. В статье рассмотрен вопрос разработки модифицированной машины вывода для создания набора стратегий параллельных выводов, принципиально отличающихся комплементарностью построения ветвящегося пространства решений и основанных на исчислительных законах преобразования информации в многомерном пространстве времени, частным случаем которых будут алгоритмические законы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Успенский В. А. Теория алгоритмов: основные открытия и приложения / В. А. Успенский, А. Л. Семенов. М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 288 с.
2. Геловани В. А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нестандартных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды / В.А. Геловани [и др.]. М.: УРСС, 2001. 304 с.
3. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2001. 384 с.
4. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ—Петербург, 2002. 608 с.
5. Статические и динамические экспертные системы. / Э.В. Попов [и др.]. М.: Финансы и статистика, 1996. 319 с.

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
01.09.07 г.

В. Н. Гридин, В. С. Титов, М. И. Труфанов

Курский государственный технический университет

ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БИНОКУЛЯРНОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОТКЛОНЕНИЙ ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Представлены принципы измерения параметров движений зрачков глаз человека и выявления косоглазия бинокулярным оптико-электронным устройством. Устройство получает изображения глаз человека, распознает зрачки, определяет их трехмерные координаты и выявляет косоглазие на основе анализа саккадических движений зрачков.

Широко распространенные способы диагностики бинокулярного зрения человека практически не изменились за последние несколько десятилетий и основаны на субъективном анализе признаков заболевания врачом [1], что приводит в случае низкой квалификации врача к несвоевременному и, иногда, неправильному определению диагноза. Применение инструментальных средств диагностики позволяет точно измерять количественные признаки заболевания и объективно ставить диагноз.

Для диагностики офтальмологических заболеваний наиболее целесообразным является применение оптико-электронных устройств (ОЭУ), позволяющих бесконтактно и быстро измерять параметры зрения человека и адекватно и своевременно ставить диагноз. Одним из заболеваний, вызванным отклонениями глазодвигательного аппарата, является косоглазие. Недостатками известных способов и оптико-электронных устройств диагностики заболеваний, связанных с отклонениями бинокулярного зрения [2, 3], является сложность их практического применения (особенно при работе с детьми), длительность процесса диагностики, низкая точность измерения степени косоглазия.

Предлагаемое оптико-электронное устройство обеспечивает диагностику связанных с отклонениями глазодвигательного аппарата офтальмологических заболеваний и отличается от известных инструментальных средств аналогичного назначения простотой практического применения, высокой точностью, низкой стоимостью, малыми габаритами, высоким уровнем автоматизации, диагностикой косоглазия на ранней стадии.

Устройство реализует принцип диагностики косоглазия, основанный на измерении параметров саккадических (быстрых) движений зрачков глаз при фиксации взгляда человека на заданной врачом точке по изображениям, поступающим с двух видеокамер, составляющих бинокулярную оптико-электронную систему. Отличительными особенностями принципа функционирования устройства является измерение трехмерных координат зрачков глаз, позволяющее с большей точностью определять степень косоглазия, а также обнаружение зрачков на изображении способом, характеризующимся низкой вычислительной сложностью,

обеспечивающим измерение параметров движений зрачков (направления, амплитуды) при помощи несложного с точки зрения схмотехнической реализации аппаратного модуля.

Устройство состоит из двух видеокамер, блоков ввода изображения, микропроцессорного контроллера, ОЗУ, специализированных вычислителей на ПЛИС, инфракрасного осветителя (рис. 1).

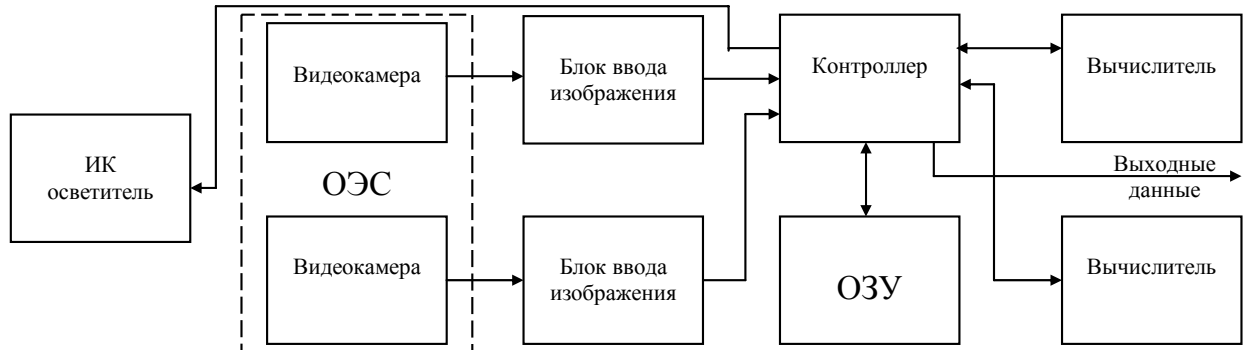


Рис. 1

Алгоритм диагностики косоглазия представлен на рис. 2.



Рис. 2

До использования ОЭУ производят калибровку (блок 1 алгоритма) положения видеокамер на основе способа [4] для реализации функции трехмерного зрения (калибровка производится однократно в процессе изготовления ОЭУ). Откалиброванную ОЭС устанавливают напротив лица человека (блок 2) так, чтобы каждая из видеокамер находилась напротив каждого из глаз и при этом изображения обоих глаз попадали в поле зрения видеокамер (рис. 3). Освещают лицо человека инфракрасным осветителем для получения контрастного изображения зрачка.

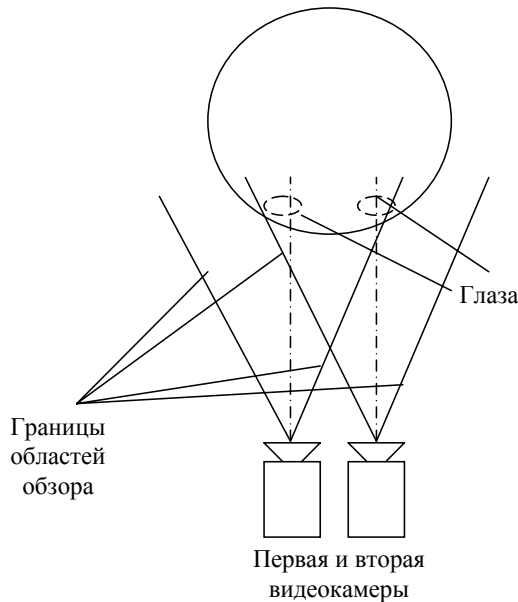


Рис. 3

В процессе функционирования опико-электронного устройства формируемое видеокамерами изображение глаз человека поступает через блоки ввода изображения и контроллер в ОЭУ. Блоки ввода изображения в процессе записи изображения в ОЭУ производят коррекцию дисторсии [5] оптической системы видеокамер для повышения точности последующего определения степени косоглазия. Затем по полученному изображению контроллер формирует его контурное описание, каждый контур которого описывается множеством из N_{kl} пар координат точек (x_i, y_i) :

$$K_l = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_{N_{kl}}, y_{N_{kl}})\}.$$

Определение яркости B точки (x, y) контурного изображения контроллер производит по формуле

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{при } G(x, y) > L_p \\ 0, & \text{при } G(x, y) < L_p \end{cases},$$

$$G(x, y) = |I(x+1, y) + I(x-1, y) + I(x, y+1) + I(x, y-1) - 4I(x, y)|,$$

где L_p — пороговое значение изменения яркости, по которому определяется принадлежность точки изображения фону или контуру; $I(x, y)$ — яркость точки с координатами (x, y) .

Сформированное контурное описание изображения используется для формирования эталона зрачка текущего анализируемого пациента. Для этого на основе априорной информации об изображении зрачка и глаза (зрачок овальный, на его изображении выделяются две области — радужная оболочка и непосредственно сам зрачок, зрачок имеет цвет, отличный от кожи и глазного яблока, уголки глаз имеют острый угол) контроллер производит распознавание зрачка (блок 7). Сформированный эталон зрачка в дальнейшем используется для быстрого распознавания зрачка вычислителями ОЭУ.

Следующей операцией (блок 8) является определение границ области движения зрачка, выполняемое для сокращения объема вычислений при последующем обнаружении зрачка. Сокращение вычислений производится за счет дальнейшего поиска зрачка только в небольшой области изображения.

В блоках 9, 10 алгоритма производится анализ контраста зрачка на изображении, и контроллер устанавливает такую мощность инфракрасного освещения, при которой контраст максимальный. Для обеспечения получения изображения с максимальным контрастом и, как следствие, наибольшей точности локализации зрачка контроллер производит плавное изменение мощности инфракрасного осветителя в заданном диапазоне значений и выбор такой мощности, при которой контраст максимальный. Контраст K_T оценивается по сумме значений двух параметров: отношению K_I максимальной I_{\max} и минимальной I_{\min} яркостей пикселей глаза и четкости K_g контура зрачка, обратно пропорциональной количеству разрывов N_{dif}

контурной линии зрачка и прямо пропорциональной значению первой производной G_k изображения контура зрачка по вертикальному и горизонтальному направлению:

$$K_T = k_I K_I + k_g K_g;$$

$$K_I = \frac{I_m}{I_{\min}};$$

$$K_g = \frac{1}{N_{\text{dif}}} G_k,$$

где k_I, k_g — весовые коэффициенты.

Следующей выполняемой оптико-электронным устройством операцией является операция быстрого распознавания зрачка (блок 11), обеспечивающая возможность отслеживания саккадических движений глаз в целях повышения точности определения косоглазия. Распознавание зрачка производится путем сравнения изображения в области движения зрачка с ранее сформированным эталоном. Распознавание выполняется на основе метода, основной операцией которого является поэлементное вычитание изображения эталона (сформированного в блоке 7) из анализируемого изображения. Распознавание и локализацию зрачка выполняют вычислители, реализованные на программируемой логической интегральной схеме. В процессе распознавания контроллер считывает из ОЗУ изображения областей возможных движений каждого зрачка и передает их на вычислители, которые определяют положение зрачков глаз (каждый вычислитель распознает зрачок по изображению только одного глаза) и формируют на своих выходах координаты зрачков, поступающие в контроллер. Контроллер записывает в ОЗУ координаты зрачков и время, в которое зрачки занимали данное положение.

Применение двух различных методов позволяет достоверно обнаруживать зрачок любого человека за счет использования общего описания эталона зрачка и глаза. Затем по сформированному эталону зрачка конкретного человека, зрение которого анализируют на основе метода, характеризующегося низкой вычислительной сложностью, достоверно обнаруживать его зрачки на основе алгоритмов, характеризующихся низкой вычислительной сложностью и возможностью реализации не в микропроцессорном устройстве, а на логической схеме. На достоверность и скорость распознавания зрачка также влияет использование его изображения в инфракрасном диапазоне, при котором темным является только зрачок, а радужная оболочка и остальная часть глаза — светлыми.

После определения двумерных координат зрачков на каждой паре поступающих с видеокамер стереоизображений контроллер производит расчет трехмерных координат зрачков и определение угла между направлениями взгляда каждого глаза, характеризующего величину косоглазия (блок 13). Двумерные координаты зрачков определяют как центр масс точек, составляющих зрачки.

В трехмерной декартовой системе координат, в которой оси абсцисс и ординат совпадают с осями абсцисс и ординат плоскости изображения левой видеокамеры, а ось аппликат направлена из центра кадра изображения левой видеокамеры и совпадает с ее главной оптической осью, пространственные координаты левого (x_{e1}, y_{e1}, z_{e1}) и правого (x_{e2}, y_{e2}, z_{e2}) зрачков равны:

$$x_{e1} = -\frac{Lx_{e1I1}}{x_{e1I2} - x_{e1I1}}; y_{e1} = -y_{e1I1} \frac{L}{x_{e1I2} - x_{e1I1}}; z_{e1} = -\frac{Lf}{x_{e1I2} - x_{e1I1}} - f;$$

$$x_{e2} = -\frac{Lx_{e2I1}}{x_{e2I2} - x_{e2I1}}; y_{e2} = -y_{e2I1} \frac{L}{x_{e2I2} - x_{e2I1}}; z_{e2} = -\frac{Lf}{x_{e2I2} - x_{e2I1}} - f,$$

где $(x_{e111}, y_{e111}), (x_{e112}, y_{e112})$ — двумерные координаты левого зрачка на изображениях, поступающих с левой и правой видеокамер соответственно; L — расстояние между видеокамерами по горизонтали; f — фокусное расстояние видеокамер; $(x_{e211}, y_{e211}), (x_{e212}, y_{e212})$ — двумерные координаты правого зрачка на изображениях, поступающих с левой и правой видеокамер соответственно.

Для определения направления наблюдения глаза должны быть известны координаты его центра. Координаты центров левого (x_{c1}, z_{c1}) и правого (x_{c2}, z_{c2}) глаз рассчитывают путем решения системы уравнений, связывающей координаты зрачков при их различных положениях через уравнение сферы (окружности в случае равенства ординат зрачков нулю). Для расчета используют координаты зрачков при их крайних и центральном положениях:

$$x_{Ci} = \frac{1}{2} \cdot \frac{-z_{i1}x_{i12}^2 + z_{i2}x_{i12}^2 - z_{i2}z_{i13}^2 - z_{i12}^2z_{i1} - x_{i13}^2z_{i12} + z_{i12}^2z_{i13} + x_{i12}^2z_{i1} + z_{i12}x_{i13}^2 - z_{i13}z_{i12}^2 + z_{i12}z_{i13}^2 + z_{i13}^2z_{i1} - x_{i12}^2z_{i13}}{x_{i12}z_{i12} - x_{i12}z_{i13} - z_{i12}x_{i12} + z_{i12}x_{i13} - x_{i13}z_{i12} + z_{i13}x_{i12}},$$

$$z_{Ci} = \frac{1}{2} \cdot \frac{x_{i12}^2x_{i12} - x_{i12}^2x_{i13} - x_{i12}x_{i12}^2 - x_{i12}z_{i12}^2 + x_{i12}x_{i13}^2 + x_{i12}z_{i13}^2 + z_{i12}^2x_{i12} - z_{i12}^2x_{i13} - x_{i13}^2x_{i12} + x_{i13}x_{i12}^2 + x_{i13}z_{i12}^2 - z_{i13}^2x_{i12}}{x_{i12}z_{i12} - x_{i12}z_{i13} - z_{i12}x_{i12} + z_{i12}x_{i13} - x_{i13}z_{i12} + z_{i13}x_{i12}},$$

где i — номер глаза; $(x_{i11}, z_{i11}), (x_{i12}, z_{i12}), (x_{i13}, z_{i13})$ — координаты (абсциссы и аппликаты) зрачков i -го глаза в трехмерной системе координат.

Рассмотрим геометрическую схему для расчета угла косоглазия (рис. 4).

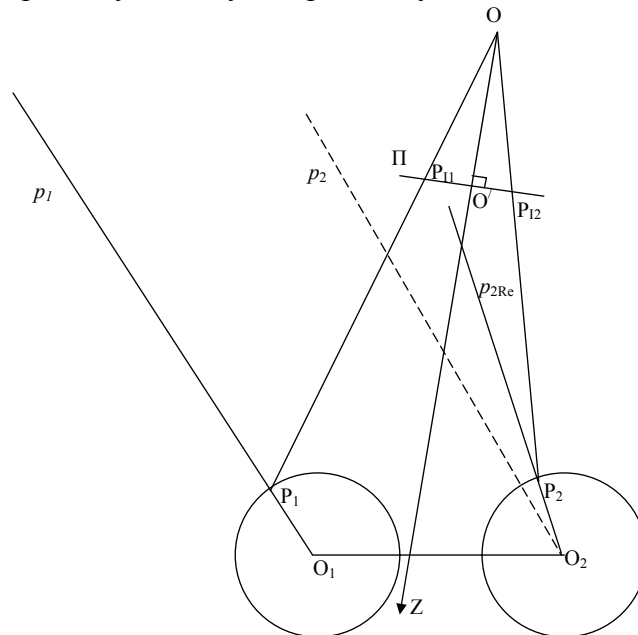


Рис. 4

При отсутствии косоглазия направления наблюдения каждого глаза, показанные прямыми p_1 и p_2 , параллельны (для упрощения рассматриваются прямые в плоскости XOZ , см. рис. 4). При косоглазии направление наблюдения одного из глаз, показанное прямой p_{2Re} , смещено относительно положения при здоровом зрении. Положения зрачков показаны точками P_1 и P_2 . Уравнения прямых p_1, p_{2Re} в плоскости XOZ записываются:

$$x = k_{p1}z + b_{p1};$$

$$x = k_{p2}z + b_{p2},$$

где $k_{p1}, b_{p1}, k_{p2}, b_{p2}$ — параметры прямых p_1, p_2 , причем k_{p1}, k_{p2} являются арктангенсами углов наклона соответствующих прямых в плоскости XOZ к оси аппликат.

Параметры k_{p1} , k_{p2} определяют, решая систему уравнений, составленную на основе уравнений прямых p_1 , p_2 при известных координатах центров глаз (x_{c1}, z_{c1}) , (x_{c2}, z_{c2}) и текущих координатах (x_{e1}, z_{e1}) , (x_{e2}, z_{e2}) зрачков.

Углы, определяющие направления взгляда в плоскости XOZ левого δ_1 и правого δ_2 глаз, равны:

$$\delta_1 = \arctg(k_{p1});$$

$$\delta_2 = \arctg(k_{p2}).$$

В плоскости YOZ определяющие направления взгляда углы рассчитывают аналогично.

Угол косоглазия δ , равный углу между прямыми p_1 p_2 , определяют по разности углов наклона прямых p_1 и p_2 :

$$\delta = \arctg(k_{p1}) - \arctg(k_{p2}).$$

После определения направлений взгляда и угла косоглазия полученные результаты контроллер передает (блок 13 алгоритма) для дальнейшего анализа глазодвигательного аппарата и бинокулярного зрения человека.

Для экспериментальной проверки созданного устройства создана имитационная модель, описывающая принципы формирования изображения в оптико-электронном устройстве диагностики и процесс наблюдения точки в пространстве глазами человека. Результаты экспериментов на имитационной модели подтвердили возможность практической реализации предложенного устройства. Представленное устройство позволяет измерять движения зрачков и направления взгляда в реальном времени и выявлять косоглазие на ранней стадии посредством анализа саккадических движений зрачков. Устройство может быть применено при решении других медицинских задач, связанных с анализом движения зрачков глаз, например диагностики нистагма, и состояния вестибулярного аппарата человека.

Работа выполнена при поддержке фонда „Научный потенциал“ (договор № 107, 2007 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урмахер Л. С. Справочник по офтальмологической оптике и приборам. М.: Медицина, 1971. 179 с.
2. Пат. № 2292836 РФ, МКИ А61В 3/08. Устройство для исследования бинокулярного зрения / В. В. Ковылин. Заявлено 20.12.2004; опубл. 10.02.2007 // Б. И. № 4. 7 с.
3. Пат. №2221475 РФ, МКИ А61В3/113. Способ исследования движения глаз по бинокулярному изображению и устройство для его реализации / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, А. В. Скрипаль, А. В. Абрамов, Т. Б. Усанова,
4. Пат. № 2002116297/14 / Феклистов В. Б. Заявл. 19.06.2002; опубл. 20.01.2004. 15 с.
5. Пат. № 2286598 РФ, МКИ G09K32. Способ внешней калибровки бинокулярной системы технического зрения / С. В. Дегтярев, В. С. Титов, М. И. Труфанов, В. А. Денисюк. Заявлено 1.03.2005; опубл. 27.10.2006 // Б. И. № 30. 15 с.
6. Пат. № 2295153 РФ, МКИ G09K32/00. Корректирующее устройство ввода изображения в ЭВМ / М. И. Труфанов, Д. В. Титов. Заявлено 4.07.2005; опубл. 10.03.2007 // Б. И. № 7. 6 с.

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
01.09.07 г.

А. Н. СТРЕЛКОВА, А. А. СТЕПЧЕНКО

Курский государственный технический университет

УСТРОЙСТВО ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ЭНДОСКОПИИ

Представлено устройство повышения качества эндоскопических изображений при анализе желудка. Путем цифровой обработки изображений в реальном времени устройство обеспечивает коррекцию яркостных искажений, вызванных отражением источника света от слизистой оболочки, и коррекцию дисторсии оптической системы эндоскопа.

В настоящее время перед разработчиками эндоскопов остаются не полностью решенными две задачи. Первая связана со значительной потерей яркости света в месте стыковки фиброволокна с узлом эндоскопа, предназначенным для передачи света. Известным решением данной проблемы является применение мощных источников света. Однако при увеличении интенсивности освещения существенно увеличивается вероятность появления на получаемом эндоскопом изображении засвеченных областей и бликов. Вторая задача заключается в коррекции искажений периферических областей поля зрения, вызванных дисторсией оптической системы эндоскопа. Эта задача в настоящее время частично решается введением в оптическую систему эндоскопа корректирующих линз, устраняющих искажение изображения. Однако введение в оптическую систему дополнительных корректирующих элементов вносит другие искажения и увеличивает габариты эндоскопа, что недопустимо.

Решением указанных задач является коррекция искажений после получения изображения на основе его цифровой обработки без изменения конструкции оптической системы путем введения предлагаемого устройства повышения качества изображения между датчиком изображения и приемником изображения.

Устройство повышения качества изображения при эндоскопии состоит из блока ввода изображения БВИ (рис. 1), блока вывода восстановленного изображения БВ, блока контроля чувствительности датчика изображения БКЧ, блока обработки изображения БОИ, блока коррекции БК, блока медианной фильтрации МФ, блока регистров БР, запоминающих устройств ЗУ1, ЗУ2, ЗУ3, ЗУ4 (рис. 2).

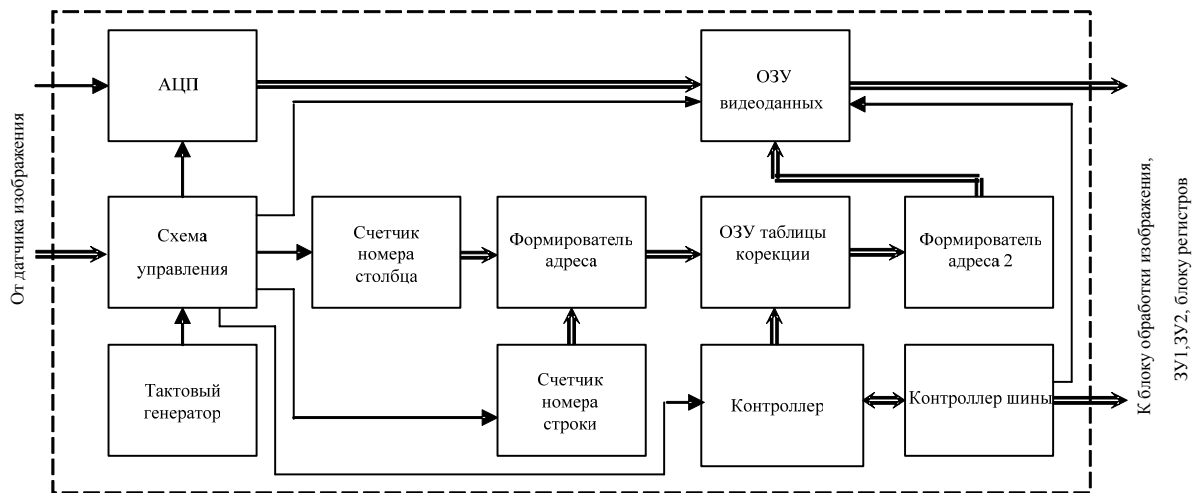


Рис. 1

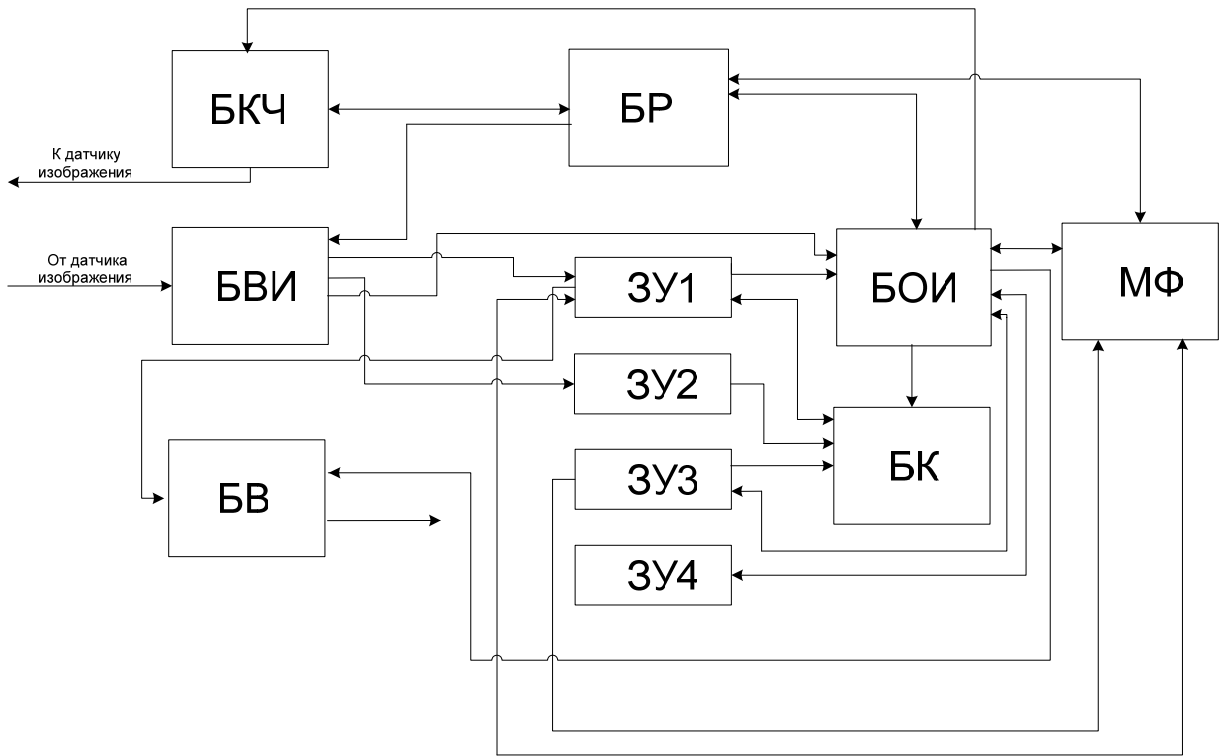


Рис. 2

Принцип функционирования устройства заключается в коррекции дисторсии при получении изображения и последующем восстановлении искаженных бликами областей изображения двумя различными способами в зависимости от величины блика.

В процессе функционирования устройства на вход блока ввода изображения поступает изображение исследуемого участка желудка. Блок ввода изображения осуществляет аналого-цифровое преобразование видеосигнала и одновременно производит коррекцию дисторсии оптической системы эндоскопа посредством записи каждого поступающего пикселя изображения в позицию, определяемую скорректированными координатами [1].

Для описания дисторсии используется модель, в соответствии с которой искажения, вызванные дисторсией линз, имеют вид [2]:

$$\begin{aligned} \Delta x_r &= x k_1 r^2; \\ \Delta y_r &= y k_1 r^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $(\Delta x_r, \Delta y_r)$ — отклонения точки изображения от ее истинного положения, которое занимала бы точка при отсутствии дисторсии; k_1 — коэффициент дисторсии, постоянный для оптической системы эндоскопа; $r = (x_2 + y_2)^{1/2}$ — расстояние от центра кадра до точки с координатами (x, y) .

Предварительно (до начала работы устройства) в блок ввода изображения (см. рис. 1) исправленные координаты (x', y') для каждого пикселя изображения с координатами (x, y) записываются в ОЗУ таблиц коррекции по адресу A , равному

$$A = x + yX, \quad (2)$$

где X — количество пикселей кадра изображения по горизонтали.

В процессе ввода изображения от источника видеосигнала поступает аналоговый сигнал на вход АЦП и управляющие сигналы на вход схемы управления (см. рис. 1) блока БВИ. Схема управления выделяет импульсы начала строки и столбца и подает их на соответ-

вующие счетчики. С выходов счетчиков строки и столбца координаты текущего обрабатываемого пикселя поступают на вход формирователя адреса. Формирователь адреса определяет адрес в ОЗУ с таблицей коррекции, где ранее были записаны исправленные координаты текущего пикселя. На выходе ОЗУ таблицы коррекции формируются значения (x', y') , которые вторым формирователем адреса преобразуются в адрес A'

$$A' = x' + y' \cdot X. \quad (3)$$

По адресу A' в ОЗУ видеоданных записывается значение яркости текущего пикселя. После прихода всех пикселей очередного кадра в ОЗУ видеоданных записано изображение, не искаженное влиянием дисторсии.

Из БВИ изображение передается на дальнейшую обработку для коррекции бликов. Принцип коррекции бликов на изображении при эндоскопии заключается в следующем. На вход устройства поступает исходное изображение, по которому производится обнаружение бликов и определение количества точек, их составляющих. При условии, что площадь блика не превышает заданную пороговую величину, устройство корректирует блик посредством медианной фильтрации [3]. В противном случае дополнительно производится получение кадра изображения в текущей позиции эндоскопа с уменьшенной чувствительностью датчика изображения, позволяющей уменьшить влияние блика, и замена искаженной области на исходном изображении на соответствующую область дополнительно полученного изображения. После коррекции бликов устройство передает скорректированное изображение для дальнейшего анализа.

Устройство повышения качества эндоскопических изображений представлено на рис. 3. Устройство производит последовательную обработку получаемых эндоскопом изображений слизистой оболочки до момента окончания эндоскопического анализа желудка (блок 1). Обработка каждого изображения заключается в следующем.

До начала обработки изображения в блоке регистров, состоящем из регистров A , B , C , D и E , в регистре D , являющемся регистром флагов, устанавливаются начальные значения переменных (флагов) EF , FST , LST , BR и EXC , используемых в процессе работы устройства: $FST=1$, $LST=0$, $BR=0$, $EXC=0$.

После операции установки флагов (блок 2 алгоритма) блок контроля чувствительности устанавливает в регистре C чувствительность датчика изображения, при которой получают кадр изображения.

Далее с блока контроля чувствительности на датчик изображения поступает значение чувствительности датчика изображения. После этого блок ввода изображения записывает изображение в ЗУ2 при значении „1“ флага FST , а при значении „0“ – в ЗУ2 (блок 4). При этом значение флага FST подается на блок ввода изображения с блока регистров.

Затем с ЗУ1 на блок обработки изображения последовательно поступают значения яркостей точек изображений (блок 6), причем смещение текущей точки (адрес) относительно начала ЗУ1 поступает на блок обработки изображения с блока регистров и хранится в регистре B .

Блок обработки изображения производит сравнение полученного значения яркости текущей точки с пороговым значением (блок 7), хранящимся в регистре A . При условии, что полученное значение меньше порогового, блок обработки изображения подает на блок регистров сигнал, свидетельствующий об увеличении значения в регистре B ; в результате в нем будет храниться смещение следующей точки относительно начала ЗУ1. После блок обработки изображения приступает к обработке следующей точки (блок 5).

Если же значение яркости текущей точки больше порогового (блок 8), то блок обработки изображения производит проверку на наличие в ЗУ3 признака необходимости применения медианного фильтра или признака, свидетельствующего о необходимости замены значения яркости текущей точки значением яркости точки изображения, полученного при уменьшен-

ной чувствительности датчика. При положительном результате проверки блок обработки изображения приступает к обработке следующей точки (блок 5). В противном случае блок обработки изображения подсчитывает число точек в блике, которому принадлежит текущая точка (блок 9). При этом блок обработки изображения записывает в ЗУ4 смещения (относительно начала ЗУ1) точек, принадлежащих текущему блику.

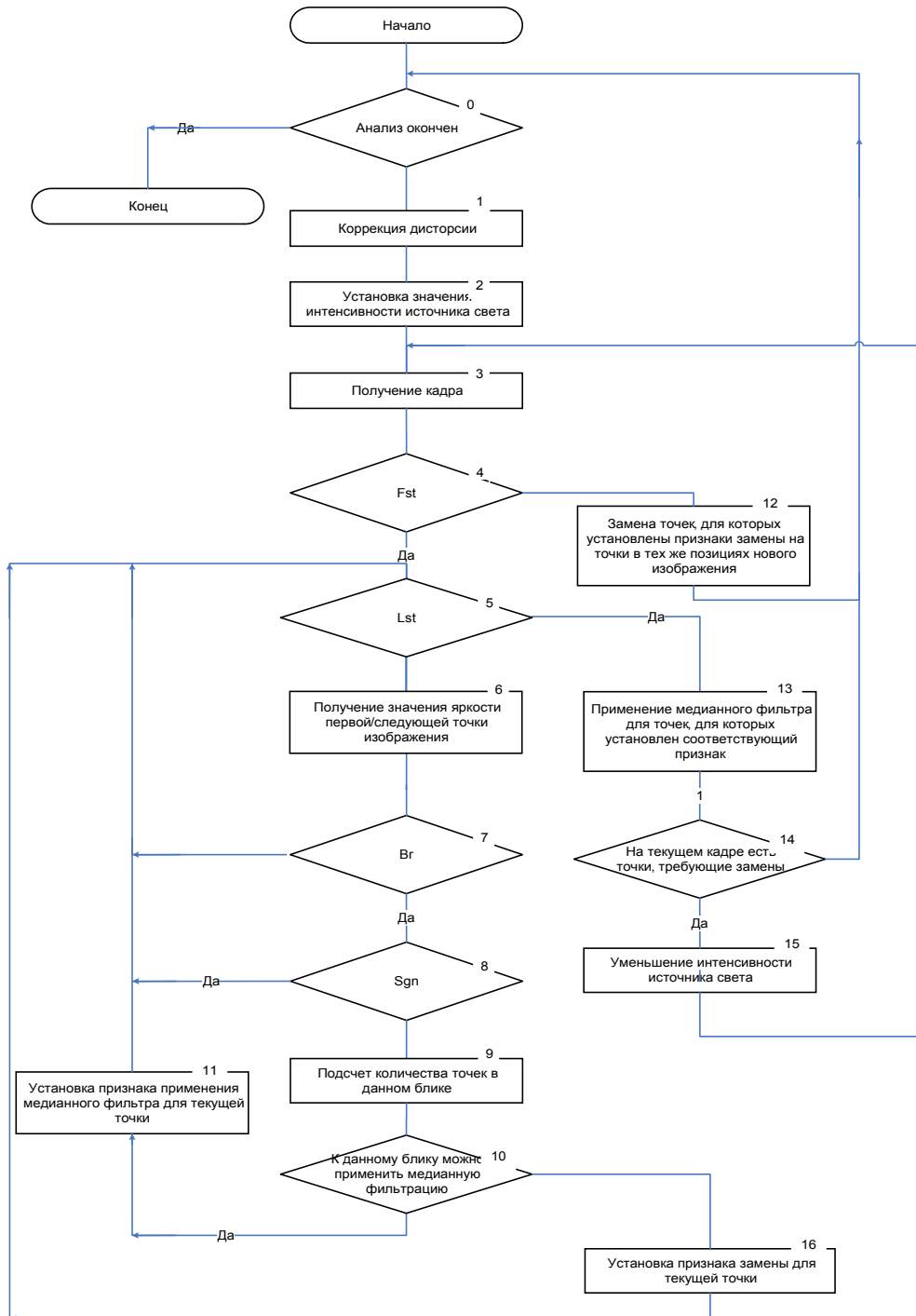


Рис. 3

Затем блок обработки изображения получает с выхода блока регистров, которому соответствует регистр E , пороговое значение количества точек блика для применения медианного фильтра и сравнивает полученное значение с количеством точек текущего блика (блок 10). Если полученное значение меньше порогового, с блока обработки изображения на ЗУ3 по-

ступает сигнал, свидетельствующий о необходимости записи признаков применения медианного фильтра в позиции, смещения которых поступают на блок обработки изображения с ЗУ4 (блок 11). В противном случае блок обработки изображения (блок 16) записывает в ЗУ3 в те же позиции признаки необходимости замены и на блок регистров подает значение флага *EXC*, равное „1“.

После того как по заданному алгоритму устройством проанализированы и обработаны все точки изображения, блок обработки изображения подает на блок регистров значение флага *LST*, равное „1“. В результате для тех точек, которые принадлежат бликам, в зависимости от размера засвеченной области в ЗУ3 в позициях, соответствующих смещениям точек относительно начала ЗУ1, расположен либо признак необходимости применения медианного фильтра, либо признак замены.

После того как проанализированы яркости всех точек изображения, блок обработки изображения направляет на блок медианной фильтрации сигнал, свидетельствующий о том, что в тех точках, для которых в позициях ЗУ3, соответствующих их смещениям относительно начала ЗУ1, находится признак необходимости применения медианного фильтра [3], получаемый блоком медианной фильтрации с ЗУ3, следует применить медианную фильтрацию (блок 13). Блок медианной фильтрации после применения медианного фильтра к каждой из указанных точек записывает их новые значения в ЗУ1 вместо уже имеющихся.

После этого (блок 14) блок обработки изображения осуществляет проверку значения флага *EXC*. Если оно равно „1“, то блок обработки изображения (блок 15) направляет на вход блока контроля чувствительности сигнал, свидетельствующий о том, что на время получения одного кадра необходимо уменьшить значение чувствительности датчика изображения, и на блок регистров подает значение флага *EXC*, равное „0“.

Затем вновь полученное изображение блок ввода изображения записывает в ЗУ2. БОИ 8 (блок 12), получив с блока обработки изображения сигнал о том, что второе изображение находится в ЗУ2, направляет на блок коррекции сигнал о том, что необходимо произвести замену значений яркости точек ЗУ1, подавая на блок коррекции значения яркостей точек, полученных с ЗУ2 на блок коррекции, в позициях, в которых в ЗУ3 на соответствующих смещениям данных точек от начала блока памяти находится признак необходимости замены, получаемый блоком коррекции с ЗУ3.

После этого блок обработки изображения подает сигнал на блок вывода восстановленного изображения о том, что с ЗУ1 на блок вывода поступает изображение, на котором засвеченные области восстановлены и которое может быть передано для дальнейшего анализа. Устройство переходит к обработке следующего изображения, если таковое получено (блок 1).

Таким образом, предлагаемое устройство позволит повысить качество эндоскопических изображений слизистой оболочки пищевода, желудка и двенадцатиперстной кишки и, как следствие, точность выявления патологических изменений и правильность постановки диагноза, что будет способствовать оптимизации терапии, улучшению прогноза заболевания, сокращению сроков лечения, уменьшению экономических затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. № 2295153 РФ, МКИ G09K32/00. Корректирующее устройство ввода изображения в ЭВМ / М. И. Труфанов, Д. В. Титов. – № 2005120848; заявлено 4.07.2005; опубл. 10.03.2007 // Б. И. № 7. 6 с.
2. Пат. № 2289111 РФ, МКИ G01M11. Способ адаптивной калибровки радиальной дисторсии оптической подсистемы системы технического зрения / С. В. Дегтярев, В. С. Титов, М. И. Труфанов. – № 2004104494/09; заявлено 16.02.2004; опубл. 10.12.2006 // Б. И. № 34. 10 с.
3. Шاپиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение / Пер. с англ. М.: Бином. Лаборатория знания, 2006. 752 с.
Рекомендована кафедрой
вычислительной техники
Поступила в редакцию
01.09.07 г.

М. И. ТРУФАНОВ, П. С. КОЗЛОВ, В. И. МЕЛИК-ГАЙКАЗЯН

Курский государственный технический университет

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ И ОЦЕНКИ ФЛОТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ВЕЩЕСТВ

Представлена оптико-электронная система измерения поверхностного натяжения жидкостей и оценки флотационной активности веществ по изображению пузырька воздуха в исследуемой жидкости. Приведены результаты экспериментальных исследований оптико-электронной системы.

Флотация является одним из широко используемых методов обогащения полезных ископаемых, очистки воды от органических веществ и твёрдых взвесей, разделения смесей в химической, нефтеперерабатывающей, пищевой и других отраслях промышленности. Процесс флотации производится при помощи специальных флотореагентов, свойства и состав которых непосредственно влияют на протекание и результат процесса флотации. Подбор оптимального состава флотореагентов является важной задачей в практике флотации. В настоящее время подбор оптимального состава флотореагентов основан на эмпирических методах, характеризующихся высоким расходом реагентов и значительными временными затратами.

Вместе с тем известен метод [1], позволяющий определять флотационную активность аполярных флотореагентов по изменяющемуся изображению пузырька газа в исследуемой жидкости и на основе этого осуществлять подбор их оптимального состава. Однако существенным недостатком данного метода является использование выполняемых человеком операций, что не позволяет использовать метод для автоматического измерения поверхностного натяжения и оценки флотационной активности веществ и приводит к снижению точности измерений.

Автоматизация операций, заключающихся в расчете поверхностного натяжения вещества по изображению пузырька газа в жидкости с реагентом на основе принципов цифровой обработки изображений, позволила получать результаты измерений в реальном времени и создать оптико-электронную систему определения поверхностного натяжения жидкости и оценки флотационной активности веществ, которая может найти широкое применение в системах автоматизации и управления флотационными процессами в промышленности.

В основу принципов функционирования предлагаемой оптико-электронной системы (ОЭС) положен метод измерения поверхностного натяжения жидкости, заключающийся в формировании пузырька газа в ячейке с прозрачными плоскопараллельными стенками [2], получении изображения пузырька при помощи цифрового фотоаппарата, цифровой обработке изображения в ЭВМ, включающей медианную фильтрацию, бинаризацию и выделение контуров объектов изображения, обнаружение пузырька, сглаживание его контура, расчет поверхностного натяжения на основе анализа формы контура пузырька.

Формирование пузырька производится следующим образом. В ячейку с плоскопараллельными стенками наливают раствор аполярного флотореагента. Затем в раствор помещается конец загнутой вверх стеклянной трубки, из которой выдувается пузырек до заданного размера. Трубка с пузырьком перемещается до совмещения пузырька с оптической осью системы.

Получение и передача изображения в ЭВМ производится цифровым фотоаппаратом с объективом-микроскопом. После получения каждого кадра изображения ЭВМ производит его обработку. Первой операцией обработки изображения является медианная фильтрация [3], цель выполнения которой — удаление из изображения присутствующих на нем побочных объектов, таких как небольшие блики, капли реагента. Использование медианной фильтрации обусловлено тем, что она не вносит существенные искажения на границах областей изображения и не влияет на точность определения поверхностного натяжения.

Далее производится бинаризация изображения и выделение контуров объектов. Выбор порога бинаризации осуществляется на основе метода Отсу [4]. Выделение контуров объектов изображения осуществляется методом пространственного дифференцирования изображения с использованием оператора Собела.

Следующей операцией является обнаружение пузырька на изображении. После бинаризации изображение наряду с пузырьком содержит побочные объекты (капельки реагентов, затемненные участки, которые не были удалены в результате применения медианной фильтрации), как показано на рис. 1, где *а*) исходное изображение, *б*) бинаризованное изображение; 1 — пузырек газа, 2–8 — побочные объекты фона. Для исключения побочных объектов из дальнейшей обработки производят распознавание пузырька на основе его общих геометрических признаков.

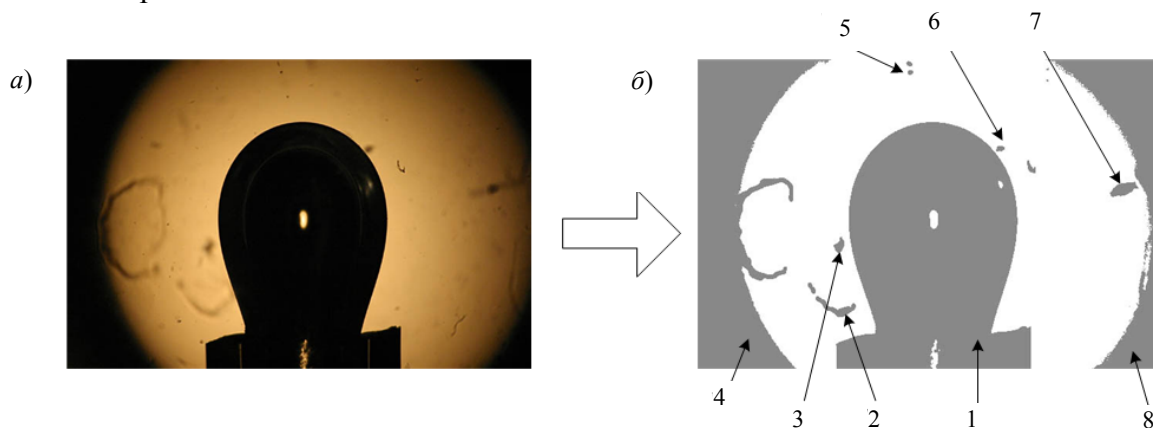


Рис. 1

Изображения пузырьков характеризуются следующими общими признаками: форма пузырьков в куполе совпадает с дугой окружности, пузырек центрирован на изображении и обладает осевой симметрией, пузырек имеет точку перегиба, диаметр сечения пузырька монотонно возрастает от вершины к экватору и монотонно убывает к точке крепления пузырька к капилляру. Из множества объектов изображения выбирается объект, соответствующий перечисленным общим свойствам пузырьков.

Для распознавания пузырька применяется метод, основанный на формировании вектора указанных геометрических параметров объектов и определении степени близости полученного вектора с эталонным вектором.

После распознавания пузырька на изображении производится сглаживание контура путем уточнения координат составляющих контур точек для более точного последующего измерения геометрических параметров пузырька, используемых при определении поверхностного натяжения. Контур на цифровом изображении представляет собой множество точек, описываемых целочисленными координатами. Операция сглаживания заключается в расчете вещественных (действительных) координат точек контура по координатам текущей корректируемой точки и точек в ее окрестности. После сглаживания контур, так же как и до сглаживания, представляется дискретной функцией, однако значения данной функции являются вещественными числами и с большей точностью описывают контур.

Рассмотрим операцию сглаживания контура. Пусть контур задан дискретной функцией, состоящей из множества координат (x_i, y_j) ($i=1, 2, \dots, L$, где L — количество точек контура). Для расчета координат точек сглаженного контура используют метод квадратичной интерполяции. Каждая пара координат точек контура (x_i, y_i) заменяется соответствующей парой (x_i^*, y_i^*) :

$$x_i^* = x_i^{\text{int}} \pm \varepsilon_x, \quad y_i^* = y_i^{\text{int}} \pm \varepsilon_y;$$

$$x_i^{\text{int}} = \sqrt{\frac{1}{2n+1} \sum_{j=0}^{2n+1} x_{i+j-n}^2}, \quad y_i^{\text{int}} = \sqrt{\frac{1}{2n+1} \sum_{j=0}^{2n+1} y_{i+j-n}^2};$$

$$\varepsilon_x = \frac{D}{2n+1} \frac{\sum (x_i - x_i^{\text{int}})^2}{2n+1}, \quad \varepsilon_y = \frac{D}{2n+1} \frac{\sum (y_i - y_i^{\text{int}})^2}{2n+1},$$

где x_i, y_i — исходные координаты точек контура; x_i^*, y_i^* — интерполированные (уточненные) значения координат точек контура; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ — поправки, причем для точек, лежащих правее оси симметрии пузырька, поправки берутся со знаком плюс, а для находящихся левее — со знаком минус; D — область интерполяции размером $(2n+1) \times (2n+1)$, $n = 4L/d$, d — ширина пузырька.

В результате контур задается сглаженной дискретной функцией, представленной множеством точек (x_i^*, y_i^*) .

После расчета координат контура пузырька непосредственно приступают к определению поверхностного натяжения по форме пузырька в соответствии с методом [5]. Форма пузырька описывается набором параметров S_i , равных отношению сечений d_i на заданных уровнях h_i к экваториальному диаметру d_e пузырька: $S_i = d_i/d_e$.

Уровни h_i определяются по формуле

$$H_i = K_i D_e, \quad K_i = 0.7, 0.75, \dots, 1.2.$$

После определения множества параметров S_i , характеризующих форму контура, производится расчет поверхностного натяжения пузырька. Поверхностное натяжение σ имеет вид [5]

$$\sigma = \frac{\delta g b^2}{\beta}, \quad [\Sigma], \text{ мДж/м}^2,$$

где δ — разность между плотностями граничащих фаз; g — ускорение свободного падения; b — радиус кривизны поверхности пузырька в вершине купола; β — параметр, вычисляемый по множеству параметров S_i .

Параметр β можно найти следующим образом. По таблицам зависимости $\beta(S)$ [6] определяется набор значений $\beta_{S_i} = \beta(S_i)$, после чего параметр β рассчитывается по формуле

$$\beta = \begin{cases} \min \{ \beta_{S_i} \}, & \text{если } \beta(S_i) \text{ — монотонна,} \\ \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \beta_{S_{i+j}}^2}, & \text{если } \beta(S_i) \text{ — немонотонна.} \end{cases}$$

Значение параметра b представим как

$$b = \frac{d_e^{[M]}}{2x_b} = \frac{d_e}{2ux_b},$$

где $d_e^{[M]}$ — значение экваториального диаметра в метрах; u — коэффициент пропорциональности; $[u]$, м/пиксель; x_b — параметр, зависящий от β .

Параметры β и x_b устанавливаются по специальным таблицам численного решения уравнения Лапласа [6, 7], в которых приведены зависимости $\beta(S)$ и $x_b(\beta)$.

Для определения коэффициента пропорциональности u получают изображение эталонного шарика известного размера, находят его размеры в пикселях и далее рассчитывают коэффициент пропорциональности

$$u = \frac{2d_{\text{ист}}}{(y_{\text{max}} - y_{\text{min}}) + (x_{\text{max}} - x_{\text{min}})},$$

где $d_{\text{ист}}$ — истинный размер шарика в метрах; x_{min} , x_{max} , y_{min} , y_{max} — координаты краев шарика на изображении в пикселях.

Рассмотренный метод определения поверхностного натяжения используется как самостоятельно, так и в составе метода оценки активности флотореагентов.

Метод оценки активности (пенообразователей) аполиарных флотореагентов [6] заключается в раздувании пузырька газа в жидкости, измерении в процессе самопроизвольного изменения формы пузырька (вследствие установления гидростатического равновесия) после его раздувания изменяющегося поверхностного натяжения в течение заданного интервала времени — получении релаксационной кривой и определении параметров релаксационной кривой, характеризующих активность компонент реагента.

Известно, что релаксационная кривая является суммой экспонент [2]

$$\Delta = D_1 \exp(B_1 t) + D_2 \exp(B_2 t) + D_3 \exp(B_3 t) + D_4 \exp(B_4 t) + \dots, \quad \Delta = \frac{\sigma_t - \sigma_p}{\sigma_t},$$

где σ_t — текущее значение поверхностного натяжения в момент времени t ; σ_p — равновесное значение поверхностного натяжения; $D_1 — D_4, \dots$ — параметры, характеризующие вклад отдельных групп поверхностно-активного вещества (ПАВ) в активную составляющую реагента; $B_1 — B_4, \dots$ — значения констант скорости миграции, содержащихся в реагенте отдельных групп ПАВ.

Числовые значения параметров B_i и D_i количественно характеризуют флотационную активность реагента, проявляющуюся в динамических условиях пенной флотации. Значения параметров B_i и D_i определяют на основе способа, изложенного в работе [2].

Оптико-электронная система, реализующая представленные методы расчета поверхностного натяжения и оценки флотационной активности флотореагента, состоит из приспособления для формирования пузырька 3, системы освещения пузырька 4, ЭВМ со специальным программным обеспечением и цифрового фотоаппарата 1 с оптическим микроскопом в качестве объектива 2 (рис. 2).

Оптико-электронная система работает следующим образом. Производится раздувание пузырька газа в жидкости с исследуемым реагентом, по изображению пузырька определяется поверхностное натяжение жидкости. В заданные моменты времени автоматически изображаются пузырьки, которые передаются в ЭВМ. После сохранения очередного изображения автоматически рассчитывается поверхностное натяжение жидкости по данному изображению. Получение изображений пузырька заканчивается, когда два значения поверхностного натяжения отличаются друг от друга на величину, менее заданной. Затем определяются параметры, характеризующие флотационную активность реагента.

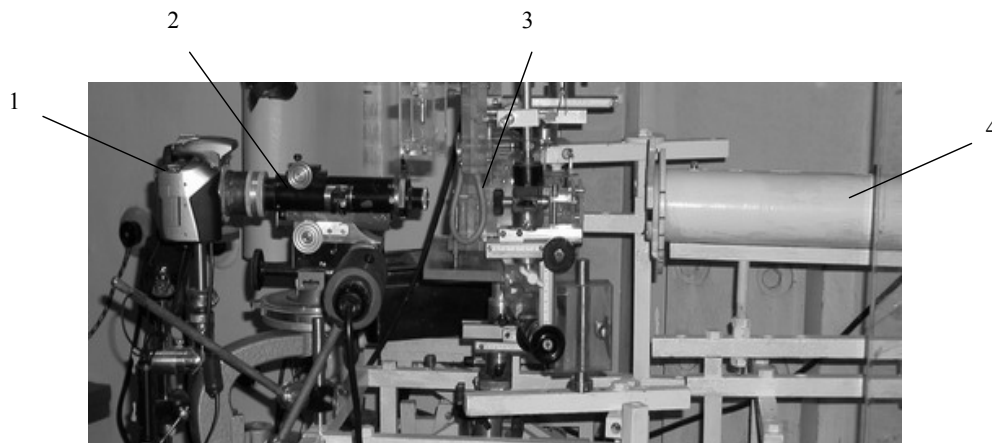


Рис. 2

Ниже приводятся экспериментальные данные исследований ОЭС, полученные при опыте с раствором, представляющим собой смесь реагента „Т-66“ [8] с 10 % ундекана концентрацией 1 г/л. На рис. 3 показаны экспериментально полученная релаксационная кривая 2 $\sigma(t)$, расчетная кривая 1 $\sigma'(t)$ и экспоненты расчетной кривой 3, 4 $\sigma'(t)$. В результате проведенных расчетов экспериментальная релаксационная кривая разложена на две экспоненты вида $D \cdot \exp(Bt)$ (см. рис. 3). По сумме двух экспонент восстановлена расчетная кривая, соответствующая исходному составу реагента

$$\Sigma'(T) = D_1 \exp(B_1 T) + D_2 \exp(B_2 T).$$

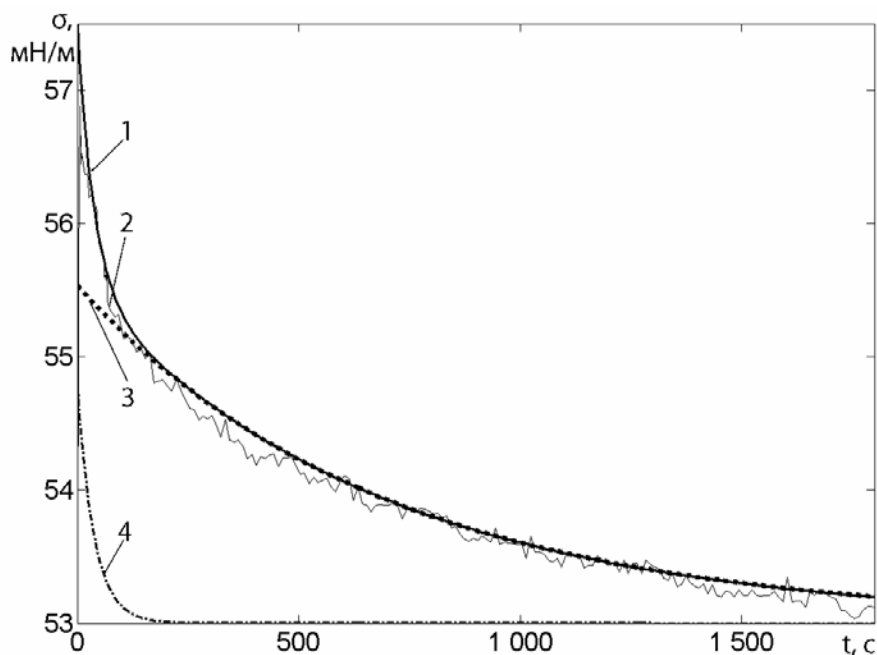


Рис. 3

Таким образом, для данного опыта установлено, что реагент состоит из двух компонентов, причем каждому соответствует экспонента, характеризующая его вклад в общую флотационную активность, что и подтверждает адекватность полученных результатов исходным данным эксперимента. При этом форма расчетной кривой совпадает с экспериментально по-

лученной, что также служит проверкой корректности произведенных расчетов. Из рис. 3 следует, что реагент 1 (кривая 1) вносит больший вклад в суммарную флотационную активность реагента.

По сравнению с комплексами аналогичного назначения ОЭС обеспечивает значительно большую (в сотни раз) скорость и высокую точность расчета поверхностного натяжения. Разработанная ОЭС позволяет определять флотационную активность реагентов, осуществлять подбор входящих в реагент компонент, управлять процессом флотации и может быть использована в промышленных и лабораторных условиях.

Работа выполнена при поддержке фонда „Научный потенциал“ (договор № 107, 2007 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелик-Гайказян В. И., Емельянова Н. П., Драганов А. В. К инструментальной оценке флотоактивности аполярных реагентов и их сочетаний с различными веществами, используемыми при пенной флотации // Обогащение руд. 1994. № 6.
2. Пат. № 2292033 РФ, МКИ G01N13/00. Способ оценки содержания аполярных флотореагентов в пульпе по цифровому изображению пузырька газа / М. И. Труфанов, Д. В. Титов, А. В. Драганов, В. И. Мелик-Гайказян, Н. П. Емельянова. № 2005108769/28; заявлено 2005.03.28; опубл. 2006.09.10.
3. Сойфер В. А. Методы компьютерной обработки изображений. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
4. Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1979. Vol. 9, N 1. P. 62—66.
5. Andreas J. M., Hauser E. A., Tucker W. B. Boundary tension by pendant drops. Cambridge, 1883.
6. Мелик-Гайказян В. И. Таблицы для определения поверхностного натяжения жидкостей, объема и площади криволинейной поверхности висячих капель (пузырьков) по их форме // Обогащение и использование угля. М.: Недра, 1970. С. 370.
7. Мелик-Гайказян В. И. Результаты численного решения уравнения Лапласа для фигур вращения с формами от $-0,0025$ до $-0,25$ // Изв. Томского политехнического института. 1965. № 13.
8. Справочник по обогащению руд. Основные процессы / Под ред. О. С. Богданова. 2-е издание, переработанное и дополненное. М.: Недра, 1983. 276 с.

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
01.09.07 г.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 528.711

А. А. Аль-Ядуми, С. В. Дегтярев, А. В. Медведев

Курский государственный технический университет

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассматривается возможность повышения помехоустойчивости интерференционного устройства для измерения малых угловых перемещений за счет применения цифрового согласованного фильтра.

Предъявляемые требования к точности измерений в некоторых отраслях промышленности, таких как строительство, тяжелое машиностроение, геодезия и др., в настоящее время могут быть достигнуты только благодаря применению интерференционных методов контроля. Существующие устройства не позволяют производить высокоточные измерения параметров интерференционной картины в автоматическом или, по крайней мере, в автоматизированном режиме с соответствующей точностью и в реальном масштабе времени, т. е. со скоростью вывода измерительной информации с приемника.

Сложность автоматической расшифровки интерферограмм и выделения измерительной информации связана с тем, что интерференционная картина помимо полезной информации содержит искажения и шумы, вносимые дестабилизирующими факторами — посторонними источниками излучения, вибрациями, турбулентностью атмосферы, запыленностью и т. д. Шумы так сильно влияют на работу интерференционных устройств измерения, что они могут дать ложный результат.

Для повышения помехоустойчивости в интерференционном устройстве для измерения малых угловых перемещений целесообразным является использование согласованных фильтров (СФ), поскольку они являются оптимальными фильтрами, выделяющими известный сигнал из смеси с белым гауссовым шумом при максимально возможном отношении сигнал/шум. Другими словами, пик выходного сигнала СФ будет более высоким по отношению к шуму при использовании согласованной фильтрации, чем на выходе любой другой линейной системы [3].

Мощность сигнала на выходе СФ в момент максимального пика равна его энергии $W = E_s$, мощность шума равна произведению дисперсии входного шума на энергию импульсной характеристики СФ $\sigma_{\text{вых}}^2 = \sigma^2 E$, а среднее квадратическое значение $\sigma_{\text{вых}} = \sigma \sqrt{E_s}$. Таким образом, отношение сигнал/шум на выходе СФ в момент максимального пика равно [1]

$$\rho = \frac{E_s}{\sigma \sqrt{E_s}}. \quad (1)$$

Поскольку числитель в формуле (1) представляет собой предельно достижимый отклик, ясно, что согласованная фильтрация обеспечивает максимально возможное отношение сигнал/шум на выходе системы.

Выполняя подобно аналоговым цепям операцию фильтрации, цифровые фильтры обладают высокой стабильностью параметров, возможностью получать самые разнообразные формы амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик, не требуют настройки и легко реализуются на ЭВМ программными методами [1].

Разработанное помехоустойчивое интерференционное устройство для измерения малых угловых перемещений (рис. 1) содержит интерференционный блок (ИБ), линейный фоточувствительный прибор с зарядовой связью (ЛФПЗС), блок индикации (БИ), синхрогенератор (С), два аналого-цифровых преобразователя (АЦП1 и АЦП2), два согласованных цифровых фильтра (СЦФ1 и СЦФ2), два цифровых компаратора (К1 и К2), два элемента задержки (Z1 и Z2), генератор (Г), счетчик (СТ), два триггера (Т1 и Т2), элемент ИЛИ, два элемента И (И1 и И2), элемент ИЛИ-НЕ.

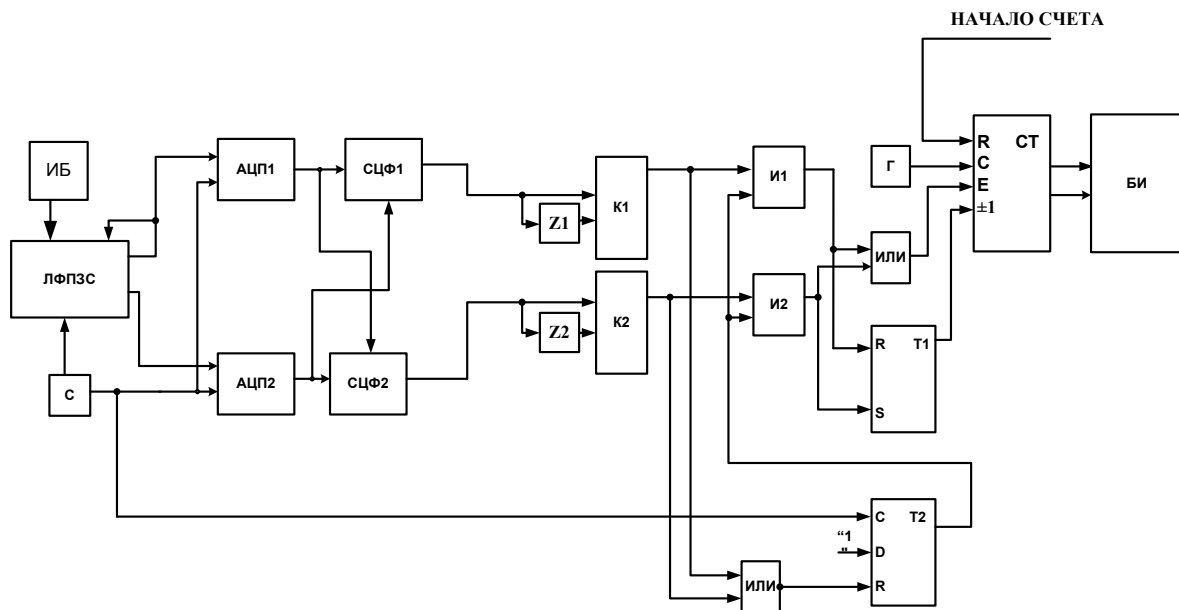


Рис. 1

Излучение от лазерного источника образует волновой фронт, из которого в плоскости анализа возникает интерференционная картина, имеющая вид чередующихся темных и светлых прямолинейных полос (интерференционные максимумы и минимумы), расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. При любом угловом смещении объекта интерференционные полосы будут линейно смещаться влево или вправо в зависимости от направления углового перемещения объекта. Итак, для определения углового смещения объекта необходимо сравнивать текущее положение полос в интерференционной картине с предыдущим.

Регистрация интерференционной картины осуществляется линейным фоточувствительным прибором с зарядовой связью ЛФПЗС, особенности построения которого позволяют использовать один из его транспортных регистров как линию задержки, что существенно упрощает устройство [2]. На первом выходе ЛФПЗС будет получен аналоговый сигнал (рис. 2, а), соответствующий проецируемой на фоточувствительную область картине, на втором выходе будет получен аналоговый сигнал (рис. 2, б), задержанный на время вывода одной строки t_{str} (рис. 2, ж). С помощью АЦП1 и АЦП2 осуществляется оцифровка полученных сигналов.

СЦФ1 и СЦФ2 позволяют получить две взаимокорреляционные функции, в которых уровень шума в несколько раз ниже уровня сигнала. Для получения взаимокорреляционной функции первого сигнала относительно второго первый оцифрованный сигнал подается на информационный вход СЦФ1, на управляющий вход которого подается второй оцифрованный сигнал для задания импульсной характеристики СЦФ1. Аналогичным образом с помощью СЦФ2 получим взаимокорреляционную функцию второго сигнала относительно первого, с той лишь разностью, что первый сигнал подается на управляющий вход СЦФ2, а второй — на информационный.

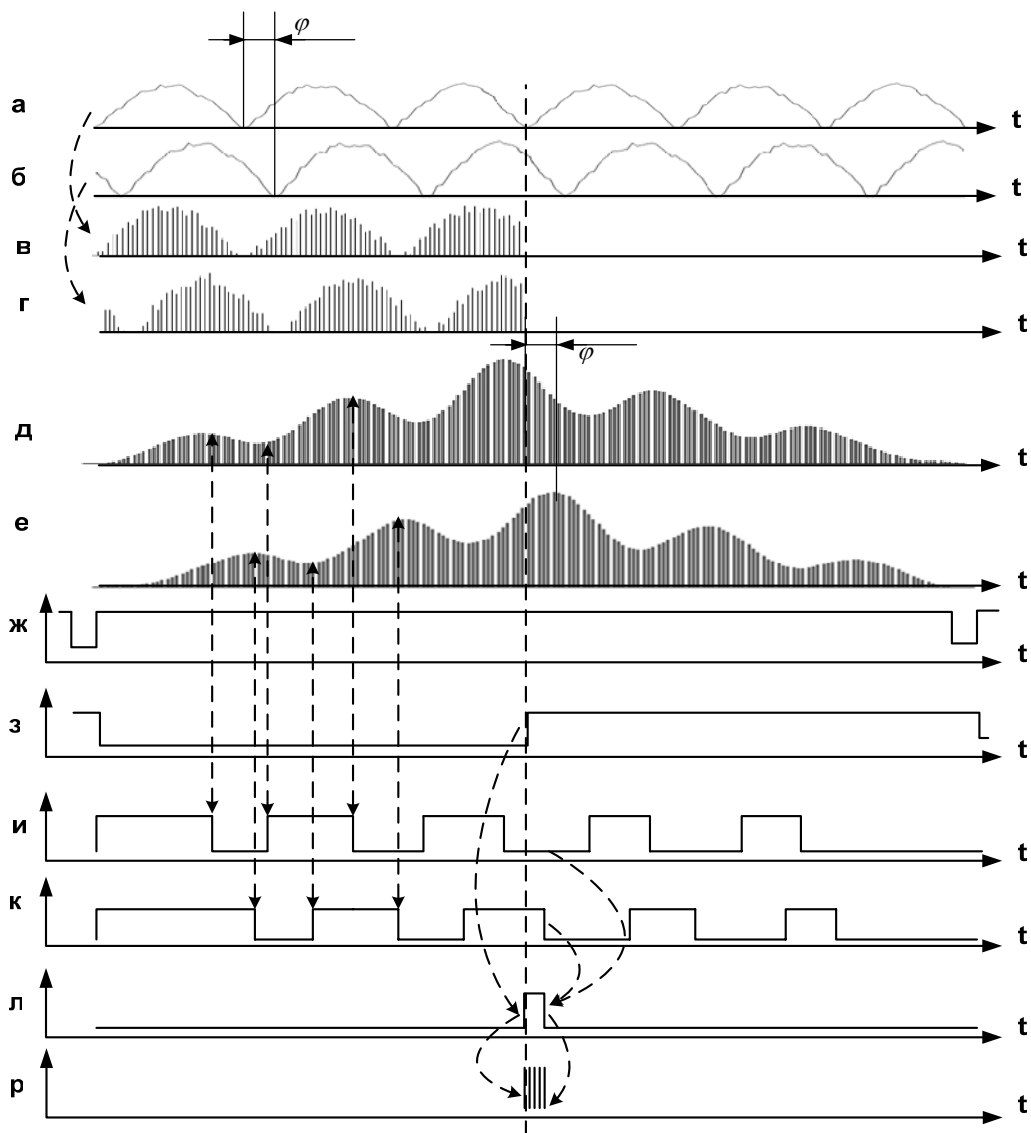


Рис. 2

В случае наличия разности фаз между сигналом на входе СЦФ и его импульсной характеристикой (т.е. при угловом перемещении объекта) центральный максимум сигнала на выходе СЦФ не будет совпадать с центром сигнала по времени, так как отклоняется от центра вправо или влево в зависимости от знака разности фаз, т. е. в зависимости от направления углового смещения наблюдаемого объекта.

Таким образом, на выходах СЦФ1 и СЦФ2 получим две взаимокорреляционные функции, центральные максимумы которых будут расположены симметрично относительно центра

входного сигнала по времени (см. рис. 2, *д*, *е*). Величина отклонения максимального пика от центра будет равна величине разности фаз сигналов, получаемых на выходах ЛФПЗС.

Цифровые компараторы $K1$ и $K2$ и элементы задержки $Z1$ и $Z2$ служат для регистрации возрастания или убывания взаимокорреляционной функции путем сравнения каждого ее отсчета с предыдущим (см. рис. 2, *и*, *к*).

Остальные элементы устройства служат для осуществления процесса подсчета разности фаз между исходными сигналами. Внешний сигнал НАЧАЛО СЧЕТА предназначен для сброса счетчика СТ в нулевое состояние и начала нового цикла измерения. Разрядность M счетчика СТ выбирается исходя из требуемых пределов измерения так, чтобы для предельных измеряемых значений углового перемещения объекта α_{\max} выполнялось равенство

$$\alpha_{\max} < 2^M - 1.$$

Старший разряд счетчика СТ используется в качестве знакового. Блок индикации БИ выполняется с возможностью определения по сигналу на старшем разряде счетчика СТ знака результата измерения и преобразования результата измерения, фиксируемого на счетчике в обратном коде, в индицируемое число в прямом коде.

Частота следования импульсов с выхода тактового генератора Γ выбирается такой, чтобы при смещении интерференционной картины на счетный вход счетчика СТ поступало число импульсов, соответствующее угловому смещению объекта в единицах измерения угловых величин (например, в угловых секундах).

Таким образом, разработанное устройство обеспечивает возможность автоматизированного измерения малых угловых перемещений. Простота устройства позволяет легко его реализовать аппаратно, а использование цифровых согласованных фильтров позволяет увеличить помехоустойчивость интерференционного устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. М.: Высш. школа, 2000.
2. Василевская Л. М., Костюков Е. В., Павлова З. В. Линейная фоточувствительная схема с зарядовой связью типа К1200ЦЛ2 // Электронная промышленность. 1982. Вып. 7. С. 10-12.
3. Smith S. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. San Diego, California, 1999.

И. Е. ЧЕРНЕЦКАЯ, Д. С. ПОТАПОВ

*Курский государственный технический университет***УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ АГЛОМЕРАТА МЕТОДОМ СВЧ**

Рассмотрены способ определения влажности потоков дисперсных слабопроводящих материалов, основные элементы структурной схемы их устройства и схема процесса определения влажности. Приведены функциональные графические зависимости, отображающие наиболее благоприятные условия измерения влажности дисперсных слабопроводящих материалов. Обоснована возможность применения устройства в системе автоматизированного контроля и управления сушкой агломерата.

Одним из важнейших качеств продукции в горно-металлургической промышленности является влажность. В зимний период массовая доля влаги в агломерате не должна превышать 3,0 %, в летний период — 8,5 %. Массовая доля влаги в готовом агломерате определяется его минералогическим составом. При одинаковых режимах сушки влажность изменяется от 0,8 до 5,0 %, причем наименьшее значение относится к сушке кристаллических руд, наибольшее — к переотложенным. Эффективное усреднение различных типов руд в карьере в минералогическом отношении технически выполнить невозможно, так же как и быстро оценить минералогический состав руды в потоке на фабрике. Регулировать массовое содержание влаги в агломерате возможно, лишь оперативно управляя режимами сушки, зная исходное содержание влаги.

СВЧ-влажномер, основанный на принципе поглощения радиоволн СВЧ-диапазона, предназначен для измерения влаги в диэлектрических и слабопроводящих материалах [1].

Схема устройства, реализующего способ измерения влажности дисперсных слабопроводящих материалов, приведена на рис. 1.

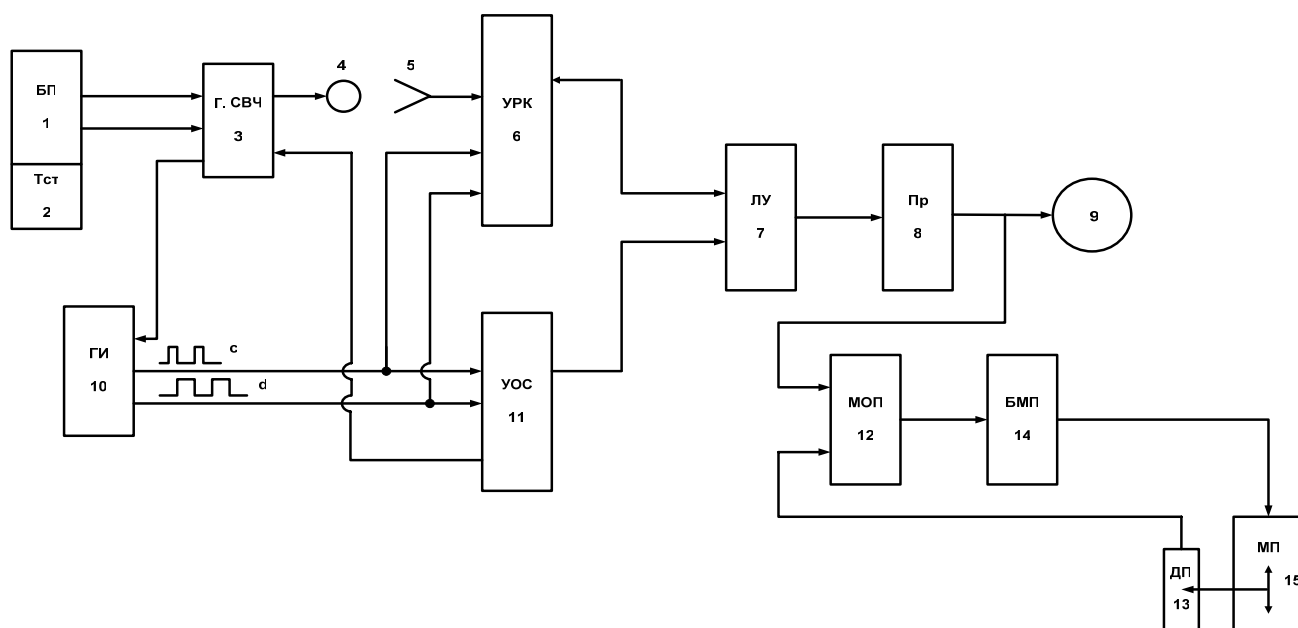


Рис. 1

В схему включены последовательно соединенные блок питания БП 1 и термостабилизации $T_{ст}$ 2 для подачи стабилизированного питания на СВЧ-генератор Г. СВЧ 3; передающую антенну 4; приемную антенну 5; усилитель рабочего канала УРК 6; генератор импульсов ГИ 10; усилитель опорного сигнала УОС 11; логарифмический усилитель ЛУ 7; преобразователь 8 „напряжение — ток“ Пр; устройство визуального контроля за изменением влажности материала 9; микропроцессор оптимального положения МОП 12; датчик положения ДП 13; микропроцессор оптимального положения МОП 12; блок механического перемещения БМП 14; механизм перемещения МП 15.

Схема устройства для определения влажности быстро движущихся потоков дисперсных слабопроводящих материалов на конвейерных лентах (как вариант устройства) представлена на рис. 2.

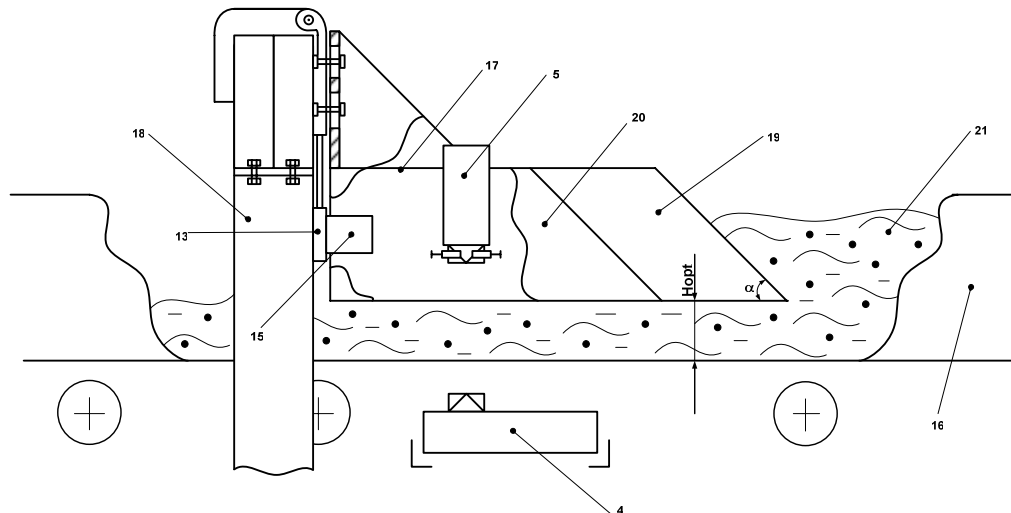


Рис. 2

Для формирования толщины слоя отработана конструкция пробформирующего устройства, обеспечивающая постоянство величины слоя и насыпной плотности агломерата в рабочей зоне измерения. Устройство содержит передающую антенну 4, установленную непосредственно под потоком слабопроводящего дисперсного материала, движущегося по конвейерной ленте 16, выполненной на основе резины. Приемная антенна 5 установлена в формирователе 17, который предназначен для регулирования потока дисперсного слабопроводящего материала заданной толщины. Формирователь 17 закреплен на раме 18 и содержит разравнивающий плуг 19 и две боковые предохранительные стенки 20, установленные вертикально и параллельно друг другу. Формирователь 17 посредством механизма перемещения 15 перемещается вверх или вниз вдоль рамы 18 параллельно ее вертикальной оси с последующей регистрацией положения формирователя 17 датчиком положения 13. Угол наклона α плоскости разравнивающего плуга 19 и боковые предохранительные стенки 20 обеспечивают выравнивание верхней поверхности и формирование потока дисперсного слабопроводящего движущегося материала 21 определенной толщины H без его уплотнения. Передающая и приемная антенны 4 и 5 герметично закрыты от влаги и пыли обтекателями (не показаны), выполнены из „прозрачного“ материала для волн СВЧ-диапазона, установлены соосно, причем продольные оси антенн устанавливаются перпендикулярно верхней поверхности движущегося материала 21, сформированной разравнивающим плугом 19.

Особенность устройства заключается в формирователе, обеспечивающем постоянные высоту слоя агломерата и насыпную плотность благодаря разравнивающему „плугу“, выполненному таким образом, что движущийся слой агломерата раздвигается в стороны без уплотнения массы, в свою очередь предохраняя приемную антенну от механических повреждений.

К недостатку конструкции пробформирующего устройства следует отнести износ плуга. Если между излучающей (на генераторном блоке) и приемной (на приемном блоке) антеннами разместить влажный материал толщиной d вдоль направления распространения СВЧ-излучения, то мощность излучения, попадающую в приемную антенну, можно представить в виде

$$P_{\text{прош}} = P_{\text{пад}} A \exp[-d(\beta + \alpha W)],$$

где $P_{\text{прош}}$, $P_{\text{пад}}$ — прошедшая и падающая мощность СВЧ-сигнала; A — параметр, определяемый геометрией измерительной системы, коэффициентами отражения СВЧ-сигнала в области между антеннами; d — толщина влажного материала; W — массовая доля влаги исследуемого материала; α — некоторый коэффициент пропорциональности; β — коэффициент затухания в сухом материале, зависящий от физических свойств вещества (плотность, проводимость, диэлектрические потери).

Логарифм отношения мощностей падающего и прошедшего СВЧ-сигнала пропорционален произведению влажности на толщину измеряемого слоя. Как уже отмечалось [2], массовая доля влаги зависит от плотности материала и его толщины. Если допустить, что насыпная плотность агломерата, движущегося на конвейере, при прочих равных условиях, изменяется незначительно, то в интегральном режиме измерения (при T_2) массовая доля влаги определяется в основном толщиной транспортируемого агломерата.

Следовательно, при измерении массовой доли влаги потока агломерата необходимо поддерживать постоянной толщину материала на конвейере.

Кроме выше перечисленных факторов, величина затухания прошедшей мощности определяется вещественным и гранулометрическим составом, температурой агломерата, конструктивными особенностями влагомера (в частности, расстоянием между антеннами).

Результаты измерения могут искажаться за счет дополнительного рассеяния волн СВЧ-сигнала на неоднородных кусках агломерата размером 5 мм и более, а также за счет неоднородности потока агломерата по влажности. При больших значениях измеряемой влажности, либо при большой толщине материала наблюдается регистрация малых мощностей прошедшей СВЧ-волны. Это также вносит погрешность в определение влажности.

Измерение массовой доли влаги потока агломерата производится следующим образом. Испытания проводятся на конвейерах ЛК 14а и ЛК 16, транспортирующих агломерат крупностью 10+0 мм из цеха сушки на догрузбункер или склад [3]. При движении конвейера без загрузки на блоке индикации устанавливается нулевое значение сигнала. Испытания проводятся при полной загрузке конвейера и формировании слоя агломерата определенной толщины в интегральном режиме измерений $T_2 = 1$ мин. Одновременно с измерением величины относительного поглощения СВЧ-волн оценивается влажность агломерата весовыми способами по ГОСТ 12764-73 (СЭВ 959-78). Для отбора представительной пробы движущейся по конвейеру массы формируется накопительная проба из суммы частных проб, отобранных через 5 с в течение 1 мин. Определяется вещественный гранулометрический состав, температура и толщина слоя агломерата. Измерение массовой доли влаги производится во всем диапазоне, определяемом возможностями технологии производства агломерата как в летний период времени, так и в сезон сушки. Определяется стандартная ошибка измерений, коэффициенты корреляции и детерминации измеряемых величин. Используя способ наименьших квадратов, с помощью ЭВМ можно найти уравнения связи величин выходного сигнала СВЧ-влагомера и массовой доли влаги. В зависимости от условий измерений можно выбирать необходимое время интегрирования. Прибор имеет два отчета времени: „мгновенное“ $T_1 = 1$ с и интегрированное $T_2 = 1$ мин.

Установлено, что отношение мощности падающих и прошедших электромагнитных волн СВЧ-диапазона через поток дисперсного материала определяется величиной диэлектрических потерь. Диэлектрическая проницаемость слабопроводящего слоя влажного дисперс-

ного материала определяется толщиной сформированного потока материала, его вещественным составом, электропроводностью, крупностью составляющих частиц, количеством свободной влаги и влаги, сорбированной частицами дисперсного материала. Экспериментальные зависимости $J_1=f_1(W)$ и $J_2=f_2(W)$ при влажности $W=const$, устанавливающие функциональную связь энергии поглощения P электромагнитных волн СВЧ-диапазона от толщины потока H слабопроводящих материалов (для удобства изменение энергии поглощения P_n , выражено величиной тока J измерительного прибора 9), представлены на рис. 3.

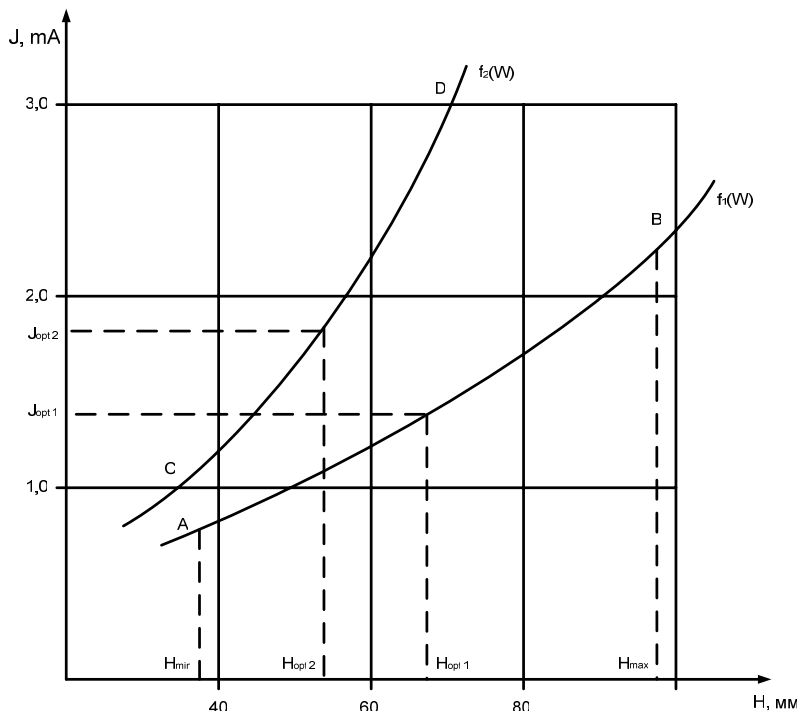


Рис. 3

Указанные графические зависимости имеют прямолинейные участки AB и CD , на которых соблюдаются условия постоянства величины градиента изменения энергии поглощения P_n волн СВЧ-диапазона ($grad P_n(H) = const$), т.е. изменение толщины потока влажного материала прямо пропорционально изменению величины энергии поглощения P_n . При уменьшении толщины потока материала (A и C) происходит рассеяние волн СВЧ-диапазона на поверхности дисперсных частиц материала и тем интенсивнее, чем больше крупность частиц слабопроводящего материала и меньше толщина потока. При значительной толщине потока материала (B и D) происходит искривление прямолинейной зависимости $J=f(W)$, определяемой насыщением блок-схемы устройства; для этих участков соблюдаются условия переменного градиента энергии поглощения P_n ($grad P_n(H)=var$). Экспериментально установлено, что наиболее благоприятные условия для измерения влажности дисперсных слабопроводящих материалов находятся в середине прямолинейных участков AB и CD графических зависимостей $J=f(W)$ при постоянных величинах градиента вторичного сигнала ($grad J(H)=const$). Например, для зависимости $f_1(W)$ оптимальным значением толщины потока влажного дисперсного слабопроводящего материала является величина H_{opt} , определяемая путем деления пополам линейного участка AB .

В условиях реального агломерационного производства контроль качества готового продукта, в частности влажности агломерата, осуществляют, как правило, в лабораторных условиях на предварительно отобранных и подготовленных образцах, что требует больших временных затрат и снижает оперативность в принятии управленческих решений.

Устройство измерения влажности агломерата методом СВЧ (СВЧ-влажомер) может быть использовано в системе автоматизированного контроля и управления сушкой агломерата (рис. 4).

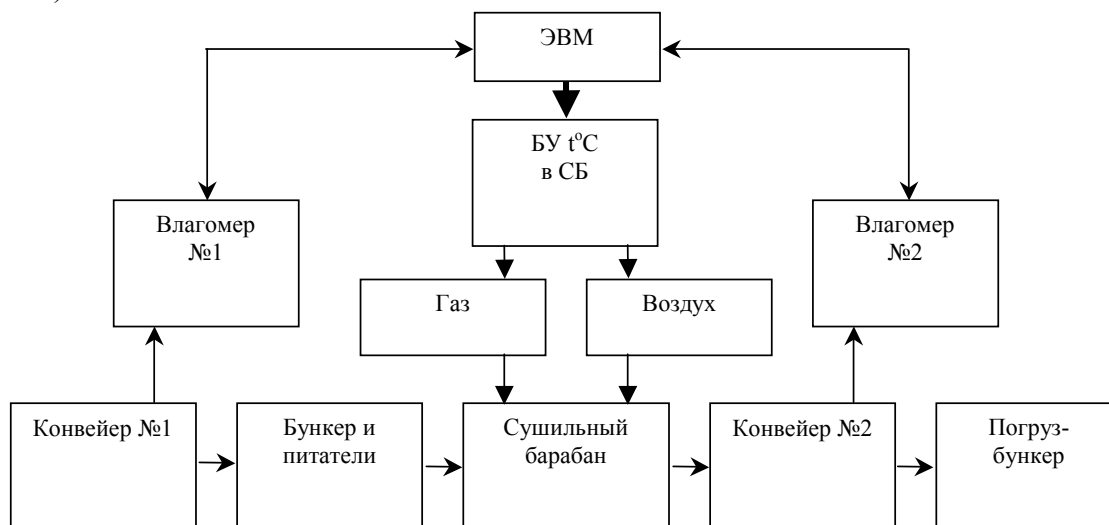


Рис. 4

Влажный сыпучий слабопроводящий материал (агломерат) подается при помощи конвейерной ленты № 1, на которой установлен СВЧ-влажомер № 1, снимающий показания о процентном содержании влаги, в бункер, откуда самотеком материал поступает на пластинчатые двухскоростные питатели, выполненные в виде своеобразного жесткого конвейера, и затем в сушильный барабан. Влажность материала не имеет постоянного процентного значения, и управлять температурным режимом в сушильном барабане с наименьшими временными затратами для более точного и качественного просушивания материала становится возможно при использовании данных, полученных от СВЧ-влажомера № 1. Информация о содержании влаги в материале передается в ЭВМ, где определяются и подаются в блок управления температурным режимом в сушильном барабане данные о подаче необходимого и достаточного объема составляющих топлива для достижения необходимой температуры. После прохождения сушильного барабана материал подается на конвейерную ленту № 2, посредством которой он попадает в погрузбункер, откуда производится дальнейшая транспортировка материала. На конвейерной ленте № 2 установлен СВЧ-влажомер № 2, снимающий показания о процентном содержании влаги в просушенном материале для коррекции или подтверждения выбранного температурного режима.

Применение СВЧ-влажомера в системе автоматизированного контроля и управления сушкой позволило сократить время и повысить точность определения влажности до $\pm 0,44\%$, обеспечить рациональный расход топлива, затрачиваемого на процесс сушки, и получить готовый продукт, соответствующий заданным показателям качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исматуллаев П. Р.* Сверхвысокочастотная влагометрия // Измерения, контроль, автоматизация. 1989. № 4 (72). С. 22—31.
2. *Кричевский Е. С.* Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов. М.: Энергия, 1980. 239 с.
3. *Кричевский Е. С., Волченко А. Г., Галушкин С. С.* Контроль влажности твердых и сыпучих материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 10—16.

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
01.09.07 г.

РЕФЕРАТЫ

УДК 681.327.12

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО КАДРИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ПОРТРЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ФОТОАППАРАТОВ / С. В. ДЕГТЯРЕВ, А. В. МЕДВЕДЕВ, С. Ю. МИРОШНИЧЕНКО // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 5—9.

Рассмотрен метод автоматического кадрирования цифровых портретных изображений с центрированием лица в плоскости кадра, предназначенный для встраивания в цифровые фотоаппараты. Метод основан на распознавании контуров глаз с использованием признаков, инвариантных к преобразованиям сдвига, поворота и масштабирования. Положение лица оценивается на основании взаимного положения глаз человека. Метод обеспечивает кадрирование портретного изображения при любом положении лица в плоскости кадра.

Ил. 3, библиогр. 8.

УДК 681.7.069.32

ВЕЙВЛЕТ-ОБРАБОТКА ИК-ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ДРЕЙФА ВОЛЬТОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ / Ю. С. БЕХТИН, Д. В. ТИТОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 10—15.

Рассматривается алгоритм вейвлет-обработки инфракрасных изображений, формируемых на выходе многорядных матричных фотоэлектронных модулей (ФЭМ) с геометрическим шумом чувствительности. Показано, что дрейф коэффициентов передачи фотоэлементов матрицы ФЭМ можно рассматривать как мультипликативный шум. Целью обработки является сегментация ИК-изображений после его текстурного анализа на уровне вейвлет-преобразования, чтобы в зависимости от типа сегмента применять различные алгоритмы оценивания вейвлет-коэффициентов. Приводятся результаты статистического моделирования, показывающие возможность увеличения интервалов между калибровками ФЭМ до нескольких часов.

Ил. 4, библиогр. 4.

УДК 6805.01:621.384

СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ РАДИАЛЬНОЙ ДИСТОРСИИ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ / Е. И. БУГАЕНКО, М. И. ТРУФАНОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 16—22.

Представлен способ определения параметров дисторсии по единственному кадру изображения, содержащему объекты с прямолинейными контурами. Способ предназначен для выполнения в автоматическом режиме без участия пользователя и без использования специально созданных шаблонов и основан на автоматическом выборе объектов на изображении, по которым определяется дисторсия, определении коэффициента радиальной дисторсии и последующем расчете истинных положений всех точек искаженного изображения. Способ может быть применен для коррекции дисторсии на изображениях, полученных видеодатчиками с неизвестными параметрами.

Ил. 2, библиогр. 4.

УДК 681.3

СОЗДАНИЕ РЕЛЬЕФНЫХ КАРТ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ ПО ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ / В. Я. ПАНЧЕНКО, А. В. ЕВСЕЕВ, В. С. МАЙОРОВ, С. В. КАМАЕВ, В. П. САВИНЫХ, А. П. МИХАЙЛОВ, М. В. ХОРОШЕВ, В. М. КУРКОВ, А. Б. ВЕЛЕЖЕВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 22—28.

Рельефные карты (трехмерные модели местности) являются весьма востребованными. В ряде случаев (стихийные бедствия, масштабные катастрофы, другие особые ситуации), когда необходимо быстро получить реальную картину (ведь место, где принимаются решения, как правило, далеко от фактического места события), существует настоятельная необходимость весьма оперативного изготовления таких макетов. В настоящей работе описываются разработанные и апробированные методика и технология оперативного создания таких рельефных карт, созданных в кооперации ИПЛИТ РАН с МИИГАиК.

Ил. 4.

УДК 681.3

АКСЕЛЕРАТОР ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ЗАДАЧ В КЛАСТЕРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ВЫСОКОЙ ГОТОВНОСТИ / Д. Б. БОРЗОВ, Б. И. АЛЬМАРАЯТ, А. П. ТИПИКИН // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 29—33.

Рассмотрена проблема размещения задач в кластерных системах, сформулирован метод планирования размещения задач в матрично-тороидальных блоках кластерных мультимикрокомпьютеров. Приведено описание акселератора, ориентированного на кластерные системы высокой готовности. Даны оценки эффективности и быстродействия предложенного метода и устройства.

Ил. 1, табл. 1, библиогр. 5.

УДК 681.3

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛИЗМА ВНУТРИ ЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ И ЕГО АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ / Д. Б. БОРЗОВ, С. А. ДЮБРЮКС, В. С. ТИТОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 34—38.

Предложен метод выявления параллелизма в линейных участках последовательных программ со связями по управлению, реализующий разбиение множества операторов задачи на независимые подмножества, а также аппаратная модель соответствующего устройства. Даны оценки эффективности и быстродействия предложенного метода и устройства.

Ил. 3, библиогр. 4.

УДК 681.3.00+681.326

АППАРАТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО ЧИСЛА БЛОКОВ ПРИ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ / Э. И. ВАТУТИН, И. В. ЗОТОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 39—43.

Рассматривается задача поиска субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов, возникающая при проектировании систем логического управления. Предлагается аппаратная модель для определения минимально возможного числа блоков разбиения при декомпозиции алгоритма параллельно-последовательным методом с учетом заданных ограничений на их сложность. Обсуждается организация основных блоков устройства (акселератора) на ее основе. Даются результаты оценки его быстродействия.

Ил. 3, табл. 2, библиогр. 6.

УДК 681.3

СТРАТЕГИИ БЫСТРЫХ СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ИСЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ / В. М. ДОВГАЛЬ, В. С. ТИТОВ, Е. А. ТИТЕНКО // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 44—47.

Анализируются недостатки известных стратегий выводов исчислительных систем. Установлено, основным сдерживающим фактором известных стратегий в задачах большой размерности или при наличии жестких временных ограничений является неизвестность размера конфликтного множества и принципиальная неустранимость процесса выбора приоритетных правил. Показано, что применение алгоритмических представительных систем порождает временную избыточность вследствие переборного с возвратами характера генерации ветвящегося пространства решений. Сущность предлагаемого подхода заключается в разработке набора комплементарных стратегий параллельных выводов (И-, ИЛИ-, И-ИЛИ-стратегии и др.) с неединичным множеством равноправных исполнителей над локальными копиями обрабатываемым данным. Работа параллельных стратегий основана на исчислительных законах преобразования информации в многомерном пространстве времени, частным случаем которых будут алгоритмические законы.

Ил. 1, библиогр. 5.

УДК 680.5.01:621.384

ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БИНОКУЛЯРНОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОТКЛОНЕНИЙ ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА / В. Н. ГРИДИН, В. С. ТИТОВ, М. И. ТРУФАНОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 48—53.

Представлены принципы функционирования оптико-электронного устройства для измерения параметров движения зрачков глаз человека, предназначенного для выявления заболеваний различного характера, связанных с отклонениями бинокулярного зрения, в частности, косоглазия. Функционирование устройства основано на получении изображений глаз человека бинокулярной оптико-электронной системой, обнаружении на изображениях зрачков глаз, определении их трехмерных координат, измерении направлений взгляда каждого глаза и выявлении косоглазия на основе анализа саккадических движений зрачков.

Ил. 4, библиогр. 6.

УДК 680.5.01:621.384, 616-072.1

УСТРОЙСТВО ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ЭНДОСКОПИИ / А. Н. СТРЕЛКОВА, А. А. СТЕПЧЕНКО // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 54—58.

Представлено устройство повышения качества эндоскопических изображений при анализе желудка. Устройство обеспечивает путем цифровой обработки изображений в реальном времени коррекцию яркостных искажений, вызванных отражением источника света от слизистой оболочки, и коррекцию дисторсии оптической системы эндоскопа после получения изображения без изменения конструкции оптической системы путем цифровой обработки изображений. Применение устройства в клинической практике позволит повысить точность выявления патологических изменений и правильность постановки диагноза, что будет способствовать оптимизации терапии, улучшению прогноза заболевания, сокращению сроков лечения, уменьшению экономических затрат.

Ил. 3, библиогр. 3.

УДК 680.5.01:621.384, 622.765

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ И ОЦЕНКИ ФЛОТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ВЕЩЕСТВ / М. И. ТРУФАНОВ, П. С. КОЗЛОВ, В. И. МЕЛИК-ГАЙКАЗЯН // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 59—64.

Представлена оптико-электронная система измерения поверхностного натяжения жидкостей и оценки флотационной активности веществ по изображению пузырька воздуха в исследуемой жидкости. Принципиальным отличием созданной оптико-электронной системы является автоматическое измерение поверхностного натяжения жидкости в реальном масштабе времени и оценка флотационной активности реагента при небольших объемах реагента. Приведены результаты экспериментальных исследований оптико-электронной системы.

Ил. 3, библиогр. 8.

УДК 528.711

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ / А. А. АЛЬ-ЯДУМИ, С. В. ДЕГТЯРЕВ, А. В. МЕДВЕДЕВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 65—68.

Представлено помехоустойчивое интерференционное устройство для измерения малых угловых перемещений. Работа устройства основана на применении двух цифровых согласованных фильтров для обеспечения помехоустойчивости. Согласованная фильтрация является оптимальным методом обнаружения сигнала известной формы в случайном шуме.

Разность фазы сигналов, поступающих на вход цифровых согласованных фильтров, влияет на положение максимального пика взаимокорреляционной функции относительно центра сигнала. Величина отклонения максимального пика будет равна величине разности фаз между сигналом на входе согласованного фильтра и его импульсной характеристикой.

Ил. 2, библиогр. 3.

УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ АГЛОМЕРАТА МЕТОДОМ СВЧ / И. Е. ЧЕРНЕЦКАЯ, Д. С. ПОТАПОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 69—73.

Предложен способ и устройство измерения влажности в движущемся потоке дисперсных слабопроводящих материалов, позволяющие оперативно определять влажность агломерата и получать готовую продукцию с заданными параметрами качества. Рассмотрены основные блоки устройства, предложена конструкция формователя слоя материала, поддерживающего постоянной толщину агломерата на конвейере. Приведены результаты экспериментального исследования работы СВЧ-влажномера в виде графических зависимостей. Обоснована возможность применения СВЧ-влажномера в системе автоматизированного контроля и управления. Применение СВЧ-влажномера в системе автоматизированного контроля и управления сушкой позволило сократить время и повысить точность определения влажности агломерата до $\pm 0,44$ %, обеспечить рациональный расход топлива, затрачиваемого на процесс сушки, и получить готовый продукт, соответствующий заданным показателям качества.

Ил. 4, библиогр. 3.