

## ПОВЫШЕНИЕ РЕЗКОСТИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ФИЛЬТРАЦИИ ПИКСЕЛЕЙ ТЕНИ ОБЪЕКТА

Во многих приложениях, связанных с анализом цифровых изображений, объекты на снимке могут иметь невысокий уровень контраста по отношению к фону, на котором они расположены. Для повышения резкости таких изображений в статье разрабатываются методы идентификации, и фильтрации пикселей тени, предназначенные для устранения перепадов яркости между объектом и фоном.

**Ключевые слова:** резкость, изображение, идентификация, фильтрация, тень, эффективность.

### Введение

Во многих приложениях, связанных с анализом цифровых изображений, объекты на снимке могут иметь невысокий уровень контраста по отношению к фону, на котором они расположены [1 – 3]. В таких условиях при решении многих прикладных задач требуется повышать резкость снимка для того, чтобы подчеркнуть (контрастировать) мелкие детали и объекты на снимке, а также для того, чтобы улучшить восприятие тех объектов, которые были расфокусированы в силу ряда причин [2, 4 – 7]. При этом считается, что большее практическое значение имеет повышение резкости за счет устранения перепадов яркости между объектом и фоном (рис. 1).



Рис. 1. Две области цветности на снимке и профиль граничного перепада яркости между ними после оцифровки [2]

В настоящее время существует немало публикаций, посвященных этой теме, основанных на применении морфологической фильтрации изображения [8]. Однако нерешенная проблема таких фильтров – построение ступеней на изображении с резкими перепадами яркости между ними как на границе, так и во внутренности объектов и фона. Изображение при этом становится похожим на акварельный рисунок. Кроме того, области шумовых выбросов значительно расширяются.

В таких условиях для повышения резкости снимка путем устранения перепадов яркости между объектом и фоном актуальной является задача

фильтрации пикселей тени [9]. Здесь под тенью понимается совокупность таких пикселей цифрового изображения, расположенных между объектом и фоном, яркость которых образована одновременно излучением объекта и фона и, следовательно, принимает промежуточные значения между яркостями граничных пикселей объекта и фона.

Поскольку методы повышения резкости чувствительны к шуму, будем полагать, что шум изображения предварительно сглажен [2, 10].

### 1. Базовые концепции и модели

Процесс формирования цифрового изображения всегда характеризуется появлением на изображении пикселей тени. Это обусловлено тем, что при оцифровке на один и тот же элемент аналого-цифрового преобразователя (АЦП) одновременно попадает излучение объекта и фона [2, 9].

Допустим, что в области границы яркость пикселей объекта имеет уровень  $f$ , а яркость пикселей фона – уровень  $b$ . Допустим также, что доля излучения объекта на элементе АЦП составляет  $S_f$ , а доля излучения фона на этом же элементе составляет  $S_b = 1 - S_f$ , где  $0 < S_f < 1$ ,  $0 < S_b < 1$ ,  $S_f + S_b = 1$ .

В такой ситуации яркость  $g$  пикселей тени будет принимать целочисленные значения в диапазоне

$$\begin{cases} b \leq g = (f \cdot S_f + b \cdot S_b) \leq f, & \text{при } b < f, \\ f \leq g = (f \cdot S_f + b \cdot S_b) \leq b, & \text{при } f < b. \end{cases} \quad (1)$$

Заметим, что на практике между границами объектов с фоном на цифровом снимке всегда располагается цепочка или полоса из пикселей тени с яркостью  $g$ , оцениваемой соответственно (1), как это показано на рис. 2. Именно наличие тени является одной из основных причин снижения контрастности объектов относительно фона.

Поэтому актуальной является разработка эффективного метода фильтрации пикселей тени для устранения перепадов яркости между объектом и фоном (рис. 1).

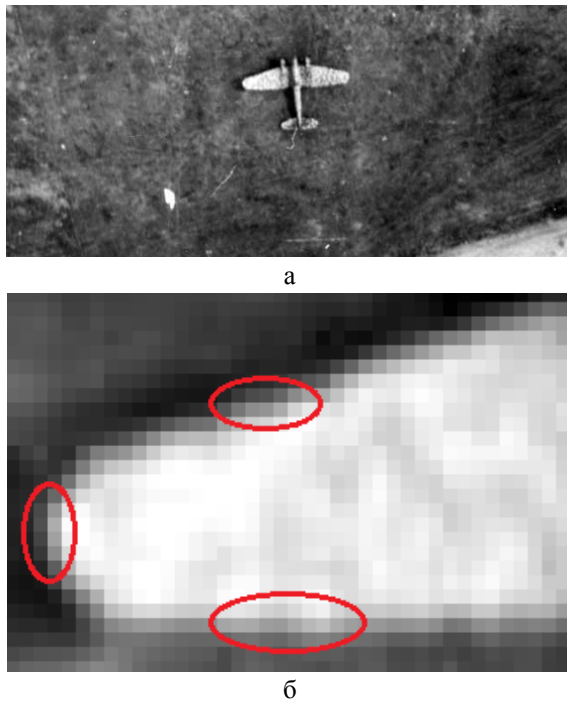


Рис. 2. Аэрофотоснимок самолета на аэродроме (<http://www.photo-war.com/ru/archives/items5394.htm>) (а) и увеличенный фрагмент левого крыла самолета, где характерные пиксели тени обведены эллипсом (б)

## 2. Выбор признаков и построение критериев идентификации пикселей тени

Рассматривая модель перепада яркости на границе объекта с фоном (рис. 1), можно сделать вывод о том, что в условиях сравнительно высокой контрастности границы объекта и сравнительно невысокой ширины тени пиксель тени с координатами  $(\xi, \eta)$ , расположенный в центре рассматриваемой окрестности, может быть идентифицирован по критерию

$$r > r^*, \quad (2)$$

где  $r$  – размах вариационного ряда яркостей в его  $\sqrt{2}$ -окрестности,

$$r = \max_{(i,j)} |f_i - f_j| = f_{\max} - f_{\min}, \quad (3)$$

где  $r^*$  – пороговая величина, а  $f_{\max}, f_{\min}$  – максимальная и минимальная яркости в окрестности.

Выполнение критерия (2) означает, что окрестность пикселя с координатами  $(\xi, \eta)$  содержит значимый перепад яркости, а сам пиксель  $(\xi, \eta)$  принадлежит тени. В сравнении с аналогами [2] важным достоинством размаха (3) является устойчивость его значений к вариациям кривизны границы объекта.

Рассмотрим принципы оценивания радиуса  $\varepsilon$ -окрестности  $O_\varepsilon(\xi, \eta)$  пикселя с координатами  $(\xi, \eta)$  для возможности адекватного и эффективного применения критерия (2); принципы определения формы окрестности подробно рассмотрены в работе [9]. Важно задавать радиус  $\varepsilon$  так, чтобы окрестность имела нечет-

ный линейный размер. Это необходимо для однозначного определения центрального пикселя окрестности  $(\xi, \eta)$ , поскольку предполагается, что все рассматриваемые оценки в окрестности характеризуют степень неоднородности центрального пикселя окрестности.

Величина радиуса  $\varepsilon$  выбирается на этапе обучения [9, 11]. На качественном снимке ширина тени составляет один пиксель (на его сглаженной копии – три пикселя). В таких условиях радиус окрестности выбирается равным единице (на сглаженной копии – равным двойке), что приводит к рассмотрению квадратной окрестности размерностью  $3 \times 3$  ( $5 \times 5$ ).

Радиус окрестности может увеличиваться с увеличением ширины тени. При этом всегда стараются выбирать минимально допустимый для адекватной фильтрации радиус окрестности. Это необходимо для того, чтобы не завышать оценки перепада яркости для пикселей границы и внутренности объекта и не идентифицировать эти пиксели как принадлежащие тени объекта. Кроме того, выбор минимально допустимого радиуса окрестности позволяет минимизировать трудоемкость фильтрации, пропорциональную площади окрестности. Функция площади  $s(\varepsilon)$  окрестности в зависимости от ее радиуса  $\varepsilon$  выражается полиномом второй степени вида  $s(\varepsilon) = (2 \cdot \varepsilon + 1)^2$ , где величина  $2 \cdot \varepsilon + 1$  – это линейный размер окрестности. Порог  $r^*$  критерия (2) также выбирается на этапе обучения так, чтобы идентифицировать все пиксели тени, значимо влияющие на потерю контрастности объекта относительно фона и минимизировать ложную идентификацию пикселей границы и внутренности объекта.

Яркости пикселей тени образуются по правилу (1) и могут принимать значения очень близкие к значениям яркости пикселей границы объекта. Такие пиксели тени значимо не влияют на потерю контрастности объекта относительно фона, поэтому их не обязательно идентифицировать и сглаживать. Тем более что отличить такие пиксели тени от пикселей границы объекта практически невозможно.

Ложная идентификация пикселей границы объекта не является критичной в смысле потери качества повышения резкости, так как яркости пикселей границы на этапе их фильтрации будут заменены яркостями смежных с ними пикселей объекта. Однако ложная идентификация пикселей границы приводит к росту трудоемкости этапа фильтрации тени.

При этом ложная идентификация пикселей внутренности объекта часто является критичной в смысле снижения качества повышения резкости, поскольку последующая фильтрация пикселей внутренности объекта в большей, или меньшей степени проявляется эффектом ступеней, как при использовании морфологических фильтров. Поэтому ложную идентификацию пикселей внутренности стараются не просто минимизировать, но исключать.

Сформулированные рекомендации и требования являются важнейшими для обеспечения эффективной идентификации пикселей тени. При этом в любом случае, качество идентификации пикселей тени всегда согласуется с теми требованиями, которые предъявляются к изображению для эффективного применения методов последующей его обработки при фильтрации и сегментации. При этом на уровне адекватной и ложной идентификации накладываются формальные пороговые ограничения, как это описано ниже при построении критериев эффективности фильтрации, после чего и происходит настройка порога  $r^*$ , радиуса  $\varepsilon$  и иных параметров моделей и критериев. Если на снимке появляются и слабоконтрастные и контрастные изображения, адекватная настройка порога  $r^*$  может быть невозможна, поскольку вариации яркости внутри объекта и на его границе могут быть сопоставимыми. В таких условиях будем применять следующий подход.

На первом этапе построим сглаженную копию исходного изображения с применением фильтра усеченного среднего так [2]:

– на множестве яркостей  $\{f_i\}_{i=1,\dots,n}$  пикселей окрестности выведем в начало ряда  $k$  минимальных, а в конец  $k$  максимальных значений яркости;

– после этого на множестве оставшихся яркостей  $\{f_i\}_{i=1+k,n-k}$  применим среднеарифметический фильтр

$$f' = \left[ \frac{1}{n-2 \cdot k} \sum_{i=1+k}^{n-k} f_i \right], \quad 2k < n. \quad (4)$$

В целом, в результате сглаживания значительно снижаются вариации яркости в смежных пикселях изображения, распределения яркости объектов, тени и фона приближаются к средним значениям в регрессионном смысле, отчетливо просматриваются линии уровней яркости. При этом важнейшие свойства сглаженной копии изображения такие:

1) вариации яркости в смежных пикселях внутренности объектов уменьшаются намного значительнее (до порядка), чем в областях границы и тени;

2) локальная кривизна границ объектов на изображении сглаживается, границы изображений становятся локально плавными;

3) пиксели границ объектов (фона) превращаются в пиксели тени. Поэтому ширина тени возрастает на величину удвоенного радиуса маски фильтра за счет пикселей границ объектов. Приграничные пиксели объекта становятся граничными.

При этом линейные объекты размываются и поглощаются тенью этих объектов. Сглаживается остаточный шум и мелкозернистая (точечная) текстура изображения.

Главное положительное свойство сглаживания состоит в том, что при значительном снижении перепадов яркости во внутренности объектов перепад

яркости между объектом и фоном (между их граничными пикселями) увеличивается за счет приближения яркостей объекта и фона к средним значениям в регрессионном смысле. Хотя и ширина тени при этом также ощутимо возрастает. В таких условиях уже много проще адекватно настроить порог  $r^*$  на обнаружение тени в окрестности границ слабоконтрастных изображений на сглаженной копии. Однако для устойчивой идентификации пикселей тени при этом радиус маски фильтра должен быть увеличен с учетом ширины тени и радиуса маски сглаживающего фильтра. Для наиболее распространенных на практике условий будем полагать радиус маски фильтра резкости равным двойке (то есть по умолчанию размах будем оценивать по маске  $5 \times 5$ ).

Чтобы снизить количество ложно идентифицируемых пикселей объектов, границ и линий в дополнение к размаху (3) будем использовать вычислительно эффективное отношение  $d$  меры контрастности  $c$ , оцененной по кольцевой маске предложенной в работе [9], к величине размаха  $r$  в той же окрестности пикселя  $(x, y)$  вида

$$d(x, y) = \frac{c(x, y)}{r(x, y)} = \frac{\max_{\xi} |f(x, y) - f_{\xi}|}{f_{\max} - f_{\min}}, \quad f_{\max} > f_{\min}, \quad (5)$$

где пиксель  $(x, y)$  – центр окрестности,  $f_{\xi}$  – яркости пикселей маски, а  $f_{\max}, f_{\min}$  – максимальная и минимальная яркости в окрестности.

Для сглаженной копии отношение  $d$  будет принимать значения близкие к единице для пикселей объекта, и значения близкие к 0.5 – для пикселей тени. В таких условиях будем полагать, что пиксель тени, выделенный по критерию (2), идентифицирован, если выполняется условие:  $d < d^*$ . Для снижения количества ложно идентифицируемых пикселей объектов, границ и линий в качестве вспомогательного также может применяться индикаторный критерий  $C_{r_{ind}}$ , предложенный в работе [9].

### 3. Построение унифицированного метода идентификации пикселей тени

Теперь рассмотрим построение методов идентификации пикселей тени с применением сформулированных выше критериев.

*Метод 1.* Базовый метод идентификации пикселя тени объекта представляется следующей последовательностью шагов.

Шаг 1. Для пикселя входного изображения с координатами  $(\xi, \eta)$  соответственно (3) оценивается размах  $r$  ряда яркостей в его окрестности.

Шаг 2. Если условие (2) выполняется, пиксель  $(\xi, \eta)$  принадлежит тени; его координаты сохраняются для последующей фильтрации.

Шаг 3. Конец.

В условиях относительно высокой контрастности объектов на снимке предложенный метод позволяет эффективно идентифицировать пиксели тени.

С падением уровня контрастности, когда адекватная настройка порога критерия (2) невозможна, предложенный метод не позволяет эффективно идентифицировать пиксели тени. В таких условиях будем применять критерий (2) для анализа размаха ряда яркостей в окрестности на сглаженной копии.

*Метод 2.* Модифицированный метод идентификации пикселя тени объекта представляется следующей последовательностью шагов.

Шаг 1. С применением фильтра усеченного среднего (4) строится сглаженная копия исходного изображения [2].

Шаг 2. Для пикселя сглаженной копии с координатами  $(\xi, \eta)$  соответственно (3) оценивается размах  $g$  ряда яркостей в его окрестности.

Шаг 3. Если условие (2) выполняется, пиксель  $(\xi, \eta)$  на исходном изображении принадлежит тени; его координаты сохраняются для последующей фильтрации.

Шаг 4. Конец.

В условиях, когда адекватная настройка порога  $g^*$  критерия (2) все еще невозможна, предложенный метод не позволяет эффективно идентифицировать пиксели тени.

*Метод 3.* Для таких условий предлагается метод ( $gd$ -метод) идентификации пикселя тени объекта, который представляется следующей последовательностью шагов.

Шаг 1. С применением фильтра усеченного среднего (4) строится сглаженная копия исходного изображения [2].

Шаг 2. Для пикселя сглаженной копии с координатами  $(\xi, \eta)$  соответственно (3) оценивается размах  $g$  ряда яркостей в его окрестности.

Шаг 3. Если условие (2) выполняется, пиксель  $(\xi, \eta)$  на исходном изображении потенциально принадлежит тени, переход к шагу 4; иначе – к шагу 6.

Шаг 4. Для пикселя сглаженной копии с координатами  $(\xi, \eta)$  соответственно (5) оценивается мера однородности  $d$ .

Шаг 5. Если выполняется условие  $d < d^*$ , пиксель  $(\xi, \eta)$  на исходном изображении принадлежит тени; его координаты сохраняются для последующей фильтрации.

Шаг 6. Конец.

Заметим, что  $gd$ -метод может давать адекватные результаты при заниженном пороге критерия (2) за счет применения вспомогательного критерия идентификации вида:  $d < d^*$ . Это свойство является важным для эффективной идентификации пикселей тени слабо контрастного изображения.

#### 4. Оценки трудоемкости идентификации пикселей тени

Для построения сглаженной копии изображения обычно достаточно использовать маску фильтра размерностью  $3 \times 3$ . В таких условиях оценка трудоемкости построения сглаженной копии с применением фильтра усеченного среднего при  $k=0$  составляет порядка 10 операций сравнения на пиксель. Трудоемкость  $T(\varepsilon)$  нахождения размаха в окрестности радиуса  $\varepsilon$ , здесь и далее измеряемая числом операций сравнения на пиксель снимка, оценивается так:

$$T_r(\varepsilon) = 3 \cdot (2 \cdot \varepsilon + 1)^2. \quad (6)$$

Оценка трудоемкости нахождения меры однородности  $d$  составляет одну операцию сравнения на пиксель, поскольку размах и предельные яркости в окрестности уже найдены, и остается лишь найти величину  $\max\{|f(\xi, \eta) - f_{\max}|, |f(\xi, \eta) - f_{\min}|\}$ . Применение каждого из критериев также характеризуется одной операцией сравнения на пиксель.

В таких условиях по порядку величины оценка трудоемкости идентификации пикселя тени с применением  $gd$ -метод определяется величиной

$$T_{rs}(\varepsilon) = 10 + 3 \cdot (2 \cdot \varepsilon + 1)^2. \quad (7)$$

Общая трудоемкость фильтрации тени также определяется оценкой (7), поскольку методы идентификации применяются ко всем пикселям снимка, а методы фильтрации лишь к идентифицированным пикселям тени, которых на снимке не более 1%.

Трудоемкость применения наиболее используемых в настоящее время фильтров резкости [2], основанных на применении не направленной маски по порядку величины составляет

$$T_m(\varepsilon) = (2 \cdot \varepsilon + 1)^2. \quad (8)$$

При использовании направленных масок для адекватного оценивания величины градиента требуется  $4 \cdot (2 \cdot \varepsilon + 1)$  операций сравнения для применения масок в одном положении. Также потребуются сменить  $2 \cdot \varepsilon$  положений масок и выполнить  $2 \cdot \varepsilon$  операций сравнения для нахождения градиента. Таким образом, трудоемкость нахождения градиента при использовании направленных масок по порядку величины составляет

$$T_{dm}(\varepsilon) = 2 \cdot \varepsilon \cdot 4 \cdot (2 \cdot \varepsilon + 1) + 2 \cdot \varepsilon. \quad (9)$$

Если при этом учитывать также элементарные арифметические операции и извлечение квадратного корня, оценка (9) будет существенно выше. Таким образом, можно сделать вывод о том, что трудоемкость предложенного в работе метода идентификации (и далее фильтрации) пикселей тени находится в пределах оценок существующих аналогов (рис. 3). Поэтому в силу указанных выше свойств и приемлемой трудоемкости  $gd$ -метод будем использовать в качестве основного метода для идентификации пикселей тени.

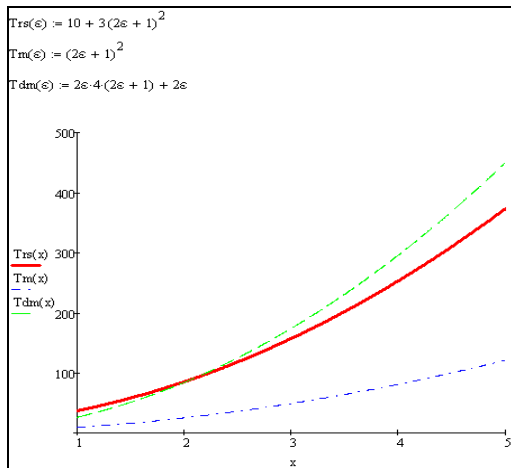


Рис. 3. Лістинг: функція трудоемкості (7) зображена жирною лінією, функція трудоемкості (8) зображена штрихпунктирною лінією і функція трудоемкості (9) зображена пунктирною лінією

### 5. Побудова уніфікованого методу фільтрації пікселів тіні

Після ідентифікації необхідно згладити яркості пікселів тіні (1), замінивши їх яркостями сусідніх їм пікселів об'єкта або фону з урахуванням ширини тіні та кривизни межі в околицях фільтруваного пікселя тіні. Звернемо увагу, що на етапі фільтрації згладжена копія зображення вже не використовується. Отже, допустимо, що координати  $(\xi, \eta)$  ідентифікованих пікселів тіні збережені в множині  $S$ .

**Метод 4.** Для згладжування яркостей пікселів тіні пропонується метод (sms-метод), основні етапи якого наведені нижче.

*Етап 1. Підготовка структур даних.*

Етап 1. З використанням хвильового методу [2] будуються 8-зв'язні компоненти тіні  $\{C_j\}_j$  такі, що:  $S = \cup C_j, \cap C_j = 0, j = 1, \dots, m$ .

Етап 2. Формування хвильової структури множини  $S$  здійснюється по черзі для кожної компоненти зв'язності  $C_j, j = 1, \dots, m$ . Перед розглядом компоненти зв'язності  $C_j$  номер хвилі  $i$  цієї компоненти приймає рівне нулю:  $i = 0$ .

З межових пікселів множини  $C_j$  трасировкою його межі або з використанням хвильового методу [2, 3] будується хвиля  $W_j^i$ ; межовими називаються пікселі множини  $C_j$ , які в своїй околиці на знімку одночасно містять і пікселі тіні, що належать множині  $S = \cup C_j$ , і пікселі об'єкта, або фону, що не належать множині  $S$ .

Після побудови хвилі координати її пікселів видаляються з множини  $C_j$ , приймаємо  $i = i + 1$ .

До того часу, поки множина  $C_j$  не стане порожньою множиною, процедура побудови хвилі  $W_j^i$  продовжується.

В результаті множина  $S$  представляється так:  $S = \{C_j = \{W_j^i\}_i\}_j$ . Таке представлення множини  $S$  необхідно для адекватної організації фільтрації пікселів тіні в умовах, коли ширина тіні перевищує два пікселі. Звернемо увагу, що при використанні згладженої копії зображення ширина тіні становитиме мінімум три пікселі.

*Етап 2. Згладжування пікселів тіні.*

Етап 3. При згладжуванні пікселі множини  $S$  будуть розглядатися відповідно до зростання номера хвилі  $i$ : спочатку згладжуються яркості пікселів множини  $\{\{W_j^i\}_{i=0}\}_{j=1, \dots, m}$ , потім – яркості пікселів множини  $\{\{W_j^i\}_{i=1}\}_{j=1, \dots, m}$  і так далі; отже, приймаємо  $i = 0$ .

Етап 4. Розглядаються пікселі тіні, що належать множині  $\{\{W_j^i\}_{i=1}\}_{j=1, \dots, m}, i = \text{const}$ .

Допустимо, що визначено фільтруваний піксель тіні  $d(\xi, \eta)$  множини  $W_j^i$ .

Будується множина  $X = \{x_i\}_i$  яркостей таких пікселів  $\varepsilon$ -околиці пікселя  $d(\xi, \eta)$ , які не належать тіні.

Для цілей згладжування найбільш ефективним є фільтр найближчого сусіда [9, 10], який замінює яркість  $f(\xi, \eta)$  пікселя  $d(\xi, \eta)$  найближчою яркістю  $x_k \in X$

$$f(\xi, \eta) = x_k, k = \arg \min_i |f(\xi, \eta) - x_i| \quad (10)$$

Однак цей фільтр не враховує кривизни межі об'єкта та ряду інших аспектів. Побудова ефективного уніфікованого згладжуючого фільтра докладніше розглядається нижче. Після згладжування пікселі множини  $W_j^i$  з номером хвилі  $i$  вже не належать тіні, отже, вони видаляються з множини  $S = \{C_j = \{W_j^i\}_i\}_j$ . Приймаємо  $i = i + 1$ . До того часу, поки множина  $S$  не стане порожньою множиною, процедура згладжування продовжується.

Етап 5. Кінець.

В результаті застосування запропонованого методу, яркості пікселів тіні зображень об'єктів на знімку будуть замінені яркостями найближчих до них пікселів об'єкта або фону. Важливим достоїнством sms-методу є його стійкість до варіацій ширини тіні зображення об'єкта.

Однак, при розв'язанні прикладних завдань вибір адекватного порога, що дозволяє однозначно розділити пікселі об'єкта та його тіні, є досить складною, а часто і неможливою.

В такой ситуации на этапе идентификации могут выделяться пиксели границы. Однако эта проблема не носит принципиального характера, поскольку неадекватно идентифицированные пиксели границы объекта будут заменены яркостью смежных с ними пикселей объекта.

Также, на этапе идентификации могут не идентифицироваться пиксели тени с яркостью близкой к граничным значениям для объекта или фона. В такой ситуации яркости пикселей тени могут заменяться яркостями не идентифицированных пикселей тени, что не носит принципиального характера. Что более важно, использование предложенного правила при широкой тени может приводить к получению одноцветных приграничных участков объекта (фона), что является недостатком с точки зрения визуального восприятия. Также, предложенное правило не учитывает кривизны границы в области фильтрации.

**Метод 5.** Для компенсации этих негативных факторов влияния на четвертом шаге sms-метода вместо фильтра ближайшего соседа (10) предлагается применять следующее правило сглаживания яркости пикселя тени, основные шаги которого состоят в следующем.

**Шаг 1.** При построении множества  $X$  выбираются яркости таких пикселей  $\varepsilon$ -окрестности пикселя  $d(\xi, \eta)$ , которые не принадлежат тени, после чего к этому множеству применяется  $k \cdot \sigma$ -метод [10]. В результате во множестве  $X$  остается наибольшее по площади однородное множество яркостей пикселей, принадлежащих либо объекту, либо фону.

**Шаг 2.** Для целей сглаживания вместо фильтра (10) к яркостям  $f(\xi, \eta)$  пикселей  $d(\xi, \eta)$  множества  $X$  применяется фильтр усеченного среднего (4).

Хотя наилучшим по качеству для целей сглаживания в сравнительно небольшой окрестности является линейный регрессионный фильтр, заменяющий яркость  $f(\xi, \eta)$  пикселя  $d(\xi, \eta)$  по правилу

$$p(\xi, \eta) = a \cdot \xi + b \cdot \eta + c, \quad (11)$$

тем не менее, для получения оценок  $a^*, b^*, c^*$  коэффициентов  $a, b, c$  регрессии  $p(\xi, \eta)$  во множестве  $X$  может быть недостаточно данных [2, 10]. Поэтому для целей сглаживания в качестве основного будем применять фильтр усеченного среднего (4).

**Шаг 3.** Конец.

В результате применения предложенного метода фильтрации, яркости пикселей тени изображений объектов на снимке будут адекватно заменены яркостями пикселей объекта или фона с учетом ширины тени и кривизны границы в окрестности.

При ширине тени в  $n$  пикселей резкость объекта с применением sms-метода будет повышена в  $n+1$  раз в среднем. При этом будет устранен эффект ступеней, который является основным фактором неустойчи-

вости применения современных граничных детекторов. Эффект ступеней проявляется в том, что яркость смежных пикселей тени объекта малыми перепадами переходит от яркости объекта к яркости фона (рис. 4) вдоль границы. Возникает такой эффект благодаря тому, что при переходе между смежными пикселями тени вдоль границы объекта с фоном происходит плавное изменение соотношения площадей  $S_f$  и  $S_b$  при формировании яркости пикселей тени (1).

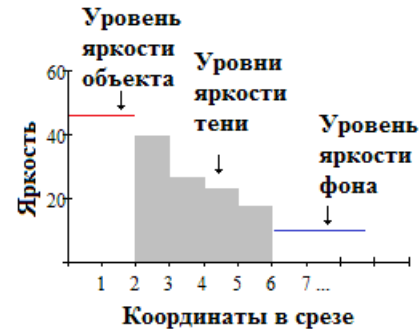


Рис. 4. Иллюстрация эффекта ступеней в срезе вдоль тени объекта

Оценка трудоемкости предложенного метода показывает, что для сглаживания яркости одного пикселя тени потребуется выполнить 100 операций сравнения по порядку величины. Учитывая тот факт, что общая площадь тени в большинстве приложений не превышает 1% площади снимка, трудоемкость сглаживания будет составлять 1 операцию сравнения на пиксель снимка по порядку величины.

В таких условиях можно сделать вывод о том, что общая оценка трудоемкости идентификации и сглаживания пикселя тени изображения будет аппроксимироваться по порядку величины оценкой трудоемкости идентификации пикселя тени с применением rd-метода (7).

## 6. Критерии эффективности фильтрации пикселей тени

Идеальным будем считать такое повышение резкости, в результате которого:

- 1) яркости всех пикселей тени заменены яркостями смежных им пикселей объектов или фона с учетом ширины тени и кривизны границы объектов с фоном в окрестности, и
- 2) яркость ни одного пикселя объекта или фона не была изменена.

Конечно же, с практической точки зрения добиться такого качества невозможно. Добиваться идеальной фильтрации и не нужно. Если яркость пикселя тени изображения отлична от яркости пикселя границы объекта всего лишь на несколько единиц, такой пиксель тени, во-первых, практически невозможно достоверно идентифицировать, а, во-вторых, присутствие такого пикселя тени значимо не повлияет на резкость снимка.



С другой стороны, если отфильтрован пиксель границы объекта, и его яркость заменена яркостью смежного с ним пикселя объекта, это приведет лишь к слабому эффекту нерезкого маскирования, что во многих случаях лишь приветствуется. Главное не фильтровать пиксели внутренности объекта, поскольку это приводит к образованию более или менее заметных скачков яркости внутри объекта.

Предположим, что задано некоторое изображение  $E$ . Для него известно положение пикселей объектов, тени и фона. Для окрестности заданной размерности найдем минимальную контрастность с пикселя границы объекта на этом изображении относительно пикселей тени и фона, а также максимальную контрастность  $h$  пикселя внутренности объекта (фона) относительно пикселей объекта так

$$c^* = \min_i(c_i), \quad h^* = \max_j(h_j); \quad (12)$$

если специально не оговорено иное, здесь и далее контрастность  $u(x, y)$  пикселей  $d(x, y)$  оценивается попарно по правилу

$$u(x, y) = \max_{\xi} |f(x, y) - f_{\xi}|, \quad (13)$$

предложенному в работе [9].

Допустим, что изображение  $E$  было отфильтровано; при этом часть пикселей тени была отнесена к объекту, часть – к фону, а часть пикселей тени вообще не была идентифицирована.

В таких условиях построим новые границы объектов и фона. Еще раз оценим минимальную контрастность  $g$  пикселя границы объекта на этом изображении относительно пикселей тени и фона, а также максимальную контрастность  $s$  пикселя внутренности объекта (фона) относительно пикселей объекта так

$$g^* = \min_i(g_i), \quad s^* = \max_j(s_j). \quad (14)$$

Если выполняется соотношение

$$g^* > T \text{ и } s^* < T', \text{ где } T' \geq h^*, \quad (15)$$

тогда считается, что повешение резкости произведено эффективно. Правило (15) – базовый критерий эффективности фильтрации тени изображения.

Следовательно, эффективным будем считать такой оператор повышения резкости, который обеспечивает выполнение условия (15).

Заметим, что в задачах машинного зрения пороги  $T$  и  $T'$  обычно выбираются так, чтобы обеспечить максимально эффективную последующую обработку изображения. При этом кратность повышения резкости можно оценить величиной

$$r = g^* / c^*. \quad (16)$$

## Выводы

В работе предложены методы повышения резкости цифровых изображений, ориентированные на

устранение перепадов яркости между объектом и фоном за счет фильтрации пикселей тени объектов.

Показано, что при приемлемой трудоемкости, допустимой при решении подавляющего количества прикладных задач, последовательное применение предложенных методов идентификации и фильтрации позволяет адекватно повышать резкость изображений объектов для различных условий контрастности объектов, ширины их тени и кривизны границы объектов.

При этом в сравнении с аналогами применение предложенных в работе методов идентификации и фильтрации не приводит к появлению негативных эффектов, вызываемые применением современных фильтров резкости. Основные из них – это эффекты усиления и расширения шумов изображения, формирования заметных ореолов вдоль границ, а также возникновения ступеней с резкими перепадами яркости во внутренности объектов.

## Список литературы

1. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: БИНОМ, 2006. – 752 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. Sonka M. Image processing, analysis and machine vision / M. Sonka, V. Hlavak, R. Boyle. – California (USA): Cole Publishing Company, 1999. – 770 p.
4. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М.: Вильямс, 2004. – 928 с.
5. Яне Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
6. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых и др. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 351 с.
7. Журавлев Ю.И. Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю.И. Журавлев, В.В. Рязанов, О.В. Сенько. – М.: Фазис, 2005. – 159 с.
8. Schavemaker J.G.M. Image sharpening by morphological filtering / J.G.M. Schavemaker, M.J.T. Reinders, J.J. Gerbrands, E. Backer // Pattern Recognition. – 2000. – Vol. 33, Is. 6. – P. 997-1012.
9. Смеляков К.С. Модели и методы сегментации границ изображений нерегулярного вида на основе адаптивных масок: дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02 / Смеляков Кирилл Сергеевич. – Х., 2005. – 162 с.
10. Смеляков К.С. Построение статистических методов исключения экстремальных наблюдений для обеспечения адекватного применения пространственных фильтров шума изображений / К.С. Смеляков, О.В. Водолажко, С.В. Смеляков, С.В. Осиевский // Системы обработки информации. – Х.: ХУ ПС, 2013. – Вып. 4 (111). – С. 35-41.
11. Смеляков К.С. Модели и методы сегментации изображений объектов нерегулярного вида для автономных систем технического зрения: дис. ... докт. техн. наук: 01.05.02 / Смеляков Кирилл Сергеевич. – Х., 2012. – 306 с.

Поступила в редколлегию 20.10.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Рубан, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ПІДВИЩЕННЯ РІЗКОСТІ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ ЗА РАХУНОК ФІЛЬТРАЦІЇ ПІКСЕЛЕЙ ТІНІ ОБ'ЄКТА

К.С. Смеляков, С.І. Хмелевський, Є.М. Дроб, О.В. Водолажко

*У багатьох додатках, пов'язаних з аналізом цифрових зображень, об'єкти на знімку можуть мати невисокий рівень контрасту по відношенню до фону, на якому вони розташовані. Для підвищення різкості таких зображень у статті розробляються методи ідентифікації та фільтрації пікселів тіні, призначені для усунення перепадів яскравості між об'єктом і фоном.*

**Ключові слова:** різкість, зображення, ідентифікація, фільтрація, тінь, ефективність.

### RISING THE SHARPENING OF DIGITAL IMAGE BY VIRTUE OF FILTERING THE OBJECT SHADOW PIXELS

K.S. Smelyakov, S.I. Hmelevsky, E.M. Drob, O.V. Vodolazhko

*In various applications pertaining to analysis of digital images the image objects may have a low contrast level relative to the underlying background. In order to increase the sharpness of such images, in this article the methods are proposed for identification and filtering of shadow pixels being intended for elimination of the object-background brightness jumps.*

**Keywords:** sharpness, image, identification, filtering, shadow, efficiency.