

ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИЯ КОНТУРОВ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ

Охотников С.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Поволжского государственного технологического университета, Йошкар-Ола, e-mail: OhotnikovSA@volgatech.net

Хафизов Д.Г., к.т.н., доцент, доцент кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Поволжского государственного технологического университета, Йошкар-Ола, e-mail: HafizovDG@volgatech.net

Егошина И.Л., д.т.н., профессор, профессор кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Поволжского государственного технологического университета, Йошкар-Ола, e-mail: EgoshinaIL@volgatech.net

Хафизов Р.Г., д.т.н., профессор, профессор кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Поволжского государственного технологического университета, Йошкар-Ола, e-mail: HafizovRG@volgatech.net

REDISCRETIZATION THE CONTOURS OF DIGITAL IMAGES OF OBJECTS

Okhotnikov S.A., Khafizov D.G., Egoshina I.L., Khafizov R.G.

The study showed that high-quality rediscretization of image contours is possible when using the method that retains the spectrum shape of an object image. It was obtained that the maximum contour spectrum consistency method provides the normalized scalar product value close to the normalized scalar product value of the initial continuous contours. In addition, when the dimensions are lowered, the normalized scalar product value is higher than when rediscretizing with increasing dimensions.

Key words: rediscretization, equalization, spectrum shape consistency, alignment of the contour dimensions.

Ключевые слова: передискретизация, эквализация, сохранение формы спектра, выравнивание размерности контура.

Введение и постановка задачи

Одним из методов обработки изображений является метод контурного анализа [1]. Размерности наблюдаемых и эталонных изображений, хранящихся в памяти устройств обработки, как правило, различаются. Это обусловлено тем, что условия формирования наблюдаемого изображения объекта могут быть различны (дальность до объекта, пространственная угловая ориентация и т.п.). Как следствие, контуры изображений одних и тех же объектов так же могут различаться (рис. 1). Таким образом, для выравнивания размерностей контуров изображений объектов требуется проведение передискретизации.

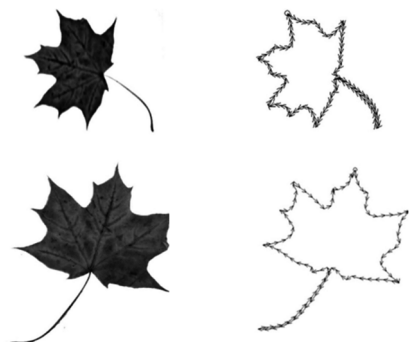


Рис. 1. Изображения и их контуры, полученные при разных условиях формирования

Вопросы передискретизации сигналов и изображений решаются в различных практических приложениях [2-8], в том числе и для контуров изображений [9]. Целью данной работы является исследование эффективности методов выравнивания размерности контуров

Показано, что качественная передискретизация контуров изображений возможна при использовании метода, сохраняющего форму спектра контура изображения объекта. Получено, что метод максимального сохранения спектра контура обеспечивает значение нормированного скалярного произведения контуров близкое к значению нормированного скалярного произведения исходных непрерывных контуров. Кроме того, значение нормированного скалярного произведения контуров при понижении размерности выше, чем при передискретизации с повышением размерности.

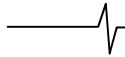
изображений путём их передискретизации.

В работе [9] предложено не только сами контуры изображений объектов, но и их спектры, корреляционные функции и характеристики контурных фильтров представлять в виде контуров на комплексной плоскости. По введенному в ОЗУ изображению естественным образом формируется контур в виде последовательности элементарных векторов (ЭВ). При полигональном представлении контур $\Gamma = \{\gamma(n)\}$ определяется последовательностью из s комплексных чисел $\gamma(n) = \gamma_1(n) + i\gamma_2(n)$, $n = 0, 1, \dots, s-1$. Однако при переходе от стандартного кода к полигональному изменяется спектр контура, что приводит к искажению формы изображения объекта [9].

Методы выравнивания размерности контуров изображений объектов

В работе [9] предложена процедура изменения размерности контура (эквализация контура). Данная процедура основана на делении исходного контура $\Gamma = \{\gamma(n)\}$, $n = 0, 1, \dots, s-1$ на заданное количество p одинаковых по длине отрезков. Концы полученных отрезков соединяются векторами $\varepsilon(r)$ эквализованного контура $E = \{\varepsilon(r)\}$, $r = 0, 1, \dots, p-1$. При этом эквализованный контур $E = \{\varepsilon(r)\}$ характеризуется следующим свойством:

– концы и начала векторов $\varepsilon(r)$ принадлежат линии исходного контура Γ ;



- начало вектора $\varepsilon(0)$ совпадает с концом вектора $\varepsilon(p-1)$;
- модули всех ЭВ $\varepsilon(r)$ примерно одинаковы.

Эквализация контуров позволяет привести размерность s анализируемого контура к заданному значению размерности p . На рис. 2, *b* представлен контур, полученный путем эквализации контура, показанного на рис. 2, *a*, для размерности $p = 10$.

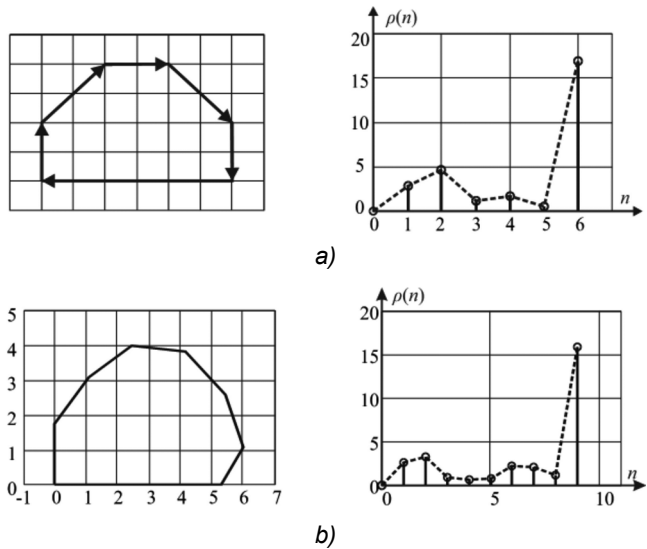


Рис. 2. Изменение размерности контура методом эквализации:
a – исходный контур и его амплитудный спектр,
b – контур, полученный в результате эквализации,
 и его амплитудный спектр

Как правило, преобразование контура, связанного с изменением размерности, приводит к изменению его спектра. Как показано в работах [10], качественную передискретизацию можно получить при использовании методов, максимально сохраняющих форму спектра сигнала. Рассмотрим применительно к контурам изображений метод, основанный на принципе максимального сохранения спектра контура и построенный по схеме «интерполяция – фильтрация – прореживание».

Пусть задан контур $\Gamma = \{\gamma(n)\}$ в виде последовательности из s комплексных чисел $\gamma(n)$, $n = 0, 1, \dots, s-1$. Требуется «растянуть» контур от s векторов до p векторов, т.е. в s/p раз. Данная операция выполняется в 3 этапа. Первый этап заключается в интерполяции нулями, при этом увеличивается размерность контура в p раз. Для этого умножаем ЭВ контура $\Gamma = \{\gamma(n)\}$ на p . После каждого ЭВ контура добавляем $(p-1)$ нулей:

$$\Gamma = \left\{ p\gamma(0), \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{p-1}, p\gamma(1), \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{p-1}, \dots, p\gamma(s-1), \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{p-1} \right\}.$$

Такая процедура приводит к расширению спектра контура в p раз. При этом спектр представляет собой периодическое повторение копий спектра исходного контура.

Второй этап представляет собой низкочастотную фильтрацию полученного контура. Частота среза контурного ФНЧ должна быть равна $s/2$, что позволит исключить повторение копий спектра исходного контура. В результате будет получен контур, который в p раз длиннее исходного, но сохранивший форму спектра исходного контура.

На третьем этапе требуется уменьшить длину контура в s раз. Выбираем из контура каждый s -й отсчет $\gamma(ms)$, $m = 0, 1, \dots, p-1$. На рис. 3 представлен пример передискретизации контура, показанного на рис. 2, *a*.

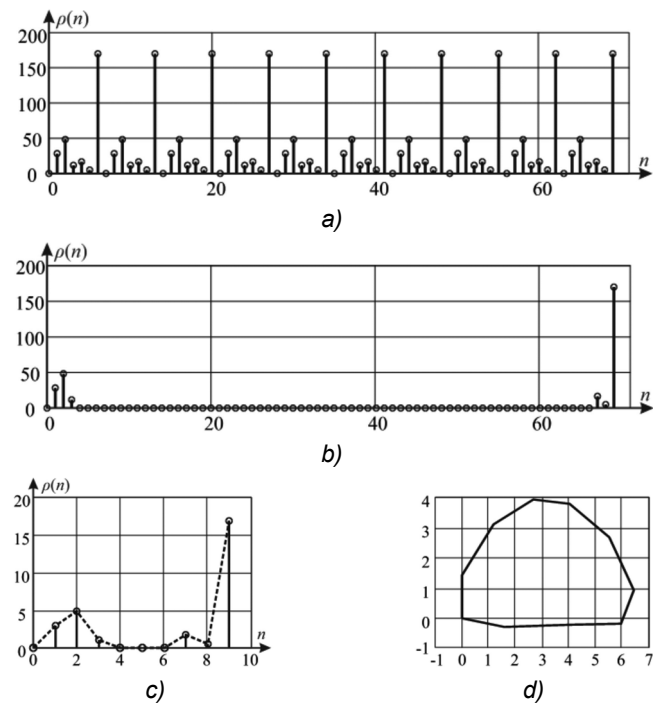


Рис. 3. Передискретизация контура: *a* – амплитудный спектр контура с интерполяцией нулями,
b – амплитудный спектр контура после контурного ФНЧ,
c – амплитудный спектр передискретизированного контура (амплитудный спектр контура после передискретизации),
d – контур с размерностью $p = 10$

Для выравнивания размерностей контуров может быть использован метод представления дискретного контура в виде непрерывного контура [11]. При этом дискретный контур $\Gamma = \{\gamma(n)\}$, $n = 0, 1, \dots, s-1$, может быть представлен в виде непрерывного контура $X = \{\chi(l), l \in [0, 2\pi)\}$, например, с помощью сплайн-аппроксимации. Однако данный метод является более трудоемким, т.к. требует проведения процедуры аппроксимации кубическим сплайном.

Оценка эффективности методов передискретизации

Рассмотрим непрерывные контуры изображений объектов $X = \{\chi(l)$ и $Y = \{\psi(l)\}$, $l \in [0, 2\pi)$ (рис. 4) [11,12].

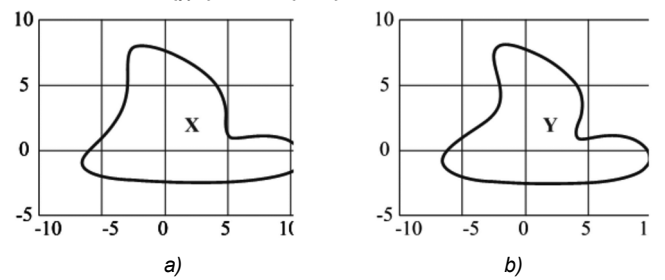
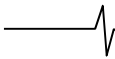


Рис. 4. Непрерывные контуры X и Y

Нормированное скалярное произведение (НСП) непрерывных контуров X и Y, определяемое как:

$$\eta_{X,Y} = \frac{(X, Y)}{\|X\| \|Y\|} = \frac{1}{\|X\| \|Y\|} \int_0^{2\pi} \chi(l) \psi^*(l) dl,$$



где $\|X\| = \sqrt{\int_0^{2\pi} |\chi(l)|^2 dl}$ и $\|Y\| = \sqrt{\int_0^{2\pi} |\nu(l)|^2 dl}$ – нормы контуров X и Y соответственно, равно 0,997, что свидетельствует о большом сходстве форм изображений объектов, задаваемых контурами X и Y . Произведем процедуру дискретизации непрерывных контуров X и Y [13].

При этом контур X дискретизируем с размерностью $k = 7$, а контур $Y - k = 15$. В результате дискретизации контура X получим контур $\Gamma = \{\gamma(n)\}$, $n = 0, 1, \dots, 6$, (рис. 5,а), из контура Y получим контур $N = \{v(n)\}$, $n = 0, 1, \dots, 14$ (рис. 5,б):

$\Gamma = \{-15,082-0,397i; 0,494+3,534i; 1,497+4,676i; 3,564+1,149i; 4,234-5,1i; 2,784-1,156i; 2,51-2,707i\}$,

$N = \{-6,978+0,576i; -1,578+1,515i; 1,867+1,674i; 2,033+1,416i; 0,65+2,004i; -0,483+2,529i; 1,487+0,838i; 3,675-1,662i; 1,786-2,68i; -0,445-2,204i; 0,812-0,541i; 2,518+0,218i; 2,245-1,111i; -1,032-1,819i; -6,556-0,752i\}$.

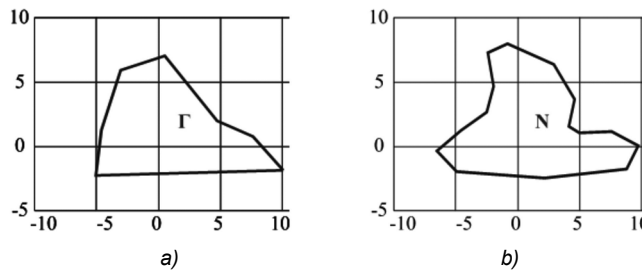


Рис. 5. Контур Γ (а) и N (б), полученный в результате дискретизации контуров X и Y с размерностями 7 и 15 соответственно

Произведем передискретизацию контура Γ , изменив размерность с $k = 7$ до $p = 15$, используя методы эквализации и максимального сохранения спектра контура. В результате получаем контуры $\Gamma_{\gamma-7-15}$ и $\Gamma_{\text{мсск-7-15}}$ соответственно (рис. 6):

$\Gamma_{\gamma-7-15} = \{-2,709-0,071i; -2,709-0,071i; -2,709-0,071i; -2,709-0,071i; -2,709-0,071i; -1,375+1,12i; 0,427+2,672i; 0,826+2,58i; 1,358+2,05i; 2,579+0,831i; 1,797-1,856i; 1,731-2,085i; 2,097-1,588i; 2,263-1,383i; 1,842-1,987i\}$,

$\Gamma_{\text{мсск-7-15}} = \{-7,038-0,185i; -4,914+1,004i; -0,334+1,608i; 2,112+1,828i; 1,201+2,109i; -0,11+2,166i; 0,785+1,258i; 2,706-0,571i; 2,865-2,116i; 1,182-2,236i; 0,406-1,208i; 1,847-0,41i; 2,96-0,665i; 0,601-1,335i; -4,268-1,248i\}$.

В результате передискретизации контура Γ размерности контуров $\Gamma_{\gamma-7-15}$ и $\Gamma_{\text{мсск-7-15}}$ и контура N выравнены. НСП контуров, представленных в дискретном виде, определяются как:

$$\eta_{\Gamma_{\gamma-7-15}, N} = \frac{(\Gamma_{\gamma-7-15}, N)}{\|\Gamma_{\gamma-7-15}\| \|N\|} = \frac{1}{\|\Gamma_{\gamma-7-15}\| \|N\|} \sum_{n=0}^{14} \gamma_{\gamma-7-15}(n) v^*(n),$$

$$\eta_{\Gamma_{\text{мсск-7-15}}, N} = \frac{(\Gamma_{\text{мсск-7-15}}, N)}{\|\Gamma_{\text{мсск-7-15}}\| \|N\|} = \frac{1}{\|\Gamma_{\text{мсск-7-15}}\| \|N\|} \sum_{n=0}^{14} \gamma_{\text{мсск-7-15}}(n) v^*(n),$$

где $\|N\| = \sqrt{\sum_{n=0}^{14} |v(n)|^2}$, $\|\Gamma_{\text{мсск-7-15}}\| = \sqrt{\sum_{n=0}^{14} |\gamma_{\text{мсск-7-15}}(n)|^2}$

и $\|\Gamma_{\gamma-7-15}\| = \sqrt{\sum_{n=0}^{14} |\gamma_{\gamma-7-15}(n)|^2}$ – нормы контуров N ,

$\Gamma_{\text{мсск-7-15}}$ и $\Gamma_{\gamma-7-15}$ соответственно. Значения НСП в этом случае равны 0,474 и 0,916 соответственно. Таким образом в результате применения метода максимального сохранения спектра контура, получаем значение НСП контуров $\Gamma_{\text{мсск-7-15}}$ и N , наиболее близкое к значению НСП исходных непрерывных контуров X и Y .

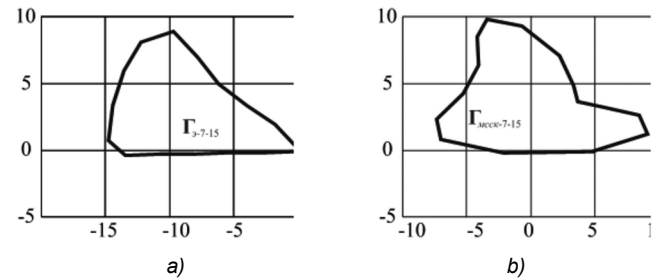


Рис. 6. Контур Γ , полученный в результате передискретизации с размерности 7 до 15 методом: а – эквализации, б – максимального сохранения спектра контура

Далее произведем передискретизацию контура N с понижением размерности, т.е. изменим размерность с $k = 15$ до $p = 7$, аналогично используя методы эквализации и максимального сохранения спектра контура. Получаем контуры $N_{\gamma-15-7}$ и $N_{\text{мсск-15-7}}$ соответственно (рис. 7):

$N_{\gamma-15-7} = \{-6,373+0,526i; 0,581+3,863i; 1,589+5,486i; 5,421-1,803i; 2,537-4,527i; 2,599-2,816i; -6,353-0,728i\}$,

$N_{\text{мсск-15-7}} = \{-14,952+1,234i; 4,359+3,497i; 0,313+4,883i; 5,95-0,698i; 0,29-5,537i; 4,717+0,532i; -0,704-3,961i\}$.

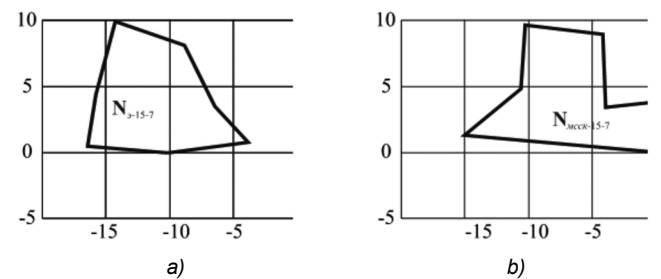


Рис. 7. Контур N , полученный в результате передискретизации с размерности 15 до 7 методом: а – эквализации, б – максимального сохранения спектра контура

В результате передискретизации контура N размерности контуров $N_{\gamma-15-7}$ и $N_{\text{мсск-15-7}}$ и контура Γ выравнены. НСП контуров $N_{\gamma-15-7}$ и Γ и $N_{\text{мсск-15-7}}$ и Γ в этом случае равны 0,727 и 0,935 соответственно. Значения НСП в данном эксперименте с понижением размерности выше, чем при передискретизации с повышением размерности независимо от используемого метода. При этом в результате применения метода максимального сохранения спектра контура также получаем значение НСП контуров $N_{\text{мсск-15-7}}$ и Γ ближе к значению НСП исходных непрерывных контуров X и Y .

В следующем эксперименте произведем восстановление непрерывных контуров после процедуры передискре-

тизации с понижением и повышением размерностей. На рис. 8 представлены полученные непрерывные контуры.

НСП непрерывных контуров, полученных из дискретных контуров Γ_{9-7-15} и $\Gamma_{мскк-7-15}$, с непрерывным контуром Y равно 0,669 и 0,769 соответственно, а НСП непрерывных контуров, полученных из дискретных контуров N_{9-15-7} и $N_{мскк-15-7}$, с непрерывным контуром X равно 0,804 и 0,585 соответственно.

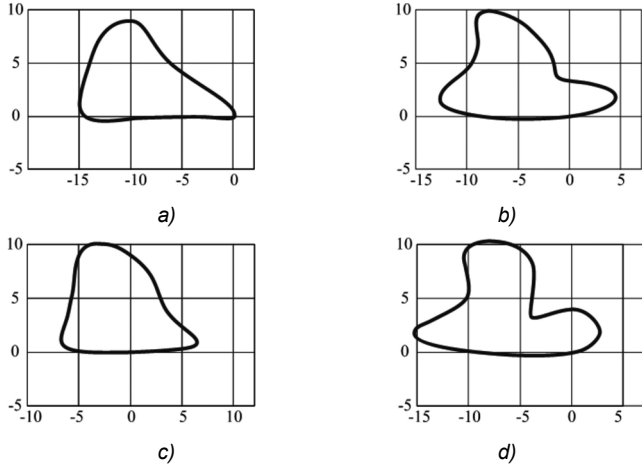


Рис. 8. Восстановленные непрерывные контуры, полученные из дискретных контуров:

$a - \Gamma_{9-7-15}$, $b - \Gamma_{мскк-7-15}$, $c - N_{9-15-7}$, $d - N_{мскк-15-7}$

Дискретизируем непрерывные контуры X и Y с одинаковыми размерностями $k = 7$ и $k = 15$. Для контуров N_7 (рис. 9, б) и Γ_{15} (рис. 9, с) получим:

$N_7 = (-14,015-0,402i; 0,617+3,395i; 2,213+3,967i; 2,68+2,132i; 3,717-5,264i; 2,307-1,124i; 2,481-2,703i)$,

$\Gamma_{15} = (-7,492+0,544i; -1,542+1,383i; 1,781+1,865i; 1,373+2,081i; 0,398+2,243i; 0,123+1,943i; 1,91+0,35i; 3,579-1,625i; 2,017-2,575i; 0,179-2,224i; 1,079-0,562i; 2,433+0,226i; 2,296-1,117i; -1,056-1,817i; -7,079-0,717i)$.

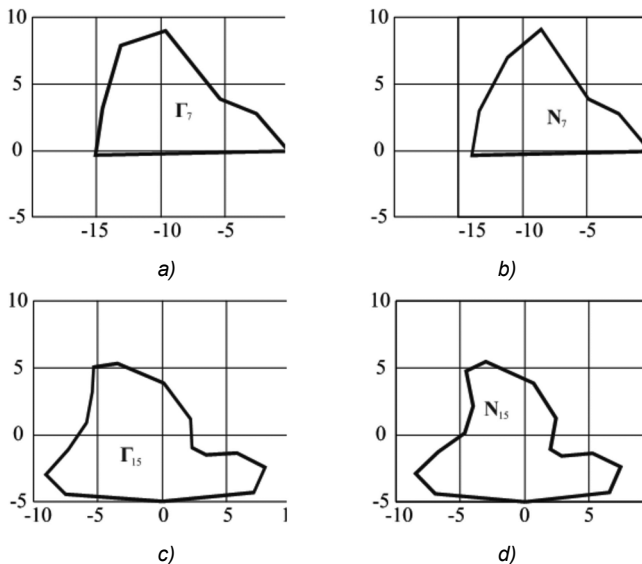


Рис. 9. Дискретные контуры: $a - \Gamma_7$, $b - N_7$, $c - \Gamma_{15}$, $d - N_{15}$

НСП полученных дискретных контуров Γ_7 и N_7 равно 0,995, а НСП контуров Γ_{15} и N_{15} равно 0,992. Таким образом, анализируя результаты вычисления НСП контуров, полученных рассмотренными методами передис-

кретизации, приходим к выводу, что наиболее эффективным является метод максимального сохранения спектра контура.

Заключение

Произведен анализ эффективности методов передискретизации контуров изображений с целью выравнивания их размерностей. Исследован метод эквализации и метод максимального сохранения спектра контура. Для оценки эффективности использовано нормированное скалярное произведение контуров изображений.

Наиболее приемлемые для практического использования результаты показал метод максимального сохранения спектра контура. Получено, что как при увеличении, так и при уменьшении размерности контура метод максимального сохранения спектра контура обеспечивает значение НСП близкое к значению НСП исходных непрерывных контуров. Также получено, что значение НСП при передискретизации с понижением размерности выше, чем при повышении размерности. Повышение качества передискретизации контуров изображений можно получить при использовании метода, максимально сохраняющего форму спектра контура изображения объекта.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005.
2. Karim S. A. A. Rational Bi-Quartic Spline with Six Parameters for Surface Interpolation with Application in Image Enlargement // IEEE Access, 2020. – Vol. 8. – PP. 115621–115633.
3. Пьявченко А. О., Петренко Е. В. Анализ и выбор цифровых фильтров для передискретизации кадров цифрового изображения для режима воспроизведения «картинка-в-картинке» // Известия ЮФУ. Технические науки, 2012. – №5 (130). – С. 185-189.
4. Малахин В. А., Терешин А. А., Гончаров С. Н., Писецкий В. В., Гончаров Е. С. Исследование и моделирование алгоритмов восстановления цифрового сигнала между отсчетами // Труды международного симпозиума «Надежность и качество», 2018. – Т. 1. – С. 344-349.
5. Михеев С. Е., Морозов П. Д. Применение квазиэрмитовых кубических сплайнов для передискретизации звуковых файлов // Труды Карельского научного центра РАН, 2014. – №4. – С. 106-115.
6. Спажакин М. И. Применение многоканальных ресэмплеров фарроу в задачах радиомониторинга // Радиотехника, – 2018. – №7. – С. 29-34.
7. Петухов К. Ю., Шаяхметов М. Р. Передискретизация как метод борьбы с шумом // Вестник КИГИТ, 2012. – №7 (25). – С. 4-8.
8. Cheng X., et al. Efficient L0 resampling of point sets. Comput. Aided Geom. Des. (2019), 101790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2019.101790>.
9. Введение в контурный анализ и его приложение к обработке изображений и сигналов/ под ред. Я. А. Фурмана. – М.: Физматлит, 2002.
10. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. — 3-е изд. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011.
11. Основы теории обработки непрерывных контуров изображений: монография / под ред. Р. Г. Хафизова. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015.
12. Хафизов Р. Г., Охотников С. А. Распознавание непрерывных комплекснозначных контуров изображений // Известия вузов. Приборостроение. – 2012. – №5, – С. 3-9.
13. Хафизов Р. Г., Охотников С. А. Дискретизация непрерывных контуров изображений, заданных в комплекснозначном виде // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, №2, – С. 274-278.