

## **Разработка структуры и реализация деблочного фильтра декодера цифрового телевизионного сигнала высокой четкости стандарта H.264**

### **Structure development and design of the H.264 deblocking filter of HDTV decoder for digital signal**

Александрова Л.А., старший инженер, ЗАО НТЦ "Модуль". Российская Федерация, 125190, Москва, а/я 166  
Тел. 8(499) 1529802 laalexan@module.ru;

Филимонова И.П., инженер, ЗАО НТЦ "Модуль". Российская Федерация, 125190, Москва, а/я 166  
Тел. 8(499) 1529802 ipf@module.ru;

Шевченко П.А., начальник сектора, ЗАО НТЦ "Модуль". Российская Федерация, 125190, Москва, а/я 166  
Тел. 8(499) 1529802 pshvch@module.ru;

**Аннотация:** Данная статья описывает структуру деблочного фильтра, разработанного в ЗАО НТЦ «Модуль», а также реализацию функциональных устройств для блока деблочного фильтра с целью аппаратного ускорения выполнения видео по стандарту H264 (H.264 Standard — ISO-IEC 144496-10). Разработка проводилась по стандартному маршруту проектирования с использованием систем автоматического проектирования (САПР) фирм Cadence и Fujitsu.

**Abstract:** This paper describes the structure of deblocking filter, developed in the RC "Module", as well as the implementation of functional units for the block of deblocking filter to hardware-accelerated video performance on standard H264 (H.264 Standard - ISO-IEC 144496 -10). The development follows the standard route design using computer-aided design (CAD) software of company Cadence and Fujitsu.

**Ключевые слова:** деблочный фильтр (ДБ), фильтрация, стандарт H264, декодер цифрового телевизионного сигнала высокой четкости (ДЦТС ВЧ), макроблок, пиксель, блочные краевые эффекты (артефакты), конвейерный вариант архитектуры деблочного фильтра.

**Ключевые слова:** deblocking filter, filtering, standart H264, HDTV decoder for digital signal, macroblock, pixel, block`s sharp edges (artefact), pipelined filter architecture.

**Введение.** Видеоинформация, поступающая на вход декодера телевизионного сигнала, обрабатывается в соответствии со стандартом H.264/AVC, который допускает определенную степень компрессионного сжатия данных и одновременно обеспечивает уменьшение сложности вычислений без значительных потерь производительности и качества данных. Архитектура декодера должна поддерживать процесс обработки цифрового телевизионного сигнала высокой четкости HDTV 1920 x 1080 пикселей 30 кадров/сек на 180МГц. Деблочный фильтр является важной частью процесса декодирования, так как улучшает качество декодированных кадров и занимает по некоторым оценкам более 30% от общего времени декодирования. Процесс фильтрации запускается после реконструкции кадра. Программная реализация ДБ занимает примерно 3000 – 6000 циклов процессора, что делает задачу фильтрации аппаратными методами особенно актуальной.

Задача фильтрации на макроблочной основе (16 x 16 пикселей) осложняется зависимостью данных как текущего макроблока от соседних, так и зависимостью блочных (4 x 4 пикселей) данных внутри макроблока.

Фильтрация производится по вертикальным и горизонтальным границам блоков с перекрытием и сглаживает блочные краевые эффекты (артефакты) после приема и декодирования после сжатия.

Порядок фильтрации по границам определяется стандартом. Применение конвейерной обработки при реализации фильтра позволяет существенно сократить занимаемое оборудование и понизить мощность рассеяния и затраты времени на фильтрацию.

Целью данной работы является разработка конвейерного варианта архитектуры ДФ для СБИС ДЦТС ВЧ.

Анализируется алгоритм фильтрации монохроматических и цветоразностных блоков, рассматриваются основные режимы фильтрации. Анализируются полученные результаты.

ДФ предназначен для использования в системе на кристалле, построенной на основе интерфейса AMBA 3 AXI. Для хранения исходных данных и результатов фильтрации предполагается использование внешней памяти с использованием механизма ПДП.

Результатом работы является синтезируемая RTL-модель ДФ декодера, применяемого в СБИС в составе цифрового декодера (цифровой приставки), подключаемого к аналоговому телевизору и преобразующего цифровой сигнал в подходящий для приема аналоговым телевизором вид.

Данная работа должна решить проблему замещения дорогих лицензированных импортных ДБФ-блоков в области обработки и получения изображения высокого разрешения.

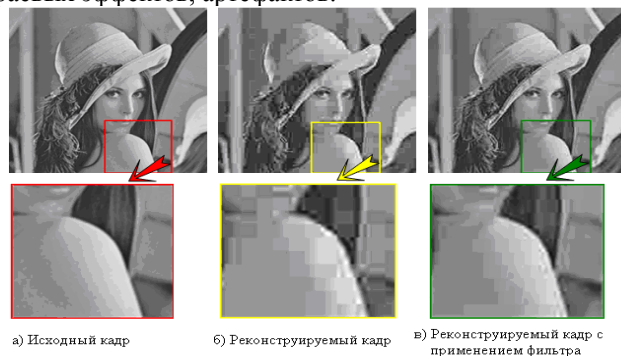
**Причины возникновения блочных артефактов.** Существует несколько причин возникновения блочных артефактов, с которыми приходится бороться ДФ. Как правило, видимые искажения изображения наиболее заметны на границе двух соседних блоков, рассматриваемых в архитектуре стандарта видеокодирования H.264/MPEG-4 AVC. Наиболее чувствительным к артефактам являются те макроблоки, которые были получены в результате целочисленного дискретно-косинусного преобразования (DCTs) в моде *inter* и *intra* для создания кадра-прогноза. Второй источник появления блочных артефактов может быть связан с методом компенсации движения. Поскольку практически невозможно точно восстановить данные, то, как правило, появляются разрывы на границах фиксированного блока данных. Несмотря на то, что процесс компрессии и декомпрессии происходит с малыми блоками размером 4x4, используемыми в H.264/MPEG-4 AVC, и это несколько способствует снижению проблем возникновения блочных артефактов, ДФ по-прежнему является выгодным инструментом для максимальной эффективности кодирования.

Отфильтрованное изображение наиболее точно соответствует исходному кадру, впоследствии для создания более точных прогнозов его используют в качестве ссылочного кадра.

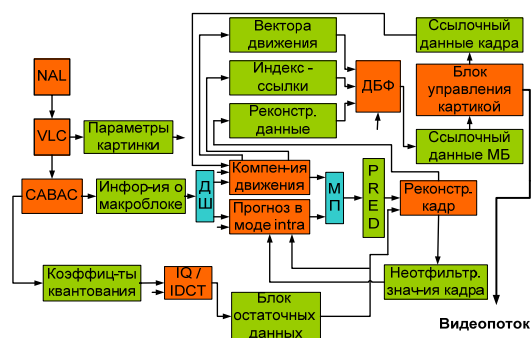
**Требования к ДФ.** ДФ как часть процесса декодирования кадров должен выполнять следующие функции:

- реализация простых операций по выявлению и анализу блочных артефактов на закодированных границах блока;
- обработка и получение изображения высокого разрешения в соответствии со стандартом H.264;
- улучшение качества декодированных данных в соответствии со стандартом H.264 за счет сглаживания блочных краевых эффектов, артефактов. .

На рисунке 1 представлен результат применения ДФ, на котором происходит сглаживание блочных краевых эффектов, артефактов.



**Рисунок 1. — Улучшение качества декодированных данных**



**Рисунок 2. — Программно-аппаратная реализация декодера**

Основной задачей ДФ является фильтрация на макроблочной основе по вертикальным и горизонтальным границам блоков с их перекрытием в соответствие со стандартом H.264.

Устройство ДФ, рассматриваемое в этой работе, должно отвечать следующим основным требованиям:

- загрузка видео данных и управляющей информации через 64-разрядную шину данных;
- возможность блокировки работы ДФ процессором DSP;
- обработка данных должна соответствовать стандарту H.264/AVC;
- задача фильтрации должна занимать не более 30% от общего времени декодирования;
- необходимо минимизировать размер блока.

**Взаимосвязь ДФ с остальными блоками ДЦТС ВЧ.** На рис.2 представлена программно-аппаратная реализация декодера, где наиболее подробно можно рассмотреть взаимосвязь ДФ с другими частями системы декодера.

*Голубой цвет (Software)* – программное обеспечение, *красный цвет (Hardware)* – аппаратная реализация, *зеленый цвет (Memory)* – память. На вход устройству ДФ подаются данные:

1. Параметры и пороги, задаваемые стандартом H.264. Этот набор констант определяет условия фильтрации;
2. Индексы ссылок для разных ссылочных кадров или разного числа ссылочных кадров;
3. Набор векторов движения, необходимый для определения интенсивности фильтрации;
4. Данные реконструируемого кадра, которые необходимо отфильтровать.

Выходными данными являются отфильтрованные данные кадра, которые впоследствии используются как ссылочные, обеспечивая при этом более высокое качество прогнозирования векторов компенсации движения, так как являются наиболее точной репродукцией для текущих областей.

**Древовидная структура данных, основные области входных данных.** В [1]-[2], процесс фильтрации применяется непосредственно к макроблоку. Каждый макроблок может быть разбит на части 4 способами:  $16 \times 16$ ,  $16 \times 8$ ,  $8 \times 16$ ,  $8 \times 8$ . На рисунке 3 показана древовидная структура макроблока. Выбрано разбиение  $8 \times 8$ , при этом каждый из четырех подмакроблоков (размером  $8 \times 8$  точек) также может быть разбит на несколько частей:  $4 \times 8$ ,  $8 \times 4$  или  $4 \times 4$ .

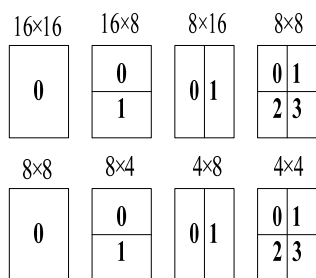
Эти способы разделения на подмакроблоки дают возможность кодеру адаптироваться к сложности движения в конкретном участке кадра и динамически изменять точность компенсации движения для обеспечения заданной скорости цифрового потока при лучшем качестве.

На рисунке 4 показан порядок фильтрации макроблоков. Предоставленное изображение соответствует размеру  $144 \times 176$ . Один кадр состоит из 99 макроблоков размером  $16 \times 16$ . Каждый макроблок расположен в последовательности растрового сканирования, начиная от верхнего левого угла.

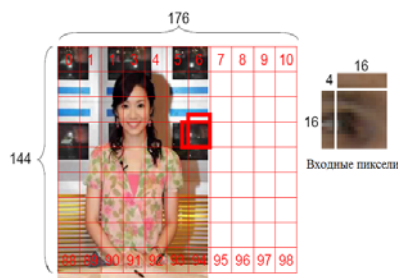
В [2]–[3] все входные пиксели могут находиться в трех заданных областях. Первая, основная область — это поле для монохроматического макроблока - размером  $16 \times 16$  пикселей, для цветоразностных данных —  $8 \times 8$  для обоих компонент (U, V). В данное поле записываются входные значения, поступающие на вход ДФ.

Существуют две дополнительные области, необходимые для организации правильности работы устройства при фильтрации первой горизонтальной и вертикальной границ: LEFT - размером  $16 \times 4$  для монохроматических данных,  $8 \times 2$  - для цветоразностных данных, массив необходим для хранения отфильтрованных значений предыдущего соседнего макроблока, стоящего в одной и той же строке, и TOP размером области  $4 \times 16$  для монохроматических данных пикселей,  $2 \times 8$  пикселей для цветоразностных

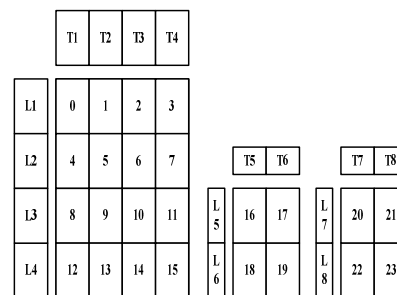
данных, массив предназначен для запоминания отфильтрованных значений макроблока, стоящего строкой выше.



**Рисунок 3. — Древоидная структура макроблока**



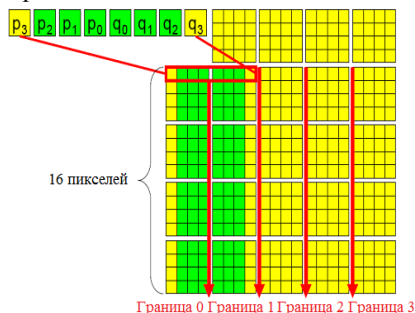
**Рисунок 4. — Порядок фильтрации (растровое сканирование)**



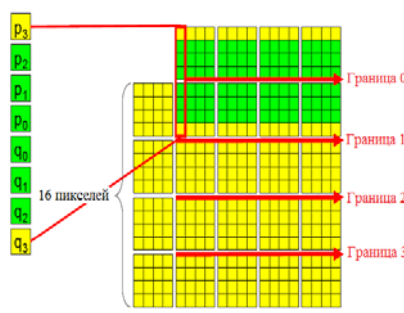
**Рисунок 5. — Разбиение макроблока монохроматических и цветоразностных данных на области**

Разбиение макроблока монохроматических и цветоразностных данных на области приведено на рис. 5. **Режимы и условия фильтрации.** В стандарте H.264/AVC определено направление и порядок фильтрации для каждого блока 4x4 в макроблоке. По умолчанию выполняются следующие операции фильтрации (при этом у кодера имеется возможность изменять интенсивность фильтрации или отключать фильтр):

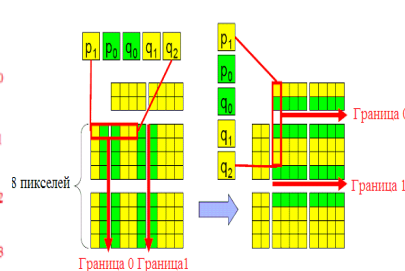
- Фильтрация четырех вертикальных границ компоненты яркости показана на рис. 6.
- Фильтрация четырех горизонтальных границ компоненты яркости приведена на рис.7.
- Фильтрация двух вертикальных и двух горизонтальных границ компонент хроматичности изображена на рис. 8.



**Рисунок 6. — Фильтрация вертикальной границы монохроматического макроблока**



**Рисунок 7. — Фильтрация горизонтальной границы монохроматического макроблока**



**Рисунок 8. — Фильтрация вертикальной и горизонтальной границы цветоразностного макроблока**

**Условия фильтрации.** Группа пикселей из множества  $(p_2, p_1, p_0$  и  $q_0, q_1, q_2)$  подвергается фильтрации, если  $bs > 0$  и  $|p_0 - q_0| < \alpha$ ,  $|p_1 - p_0| < \beta$ ,  $|q_1 - q_0| < \beta$ . Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  – пороги, задаваемые стандартом. Невыполнение условия фильтрации «отключает» фильтр.

**Граничная интенсивность.** Процесс фильтрации начинается с вычисления граничной силы для каждого блока 4x4 и зависит от условий кодирования и значений пикселей. Выбор результирующего фильтра зависит от граничной силы и градиента значений пикселей вдоль границы. Граничная сила  $bs$  ( boundary strength ) может изменяться от 0 до 4. Для значения  $bs = 4$  до 3 пикселей  $p$  и  $q$  с каждой стороны будет изменяться, для значений 1-3 – до 2-х пикселей.  $bs = 0$  означает отсутствие фильтрации.

На рисунке 9 показываются основные правила выбора параметра граничной силы  $bs$  (boundary Strength). Вычисляемое значение параметра граничной силы во многом зависит от типа макроблока, близости местонахождения от границы блока, от типа ссылочных кадров и от векторов движения двух соседних блоков. Чем больше  $bs$ , тем сильнее интенсивность фильтрации.

Только одно значение граничной силы  $bs$  соответствует вертикальной или горизонтальной границе блока размером 4x4. Значения граничной силы  $bs$  для процесса горизонтальной фильтрации монохроматических и цветоразностных данных в макроблоке показаны на рисунке 10. Значения граничной силы  $bs$  для процесса вертикальной фильтрации монохроматических и цветоразностных данных в макроблоке показаны на рисунке 11.

**Интерфейс устройства ДФ.** Для фильтрации пикселей макроблока необходимо на вход ДФ подать:

- поток реконструируемых данных, представленных в виде блоков размером 4x4;
- значения параметров граничных сил  $bs$ , вычисляемых с помощью векторов движения различных ссылочных кадров, параметров картинки и макроблока, индексов ссылок;
- среднее значение параметра квантователя  $QP$  двух макроблоков  $p$  и  $q$ .

Выходными значениями для макроблока является поток отфильтрованных значений, поступающих на 64-разрядную шину данных. На рисунке 12 представлен интерфейс ДФ.

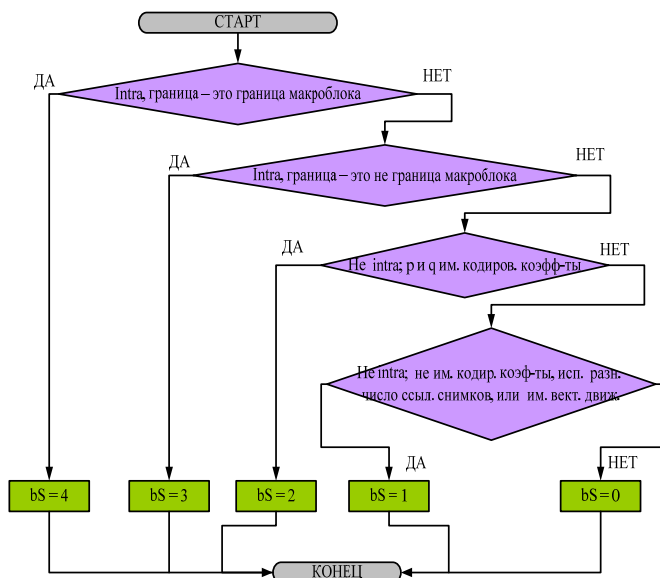


Рисунок 9. — Выбор значений параметра граничной силы bS (boundary Strength)

**Предлагаемая архитектура устройства ДФ.** В предшествующих работах рассматривался один фильтр, который последовательно выполнял горизонтальную и вертикальную фильтрацию [6]. Для повышения производительности было введено два идентичных фильтра [7] для горизонтальной и вертикальной фильтрации, позволяющие одновременно, синхронно в конвейерном режиме фильтровать вертикальные и горизонтальные границы. На рис.13 показаны основные блоки для реализации данной архитектуры, где все входные данные 64 – битные (8 пикселей).

**Реализация процедуры монохроматической и цветоразностной фильтрации.** Алгоритм фильтрации для p-пикселей предыдущего вертикального столбца (горизонтальной строки) и q-пикселей текущего столбца (строки) блока приведен на рис. 14.

**Общая структурная схема конвейерной модели ДФ.** На Рис. 15 представлена структурная схема конвейерной модели деблочного фильтра. Работа аппаратного деблочного фильтра состоит из нескольких стадий. На первой стадии исходные данные загружаются в соответствующие буферные памяти макроблока для массивов векторов движения, массивов адресных ссылок и набора регистров. После загрузки параметров макроблоков и картинки рассчитываются значения граничной силы для соответствующего количества вертикальных и горизонтальных границ текущего макроблока. Подкачка векторов движения и массивов ссылок для макроблока производится до начала процесса фильтрации. Подкачка массивов данных может быть совмещена с процессом фильтрации. Рассмотрим процесс фильтрации для одного монохроматического макроблока в нормальном режиме.

Устройство состоит из 2-х уровней конвейера – на первый уровень в каждом такте подаются данные одного блока для фильтрации вертикальной границы каждого блока в строке (0,1,2,3 или 4,5,6,7 и т.д.). За 4 такта обрабатывается вертикальная граница 4 блоков в растровом режиме. Данные 3,7,12, 15 блоков через каждые 4 такта поблочно переписываются в память Left\_memory 4 x16 для фильтрации следующего макроблока.

На 2-ой уровень конвейера поступает результат вертикальной фильтрации каждого блока с начальной задержкой, вызванной тем, что текущий блок фильтруется дважды - для левой и правой вертикальной границы. Буферная память TOP-мемору 4 X16 к моменту начала горизонтальной фильтрации первого блока считается загруженной TOP- данными предыдущего блока. Каждые 4 такта обрабатывается одна горизонтальная граница

Каждый такт отфильтрованные данные (current) загружаются в TOP-мемору для того, чтобы стать TOP-данными для следующей горизонтальной границы (0,1,2,3 или 4,5,6,7 или 8,9,10,11) и поступают на выход схемы. Запись последней строки (блоки 12.13.14.15) в TOP-мемору не производится, т.к. в растровом режиме не используется для фильтрации следующего макроблока, а аналогично другим отфильтрованным блокам горизонтальной границы выгружается в память для временного хранения. Во время записи этих данных в TOP-мемору производится загрузка новой TOP-строки из памяти для фильтрации следующего макроблока.

Данная структурная схема модели деблочного фильтра предоставляет:

- улучшенную организацию памяти при использовании собственной памяти при хранении данных;
- новый порядок фильтрования с использованием местной памяти для хранения данных и уменьшением времени загрузки данных;
- работа фильтра обеспечивается в конвейерном режиме.

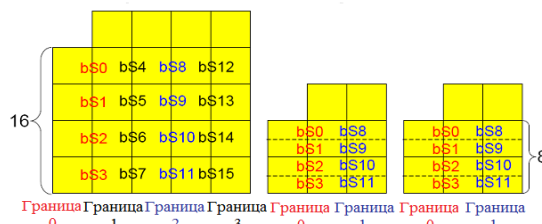


Рисунок 10. — Значение граничной силы bS для процесса горизонтальной фильтрации вертикальных границ

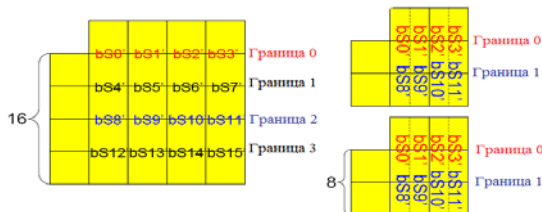


Рисунок 11. — Значение bS для процесса вертикальной фильтрации горизонтальных границ

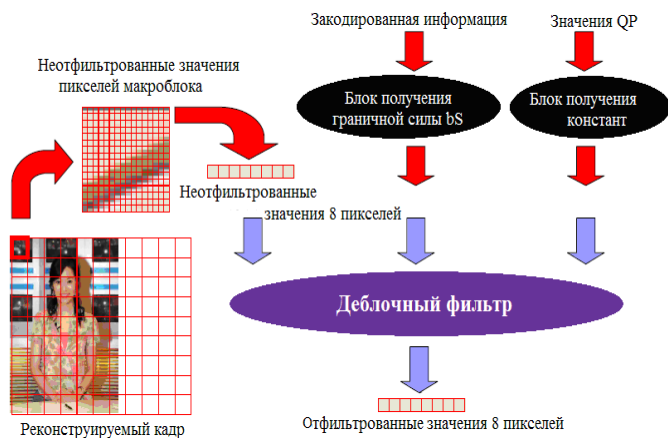


Рисунок 12 — Интерфейс ДФ

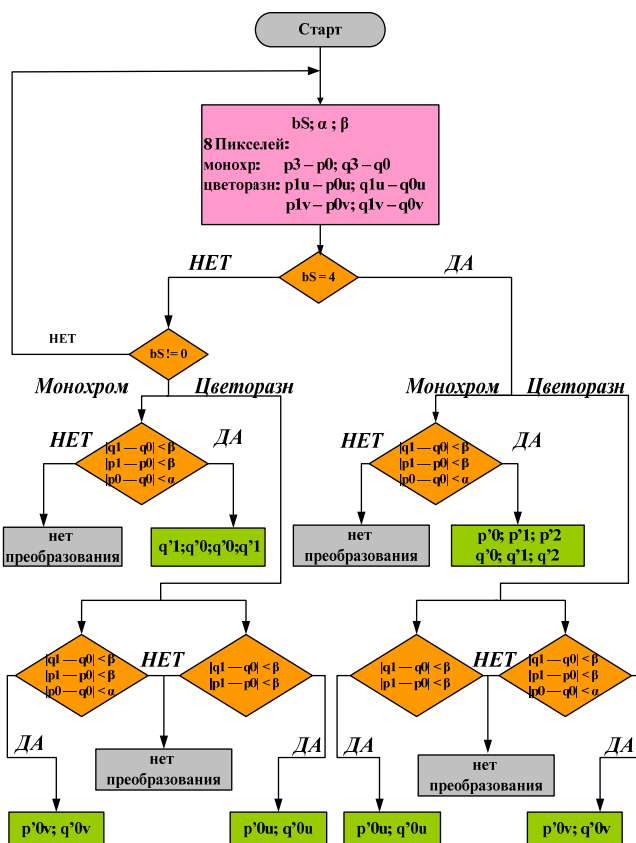


Рисунок 14. — Блок-схема алгоритма монохроматической и цветоразностной фильтрации

**Заключение.** Авторы считают, что в данной работе новым является следующее положение и результат: — выбрана архитектура, которая затрачивает небольшое количество циклов фильтрации на макроблок и увеличивает пропускную способность при технологии в 90 нм.

Для сравнения в таблице 1 приведены параметры ранее разработанных деблочных фильтров с различной архитектурой.

В процессе выполнения данной работы были проведены следующие исследования:

- рассмотрена реализация различных вариантов функциональных устройств блока ДФ, в том числе: систем загрузки и хранения данных для ДФ, функций фильтрации групп точек с целью разработки RTL модели ДФ;
- исследованы варианты аппаратной реализации ДФ для СБИС ДЦТС ВЧ в виде отдельного блока. Также были определены: основные требования к структуре ДФ, состав и назначение внешних выводов, количество внутренних управляющих сигналов и их назначение.
- Разработаны архитектура и структура ДФ;
- Разработана электрическая принципиальная схема ДФ;
- Проведено функциональное тестирование ДФ;
- Оценены параметры блока ДФ для выбранной технологии.

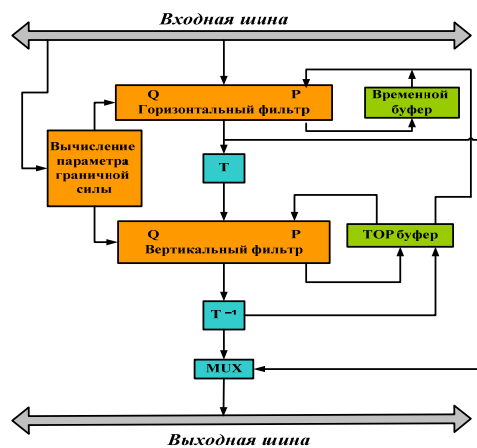


Рисунок – 13. Блок - схема предлагаемой архитектуры

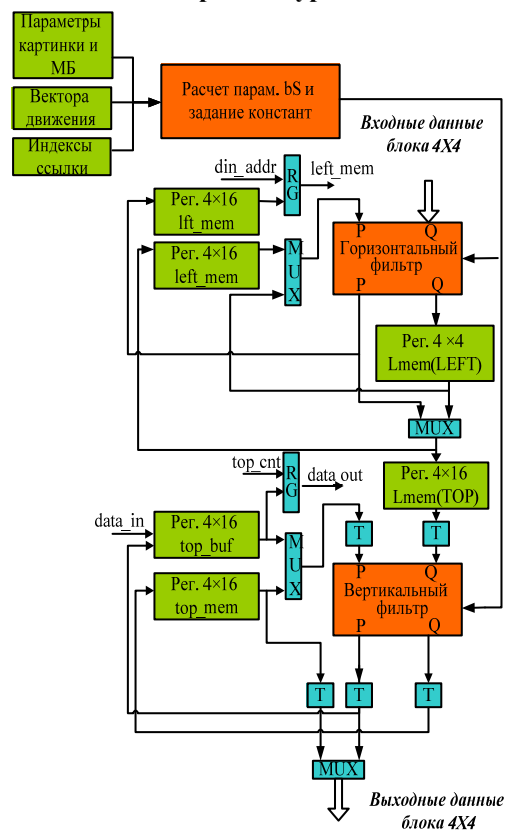


Рисунок – 15. Структурная схема конвейерной модели ДФ

**Таблица 1 Сравнение деблочных фильтров с различной структурой и архитектурой**

	Wu's '04	Yu's '04	Lee's '05	S-Y. Shih's C-R. Chang's Y-L. Lin's '06	Предлагаемый вариант деблочного фильтра
Число циклов на макроблок	446	288	250	214	410
Число циклов фильтрации на макроблок	192	236	250	200	202
Память SRAM для хранения данных	256×32 бита	240×32 бита	292×32 бита	220×32 бита	96×32 бита
Количество фильтров	1	1	1	1 конвейерная структура	2 конвейерная структура
Пропускная способность 1280×720p 100/180 МГц	1,92 мкс	2,36 мкс	2,5 мкс	2,0 мкс	1,12 мкс
Разрабатываемая технология	0.25	0.18	0.18	0.18	0,09
Степень интеграции	24К	19.5К	19.6К	20.9К	31К

В результате выполнения данной работы разработан блок ДФ для СБИС ДЦТС ВЧ, полностью удовлетворяющий техническим требованиям.

Разработанный блок ДФ для СБИС ДЦТС ВЧ позволяет:

- осуществлять обработку данных в соответствии со стандартом H.264/AVC частотой работы процессора ЦОС NM6403 - 180 МГц;
- осуществлять обмен 64-разрядными словами с внешней и внутренней памятью процессора под управлением контроллера ПДП с частотой 180 МГц;
- блокировать работу деблочного фильтра по сигналу процессора ЦОС NM6403.

Степень интеграции ДФ составила 31К эквивалентных вентилях. Мощность, потребляемая ДФ, не превышает 0.01 Вт.

**Список используемой литературы.**

- [1] H264.DEC file of Heinrich\_Hertz-Institut , Benno Stabernack, Heiko Huebert.
- [2] S.-Y. Shih, C.-R. Chang, and Y.-L. Lin, "A Near Optimal Deblocking Filter for H.264 Advanced Video Coding," Asia and South Pacific Conf. on Design Automation, 2006, pp. 170-175
- [3] Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services, ITU-T Rec. H.264/ISO/IEC 14496-10, Mar. 2005
- [4] C.-C. Cheng and T.-S. Chang, "An Hardware Efficient Deblocking Filter for H.264/AVC," IEEE Int. Conf. on Consumer Electronics, 2005, pp. 235-236.
- [5] S.-C. Chang, W.-H. Peng, S.-H. Wang, and T. Chiang, "A Platform Based Bus-Interleaved Architecture for Deblocking Filter in H.264/MPEG-4 AVC," IEEE Trans. on Consumer Electronics, vol. 51, no. 1, 2005, pp. 249-255.
- [6] H.264/AVC Reference Software: <http://iphome.hhi.de/suehring/tml/index.htm>
- [7] S. Lopez, F. Tobajas, G. M. Callico, P.A. Perez, V de Armas, J.F. Lopez and R/ Sarmiento "A Novel High Performance Architecture for H.264/AVC Deblocking Filtering", ETRI Journal Volume 29, Number 3, June 2007