



# **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГРАДИЕНТНЫХ МЕТОДОВ**

*В статье обсуждается задача определения границ объектов в автономных системах обработки видеоизображений. Особенностью таких систем являются ограниченные возможности в части вычислительных ресурсов. Предлагаемый подход основан на применении градиентных методов и пространственной фильтрации. Точность детектирования границ объектов определяется выбором наилучшего порогового значения принятия решения относительно их наличия или отсутствия. Существует большое количество градиентных методов детектирования границ объектов, основанных на применении специальных операторов (Робертса, Прюитта, Собеля, Лапласа и др.). В основе большинства алгоритмов градиентных методов лежит пространственная фильтрация, за которой следует процедура бинаризации с применением порогового значения. Однако задача выбора порогового значения в открытой литературе освещена недостаточно. Проведенные исследования показали возможность определения порогов, обеспечивающих минимальную ошибку для различных уровней размытия границы. По полученным экспериментальным данным ставится задача разработки алгоритмов адаптивного определения порогового значения.*

**Ключевые слова:** градиентные методы, пространственная фильтрация, определение границ, искусственные фасеточные глаза, техническое зрение

# FEATURES OF THE APPLICATION OF THE ALGORITHM FOR DETERMINING THE BOUNDARIES OF OBJECTS IN IMAGES USING GRADIENT METHODS

*The article discusses the problem of determining the boundaries of objects in autonomous video image processing systems. A feature of such systems is their limited capabilities in terms of computing resources. The proposed approach is based on the use of gradient methods and spatial filtering. The accuracy of detecting the boundaries of objects is determined by choosing the best threshold value for making a decision about their presence or absence. There are a large number of gradient methods for detecting the boundaries of objects based on the use of special operators (Roberts, Prewitt, Sobel, Laplacian, etc.). Most algorithms of gradient methods are based on spatial filtering, followed by a binarization procedure using a threshold value. However, the problem of choosing a threshold value is not sufficiently covered in the open literature. The conducted studies have shown the possibility of determining thresholds that provide a minimum error for various levels of boundary blurring. Based on the experimental data obtained, the task is to develop algorithms for adaptive threshold value determination.*

**Keywords:** gradient methods, spatial filtering, boundary detection, artificial faceted eyes, technical vision

## Введение

Задача точного определения координат движущихся объектов является актуальной для многих областей, таких как автономные транспортные средства, робототехника, системы видеонаблюдения, охранные системы и др. Традиционные радиотехнические методы определения координат объектов предполагают использование одно- или многопозиционных активных радиолокационных станций [1]. Наряду с этим широкое распространение получили и пассивные методы определения координат объектов, основанные в том числе на обработке видеoinформации. Такие методы активно используются в автономных робототехнических комплексах с системами машинного зрения. В настоящее время в этих системах широко используются методы обработки, основанные на глубоком

обучении нейронных сетей и демонстрирующие высокую точность и гибкость. Однако высокая вычислительная сложность делает невозможным их применение в автономных и компактных робототехнических комплексах. Это обуславливает необходимость разработки эффективных алгоритмов обработки видеоданных, не требующих больших вычислительных затрат.

Для сокращения требуемого объема вычислений предложен способ обработки изображений, основанный на принципах фасеточного зрения, заимствованного у живой природы [2]. В качестве алгоритма выделения объекта, его границ предлагается использование градиентных методов и пространственной фильтрации изображений [3]. Их простота реализации и низкая вычислительная сложность позволяют эффективно обра-

батывать видеопоток в режиме реального времени на маломощных платформах. Однако, точность работы алгоритмов градиентных методов сильно зависит от ряда факторов, таких как уровень шума на изображении, освещенность сцены и т.д. Для точного определения реальных границ и минимизации ложных, необходимо подбирать пороговое значение принятия решения относительно наличия или отсутствия границ. Некорректное определение порога приводит к неполному или, наоборот, к ложному выделению границ.

Таким образом, возникает проблема выбора оптимального порогового значения, обеспечивающего баланс между полнотой выделения границ и их пропуском. В данной статье рассматриваются особенности градиентных методов и проводится анализ влияния степени размытия границ на точность определения контура объекта. Цель исследования заключается в определении возможности выбора наилучшего порогового значения, обеспечивающего минимальную ошибку определения контура для различных уровней размытия (яркости) границ. В основе выбора порогового значения лежат особенности использования градиентных методов и алгоритмов пространственной фильтрации.

### Градиентные методы и пространственная фильтрация

Детектирование границ с помощью градиентных методов – это процесс определения изменений интенсивности пикселей. Они

используются для обнаружения и распознавания объектов, сегментации изображений и других задач. В данной статье рассматривается метод выделения границ, основанный на применении оператора Собеля, который является компромиссным методом выделения границ с точки зрения соотношения качества и вычислительных затрат [4].

Градиентные методы выделения границ основаны на пространственной фильтрации. Так как мы оперируем изображением, пространственной областью является плоскость изображения, состоящая из пикселей. В общем виде процесс пространственной фильтрации представляет собой применение того или иного оператора к изображению (рис. 1).

На рис. 1 представлено исходное изображение, на котором выбрана рассматриваемая точка с координатами  $(x, y)$  и ее окрестность, представленная в виде прямоугольной области вокруг нее. После применения какого-либо оператора к выбранной окрестности точки, полученный результат записывается в новую матрицу, после чего рассматривается соседняя точка, например, с координатами  $(x+1, y)$ . Процесс повторяется до тех пор, пока не будут рассмотрены все точки изображения.

Результатом наложения оператора (ядра, маски фильтра) на окрестность выбранной точки изображения (рис. 2) является сумма произведений соответствующих друг другу пикселей и коэффициентов фильтра в ядре.

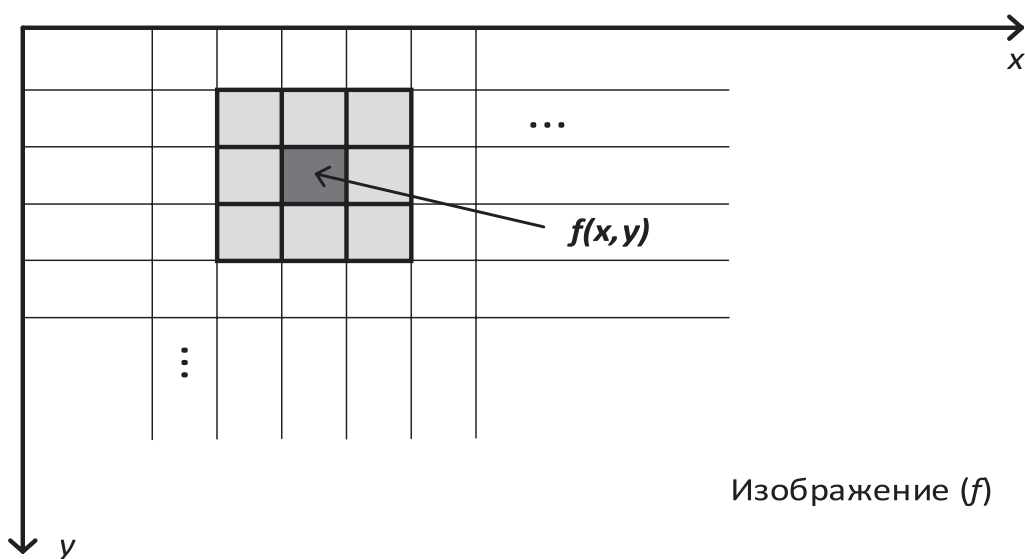


Рис. 1. Пояснение метода пространственной фильтрации

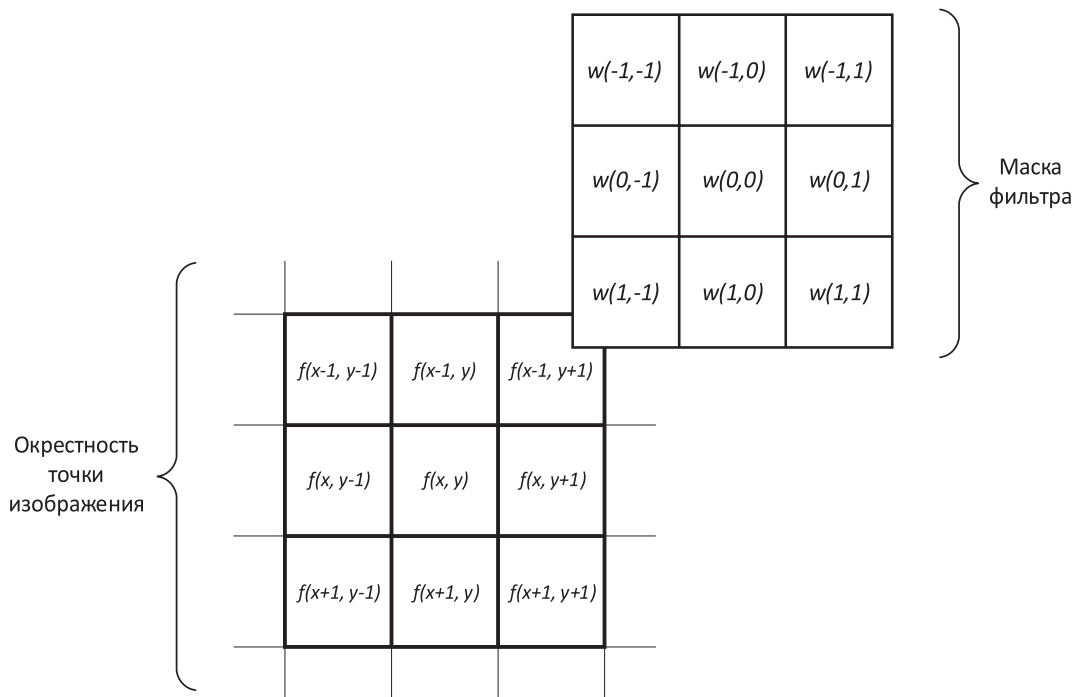


Рис. 2. Наложение ядра фильтра на окрестность выбранной точки

Математически процесс фильтрации можно представить с помощью выражения [3]:

$$g(x, y) = \sum_{s=-\frac{m-1}{2}}^{\frac{m-1}{2}} \sum_{t=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} w(s, t) f(x + s, y + t),$$

где  $m$  и  $n$  – размеры маски фильтра,  $w(s, t)$  – коэффициенты маски,  $f(x, y)$  – значения пикселей в окрестности выбранной точки.

Для оператора размером  $m=n=3$  результат свертки рассматриваемой области изображения с ядром фильтра можно представить в виде:

$$g(x, y) = w(-1, -1)f(x - 1, y - 1) + w(-1, 0)f(x - 1, y) + \dots + w(0, 0)f(x, y) + \dots + w(1, 0)f(x + 1, y) + w(1, 1)f(x + 1, y + 1).$$

### Маски фильтров выделения границ

В общем случае размеры масок могут быть произвольными, но чаще всего используются маски с нечетными размерами (в основном 3x3), так как они являются центрированными. При их использовании рассматриваются все пиксели вокруг выбранной точки. Коэффициенты ядер также могут быть различными, они напрямую влияют на результат фильтрации [3].

Градиентные методы выделения границ основаны на вычислении производной интенсивности изображения по горизонтали и вертикали. Градиент указывает направление и величину наибольшего изменения функции (в данном случае, интенсивности изображения) в рассматриваемой точке. Так как изображение является дискретным [5], то частные производные для любой выбранной точки можно получить с помощью выражений [3, 6]:

$$g_x = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = f(x + 1, y) - f(x, y);$$

$$g_y = \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = f(x, y + 1) - f(x, y).$$

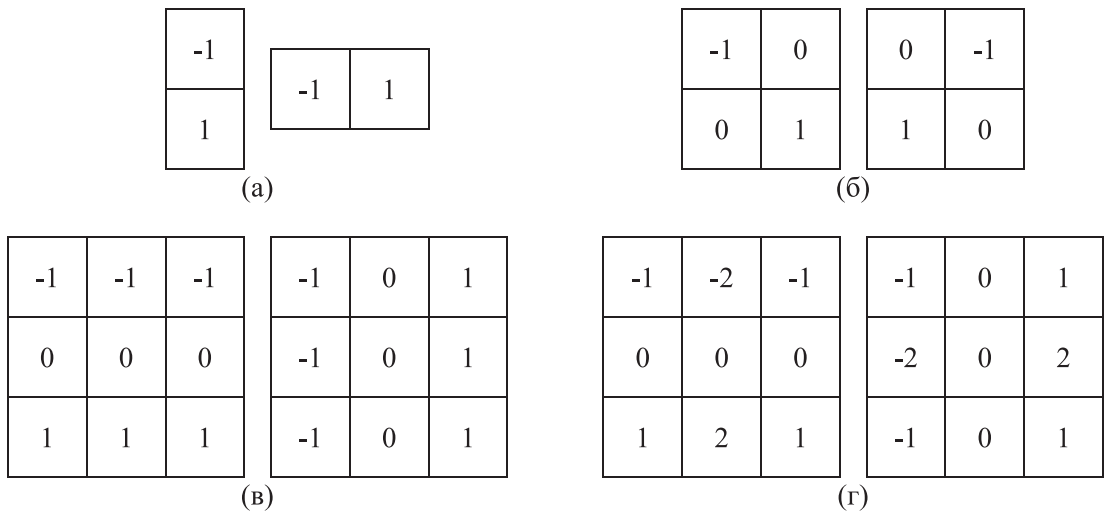


Рис. 3. Распространенные маски фильтра: (а) одномерные маски; (б) маски оператора Робертса; (в) маски оператора Прюитта; (г) маски оператора Собеля

Они позволяют определять только изменение яркости в горизонтальном и вертикальном направлениях. В данном случае маски фильтра будут являться одномерными (рис. 3, а).

Для определения изменения яркости в двух диагоналях одномерные маски модифицируются до двумерных (рис. 3, б). Данные ядра известны как маски оператора Робертса. Как видно, маски размером 2x2 не являются центрированными и учитывают не все пиксели вокруг рассматриваемой точки. Для этого необходимы маски с нечетными размерами. Самыми простыми являются маски оператора Прюитта [3, 4], они имеют размер 3x3 (рис. 3, в). Такие ядра являются симметричными относительно центрального значения, что позволяет оперировать всеми значениями интенсивности пикселей вокруг центральной точки.

Для уменьшения эффекта сглаживания [3], а следовательно, усиления градиента между пикселями, средние боковые коэффициенты ядер могут быть удвоены, в результате чего получаются маски, известные как оператор Собеля (рис. 3, г) [7]. Удвоенные коэффициенты масок фильтра способствуют большей чувствительности к изменениям интенсивности вдоль направления вычисления производной.

### Особенности выбора порогового значения фильтра

В качестве исходного изображения был использован простой переход с темного цвета на светлый (рис. 4, а). Данное изображение является идеальным (не имеет шума) и содержит одну границу между двумя областями (темной и светлой), которая четко определена и легко верифицируема. Это позволяет

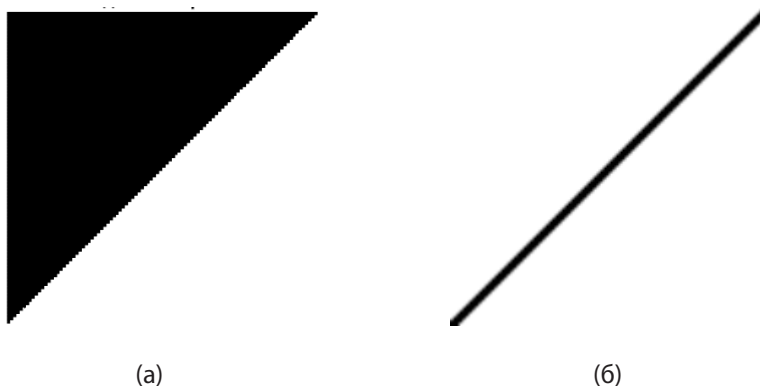


Рис. 4. Тестовое изображение: (а) исходное изображение; (б) истинная граница

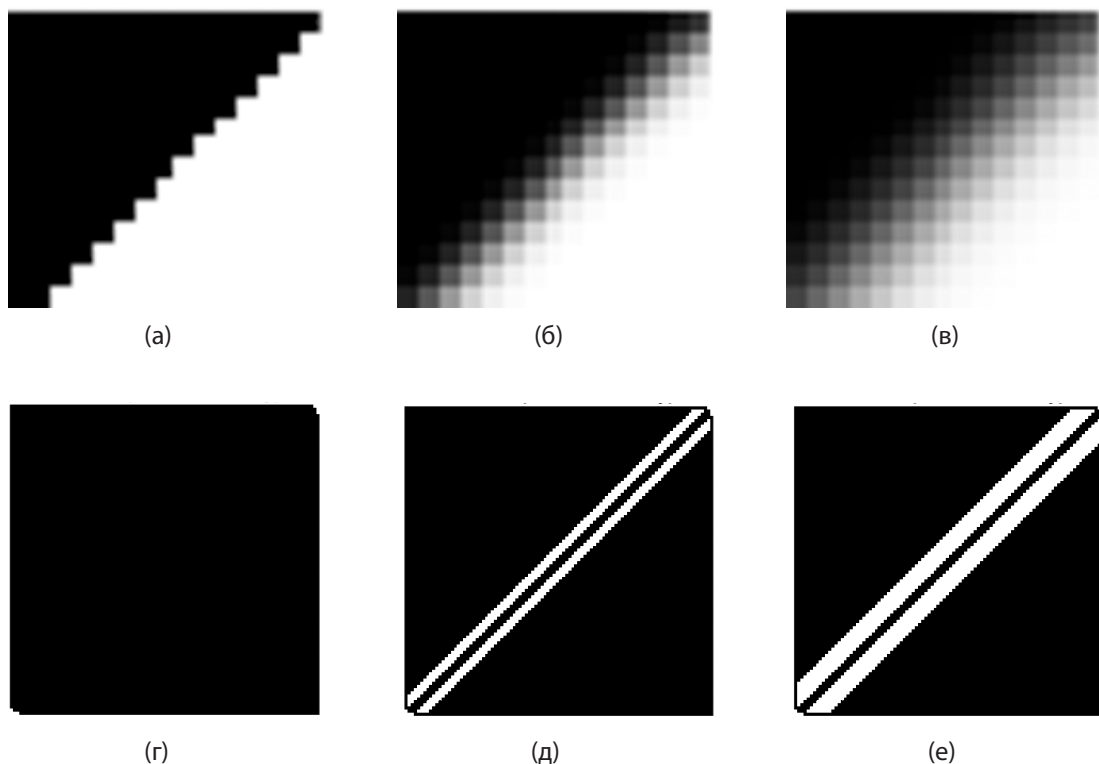


Рис. 5. Определение границы исследуемого изображения: (а) четкая граница; (б), (в) размытая с разной степенью граница; (г), (д), (е) ошибка определения (белые пиксели) границы для (а), (б), (в) соответственно

определить истинную границу (рис. 4, б) для дальнейшего сравнения результатов детектирования контура. В данном случае для выделения границы используется оператор Собеля.

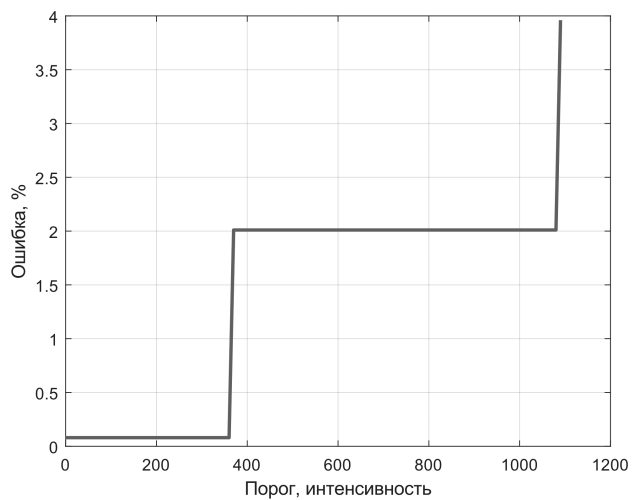
Для исследования особенностей выбора порогового значения рассматриваются три случая (рис. 5, а-в) с различной степенью размытия границы (для наглядности представлена часть изображения в увеличенном масштабе).

Результат работы фильтра (бинарное изображение после пороговой обработки) сравнивается поэлементно с эталонным бинарным изображением с помощью операции исключающего «ИЛИ» (XOR). Операция XOR возвращает единицу, если пиксели в двух изображениях имеют разные значения (один белый, другой черный), и ноль, если эти значения одинаковые. Таким образом, результирующее изображение после операции XOR покажет все позиции, в которых граница не определилась, или определилась неверно. Белые пиксели на изображении (рис. 5, г-е) представляют собой ошибку определения границы (чем шире область,

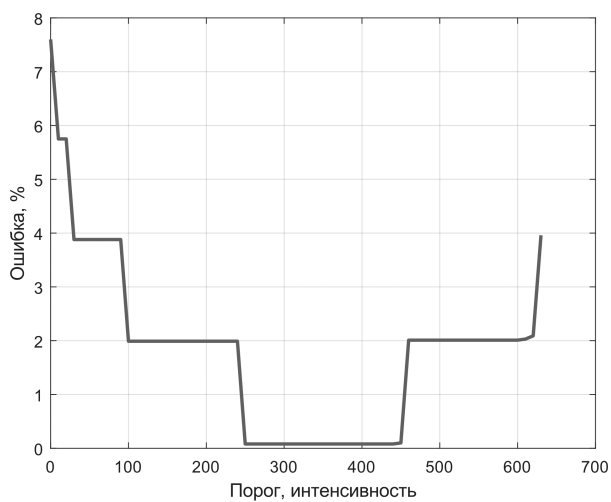
обозначенная белым цветом, тем больше ошибка).

Для количественной оценки точности определения границы изображения подсчитывается общее количество белых пикселей, полученных после операции XOR. Это количество делится на общее число пикселей в изображении и выражается в процентах. Процент ошибки отражает долю пикселей, в которых используемый оператор дал неверный результат. Для анализа влияния порогового значения фильтра на точность детектирования границы объекта строится график зависимости процента ошибки от значения порога для разной степени размытия изображения (рис. 6).

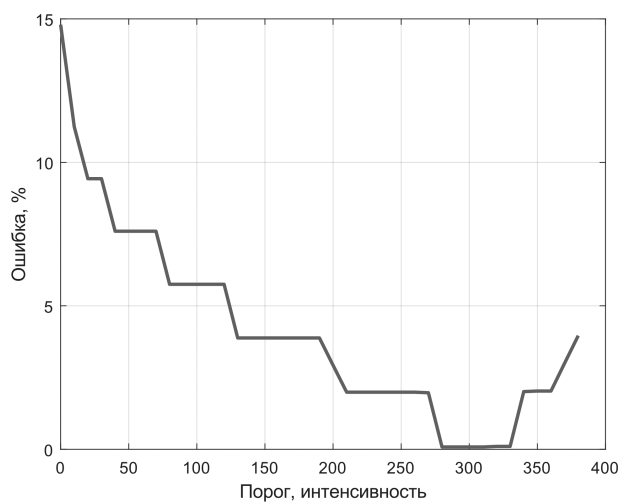
Пороговое значение принятия решения относительно наличия или отсутствия границы определяется требованиями к ширине границы выходного бинарного изображения (чем больше порог, тем уже граница). Оно определяет чувствительность алгоритма к изменениям яркости на изображении – низкий порог приводит к детектированию большего количества границ (включая ложные), а высокий порог в ряде случаев может приве-



(а)

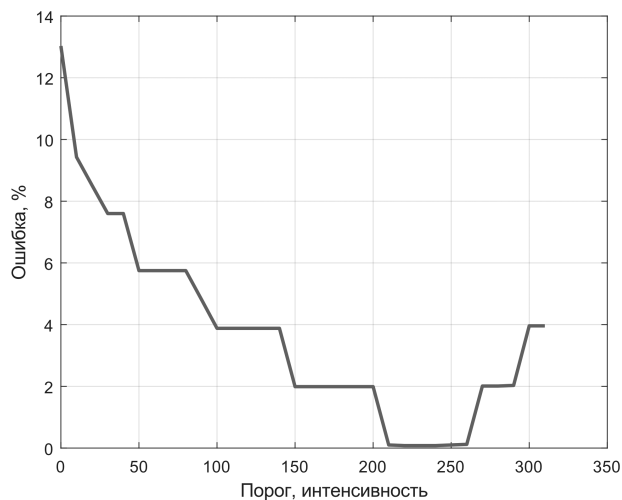


(б)

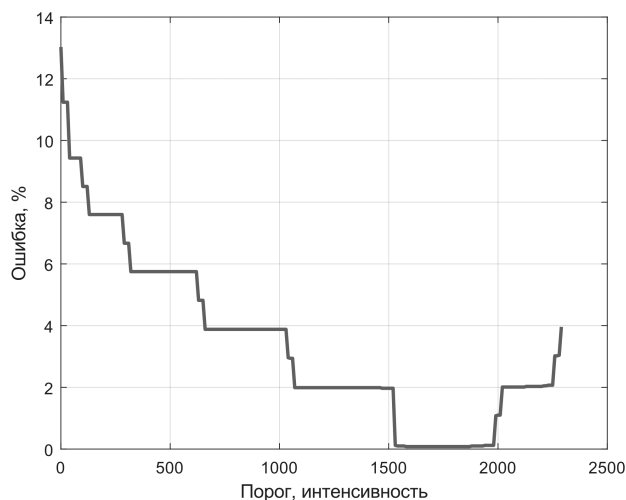


(в)

Рис. 6. Зависимость ошибки определения границ от порогового значения: (а) четкая граница; (б) слабое размытие границы; (в) сильное размытие границы



(а)



(б)

Рис. 7. Зависимость ошибки определения границ от порогового значения: (а) оператор Прюитта; (б) оператор Собея с центральными элементами, увеличенными в 10 раз

сти к пропуску реальных границ. Анализ полученных данных (рис. 6) показывает реальную зависимость точности детектирования границы объекта от яркости изображения. Оно позволяет сделать вывод о том, что для различных ситуаций возможно определить пороговое значение, при котором процент ошибки определения границ минимален. Он будет зависеть от характеристик исходного изображения и может изменяться для различных ситуаций (освещение, зашумленность и т.д.).

На рис. 7 представлены графические зависимости ошибки определения границы объек-

та от порогового значения при использовании фильтра с другими ядрами. Рассматривается случай с сильно размытой границей.

Анализ полученных зависимостей (рис. 6, в и рис. 7, а-б) позволяет сделать вывод о том, что в количественном плане при данном алгоритме расчета, график ошибки имеет схожий вид. Различия заключаются в уменьшении или увеличении пороговой величины для сохранения минимальной ошибки. Таким образом, с увеличением веса центрального элемента в ядрах фильтра увеличивается «окно», в котором должно находиться пороговое значение.



## Заключение

Использование простого тестового изображения с четким и плавным диагональным переходом позволило исключить влияние шума и других явлений, сосредоточившись на оценке работы фильтра выделения границ. Полученные результаты, представленные в виде графических зависимостей ошибки выделенных границ от порогового значения фильтра, наглядно демонстрируют его влияние на точность определения контура объекта. Анализ полученных результатов позволяет определить пороговое значение для конкретного типа изображения. Выбор этого значения является компромиссным. Он должен обеспечить качественное определение реальных границ объекта и подавлять лож-

ные контуры, возникающие при наличии шума и других искажений изображений.

Тип масок фильтра также влияет на выбор порога. Увеличение веса центральных элементов в ядрах фильтра расширяет область оптимальных значений порога. Результаты данного исследования могут быть использованы при разработке алгоритмов первичной обработки видеoinформации в системах технического зрения на основе искусственных фасеточных глаз [2, 8, 9]. Вместе с тем результаты исследования показывают, что требуется проведение дополнительных исследований для создания алгоритмов, реализующих адаптивное определение порогового значения для оценки качества того или иного типа изображения.

---

## Литература

1. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Изд-во «Радио и связь», 1993. – 315 с.
2. Портнов А.В., Николаев А.Н., Николаева А.Р. Устройство и алгоритмы первичной обработки видеoinформации для системы машинного зрения на основе искусственных фасеточных глаз // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере, 2023. – № 4 (50). – С. 5-12. DOI: 10.14529/secur230401.
3. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений: Издание 3-е, исправленное и дополненное / Р. Гонсалес, Р. Вудс // Москва: Техносфера, 2012. – 1104 с.
4. Пахомова О.А. Сравнительный анализ градиентных методов выделения контура объекта на изображении / О.А. Пахомова, О.Я. Кравец // Вестник ВГУ, 2018. – № 1(14). – С. 37-43.
5. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Пер. с англ. / У. Прэтт // М.: Мир, 1982. – 480 с.
6. Методы компьютерной обработки изображений / М.В. Гашников, Н.И. Глунов, Н.Ю. Ильясова [и др.]. – Под ред. В.А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с. – ISBN 5-9221-0270-2.
7. Sobel I. A 3x3 Isotropic Gradient Operator for Image Processing / I. Sobel, G. Feldman // Pattern Classification and Scene Analysis, 1968. – P. 271-272.
8. Соломатин В. Фасеточное зрение: перспективы в оптико-электронных системах // Фотоника, 2009. – № 1. – С. 22-26.
9. Федянина Р.С., Соколинский Л.Б. Двумерная модель фасеточного зрения // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика, 2020. – Т. 9, № 4. – С. 48-66. DOI: 10.14529/cmse200404.

## References

1. Farina A. Tsifrovaya obrabotka radiolokatsionnoy informatsii. Soprovozhdeniye tseley. / A. Farina, F. Studer. – M.: Izd-vo «Radio i svyaz'», 1993. – 315 s.
2. Portnov A.V., Nikolayev A.N., Nikolayeva A.R. Ustroystvo i algoritmy pervichnoy obrabotki videoinformatsii dlya sistemy mashinnogo zreniya na osnove iskusstvennykh fasetochnykh glaz // Vestnik UrFO. Bezopasnost' v informatsionnoy sfere, 2023. – № 4 (50). – S. 5-12. DOI: 10.14529/secur230401.
3. Gonsales R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy: Izdaniye 3-ye, ispravlennoye i dopolnennoye / R. Gonsales, R. Vuds // Moskva: Tekhnosfera, 2012. – 1104 s.
4. Pakhomova O.A. Sravnitel'nyy analiz gradiyentnykh metodov vydeleniya kontura ob'yekta na izobrazhenii / O.A. Pakhomova, O.YA. Kravets // Vestnik VGTU, 2018. – № 1(14). – S. 37-43.
5. Prett U. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. Per. s angl. / U. Prett // M.: Mir, 1982. – 480 s.
6. Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy / M.V. Gashnikov, N.I. Glumov, N.YU. Il'yasova [i dr.]. – Pod red. V.A. Soyfera. – 2-ye izd., ispr. – M.: FIZMATLIT, 2003. – 784 s. – ISBN 5-9221-0270-2.
7. Sobel I. A 3x3 Isotropic Gradient Operator for Image Processing / I. Sobel, G. Feldman // Pattern Classification and Scene Analysis, 1968. – p. 271-272.

8. Solomatin V. Fasetochnoye zreniye: perspektivy v optiko-elektronnykh sistemakh // Fotonika, 2009. – № 1. – S. 22–26.

9. Fedyanina R.S., Sokolinskiy L.B. Dvumernaya model' fasetochnogo zreniya // Vestnik YUUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika, 2020. – Т. 9, № 4. – S. 48–66. DOI: 10.14529/cmse200404.

---

**Портнов Андрей Владимирович**, аспирант ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, д. 76. E-mail: portnovav@susu.ru

**Даровских Станислав Никифорович**, доктор технических наук, доцент, профессор ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, д. 76. E-mail: darovskikhsn@susu.ru

**Николаев Андрей Николаевич**, доцент ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, д. 76. E-mail: nikolaevan@susu.ru

**Николаева Алиса Робертовна**, инженер ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, д. 76. E-mail: nikolaevaar@susu.ru

**Portnov Andrey Vladimirovich**, post-graduate student of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University (national research university)". 454080, Chelyabinsk, Lenina avenue, 76. E-mail: portnovav@susu.ru

**Darovskikh Stanislav Nikiforovich**, doctor of technical sciences, docent, professor of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University (national research university)". 454080, Chelyabinsk, Lenina avenue, 76. E-mail: darovskikhsn@susu.ru

**Nikolaev Andrey Nikolaevich**, docent of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University (national research university)". 454080, Chelyabinsk, Lenina avenue, 76. E-mail: nikolaevan@susu.ru

**Nikolaeva Alisa Robertovna**, engineer of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University (national research university)". 454080, Chelyabinsk, Lenina avenue, 76. E-mail: nikolaevaar@susu.ru