

1. Сглаживание (низкочастотная фильтрация)

1.1. Общая постановка

Сглаживание (низкочастотная фильтрация) используется для подавления шумов и локальных высокочастотных колебаний яркости на изображении. В дискретном случае сглаживание реализуется как **свёртка** исходного изображения с небольшим маскирующим ядром (матрицей весов), задающим вклад соседних пикселей в итоговое значение.

Пусть $I(x, y)$ — исходное изображение в какой-либо цветовой компоненте (например, канале R), а $K(i, j)$ — ядро размера $n \times n$, где n — нечётное (3 или 5). Тогда результат свёртки $I'(x, y)$ вычисляется по формуле

$$I'(x, y) = \sum_{i=-h}^h \sum_{j=-h}^h K(i, j) I(x + i, y + j),$$

где $h = \frac{n-1}{2}$ — «радиус» ядра. На границах изображения используется обрезка индексов (значения выходят за пределы — индекс зажимается к краю).

В приложении свёртка выполняется отдельно для каждого цветового канала R, G, B, а альфа-канал (прозрачность) сохраняется без изменений.

1.2. Усредняющие фильтры 3×3 и 5×5

Простейшим сглаживающим фильтром является **усредняющий фильтр** (box filter). В этом случае все элементы ядра равны, а результатом является среднее значение пиксела по его окрестности.

Для ядра размера $n \times n$ элементы ядра имеют вид:

$$K(i, j) = \frac{1}{n^2}, \quad i, j = -h, \dots, h.$$

В приложении реализованы два варианта:

- усреднение 3×3 (слабое сглаживание);
- усреднение 5×5 (более сильное сглаживание, заметная «размытость» деталей).

Усредняющее сглаживание эффективно уменьшает гауссов шум и мелкие артефакты, но при этом размывает края и мелкие детали.

1.3. Гауссов фильтр 3×3

В отличие от простого усреднения, **гауссов фильтр** учитывает расстояние до центра ядра: центральным пикселям соответствует больший вес, а вклад более удалённых пикселей уменьшается. Это позволяет чуть лучше сохранять контуры при подавлении шума.

В приложении используется классическое нормированное ядро 3×3:

$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Здесь сумма всех коэффициентов равна 16, деление на 16 обеспечивает сохранение средней яркости.

Алгоритм свёртки при гауссовом фильтре аналогичен усредняющему фильтру, но значения $K(i, j)$ отличаются в зависимости от положения относительно центра.

2. Методы изменения контраста

В приложении реализованы три независимых метода изменения контраста:

1. линейное контрастирование в пространстве HSV (по компоненте V);
2. гистограммная эквализация в пространстве RGB (по каналам R, G, B);
3. гистограммная эквализация по яркости в пространстве HSV (по компоненте V).

Перед описанием конкретных методов введём несколько основных понятий.

2.1. Гистограмма яркости и гистограммная эквализация

Гистограмма яркости (или отдельного канала) — это дискретное распределение, показывающее, сколько пикселей имеют то или иное значение интенсивности. Для 8-битного канала используется 256 корзин:

$$\text{hist}[k] = \text{число пикселей с интенсивностью } k, \quad k = 0, \dots, 255.$$

Гистограммная эквализация — это преобразование интенсивностей, стремящиеся сделать гистограмму «более равномерной», то есть растянуть часто встречающиеся значения и сжать доминирующие диапазоны. Формально это реализуется через нормализованную интегральную функцию распределения (CDF — cumulative distribution function):

$$\text{CDF}(k) = \sum_{j=0}^k \text{hist}[j].$$

После нормализации CDF к диапазону $[0, 255]$ получаем таблицу соответствия (LUT, lookup table):

$$\text{LUT}(k) = \left\lfloor \frac{\text{CDF}(k) - \text{CDF}_{\min}}{N - \text{CDF}_{\min}} \cdot 255 \right\rfloor,$$

где N — общее число пикселей, CDF_{\min} — первое ненулевое значение CDF (для исключения пустого начального участка гистограммы). Затем каждое исходное значение интенсивности k заменяется на $\text{LUT}(k)$.

2.2. Пространства RGB и HSV

- В пространстве **RGB** цвет задаётся тройкой каналов $R, G, B \in [0, 255]$. Это «аппаратно ориентированное» представление, связанное с интенсивностью трёх базовых цветов.
- В пространстве **HSV** (Hue–Saturation–Value):
 - H (hue) — оттенок, кодируемый углом на цветовом круге (обычно нормирован к $[0, 1]$);

- S (saturation) — насыщенность (0 — полностью серый, 1 — максимально насыщенный цвет);
- V (value) — яркость или светлота (0 — чёрный, 1 — максимально светлый).

Преобразования $RGB \leftrightarrow HSV$ используются для того, чтобы воздействовать только на яркость (V), не затрагивая оттенок и насыщенность.

2.3. Линейное контрастирование по компоненте V (HSV)

Данный метод реализует **линейное растяжение динамического диапазона яркости**. В качестве яркости используется компонент V в пространстве HSV.

Основные шаги:

1. Для каждого пикселя вычисляется яркость $V \in [0, 1]$ (через преобразование $RGB \rightarrow HSV$).
2. Строится гистограмма компонент V .
3. По гистограмме определяются нижний и верхний пороги v_{\min} и v_{\max} , соответствующие, например, 1-му и 99-му процентилям (нижним и верхним 1 % пикселей). Это позволяет исключить влияние редких выбросов.
4. Для каждого пикселя выполняется линейное преобразование яркости:

$$V_{\text{нов}} = \begin{cases} 0, & V \leq v_{\min}, \\ \frac{V - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}}, & v_{\min} < V < v_{\max}, \\ 1, & V \geq v_{\max}. \end{cases}$$

5. Полученное значение $V_{\text{нов}}$ подставляется вместо исходного V , и пиксель пересчитывается обратно в RGB ($HSV \rightarrow RGB$), компоненты H и S остаются без изменений.

Эффект: увеличивается «разброс» яркостей, тёмные области становятся темнее, светлые — светлее, при этом исходные оттенки и насыщенности в значительной степени сохраняются.

2.4. Гистограммная эквализация по каналам RGB

В данном методе гистограммная эквализация выполняется **независимо для каждого цветового канала** R , G и B в пространстве RGB.

Шаги:

1. Строятся три гистограммы: hist_R , hist_G , hist_B .
2. Для каждой гистограммы вычисляется CDF и формируется LUT:

$$\text{LUT}_R(k), \text{LUT}_G(k), \text{LUT}_B(k).$$

3. Для каждого пикселя выполняется преобразование:

$$R' = \text{LUT}_R(R), \quad G' = \text{LUT}_G(G), \quad B' = \text{LUT}_B(B).$$

4. В приложении дополнительно используется «мягкое» смешивание результата с исходными значениями для снижения артефактов:

$$R_{\text{итог}} = \alpha R' + (1 - \alpha)R, \quad G_{\text{итог}} = \alpha G' + (1 - \alpha)G, \quad B_{\text{итог}} = \alpha B' + (1 - \alpha)B,$$

где $\alpha = 0,65$ — коэффициент «силы» эквализации.

Особенность метода: контраст по каждому каналу увеличивается, однако, так как R, G и B корректируются независимо, исходные соотношения между каналами нарушаются. Это может приводить к заметному изменению оттенков и появлению неестественных цветов, особенно в областях с большой долей одного канала.

2.5. Гистограммная эквализация яркости (V) в HSV

В этом методе гистограммная эквализация применяется не к каждому каналу RGB, а только к яркости V в пространстве HSV.

Шаги:

1. Для каждого пикселя выполняется преобразование $RGB \rightarrow HSV$, выделяется яркость $V \in [0, 1]$.
2. Значение V переводится в дискретный диапазон 0...255, по нему строится гистограмма hist_V .
3. На базе hist_V вычисляется CDF и формируется LUT $\text{LUT}_V(k)$.
4. Для каждого пикселя выполняется:

$$V' = \frac{\text{LUT}_V(\lfloor 255V \rfloor)}{255}.$$

При этом компоненты H и S сохраняются без изменений.

5. Новый HSV-триплет (H, S, V') пересчитывается обратно в RGB.

6. Аналогично предыдущему методу применяется мягкое смешивание:

$$R_{\text{итог}} = \alpha R' + (1 - \alpha)R, \quad G_{\text{итог}} = \alpha G' + (1 - \alpha)G, \quad B_{\text{итог}} = \alpha B' + (1 - \alpha)B, \quad \alpha = 0,65.$$

Эффект: гистограмма яркости становится более «растянутой» и равномерной, контраст увеличивается, при этом оттенок и насыщенность остаются близкими к исходным. По сравнению с эквализацией в RGB это даёт более естественную цветопередачу.

3. Сравнительный обзор методов контраста

С точки зрения реализации и визуального результата три метода изменения контраста можно суммировать следующим образом:

- **Линейное контрастирование по V (HSV)**

Простое и устойчивое к артефактам преобразование: диапазон яркостей (по компоненте V) линейно растягивается с учётом отсека крайних 1 % значений. Метод хорошо улучшает «приглушённые» изображения и не вносит существенных цветовых искажений.

- **Гистограммная эквализация в RGB**

Даёт наиболее сильный рост контраста, так как пересобирает распределение яркостей по каждому каналу. Однако независимая обработка каналов R, G, B может существенно изменять оттенки и вызывать визуальные артефакты, особенно на цветных изображениях с большими однотонными областями.

- **Гистограммная эквализация по яркости V (HSV)**

Компромисс между усилением контраста и сохранением естественности изображения: перераспределяется только яркость, а цветовой тон и насыщенность сохраняются. В результате контраст повышается, но цветовая палитра остаётся близкой к исходной.