

## УДАЛЕНИЕ ШУМА С ИЗОБРАЖЕНИЙ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ОПЕРАТОРОВ НЕЧЕТКОЙ МОРФОЛОГИИ

А.В. ИНЮТИН

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 02 апреля 2020*

**Аннотация.** Представлены операторы нечеткой морфологии для удаления шума с черно-белых изображений топологических объектов. Фильтры, использующие такие операторы, имеют высокое пространственное разрешение (способность разделять близко расположенные элементы на изображении). Показано, что использование фильтров на основе операторов нечеткой морфологии позволяет удалять шум с изображений слоев печатных плат, не изменяя связи между дорожками.

**Ключевые слова:** топологические изображения, математическая морфология, удаление шума.

### Введение

Объект на изображении будет называться топологическим, если рассматривать этот объект с точки зрения связей между его элементами. Для изображений слоев печатных плат топологическими объектами являются дорожки, которые состоят из элементов топологии: проводников, контактных площадок, концевых контактов, экранов и т. д. Для печатной платы топология – это рисунок (чертеж), определяющий форму элементов фотошаблона, их взаимное расположение, геометрические размеры и предельные отклонения размеров. В задачах оптического контроля топологии необходимо локализовать и классифицировать ее дефекты на изображении, в результате чего принимается решение о качестве проверяемой платы.

Для повышения качества контроля с изображения необходимо удалить шум, обусловленный процессами, происходящими в матрице ПЗС датчика, а также пылью и другими загрязнениями объекта съемки. При этом необходимо не допустить появления коротких замыканий и обрывов в процессе работы фильтра. Фильтры для удаления шума могут быть различными: использующими трансформацию в частотной области после Фурье или вейвлет-преобразования; семантическими; основанными на сканировании изображения окном маски (медианными, морфологическими и т. п.) [1].

Использование морфологических фильтров, которые имеют такие параметры, как размер и форма структурирующего элемента (СЭ), позволяет более гибко управлять процессом удаления шума с изображения. Мягкий морфологический фильтр [2] имеет дополнительный параметр – порог фильтрации, а также обладает возможностью многократного его применения с минимальным СЭ, что дает дополнительную вариативность его применения. В докладе предложена модификация фильтра, заключающаяся в замене операторов мягкой математической морфологии на операторы, основанные на использовании нечеткой функции принадлежности.

### Операторы нечеткой математической морфологии

На сегодняшний день не существует однозначного определения операторов нечеткой математической морфологии [3–7], основанных на понятии нечетких множеств [8]. В источниках [3–7] нечеткая функция принадлежности, как правило, определяется как функция яркости пикселей изображения  $\mu_{\tilde{A}} = f_A(x)$ .

В качестве нечеткой функции принадлежности предлагается использовать отношения

мощностей множеств  $n_{fit}$  и  $n_{unfit}$  :

$$\mu_{\bar{A}} = \left| \frac{n_{fit}}{n_{unfit}} \right|, \forall x \in \bar{A}$$

где  $n_{fit} = \{ \overline{a_i \cap b_i} \}$  – множество ненулевых пикселей на изображении в границах используемого СЭ, совпавших по значению с ненулевыми пикселями СЭ;  $n_{unfit} = \{ a_i \cap b_i \}$  – множество пикселей на изображении в границах используемого СЭ, значения которых не совпали со значениями соответствующих пикселей СЭ.

Для работы с бинарными изображениями предлагается использовать следующие операторы нечеткой математической морфологии:

$$FuzzyErode(A, B, t) = \begin{cases} \left| n_{fit} \right| + t \leq \left| n_{unfit} \right| \rightarrow a = 0, \\ \left| n_{fit} \right| + t > \left| n_{unfit} \right| \rightarrow a = 1, \end{cases} \quad a \in A,$$

$$FuzzyDilate(A, B, t) = \begin{cases} \left| n_{fit} \right| + t \leq \left| n_{unfit} \right| \rightarrow a = 0, \\ \left| n_{fit} \right| + t > \left| n_{unfit} \right| \rightarrow a = 1, \end{cases} \quad a \in A.$$

где  $t$  – порог подобия,  $A$  – черно-белое изображение,  $B$  – структурирующий элемент. Нечеткость операторов определяется нечеткой степенью подобия СЭ элемента изображению.

Фазификация производится на этапе вычисления функции принадлежности как отношения мощностей множеств  $n_{fit}$  и  $n_{unfit}$ . Дефазификация осуществляется при определении значения пикселя исходя из значения его функции принадлежности.

Особенностью операторов является определение значения для каждого пикселя изображения только один раз на основе вычислений в маске СЭ, что обеспечивает фильтру высокое пространственное разрешение, т.е. способность разделять близко расположенные элементы на изображении. Использование порога подобия позволяет варьировать степень влияния на результат даже минимального СЭ.

### Оценка эффективности фильтра на базе операторов нечеткой математической морфологии

Было проведено исследование и сравнение результатов работы фильтров, которые используют морфологические отмыкание, замыкание, последовательные фильтры OpenClose и CloseOpen с СЭ в виде квадрата и ромба размерами от  $2 \times 2$  до  $5 \times 5$  пикселей, а также аналогичные операции нечеткой морфологии, в том числе нечеткая эрозия и дилатация, которые при определенных параметрах могут удалять шум с изображения без искажения размеров. Значение порога подобия задавалось в интервале от одного пикселя до половины числа пикселей СЭ, количество итераций фильтра – от одной до трех.

В качестве исходных данных использовался набор из трех изображений печатных плат размером от  $640 \times 480$  до  $1280 \times 960$  пикселей с различной минимальной шириной дорожки и синтезированным шумом. На всех изображениях присутствовали обрывы и короткие замыкания различного размера (с минимальной шириной дефекта от одного до трех пикселей). После фильтрации вычислялось количество обрывов и коротких замыканий, которые образовались в процессе работы фильтра.

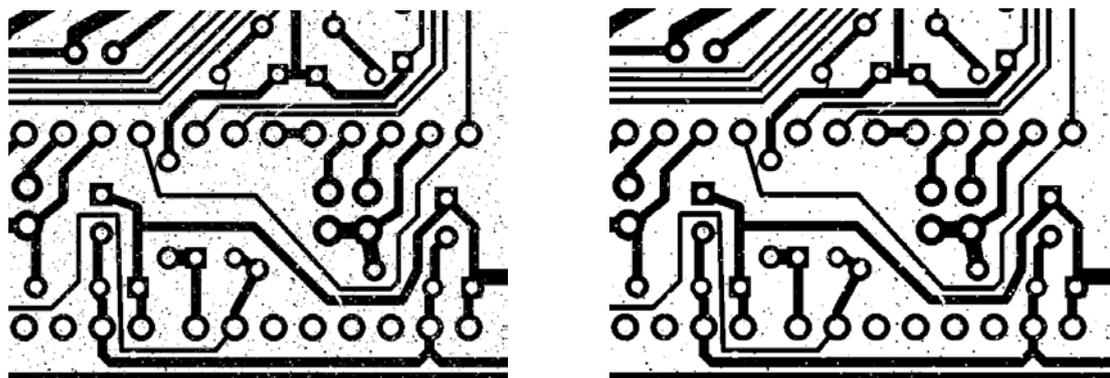
В таблице приведен список некоторых из исследованных фильтров, отсортированных по интегральному критерию качества  $k$ , а также представлены: коэффициенты  $k_{шум}$  – среднее отношение площади шума на изображении  $S_{noise}$  оставшегося после применения фильтра, к площади изображения  $S_{img}$  для всего набора тестовых изображений;  $k_{вс}$  – значение  $k_{шум}$  с учетом вычислительной сложности фильтра  $k_{вс} = k_{шум} \times i \times d$ , где  $i$  – количество итераций фильтра;  $d$  – условная оценка его вычислительной сложности, равная произведению высоты и ширины СЭ (или их сумме для квадратных СЭ в операциях классической математической морфологии);  $k_{нд}$  – количество привнесенных обрывов и

замыканий. Чем меньше значение  $k$ , тем лучше и быстрее фильтр удаляет шум с изображения с минимальным количеством привносимых искажений топологии.

Оценка эффективности исследованных фильтров

№	Тип фильтра	Форма СЭ	Размер СЭ	Порог подобия	$i$	$k_{\text{шум}}$	$k_{\text{вс}}$	$k_{\text{нд}}$	$k_{\text{сум}}$
1	FuzzyErode	ромб	3	2	1	0,0074	0,067	0	0,067
2	FuzzyDilate	ромб	3	2	1	0,0074	0,067	0	0,067
3	FuzzyOpen	ромб	3	2	1	0,0061	0,109	0	0,109
4	FuzzyErode	ромб	3	2	2	0,0062	0,112	0	0,112
5	FuzzyClose	ромб	3	2	1	0,0062	0,112	0	0,112
19	FuzzyErode	квадрат	3	4	1	0,0069	0,062	3	3,062
20	FuzzyDilate	квадрат	3	4	1	0,0069	0,062	3	3,062
21	FuzzyOpenClose	квадрат	3	3	1	0,0070	0,252	4	4,252
45	CloseOpen	квадрат	2	0	1	0,0066	0,105	6	6,105
54	OpenClose	квадрат	2	0	1	0,0067	0,106	9	9,106
62	FuzzyOpenClose	ромб	3	1	2	0,0040	0,289	12	12,289
63	FuzzyOpenClose	ромб	3	1	3	0,0040	0,434	12	12,434
64	FuzzyErode	ромб	3	4	2	0,1735	3,122	11	14,122
65	Close	квадрат	2	0	1	0,0090	0,072	15	15,072
75	Open	квадрат	2	0	1	0,0133	0,107	18	18,107
162	Open	квадрат	4	0	1	0,0223	0,356	277	277,356
163	Close	квадрат	4	0	1	0,0186	0,297	297	297,297
164	Open	квадрат	5	0	1	0,0356	0,713	309	309,713
165	Open	ромб	5	0	1	0,0254	1,271	372	373,271
166	Close	квадрат	5	0	1	0,0378	0,756	403	403,756
167	FuzzyDilate	квадрат	3	1	3	0,2208	5,962	460	465,962
168	FuzzyErode	ромб	3	4	3	0,2564	6,924	751	757,924

Фильтры № 62 и 63, лучшие по шумоподавлению, приводят к появлению 12 обрывов и коротких замыканий. Фильтр № 19 имеет лучшее шумоподавление с учетом вычислительной сложности, но тоже приводит к искажению связей между дорожками печатной платы. Исходя из интегрального критерия эффективности  $k_{\text{сум}} = k_{\text{вс}} + k_{\text{нд}}$ , оптимальным будет фильтр, основанный на однократном использовании операции FuzzyErode со структурирующим элементом в форме ромба размером  $3 \times 3$  пикселя и порогом 2. Пример исходного изображения и результата работы оптимального фильтра приведен на рис. 1. На рис.1, б видно, что после фильтрации на изображении осталось еще много импульсного шума, но использование площадных фильтров для его удаления нарушит связи между дорожками, что недопустимо для задачи контроля топологии на изображении слоев печатных плат.



*a*
*б*  
 Рис. 1. Пример работы фильтра: *a* – исходное изображение фрагмента печатной платы;  
*б* – результат работы оптимального фильтра

### Заключение

Фильтры на основе предложенных операторов удаляют шум с изображений слоев печатных плат, не изменяя связи между дорожками, и могут применяться для обработки изображения слоев интегральных микросхем, элементами топологии которых будут проводники и контактные окна.

Дальнейшая разработка операторов нечеткой математической морфологии для удаления шума с черно-белых изображений топологических объектов позволит создать набор алгоритмов для обработки бинарных, полутоновых и цветных изображений.

## REMOVING NOISE FROM LAYOUT IMAGES USING FUZZY MORPHOLOGY OPERATORS

A.V. INYUTIN

**Abstract.** Operators of fuzzy morphology are presented to remove noise from black-and-white images of topological objects. The filters that use these operators have a high spatial resolution, i.e. the ability to separate the closely spaced elements in the image. Filters based on fuzzy morphology operators remove noise from images of layers of circuit boards without distorting the links between tracks.

*Keywords:* mathematical morphology, noise reduction, layout, image.

### Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Мир цифровой обработки. Цифровая обработка изображений: М., 2005.
2. Инютин А.В. // Искусственный интеллект. 2007. № 3. С. 217–228.
3. Bloch I., Maitre H. // Pattern Recognition. 1995. Vol. 28, № 9. P. 1341–1387.
4. De Baets B., Kerre E. E., Gupta M.M. // Intern. J. of General Systems. 1995. № 23. P. 155–171.
5. Kitainik L. Fuzzy Decision Procedures with Binary Relations: Kluwer Academic Publishers. 1993.
6. Nachtegaele M., Kerre E.E. // Fuzzy Sets and Systems. 2001. Vol. 124, № 1. P. 73–85.
7. Sinha D., Dougherty E.R. // J. of Visual Communication and Image Representation. 1992. Vol. 3, № 3. P. 286–302.
8. Zadeh L. Fuzzy sets / Information and Control. 1965. № 8. P. 338–352.