

# Телевизионные системы, передача и обработка изображений

DOI 10.24412/2221-2574-2023-1-50-60

УДК 621.391

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ КОНТУРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**Охотников Сергей Аркадьевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехнических и медико-биологических систем, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет».

E-mail: [OhotnikovSA@volgatech.net](mailto:OhotnikovSA@volgatech.net)

Адрес: 424000, Российская Федерация, Республика Марий-Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 87.

*Аннотация:* В статье представлен подход к оценке параметров «простых» и «комбинированных» геометрических искажений. Подход базируется на многоэтапной процедуре, когда входной контур сравнивается с набором эталонных контуров с изменяемым параметром искажения. Выбор ближайшего эталонного контура происходит при помощи критерия максимального правдоподобия.

*Ключевые слова:* изображение, распознавание, контур, эталон, форма контура, нелинейное искажение.

### Введение

Геометрические искажения — распространённая проблема, встречающаяся в самых разных приложениях, таких, как позиционирование движущейся камеры, обработка фотографий печатных документов, получение координат объектов по 2D-проекциям, и т.д.

Данные искажения могут быть вызваны несовершенством устройств (оптический объектив), условиями съёмки (при движении) и операций обработки изображений (деформация изображения). Объективы устройств часто страдают от оптических аберраций, вызывающих бочкообразную дисторсию, характерную для широкоугольных объективов, где изображение уменьшается по мере удаления от оптической оси, и подушкообразных искажений, где оно увеличивается [1, 2]. Кроме искажений, порождаемых оптикой, из-за неправильной ориентации или движения камеры могут возникать «внешние» геометрические искажения, такие, как вращение, сдвиг и искажение перспективы. Дальнейшая обработка и передача видеоинформации так же могут приводить к дополнительным искажениям изображений.

Полностью «слепая» коррекция геометрических искажений является сложной задачей,

которая недостаточно ограничена, учитывая, что вход представляет собой единственное искаженное изображение. Поэтому существует множество методов коррекции с использованием нескольких изображений или дополнительной информации.

Традиционно, задача распознавания изображений решается на основе процедуры пиксельного сравнения изображений [3–7]. Подход базируется на анализе двумерных полей. Он чувствителен к изменению масштаба и взаимной угловой ориентации анализируемых изображений, а также, требует обработки большого количества точек изображений.

Инвариантность к указанным преобразованиям является основным требованием к новым алгоритмам. Предложены различные инварианты к аффинным преобразованиям, используемые при распознавании [5, 8, 9]. К таким инвариантам относятся, например, моменты разных порядков или дескрипторы Фурье [8, 10].

В последние годы приобрели популярность методы, основанные на глубоком обучении, поскольку они могут изучать коррекцию геометрических искажений на основе больших синтетических наборов данных. Эти методы дали многообещающие результаты, однако, их

производительность в значительной мере ограничивается быстродействием ЭВМ [11, 12].

Другой подход заключается в использовании дополнительной информации, такой как соответствие линейных сегментов. Соответствие сегментов может быть оценено с помощью дескрипторов характерных точек изображения, таких как SIFT или SURF [9, 13]. Соответствия между несколькими сегментами затем могут быть использованы для оценки относительного движения и искажений между ними. В данной статье для вычисления такого соответствия и оценки искажений предлагается использование аппарата контурного анализа.

Задачи контурного анализа возникают в системах технического зрения при обработке изображений и распознавании зрительных образов. В работе [14] предложен подход к решению данной задачи на основе метода контурного анализа. Контур изображения  $\Gamma = \{\gamma(n)\}_{0,s-1}$  задаётся на плоскости  $s$  точками, соединёнными векторами  $\gamma(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, s - 1$ . Каждой точке сопоставляется комплексная координата  $\gamma_1 + i\gamma_2$  [14]. Рассмотрение контуров изображений как комплекснозначных функций одной переменной и представление их в линейном комплекснозначном пространстве, позволяет получить меру близости двух контуров, инвариантную к линейным преобразованиям переноса, поворота и масштабирования, в виде их скалярного произведения. Из-за небольшого, по сравнению со всеми изображениями, количества контурных точек временные затраты при этом снижаются.

В работе [15] были предложены математические модели контуров изображений объектов с простой и сложной формами при воздействии геометрических искажений, а также модели контуров с комбинацией разных геометрических искажений. Для оценки нелинейных искажений и их компенсации рассмотрен метод, основанный на анализе спектрального состава контура и сравнении его с эталоном [16]. Было показано, что спектр контура дополняет-

ся гармониками в зависимости от вида геометрического искажения, что позволяло производить оценку нелинейных искажений.

В данной работе решается задача разработки алгоритма оценки параметров и типов искажений контурных изображений, дальнейшее обобщение на широкий диапазон искажений.

### Математические модели «простых» и «комбинированных» геометрических искажений контуров

В работе [15] вводятся математические модели геометрических искажений. Под «простым» будем понимать искажение одного типа, вносимое в эталонный контур. Искажения «сжатие» и «растяжение» объединены в одну группу. Математические модели «простых» искажений задаются выражениями (1)–(5):

– искажение типа «параллелограмм»

$$v_{\Pi}(n, A) = A \sin\left(\frac{2\pi}{s} 3n\right); \quad (1)$$

– сжатие/растяжение по вертикали

$$v_{CPB}(n, A) = \mp i A \sin\left(\frac{2\pi}{s} n\right); \quad (2)$$

– сжатие/растяжение по горизонтали

$$v_{CPГ}(n, A) = \pm A \cos\left(\frac{2\pi}{s} n\right); \quad (3)$$

– трапецидальное искажение в вертикальной плоскости

$$v_{TB}(n, A) = A \exp\left(i \frac{2\pi}{s} 2n\right); \quad (4)$$

– трапецидальное искажение в горизонтальной плоскости

$$v_{TT}(n, A) = i A \exp\left(i \frac{2\pi}{s} 2n\right), \quad (5)$$

где  $A$  — параметр геометрического искажения.

Под «комбинированными» геометрическими искажениями понимаются случаи, когда на контур наложено более одного «простого» геометрического искажения. При этом эталонный  $\mathbf{E}(A_{x_1}, \dots, A_{x_n})$  и наблюдаемый  $\mathbf{N}(A_{x_1}, \dots, A_{x_n})$  контуры зависят от двух и более



Рис. 1. Исходный базовый контур К

параметров геометрических изображений  $A_{x_1}, \dots, A_{x_n}$ . В работе математические модели наблюдаемых контуров с «комбинированными» геометрическими искажениями задаются сумой двух «простых» искажений (6):

$$N(A_{x_1}, A_{x_2}) = \gamma(n) + v_{s_1}(n, A_{x_1}) + v_{s_2}(n, A_{x_2}), \quad (6)$$

$$s_1 \neq s_2$$

где  $v_{s_1}(n, A_{x_1}), v_{s_2}(n, A_{x_2})$  — различные типы «простых» геометрических искажений с независимым  $A_{x_1}, A_{x_2}$  параметрами геометрических искажений;  $\gamma(n) = \gamma_1(n) + i\gamma_2(n)$   $n = 0, 1, \dots, s-1$  — элементы контура изображения.

Зададим исходный базовый контур  $K = (8; -8i; -8; 8i)$  (рис. 1).

Используя выражения (1)–(6), на основе базового контура  $K$  (рис. 1) создан набор эталонных контуров  $K_{x_i}$  при различных искажениях: 60 эталонных контуров по каждой группе «простых» геометрических искажений (выражения (1)–(5)); 240 эталонных контуров по

каждой группе «комбинированных» искажений (выражение (6)). Параметр геометрического искажения  $A_1$  изменялся от  $-7$  до  $7$  с шагом  $h = 1,166$ . На рис. 2. приведён пример геометрического искажения типа «параллелограмм» с параметром геометрического искажения  $A_1$ , равным  $-7; -3,5; 3,5; 7$ . На рис. 3. приведен пример «комбинированного» геометрического искажения типа «параллелограмм — сжатие/растяжение по вертикали» с фиксированным параметром геометрического искажения типа «параллелограмм»  $A_1 = 7$  и изменяемым параметром  $A_2$  (сжатие/растяжение по вертикали) равным  $-7; -3,5; 3,5; 7$ .

### Оценка геометрических искажений контуров по максимуму правдоподобия

Считая шум  $Z$  стационарным и белым для функционала плотности вероятности процесса  $Y$  при условии наличия в нем контура  $\Gamma(A)$ , можно записать:

$$W(Y | X(A)) = c \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_0^L [v(l) - \chi(l, A)]^2 dl \right\}, \quad (7)$$

где  $c$  — некоторая константа.

Для принятой реализации  $Y$  принимают решение о присутствии в ней того из  $M$  контуров, который наименее уклоняется от контура  $Y$ . При этом, мерой уклонения является энергия разности контуров  $Y$  и  $X(A)$ . Раскроем скобку под интегралом в выражении (7):

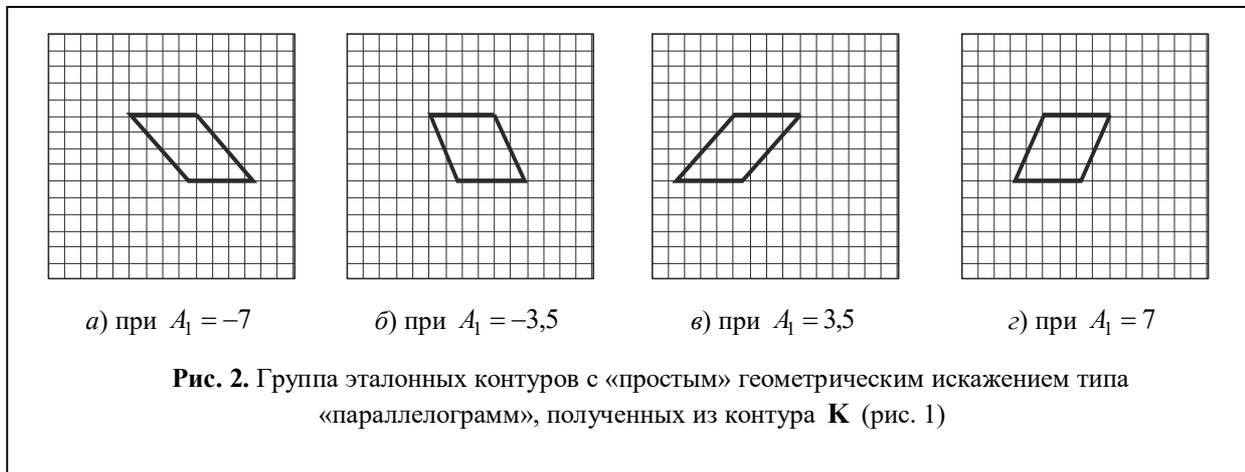
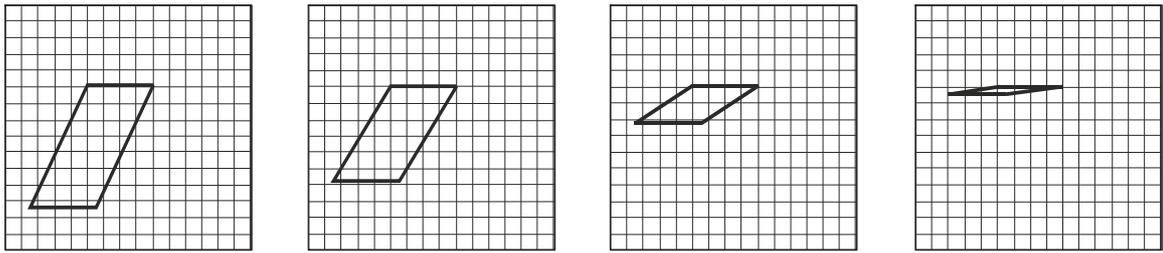


Рис. 2. Группа эталонных контуров с «простым» геометрическим искажением типа «параллелограмм», полученных из контура К (рис. 1)



а) при  $A_2 = -7$

б) при  $A_2 = -3,5$

в) при  $A_2 = 3,5$

г) при  $A_2 = 7$

**Рис. 3.** Группа эталонных контуров с «комбинированным» геометрическим искажением типа «параллелограмм — сжатие — растяжение по вертикали», полученных из контура  $\mathbf{K}$  (рис. 1), где  $A_1 = 7; A_2 = 7; -3,5; 3,5; 7$ .

$$W(\mathbf{Y} | \mathbf{X}(A)) = c_Y \cdot \exp\left\{\frac{2z(A) - E(A)}{N_0}\right\}, \quad (8)$$

где  $E(A)$  — энергия контура  $\mathbf{X}(A)$ ;

$$z(A) = \int_0^L v(l) \cdot \chi(l, A) dl \quad \text{— корреляция принятой}$$

реализации  $\mathbf{Y}$  и контура  $\mathbf{X}(A)$ ;

$$c_Y = c \cdot \exp\left\{-\frac{1}{N_0} \int_0^L v^2(l) dl\right\} \quad \text{— коэффициент,}$$

зависящий от энергии контура  $\mathbf{Y}$ . Выражение для функции правдоподобия (8) позволяет установить правило оценки максимального правдоподобия параметров геометрических искажений контура на фоне гауссовского шума. Из выражения (8) следует, что оценка максимального правдоподобия параметра искажения  $A$  есть значение  $\hat{A}$ , максимизирующее показатель правой части (8):

$$z(\hat{A}) - E(\hat{A}) / 2 = \max_A [z(A) - E(A) / 2]. \quad (9)$$

Если рассматривать нормированный контур  $\mathbf{Y}$ , при котором геометрические искажения не приводят к изменению энергии сигнала,  $E(A) = E = const$ , то

$$z(\hat{A}) = \max z(A). \quad (10)$$

Таким образом, оценка максимального правдоподобия  $\hat{A}$  есть такое его значение, при котором принятая реализация  $\mathbf{Y}$  обладает наибольшим значением корреляции с  $\mathbf{X}(A)$ .

Поэтому оценку параметра  $A$  контура можно сформировать, располагая набором  $M$  формирователей скалярного произведения, на которые параллельно подаётся входная реализация  $\mathbf{Y}$ . В качестве опорных во всех формирователях используются копии контура  $\mathbf{X}(A)$  с различными значениями параметра  $A$ . Решающий блок вырабатывает в качестве оценки значения  $A$  в канале с максимальным выходным эффектом. При этом число каналов  $M$  может быть равно числу различных дискретных значений  $A$ .

Процедуру оценки параметра  $A$  можно рассматривать как многоэтапную. При этом оценка  $\hat{A}$ , полученная на каждом этапе, служит в качестве начального значения при формировании контура  $\mathbf{X}(A)$ . На рис. 4 представлена структурная схема базового блока оценки (ББО) геометрических искажений контура.

При этом точность оценки  $\delta$  геометрических искажений контура на каждом этапе определяется как:

$$\delta = \frac{\Delta A}{2}. \quad (11)$$

Количество блоков  $N$  системы оценки, представленной на рис. 5, определяется заданными требованиями точности оценки  $\delta$  геометрических искажений контура.

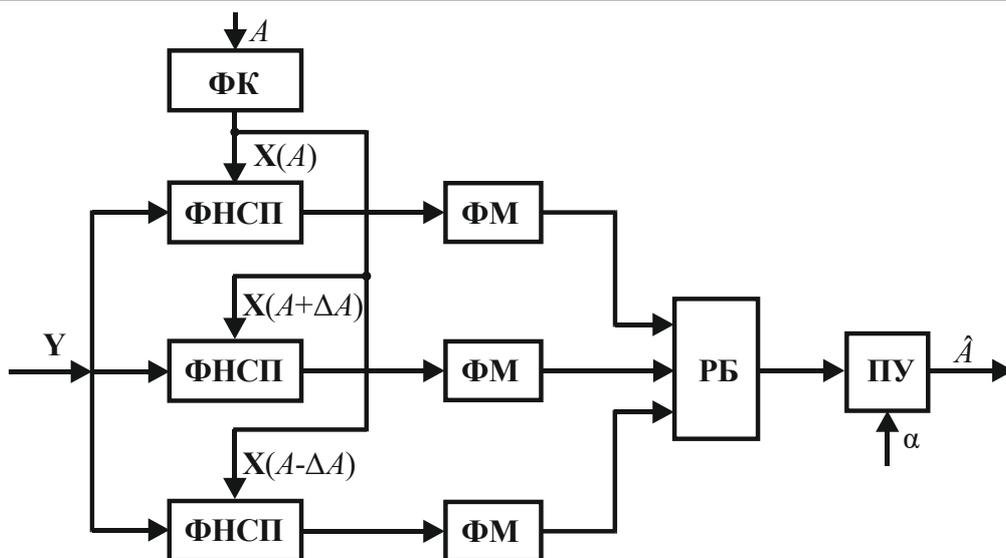


Рис. 4. Структура базового блока оценки геометрических искажений контура

**Оценка типа геометрического искажения**

Пусть дискретный контур  $\mathbf{K} = \{\kappa(n)\}$ ,  $n = 0, 1, \dots, s-1$  — эталонный контур исходного изображения, заданный на комплексной плоскости, полученный из непрерывного контура [17]. Набор искажённых контуров  $\mathbf{E}_\Pi$ ,  $\mathbf{E}_{CB}$ ,  $\mathbf{E}_{PB}$ ,  $\mathbf{E}_{CG}$ ,  $\mathbf{E}_{PG}$ ,  $\mathbf{E}_{TG}$  и  $\mathbf{E}_{TB}$  получаем на основе эталонного контура  $\mathbf{K} = \{\kappa(n)\}$  путём добавления соответствующего геометрического искажения. Они образуют базу эталонных контуров с различными геометрическими искажениями, где  $\mathbf{E}_\Pi = \{\kappa(n) + v_\Pi(n)\}$  — контур с геометрическим искажением типа «параллелограмм»,  $\mathbf{E}_{CB} = \{\kappa(n) + v_{CPB}(n)\}$  — контур с геометрическим искажением «сжа-

тие/растяжение по вертикали»,  $\mathbf{E}_{CG} = \{\kappa(n) + v_{CPG}(n)\}$  — контур с геометрическим искажением «сжатие/растяжение по горизонтали»,  $\mathbf{E}_{TB} = \{\kappa(n) + v_{TB}(n)\}$  — контур с геометрическим искажением «трапецидальное искажение в вертикальной плоскости»,  $\mathbf{E}_{TI} = \{\kappa(n) + v_{TI}(n)\}$  — контур с геометрическим искажением «трапецидальное искажение в горизонтальной плоскости». Полагаем, что параметры контуров, такие как угол поворота  $\varphi$  и сдвиг начальной точки  $d$ , определены и равны нулю [14]. На вход устройства определения типа геометрического искажения подается входной контур  $\mathbf{K}_x = \{\kappa(n) + v(n)\}$  с внесённым геометрическим искажением. Для

проверки возможности определения типа геометрического искажения во входной контур вносим один тип искажений. Задача определения типа геометрического искажения состоит в обоснованном принятии решения по его отнесению к одному из эталонных контуров  $\mathbf{E}_x$ . Для принятия решения будем находить максимальное значение нормированного скалярного произведения входного контура со всеми

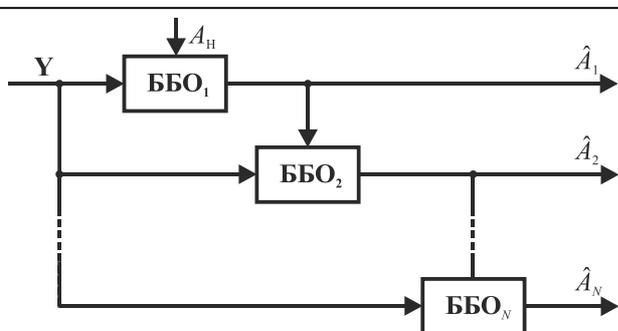


Рис. 5. Структура системы оценки геометрических искажений контура

эталонными контурами, и определять тип и параметр искажения:

$$\eta = \frac{(\mathbf{K}_x, \mathbf{E}_x)}{\|\mathbf{K}_x\| \cdot \|\mathbf{E}_x\|}. \quad (12)$$

Рассмотрим пример. На вход устройства определения типа геометрического искажения поступает контур  $\mathbf{K}_1 = (8; -8i; -8; 8i)$  (рис. 1) и производится сравнение с эталонным контуром  $\mathbf{E}_{II}(A = -7) = (8; 7 - 8i; -8; -7 + 8i)$  (рис. 2, а). Найдём скалярное произведение контуров  $\mathbf{K}_1$  и  $\mathbf{E}_{II}$ :

$$(\mathbf{K}_1, \mathbf{E}_{II}) = (8 \cdot 8 + (-8) \cdot (7 - 8i) + (-8) \cdot (-8) + 8i \cdot (-7 + 8i)) = 256 + 112i.$$

Найдём нормы контуров  $\mathbf{K}_1$  и  $\mathbf{E}_{II}$ :

$$\|\mathbf{K}_1\| = \sqrt{\text{Re}k(n)^2 + \text{Im}k(n)^2} = \sqrt{8^2 + 8^2 + 8^2 + 8^2} = 16,$$

$$\|\mathbf{E}_{II}\| = \sqrt{8^2 + 7^2 + (-8)^2 + (-8)^2 + (-7)^2 + 8^2} = 18,815,$$

тогда нормированное скалярное произведение равно:

$$\eta = \frac{(\mathbf{K}_1, \mathbf{E}_{II})}{\|\mathbf{K}_1\| \cdot \|\mathbf{E}_{II}\|} = \frac{|256 + 112i|}{16 \cdot 18,815} = 0,928.$$

Произведён поиск эталона с геометрическим искажением типа «параллелограмм». Задан входной контур  $\mathbf{K}_1$  с параметром геометрического искажения  $A$  равным 3,5 (рис. 2, в).

Производится сравнение эталонных контуров  $\mathbf{E}_x(A_x)$  с различными «простыми» геометрическими искажениями. В таблице 1 приведены результаты определения типа и параметра искажения контура. Столбцы 1–5 задают тип геометрического искажения: 1 — искажение типа «параллелограмм»; 2 — искажение «сжатие ( $A < 0$ )/растяжение ( $A > 0$ ) по вертикали»; 3 — искажение «сжатие ( $A < 0$ )/растяжение ( $A > 0$ ) по горизонтали»; 4 — «трапецидальное искажение в горизонтальной плоскости»; 5 — «трапецидальное искажение в вертикальной плоскости».

Из таблицы 1 получено, что максимальное значение нормированного скалярного произведения на номере эталона  $\mathbf{E}_{II}$  (искажение типа «параллелограмм») с параметром  $A = 3,5$ . Проведены исследования для всех типов «простых» геометрических искажений. Показана возможность однозначного определения типа и параметра геометрического искажения.

#### Оценка влияния шума на определения типа геометрического искажения

Задан набор эталонных контуров  $\mathbf{E}(A_x) = \{k(n) + v(n, A_x)\}$ , где  $x$  — количество эталонных контуров;  $v(n, A_x)$  — заданный тип

Таблица 1. Нормированное скалярное произведение входного контура  $\mathbf{K}_1$  с геометрическим искажением типа «параллелограмм» с параметром геометрического искажения  $A = 3,5$  (рис. 2, в)

Номер эталона	Параметр искажения $A_x$	1	2	3	4	5
		$\mathbf{E}_{II}$	$\mathbf{E}_{CPB}$	$\mathbf{E}_{CPG}$	$\mathbf{E}_{TG}$	$\mathbf{E}_{TB}$
1	-7,000	0,834	0,949	0,814	0,731	0,731
2	-5,833	0,857	0,955	0,879	0,785	0,785
3	-4,667	0,882	0,962	0,925	0,839	0,839
4	-3,500	0,907	0,967	0,953	0,89	0,89
5	-2,333	0,931	0,972	0,968	0,933	0,933
6	-1,167	0,953	0,974	0,973	0,962	0,962
7	0,000	0,972	0,972	0,972	0,972	0,972
8	1,167	0,986	0,965	0,966	0,962	0,962
9	2,333	0,995	0,949	0,957	0,933	0,933
10	3,500	1	0,922	0,947	0,89	0,89
11	4,667	0,999	0,881	0,937	0,839	0,839
12	5,833	0,995	0,822	0,926	0,785	0,785
13	7,000	0,989	0,745	0,915	0,731	0,731

геометрического искажения. На вход поступает зашумленный наблюдаемый контур  $\mathbf{N} = \mathbf{K}_x + \mathbf{Z}$ , где  $\mathbf{Z} = \{\xi(n)\}_{0,s-1}$  — шумовой комплекснозначный контур, отчёты которого представляют собой белый гауссовский шум и распределены по нормальному закону распределения,  $\mathbf{K}_x$  —  $x$ -ый базовый входной контур. Математическое ожидание шумовых отчётов контура равно нулю. Необходимо исследовать зависимость правильного принятия решения о наблюдаемом контуре  $\mathbf{N}'_x$  на выходе от заданного отношения сигнал/шум  $\sigma$ , действующего на наблюдаемый контур  $\mathbf{K}_x$ . Произведено исследование вероятности правильного определения параметра геометрического искажения от отношения сигнал/шум  $\sigma$  при различном количестве базовых эталонных контуров  $\mathbf{E}(A_i)$ , которое равнялось 3; 5 и 7 соответственно. При построении базы эталонных контуров  $\mathbf{E}$  с различными геометрическими искажениями были получены контуры с различными энергиями. Для устранения данной неоднозначности наблюдаемый входной контур был нормирован.

Представлен алгоритм оценки «простых» искажений.

#### НАЧАЛО АЛГОРИТМА

Шаг 1. Нормируем наблюдаемый контур  $\mathbf{K}_x$ ;

Шаг 2. Задаем отношение сигнал/шум  $\sigma$ ;

Шаг 3. Формируем зашумленный контур  $\mathbf{N} = \mathbf{K}_x + \mathbf{Z}$ , где  $\mathbf{Z} = \{\xi(n)\}_{0,s-1}$  — шумовой контур с заданными случайными отсчетами контура с отношением сигнал/шум равным  $\sigma$ ;

Шаг 4. Вычисляем нормированное скалярное произведение между входным наблюдаемым контуром  $\mathbf{N}$  и  $x$ -ым эталонным контуром  $\mathbf{E}(A_x)$ ;

Шаг 5. По максимальному значению нормированного скалярного произведения определяем принадлежность к  $x$ -ому классу эта-

лонного контура  $\mathbf{E}(A_x)$ ;

Шаг 6. Прodelываем шаги 3–5 не менее 1000 раз;

Шаг 7. Вычисляем вероятность правильного принятия решения  $p$ ;

Шаг 8. Изменяем отношение сигнал/шум  $\sigma$  и повторяем шаги 2–7;

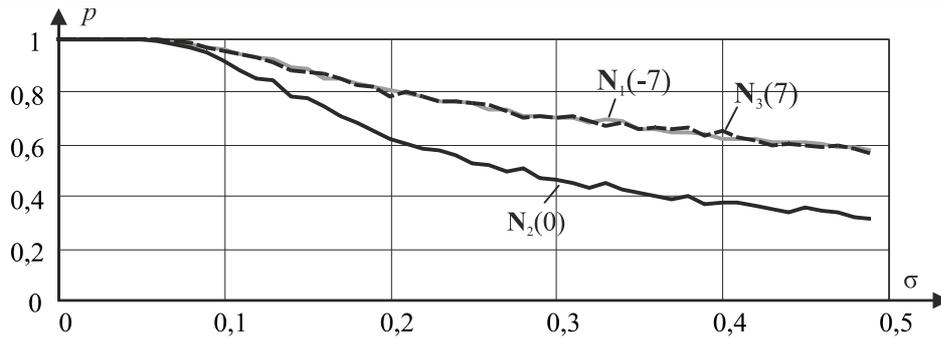
Шаг 9. Строим зависимость правильного принятия решения от заданного отношения сигнал/шум  $\sigma$ , действующего на наблюдаемый контур  $\mathbf{K}_x$ ;

Шаг 10. Прodelываем шаги 1–9 для всех наблюдаемых контуров из базы эталонных контуров.

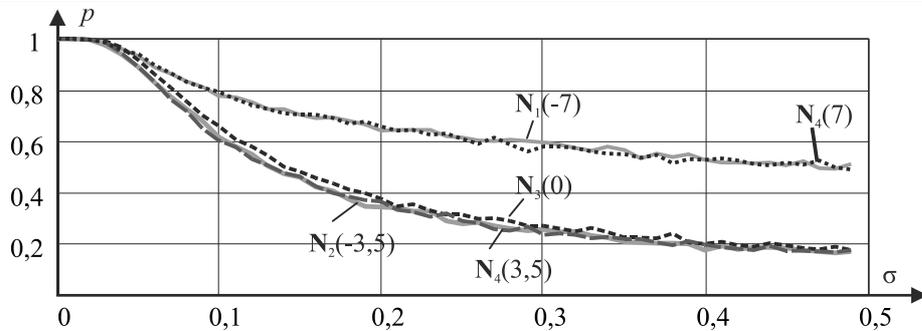
#### ОКОНЧАНИЕ АЛГОРИТМА.

Зададим три эталонных контура  $\mathbf{E}_1(-7)$ ,  $\mathbf{E}_2(0)$  и  $\mathbf{E}_3(7)$ , а также три наблюдаемых входных контура  $\mathbf{N}_1(-7)$ ,  $\mathbf{N}_2(0)$  и  $\mathbf{N}_3(7)$ , где значение в скобках – параметр геометрического искажения  $A$  типа «параллелограмм». По вышеописанному алгоритму построим зависимости правильного определения класса эталона от отношения сигнал/шум  $\sigma$  на входе системы оценки геометрического искажения. На рис. 6–8 приведены зависимости при наличии в системе 3; 5 и 7 эталонных контуров  $\mathbf{E}(A_x)$ .

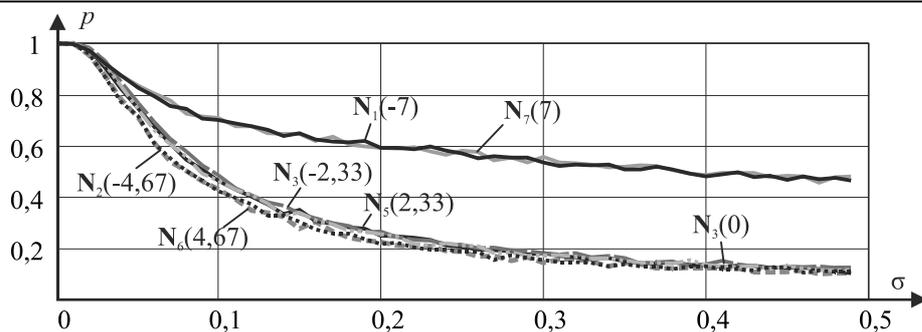
Анализируя рис. 6–8, получили, что с увеличением количества эталонных контуров в системе оценки типа геометрического искажения общая вероятность правильного принятия решения о типе геометрического искажения снижается. Например, при отношении сигнал/шум  $\sigma = 0,2$  для наблюдаемого контура  $\mathbf{N}_1(-7)$  с параметром искажения  $A = -7$ , при наборе из трёх эталонных контуров  $\mathbf{E}(A_x)$  вероятность правильной оценки  $p = 0,8$  (рис. 6); при наборе из пяти —  $p = 0,65$  (рис. 7); при наборе из семи —  $p = 0,6$  (рис. 8).



**Рис. 6.** Зависимость вероятности правильного определения параметра геометрического искажения «искажение типа параллелограмм» от отношения сигнал/шум  $\sigma$ : система из трёх базовых эталонных контуров  $E_1(-7)$ ,  $E_2(0)$  и  $E_3(7)$  при наличии на входе одного из трёх наблюдаемых контуров  $N_1(-7)$ ,  $N_2(0)$ ,  $N_3(7)$



**Рис. 7.** Зависимость вероятности правильного определения параметра геометрического искажения «искажение типа параллелограмм» от отношения сигнал/шум  $\sigma$ : система из пяти базовых эталонных контуров  $E_1(-7)$ ,  $E_2(-3,5)$ ,  $E_3(0)$ ,  $E_4(3,5)$  и  $E_5(7)$  при наличии на входе одного из пяти наблюдаемых контуров  $N_1(-7)$ ,  $N_2(-3,5)$ ,  $N_3(0)$ ,  $N_4(3,5)$  и  $N_5(7)$



**Рис. 8.** Зависимость вероятности правильного определения параметра геометрического искажения «искажение типа параллелограмм» от отношения сигнал/шум  $\sigma$ : система из семи базовых эталонных контуров  $E_1(-7)$ ,  $E_2(-4,67)$ ,  $E_3(-2,33)$ ,  $E_4(0)$ ,  $E_5(2,33)$ ,  $E_6(4,67)$  и  $E_7(7)$  при наличии на входе одного из семи наблюдаемых контуров  $N_1(-7)$ ,  $N_2(-4,67)$ ,  $N_3(-2,33)$ ,  $N_4(0)$ ,  $N_5(2,33)$ ,  $N_6(4,67)$  и  $N_7(7)$

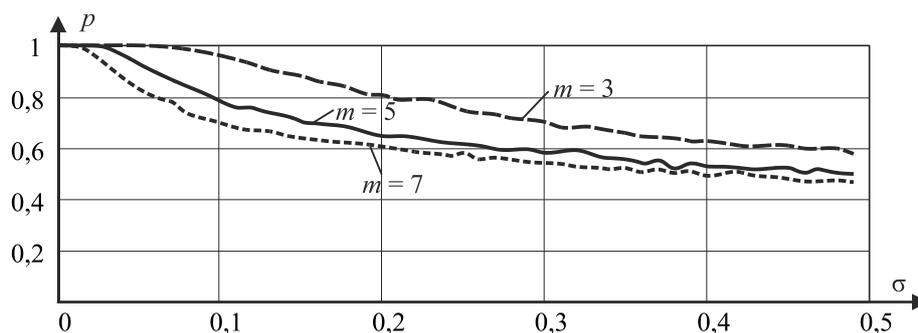


Рис. 9. Зависимость вероятности правильного определения параметра геометрического искажения от отношения сигнал/шум при 3; 5, 7 базовых эталонных контурах при наблюдаемом контуре  $N_1(-7)$

На рис. 9 представлена зависимость вероятности правильного определения параметра геометрического искажения от отношения сигнал/шум  $\sigma$  при 3; 5 и 7 базовых эталонных контурах в системе при одном наблюдаемом контуре  $N_1(-7)$ .

Проведено исследование зависимости вероятности правильного определения параметра геометрического искажения от отношения сигнал/шум  $\sigma$  при 3; 5 и 7 базовых эталонных контурах в системе при одном наблюдаемом контуре для оставшихся типов «простых» геометрических искажений. Получено, что с увеличением количества эталонных контуров в системе оценки типа геометрического искажения общая вероятность правильного принятия решения о типе геометрического искажения падает для всех типов «простых» геометрических искажений (рис. 9, для искажения типа «параллелограмм»).

### Заключение

Решена задача оценки класса геометрического искажения при наложении на контурные изображения нормального шума. Построены зависимости вероятности правильного определения класса геометрического искажения от отношения сигнал/шум для моделей контурных изображений как с «простыми», так и с «комбинированными» искажениями. Получено, что с увеличением количества эталонных контуров в системе оценки типа геометрического искажения общая вероятность правильного принятия

решения о типе геометрического искажения падает для всех рассмотренных типов. Вероятность правильного принятия решения о типе искажения с двумя комбинированными искажениями всегда ниже, чем при наложении одного искажения.

Показано, что в некоторых случаях при определении геометрического искажения возникла неоднозначность принятия решения о его типе. Для решения данного вопроса предложена многоэтапная процедура оценки типа искажения. На каждом этапе оценки зашумленный входной контур сравнивается с набором эталонных контуров с изменяемым параметром оценки. Процедура оценки заканчивается, когда достигается заданная точность оценки типа геометрического искажения.

### Литература

1. *Pozdnyakov D.* Fisheye lens distortion correction [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2010/2010.10295.pdf> [дата доступа 21.11.2022].
2. *Lee M., Kim H., Paik J.* Correction of Barrel Distortion in Fisheye Lens Images Using Image-Based Estimation of Distortion Parameters. IEEE Access. 2019. No. 7. Pp. 45723–45733. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2908451.
3. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
4. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.
5. *Соловьев Н.В.* Методы коррекции пространственных искажений изображений объектов в условиях действия полной аффинной

- группы преобразований // Информационно-управляющие системы. 2003. №6. С. 7–11.
6. Li X., Zhang B. et al. Document rectification and illumination correction using a patch-based CNN // ACM Transactions on Graphics. 2019. Iss. 6. Vol. 38. DOI:10.1145/3355089.3356563.
  7. Орлов А.А., Рыжкова М.Н., Мареев, А.В. Методы локализации объектов в видеопотоке (обзор) // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №3(43). 2021. С. 48–60.
  8. Wang W., Yan X., Jiang Y., Kuang G. Affine invariant contour matching using a voting approach // Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Computer Science and Electronics Engineering, Paris, 2013. Pp. 1714–1717.
  9. Lakshmi M.D., Raj M.V. Murugan S.S. Feature Matching and Assessment of Similarity rate on geometrically Distorted Side Scan Sonar Images // 2019 TE-QIP III Sponsored Int. Conf. on Microwave Integrated Circuits, Photonics and Wireless Networks (IMICPW), Tiruchirappalli, India, 2019. Pp. 208–212. DOI: 10.1109/IMICPW.2019.8933268.
  10. Yang M., Kpalma K., Ronsin J. Affine Invariance Contour Descriptor Based on the Area Normalization // International Journal of Applied Mathematics. 2007. Vol. 36. No. 2. URL: [http://www.iaeng.org/IJAM/issues\\_v36/issue\\_2/index.html](http://www.iaeng.org/IJAM/issues_v36/issue_2/index.html) (дата обращения 22.11.2022).
  11. Xiaoyu Li, Bo Zhang, Pedro V. Sander, Jing Liao. Blind Geometric Distortion Correction on Images Through Deep Learning // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019, Pp. 4855–4864
  12. Шахуро В.И., Конушин А.С. Синтез обучающих выборок для классификации дорожных знаков с помощью нейросетей // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. №1. С. 105–112. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-105-112.
  13. Cao G., Li S., Zhang S., Peng Z., Wu Y., Wang D., Dai C. Improved FAST algorithm for non-uniform rotational distortion correction in OCT endoscopic imaging // Optics Express. 2023. Vol. 31. Iss. 2. Pp. 2754–2767.
  14. Введение в контурный анализ и его приложение к обработке изображений и сигналов / Под ред. Я.А. Фурмана. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 592 с.
  15. Хафизов, Р.Г., Охотников С.А., Яранцева Т.В. Модели контуров изображений объектов при наличии геометрических искажений // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. №3. С. 404–409. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-404-409.
  16. Охотников С.А. Оценка нелинейных искажений контуров изображений объектов, заданных на комплексной плоскости // Телекоммуникации. 2017. № 8. С. 30–35
  17. Охотников С.А., Хафизов Д.Г., Егошина И.Л., Хафизов Р.Г. Передискретизация контуров цифровых изображений объектов // Цифровая обработка сигналов. 2021. №4. С. 48–51.

Поступила 22 ноября 2022 г.

English

## PARAMETER ESTIMATION OF GEOMETRIC DISTORTIONS IN IMAGE CONTOURS

**Sergei Arcadieievich Okhotnikov** — PhD, Associate Professor, Department of Radio Engineering and Biomedical Systems, Volga State University of Technology.

Address: 424000, Russia, Republic of Mari-El, Yoshkar-Ola, Lenin Square, 3.

*Abstract:* A need arises to identify the position of a three-dimensional object with reference to its two-dimensional projections, for example, from a video sensor in solving a number of practical tasks. Object location relative to the camera can be defined by the "distortion" of its shape relative to the reference one when the original object shape is known in advance. Contour analysis device is proposed to use for solving this problem. Upon that, two-dimensional scene-based objects are explicitly defined by their contours assigned as complex-valued signals. It is possible to estimate object position relative to the camera by estimating the shape distortion of the object contours relative to some original one. The article describes the basic types of distortions and combined distortions based on them. A multiphase procedure is proposed to assess the distortion parameter by the maximum likelihood criterion, which means finding the maximum similarity measure of standard and reference contour implementations. The possibility of unambiguous determination of the type and parameter of geometric distortion is indicated. The set of reference contours was developed for the examined distortion types. There was investigated probability dependence of the correct determination for the geometric distortion parameter based on signal-to-noise ratio with various number of references. It is found that general probability of correct decision-making about the type of geometric distortion drops down for all types of "simple" geometric distortions with an increase in the number of reference contours in the system.

*Keywords:* image, recognition, contour, reference, contour shape, nonlinear distortion.

### References

1. *Pozdnyakov D.* Fisheye lens distortion correction [Electronic source]. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2010/2010.10295.pdf> [Access date 21.11.2022].
2. *Lee M., Kim H., Paik J.* Correction of Barrel Distortion in Fisheye Lens Images Using Image-Based Estimation of Distortion Parameters. *IEEE Access*. 2019. No. 7. Pp. 45723–45733. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2908451.
3. *Gonsales R., Woods R.* Digital image processing. Moscow: Tehnosfera, 2005. 1072 p.
4. Methods for computer image processing. Edited by *V.A. Soifer*. 2nd ed., rev. Moscow: FIZMATLIT, 2003. 784 p.
5. *Solov'ev N.V.* Methods for Correcting Spatial Distortions in Images of Flat Objects under the Action of a Complete Affine Group of Transformations. *Information and Control Systems*. 2003. No. 6. Pp. 7–11.
6. *Li X., Zhang B.* et al. Document rectification and illumination correction using a patch-based CNN. *ACM Transactions on Graphics*. 2019. Iss. 6. Vol. 38. DOI:10.1145/3355089.3356563.
7. *Orlov A.A., Ryzhkova M.N., Mareev A.V.* Methods of object localization in video stream (review). *Radio and telecommunication systems*. No. 3 (43). 2021. Pp. 48–60.
8. *Wang W., Yan X., Jiang Y., Kuang G.* Affine invariant contour matching using a voting approach. *Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Computer Science and Electronics Engineering, Paris, 2013*. Pp. 1714–1717.
9. *Lakshmi M.D., Raj M.V., Murugan S.S.* Feature Matching and Assessment of Similarity rate on geometrically Distorted Side Scan Sonar Images. 2019 TEQIP III Sponsored Int. Conf. on Microwave Integrated Circuits, Photonics and Wireless Networks (IMICPW), Tiruchirappalli, India, 2019. Pp. 208–212. DOI: 10.1109/IMICPW.2019.8933268.
10. *Yang M., Kpalma K., Ronsin J.* Affine Invariance Contour Descriptor Based on the Area Normalization [Electronic source]. *International Journal of Applied Mathematics*. 2007. Vol. 36. No. 2. URL: [http://www.iaeng.org/IJAM/issues\\_v36/issue\\_2/index.html](http://www.iaeng.org/IJAM/issues_v36/issue_2/index.html) (Access date 22.11.2022).
11. *Xiaoyu Li, Bo Zhang, Pedro V. Sander, Jing Liao.* Blind Geometric Distortion Correction on Images Through Deep Learning. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019, Pp. 4855–4864
12. *Shakhuro V.I., Konushin A.S.* Image synthesis with neural networks for traffic sign classification. *Computer Optics*. 2018. Vol. 42(1). Pp. 105–112. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-105-112.
13. *Cao G., Li S., Zhang S., Peng Z., Wu Y., Wang D., Dai C.* Improved FAST algorithm for non-uniform rotational distortion correction in OCT endoscopic imaging. *Optics Express*. 2023. Vol. 31. Iss. 2. Pp. 2754–2767.
14. Contour analysis introduction and its image and signal processing application. Edited by *Ya.A. Furman*. Moscow: Fizmatlit, 2002. 592 p.
15. *Khafizov R.G., Okhotnikov S.A., Yaranceva T.V.* Models of the image of object contours with geometrical distortions. *Computer Optics*. 2016. Vol. 40(3). Pp. 404–409. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-404-409.
16. *Okhotnikov S.A.* Nonlinear distortion estimation of contour images of objects on complex plane. *Telecommunications*. 2017. No. 8. Pp. 30–35.
17. *Okhotnikov S.A., Khafizov D.G., Egoshina I.L., Khafizov R.G.* Rediscrretization the contours of digital images of objects. *Digital Signal Processing*. 2021. No. 4. Pp. 48–51.