

УДК 623.4.023.41

## ЛИНЕЙНЫЙ ОПЕРАТОР ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ НА ЦИФРОВОМ ИЗОБРАЖЕНИИ ГРАНИЦ ОБЪЕКТОВ С АПРИОРНО ЗАДАННОЙ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ

**Т. С. Кислицына**, ассистент кафедры радиотехнических систем РГРТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0003-0374-8316, e-mail: stroikova.t.s@rsreu.ru

**И. С. Холопов**, к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0001-5220-0811, e-mail: kholopov.i.s@rsreu.ru

**Е. С. Штрунова**, к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем РГРТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0003-1878-8011, e-mail: shtrunova.e.s@rsreu.ru

*Целью работы является разработка линейного двумерного оператора, реализующего вычисление на цифровом изображении градиента яркости в априорно заданном угловом направлении. Приведены геометрическая постановка задачи и алгоритм расчета весовых коэффициентов маски линейного фильтра. Показано, что разработанный линейный оператор позволяет успешно выделять границы заданной пользователем угловой ориентации при отношении сигнал-шум более 10. Приведён пример применения линейного оператора в прикладной задаче измерения дальности до объектов на железной дороге по информации от единственного кадра.*

**Ключевые слова:** градиент яркости, детектор границ, операторы Прэвитта и Неватти – Бабу.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2022-80-171-180

### Введение

Оценка ориентации объектов на цифровых изображениях является одной из важных задач интеллектуального анализа и обработки изображений и применяется для сегментации, распознавания объектов, анализа текстур [1-3]. Для её успешного выполнения требуется решение частной задачи – детектирования границ. Для выделения вертикально и горизонтально ориентированных границ известны [4] операторы Прэвитта и Собела, а для выделения границ, ориентированных под углом  $45^\circ$  – операторы Робертса, Кирша и Щарра [4-6]. Все перечисленные операторы основаны на вычислении градиента яркости и в зависимости от направления его вектора позволяют определить 8 преимущественных направлений его вектора:  $0^\circ, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ, \pm 135^\circ, 180^\circ$ . Предполагается, что каждому преимущественному направлению вектора градиента  $\alpha_i, i = 1, 2, \dots, 8$ , соответствует сектор  $(\alpha_i - 22,5^\circ, \alpha_i + 22,5^\circ]$ . При этом известные операторы детектирования границ обеспечивают максимальную дисперсию результата фильтрации именно для базовых, кратных  $45^\circ$ , преимущественных направлений. В то же время в ряде прикладных задач, связанных с выделением на изображении границ протяженных, близких к прямолинейным, объектов (например, линий дорожной разметки [7, 8], рельсов железнодорожных путей [9], проводов воздушных линий электропередачи [10]) их угловая ориентация  $\alpha$  может отличаться от кратных  $45^\circ$  значений на  $10^\circ$  и более. В таком случае применение единственного оператора для вычисления градиента яркости в направлении  $\alpha_\perp$ , перпендикулярном линии с углом наклона  $\alpha$ , для наиболее близкой угловой ориентации  $\alpha_i$  не будет являться оптимальным в смысле обеспечения максимального отношения сигнал-шум (вдоль границы изображения объектов).

**Целью работы** является разработка линейного 2D оператора для выделения на изображении границ априорно заданной угловой ориентации.

### Геометрическая постановка задачи

В отличие от операторов, рассмотренных во введении, маски фильтров для выделения на изображении границ заданной угловой ориентации в технической литературе широко не

освещены. Упоминания о таких фильтрах содержатся, например, в обзоре [11], монографии [12] и диссертации [13], где приводится информация о предложенных в 1980-м году масках Неватии – Бабу [14, 15] (для сравнения: первое упоминание о фильтре Джудит Прэвитт датировано 1970-м годом [16], а о фильтре Собела – 1973-м [17], хотя сам фильтр, по воспоминаниям его автора – Ирвинга Собела – был впервые апробирован на конференции по искусственному интеллекту ещё в 1968-м году [18]). В работах [14, 15] приводятся примеры масок Неватии – Бабу с целочисленными весами для вычисления градиента вдоль направлений, перпендикулярных  $\theta = 30^\circ$  и  $\theta = 60^\circ$ , где угол  $\theta$  отсчитывается в направлении против часовой стрелки от вертикали:

$$\mathbf{M}^{\text{НБ}}_{5 \times 5}(\theta) \Big|_{\theta=30^\circ} = \begin{bmatrix} -100 & 32 & 100 & 100 & 100 \\ -100 & -78 & 92 & 100 & 100 \\ -100 & -100 & 0 & 100 & 100 \\ -100 & -100 & -92 & 78 & 100 \\ -100 & -100 & -100 & -32 & 100 \end{bmatrix}, \mathbf{M}^{\text{НБ}}_{5 \times 5}(\theta) \Big|_{\theta=60^\circ} = \begin{bmatrix} 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ -32 & 78 & 100 & 100 & 100 \\ -100 & -92 & 0 & 92 & 100 \\ -100 & -100 & -100 & -78 & 32 \\ -100 & -100 & -100 & -100 & 100 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Идея расчета элементов маски основана на представлении области изображения, накрываемой маской оператора вычисления градиента, по аналогии с [19], где светлomu сектору соответствует элемент маски, равный «1», а темному сектору – равный «-1». Технический результат достигается тем, что фактически вес каждого элемента маски (квадрата размером  $1 \times 1$  пиксель) определяется как разность площадей, накрытых темным и светлым секторами. Не нарушая общности решения задачи, примем за начальное (нулевое) положение ориентацию  $\alpha$  границы по горизонтали и направление вектора градиента яркости «вниз». При  $\alpha = 0^\circ$  (рисунок 1) маски размером  $3 \times 3$  и  $5 \times 5$  пикселей соответствуют маскам  $\mathbf{M}$  оператора Прэвитт аналогичного размера [2]:

$$\mathbf{M}_{3 \times 3}(\alpha) \Big|_{\alpha=0} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{5 \times 5}(\alpha) \Big|_{\alpha=0} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для произвольного  $\alpha$ ,  $-180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ , отсчитываемого против часовой стрелки от горизонтали, требуется учёт всех возможных вариантов пересечения границы темного и светлого секторов со сторонами квадратов каждого пикселя [11].

Рассмотрим в качестве примера расчет элементов маски для  $\alpha = -60^\circ$  (рисунок 2).

Из геометрических построений рисунка 2 следует (см. Приложение), что веса отличных от 0 и  $\pm 1$  элементов маски  $m_{yx}$  вычисляются по формулам:

$$m_{1,-1} = 1 - 0,25(3\text{tg}\theta - 1)(3 - \text{tg}^{-1}\theta),$$

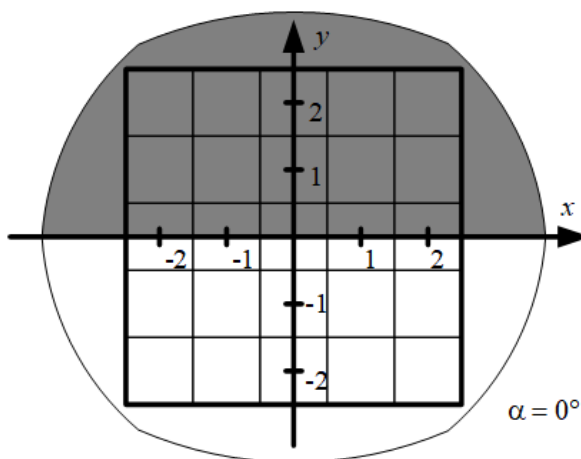
$$m_{1,0} = 0,25(\text{tg}\theta - 1)(1 - \text{tg}^{-1}\theta) - 1,$$

$$m_{2,-1} = 2(1 - 2\text{tg}\theta),$$

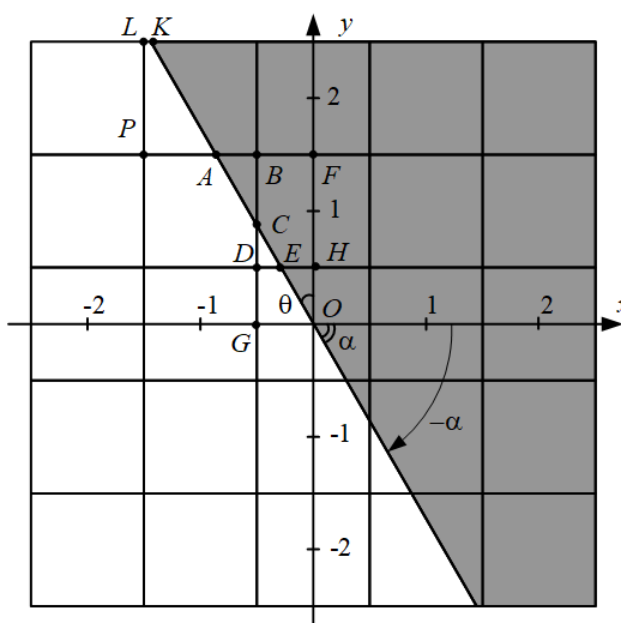
$$m_{-1,1} = -|m_{1,-1}|, m_{-1,0} = |m_{1,0}|, m_{-2,1} = |m_{2,-1}|,$$

где  $\theta = 90^\circ - |\alpha|$ . Таким образом,

$$\mathbf{M}_{5 \times 5}(\alpha) \Big|_{\alpha=-60} = \begin{bmatrix} 1 & -0,309 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0,768 & -0,923 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0,923 & -0,768 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0,309 & -1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$



**Рисунок 1 – Пример представления маски оператора Прэвитт для вычисления градиента яркости в направлении «вниз»**  
**Figure 1 – An example of Prewitt operator mask representation for computing brightness gradient in the «down» direction**



**Рисунок 2 – Геометрическая постановка задачи для расчета элементов маски при  $\alpha = -60^\circ$**   
**Figure 2 – Geometric formulation of the problem for calculating mask elements at  $\alpha = -60^\circ$**

Элементы маски (3) можно привести к виду маски Неватии – Бабу для угла  $\theta = 90^\circ + \alpha = 90^\circ + (-60^\circ) = 30^\circ$  путем умножения каждого элемента маски (3) на 100 и его округления до ближайшего целого:

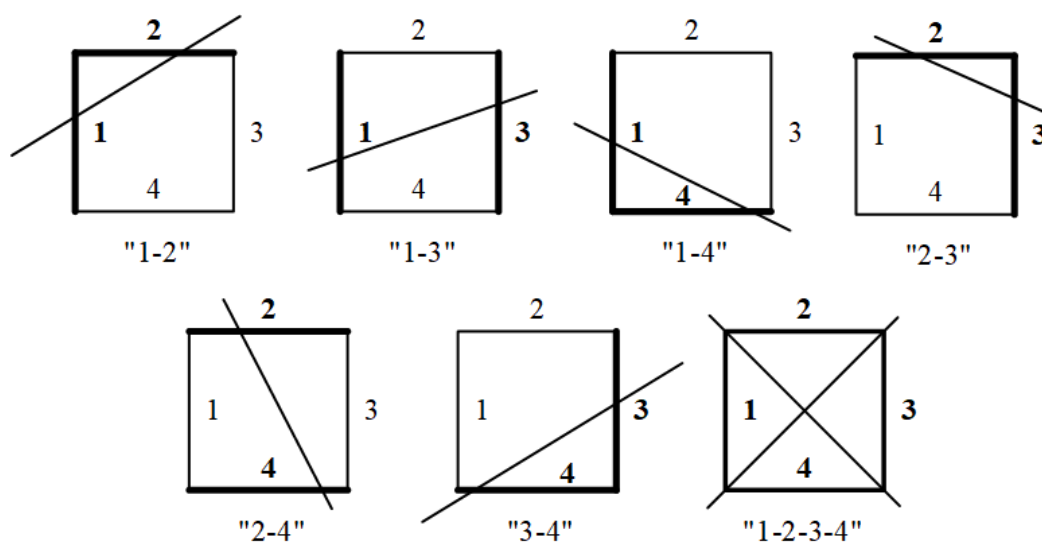
$$M_{5 \times 5}^n(\alpha) \Big|_{\alpha=-60} = \begin{bmatrix} 100 & -31 & -100 & -100 & -100 \\ 100 & 77 & -92 & -100 & -100 \\ 100 & 100 & 0 & -100 & -100 \\ 100 & 100 & 92 & -77 & -100 \\ 100 & 100 & 100 & 31 & -100 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Следует отметить, что 21 из 25-и элементов маски с точностью до знака (так как в [13, 14] за начальное направление принято направление вектора градиента «вправо») совпадают с элементами маски Неватии – Бабу. Авторы статьи не могут объяснить отличие на единицу модулей элементов  $m_{1,-1}$ ,  $m_{-1,1}$ ,  $m_{2,-1}$  и  $m_{-2,1}$  маски (4) от элементов с аналогичными индексами маски Неватии – Бабу для  $\theta = 30^\circ$  (1), приведённой в работах [11, 13, 14].

### Алгоритм расчёта элементов маски линейного оператора для вычисления градиента яркости вдоль заданного направления

Недостатком рассмотренного в [11] подхода к расчёту элементов маски фильтра является отсутствие универсальности применяемых формул. Действительно, при изменении угла  $\alpha$  граница разделения положительных и отрицательных весов в области вычисления градиента может пересекать иные пиксели маски и/или разбивать их на иные пары фигур: треугольник – треугольник (для углов  $\alpha$ , кратных  $45^\circ$ ), треугольник – трапеция, трапеция – трапеция). Таким образом, для каждого заданного угла  $\theta$  требуется, по сути, каждый раз вручную [11] определять аналитические выражения для элементов маски фильтра  $\mathbf{M}(\alpha)$ .

По этой причине авторами статьи в работе [20] разработан алгоритм для автоматического вычисления элементов маски. Для работы алгоритма вводят в рассмотрение бинарные признаки  $b_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ , принимающие значение 1, если прямая  $y = kx$  пересекает  $i$ -ю границу пикселя, и 0 – в противном случае. Обозначив левую, верхнюю, правую и нижнюю сторону границы пикселя (квадрата с единичной длиной стороны) соответственно индексами 1, 2, 3 и 4, получим семь возможных комбинаций пересечения прямой  $y = kx = (\operatorname{tg}\alpha)x$  с их сторонами: "1-2", "1-3", "1-4", "2-3", "2-4", "3-4" и "1-2-3-4" – при  $|\alpha| = 45^\circ$  и  $|\alpha| = 135^\circ$  (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Возможные семь вариантов пересечения границ пикселя с прямой, в направлении перпендикуляра к которой вычисляется градиент яркости**  
**Figure 3 – Possible seven variants of intersection of pixel boundaries with a straight line, in the direction of the perpendicular to which the brightness gradient is calculated**

При этом для комбинаций "1-2", "1-4", "2-3" и "3-4" площадь меньшей части квадрата, отсекаемой от него прямой  $y = kx$ , рассчитывается по формуле площади треугольника, а для комбинаций "1-3" и "2-4" – по формуле площади трапеции. Для комбинации "1-2-3-4" площади частей квадрата равны, поэтому их разность равна нулю.

Алгоритм расчета весового коэффициента для элемента маски  $m_{y,x}$  с координатами центра пикселя  $(X, Y)$  содержит следующие основные этапы.

1. Вычисление для квадрата размером  $1 \times 1$  пиксель (см. рисунок 2) координат его левого нижнего угла  $(x_0, y_0)$ :

$$x_0 = X - 0,5, \quad y_0 = Y - 0,5.$$

2. Вычисление тангенса угла наклона прямой, являющейся границей темного и светлого секторов,  $k = \operatorname{tg}\alpha$ .

3. Вычисление бинарных признаков  $b_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ , определяющих факт пересечения прямой  $y = kx$  с  $i$ -ми границами пикселя:

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \begin{cases} 1, & y_0 \leq y_1 \leq y_0 + 1, \text{ где } y_1 = kx_0, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases} \\
 b_2 &= \begin{cases} 1, & x_0 \leq x_2 \leq x_0 + 1, \text{ где } x_2 = (y_0 + 1) / k, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases} \\
 b_3 &= \begin{cases} 1, & y_0 \leq y_3 \leq y_0 + 1, \text{ где } y_3 = k(x_0 + 1), \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases} \\
 b_4 &= \begin{cases} 1, & x_0 \leq x_4 \leq x_0 + 1, \text{ где } x_4 = y_0 / k, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{5}$$

4. Определение знака весового коэффициента в зависимости от того, выше или ниже прямой  $y = kx$  находится точка с координатами  $(X, Y)$ :

$$s = \text{sign}(kX - Y),$$

где  $\text{sign}(\cdot)$  – функция знака.

5. Вычисление весового коэффициента элемента маски  $m_{j,i}$  размера  $N \times N$ , содержащего точку  $(X_i, Y_j) = (i - ]m/2[, j - ]m/2[)$ , где  $]\cdot[$  – оператор округления до ближайшего меньшего целого:

$$m_{ji} = \begin{cases} s |1 + 2y_0 - (y_1 + y_3)|, & \text{если } b_1 \& b_3 = 1, \\ s |1 + 2x_0 - (x_2 + x_4)|, & \text{если } b_2 \& b_4 = 1, \\ s |1 - (y_1 - y_0)(x_4 - x_0)|, & \text{если } b_1 \& b_4 = 1, \\ s |1 - (y_0 + 1 - y_1)(x_2 - x_0)|, & \text{если } b_1 \& b_2 = 1, \\ s |1 - (x_0 + 1 - x_2)(y_0 + 1 - y_3)|, & \text{если } b_2 \& b_3 = 1, \\ s |(y_0 + 1 - x_4)(y_0 + 1 - y_3)|, & \text{если } b_3 \& b_4 = 1, \\ 0, & \text{если } b_1 \& b_2 \& b_3 \& b_4 = 1, \\ s, & \text{в остальных случаях, если пересечений нет.} \end{cases} \tag{6}$$

В (6) оператором амперсанд «&» обозначен логический оператор «И».

Поскольку тангенс угла наклона  $k$  при  $\alpha = \pm 90^\circ$  принимает значения, равные  $\pm\infty$ , а при  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 180^\circ$  – нулю, то для этих углов использовать формулы (5) и (6) нельзя. В данных случаях маску весовых коэффициентов получают поворотом относительно центрального элемента масок оператора Прэвитт (2): для  $\alpha = 90^\circ$  и  $\alpha = -90^\circ$  – поворотом на  $90^\circ$  против и по часовой стрелке соответственно, а для  $\alpha = 180^\circ$  – поворотом на  $180^\circ$ :

$$\mathbf{M}_{5 \times 5}(\alpha) \Big|_{\alpha=90} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{5 \times 5}(\alpha) \Big|_{\alpha=-90} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Для  $\alpha = 0^\circ$  маски (2) оставляют ее без изменений.

Примеры масок для углов  $\alpha = 30^\circ$  и  $\alpha = -75^\circ$ :

$$\mathbf{M}_{5 \times 5}(\alpha) \Big|_{\alpha=30} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -0,768 & 0,309 \\ -1 & -0,923 & 0 & 0,923 & 1 \\ -0,309 & 0,768 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{5 \times 5}(\alpha) \Big|_{\alpha=-75} = \begin{bmatrix} 1 & 0,892 & -0,964 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -0,536 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0,536 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0,964 & -0,892 & -1 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Для реализации вычисления операции свёртки отсчетов цифрового изображения с маской фильтра рационально выполнить переход к маскам с целочисленными весами  $m_{j,i}^H$ . При

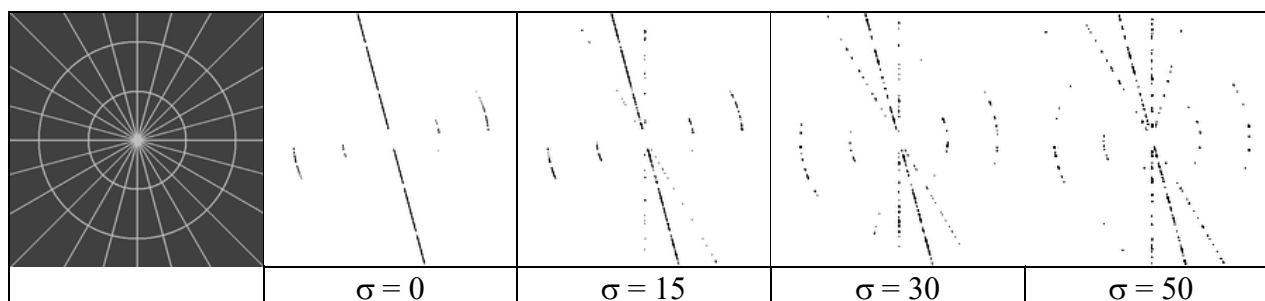
этом для нормирующего множителя целесообразно обеспечить равенство  $w = \sum_i \sum_j m_{j,i}^n = 2^n$  для замены операции деления операций арифметического сдвига на  $n$  разрядов вправо: ( $\gg n$ ). Поэтому, в отличие от [13, 14], при переходе к целочисленной маске авторы предлагают умножать дробные веса маски (6) на  $2^n \left[ \sum_i \sum_j |m_{j,i}| \right]^{-1}$ . Так, для маски (3) при  $n = 11$  получим её целочисленный аналог:

$$\mathbf{M}_{5 \times 5}^n(\alpha) \Big|_{\alpha=-60} = \begin{bmatrix} 93 & -29 & -93 & -93 & -93 \\ 93 & 72 & -86 & -93 & -93 \\ 93 & 93 & 0 & -93 & -93 \\ 93 & 93 & 86 & -72 & -93 \\ 93 & 93 & 93 & 29 & -93 \end{bmatrix} \quad (8)$$

с суммой модулей элементов  $\sum_i \sum_j |m_{j,i}| = 2048 = 2^{11}$ .

### Чувствительность линейного оператора к шуму

Определяемый выражениями (5) и (6) линейный оператор, как и оператор Прэвитт, не робастен [21] к шумам изображения. Результаты обработки для модели аддитивного белого гауссовского шума с различными среднеквадратическими отклонениями (СКО)  $\sigma$  приведены на рисунке 4. Для тестового изображения в виде радиально-круговой мишени с линиями яркостью  $Y = 192$ , проведенными через каждые  $30^\circ$ , расположенной на фоне с яркостью  $Y_\Phi = 64$ , после фильтрации маской  $\mathbf{M}_{5 \times 5}(\alpha) \Big|_{\alpha=-75}$  (7) выполнялась адаптивная бинаризация. Порог бинаризации адаптивно устанавливался по гистограмме таким образом, чтобы его превышали не более 0,2 % яркостей пикселей изображения на выходе фильтра.



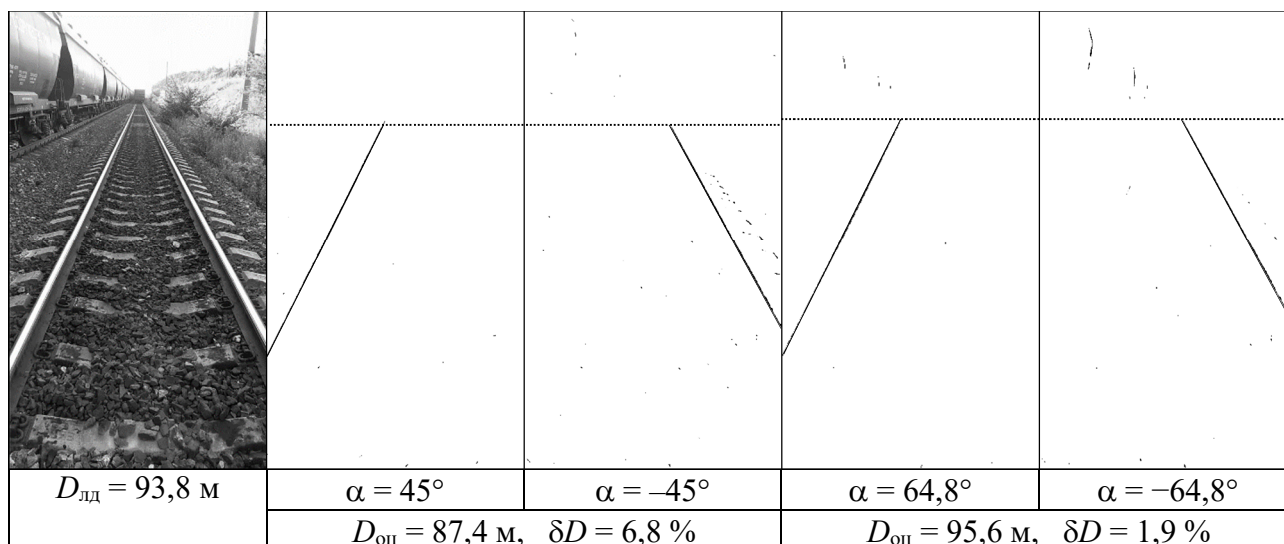
**Рисунок 4 – Результаты фильтрации и бинаризации тестового изображения (слева) при различных СКО шума; приведены негативы бинаризованных изображений**  
**Figure 4 – The results of filtering and binarization of test image (left) at different noise standard deviations; negatives of binarized images are shown**

Из результатов видно, что при  $\sigma > 15$ , т.е. при отношении сигнал-шум  $q < (Y - Y_\Phi)/\sigma = (192 - 64)/15 = 8,53$  в выделяемой границе с угловой ориентацией  $\alpha = -75^\circ$  начинают наблюдаться разрывы. Также наблюдается детектирование участков границ с угловой ориентацией, отличной от заданной (прямые с углами наклона  $-60^\circ$  и  $-90^\circ$ ).

### Сравнение с оператором Прэвитт

Сравнение исследуемого оператора с оператором Прэвитт выполнено по изображению рисунка 5 (слева), где приведена фотография прямолинейного участка пути на южном железнодорожном обходе г. Рязани (географические координаты:  $54,593740^\circ$  с.ш.,  $39,66102^\circ$  в.д.). Измеренная лазерным дальномером Leica Disto D2 дальность до последнего вагона составила  $D_{\text{лд}} = 93,8$  м. Согласно алгоритму работы [22] были оценены дальности  $D_{\text{оц}}$  до железнодо-

рожного состава, стоящего на пути, по информации от единственного кадра с камеры с априори известным углом наклона линии визирования к плоскости горизонта. При этом для выделения контурного препарата рельсов применялись два оператора с маской  $5 \times 5$  пикселей: разработанный линейный оператор при  $\alpha = 64,8^\circ$  и  $\alpha = -64,8^\circ$  (в соответствии с углом наклона рельсов пути на изображении) для левой и правой половин кадра и оператор Прэвитт для наиболее близких значений углов: соответственно  $\alpha = 45^\circ$  и  $\alpha = -45^\circ$ . Для выделения контуров порог бинаризации адаптивно устанавливался по гистограмме таким образом, чтобы его превышали яркости не более 0,1 % пикселей изображения на выходе фильтра.



**Рисунок 5 – Результаты обработки изображения рельсового пути;**

**слева направо: исходное изображение, результаты бинаризации после фильтрации масками оператора Прэвитт для  $\alpha = 45^\circ$  и  $\alpha = -45^\circ$ , результаты бинаризации после фильтрации масками рассмотренного оператора для  $\alpha = 64,8^\circ$  и  $\alpha = -64,8^\circ$**

**Figure 5 – The results of railway image matching; from left to right: initial image, binarization results after filtering with Prewitt masks for  $\alpha = 45^\circ$  and  $\alpha = -45^\circ$ , binarization results after filtering with considered operator masks for  $\alpha = 64,8^\circ$  and  $\alpha = -64,8^\circ$**

Применение фильтра, определяемого выражениями (5) и (6), при наличии априорной информации об угловой ориентации рельсов пути на изображении позволяет успешно выделить контура в той части изображения, где их толщина минимальна. Этим достигается большая протяженность неразрывной части контура после адаптивной бинаризации (её верхняя граница для контура меньшей протяженности на рисунке 5 маркирована пунктирной линией). Выделение контуров изображений рельсов линейным оператором, учитывающим априорную информацию об угловой ориентации объектов, позволяет более чем в 3,5 раза снизить относительную погрешность измерения дальности до вагона  $\delta D$  согласно алгоритму [22].

### Заключение

Рассмотрен алгоритм автоматического расчета элементов маски двумерного линейного фильтра для выделения границ априори заданной угловой ориентации. Обосновано аналитическое выражение для перехода к целочисленным весам маски при аппаратной реализации фильтра. Исследована его чувствительность к действию белого гауссовского шума. Обоснованы преимущества применения фильтра в сравнении с известным фильтром Прэвитт на примере прикладной задачи измерения дальности до вагона на железнодорожном транспорте. При этом показано, что учёт априорной информации об угловой ориентации изображений рельсов пути обеспечивает снижение относительной погрешности измерений дальности до 3,5 раз.

### Приложение

Из геометрической постановки задачи (см. рисунок 2) следует, что вес элемента маски  $m_{1,-1}$  равен разности площади квадрата с длиной стороны 1 и удвоенной площади треугольника  $ABC$ :

$$m_{1,-1} = 1 - 2S_{\Delta ABC} = 1 - 2 \cdot 0,5 \cdot AB \cdot BC = 1 - (AF - BF)(BG - CG) = \\ = 1 - (1,5 \operatorname{tg} \theta - 0,5)(1,5 - 0,5 \operatorname{tg}^{-1} \theta) = 1 - 0,25(3 \operatorname{tg} \theta - 1)(3 - \operatorname{tg}^{-1} \theta).$$

Модуль веса элемента маски  $m_{1,0}$  равен разности площади квадрата с длиной стороны 1 и удвоенной площади треугольника  $CDE$ :

$$|m_{1,0}| = 1 - 2S_{\Delta CDE} = 1 - 2 \cdot 0,5 \cdot CD \cdot DE = 1 - (CG - DG)(DH - EH) = \\ = 1 - (0,5 \operatorname{tg} \theta - 0,5)(0,5 - 0,5 \operatorname{tg}^{-1} \theta) = 1 - 0,25(\operatorname{tg} \theta - 1)(1 - \operatorname{tg}^{-1} \theta).$$

Поскольку большая часть пикселя маски  $(1, 0)$  накрыта оператором со знаком «-1», то

$$m_{1,0} = -|m_{1,0}| = 0,25(\operatorname{tg} \theta - 1)(1 - \operatorname{tg}^{-1} \theta) - 1.$$

Модуль веса элемента маски  $m_{2,-1}$  равен разности площади квадрата с длиной стороны 1 и удвоенной площади трапеции  $AKLP$ :

$$|m_{2,-1}| = 1 - 2S_{AKLP} = 1 - 2 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot (KL + AP) = 1 - [(1,5 - 2,5 \operatorname{tg} \theta) + (1,5 - 1,5 \operatorname{tg} \theta)] = \\ = 1 - (3 - 4 \operatorname{tg} \theta) = 2(2 \operatorname{tg} \theta - 1).$$

Поскольку большая часть пикселя маски  $(2, -1)$  накрыта оператором со знаком «-1», то

$$m_{2,-1} = -|m_{2,-1}| = 2(1 - 2 \operatorname{tg} \theta).$$

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).*

### Библиографический список

1. **Jiang X.** Extracting image orientation feature by using integration operator // Pattern Recognition. 2007. Vol. 40, No. 2. pp. 705-717.
2. **Park C. H., Park H.** Fingerprint classification using fast Fourier transform and nonlinear discriminant analysis // Pattern Recognition. 2005. Vol. 38, No. 4. pp. 495-503.
3. **Новиков А. И., Устюков Д. С.** Метод обнаружения объектов с дополнительным семантическим признаком // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 79. С. 89-100.
4. **Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Бондаренко А. В., Ососков М. В., Моржин А. В.** Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
5. **Ziou D., Tabbone S. A.** Edge detection techniques – an overview // Pattern Recognition and Image Analysis. 1998. Vol. 8, No. 4. pp. 537-559.
6. **Kirsch R.** Computer determination of the constituent structure of biological images // Computers and Biomedical Research. 1971. Vol. 4, No. 3. pp. 315-328.
7. **Кий К. И., Досаев Р. В.** Глобальный анализ изображений: детектирование и распознавание базисных информативных элементов дорожных сцен // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020): сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школы. В 4-х томах / под ред. В.В. Мясникова. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2020. С. 454-462.
8. **Li Q., Zhou J., Li B., Guo Y., Xiao J.** Robust lane-detection method for low-speed environments // Sensors. 2018. Vol. 18, No. 12. pp. 1-18.
9. **Maire F., Bigdeli A.** Obstacle-free range determination for rail track maintenance vehicles // Proc. of 11th Int. Conf. on Control Automation Robotics & Vision. Singapore, 2010. pp. 1-9.
10. **Бабаян П. В., Шубин Н. Ю.** Обнаружение линий электропередач на изображении с помощью преобразования Радона // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2017. Т. 7. № 3. С. 141-144.
11. **Andrade-Cetto J., Kak A. C.** Object recognition // Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering / ed. **J. G. Webster**. New York: John Wiley & Sons, 2000. pp. 449-470.
12. **Zhang Y. J.** Handbook of Image Engineering. Singapore: Springer Nature, 2021. 1869 p.



13. **Костюхина Г. В.** Модель, метод и комплекс программ выделения контуров на изображениях с использованием энергетических признаков: дисс. канд. техн. наук: 05.13.18. – Казань: КНИТУ, 2020. 238 с.
14. **Nevatia R., Babu K. R.** Linear feature extraction and description // Computer graphics and image processing. 1980. Vol. 13. pp. 257-269.
15. **Medioni G., Nevatia R.** Matching images using linear features // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1984. Vol. PAMI-6, No. 6. pp. 675-685.
16. Picture processing and psychopictories / ed. by **B. S. Lipkin and A. Rosenfeld**. New York, Academic Press, 1970. 526 p.
17. **Duda R., Hart P.** Pattern classification and scene analysis. New York: John Wiley & Sons, 1973. 512 p.
18. History and Definition of the so-called "Sobel Operator", more appropriately named the Sobel-Feldman Operator. Режим доступа: URL: [https://www.researchgate.net/profile/Irwin-Sobel/publication/239398674\\_An\\_Isotropic\\_3x3\\_Image\\_Gradient\\_Operator/links/557e06f508aeaa18b777c389/An-Isotropic-3x3-Image-Gradient-Operator.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Irwin-Sobel/publication/239398674_An_Isotropic_3x3_Image_Gradient_Operator/links/557e06f508aeaa18b777c389/An-Isotropic-3x3-Image-Gradient-Operator.pdf) (дата обращения: 20.04.2022).
19. **Chella A., Maniscalco U., Pirrone R.** A neural architecture for 3D segmentation // Lecture Notes in Computer Science. 2003. Vol. 2859. pp. 121-128.
20. **Kislitsyna T. S., Kholopov I. S.** Generalized compass operator for edge detection with the required angular orientation // Proc. 10th Mediterranean Conf. on Embedded Computing. – Budva, Montenegro, 2021. pp. 302-305.
21. **Zuniga O. A., Haralick R. M.** Integrated directional derivative gradient operator // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. 1987. Vol. SMC-17, No. 3. pp. 508-517.
22. **Kudinov I. A., Kholopov I. S.** Perspective-2-point solution in the problem of indirectly measuring the distance to a wagon // Proc. 10th Mediterranean Conf. on Embedded Computing. – Budva, Montenegro, 2020. pp. 1-5.

UDC 623.4.023.41

## LINEAR OPERATOR TO DETECT OBJECT EDGES WITH A PRIORI SPECIFIED ANGULAR ORIENTATION IN A DIGITAL IMAGE

**I. S. Kholopov**, Ph.D. (Tech.), associate professor, Department of Radio Engineering Systems, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-5220-0811, e-mail: kholopov.i.s@rsreu.ru

**T. S. Kislitsyna**, assistant, Department of Radio Engineering Systems, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-0374-8316, e-mail: stroikova.t.s@rsreu.ru

**E. S. Shtrunova**, Ph.D. (Tech.), associate professor, Department of Radio Engineering Systems, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-1878-8011, e-mail: shtrunova.e.s@rsreu.ru

*The aim of the work is to develop a linear two-dimensional operator that implements the calculation of a brightness gradient in a digital image in a priori given angular direction. The geometric statement of the problem and the algorithm for calculating the weight coefficients of linear filter mask are given. It is shown that the developed linear operator makes it possible to successfully detect edges with user-defined angular orientation when signal-to-noise ratio is more than 10. An example of using a linear operator in an applied task of measuring the distance to objects on a railway using information from a single camera frame is given.*

**Keywords:** brightness gradient, edge detector, Prewitt operator, Nevatia – Babu operator.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-80-171-180

### References

1. **Jiang X.** Extracting image orientation feature by using integration operator. *Pattern Recognition*. 2007, vol. 40, no. 2. pp. 705-717.

2. **Park C. H., Park H.** Fingerprint classification using fast Fourier transform and nonlinear discriminant analysis. *Pattern Recognition*. 2005, vol. 38, no. 4. pp. 495-503.
3. **Novikov A. I., Ustjukov D. S.** Metod obnaruzhenija objektov s dopolnitel'nym semanticheskim priznakom. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 79. pp. 89-100. (in Russian).
4. **Vizil'ter Ju. V., Zheltov S. Ju., Bondarenko A. V., Ososkov M. V., Morzhin A. V.** *Obrabotka i analiz izobrazhenij v zadachah mashinnogo zrenija: kurs lekcij i prakticheskikh*. Moscow: Fizmatkniga. 2010. 672 p. (in Russian).
5. **Ziou D., Tabbone S. A.** Edge detection techniques – an overview. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 1998, vol. 8, no. 4, pp. 537-559.
6. **Kirsch R.** Computer determination of the constituent structure of biological images. *Computers and Biomedical Research*. 1971, vol. 4, no. 3, pp. 315-328.
7. **Kij K. I., Dosaev R. V.** Global'nyj analiz izobrazhenij: detektirovanie i raspoznavanie bazisnyh informativnyh jelementov dorozhnyh scen. *Informacionnye tehnologii i nanotekhnologii (ITNT-2020): sbornik trudov po materialam VI Mezhdunarodnoj konferencii i molodezhnoj shkoly. V 4-h tomah / pod red. V.V. Mjasnikova*. Samara: Samarskij nacional'nyj issledovatel'skij universitet imeni akademika S.P. Koroleva, 2020. pp. 454-462. (in Russian).
8. **Li Q., Zhou J., Li B., Guo Y., Xiao J.** Robust lane-detection method for low-speed environments. *Sensors*. 2018, vol. 18, no. 12. pp. 1-18.
9. **Maire F., Bigdeli A.** Obstacle-free range determination for rail track maintenance vehicles. *Proc. of 11th Int. Conf. on Control Automation Robotics & Vision*. Singapore. 2010. pp. 1-9.
10. **Babajan P. V., Shubin N. Ju.** Obnaruzhenie linij jelektroperedach na izobrazhenii s pomoshh'ju preobrazovanija Radona. *DSPA: Voprosy primenenija cifrovoj obrabotki signalov*. 2017, vol. 7, no. 3, pp. 141-144. (in Russian).
11. **Andrade-Cetto J., Kak A. C.** Object recognition. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering / ed. J. G. Webster*. New York: John Wiley & Sons. 2000, pp. 449-470.
12. **Zhang Y. J.** *Handbook of Image Engineering*. Singapore: Springer Nature, 2021. 1869 p.
13. **Kostjuhina G. V.** *Model', metod i kompleks programm vydelenija konturov na izobrazhenijah s ispol'zovaniem jenergeticheskikh priznakov: diss. kand. tehn. nauk: 05.13.18.* – Kazan': KNITU, 2020. 238 p. (in Russian).
14. **Nevatia R., Babu K. R.** Linear feature extraction and description. *Computer graphics and image processing*. 1980, vol. 13, pp. 257-269.
15. **Medioni G., Nevatia R.** Matching images using linear features. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1984, vol. PAMI-6, no. 6. pp. 675-685.
16. *Picture processing and psychopictories / ed. by B. S. Lipkin and A. Rosenfeld*. New York, Academic Press, 1970. 526 p.
17. **Duda R., Hart P.** *Pattern classification and scene analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1973. 512 p.
18. History and Definition of the so-called "Sobel Operator", more appropriately named the Sobel-Feldman Operator. Rezhim dostupa: URL: [https://www.researchgate.net/profile/Irwin-Sobel/publication/239398674\\_An\\_Isotropic\\_3x3\\_Image\\_Gradient\\_Operator/links/557e06f508aeea18b777c389/An-Isotropic-3x3-Image-Gradient-Operator.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Irwin-Sobel/publication/239398674_An_Isotropic_3x3_Image_Gradient_Operator/links/557e06f508aeea18b777c389/An-Isotropic-3x3-Image-Gradient-Operator.pdf) (data obrashhenija: 20.04.2022).
19. **Chella A., Maniscalco U., Pirrone R.** A neural architecture for 3D segmentation. *Lecture Notes in Computer Science*. 2003, vol. 2859, pp. 121-128.
20. **Kislitsyna T. S., Kholopov I. S.** Generalized compass operator for edge detection with the required angular orientation. *Proc. 10th Mediterranean Conf. on Embedded Computing*. – Budva, Montenegro, 2021. pp. 302-305.
21. **Zuniga O. A., Haralick R. M.** Integrated directional derivative gradient operator. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*. 1987. Vol. SMC-17, No. 3. pp. 508-517.
22. **Kudinov I. A., Kholopov I. S.** Perspective-2-point solution in the problem of indirectly measuring the distance to a wagon. *Proc. 10th Mediterranean Conf. on Embedded Computing*. – Budva, Montenegro, 2020. pp. 1-5.