

ТАБАСИ СЕЙЕД ХАШЕМ

**АДАПТИВНЫЙ ВИДЕОДАТЧИК НА БАЗЕ КМОП ПРИЕМНИКА
ИЗЛУЧЕНИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКОЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск - 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет» на кафедре вычислительной техники в совместной научно-исследовательской лаборатории Центра информационных технологий в проектировании РАН и Курского государственного технического университета «Информационные распознающие телекоммуникационные интеллектуальные системы».

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Титов В. С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бурмака А.А.

кандидат технических наук, доцент
Жмакин А.П.

Ведущая организация: Воронежский государственный
технический университет

Защита диссертации состоится «28» апреля 2009 г. в 16 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.105.02 при Курском государственном техническом университете по адресу: 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Курского государственного технического университета.

Автореферат разослан «27» марта 2009 г.

Размещен на сайте www.kstu.kursk.ru «27» марта 2009 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94, КурскГТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д212.105.02

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент

_____ Е.А. Титенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время видеодатчики на базе КМОП приемников излучения (ПИ) применяются в различных отраслях науки, техники и промышленности: в системах управления технологическими процессами, в биомедицинских системах, системах наблюдения, охраны и безопасности, видеокамерах, фотоаппаратах, мобильных телефонах и т.д. В таких видеодатчиках имеется возможность предварительной обработки визуальной информации в процессе ее восприятия за счет объединения в пределах одного кристалла фотоприемника, устройств развертки, квантования и модулей, реализующих процедуры обработки изображения.

Наиболее распространенными процедурами обработки изображений, получаемых с видеодатчиков на базе КМОП ПИ, реализуемыми непосредственно на кристалле видеодатчика, являются процедуры преобразования изображения в цифровой формат, уменьшения шумов, компенсации эффекта размытости изображения. В системах технического зрения, построенных на основе современных видеодатчиков на базе КМОП ПИ, такие важные операции как пространственная фильтрация, интерполяция, сжатие, распознавание изображений выполняются с использованием внешних специализированных устройств обработки, что снижает быстродействие таких систем и не позволяет вести предварительную обработку изображения непосредственно в процессе его получения. Кроме того, широко используемая в современных видеодатчиках операция интерполяции изображения, при которой выполняется масштабирование (увеличение) изображения, не позволяет получать четкое изображение, поскольку используемые методы линейной, билинейной и бикубической интерполяции снижают качество изображения, что в зависимости от используемого метода и типа обрабатываемого изображения проявляется в виде блочного дефекта или снижения резкости, и вызывает необходимость разработки алгоритмов интерполяции, учитывающих особенности обрабатываемых изображений.

Поскольку априорная неопределенность условий функционирования видеодатчиков вызывает необходимость использования адаптивных алгоритмов обработки изображения, а в большинстве современных видеодатчиков на базе КМОП ПИ происходит только формирование матрицы яркостей изображения, тогда как фильтрация и интерполяция выполняются в отдельных устройствах, то аппаратная реализация адаптивных алгоритмов обработки изображения непосредственно на кристалле видеодатчика с использованием параллельных структур позволит значительно ускорить процесс обработки изображения и обеспечит расширение функциональных возможностей видеодатчика.

Таким образом, **актуальной научно-технической задачей** является расширение функциональных возможностей и повышение быстродействия видеодатчиков на базе КМОП ПИ за счет аппаратной реализации алгоритмов предварительной обработки изображений.

Работа выполнялась в рамках плана НИР Курского государственного технического университета по единому заказ-наряду Министерства образования РФ в 2006-2008 годах.

Цель диссертации: разработка теоретических и реализационных основ создания видеодатчиков на базе КМОП приемников излучения с возможностью

интерполяции изображений и адаптацией к изменению параметров яркости рабочей сцены на основе фильтрации в режиме реального времени.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи:

1. Сравнительный анализ современных видеодатчиков на базе КМОП приемников излучения и методов обработки изображений, используемых в них.
2. Разработка математической модели адаптивного видеодатчика на базе КМОП приемника излучения с предварительной обработкой изображений.
3. Создание аппаратно-ориентированного алгоритма пространственной фильтрации и быстрого алгоритма адаптивной интерполяции изображения.
4. Разработка структуры и принципов функционирования адаптивного видеодатчика на базе КМОП приемника излучения.

Новыми научными результатами и положениями, выносимыми на защиту, являются:

1. Математическая модель адаптивного видеодатчика с предварительной обработкой изображений, особенностью которой является учет параметров, влияющих на адаптацию к изменению рабочей сцены.
2. Алгоритм адаптивной интерполяции изображения, основанный на выборе метода линейной, билинейной или бикубической интерполяции на основе анализа перепадов яркостей пикселей изображения, и позволяющий тем самым сократить время обработки изображения по сравнению с бикубической интерполяцией.
3. Структурно-функциональная организация адаптивного видеодатчика с предварительной обработкой изображений, обеспечивающего выполнение операции пространственной фильтрации изображения фильтрами с маской 3×3 и операции масштабирования изображений, отличающаяся введением схемы фильтрации, блока вычислений и использованием аппаратно-ориентированного алгоритма фильтрации изображения скользящим окном и конвейерно-параллельной организацией вычислений.

Объект исследований – системы технического зрения на основе видеодатчиков с КМОП приемниками излучения.

Предмет исследований – методы, алгоритмы и устройства предварительной обработки изображений в видеодатчиках на базе КМОП приемников излучения.

Методы исследования. В работе использованы методы цифровой обработки сигналов и изображений, математического моделирования, теории: параллельных вычислений, алгоритмов, проектирования ЭВМ.

Практическая ценность работы состоит в том, что ее результаты являются основой для разработки широко класса систем технического зрения с использованием видеодатчиков на базе КМОП ПИ, позволяющих обеспечить предварительную обработку изображения и адаптацию устройства к изменяющейся внешней освещенности в процессе формирования изображения, и могут использоваться при создании различных адаптивных видеодатчиков для систем технического зрения мобильных роботов, автоматизированных систем охраны и наблюдения, систем биометрического контроля, бытовых фото- и видеокамер, фото- и видеокамер мобильных телефонов.

Реализация и внедрение. Результаты, полученные в диссертационной работе, использовались в технологическом процессе в ЗАО ЛВЗ «Курский», а

также используются в учебном процессе в Курском государственном техническом университете в рамках дисциплин «Цифровая обработка и анализ изображений», «Современные проблемы науки и производства», что подтверждается соответствующими актами.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на международных и российских конференциях: VIII Международной конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание – 2008» (г. Курск, 2008г.); научно-технической конференции «Материалы и упрочняющие технологии – 2008» (г. Курск, 2008г.); VI Международной научно-технической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» (г. Курск, 2008г.); XXXV межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов в области научных исследований «Молодежь и XXI век» (г. Курск, 2007г.); а также на научно-технических семинарах кафедры «Вычислительная техника» Курского государственного технического университета и семинарах кафедры «Mathematics and Computer Science» Damghan University of Basic Sciences (г. Дамган, Иран) с 2006 по 2009 гг.

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 8 печатных работах. Среди них 2 статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень журналов и изданий, рекомендуемых ВАК.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателем предложены: в [1-2] – алгоритм работы адаптивного видеодатчика интерполяции, общая структура видеодатчика, в [3] – алгоритм анализа яркостей пикселей изображения для определения используемого метода интерполяции, в [7] – структура видеодатчика с блоком предварительной обработки, [4-6, 8] – основные принципы функционирования и использования адаптивного видеодатчика.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа содержит 115 страниц основного текста, в том числе 35 рисунков, 10 таблиц, список использованных источников из 78 наименований и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведен сравнительный анализ современных видеодатчиков на базе КМОП приемников излучения, выпускаемых фирмами Kodak, Micron, ZMD AG, OmniVision и др., а также методов обработки изображений, используемых в них. Показано, что в таких видеодатчиках имеется возможность осуществления предварительной обработки визуальной информации в процессе ее получения за счет объединения в пределах одной микросхемы матричного фотоприемника, устройств развертки, квантования и модулей, реализующих процедуры предварительной обработки изображения. Сделан вывод о том, что введение в кристалл параллельных структур позволит расширить функциональность системы и увеличить быстродействие видеодатчика, а также

адаптивная обработка информации, полученной с КМОП приемника излучения, дает возможность гибко изменять параметры приемника излучения с целью получения лучшего качества изображения. В качестве операций по обработке изображения, реализуемых непосредственно на кристалле видеодатчика, выбраны операции пространственной фильтрации фильтрами с маской 3×3 и интерполяции, как наиболее часто используемые на практике.

Во второй главе разработана модифицированная математическая модель адаптивного видеодатчика (АВ) на базе КМОП приемника излучения, позволяющая получить распределение значений яркости цифрового изображения в зависимости от яркости объектов рабочей сцены L_{obj} .

Математическая модель АВ основана на известной математической модели адаптивного видеодатчика с пространственно-временной фильтрацией и отличается введением модели обработки сигнала изображения. Также составляющими математической модели АВ являются математическая модель рабочей сцены F_{PC} , математическая модель КМОП ПИ $F_{ПИ}$, математическая модель аналого-цифрового преобразования сигнала $F_{АЦП}$ и математическая модель обработки сигнала изображения F_O :

$$F_{AB} = \{F_{PC}, F_{ПИ}, F_{АЦП}, F_O\}, \quad (1)$$

$$F_{AB} = F_O \left(F_{АЦП} \left(F_{ПИ} \left(F_{PC} (L_{obj}(x_1, x_2)) \right) \right) \right). \quad (2)$$

Математическая модель рабочей сцены записывается в виде

$$F_{PC} = E_{img} = \tau_c \cdot \tau_{onm} \cdot L_{obj}(x_1, x_2) \cdot \pi \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{f}{D} (1 - m) \right)^2}, \quad x_1 \in [0, X_1], \quad x_2 \in [0, X_2], \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, l}, \quad (3)$$

где E_{img} - освещенность изображения, τ_c - показатель преломления среды; τ_{onm} - коэффициент пропускания оптической системы; $L_{obj}(x_1, x_2)$ - функция яркости объектов рабочей сцены; f - фокусное расстояние объектива; D - диаметр входного зрачка; $m = 1 - \frac{s_{img}}{f} < 0$ - коэффициент увеличения линзы; s_{img} - расстояние от входного зрачка до изображения; X_1 и X_2 - горизонтальные и вертикальные размеры выбранной плоскости проекции, в которой введена система координат $0x_1x_2$; m и l - горизонтальные и вертикальные размеры целочисленной решетки, наложенной на всю область $X_1 \times X_2$ или на некоторую ее подобласть.

Математическая модель КМОП ПИ позволяет определить зависимость величины сигнала на выходе приемника излучения $u(i_s, t)$ от освещенности изображения и имеет вид

$$u(i_s, t) = F_{ПИ} (E_{img}), \quad (4)$$

где i_s - ток, возникающий вследствие поглощения потока фотонов фотоэлементом пикселя КМОП ПИ в течение времени t .

Математическая модель ПИ запишется как:

$$F_{ПИ} = u(i_s, t) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l w_{ij} \cdot g_{ij} (Q_{ij}(i_s) + Q_N) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l w_{ij} \cdot x_{ij}, \quad (5)$$

$$Q_{ij}(i_s) = \begin{cases} (i_s \cdot t), & 0 < i_s < \frac{Q_{max}}{t}, \\ Q_{max}, & i_s \geq \frac{Q_{max}}{t}; \end{cases} \quad (6)$$

где w_{ij} - внутрипиксельный коэффициент усиления (ВКУ) КМОП ПИ, g_{ij} - коэффициент передачи КМОП ПИ с активными пикселями; $Q_{ij}(i_s)$ - заряд, накопленный на фотодиоде вследствие протекания тока $i_s = i_{ph}(E_{img}) + i_{dc}$; $i_{ph}(E_{img})$ - фототок, образованный под воздействием освещенности E_{img} ; i_{dc} - темновой ток фотодиода; Q_N - общая величина заряда шума КМОП ПИ (включающая заряд дробового шума, заряд теплового шума, заряд шума фиксированной разводки), x_{ij} - выходной сигнал пикселя КМОП ПИ, содержащий полезный сигнал и шум. Данная модель позволяет учесть внутрипиксельный коэффициент усиления, а также суммарное значение шумовой составляющей сигнала.

В результате аналогово-цифрового преобразования получается описание цифрового изображения $Y(i, j)$ в виде функции яркости объектов рабочей сцены L_{obj} . Математическая модель аналого-цифрового преобразования элемента изображения записывается следующим образом:

$$F_{АЦП} = Y(i, j) = [k_{АЦП} u_{(j+li)\Delta t} + \Delta_{ja}], \quad (7)$$

где $[]$ - операция определения наибольшего целого числа; $u_{(j+li)\Delta t}$ - дискретный аналоговый сигнал с КМОП ПИ; Δt - шаг квантования; $k_{АЦП}$ - коэффициент передачи АЦП; Δ_{ja} - погрешность преобразования АЦП, представляющая смещение характеристики преобразования по j -му сигналу. Изменение коэффициента передачи АЦП $k_{АЦП}$ позволяет изменять диапазон выходного сигнала.

Таким образом:

$$Y(i, j) = [k_{АЦП} \cdot (w_{ij} \cdot g_{ij} (Q_{ij}(i_s) + Q_N))_{(j+li)\Delta t} + \Delta_{ja}]. \quad (8)$$

На выходе КМОП ПИ получаем матричное описание изображения в виде

$$Y(i, j) = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & \dots & y_{1l} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & \dots & y_{2l} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & \dots & y_{3l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{m1} & y_{m2} & y_{m3} & \dots & y_{ml} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Математическая модель обработки сигнала изображения зависит от используемых операций обработки. Операция фильтрации и разработанная процедура интерполяции, в общем случае, входят в класс процедур обработки изображения скользящим окном. Таким образом, математическая модель обработки сигнала изображения в общем случае представляется в виде:

$$F(i, j) = C[y(i - n_1, j - n_2), (0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq l, 0 \leq n_1 \leq m, 0 \leq n_2 \leq l)], \quad (10)$$

где $F(i,j)$ – представляет описание выходного изображения, C – оператор преобразования. Так для операции фильтрации множество выходных значений результирующего изображения запишется в виде:

$$F(i,j) = \frac{1}{H} \sum_{n_1} \sum_{n_2} h(i,j;n_1,n_2) \cdot y(i-n_1,j-n_2), 0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq l, 0 \leq n_1 \leq m, 0 \leq n_2 \leq l \quad (11)$$

где $h(i,j;n_1,n_2)$ - коэффициенты фильтра, зависящие от значений яркости входного изображения.

Общую математическую модель АВ запишем в виде:

$$F_{AB} = \left\{ \begin{array}{l} E_{img} = \tau_c \cdot \tau_{onm} \cdot L_{obj}(x_1, x_2) \cdot \pi \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{f}{D} (1-m) \right)^2}, \quad x_1 \in [0, X_1], \quad x_2 \in [0, X_2], \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, l}; \\ u(i_s, t) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l w_{ij} \cdot g_{ij}(Q_{ij}(i_s) + Q_N) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l w_{ij} \cdot x_{ij}, \\ i_s = i_{ph}(E_{img}) + i_{dc}, \quad Q_{ij}(i_s) = \begin{cases} (i_s \cdot t), & 0 < i_s < \frac{Q_{max}}{t}, \\ Q_{max}, & i_s \geq \frac{Q_{max}}{t}; \end{cases} \\ Y(i,j) = [k_{АЦП} \cdot (w_{ij} \cdot g_{ij}(Q_{ij}(i_s) + Q_N))_{(j+li)\Delta t} + \Delta_{ja}], \\ F(i,j) = C[y(i-n_1, j-n_2), (0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq l, 0 \leq n_1 \leq m, 0 \leq n_2 \leq l)] \end{array} \right\}. \quad (12)$$

Изменяя параметры фильтрации $h(i,j;n_1,n_2)$ можно увеличивать или уменьшать значения яркостей выходного изображения $F(i,j)$ и так выполнять адаптивную подстройку выходного сигнала видеодатчика к изменяющимся параметрам рабочей сцены (уменьшать яркость сильно освещенных фрагментов сцены и увеличивать яркость затемненных участков), выполнять выделение контуров на изображении и пороговую обработку.

Таким образом, математическая модель адаптивного видеодатчика отличается введением модели обработки сигнала, и позволяет учесть параметры обработки изображения для адаптации видеодатчика к изменению рабочей сцены.

В третьей главе рассмотрены алгоритм адаптивной интерполяции изображения и алгоритм фильтрации изображения. Представлены результаты моделирования разработанных алгоритмов. Разработаны схема для реализации алгоритма фильтрации в видеодатчике.

Широко используемые методы билинейной, бикубической и интерполяции методом ближайшего соседа ухудшают изображение наличием блочного дефекта или снижают резкость изображения, из-за чего теряется граница между объектами. В связи с этим, алгоритм адаптивной интерполяции должен с одной стороны сохранять четкие границы на изображении, а с другой – не допускать возникновения дефектов. Для выполнения интерполяции предложен алгоритм, основанный на комбинации известных алгоритмов билинейной, бикубической и интерполяции методом ближайшего соседа, использующий информацию о расположении однородных областей на изображении. При определении границы областей учитывается тот факт, что область может быть одного цвета, но иметь различные участки интенсивности. Таким образом, к границе относится не только область цветового перехода (например, красный - синий), но и область яркостного

перепада (например, с интенсивности 0 до 255) в рамках одной цветовой плоскости.

Выделение однородных областей на изображении выполняется следующим образом. Первоначально на изображении производится выделение контуров для нахождения однородных областей изображения. В соответствии с заданным коэффициентом масштабирования эти области увеличиваются. Для каждой увеличенной области значения яркостей для новых пикселей рассчитываются на основе значений яркостей пикселей, входящих в эту область на исходном изображении. Новые пиксели добавляются в области, что вызывает увеличение площади области, тогда как граница между областями увеличивается только в длину. Таким образом, площади областей растут пропорционально коэффициенту масштабирования, а ширина границы не меняется, что позволяет избежать эффекта утолщения и размытия границы.

Обработка изображения для выделения перепадов яркостей по каждой цветовой компоненте выполняется следующим образом:

$$\begin{aligned} GR(i, j) &= \sqrt{s_1 R(i, j)^2 + s_2 R(i, j)^2} \\ GG(i, j) &= \sqrt{s_1 G(i, j)^2 + s_2 G(i, j)^2}, \\ GB(i, j) &= \sqrt{s_1 B(i, j)^2 + s_2 B(i, j)^2} \end{aligned} \quad (13)$$

где $GR(i, j)$, $GG(i, j)$, $GB(i, j)$ – значения градиента по каждой из цветовых плоскостей для пикселя с координатами (i, j) , $s_1(i, j)$ и $s_2(i, j)$ – величины, определяемые с помощью масок Собела, $R(i, j)$, $G(i, j)$, $B(i, j)$ – значения яркостей пикселя изображения $Y(i, j)$ в красной, зеленой и синей цветовых плоскостях соответственно.

После выделения перепадов яркостей на исходном изображении выполняется вычисление новых значений координат для масштабируемого изображения следующим образом. Существует равномерная сетка координат размером $m_1 \times l_1$ узлов. В узлах сетки известны значения некоторой функции $Y(i, j)$. Требуется перейти от сетки $m_1 \times l_1$ к равномерной сетке $m_2 \times l_2$, покрывающей ту же область, и вычислить значения функции $f(i, j)$ на сетке $m_2 \times l_2$. В качестве узлов сетки выступают координаты пикселей, в качестве функции – яркости пикселей в зависимости от пространственных координат по каждому цветовому каналу.

В матричном представлении изображения процесс интерполяции записывается:

$$F(i_1, j_1) = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & \dots & f_{1l_{out}} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & \dots & f_{2l_{out}} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & \dots & f_{3l_{out}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{m_{out}1} & f_{m_{out}2} & f_{m_{out}3} & \dots & f_{m_{out}l_{out}} \end{bmatrix} = I \left(\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & \dots & y_{1l_{in}} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & \dots & y_{2l_{in}} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & \dots & y_{3l_{in}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{m_{in}1} & y_{m_{in}2} & y_{m_{in}3} & \dots & y_{m_{in}l_{in}} \end{bmatrix}, k_m \right), \quad (14)$$

где $m_{out} \times l_{out}$ – размерность выходного изображения, $m_{in} \times l_{in}$ – размерность входного изображения, I – оператор интерполяции, k_m – коэффициент масштабирования. Координаты (i, j) исходного изображения преобразуются в координаты (i_l, j_l) конечного изображения. В предложенном алгоритме предполагается, что k_m – целое.

После преобразования координат на основе анализа перепадов яркостей соседних пикселей исходного изображения вычисляются значения яркости пикселей для нового изображения. Последовательность операций в алгоритме интерполяции следующая:

1. Выделение перепадов яркостей на исходном изображении по формуле (13).
2. Расчет координат нового изображения.
3. Вычисление новых значений яркостей:
 - 3.1 Для текущего изображения: если $i_1 = i \cdot k_m$ и $j_1 = j \cdot k_m$, то переход к 3.2, иначе к 3.3.

3.2 Присвоить $f(i_1, j_1) = y(i, j)$, переход к 3.6.

3.3 Определение разницы между яркостями соседних точек:

$$\max \{ |g(i+1, j+1) - g(i, j)|, |g(i+1, j+1) - g(i+1, j)|, \\ |g(i+1, j+1) - g(i, j+1)|, |g(i+1, j) - g(i, j)|, \\ |g(i+1, j) - g(i, j+1)|, |g(i, j+1) - g(i, j)| \} \quad (15)$$

где $g(i, j)$ – значения яркости на градиентном изображении (полученном после выделения контуров), $\max\{\}$ – функция, возвращающая максимальное из переданных ей значений, $|\cdot|$ – оператор взятия по модулю.

3.4 Если разница между яркостями соседних четырех точек на изображении с выделенными перепадами яркостей более в пределах 2% (процент подобран экспериментально) от диапазона шкалы яркостей, что для шкале яркостей $[0, 255]$ составляет 5 единиц, то переход к 3.5, иначе новое значение вычисляется в соответствии с правилом ближайшего соседа:

$$f(i_1, j_1) = \begin{cases} f(i_1 - ax_0, j_1 - ay_0), & \text{если } ax_0 = \min(ax_0, ax_1), \quad ay_0 = \min(ay_0, ay_1) \\ f(i_1 + ax_1, j_1 - ay_0), & \text{если } ax_1 = \min(ax_0, ax_1), \quad ay_0 = \min(ay_0, ay_1) \\ f(i_1 - ax_0, j_1 + ay_1), & \text{если } ax_0 = \min(ax_0, ax_1), \quad ay_1 = \min(ay_0, ay_1) \\ f(i_1 + ax_1, j_1 + ay_1), & \text{если } ax_1 = \min(ax_0, ax_1), \quad ay_1 = \min(ay_0, ay_1) \end{cases} \quad (16)$$

где ax_0, ay_0, ax_1, ay_1 – расстояния по горизонтали и по вертикали до ближайших четырех точек с известными координатами, определяемые как:

$$ax_0 = \left\langle \frac{i_1}{k_m} \right\rangle, \quad ax_1 = 1 - ax_0, \quad ay_0 = \left\langle \frac{j_1}{k_m} \right\rangle, \quad ay_1 = 1 - ay_0, \quad (17)$$

где $\langle \cdot \rangle$ – операция определения дробной части скобочного выражения.

Переход к шагу 3.6.

3.5 Рассматриваются следующие случаи, соответствующие 4 типам границ (рассматривается попадание точки в квадрат с координатами $(0,0)$, $(0,1)$, $(1,0)$, $(1,1)$ – которые представляют собой относительные координаты ближайших соседей точки с неизвестной яркостью):

1) если $\sqrt{(y(0,1) - y(0,0))^2 + (y(1,1) - y(1,0))^2} > T$ – вертикальная граница, где T – порог, подбираемый экспериментально, то

$$f(i_1, j_1) = \begin{cases} \frac{f(i_1 - ax_0, j_1 - ay_0) \cdot 1/ay_0 + f(i_1 - ax_0, j_1 + ay_1) \cdot 1/ay_1}{1/ay_0 + 1/ay_1}, & \text{если } ax_0 \leq ax_1 \\ \frac{f(i_1 + ax_1, j_1 - ay_0) \cdot 1/ay_0 + f(i_1 + ax_1, j_1 + ay_1) \cdot 1/ay_1}{1/ay_0 + 1/ay_1}, & \text{если } ax_0 > ax_1 \end{cases} \quad (18)$$

Переход к 3.6.

2) если $\sqrt{(y(1,0) - y(0,0))^2 + (y(1,1) - y(0,1))^2} > T$ – горизонтальная граница, то

$$f(i_1, j_1) = \begin{cases} \frac{f(i_1 - ax_0, j_1 - ay_0) \cdot 1/ax_0 + f(i_1 + ax_1, j_1 - ay_0) \cdot 1/ax_1}{1/ax_0 + 1/ax_1} & , \text{ если } ay_0 \leq ay_1 \\ \frac{f(i_1 - ax_0, j_1 + ay_1) \cdot 1/ax_0 + f(i_1 + ax_1, j_1 + ay_1) \cdot 1/ax_1}{1/ax_0 + 1/ax_1} & , \text{ если } ay_0 > ay_1 \end{cases} . \quad (19)$$

Переход к 3.6.

3) если $|y(1,1) - y(0,0)| > T1$ ($T1$ – порог, подбираемый экспериментально), то

$$f(i_1, j_1) = \begin{cases} \frac{f(i_1 - ax_0, j_1 - ay_0) \cdot \sqrt{\frac{1}{ax_0^2 + ay_0^2}} + f(i_1 - ax_0, j_1 + ay_1) \cdot \sqrt{\frac{1}{ax_0^2 + ay_1^2}} + f(i_1 + ax_1, j_1 - ay_0) \cdot \sqrt{\frac{1}{ax_1^2 + ay_0^2}}}{\left(\sqrt{\frac{1}{ax_0^2 + ay_0^2}} + \sqrt{\frac{1}{ax_0^2 + ay_1^2}} + \sqrt{\frac{1}{ax_1^2 + ay_0^2}} \right)} & , \\ \text{если } \sqrt{ax_0^2 + ay_0^2} \geq \sqrt{ax_1^2 + ay_1^2} . & \\ \frac{f(i_1 + ax_1, j_1 + ay_1) \cdot \sqrt{\frac{1}{ax_1^2 + ay_1^2}} + f(i_1 - ax_0, j_1 + ay_1) \cdot \sqrt{\frac{1}{ax_0^2 + ay_1^2}} + f(i_1 + ax_1, j_1 - ay_0) \cdot \sqrt{\frac{1}{ax_1^2 + ay_0^2}}}{\left(\sqrt{\frac{1}{ax_1^2 + ay_1^2}} + \sqrt{\frac{1}{ax_0^2 + ay_1^2}} + \sqrt{\frac{1}{ax_1^2 + ay_0^2}} \right)} & , \text{ иначе} \end{cases} . \quad (20)$$

Переход к 3.6.

4) если $|y(0,1) - y(1,0)| > T1$, то

$$f(i_1, j_1) = \begin{cases} \frac{f(i_1 - ax_0, j_1 - ay_0) \cdot \sqrt{\frac{1}{ax_0^2 + ay_0^2}} + f(i_1 - ax_0, j_1 + ay_1) \cdot \sqrt{\frac{1}{ax_0^2 + ay_1^2}} + f(i_1 + ax_1, j_1 + ay_1) \cdot \sqrt{\frac{1}{ax_1^2 + ay_1^2}}}{\left(\sqrt{\frac{1}{ax_0^2 + ay_0^2}} + \sqrt{\frac{1}{ax_0^2 + ay_1^2}} + \sqrt{\frac{1}{ax_1^2 + ay_1^2}} \right)} & , \\ \text{если } \sqrt{ax_0^2 + ay_1^2} \geq \sqrt{ax_1^2 + ay_0^2} . & \\ \frac{f(i_1 - ax_0, j_1 - ay_0) \cdot \sqrt{\frac{1}{ax_0^2 + ay_0^2}} + f(i_1 + ax_1, j_1 - ay_0) \cdot \sqrt{\frac{1}{ax_1^2 + ay_0^2}} + f(i_1 + ax_1, j_1 + ay_1) \cdot \sqrt{\frac{1}{ax_1^2 + ay_1^2}}}{\left(\sqrt{\frac{1}{ax_0^2 + ay_0^2}} + \sqrt{\frac{1}{ax_1^2 + ay_0^2}} + \sqrt{\frac{1}{ax_1^2 + ay_1^2}} \right)} & , \text{ иначе} \end{cases} . \quad (21)$$

Переход к 3.6.

5) если ни одно из четырех условий не выполняется, то расчет нового значения яркости выполняется известным алгоритмом бикубического масштабирования.

3.6 Если просмотр изображения закончен, то к шагу 4, иначе переход к следующему пикселю и к 3.1.

4. Конец.

Экспертная оценка результатов моделирования разработанного алгоритма адаптивной интерполяции изображений показала, что вертикальные и горизонтальные границы у интерполированных изображений получаются более четкими, чем у бикубического метода, что достигается за счет использования алгоритма определения вида границы, а также использования для однородных областей с малыми перепадами яркости (в пределах 2% от диапазона шкалы яркостей) метода ближайшего соседа. Реализация данного алгоритма возможна с использованием стандартных программных компонент (soft-ядер) фирмы Xilinx семейства Virtex 4.

Далее рассматривается алгоритм фильтрации изображения, определяемой выражением (11). При адаптивной фильтрации параметры фильтра зависят от яркости пикселей входного изображения, причем алгоритмы расчета параметров фильтра широко представлены в литературе по обработке изображений.

В разработанном аппаратно-ориентированном алгоритме фильтрации изображений коэффициенты фильтра задаются постоянными или же вычисляются

с помощью известных алгоритмов на основе анализа яркостей изображения предыдущего кадра и хранятся в памяти. Размер фильтра выбран 3х3, поскольку фильтры с таким размером обладают простотой схемотехнической реализации. При поступлении нового кадра выполняется фильтрация изображения в соответствии с заданными коэффициентами фильтра. В аппаратной реализации фильтра используются схема на логических элементах и параллельных сумматорах (рисунок 1).

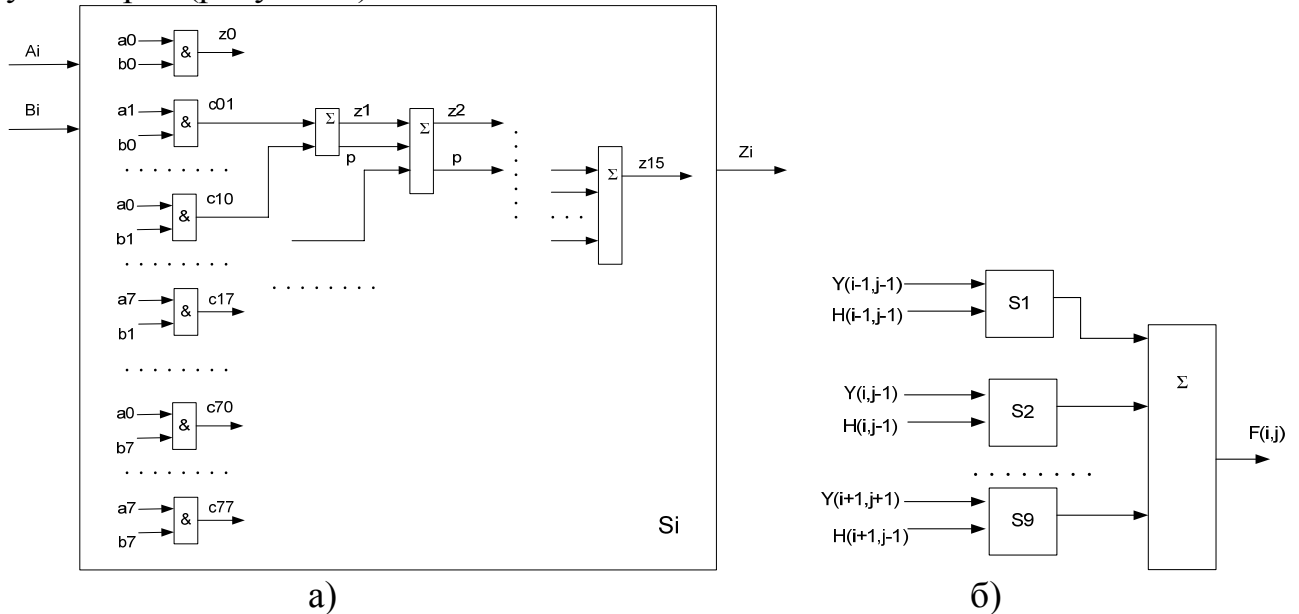


Рис. 1 –Схема для реализации операции пространственной фильтрации изображения окном 3х3; а) схема реализации умножения чисел A_i и B_i ; б) схема для реализации фильтрации изображения окном 3х3

Умножаемые числа A_i и B_i , соответствующие значениям яркости пикселя и коэффициента фильтра представляются в виде битовых последовательностей $a_7a_6a_5a_4a_3a_2a_1a_0$ и $b_7b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0$. Промежуточные результаты умножения двух бит a_i и b_j образуют бит c_{ji} и затем с помощью параллельных сумматоров формируются суммы z_i . Таким образом, в блоках $S1-S9$ выполняется умножение.

Расчет нового значения яркости пикселя при фильтрации изображения маской 3х3 выполняется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 F(i, j) = & Y(i-1, j-1) \cdot H(i-1, j-1) + F(i, j-1) \cdot H(i, j-1) + \\
 & + F(i+1, j-1) \cdot H(i+1, j-1) + F(i-1, j) \cdot H(i-1, j) + \\
 & + F(i, j) \cdot H(i, j) + F(i+1, j) \cdot H(i+1, j) + F(i-1, j+1) \cdot H(i-1, j+1) + \\
 & + F(i, j+1) \cdot H(i, j+1) + F(i+1, j+1) \cdot H(i+1, j+1),
 \end{aligned} \quad (22)$$

где $F(i, j)$ - новое значение яркости пикселя изображения, H - матрица фильтра для изображения Y .

Аппаратно-ориентированный алгоритм фильтрации изображения базируется на логических операциях и операциях сложения, и его реализация на ПЛИС без использования микропроцессорных устройств позволит обеспечить фильтрацию изображения в реальном времени.

В четвертой главе разработана структура адаптивного видеодатчика на базе КМОП приемника излучения с цифровыми пикселями с предварительной обработкой. Представлена структурно-функциональная организация блока предварительной обработки изображения. Проведена оценка быстродействия

разработанного видеодатчика. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Структурно-функциональная организация адаптивного видеодатчика на базе КМОП приемника излучения с цифровыми пикселями с предварительной обработкой изображений представлена на рисунке 2.

Адаптивный видеодатчик содержит следующие блоки: КМОП ПИ с цифровыми пикселями (ЦП) и буферной схемой; блок управления, содержащий схемы обеспечения доступа к строкам матрицы ПИ, схемы формирования сигналов сброса и выбора строки, схему формирования сигналов считывания пикселя, схему формирования тактовых и управляющих сигналов; контроллер для формирования команд и сигналов интерфейса с блоком обработки верхнего уровня, представляющего собой ЭВМ или специализированный процессор; блок вычислений, содержащий память для хранения изображения предыдущего кадра и отфильтрованного изображения текущего кадра, и предназначенный для выполнения операций фильтрации и расчета коэффициентов адаптивных фильтров.

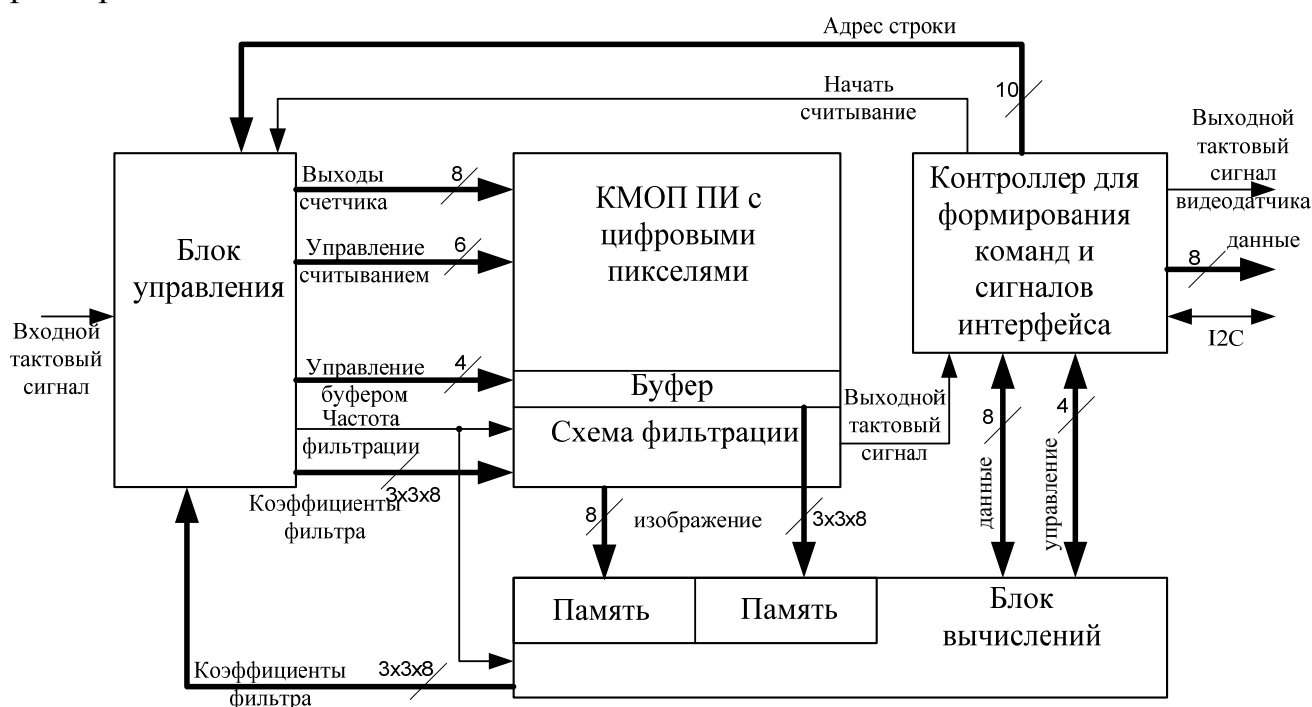


Рис. 2 – Структурно-функциональная организация адаптивного видеодатчика на базе КМОП приемника излучения с цифровыми пикселями с предварительной обработкой изображений

Устройство работает следующим образом: КМОП ПИ получает цифровое изображение объектов рабочей сцены, которое считывается под управлением блока управления. Считывание осуществляется построчно путем задания блоком управления адреса строки КМОП ПИ. Адреса строк формируются блоком управления начиная с нулевого. Значение адреса может быть получено и от устройства управления верхнего уровня через контроллер для формирования команд и сигналов интерфейса. В процессе считывания выполняется фильтрация изображения пространственным фильтром с коэффициентами, задаваемыми контроллером для формирования команд и сигналов интерфейса. Затем байт изображения передается в память блока вычислений. После обработки в блоке

вычислений, кадр изображения поступает в контроллер формирования команд и сигналов интерфейса, откуда передается управляющей ЭВМ (выход датчика). Считывание изображения также возможно без использования схемы фильтрации. В таком случае изображение считывается блоками по 9 элементов.

Основными элементами блока вычислений являются: память, матричный сумматор, матричный вычитатель, матричный умножитель, схема управления. При реализации данного блока как внешнего устройства он может быть реализован на базе стандартных программных компонент (soft-ядер) фирмы Xilinx.

Для реализации методов пространственной фильтрации изображения непосредственно на кристалле видеодатчика разработана структурная схема матрицы цифровых пикселей, представленная на рисунке 3.

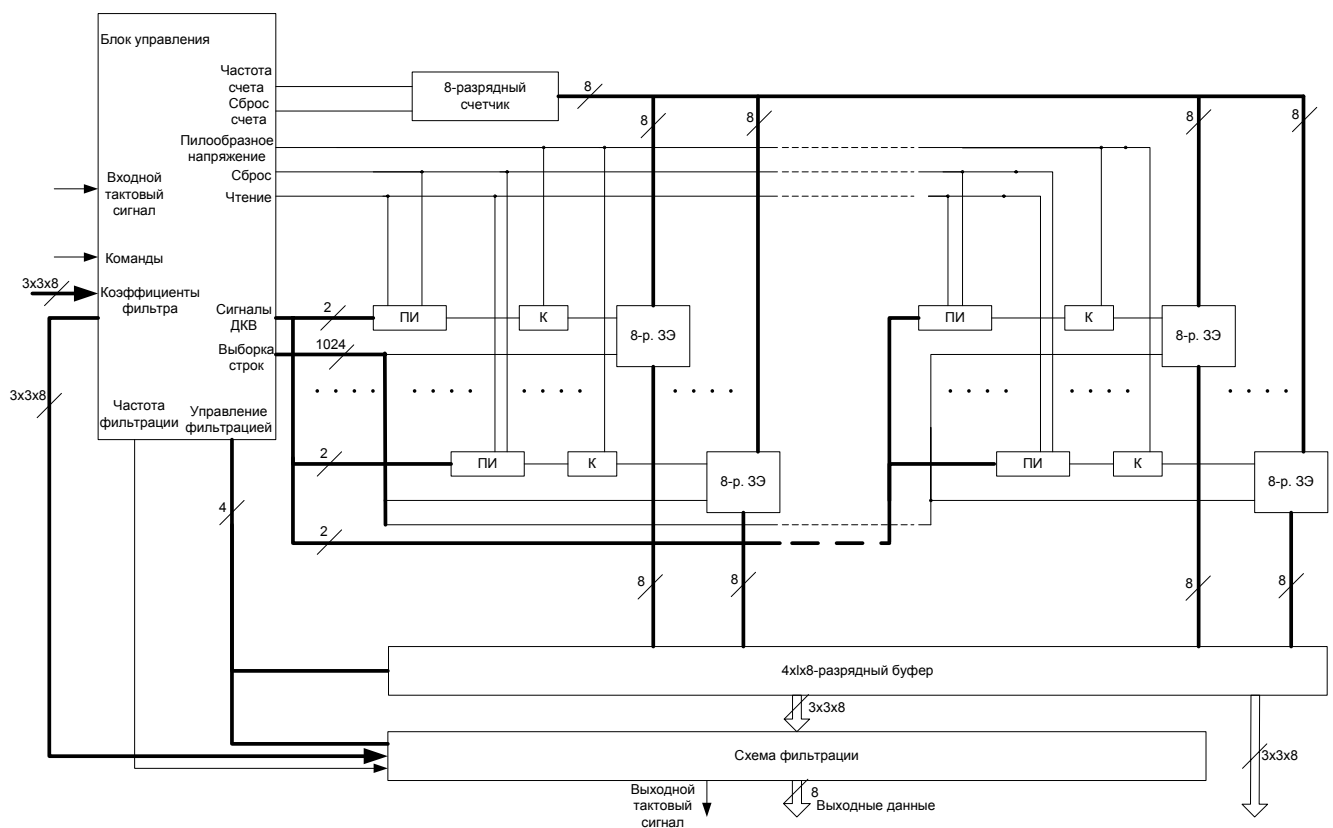


Рис. 3 – Структурная схема матрицы цифровых пикселей

Матрица цифровых пикселей содержит следующие блоки: блок управления, 8-разрядный счетчик, приемник излучения (ПИ), компаратор (К), 8-разрядный запоминающий элемент (ЗЭ), буфер для хранения строки изображения, схему фильтрации.

КМОП ПИ получает изображение объектов рабочей сцены, которое считывается в буфер управлением контроллера. Приемник излучения формирует сигнал, пропорциональный уровню своей освещенности. Считывание сигнала с ПИ происходит под управлением линий «Сброс», «Чтение», «ДКВ» (двойная коррелированная выборка). Каждый раз в цикле считывания запускается 8-разрядный счетчик, рост значений которого соотнесен с ростом пилообразного напряжения, подаваемого на второй вход компаратора. При равенстве напряжений на входах компаратора, на его выходе формируется сигнал, разрешающий запись

значения счетчика в ячейку ЗЭ. Таким образом, в ЗЭ записывается цифровое значение яркости пикселя. Запись значений из ЗЭ в выходной буфер выполняется по сигналу «Выборка строк». Запись строк выполняется последовательно в буферную схему. Непосредственно в буфере хранятся 4 строки изображения. На схему фильтрации поступают 9 байт изображения из трех последних строк, соответствующие окну 3х3. Эти же 9 байт передаются на выход схемы для сохранения текущего кадра изображения. Коэффициенты фильтрации задаются также блоком управления. В процессе фильтрации строки изображения, в буфер выполняется запись новой строки, и таким образом, обеспечивается конвейерно-параллельная обработка пикселей изображения. Группа сигналов «Управление фильтрацией» включает в себя сигналы выборки столбца, выбора строки буфера, разрешение записи, разрешения выдачи информации. Фильтрация выполняется с частотой, задаваемой блоком управления. Алгоритм фильтрации строки изображения окном 3х3 реализован на логических элементах.

Для сравнительного анализа полученных в ходе моделирования параметров разработанного видеодатчика были использованы видеодатчик MT9M413C36STM фирмы Micron с подключением к ПЭВМ и видеодатчик Atmel ATMOS 1M60 с подключением к сигнальному процессору для выполнения операций фильтрации и интерполяции изображений, не реализуемых непосредственно в данных видеодатчиках. Основные параметры сравниваемых датчиков представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Параметры видеодатчиков

Параметры	Видеодатчики		
	АВ	MT9M413C36STM	ATMOS 1M60
Число элементов, пиксели	1280×1024	1280×1024	1312×1024
АЦП, бит	8	10	8, 10, 12
Ввод и обработка изображения фильтром с фиксированной маской, кадров/с	30	10	16
Ввод и обработка изображения адаптивным фильтром (адаптация по 9-ти соседям), кадров/с	30	8	15
Получение увеличенного изображения в 2 раза (для изображений с плавными цветовыми переходами), с	0,2 (адаптивный метод)	1 (бикубическая интерполяция)	0,5 (билинейная интерполяция)
Получение увеличенного изображения в 2 раза (для изображений с множеством резких цветовых переходов), с	0,7	1	0,5

При выполнении интерполяции скорость обработки зависит от вида изображения. Для изображений с множеством деталей скорость обработки быстродействующего видеодатчика и видеодатчиков-аналогов практически не отличаются, поскольку используется метод билинейной или бикубической интерполяции. Для таких изображений качество интерполяции выше, чем у бикубического метода, за счет сохранения четких вертикальных и горизонтальных границ. Выигрыш в скорости заметен для изображений с однородными областями, где использование адаптивного алгоритма позволяет сократить количество вычислений. При выполнении операций обработки изображения фильтрами с фиксированной и адаптивной маской выигрыш в скорости достигается за счет аппаратной реализации операции фильтрации в разработанном видеодатчике. Таким образом, разработанная схема и алгоритмы обработки изображения позволяют получить обработанное изображение до 2-х раз быстрее по сравнению с известными устройствами.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В приложениях приведены графические результаты обработки тестовых изображений, акты о внедрении, листинги программ, реализующих разработанные алгоритмы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

При решении поставленной в диссертационной работе задачи были получены следующие результаты.

1. По результатам анализа существующих методов и устройств фильтрации сигнала в видеодатчиках разработана математическая модель адаптивного видеодатчика с предварительной обработкой изображений, отличающаяся введением модели обработки сигнала и позволяющая учесть параметры обработки изображения для адаптации видеодатчика к изменению рабочей сцены.
2. Разработаны алгоритм адаптивной интерполяции изображения, основанный на комбинации алгоритмов линейной, билинейной и бикубической интерполяции и аппаратно-ориентированный алгоритм пространственной фильтрации изображения, позволяющий сократить время обработки изображений.
3. Разработана структурная схема адаптивного видеодатчика с предварительной обработкой изображений на базе КМОП приемника излучения с цифровыми пикселями, обеспечивающего фильтрацию и адаптивную интерполяцию изображения непосредственно в процессе его получения, отличающиеся использованием параллельных структур и позволяющие повысить быстродействие за счет конвейерно-параллельной организации вычислений.
4. Сравнительный анализ характеристик разработанного адаптивного видеодатчика и устройств обработки изображений на основе видеодатчиков-аналогов показал, что разработанный видеодатчик обладает расширенными функциональными возможностями, а скорость получения выходных изображений с учетом выполнения операций фильтрации или интерполяции (масштабирования) у разработанного видеодатчика до 2-х раз выше.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ

1. Табаси, С.Х. Оптико-электронный адаптивный датчик на базе КМОП приемника излучения [Текст] / С.Х. Табаси, В.С. Панищев // Датчики и системы. – 2009. – № 2. – С. 23-25.
2. Табаси, С.Х. Алгоритм адаптивной интерполяции изображений [Текст] / С.Х. Табаси, В.С. Панищев, В.С. Титов // Телекоммуникации. – 2009. – № 1. – С. 16-19.

Монографии

3. Табаси, С.Х. Параграф 6.3. Адаптивный видеодатчик с аппаратной коррекцией внутрипиксельных коэффициентов усиления КМОП приемника излучения [Текст] // В.С. Яковлева, В.С. Панищев, В.С. Титов. Монография «Адаптивные видеодатчики на базе КМОП приемников излучения с активными пикселями». Курск. гос. техн. ун-т., Курск, 2008, 100с.

Материалы конференций

4. Табаси, С.Х. Биометрическая система идентификации человека на основе искусственной нейронной сети [Текст] / С.Х. Табаси, В.П. Решетникова // «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» Распознавание – 2008. Материалы VIII Международной конференции. г.Курск. – 2008. - Т2. С.75-77.
5. Табаси, С.Х. Построение адаптивных видеодатчиков на основе КМОП приемников излучения [Текст] / С.Х. Табаси // «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» Распознавание – 2008. Материалы VIII Международной конференции. г.Курск. – 2008. - Т2. С.117-119.
6. Табаси, С.Х. Аппаратно-программный комплекс для испытаний адаптивного видеодатчика [Текст] / С.Х. Табаси // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Материалы VI Международной научно-технической конференции: в 2 ч. Ч.2 / редкол.: Е.И. Яцун [и др.]; Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2008 г. с.162 – 164.
7. Табаси, С.Х. Устройство для оптической диагностики на базе КМОП-датчика [Текст] / С.Х. Табаси, В.П. Решетникова // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии в медицине, биологии и экологии» / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2008. – С.31 – 32.
8. Табаси, С.Х. Уменьшение внутренних шумов видеодатчиков [Текст] / С.Х. Табаси, В.С. Панищев, В.С. Яковлева // Материалы научно-технической конференции «Материалы и упрочняющие технологии-2008». г.Курск. – 2008. – С.278 – 280.

Подписано к печати _____. Формат 60x84 1/16.

Печатных листов 1,0. Тираж 100 экз. Заказ _____.

Издательско-полиграфический центр Курского государственного технического
университета.

Курский государственный технический университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.