

2. ШУМ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

2.1. Источники шумов на цифровых изображениях

2.1.1. Технология производства фоточувствительной матрицы

Шум на изображениях представляет собой некоторый набор дефектов в полученном кадре, которые проявляются в виде хаотично расположенных элементов раstra (пикселей), имеющих размер близкий к размеру пикселя. Особенно он заметен на однотонных поверхностях – небо, кожа, участки теней.

Природа шума многообразна, но основным его источником в современной цифровой камере является сам фотоприемник. К числу «постоянных» шумов, характер которых не меняется от кадра к кадру, можно отнести наличие «горячих» и «битых» пикселей на матрице, число которых зависит от технологического процесса на заводе изготовителя.

На месте «битых» пикселей в кадре всегда будут наблюдаться темные точки. Это связано с различными дефектами в полупроводниковой подложке, которые возникают в процессе обработки, или обусловлены наличием различных примесей в ней из-за недостаточной степени очистки кремниевой пластины, а также дефектами потенциального барьера, возникающего на этапах формирования структуры фоточувствительной области, которые вызывают утечку накопленного заряда в объем полупроводниковой пластины.

На рисунке 2.1 показан снимок с фотокамеры, у которой в центре матрицы сосредоточено большое число «битых» пикселей, что выражается в виде большого черного пятна на изображении.

В отличие от «битых» пикселей, так называемые «горячие» (hot) пикселы проявляются только при длительных выдержках, когда фоточув-



Рисунок 2.1 – «Битые» пиксели в сенсоре фотоаппарата

ствительная матрица заметно нагревается. Проявляться горячие пиксели могут в виде ярких точек, расположенных на одном и том же месте от кадра к кадру. Как видно из рисунка 2.2., при низкой температуре самой матрицы никаких артефактов не наблюдается. Однако при повышении температуры до уровня комнатной температуры становятся заметны яркие пиксели, и при дальнейшем увеличении температуры сенсора количество и размер ярких белых пятен продолжает расти, причем зависимость носит явно нелинейный характер.



Рисунок 2.2 – Проявление «горячих» пикселей при прогреве матрицы

2.1.2. Физические процессы при накоплении и считывания кадра

Помимо «битых» и «горячих» пикселей, которые относятся к «постоянному» типу шумов, на изображении присутствуют также и «случайные» шумы. Их наличие обусловлено физическими процессами, происходящими в процессе работы самой матрицы. К числу основных составляющих данного типа шума можно отнести:

- Фотонный шум (также дробовой или пуассоновский);
- Тепловой шум;
- Шум считывания;
- Шум квантования;

Фотонный шум является следствием дискретной природы света. Число квантов энергии, попадающих на фоточувствительную поверхность матрицы, флуктуирует. Интенсивность фотонного шума равна квадратному корню из количества сигнальных фотонов и она определяет максимальный уровень отношения сигнал/шум, который может быть достигнут в

идеальных условиях для не шумящего фотоприемника, так как этот тип шума невозможно ликвидировать. И в отличие от теплового шума, рассматриваемого далее, его уровень никак не зависит от температуры и прочих условий.

Распределение значений уровня фотонного шума представляет собой распределение по Пуассону, которое при высоких значениях математического ожидания вырождается в нормальное распределение Гаусса. Визуально на изображениях фотонный шум проявляется также как и белый шум, т.е. появляется ощущение, что на поверхности изображения присутствует мелкий песок (рисунок 2.3).



Исходное изображение



Добавлен пуассоновский шум

Рисунок 2.3 – Визуальное проявление фотонного шума на изображении

Тепловой же шум связан с термоэлектронной эмиссией, происходящей в полупроводниковой подложке, из которой изготавливаются фоточувствительные матрицы. В результате тепловых колебаний атомов кристаллической решетки полупроводника могут высвобождаться свободные электроны, которые затем накапливаются в потенциальных ямах вместе с основным информационным зарядом. Поэтому даже в условиях полного отсутствия освещения в потенциальных ямах будет скапливаться ненулевой уровень заряда (рисунок 2.4).

Основной причиной возникновения так называемого «темнового тока» является наличие примесей в кремниевой пластине либо повреждения структуры кристаллической решетки, образовавшиеся на этапах подготов-

ки полупроводниковой пластины. Чем меньше примесей, тем меньше будет уровень темнового тока.

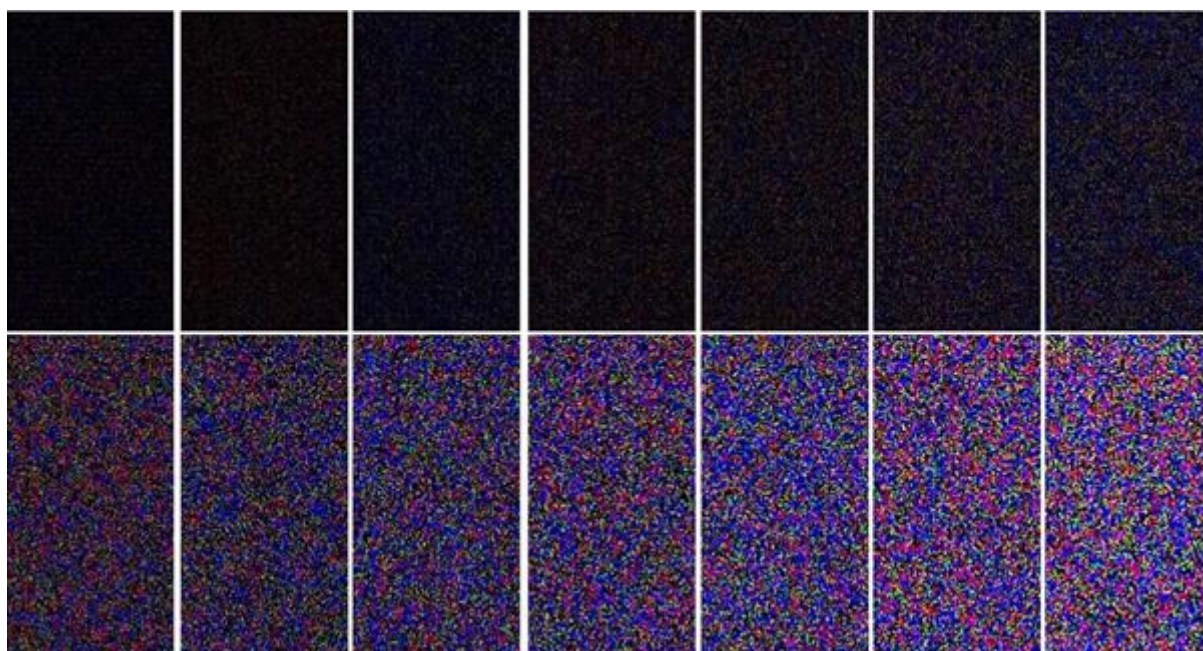


Рисунок 2.4 – Проявление тепловых шумов при различном времени экспозиции в условиях полного отсутствия внешнего освещения

Скорость формирования темнового заряда никак не связана с информационным зарядом, который индуцируется падающими фотонами, что вносит некоторую неопределенность в его величину, накопленную за определенный промежуток времени, и не позволяет просто вычесть его уровень при считывании зарядового пакета. Однако величина накопленного заряда сильно зависит от температуры подложки. Например, при охлаждении температуры матрицы на 6-8 градусов величина темнового тока падает в 2 раза, поэтому для получения качественного снимка с низким уровнем теплового шума камеры часто принудительно охлаждают во время использования. Охлаждение подложки до температуры всего лишь -30 градусов по Цельсию снижает влияние темнового тока практически до пренебрежимо малого уровня.

Также следует отдельно отметить, что визуальное проявление наличия темнового тока на изображении будет расти, при условии постоянства температуры, с увеличением времени накопления кадра, так как увеличивается время накопления шумового заряда в том числе.

Еще одним источником шумов на изображении является шум считывания, который добавляется к информационному сигналу предварительным усилителем в процессе преобразования уровня накопленного заряда в сигнал напряжения. Производители часто указывают его среднее (средне-квадратическое) значение, выраженное в количестве электронов на пиксел для каждой конкретной линейки сенсоров.

Данный вид шума является частотно-зависимым, поэтому с увеличением скорости считывания зарядовых пакетов увеличивается уровень добавляемого шума. Возрастание уровня шума при высоких скоростях считывания частично является следствием необходимости обеспечения большей полосы пропускания усилителя для увеличения частоты тактирования матрицы.

Как и в случае с темновым шумом, частично снизить его влияние позволяет охлаждение полупроводниковой подложки матрицы. Однако в современных сенсорах предусмотрен немного иной подход устранения шума считывания. Одним из способов обеспечения высокой скорости считывания кадра без соответствующего увеличения уровня шума является разделение кадра на несколько сегментов и передача их по различным каналам одновременно. Например, в современных матрицах компании Sony может быть предусмотрено до 4 параллельных каналов для считывания данных.

В отличие от ПЗС-матриц для КМОП-матриц характерно наличие еще одного дополнительного источника шума. Он обусловлен необходимостью преобразования уровня выходного сигнала в цифровой код при помощи АЦП. Уровень вносимого шума будет напрямую зависеть от его разрядности, так как из-за квантования уровней величина считанного заряда будет округлена до целого значения, которое способно выдать АЦП.

Снижение шума квантования возможно благодаря использованию высококачественных АЦП с большой разрядностью.

2.1.3. Кодирование цветного изображения

Большинство современных фото- и видеокамер, которые позволяют получать цветные снимки, на самом деле реализованы в виде обычной светочувствительной матрицы, на которую накладывается специальный слой, состоящий из массива цветных светофильтров. Структура мозаики может

быть различной, существует множество способов их организации, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Однако ввиду такого подхода часть пикселей в каждом цветовом канале окажется пустой. Для компенсации этого недостатка значения соседних пикселей необходимо каким-либо образом заполнить. Чаще всего осуществляют операцию интерполяции или простое замещение всей окрестности центрального пиксела его значением. Поэтому заметно падает разрешающая способность на изображении в цвете и становится возможным появление на изображении различных артефактов (муаров), которые проявляются в виде цветных пятен или иных структур на изображении. В зависимости от выбранной структуры мозаичного фильтра артефакты проявляются по-разному (рисунок 2.5).

Также стоит отметить, что в цветном изображении для каждого цветового канала шум может иметь разную интенсивность. Изначально все пиксели на изображении одинаково подвержены шуму, но после коррекции изображения, в том числе изменения баланса белого, в канале, где был увеличен средний уровень интенсивности, увеличивается и уровень шума.

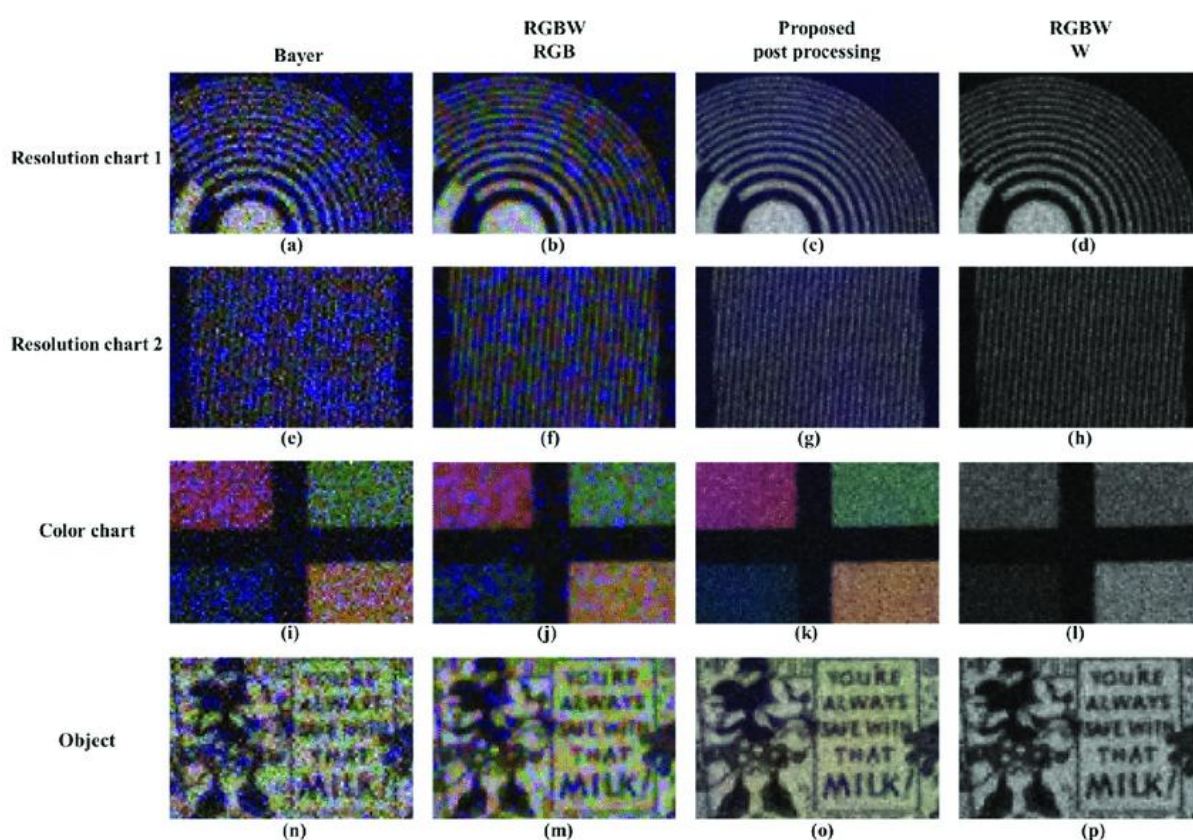


Рисунок 2.5 – Цветные муары после интерполяции каналов для различных структур мозаичных фильтров

2.1.4. Канал связи

Отдельно можно выделить тип шумов, который обычно обусловлен необходимостью передачи изображения по внешним каналам связи. Мощное импульсное воздействие различных электромагнитных помех, грозовых разрядов и т.д. может исказить передаваемую во внешней среде информацию или даже полностью поглотить часть передаваемого сигнала. В таком случае на приемной стороне на месте пропавших пикселей наблюдаются черные точки, следствие отсутствия информации о потерянном пикселе, а в тех местах, где импульсная помеха многократно увеличила уровень сигнала, будет иметь место белый пиксел с максимально возможной яркостью (рисунок 2.6). Такой вид искажений относят к разряду импульсных шумов.



Рисунок 2.6 – Результат воздействия импульсной помехи

Для минимизации риска потери информации в таких случаях целесообразно использовать различные алгоритмы кодирования цифровых и аналоговых сигналов перед их передачей во внешнюю среду. Также возможна коррекция последствий воздействия импульсной помехи различными программными методами с применением специальных алгоритмов фильтрации, например, обработка медианным фильтром.

2.2. Алгоритмы шумоподавления

2.2.1. Классификация алгоритмов шумоподавления

Так как накопленный в потенциальной яме заряд, порожденный источниками шума, невозможно отличить от сигнала, порожденного фотонами, необходимо рассмотреть природу и способы борьбы с возникающими шумами.

Цифровой шум на изображении портит восприятие кадра пользователем, а также может существенно снизить качество работы алгоритмов компьютерного зрения, так как любая шумовая составляющая вносит дополнительный объем данных для классификации объектов, поиска точек интереса и т.д. Поэтому вопрос шумоподавления особо актуален для предварительной обработки фото- и видео- кадров в таких системах.

Существуют всевозможные способы подавления цифрового шума на уровне сенсора, трактов цифрового фотоаппарата и при дальнейшей цифровой обработке.

Аппаратные способы борьбы с шумами мы рассмотрели.

Однако нас интересует процесс шумоподавления цифрового стохастического шума при постобработке.

Существует большое число алгоритмов для фильтрации шумов на двумерном изображении.

Классификация подходов в алгоритмах шумоподавления может быть достаточно сложной, так как часто подходы комбинируются с целью достижения лучших результатов. Причем каждый подход оправдывает себя в тех или иных условиях, которые характеризуются разным уровнем шумов, его природой и условий получения самого изображения (яркий солнечный день или полночь, и т.д.).

Однако из всего многообразия мы классифицируем алгоритмы по способу обработки видеоряда, за счет появления компоненты времени, можно усложнять обработку используя корреляционную зависимость между соседними кадрами и т.д.

Мы разделим известные алгоритмы по 2 параметрам: по способу фильтрации в пространстве и времени, и способности к интеллектуальной обработке кадра для учета его особенностей. Диаграмма классификации представлена на рисунке 2.6.

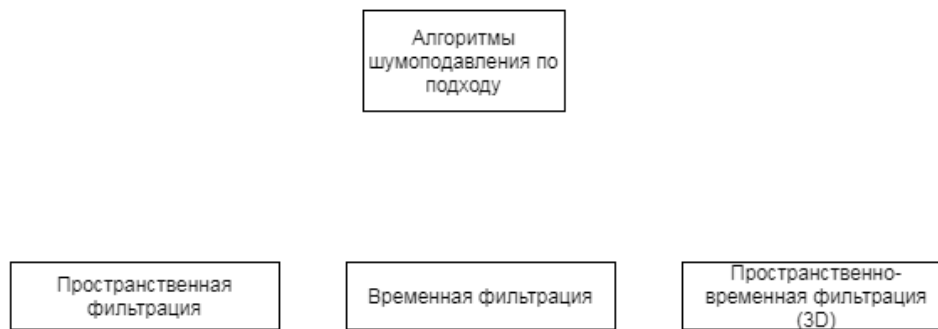


Рисунок 2.6 – Классификация алгоритмов по подходу к классификации

Выделяют следующие методы шумоподавления видео:

- Пространственные методы — алгоритмы шумоподавления изображения применяются для каждого кадра отдельно.
- Временные методы — усреднение между несколькими последовательно идущими кадрами. Могут появляться артефакты в виде раздвоения изображения.
- Пространственно-временные методы — так называемая 3D-фильтрация, сочетают оба метода, основаны на пространственно-временной корреляции изображения.

Временные методы достаточно просты с точки зрения подхода. Если шум имеет случайный характер, то накопив несколько кадров и соответствующим образом их сложив, мы снизим шумовую компоненту на изображении. Так как в одном кадре в каком-то пикселе присутствует шумовой выброс, но на других кадрах его, и при сложении результирующий пиксел будет содержать в значительной степени меньше шумов.

В настоящее время основными способами шумоподавления являются технологии класса 2DNR и 3DNR. Двумерное шумоподавление 2DNR, разделяется на: пространственное, временное. Первое из которых создает основной упор на тщательном анализе изображений исключительно в пространственной области, а второе – ориентируется на подавление цифровых шумов во временном направлении. При этом временное шумоподавление зачастую бывает основано на адаптивном или компенсационном методе фильтрации, которые заключаются в своеобразном анализе пикселей, находящихся в одной и той же позиции в разных кадрах, а также на анализе траектории движения. Основным недостатком данного двумерного метода шумоподавления является получение не слишком качественных, а по-

рой даже и очень размытых изображений прошедших фильтрацию и предварительную обработку.

Что же касается трехмерного 3DNR шумоподавления, то данный фильтр лишен подобных недостатков и не имеет существенных отличий от вышеупомянутого способа шумоподавления, за тем лишь исключением, что в нем применяется анализ сразу нескольких последовательных кадров как по средствам временной, так и по средствам по-пиксельной фильтрации. Иными словами, данный метод основан на выявлении степени различий между несколькими пикселями в каждом последующем кадре, определении уровня нежелательных искажений и определении вектора движения, что в итоге позволяет рассчитать результат по усредненному значению пикселей и получить качественное изображение даже при самой неблагоприятной освещенности.

3DNR - технология шумоподавления 3DNR (3D Noise Reduction) является одной из наиболее прогрессивных технологий в области подавления шумов в изображениях и представляет собой отличное средство для повышения качества снимков сделанных в условиях плохой освещенности. Данная технология крайне востребована как в различных системах передачи видеосигнала, так и в современных механизмах видеонаблюдения, поскольку позволяет проводить достаточно качественную фильтрацию шумов и повышать шумоподавление в изображениях. С помощью «3D Noise Reduction» можно существенно уменьшить уровень шума цифрового видео, улучшить картинку после ее декомпрессии или декодирования, а также добиться более качественного отображения сигнала при плохом или не полном освещении. Использование данной технологии в большинстве современных цифровых систем видеонаблюдения, является более чем обоснованным и оправданным, поскольку наличие чрезмерного шума в видеосигнале может привести к существенному ухудшению качества картинки и привести к нестабильной и малоэффективной работе всей системы в целом.

Каждый из перечисленных веток может также делиться на более мелкое подмножество с точки зрения учета данных внутри кадра (рисунок 2.7).

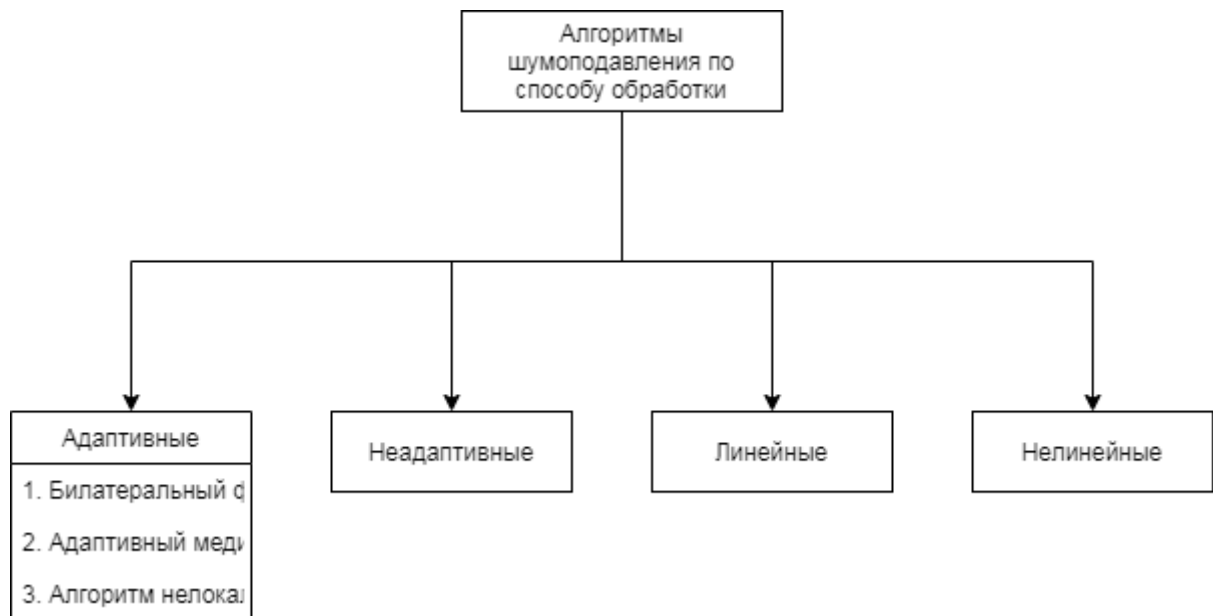


Рисунок 2.7 – Классификация по способу обработки данных

Рассмотрим подробнее некоторые алгоритмы, относящиеся к этим группам.

К адаптивным можно отнести билатеральный фильтр, который помимо евклидова расстояния учитывает и яркостную составляющую пикселей. «Адаптивность» здесь проявляется за счет учета информационной составляющей пикселя. Если его значение сильно отличается от значений остальных, то вероятнее всего этот пиксел является шумовым, следовательно, следует уменьшить «вес» при вычислении результирующего значения. Если же на самом деле под маской находятся несколько таких пикселей, возможно, это не шумовая составляющая, а часть границы какого-либо предмета на изображении. Соответственно распределение в таком случае также изменится, что позволит сохранить границу, не размыв тем самым изображение.

Также можно модифицировать медианный фильтр, добавив оценку достоверности перед заменой. Принцип работы этого фильтра основан на следующем: он заменяет значение каждого пикселя на среднее значение тех его соседей, значение которых отличается от данного пикселя не более чем на заданную величину (порог). При этом соседи рассматриваются в области, определенной радиусом. Благодаря этому низкоуровневый шум размывается, а резкие детали остаются нетронутыми.

Но иногда изображение становится менее естественным.

Фильтры Гаусса, медианный, усредняющий относятся к неадаптивным.

2.2.2. Выбор алгоритмов для реализации в ПЛИС

Однако такой подход плохо работает с динамическими изображениями, так как усреднение по кадрам даст «смаз» деталей, ведь значительное изменение пиксела рассматривается с точки зрения шума.

Пространственно-временные методы являются более точными в сравнении с предыдущим подходом, так как позволяет скомпенсировать движение в кадре, если такое было определено и т.д. Однако 3D алгоритмы являются в значительной степени более ресурсозатратными, при этом надо учитывать, что для обработки необходимо накопить некоторое количество кадров перед тем, как осуществлять коррекцию изображения. В ряде приложений, требующих обработки видеопотока в режиме реального времени, такая задержка на обработку может быть не допустима. Помимо задержки на обработку необходимо предусмотреть буферизацию кадров, что при современных стандартах разрешения цветного изображения 1920x1080, глубине пиксела 12 бит потребует порядка 9 Мбайт на 1 кадр, следовательно при накоплении нескольких кадров необходимый объем памяти линейно растет, что может не позволять использовать интегрированные в видеопроцессоре блоки памяти, если речь идет о малогабаритных и автономных задачах, так как потребуются дополнительные модули внешней памяти, которые могут потребовать дополнительного места на печатной плате, увеличивать потребление питания и задержку на обращение к памяти при записи и чтении.

Поэтому для реализации алгоритмов в ПЛИС следует обратить внимание на фильтры, основанные на пространственной фильтрации. Рассмотрим некоторые фильтры, относящиеся к данному типу.

Можно выделить следующие базовые подходы к пространственному шумоподавлению:

1. Линейное усреднение пикселей по соседям
2. Медианная фильтрация
3. Гауссовское размытие
4. Билатеральная фильтрация

5. Методы на основе вейвлет-преобразования
6. Метод главных компонент

Некоторые из этих методов применимы с небольшими модификациями также и во временной области.

Заметим, что алгоритмы на основе вейвлет-преобразования и метода главных компонент применяются, в основном, для обработки статичных изображений, хотя и обеспечивают наилучшее качество среди всех вышеперечисленных методов. Дело в том, что эти алгоритмы работают очень медленно и даже при хорошей оптимизации не могут обеспечить обработку в реальном времени, а при обработке видео скорость играет очень важную роль.

2.2.3. Усредняющий фильтр

Простейшая идея удаления шума - усреднять значения пикселей в пространственной окрестности. Для каждого пикселя анализируются соседние для него пиксели, которые располагаются в некотором прямоугольном окне вокруг этого пикселя (см. рисунок 2.1.1а). Чем больше взят размер окна, тем сильнее происходит усреднение. Самый простой вариант фильтрации - в качестве нового значения центрального пикселя брать среднее арифметическое всех тех его соседей, значение которых отличается от значения центрального не более чем на некоторый порог. Чем больше величина этого порога, тем сильнее происходит усреднение.

Вместо среднего арифметического соседей можно брать их взвешенную сумму, где весовой коэффициент каждого соседнего пикселя зависит либо от расстояния в пикселях от него до центрально пикселя, либо от разницы их значений.

Эти алгоритмы очень простые, но они не дают хорошего результата.

Интересная модификация этого метода была предложена Де Хааном. Он предложил в качестве значения центрального пикселя также брать взвешенную сумму соседних пикселей, только соседей брать не подряд, а через один или два пикселя (см. рисунок 2.1.1б). Утверждается, что при таком подходе удастся подавить низкочастотный шум, который заметнее на глаз, чем высокочастотный.

Аналогично можно применять этот метод во временной области, только усреднение будет производиться уже между соседними кадрами, и

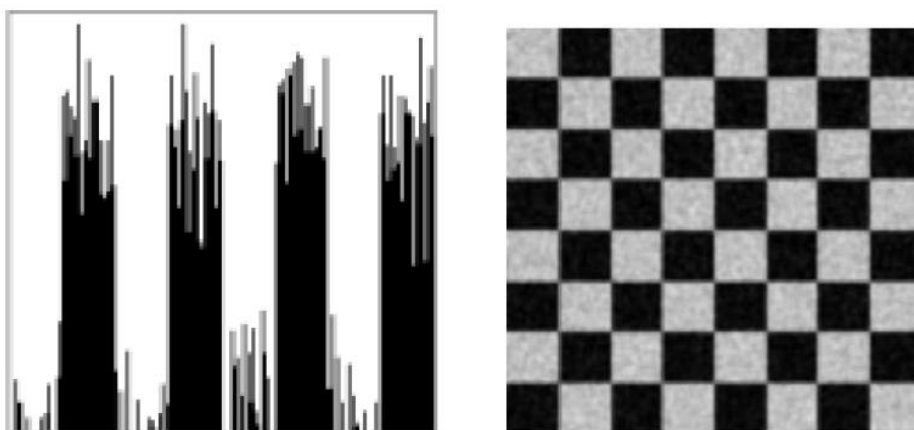
окно соответственно будет браться по времени (то есть каждый пиксель будет усредняться по пикселям, расположенным в той же позиции в соседних кадрах). В общем виде такую схему шумоподавления можно выразить следующей формулой:

$$\tilde{F}(x, t) = \sum_{i=-T_1}^{T_2} k_i F(x, t+i) / \sum k_i,$$

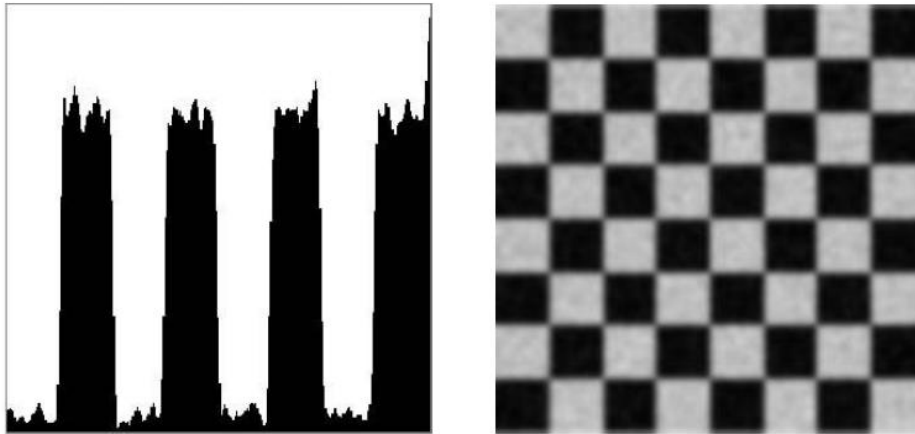
где x - пиксель, а t - номер кадра. Веса k_i могут браться в зависимости от близости значений пикселей и расстояния между кадрами. Также усреднение может проводиться рекурсивно:

$$\tilde{F}(x, t) = kF(x, t) + (1 - k)\tilde{F}(x, t - 1),$$

где $\tilde{F}(x, t - 1)$ - значение, посчитанное для этого пикселя в предыдущем кадре. Для предотвращения возникновения ореолов вокруг движущихся объектов, о которых было сказано выше, во временные фильтры встраивают алгоритмы определения движения. При этом возможно два варианта: простое детектирование движения (пиксели в движущихся блоках просто остаются без изменения, и шум вдоль движущихся объектов не подавляется) или построение скомпенсированного предыдущего и/или следующего кадра (см. [27]) и смешивание текущего с ним. В последнем случае компенсация движения должна быть выполнена качественно, иначе будут артефакты на месте неправильно найденных блоков.



Зашумленное изображение



После обработки усредняющим фильтром

Рисунок 2.10 – Гистограммы исходного и обработанных изображений

2.2.4. Медианный фильтр

Медианная фильтрация - это стандартный способ подавления импульсного шума.

Для каждого пиксела в некотором его окружении (окне) ищется медианное значение и присваивается этому пикселу. Определение медианного значения: если массив пикселей отсортировать по их значению, медианой будет серединный элемент этого массива. Размер окна соответственно должен быть нечетным, чтобы этот серединный элемент существовал.

Медиану также можно определить формулой:

$$med = \arg \min_{f_i \in W} \sum_{f_j \in W} |f_i - f_j|$$

где W - множество пикселей, среди которых ищется медиана, а f_i - значения яркостей этих пикселей.

Для цветных изображений используется векторный медианный фильтр (VMF):

$$med = \arg \min_{F_i \in W} \sum_{F_j \in W} d(F_i, F_j)$$

где F_i - значения пикселей в трехмерном цветовом пространстве, а d - произвольная метрика (например, евклидова).

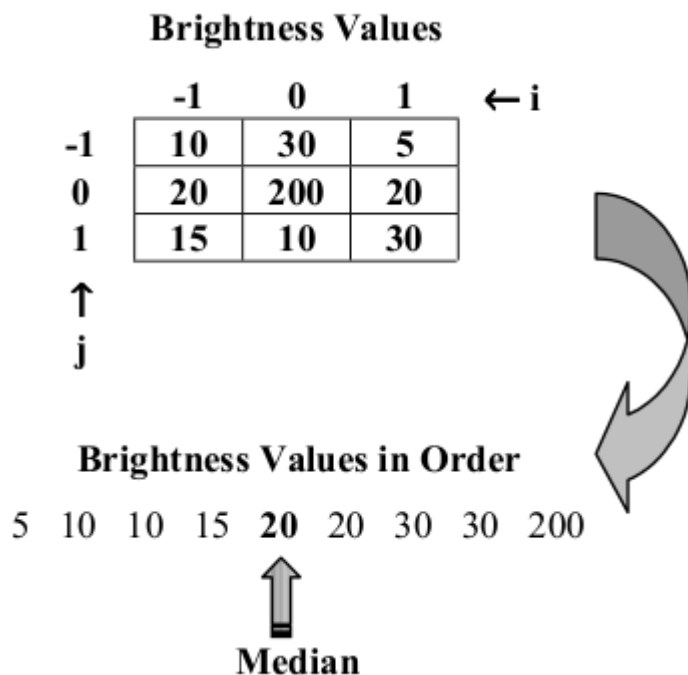
Однако в чистом виде медианный фильтр размывает мелкие детали, величина которых меньше размера окна для поиска медианы, поэтому на

практике практически не используется. Пример усовершенствованной медианной фильтрации можно найти в [1].

Медианный фильтр является одним из наиболее широко используемых цифровым фильтров, особо эффективен для фильтрации импульсных помех. Основная идея такого подхода заключается в сортировке значений пикселей внутри скользящего окна и выбор центрального в качестве замещающего центральный в исходном изображении. Таким образом пиксел, подвергнутый импульсному воздействию будет заменен и не окажет никакого влияния на соседние пиксели. Поэтому этот тип фильтра относится к фильтрам, сохраняющим четкость границ на изображении.

$$Y_k = \text{med}(X_k, X_{k-1}, \dots),$$

,где значения X_k соответствуют элементам маски скользящего окна.



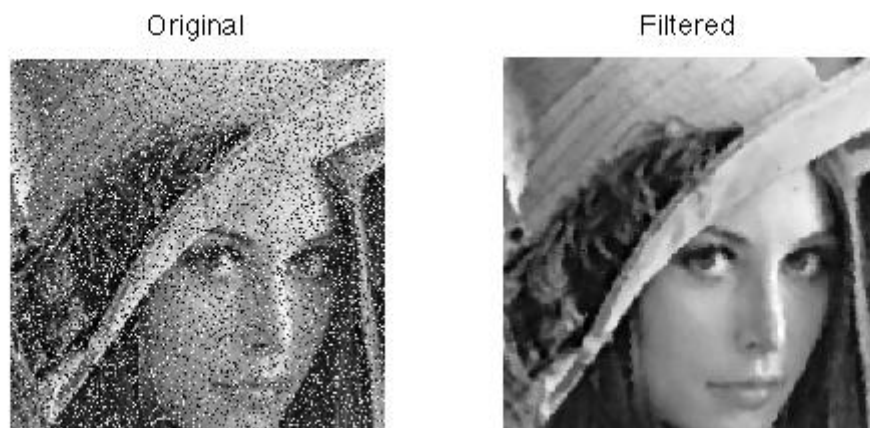


Рис.5. Изображение подвергнутое импульсной помехе до(а) и после(б) обработки медианным фильтром

2.2.5. Биномиальный фильтр (Гауссовское размытие)

Гауссовское размытие - это свертка изображения с функцией

$$g(x, y) = Ae^{-\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}},$$

где параметр s задает степень размытия, а параметр A обеспечивает нормировку. Фактически, это то же усреднение, только пиксель смешивается с окружающими по определенному закону, заданному функцией Гаусса. Матричный фильтр, посчитанный по указанной формуле, называется гауссианом; чем больше его размер, тем сильнее размытие (при фиксированном s). Поскольку данный фильтр сепарабелен, то есть представим в виде $g(x, y) = f_1(x) \cdot f_2(y)$,

то свертку можно производить последовательно по строкам и по столбцам, что приводит к значительному ускорению работы метода при больших размерах фильтра.

Вблизи границ (контуров на изображении) такой фильтр применять нельзя, чтобы не смазать детали изображения. Как следствие вдоль границ остается зашумленный контур.

Можно немного модифицировать этот метод для лучшей адаптации к границам: искать в каждом окне наилучшее направление размытия (наличие границы), вычисляя производные по направлениям, и применяя в данном окне направленный гауссиан вдоль найденной границы. В результате

размытие будет проводиться вдоль границ изображения, и зашумленного контура не будет.

В отличие от медианного фильтра, данный фильтр размывает границы изображения, так как является линейной комбинацией пикселей, находящихся под маской скользящего окна. Часто данный фильтр применяется в алгоритмах компьютерного зрения с целью улучшения структуры изображения перед интеллектуальными обработками, чтобы исключить влияние случайных шумов на работу алгоритмов.

$$I'(x, y) = \sum_{l=-n}^n \sum_{k=-m}^m I(x+l)(y+k) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$

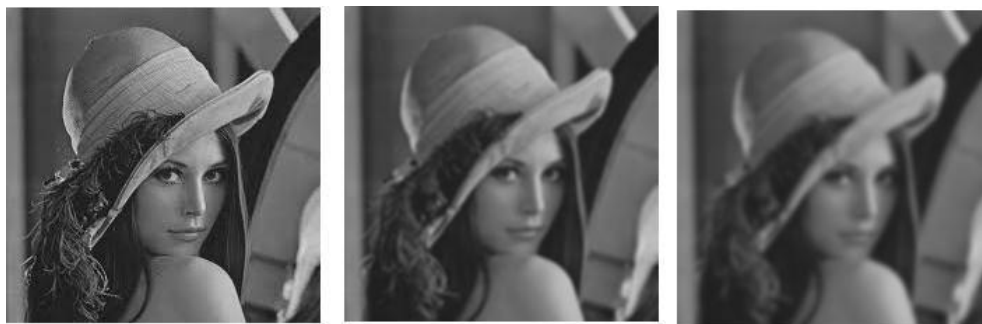


Рис.6. Изображение исходное(а) и после обработки фильтром Гаусса с масками 3х3(б) и 5х5(в)

Выбранный набор алгоритмов: усредняющий, медианный фильтры и фильтр Гаусса реализуем в практической задаче на ПЛИС.