

УДК 004:316.4:005.334

[0000-0002-0969-2248] **О. Г. Васильченко**¹, к.т.н., профессор,

e-mail: oleh.vasylchenkov@khpi.edu.ua

[0000-0003-0214-7383] **Н. А. Евсина**¹, к.т.н., доцент,

e-mail: newquasar838@gmail.com

[0000-0002-0490-4061] **Д. В. Сальников**¹, ассистент,

e-mail: dmytro.salnikov@khpi.edu.ua

[0000-0002-2558-4984] **П. В. Буслов**², аспирант

e-mail: p.buslov@ukr.net

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, 61002, Украина²Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
пр. Науки, 14, г. Харьков, 61000, Украина

РЕАЛИЗАЦИЯ ФИЛЬТРА С ПОСТФИЛЬТРАЦИОННЫМ ПРИНЯТИЕМ РЕШЕНИЯ НА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ АРХИТЕКТУРАХ С ВЕКТОРНЫМ РАСШИРЕНИЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДЕБНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

Приводятся результаты исследований средств обеспечения показателей эффективности судебной экспертизы изображений, в том числе и цифровых. Проводится анализ основных задач, стоящих при экспертизе изображений, и методы их решений. Основной проблемой таких исследований является недостаточная автоматизация процесса обработки изображений при экспертизе. Объектом исследования является процесс фильтрации изображений, предметом исследований – фильтры, которые используются при обработке изображений. Цель статьи – построение быстродействующей реализации фильтра с постфильтрационным принятием решения на современных процессорных архитектурах. Приведены результаты анализа возможности использования векторных инструкций современных процессорных архитектур, рассмотрены алгоритмы векторизации сортировки для эффективной реализации подпрограммы поиска медианного значения внутри текущего и проведено моделирование фильтра с постфильтрационным принятием решения с целью выяснения пригодности для использования в задачах реального времени. В результате проведенных исследований впервые предложен метод векторизованной реализации фильтра с постфильтрационным принятием решения, пригодный для процессоров с набором команд SIMD ARM NEON, Intel SSE или AVX; рассмотрено использование сортирующих сетей в качестве алгоритма поиска медианы для процессоров с векторным расширением; впервые построена реализация фильтра описанным методом для процессора ARM Cortex-A9 в составе SOC Intel Cyclone® V SE 5CSEBA6U2317NDK; проведено моделирование работы фильтра на ARM Cortex-A9. Скорость обработки изображения 512x512 пикселей составила более 500 кадров в секунду. Скорость обработки полутонных изображений FullHD – более 60 кадров в секунду.

Ключевые слова: автоматизация процесса обработки изображений, фильтрация изображений, постфильтрационное принятие решения, векторизованная реализация фильтра, сортирующие сети, моделирование фильтров изображений.

Введение. Объектами судебной фототехнической экспертизы являются фотоснимки, а также технические средства и материалы, применяемые для их изготовления. Фотографические снимки – основной объект судебной фототехнической экспертизы, они чаще всего поступают на исследование в судебно-

экспертные учреждения; технические средства и материалы, применяемые для изготовления фотоснимков, исследуются намного реже, нежели сами фотографические изображения. Однако существующие сейчас методики по исследованию фотоизображений, полученных с помощью аналоговой камеры, ма-

лоприменимы к исследованию цифровых фотографических изображений. Поскольку в большинстве случаев на экспертизу приходят фотоизображения, полученные именно с помощью цифровых фотокамер, то существует необходимость описания процесса ряда действий, которые следует совершать эксперту при исследовании самого распространенного на сегодняшний день объекта судебной фототехнической экспертизы – цифрового фотографического изображения. При необходимости проведения судебной фототехнической экспертизы следует иметь четкое представление о том, какие задачи могут решаться этим видом экспертиз в отношении данного объекта. Круг современных задач представляется следующим образом [1]:

- идентификация оригинала (негатива, позитива, фотосенсора) по фотоотпечатку;
- идентификация предметов, помещений и участков местности, изображенных на фотоснимках;
- определение условий и способа изготовления фотоснимка, включая установление способа получения (печати) цифрового фотоснимка, распознавание проекционного или контактного (сканированием) способов получения изображений, определение факта повторного репродуцирования;
- установление факта ретуши (негативной, позитивной), в том числе распознавание основных приемов цифровой ретуши по изображениям на фотоснимке;
- установление факта составления изображения из двух или более самостоятельных изображений (фотомонтажа);
- распознавание приемов аналогового и цифрового фотомонтажа изображений по фотоснимкам;
- определение размеров предметов, изображенных на фотоснимке, и расстояний между предметами, в том числе с использованием специализированных компьютерных программных средств;
- восстановление изображений на фотоснимках, в том числе с использованием цифровых методов восстановления контраста и цветности;
- определение времени и иной служебной информации по метаданным, дополняющим графический файл с изображением.

Экспертное исследование базируется на общих методических положениях и подходах и состоит из четырех стадий: подготовительной, аналитической, сравнительной, оценочной. Эти стадии экспертного исследования охватывают полный круг задач, которые могут быть поставлены перед экспертом. В зависимости от вида решаемой задачи – идентификационная или диагностическая – будет варьироваться количество этапов. Некоторые описанные ниже этапы исследования характерны только для решения определенного вида задач.

Аналитическая стадия. На этой стадии необходимо всесторонне изучить представленные на экспертизу фотоизображения, выявить наибольшее количество признаков. Эта стадия важна как для решения идентификационных задач, так и для решения диагностических. Для наглядности можно рассмотреть эту стадию на примере решения такой диагностической задачи, как определение условий и способа изготовления фотоснимка, включая установление способа получения (печати) цифрового фотоснимка, распознавание проекционного или контактного (сканированием) способов получения изображений, определение факта повторного репродуцирования.

Способы создания изображения. При фотографировании цифровым фотоаппаратом изображение проекции объектов создается путем записи в файл состояния элементов ПЗС-матрицы фотоаппарата. Различают бытовые (дешевые) модели цифровых фотоаппаратов и профессиональные модели. Для бытовых моделей характерно невысокое качество получаемых изображений, поэтому их применение для создания качественного фотоснимка ограничено и нежелательно ввиду низкого разрешения и значительных трудозатрат на ретуширование. Профессиональные модели цифровых фотоаппаратов позволяют получить высококачественное изображение, в том числе и с различными визуальными эффектами (используются объективы и насадки к ним разных типов). Могут создаваться изображения из специальных библиотек («фото-клипартов», созданных профессиональной съемкой) или Интернет-ресурсов (как правило, созданы путем значительного снижения разрешения изображений, созданных профессиональной съемкой).

Криміналістическіє признакі:

- дискретні (ступенчаті) краї і контури елементів зображень (бытові моделі і зображення із Інтернет-ресурсів);
- непропрабованність мелкіх деталей (бытові моделі і зображення із Інтернет-ресурсів);
- непропрабованність движущихся об'єктів (бытові моделі);
- непропрабованність елементів заднього лібо переднього плану із-за фокусного расстоянія;
- різкі скачки цвета в градієнтах (бытові моделі);
- відсутність тонкіх ліній;
- зміщення цветовой моделі зображення в сторону одного оттенка (бытові моделі);
- следи полупрозрачных потожирових загрязнєній объектива;
- дефекты объектива, которые могут отобразиться в серии зображень;
- наличие посторонних полихроматических шумов в тенях («зашумленность», похожая на помехи при плохом приеме телевизионного канала) зображення (бытові моделі, но может встречаться и в профессиональных);
- наличие посторонних полихроматических шумов на цветовых границах объектов;
- наличие дисторсии (в бытовых, реже в профессиональных).

При сканірованні напечатаних раніє фотографіеских зображень зображення поверхності сканіруемого об'єкта створюється путем фіксації состояній елементів ПЗС-матриці сканера. Для сканерів бытових моделей характерно низкое качество получаемых зображень, поэтому их применение для создания качественной электронной копии фотографии крайне ограничено и нежелательно ввиду низкого разрешения и значительных трудозатрат на ретуширование муара. Профессиональные модели сканеров позволяют получить условно качественное зображення.

Криміналістическіє признакі:

- наличие муара, вызванное наложением периодических структур растра, особенно в желтом, малиновом, реже в голубом каналах;
- состоящие из неравномерных точек края и контуры элементов зображень;

- излишне контрастные и непроработанные в светлых и темных полутонах («срезовые») зображення;
 - отсутствие тонких линий;
 - значительные следы ретуши в зображеннях;
 - слегка (профессиональные модели) либо сильно (бытові моделі) размытые для удаления муара зображення;
 - контрастные цветовые переходы;
 - пониженная цветовая насыщенность зображення;
 - отобразившиеся признаки технологии печати;
 - дискретные края и контуры элементов зображень;
 - непропрабованність мелкіх деталей;
 - відсутність непропрабованности элементов заднего либо переднего плана;
 - следи полупрозрачных потожирових загрязнєній и царапин на стеклянной рабочей поверхности сканера;
 - дефекты сканера, которые могут отобразиться в серии зображень;
 - непропрабованність фрагментов зображення із-за неплотного прилегания поверхности сканируемого объекта к стеклянной рабочей поверхности сканера;
 - непропрабованність теней зображення, вызванных неправильной настройкой «точки черного»;
 - наличие посторонних полихроматических шумов в светлых (условно белых) областях зображення, вызванных неправильной настройкой «точки белого» (фактура бумаги);
 - відсутність дисторсии [2].
- Зображення, полученные путем компьютерного 3D-моделирования, созданные вручную в векторных графических редакторах, обладают рядом отличительных признаков:
- відсутність дисторсии в горизонтальных и вертикальных элементах зображення;
 - идеальное (математическое) градиентное распределение теней и цветовых переходов (градиентов) элементов зображення;
 - дискретная (ступенчатая) структура цветовых переходов (градиентов) элементов зображень;
 - математически «точные» границы и контуры элементов зображення;

- математически «точные» границы и контуры выворотов;
- наличие тонких (толщиной менее 1 пт) линий;
- наличие элементов (контуры, тексты), выполненных запечаткой черным поверх основного цвета («верпринт»);
- наличие перспективных (математически точных) искажений в горизонтальных и вертикальных элементах;
- цветовые ступенчатые градиенты теней объектов.

При выявлении у фотоснимков определенного комплекса признаков можно говорить о создании фотоизображения одним из перечисленных выше способов.

Сравнительное исследование. Данная стадия характерна для экспертного исследования при решении идентификационных задач:

- идентификация оригинала (негатива, позитива, фотосенсора) по фотоотпечатку;
- идентификация предметов, помещений и участков местности, изображенных на фотоснимках;
- установление факта составления изображения из двух или более самостоятельных изображений (фотомонтажа) [3-6].

Подводя итог вышесказанному, необходимо подчеркнуть, что современное состояние судебной фототехнической экспертизы подверглось качественным изменениям в связи с появлением целого ряда цифровых объектов, полученных с использованием цифровых фототехнологий. На основе этого работа по дальнейшему совершенствованию методики судебной фототехнической экспертизы представляется актуальной и важной [7].

В то же время любая работа по обработке изображений требует соответствующего аппаратно-программного комплекса, который должен включать в свой состав соответствующие фильтры, которые позволяют обеспечивать необходимые требования к показателям качества результатов экспертизы.

Целью исследования является построение быстродействующей реализации фильтра с постфильтрационным принятием решения на современных процессорных архитектурах.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- провести анализ возможности использования векторных инструкций современных процессорных архитектур.
- для эффективной реализации подпрограммы поиска медианного значения внутри текущего рассмотреть алгоритмы векторизации сортировки
- провести моделирование фильтра с постфильтрационным принятием решения с целью выяснения пригодности для использования в задачах реального времени

Изложение основного материала. На данный момент абсолютное большинство устройств автоматизированной обработки изображений использует в качестве датчиков CCD (charge-coupled device) или CMOS (complementary metal oxide semiconductor) матрицы, которые подвержены зашумлению в результате нагрева, фотонного шума, кТС шума и пр. [8] Таким образом, алгоритмы удаления шума с изображений так или иначе используются в любом современном устройстве обработки изображений.

Широкое применение в качестве алгоритма поиска пикселей, подверженных воздействию импульсного шума, получил медианный фильтр. Недостатком этого фильтра считают существенное влияние на пиксели, не подверженные зашумлению. Таким образом, выходное изображение теряет большую часть информации, что может быть критично для последующих алгоритмов, использующих данные после фильтрации. На данный момент медианный фильтр используется в качестве составной части в большинстве современных адаптивных фильтров [9-11], имеющих специализированный алгоритм для определения зашумленных участков изображения.

Как правило, реализация детекторов шума является вычислительно сложной, а аппаратные затраты на реализацию алгоритма на современных микропроцессорах и программируемых интегральных схемах могут существенно ограничивать применение таких алгоритмов в приложениях, требующих обработки в реальном времени.

Результаты исследований. Фильтр с постфильтрационным принятием решения [12] является компромиссным с точки зрения соотношения качества фильтрации и аппаратных затрат. Он использует входное и медианное значение окна для принятия решения

о зашумленности, благодаря чему снижается размытие выходного изображения.

Алгоритм фильтра можно представить следующим уравнением:

$$Y(i, j) = \begin{cases} m_{i,j}, & \text{если } |X(i, j) - m_{i,j}| > th \\ X(i, j), & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

где $X(i, j)$ – исходное значение фильтруемого пикселя, $Y(i, j)$ – выходное значение фильтруемого пикселя, $m_{i,j}$ – медианное значение текущего окна, th – пороговое значение.

Как видно из уравнения (1), в фильтре нет ресурсоемких вычислений, что, по мнению авторов, способствует снижению аппаратных затрат на реализацию.

Предложенный фильтр [13] может быть эффективно реализован на большинстве современных процессоров при помощи векторных SIMD (single instruction multiple data) инструкций.

Одними из наиболее распространённых процессоров с таким набором являются процессоры архитектуры x86 с расширением SSE и/или AVX, а также группа процессоров архитектуры ARM с расширенным набором команд NEON. Эти процессоры имеют набор векторных регистров, над которыми можно осуществлять математические операции. Таким образом, ускорение работы фильтра осуществляется за счет сокращения числа обращений к памяти, а также выполнения нескольких, например 16 в случае 8-битных данных и процессора ARM, математических операций за один такт процессора.

Моделирование проводилось на аппаратной платформе terasIC DE10-Nano. На данном модуле установлена система на кристалле Intel Cyclone® V SE 5CSEBA6U23I7NDK, в состав которой входит двухъядерный процессор ARM Cortex-A9 с расширением NEON.

Программирование фильтра выполнялось на языках C/C++ при помощи специализированных «intrinsic» функций, которые транслируются компилятором в необходимые инструкции процессора, минуя большинство алгоритмов автоматической оптимизации, применяемой компилятором.

Изображение было представлено в памяти процессора в виде последовательного набора 8-ми битных данных, которые можно представить в виде двумерного массива. Каждая ячейка памяти представляет собой яркость определенного пикселя.

Процесс нахождения медианы для окна размера 3x3 представлен на рисунке 1.

0	1	2	3	4	5	6
10	11	12	13	14	15	16
20	21	22	23	24	25	26
30	31	32	33	34	35	36

Рисунок 1 – Процесс медианной фильтрации изображения с окном 3x3 пикселя

Фильтрация представляет собой последовательное прохождение окна по всему изображению с шагом 1 пиксель. Внутри каждого окна, используя значения яркости 9 пикселей, находится медианное значение. Отклонение по модулю полученной величины от исходного значения сравнивается для получения решения о необходимости модификации центрального пикселя окна.

Из рисунка выше видно, что для нахождения медианного значения необходимо загрузить из памяти значения:

для шага 1 – 0, 1, 2, 10, 11, 12, 20, 21, 22;

для шага 2 – 1, 2, 3, 11, 12, 13, 21, 22, 23;

для шага 3 – 2, 3, 4, 12, 13, 14, 22, 23, 24;

для шага 4 – 3, 4, 5, 13, 14, 15, 23, 24, 25.

Таким образом, для загрузки в регистр процессора значений из памяти, можно использовать векторную операцию (инструкция VLD1_8). Тогда в векторном регистре процессора ARM NEON получим 16 последовательных входных значений.

Обсуждение результатов исследований.

Для реализации ускоренной процедуры нахождения медианы в обработке сигналов на ПЛИС часто используют сортирующие сети [13]. Составной частью таких сетей является блок сравнения-обмена изображенный на рисунке 2, а. Также данный механизм может быть применен и для процессоров с векторными расширениями, пример которого представлен в [14].

Отметим, что для нахождения медианы не нужно находить полностью отсортированную последовательность. В работе была использована сортирующая сеть Паэта [15] следующей структуры:

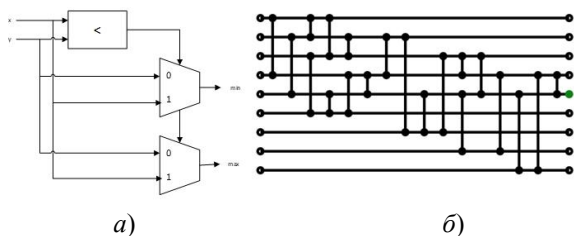


Рисунок 2 – Элемент сравнения-обмена (а) и структура (б) сортирующей сети Паэта для 9 элементов

Для нахождения медианного значения данным методом необходимо 20 элементов сравнения-обмена.

В свою очередь, элемент сравнения-обмена был реализован при помощи 3 инст-

рукций NEON: VMOV_U8, VMIN_U8 и VMAX_U8. Пример такой операции изображен на рисунке 3.

Блок сравнения с пороговым значением был реализован при помощи инструкций VABD_U8 (нахождение разности по модулю), VCGE_U8 (сравнение больше или равен) и VBSL (выбор по маске).

Сохранение полученного выходного значения может быть выполнено при помощи векторной инструкции VST1_8.

В результате моделирования фильтрации изображения размером 512x512 пикселей на SOC с процессором ARM Cortex-A9 были получены данные, представленные на рисунке 4: неоптимизированная версия фильтра (Our std::sort) выполнялась 85 948 мкс, неоптимизированная с собственной реализацией сортировки (Our custom sort) – 50 007 мкс, оптимизированная методом, описанным выше, (Our NEON) – 1974 мкс. Таким образом, описанный метод реализации фильтра позволяет получить ускорение в 43,54 раза.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Q0 U8	20	94	192	1	15	189	207	82	163	189	208	32	143	55
Q1 U8	146	87	206	232	210	88	103	174	222	60	141	86	245	219

VMOV U8	20	94	192	1	15	189	207	82	163	189	208	32	143	55
VMIN U8	20	87	192	1	15	88	103	82	163	60	141	32	143	55
VMAX U8	146	94	206	232	210	189	207	174	222	189	208	86	245	219

Рисунок 3 – Реализация блока сравнения-обмена при помощи SIMD инструкций ARM NEON

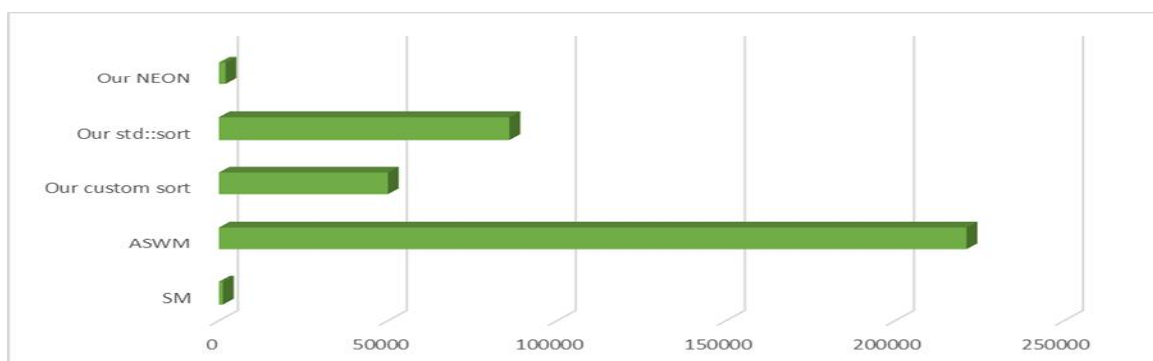


Рисунок 4 – Сравнение скорости работы медианного (SM), адаптивного переключающегося (ASWM) фильтра и оптимизированной версии предложенного фильтра

Следует отметить, что существенное влияние на быстродействие имеет алгоритм нахождения медианы. Так, использование небibliothечного алгоритма сортировки

позволяет ускорить фильтр практически в два раза.

Быстродействие медианного фильтра (SM) сопоставимо со скоростью фильтра

с постфильтрационным принятием решения – 1221 мкс и 1986 мкс соответственно.

В дальнейших исследованиях представляется целесообразным оптимизировать полученный код путем внесения улучшений для повторного использования загруженных в регистры значений, а также параллельного выполнения на нескольких ядрах процессора.

Заключение. В данной работе был проведен анализ методик проведения судебных экспертиз изображений, определены факторы, которые оказывают максимальное влияние на достоверность проведения соответствующих экспертных оценок, и пути повышения их качества. В работе проведен анализ возможности автоматизации экспертного процесса для повышения его достоверности.

Был проведен анализ возможности построения быстродействующей реализации фильтра с постфильтрационным принятием решения на современных процессорных архитектурах.

В результате проведенных исследований:

- впервые предложен метод векторизованной реализации фильтра с постфильтрационным принятием решения, пригодный для процессоров с набором команд SIMD ARM NEON, Intel SSE или AVX;

- рассмотрено использование сортирующих сетей в качестве алгоритма поиска медианы для процессоров с векторным расширением;

- впервые построена реализация фильтра описанным методом для процессора ARM Cortex-A9 в составе SOC Intel Cyclone® V SE 5CSEBA6U23I7NDK;

- проведено моделирование работы фильтра на ARM Cortex-A9. Скорость обработки изображения 512x512 пикселей составила более 500 кадров в секунду. Скорость обработки полутоновых изображений FullHD – более 60 кадров.

В дальнейших исследованиях представляется целесообразным оптимизировать полученный код путем внесения улучшений для повторного использования загруженных в регистры значений, а также параллельного выполнения на нескольких ядрах процессора.

Список использованных источников

[1] S. M. Bobrytskyi, and S. V. Chernyi, "Methodological aspects of complex re-

search with the purpose of revealing signs of mounting in digital photography", *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*, iss. 10, pp. 633-639, 2010.

[2] Ye. V. Tymko et al., "Research method development of digital photographs and technical means of their production", Rep. on R&D: Kyiv Scientific Research Institute of Forensic Expertise, 121 p., 2013.

[3] J. Fan, H. Cao, and A. C. Kot, "Estimating EXIF parameters based on noise features for image manipulation detection", *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 8, iss. 4, pp. 602-608, 2013.

[4] R. Minhas, A. Mohammed, and Q. Wu, "An efficient algorithm for focus measure computation in constant time", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, no. 22, pp. 152-156, 2012.

[5] R. Minhas, A. Mohammed, Q. Wu, and M. Sid-Ahmed, "3D shape from focus and depth map computation using steerable filter", in *Int. Conf. Image Analysis and Recognition (ICIAR)*, 2009, pp. 573-583.

[6] S. Pertuz et al. "Analysis of focus measure operators for shape-from-focus", *Pattern Recognition*, no. 46 (5), pp. 1415-1432, 2013. DOI: 10.1016/j.patcog.2012.11.011

[7] O. Kliuiev, O. Uhrovetyskyi, E. Simakova-Yefremian, M. Mozhaiev, and O. Mozhaiev, "Method of forensic research on image for finding touch up on the basis of noise entropy", in *3rd Int. Conf. on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, 2019, pp. 76-79.

[8] А. М. Овчинников, А. А. Ильин, и М. Ю. Овчинников, "Принцип работы и устройство активно-пиксельных датчиков", Москва, 30 с., препринт Ин-т прикладной математики им. М. В. Келдыша Рос. акад. наук; № 85, 2003.

[9] Smaïl Akkoul, "A new adaptive switching median filter", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 17, pp. 587-590, 2010.

[10] Wei Zhou Zhao, Hui Li Jing, Bao Zhen Yang, and Hui Zhang, "An improved filtering algorithm for impulse noise with high density based on edge information preservation", *Applied Mechanics and Materials*, vols. 548-549, p. 1068, 2014.

[11] Zhe Zhang, Deqiang Han, Jean Dezert, and Yi Yang, "A new adaptive switching median

- filter for impulse noise reduction with pre-detection based on evidential reasoning", *Signal Processing*, vol. 147, pp. 173-189, 2018. ISSN 0165-1684.
- [12] Д. В. Сальников, и О. Г. Васильченков, "Модифицированный медианный фильтр с пост-фильтрационным принятием решения", *Системы управління, навігації та зв'язку*, вип. 1 (53), с. 158-161, 2019.
- [13] M. Ricco, L. Mathe, and R. Teodorescu, "FPGA-based implementation of sorting networks in MMC applications," in *18th Europ. Conf. on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Karlsruhe, pp. 1-10, 2016.
DOI: 10.1109/EPE.2016.7695280
- [14] S. Brankovic, A. Markovic, D. Simic, and A. Rikalo, "Improving performance of sorting small arrays on MIPS CPUs using bitonic sort and SIMD instructions," in *27th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, pp. 1-4, 2019.
DOI: 10.1109/TELFOR48224.2019.8971325
- [15] A. W. Paeth, "Median finding on a 3-by-3 grid", in *Graphic Gems*, A. S. Glassner, Ed, Academic Press, 1993, pp. 171-175.
- ter", in *Int. Conf. Image Analysis and Recognition (ICIAR)*, 2009, pp. 573-583.
- [6] S. Pertuz et al. "Analysis of focus measure operators for shape-from-focus", *Pattern Recognition*, no. 46 (5), pp. 1415-1432, 2013.
DOI: 10.1016/j.patcog.2012.11.011
- [7] O. Kliuiev, O. Uhrovetskyi, E. Simakova-Yefremian, M. Mozhaiev, and O. Mozhaiev, "Method of forensic research on image for finding touch up on the basis of noise entropy", in *3rd Int. Conf. on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, 2019, pp. 76-79.
- [8] A. M. Ovchinnikov, A. A. Ilyin, and M. Yu. Ovchinnikov, "The principle of operation and the arrangement of active-pixel sensors", Moscow, 30 p., preprint Institute of Applied Mathematics named after M. V. Keldysh of the Russian Academy of Sciences; no. 85, 2003. [in Russian].
- [9] Smaïl Akkoul, "A new adaptive switching median filter", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 17, pp. 587-590, 2010.
- [10] Wei Zhou Zhao, Hui Li Jing, Bao Zhen Yang, and Hui Zhang, "An improved filtering algorithm for impulse noise with high density based on edge information preservation", *Applied Mechanics and Materials*, vols. 548-549, p. 1068, 2014.
- [11] Zhe Zhang, Deqiang Han, Jean Dezert, and Yi Yang, "A new adaptive switching median filter for impulse noise reduction with pre-detection based on evidential reasoning", *Signal Processing*, vol. 147, pp. 173-189, 2018. ISSN 0165-1684.
- [12] D. V. Salnikov, and O. G. Vasilchenkov, "Modified median filter with post-filtration decision-making", *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, iss. 1 (53), pp. 158-161, 2019. [in Russian].
- [13] M. Ricco, L. Mathe, and R. Teodorescu, "FPGA-based implementation of sorting networks in MMC applications," in *18th Europ. Conf. on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Karlsruhe, pp. 1-10, 2016.
DOI: 10.1109/EPE.2016.7695280
- [14] S. Brankovic, A. Markovic, D. Simic, and A. Rikalo, "Improving performance of sorting small arrays on MIPS CPUs using bitonic sort and SIMD instructions," in *27th*

References

- [1] S. M. Bobrytskyi, and S. V. Chernyi, "Methodological aspects of complex research with the purpose of revealing signs of mounting in digital photography", *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*, iss. 10, pp. 633-639, 2010.
- [2] Ye. V. Tymko et al., "Research method development of digital photographs and technical means of their production", Rep. on R&D: Kyiv Scientific Research Institute of Forensic Expertise, 121 p., 2013.
- [3] J. Fan, H. Cao, and A. C. Kot, "Estimating EXIF parameters based on noise features for image manipulation detection", *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 8, iss. 4, pp. 602-608, 2013.
- [4] R. Minhas, A. Mohammed, and Q. Wu, "An efficient algorithm for focus measure computation in constant time", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, no. 22, pp. 152-156, 2012.
- [5] R. Minhas, A. Mohammed, Q. Wu, and M. Sid-Ahmed, "3D shape from focus and depth map computation using steerable fil-

Telecommunications Forum (TELFOR), [15] A. W. Paeth, "Median finding on a 3-by-3 grid", in *Graphic Gems*, A. S. Glassner, Ed, Academic Press, 1993, pp. 171-175.
Belgrade, pp. 1-4, 2019.
DOI: 10.1109/TELFOR48224.2019.8971325

O. H. Vasylenko¹, *PhD, professor*,
e-mail: oleg.vasylenko@kphi.edu.ua

N. O. Yevsina¹, *PhD, associate professor*,
e-mail: newquasar838@gmail.com

D. V. Salnikov¹, *assistant*,
e-mail: dmytro.salnikov@kphi.edu.ua

P. V. Buslov², *postgraduate*
e-mail: p.buslov@ukr.net

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

Kyrychova st., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine

²Kharkiv National University of Radio Electronics,
Nauky Ave., 14, Kharkiv, 61166, Ukraine

IMPLEMENTATION OF A FILTER WITH POST-FILTERING DECISION-MAKING ON MICROPROCESSOR ARCHITECTURES WITH VECTOR EXTENSION TO ENSURE PERFORMANCE INDICATORS OF FORENSIC EXAMINATION

The study results of the means of maintenance of efficiency indicators of image forensic examination, including digital images, are shown. The analysis of the main tasks faced by image examination and methods of their solution is carried out. The main problem of such studies consists in insufficient automation of image processing process during the examination. The object of the study is the process of image filtering, the subject of the study is filters that are used in image processing. As a result of the analysis of implementations of noise detectors it is established that they are computationally complex. And the hardware costs of implementing the algorithm on modern microprocessors and programmable integrated circuits can significantly limit the use of such algorithms in applications that require real-time processing. The purpose of the article is to build a high-speed implementation of the filter with post-filtering decision-making on modern processor architectures. The results of the analysis of the possibility of using vector instructions of modern processor architectures are presented, sorting vectorization algorithms for effective implementation of the search subroutine for the median value within the current one are considered, and the filter with post-filtering decision-making to determine suitability for real-time tasks is modelled. As a result of the conducted studies the method of vectorized implementations of the filter with post-filtering decision-making suitable for processors with a set of SIMD ARM NEON, Intel SSE or AVX commands is proposed for the first time; the use of sorting networks as a median search algorithm for processors with vector extension is considered; for the first time the implementation of the filter by the described method for the ARM Cortex-A9 processor as a part of Intel SOC Cyclone® V SE 5CSEBA6U23I7NDK is constructed; the filter operation is modelled on ARM Cortex-A9. The processing speed of the 512x512 pixel image has been more than 500 frames per second. The FullHD halftone image processing speed has been more than 60 frames.

Keywords: automation of image processing process, image filtering, post-filtering decision-making, sorting networks, image filter modelling.

О. Г. Васильченко¹, к.т.н., професор,
e-mail: oleg.vasylchenkov@khpi.edu.ua

Н. О. Євсіна¹, к.т.н., доцент,
e-mail: newquasar838@gmail.com

Д. В. Сальников¹, асистент
e-mail: dmytro.salnikov@khpi.edu.ua

П. В. Буслов², аспірант
e-mail: p.buslov@ukr.net

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

²Харківський національний університет радіоелектроніки,
просп. Науки, 14, м. Харків, 61166, Україна

РЕАЛІЗАЦІЯ ФІЛЬТРА З ПОСТФІЛЬТРАЦІЙНИМ ПРИЙНЯТТЯМ РІШЕННЯ НА МІКРОПРОЦЕСОРНИХ АРХІТЕКТУРАХ З ВЕКТОРНИМ РОЗШИРЕННЯМ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДОВОЇ ЕКСПЕРТИЗИ

Наводяться результати досліджень засобів забезпечення показників ефективності судової експертизи зображень, у тому числі й цифрових. Проводиться аналіз основних завдань, що стоять при експертизі зображень, і методи їх розв'язання. Основною проблемою таких досліджень є недостатня автоматизація процесу обробки зображень при експертизі. Об'єктом дослідження є процес фільтрації зображень, предметом досліджень – фільтри, які використовуються при обробці зображень. В результаті аналізу реалізацій детекторів шуму встановлено, що вони є обчислювально складними. Апаратні витрати на реалізацію алгоритму на сучасних мікропроцесорах і програмованих інтегральних схемах можуть істотно обмежувати застосування таких алгоритмів у додатках, що вимагають обробки в реальному часі. Метою статті є побудова швидкодіючої реалізації фільтра з постфільтраційним прийняттям рішення на сучасних процесорних архітектурах. Наведено результати аналізу можливості використання векторних інструкцій сучасних процесорних архітектур, розглянуто алгоритми векторизації сортування для ефективного реалізації підпрограми пошуку медіанного значення всередині поточного і проведено моделювання фільтра з постфільтраційним прийняттям рішення з метою з'ясування придатності для використання в задачах реального часу. В результаті проведених досліджень вперше запропоновано метод векторизованої реалізації фільтра з постфільтраційним прийняттям рішення, придатний для процесорів з набором команд SIMD ARM NEON, Intel SSE або AVX; розглянуто використання сортувальних мереж як алгоритму пошуку медіани для процесорів з векторним розширенням; вперше побудовано реалізацію фільтра описаним методом для процесора ARM Cortex-A9 в складі SOC Intel Cyclone® V SE 5CSEBA6U23I7NDK; проведено моделювання роботи фільтра на ARM Cortex-A9. Швидкість обробки зображення 512x512 пікселів становила понад 500 кадрів на секунду. Швидкість обробки напівтонових зображень FullHD – понад 60 кадрів на секунду.

Ключові слова: автоматизація процесу обробки зображень, фільтрація зображень, постфільтраційне прийняття рішення, сортувальні мережі, моделювання фільтрів зображень.

Стаття надійшла 28.11.2020

Прийнято 18.12.2020