

Д. В. Сальников, О. Г. Васильченко

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕДИАННЫЙ ФИЛЬТР С ПОСТ ФИЛЬТРАЦИОННЫМ ПРИНЯТИЕМ РЕШЕНИЯ

Обработка изображений становится одной из наиболее востребованных областей цифровой обработки сигналов. Данные изображений подвержены зашумлению в процессе снятия с датчика и передаче по разнообразным телекоммуникационным каналам. С каждым годом растет качество и объем данных изображений, что существенно усложняет требования к скорости работы цифровых фильтров изображений. На данный момент широкое распространение получили адаптивные фильтры на основе медианного фильтра, позволяющие добиться высоких результатов качества фильтрации для разнообразных видов шума и уровней зашумления. Такие фильтры зачастую содержат сложные алгоритмы детектирования зашумленных пикселей, существенно снижающие количество обрабатываемых в секунду кадров. В данной статье предложен алгоритм фильтра с принятием решения о зашумлении после процедуры фильтрации, обладающий высоким уровнем шумоподавления, а также высокой скоростью работы. Предложенный фильтр обладает высоким уровнем качества фильтрации на различных уровнях зашумления импульсным шумом. В структуре фильтра нет сложных с точки зрения вычислительной нагрузки операций, что позволяет реализовать его оптимизированную версию под популярные на текущий момент системы на кристалле, ПЛИС и процессоры с векторной арифметикой. Дальнейший интерес представляет исследование фильтра с другими видами шума, а также исследование влияния изменения апертуры фильтра.

Ключевые слова: фильтрация, медиана, шум, fpga, simd.

Введение

На текущий момент огромное количество техники, созданной человеком, использует оптические датчики или же сигналы, полученные при помощи них. Оцифрованные изображения снятые с камеры, подвержены зашумлению, ввиду низкого качества датчика, плохих условий съемки, шумов в канале передачи данных. Таким образом, становится актуальна задача обесшумливания изображений. В данный момент популярность приобрели адаптивные цифровые фильтры изображений, способные осуществлять фильтрацию сигналов с различными параметрами и уровнями зашумления.

Немаловажным параметром работы любой технической системы являются ресурсы, затрачиваемые ею для работы. Таким образом, необходимы фильтры изображений, позволяющие осуществлять фильтрацию с высоким уровнем шумоподавления при высокой скорости работы.

Наличие сложных нелинейных вычислений вносит существенные трудности в процесс оптимизации фильтра под любую аппаратную платформу. Такими вычислениями можно считать циклы недетерминированной длины и «сложные» с точки зрения затрат ресурсов операции вроде деления, нахождения корня и т.п. Следует отметить, что абсолютное большинство современных фильтров [1–4] используют операцию нахождения медианы. Эта операция хорошо реализуема в современных ПЛИС и процессорах без использования циклов или иной логики с применением ветвлений или логических автоматов, приводящих к существенным потерям скорости работы алгоритма. Таким образом, нет необходимости производить ее в конце вычислений, только после принятия решения о зашумленности.

Предложенный ниже фильтр имеет детектор шума простой структуры, без операций деления и циклов. Это позволяет реализовать его для ПЛИС и

векторных процессоров со сравнительно низкими затратами ресурсов и высокой производительностью путем выполнения конвейеризированной обработки нескольких пикселей изображения одновременно.

Обзор структуры фильтра

Алгоритм работы фильтра представлен на рис. 1. ниже. Его можно разделить на две стадии: нахождения медианы окна и принятия решения о зашумленности исследуемого пикселя. Т.е. после процедуры нахождения медианы окна происходит сравнение найденного значения с изначальным значением пикселя. В случае отличия абсолютного значения этих величин на величину порога и более, принимаем решение о том, что пиксель зашумлен.

Нахождение медианного значения в пределах текущего окна не является сложной операцией с точки зрения затрат ресурсов и может быть выполнена в виде сортирующей сети, которая зачастую может быть оптимально реализована при помощи процессорных SIMD инструкций или компараторов на ПЛИС.

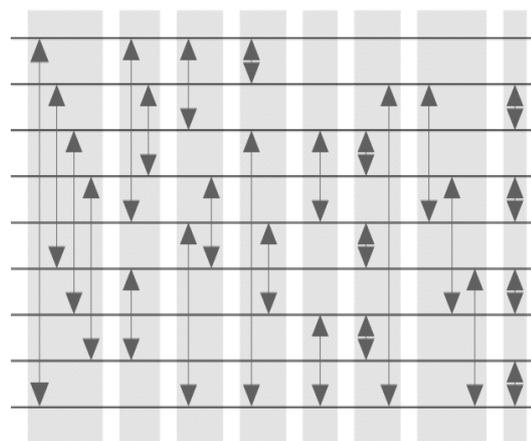


Рис. 1. Структура сортирующей сети Батчера

Блок-схему работы фильтра с пост-фильтрационным принятием решения можно представить в виде диаграммы (рис. 2).

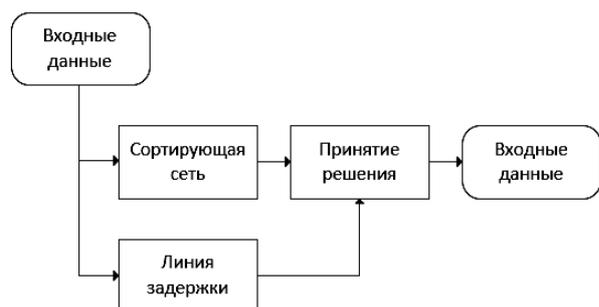


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы фильтра

Благодаря простой структуре фильтр легко поддается конвейеризации на ПЛИС путём реализации сортирующей сети, нахождения разности и операции сравнения. При использовании аппаратуры фильтра 3 и сортирующей сети Батчера [5] на вычисление одного значения будет затрачено:

$$T = T_{sort} + 2 \text{ тактов.} \quad (1)$$

Так как операции необходимые для фильтрации одного окна абсолютно идентичны операциям другого, реализация на современных векторных и VLIW процессорах позволяет рассчитывать несколько окон одновременно с последующим условным сохранением результатов в память.

Методика оценки качества фильтрации

Для оценки качества работы фильтра использовался набор монохромных изображений. Каждое изображение было подвержено зашумлению шумом типа «соль-перец» с интенсивностью от 0 до 95%. После чего оценки сходства подвергались исходное изображение и восстановленное исследуемым фильтром. Пиковое отношение сигнал-шум (PSNR) – наиболее распространенный в литературе метод оценки качества фильтрации изображений на текущий момент. Оценка производится таким образом:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |X(i, j) - K(i, j)|^2 \quad (2)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX_x^2}{MSE} \right) \quad (3)$$

где X, Y – исследуемые изображения; m, n – размеры изображений; MAX_x – максимальное значение сигнала X .

Несмотря на свою популярность, данный метод учитывает величину отклонения сигналов, что в некоторых случаях приводит к высоким показателям сходства, хотя на изображении можно наблюдать существенные различия. Примером такого случая можно считать искажения после сжатия алгоритмом JPEG.

Метод структурного сходства (SSIM) позволяет избежать данного недостатка. Оценка SSIM производилась согласно следующей формуле:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (4)$$

где x, y – исследуемые изображения; μ_x – среднее значение x ; μ_y – среднее значение y ; σ_x^2 – дисперсия x ; σ_y^2 – дисперсия y ; σ_{xy} – ковариация x и y , $c_1 = (0.01L)^2$, $c_2 = (0.03L)^2$, L – динамический диапазон (255 в случае 8-битного сигнала).

В дополнение к данным методам представлена статистика корректности работы детектора шума. Было подсчитано количество зашумленных пикселей в исходном и обработанном изображении. Представлены процентные соотношения обнаруженных, не обнаруженных зашумленных пикселей, а также процент ложных срабатываний детектора.

Аппаратные затраты на реализацию фильтра

Реализация нелинейных адаптивных фильтров на различных аппаратных платформах затруднена в следствии ряда причин. Вот некоторые из них:

- наличие сложных нелинейных связей приводящих к большому количеству ветвлений в программе, которые не позволяют использовать векторные инструкции процессоров;
- наличие сложных с вычислительной точки зрения алгоритмов и операций в составе фильтра (деление, нахождения корня и т.п.);
- наличие циклов оценки каких-либо параметров с выходом из цикла в результате вычислений, что затрудняет развертывание цикла для его ускорения.

Ярким представителем можно считать ASWM [6] фильтр, который сложно конвейеризировать для реализации на ПЛИС.

Реализация фильтра на ПЛИС

Реализация предложенного фильтра на ПЛИС представляет собой реализацию трех модулей: сортирующей сети; линии задержки входного сигнала на время сортировки; блок принятия решения о зашумленности. В данной работе использовалась сортирующая сеть Батчера, которая, в случае апертуры фильтра 3×3 имеет длину 8 тактов, блок принятия решения состоит из компаратора и мультиплексора, т.е. его длина составляет 2 такта. Затраты аппаратных ресурсов ПЛИС приведены в табл. 1. Длина фильтра составляет 10 тактов без учета загрузки и сохранения данных из памяти.

Реализация на ARM NEON

Реализация данного фильтра возможна и на ЦП ARM с набором инструкций NEON или же другим SIMD набором инструкций. Поскольку инструкции оперируют векторами величин, подход к реализации схож с реализацией на ПЛИС. Элементы сравнения обмена сортирующей сети были реализованы при помощи инструкций `vmov_u8`, `vminq_u8` и `vmaxq_u8`, а блок сравнения при помощи инструкций `vcmpneq_u8` и `vshlq_u8`. Таким образом, об-

рабатывается 16 окон входного изображения одновременно. Ввиду того, что для реализации необхо-

димо большое количество регистров финальное ус-
корение несколько меньше и составляет 14.7 раз.

Таблица 1 Затраты аппаратных ресурсов ПЛИС

	MAX 10	Cyclone V	Cyclone IV E	Cyclone IV GX	Cyclone 10
Total logic elements	415	258	417	414	418
Total registers	301	306	301	301	301
Total memory bits	88	104	88	88	88
Multiplier 9-bit	0	0	0	0	0

Ввиду того, что для реализации необходимо большое количество регистров финальное ускорение несколько меньше и составляет 14.7 раз.

Исследование производительности предложенного фильтра

Для сравнения качества детектирования были использованы процентные соотношения для обнаруженных зашумленных пикселей, не обнаруженных зашумленных пикселей, а также пикселей не содержащих шума, но принятых алгоритмом как зашумленных. Для сравнения же итогового качества фильтрации с учетом математических методов обнаружения различий и физиологических аспектов восприятия изображений человеком были использованы PSNR и SSIM метрики (табл. 2).

На рис. 3 и 4 представлены PSNR и SSIM метрики результатов фильтрации для ASWM фильтра,

медианного фильтра (который не содержит алгоритма детектирования) и предложенного фильтра с пороговыми значениями 5, 10, 15, 30.

Как видно из кривых детектор ASWM фильтра проигрывает предложенному (с количеством блоков более 15) на всем исследованном диапазоне величины зашумления.

Предложенный фильтр обладает высоким уровнем качества фильтрации на различных уровнях зашумления импульсным шумом. В структуре фильтра нет сложных с точки зрения вычислительной нагрузки операций, что позволяет реализовать его оптимизированную версию под популярные на текущий момент системы на кристалле, ПЛИС и процессоры с векторной арифметикой. Дальнейший интерес представляет исследование фильтра с другими видами шума, а также исследование влияния изменения апертуры фильтра.

Таблица 2 – Результаты моделирования предложенного фильтра

Ур. шума	Фильтр	Зашумлено, шт	Обнаружено, шт	Обнар., %	Не обнар., %	PSNR	SSIM
0,05	A	12806	12674	98,9	1,0	37,1	0,98
	10	12806	12758	99,6	0,3	33,3	0,94
	20	12806	12758	99,6	0,3	35,4	0,97
	30	12806	12727	99,3	0,6	37,1	0,98
	40	12806	11532	90,0	9,9	36,1	0,95
0,15	A	36502	35619	97,5	2,4	33,6	0,94
	10	36502	36349	99,5	0,4	31,5	0,92
	20	36502	36349	99,5	0,4	32,8	0,96
	30	36502	36240	99,2	0,7	33,8	0,96
	40	36502	32979	90,3	9,6	32,1	0,90
0,30	A	67984	64989	95,5	4,4	30,0	0,88
	10	67984	67676	99,5	0,4	29,3	0,89
	20	67984	67675	99,5	0,4	30,1	0,92
	30	67984	67407	99,1	0,8	30,7	0,93
	40	67984	60917	89,6	10	28,9	0,84
0,45	A	94912	94912	100	0	27,3	0,81
	10	94912	94315	99,3	0,6	27,6	0,85
	20	94912	94315	99,3	0,6	28,1	0,88
	30	94912	93741	98,7	1,2	28,5	0,88
	40	94912	84310	88,8	11	26,7	0,79
0,60	A	118076	106804	90,4	9,5	24,5	0,71
	10	118076	116645	98,7	1,2	25,3	0,78
	20	118076	116638	98,7	1,2	25,7	0,81
	30	118076	115721	98,0	1,9	25,8	0,82
	40	118076	103554	87,7	12	24,4	0,72
0,75	A	138232	119606	86,5	13	21,7	0,60
	10	138232	134400	97,2	2,7	22,6	0,68
	20	138232	134383	97,2	2,7	22,8	0,71
	30	138232	132909	96,1	3,8	22,9	0,71
	40	138232	118329	85,6	14	21,9	0,63
0,90	A	155504	126656	81,4	18	18,9	0,47
	10	155504	146786	94,3	5,6	19,9	0,56
	20	155504	146770	94,3	5,6	20,0	0,58
	30	155504	144377	92,8	7,1	20,0	0,58
	40	155504	128156	82,4	17	19,3	0,51

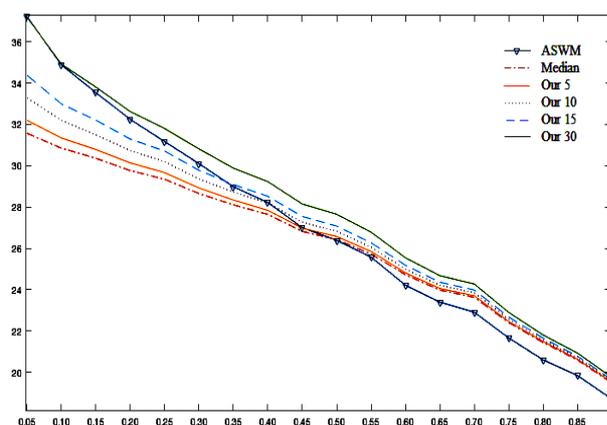


Рис. 3. PSNR пропонуваного фільтра (Our 5, 10, 15, 30), ASWM і медіанного фільтрів для різного рівня зашумлення

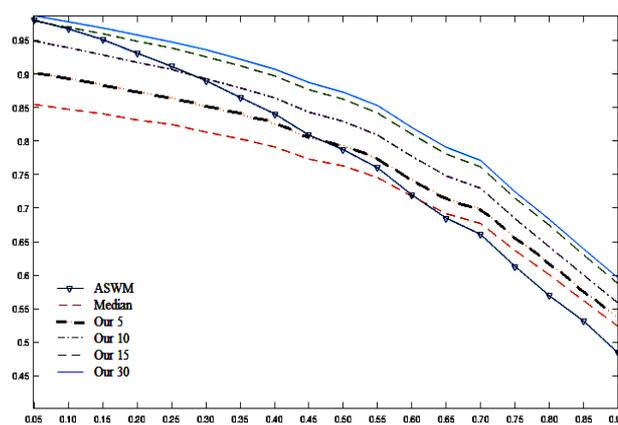


Рис. 4. SSIM пропонуваного фільтра (Our 5, 10, 15, 30), ASWM і медіанного фільтрів для різного рівня зашумлення

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. D. Brownrigg, "The weighted median filter," *Commun. Assoc. Comput. Mach.*, vol. 27, pp. 807–818, Mar. 1984
2. S. J. Ko and Y. H. Lee, "Center weighted median filters and their applications to image enhancement," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 38, pp. 984–993, 1991
3. Y. Dong and S. Xu, "A new directional weighted median filter for removal of random-value impulse noise," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 14, pp. 193–196, Mar. 2007.
4. Zhang S., Karim M.A. A new impulse detector for switching median filters // *IEEE Signal Processing Letters*. 2002. Vol.9. Pp. 360-363.
5. K.E. Batcher Sorting networks and their applications, AFIPS '68 (Spring) Proceedings of the April 30--May 2, 1968, spring joint computer conference, Pages 307-314
6. Smaïl Akkoul, A New Adaptive Switching Median Filter // *IEEE Signal Processing Letters*, Vol 17, 2010, pp. 587 – 590/

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. І. Кондрашов

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Received (Надійшла) 29.11.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.01.2019

Модифікований медіанний фільтр з пост-фільтраційним прийняттям рішення

Д. В. Сальніков, О. Г. Васильченко

Обробка зображень стає однією з найбільш затребуваних областей цифрової обробки сигналів. Дані зображень схильні до зашумлення в процесі зняття з датчика і передачі різноманітними телекомунікаційними каналами. З кожним роком зростає якість і обсяг даних зображень, що істотно ускладнює вимоги до швидкості роботи цифрових фільтрів зображень. На даний момент широкого поширення набули адаптивні фільтри на основі медіанного фільтра, що дозволяють домогтися високих результатів якості фільтрації для різноманітних видів шуму і рівнів зашумлення. Такі фільтри часто містять складні алгоритми детектування зашумлених пікселів, що істотно знижують кількість оброблюваних в секунду кадрів. В даний статті запропоновано алгоритм фільтра з прийняттям рішення про зашумлення після процедури фільтрації який володіє високим рівнем шумозаглушення, а також високою швидкістю роботи. У структурі фільтра немає складних з точки зору обчислювальної навантаження операцій, що дозволяє реалізувати його оптимізовану версію під популярні на поточний момент системи на кристалі, ПЛІС і процесори з векторної арифметикою. Подальший інтерес представляє дослідження фільтра з іншими видами шуму, а також дослідження впливу зміни апертури фільтра.

Ключові слова: фільтрація, медіана, шум, fpga, simd.

Modified median filter with post-filtration decision making

D. Salnikov, O. Vasylychenkov

Image processing becomes one of the most important areas of digital signal processing. Data of images is corrupted with noise in the process of capturing from the sensor and transmitting via various telecommunication channels. Every year, the quality and amount of images data increases. Thus, requirements of processing speed of digital image filters goes up. Adaptive filters based on the median filter have become widespread. They achieve high filtering quality for various types and levels of noise. Such filters often contain complex algorithms for detecting noisy pixels, which significantly reduce number of frames processed per second. In the given article proposed an algorithm of the filter with making decision of pixel noisiness after the filtering procedure, which achieves high filtration quality and speed. In the structure of the filter, there are no complicated in terms of computational load operations, which allows to implement its optimized version for the current popular system on the crystal, FPGAs and processors with vector arithmetic. Further interest is the study of the filter with other types of noise, as well as the study of the effect of changing the aperture of the filter.

Keywords: filtration, median, noise, fpga, simd.