

Дудкин А. А., Инютин А. В.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ШУМА С ИЗОБРАЖЕНИЙ ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Введение. Как правило, на исходном изображении в системах технического зрения присутствует шум, обусловленный процессами, происходящими в матрице ПЗС датчика, а также пылью и другими загрязнениями объекта съемки. Удаление шума осуществляется на этапе модулей предварительной обработки, после чего уже выполняется поиск и классификация дефектов и принятие решения о качестве объекта контроля (рис. 1).

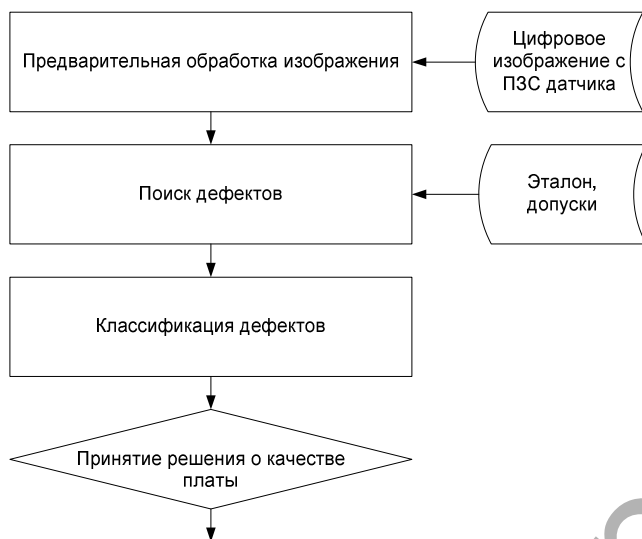


Рисунок 1 – Система контроля топологии печатных плат

На этапе предварительной обработки производится выравнивание динамического диапазона, поворот и масштабирование изображения, бинаризация и удаление шума. Для удаления шума используются фильтры, основанные на сканировании изображения окном маски: медианные, ранговые и др. [28]. Особое место занимают фильтры, основанные на использовании операторов математической морфологии. Математическая морфология оперирует терминами теории множеств, на базе которой разработаны базовые операторы – эрозия и дилатация, на которых, в свою очередь, строятся более сложные операторы. К преимуществам морфологического подхода относят [19]:

- возможность изменения геометрического содержания изображения при сохранении геометрических характеристик;
- наличие хорошо разработанной морфологической алгебры;
- возможность выражения алгоритмов обработки в терминах очень малого класса операторов;
- существование строгих теорем представления, выражающих морфологические фильтры с помощью морфологических операторов.

В общем случае целью предварительной обработки изображения является его улучшение и представление в форме, необходимой для дальнейшего анализа. Для системы контроля печатных плат предварительная обработка изображения заключается в бинаризации и удалении шума, при этом важно минимизировать количество искажений, которые могут появиться на данном этапе. В настоящей

статье представлены алгоритмы морфологической фильтрации шума, проанализирована их эффективность по критериям максимального шумоподавления и быстродействия фильтра, а также минимального количества искажений топологии.

Базовые операторы математической морфологии. Базовые операторы классической математической морфологии – эрозия и дилатация [10, 19, 30] выражаются как

$$Dilate(A, B) = \cup \{A + b : b \in B\}, \quad (1)$$

$$Erode(A, B) = \cap \{A - b : b \in B\}, \quad (2)$$

где A – исходное изображение, B – структурирующий элемент.

Для удаления шума с изображения могут применяться фильтры, основанные на операциях отмыкания и замыкания, которые представляют собой последовательность эрозии и дилатации

$$Open(A, B) = Dilate(Erode(A, B), B), \quad (3)$$

$$Close(A, B) = Erode(Dilate(A, -B), -B). \quad (4)$$

В [11, 12] были предложены операторы мягкой морфологии, а также фильтры на их основе, – мягкая эрозия и дилатация сигнала

$f: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R}$ по структурирующей системе $[B_1, B_2, k]$ определяется как:

$$f \ominus [B_1, B_2, k](x) = k\text{-му наименьшему значению мультимножества } \{k \diamond f(b_2) : b_2 \in B_2(x)\} \cup \{f(b_1) : b_1 \in (B_1(x))\} \text{ для всех } x \in \mathbb{Z}^n. \quad (5)$$

$$f \oplus [B_1, B_2, k](x) = k\text{-му наибольшему значению мультимножества } \{k \diamond f(b_2) : b_2 \in B_2(x)\} \cup \{f(b_1) : b_1 \in (B_1(x))\} \text{ для всех } x \in \mathbb{Z}^n. \quad (6)$$

Структурирующая система $[B_1, B_2, k]$ состоит из 3 параметров: конечных множеств B_1 и B_2 , $B_2 \subseteq B_1$, при этом $B_1, B_2 \in \mathbb{Z}^n$, натуральное число k удовлетворяет условию $1 \leq k \leq Card(B_1)$.

Множество $B = B_1 \cup B_2$, $B_1 \cap B_2 = \emptyset$ называется структурирующим множеством, B_2 – центром, B_1 – границей, k – порядковым индексом центра (параметр повторяемости).

В [18, 20] предложено следующее определение операторов бинарной мягкой морфологии:

$$A \ominus [B_1, B_2, k](x) = \{x \in A \mid (k \times Card[A \cap (B_1)_x] + Card[A \cap (B_2)_x]) \geq k \times Card[B_1] + Card[B_2] - k + 1\}, \quad (7)$$

$$A \oplus [B_1, B_2, k](x) = \{x \in A \mid (k \times Card[A \cap (B_1^S)_x] + Card[A \cap (B_2^S)_x]) \geq k\}, \quad (8)$$

где k – порядковый индекс, который определяет, сколько раз элементы ядра учитываются в конечном результате. Если $k = 1$ или $B = B_1$ ($B_2 = \emptyset$), то операторы мягкой морфологии превращаются в стандартные операторы математической морфологии.

Операторы математической морфологии, основанные на использовании нечетких множеств, предложены в [21]. В данном подходе нечеткость определяется тем, насколько структурирующий элемент вписывается в изображение. На сегодняшний день не существует единого подхода для определения нечеткой эрозии и дилатации. В [2–6, 15–17, 21, 25] даются различные определения ба-

Дудкин Александр Арсентьевич, д.т.н., профессор, зам. зав. лабораторией идентификации Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

Инютин Александр Владимирович, научный сотрудник Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

Беларусь, 220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6.

зовых операторов нечеткой морфологии, отличающиеся результатами работы. Например, согласно [21] операторы нечеткой эрозии и дилатации по нечеткому структурирующему элементу в терминах функций принадлежности имеют следующий вид:

$$\mu_{A \ominus B}(x) = \min_{y \in B} [\min[1, 1 + \mu_A(x + y) - \mu_B(y)]] = \min[1, \min_{y \in B} [1 + \mu_A(x + y) - \mu_B(y)]], \quad (9)$$

$$\mu_{A \oplus B}(x) = \max_{y \in B} [\min[0, \mu_A(x - y) + \mu_B(y) - 1]] = \max[0, \max_{y \in B} [\mu_A(x - y) + \mu_B(y) - 1]], \quad (10)$$

где $x, y \in \mathbb{Z}^2$ – пространственные координаты, а μ_A и μ_B – функции принадлежности изображению и структурирующему элементу.

В [1, 8, 9] приводится описание подхода, объединяющего нечеткую и мягкую морфологию. Операторы мягкой нечеткой эрозии и дилатации выглядят следующим образом (определение для нечеткой морфологии использовалось согласно [21]):

$$\mu_{A \ominus [B_1, B_2, k]}(x) = \min[1, \min_{y \in B_1, z \in B_2} \{k \wedge (\mu_A(x + y) - \mu_{B_1}(y) + 1) \} \cup \{ \mu_A(x + z) - \mu_{B_2}(z) + 1 \}], \quad (11)$$

$$\mu_{A \oplus [B_1, B_2, k]}(x) = \max[0, \max_{(x-y) \in B_1, (x-z) \in B_2} \{k \wedge (\mu_A(x - y) + \mu_{B_1}(y) - 1) \} \cup \{ \mu_A(x - z) + \mu_{B_2}(z) - 1 \}], \quad (12)$$

где $x, y, z \in \mathbb{Z}^2$ – пространственные координаты, а μ_A, μ_{B_1} и μ_{B_2} – функции принадлежности изображению A , ядру B_1 и мягкой границе B_2 структурирующего элемента. Для нечеткого структурирующего элемента выполняются условия $B \in \mathbb{Z}^2 : B = B_1 \cup B_2, B_1 \cap B_2 = \emptyset$. Если $k = 1$, то операторы мягкой нечеткой морфологии превращаются в операторы нечеткой математической морфологии.

Следует отметить, что публикации в литературе подтверждают актуальность использования мягкой [13, 23, 24, 26] и нечеткой [7, 15, 22, 27] морфологии для обработки изображений.

Для удаления шума на изображениях печатных плат предлагается использовать операторы мягкой морфологии, которые имеют следующий вид [29]:

$$SoftErode(A, B, t) = \begin{cases} n_s + t \leq n_n \rightarrow a = 0 \\ n_s + t > n_n \rightarrow a = 1 \end{cases}, a \in A, \quad (13)$$

$$SoftDilate(A, B, t) = \begin{cases} n_s + t \leq n_n \rightarrow a = 1 \\ n_s + t > n_n \rightarrow a = 0 \end{cases}, a \in A, \quad (14)$$

где $n_s = \sum_i (\overline{a_i \wedge b_i})$ – число ненулевых пикселей на изображении в маске структурирующего элемента, совпавших по значению с ненулевыми пикселями структурирующего элемента, $n_n = \sum_i (a_i \wedge b_i)$ – число пикселей на изображении в маске

структурирующего элемента, значение которых не совпало со значением соответствующих пикселей структурирующего элемента, t – порог фильтрации, a – пиксели исходного черно-белого изображения A , b – пиксели плоского структурирующего элемента B . Термин – плоский структурирующий элемент обозначает, что его пиксели могут принимать значения 0 и 1.

Исходными данными являются бинарное изображение. Параметры работы – размер и форма структурирующего элемента, значение порога фильтрации или значение порогов для операций эрозии и дилатации, если для этих операций используются разные пороги. Результат – бинарное изображение.

Операции мягкого отмыкания и замыкания имеют вид:

$$SoftOpen(A, B, t) = SoftDilate(SoftErode(A, B, t), B, t), \quad (15)$$

$$SoftClose(A, B, t) = SoftErode(SoftDilate(A, B, t), B, t), \quad (16)$$

Исходными данными являются бинарное изображение. Параметры фильтрации – размер и форма структурирующего элемента, количество проходов фильтра, значение порога фильтрации или значение порогов для операций эрозии и дилатации, если для этих операций используются разные пороги. Результат – бинарное изображение.

Мягкое отмыкание и замыкание не обладают свойством идемпотентности, поэтому могут многократно применяться с одним структурирующим элементом, и это свойство предлагается использовать для конструирования мягких морфологических фильтров. Алгоритм фильтрации изображения на основе операций мягкого отмыкания и замыкания приведен на рисунке 2.

Параметры фильтрации – это структурирующий элемент B (его размер и форма), порог фильтрации t и количество итераций фильтра i .

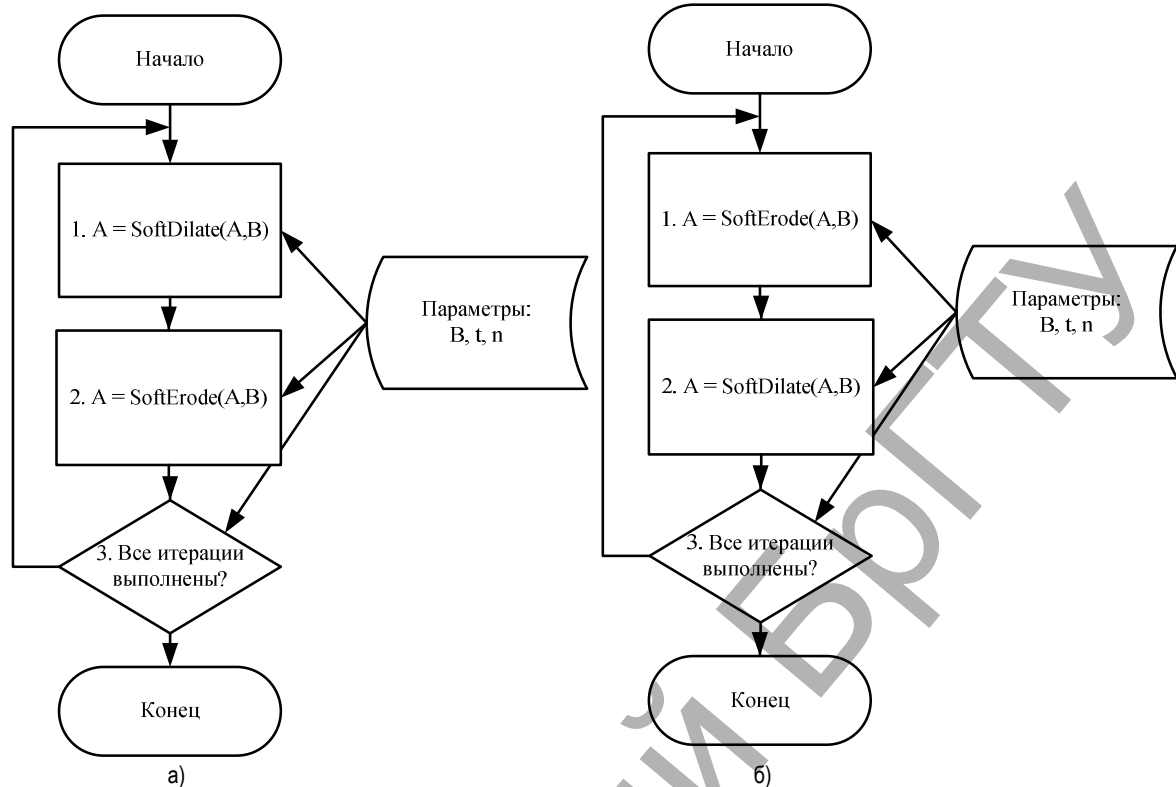
Также можно использовать последовательные мягкие морфологические фильтры, которые обозначаются $SOC, SCO, SOCO, SCOC$ и т. д., где сокращениями SO и SC обозначаются операции мягкого отмыкания и замыкания. Данные фильтры сглаживают неровности краев элементов аналогично фильтрам классической математической морфологии. А с предложенными операторами мягкой морфологии можно использовать фильтры $i_{so}SO, i_{sc}SC, i_{so}SOi_{sc}SC, i_{sc}SCi_{so}SO$ и т. д., где i_{so} – количество итераций мягкого отмыкания, а i_{sc} – количество итераций мягкого замыкания. Количество проходов фильтра задается в зависимости от качества входного изображения.

Оценка эффективности морфологических фильтров с различными параметрами. Использование мягкой математической морфологии дает возможность настройки процесса удаления шума путем выбора параметров фильтров. Предлагается оценивать эффективность морфологических фильтров с различными параметрами с помощью коэффициента качества Q . Для вычисления коэффициента набор исследуемых фильтров с различными их параметрами применяется к набору тестовых изображений. После применения каждого фильтра проводится поиск и классификация дефектов, в зависимости от которых вычисляется коэффициент Q .

В процессе оценки эффективности были исследованы фильтры с 168 вариантами их параметров:

- морфологические отмыкание, замыкание, последовательные *OpenClose* и *CloseOpen* фильтры со структурирующими элементами в виде квадрата и ромба размером от 2×2 до 5×5 пикселей;
- аналогичные операции мягкой морфологии, а также мягкая эрозия дилатация, которые при определенных параметрах могут удалять шум изображения без искажения размеров. Значение порога фильтра задавалось от 1 до половины количества пикселей структурирующего элемента, количество итераций фильтра – от 1 до 3.

В качестве исходных данных использовался набор из 3 изображений печатной платы размером от 640×480 до 1280×960 пикселей с различной минимальной шириной дорожки и синтезированным шумом. С точки зрения контроля топологии печатной платы привнесение шума на изображения выразилось в образовании таких дефектов как выступы (недотравы), вырывы (каверны или перетравы), островки и проколы. На всех изображениях присутствовали обрывы и короткие замыкания различного размера (размер минимальной ширины дефекта от 1 до 3 пикселей). Пример исходного изображения приведен на рисунке 3. После фильтрации проводился поиск дефектов методом сравнения с эталоном и классификация найденных дефектов на шесть классов: выступ, вырыв, обрыв, короткое замыкание, островок и прокол.



а) отмыкание, б) замыкание

Рисунок 2 – Алгоритмы фильтрации мягкой морфологии

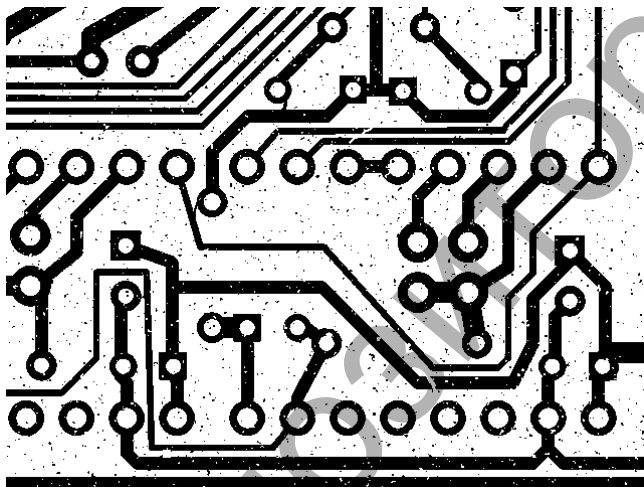


Рисунок 3 – Пример исходного изображения фрагмента печатной платы для определения параметров фильтрации

Критерий минимизации шума. Первый вариант оценки фильтрации основан на критерии минимального количества шума, который остается на изображении после фильтрации. Следовательно, для оценки требуется вычислить среднее отношение площади шума на изображении S_{noise} , оставшегося после применения фильтра, к площади изображения S_{img} для всего набора тестовых изображений:

$$Q1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{S_{noise_j}}{S_{img_j}} \quad (17)$$

В S_{noise} учитывается и оставшийся шум, и изменения формы элементов топологии в процессе фильтрации. Чем меньше значение $Q1$, тем лучше фильтр удаляет шум с изображения. Значение коэффициента $Q1$ для различных фильтров и их параметров, отсортированные по ухудшению минимального количества шума после фильтрации, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значение коэффициента $Q1$ для различных фильтров и их параметров

| Тип фильтра | Форма СЭ | Размер СЭ | Порог фильтра | Кол-во итераций | $Q1$ |
|---------------|----------|-----------|---------------|-----------------|----------|
| SoftOpenClose | Ромб | 3 | 1 | 2 | 0,004009 |
| SoftOpenClose | Ромб | 3 | 1 | 3 | 0,00402 |
| SoftOpenClose | Ромб | 3 | 3 | 3 | 0,004052 |
| SoftOpenClose | Ромб | 3 | 3 | 2 | 0,004061 |
| SoftClose | Квадрат | 3 | 4 | 3 | 0,004232 |
| SoftOpenClose | Квадрат | 3 | 4 | 1 | 0,00424 |
| SoftCloseOpen | Квадрат | 3 | 4 | 1 | 0,00424 |
| SoftClose | Квадрат | 3 | 4 | 2 | 0,00424 |
| SoftOpenClose | Квадрат | 3 | 4 | 2 | 0,004266 |
| SoftCloseOpen | Квадрат | 3 | 4 | 2 | 0,004274 |
| SoftOpenClose | Квадрат | 3 | 4 | 3 | 0,004338 |
| SoftCloseOpen | Квадрат | 3 | 4 | 3 | 0,004348 |
| SoftOpen | Квадрат | 3 | 4 | 1 | 0,004399 |
| SoftOpen | Квадрат | 3 | 4 | 2 | 0,004453 |
| SoftOpen | Квадрат | 3 | 4 | 3 | 0,004462 |
| SoftOpenClose | Ромб | 3 | 1 | 1 | 0,004518 |
| SoftOpenClose | Ромб | 3 | 3 | 1 | 0,004552 |
| SoftOpen | Ромб | 3 | 1 | 1 | 0,004587 |
| SoftOpen | Ромб | 3 | 1 | 2 | 0,004587 |
| SoftOpen | Ромб | 3 | 1 | 3 | 0,004587 |
| ... | | | | | |
| OpenClose | Квадрат | 3 | - | 1 | 0,00575 |
| CloseOpen | Квадрат | 3 | - | 1 | 0,00612 |
| CloseOpen | Квадрат | 2 | - | 1 | 0,006573 |
| OpenClose | Квадрат | 2 | - | 1 | 0,006653 |
| OpenClose | Ромб | 5 | - | 1 | 0,0187 |
| CloseOpen | Ромб | 5 | - | 1 | 0,0199 |

Для полноты представления результата в таблице 1 приведены параметры и значение Q1 лучших фильтров на базе классической математической морфологии. Из таблицы 1 видно, что фильтры с разными параметрами могут иметь одинаковое значение Q1. Значения коэффициента Q1 для всех протестированных фильтров приведены на рисунке 4, из которого видно, что при достаточно близких значениях параметров фильтрации результаты могут отличаться более чем в 60 раз.

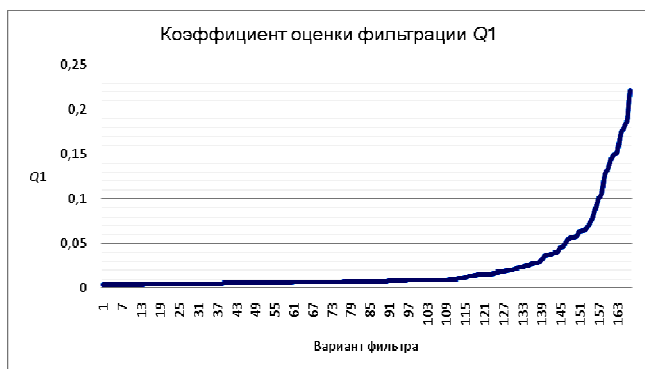


Рисунок 4 – Отношение площади шума, оставшегося после применения фильтра, к площади изображения для разных вариантов фильтра

Лучший по данному критерию фильтр – это двукратно примененная операция *SoftOpenClose* со структурирующим элементом в виде ромба размером 3x3 пикселя и порогом фильтрации, равным 1.

Критерий минимизации шума с учетом времени работы фильтра. Критерий минимального количества шума после фильтрации с учетом времени работы фильтра можно использовать, если кроме хорошего подавления шума требуется высокая скорость работы фильтра. Добавив в оценку фильтра Q1 его условную вычислительную сложность, можно вычислить его оценку с учетом времени его работы Q2:

$$Q2 = i \times Cd \times Q1, \quad (18)$$

где *i* – количество итераций фильтра; *Cd* – его условная вычислительная сложность, равная произведению высоты и ширины структурирующего элемента (или их сумме для квадратных структурирующих элементов в операциях классической математической морфологии).

Чем меньше значение Q2, тем лучше фильтр удаляет шум с изображения с учетом времени его работы. Значение коэффициента Q2 для 25 лучших фильтров и их параметров, отсортированные по ухудшению эффективности согласно критерию минимального количества шума после фильтрации с учетом времени работы фильтра, приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что лучшие результаты фильтра с учетом времени его работы имеют простые однократные операции мягкой эрозии и дилатации с квадратным СЭ размером 3x3 пикселя и порогом 4. Операции мягкой эрозии и дилатации при данных размерах порога уже могут удалять шум с изображения за один проход с минимальными изменениями формы элементов изображения. Двукратное применение этих операций уменьшает остаточный шум на изображении в 1,6 раз.

Значения коэффициента Q2 для всех протестированных фильтров приведены на рисунке 5.

Критерий минимального искажения топологии. Применение площадных фильтров может привести к образованию коротких замыканий и обрывов на изображении топологии. Коэффициенты Q1 и Q2 не учитывают искажения топологии (связей между элементами), которые вносит фильтр. Для оценки фильтрации топологических изображений предлагается использовать критерий минимального искажения топологии Q3, который, например, может вычисляться по формуле:

$$Q3 = Q2 + Nt.err, \quad (19)$$

где *Nt.err* – количество коротких замыканий и обрывов, появившихся в процессе удаления шума.

Таблица 2 – Значение коэффициента Q2 для различных фильтров и их параметров

| Тип фильтра | Форма СЭ | Размер СЭ | Порог фильтра | Кол-во итераций | Q1 | Q2 |
|-------------|----------|-----------|---------------|-----------------|----------|----------|
| SoftErode | Квадрат | 3 | 4 | 1 | 0,006925 | 0,062327 |
| SoftDilate | Квадрат | 3 | 4 | 1 | 0,006938 | 0,062439 |
| SoftErode | Ромб | 3 | 2 | 1 | 0,0074 | 0,066602 |
| SoftDilate | Ромб | 3 | 2 | 1 | 0,00744 | 0,066963 |
| Close | Квадрат | 2 | - | 1 | 0,009041 | 0,072326 |
| SoftOpen | Квадрат | 3 | 4 | 1 | 0,004399 | 0,079175 |
| SoftOpen | Ромб | 3 | 1 | 1 | 0,004587 | 0,082563 |
| SoftErode | Квадрат | 3 | 4 | 2 | 0,004618 | 0,083115 |
| SoftDilate | Квадрат | 3 | 4 | 2 | 0,00463 | 0,083335 |
| SoftClose | Квадрат | 3 | 4 | 1 | 0,004635 | 0,083438 |
| SoftOpen | Ромб | 3 | 3 | 1 | 0,005005 | 0,090093 |
| SoftClose | Ромб | 3 | 3 | 1 | 0,005648 | 0,10166 |
| CloseOpen | Квадрат | 2 | - | 1 | 0,006573 | 0,105161 |
| OpenClose | Квадрат | 2 | - | 1 | 0,006653 | 0,106454 |
| Open | Квадрат | 2 | - | 1 | 0,013314 | 0,10651 |
| SoftErode | Квадрат | 3 | 3 | 1 | 0,011859 | 0,106733 |
| SoftOpen | Квадрат | 3 | 1 | 1 | 0,006 | 0,108008 |
| SoftOpen | Ромб | 3 | 2 | 1 | 0,00607 | 0,109263 |
| SoftErode | Ромб | 3 | 2 | 2 | 0,006198 | 0,111563 |
| Close | Квадрат | 3 | - | 1 | 0,009316 | 0,11179 |
| SoftClose | Ромб | 3 | 2 | 1 | 0,006215 | 0,111865 |
| SoftDilate | Ромб | 3 | 2 | 2 | 0,006242 | 0,112349 |
| SoftClose | Квадрат | 3 | 3 | 1 | 0,006405 | 0,115288 |
| SoftClose | Ромб | 3 | 1 | 1 | 0,006517 | 0,117305 |
| SoftDilate | Квадрат | 3 | 3 | 1 | 0,013849 | 0,124641 |



Рисунок 5 – Оценки фильтров с учетом их условной вычислительной сложности

Чем меньше значение Q3, тем лучше фильтр удаляет шум с изображения с минимальным количеством привносимых искажений топологии. Значение коэффициента Q3 для 25 лучших фильтров и их параметров, отсортированные по его ухудшению, приведены в таблице 3.

Для полноты представления результата приведены значения некоторых фильтров на базе классической математической морфологии.

Значения коэффициента Q3 для всех протестированных фильтров приведены на рисунке 6. Из рисунка видно, что суммарное количество искажений топологии при использовании площадных фильтров может достигать сотен, что недопустимо при решении задачи контроля топологии. Другими словами, неправильно подобранные параметры фильтрации ухудшают результат контроля.

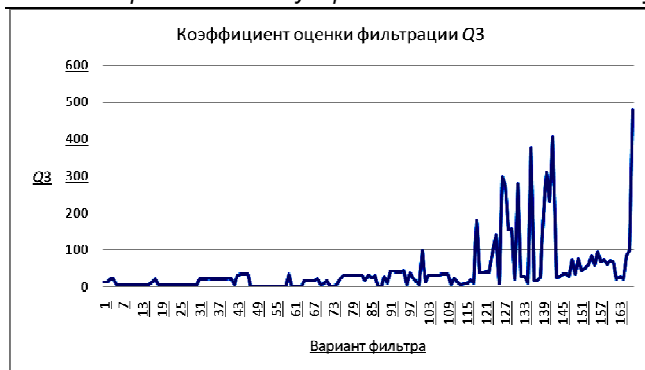


Рисунок 6 – Оценки фильтров с учетом количества вносимых искажений топологии

Интегральный критерий эффективности фильтра. Для более точного выбора настроек параметров фильтрации предлагается использовать интегральный критерий эффективности фильтра Q , который имеет следующий вид:

$$Q = k_1 \times Q_1 + k_2 \times Q_2 + k_3 \times Nt.err, \quad (20)$$

где k_1 , k_2 и k_3 – коэффициенты для задания веса критериев минимального количества шума после фильтрации, минимального количества шума после фильтрации с учетом времени работы фильтра и минимального искажения топологии, соответственно.

Чем меньше значение Q , тем эффективнее фильтр удаляет шум с изображения за минимальное время и с минимальным количеством вносимых искажений топологии. Например, для выбора эффективного фильтра, который не вносит искажения в топологию изображения и скорость работы которого не имеет принципиального значения, Q_{pr} можно определить как

$$Q_{pr} = Q_1 + 0,1 \times Q_2 + Nt.err. \quad (21)$$

Значения интегрального коэффициента Q_{pr} , выраженного по формуле (5), для всех протестированных фильтров приведены на рисунке 7.

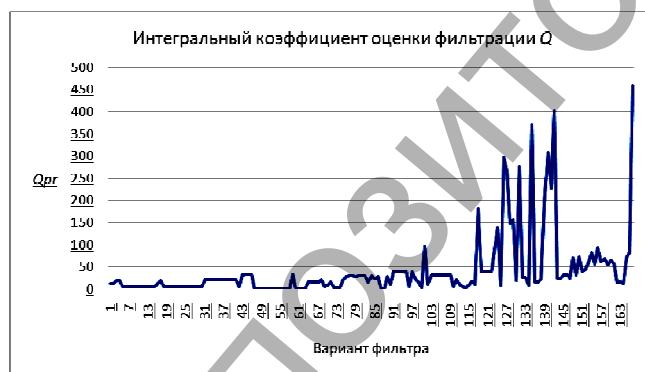


Рисунок 7 – Значение интегрального коэффициента оценки фильтрации Q_{pr}

Исходя из интегрального критерия эффективности Q_{pr} , оптимальным будет фильтр, основанный на однократном использовании операции *SoftErode* со структурирующим элементом в форме ромба размером 3×3 пикселя и порогом 2. Пример работы такого фильтра приведен на рисунке 8.

Из рисунка 8 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.

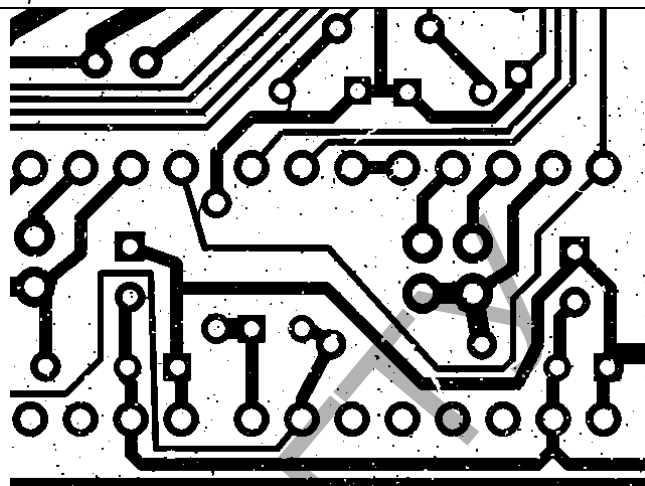


Рисунок 8 – Результат работы оптимального фильтра

Заключение. Предложена оценка эффективности фильтра, которая основана на критериях минимального количества шума после фильтрации, минимального количества шума после фильтрации с учетом времени работы фильтра и минимального искажения топологии. Использование такой оценки позволяет выбрать оптимальные настройки фильтра исходя из требований к удалению шума. Применение операторов мягкой морфологии, которые имеют дополнительные параметры для фильтрации, дает лучший результат для удаления шума с изображений, имеющих мелкие детали или близкое их расположение относительно друг друга.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ (проект № Ф18В-005) и ГКНТ Республики Беларусь (проект № Ф18ПЛШГ-008П).

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Binary, gray-scale and vector soft mathematical morphology: Extensions, algorithms, and implementations / M. I. Vardavoulia [et al.] // *Advances in Imaging and Electron Physics*. – 2001. – Vol. 119. – P. 1–53.
2. Bloch, I. Duality vs. adjunction for fuzzy mathematical morphology and general form of fuzzy erosions and dilations / Isabelle Bloch // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2009. – Vol. 160, № 13. – P. 1858–1867.
3. Bloch, I. Fuzzy connectivity and mathematical morphology / Isabelle Bloch // *Pattern Recognition Letters*. – 1993. – Vol. 14, № 6. – P. 483–488.
4. Bloch, I. Fuzzy mathematical morphologies: a comparative / Isabelle Bloch, Henri Maitre // *Pattern Recognition*. – 1995. – Vol. 28, № 9. – P. 1341–1387.
5. Bloch, I. Lattices of fuzzy sets and bipolar fuzzy sets, and mathematical morphology / Isabelle Bloch // *Information Sciences*. – 2011. – Vol. 181, № 10. – P. 2002–2015.
6. Bloch, I. Spatial reasoning under imprecision using fuzzy set theory, formal logics and mathematical morphology / Isabelle Bloch // *International Journal of Approximate Reasoning*. – 2006. – Vol. 41, № 2. – P. 77–95.
7. Fatchah, C. Interest-Based Ordering for Fuzzy Morphology on White Blood Cell Image Segmentation / ChastineFatchah [et al.] // *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*. – 2012. – Vol. 16, № 1. – P. 76–86.
8. Gasteratos, A. Non-linear image processing in hardware / A. Gasteratos, I. Andreadis // *Pattern Recognition*. – 2000. – Vol. 33, № 6. – P. 1013–1021.
9. Gasteratos, A. Soft Mathematical Morphology: Extensions, Algorithms and Implementations / AntoniosGasteratos, IoannisAndreadis // *Invited Contribution, Advances in Imaging and Electron Physics*. – 1999. – Vol. 110, Ch. 3. – P. 63–99.
10. Giardina C.R., Dougherty E.R. *Morphological method in image and signal processing*, Prentice Hall, New Jersey, 1988.
11. Koskinen, L. Soft morphological filters / Lasse Koskinen [et al.] // *Proc. SPIE. Image Algebra and Morphological Image Processing II* – 1991. – Vol. 1568. – P. 262–270.

12. Kuosmanen, P. Soft morphological filtering / Pauli Kuosmanen and Jaakko Astola // Journal of Mathematical Imaging and Vision. – 1995. – Vol. 5, № 3. – P. 231–262.
13. Liu, T. Infrared small targets detection and tracking based on soft morphology Top-Hat and SPRT-PMHT / Tan Liu, Xiang Li // Proc. of 3rd International IEEE Congress on Image and Signal Processing (CISP). Shanghai, 2010. – 2010. – Vol. 2. – P. 968–972.
14. Maccarone, M. C. Fuzzy mathematical morphology: Concepts and applications / Maria Concetta Maccarone // Vistas in Astronomy. – 1996. – Vol. 40, № 4. – P. 469–477.
15. Nachtegaele, M. A study of interval-valued fuzzy morphology based on the minimum-operator / M. Nachtegaele [et al.] // Proc. SPIE 7546 – Proc. of Second International Conference on Digital Image Processing, 26 February 2010, Singapore. / ed. Kamaruzaman Jusoff, Yi Xie. – 2010. – SPIE Vol. 7546. – P. 75463H–1–7.
16. Nachtegaele, M. Classical and fuzzy approaches towards mathematical morphology / M. Nachtegaele, E. E. Kerre // Fuzzy Techniques in Image Processing / E. E. Kerre and M. Nachtegaele, eds. – 2000. – Springer Verlag Berlin / Heidelberg. – P. 3–57.
17. Nachtegaele, M. Connections between binary, gray-scale and fuzzy mathematical morphologies / Mike Nachtegaele, Etienne E. Kerre // Fuzzy Sets and Systems. – 2001. – Vol. 124, № 1. – P. 73–85.
18. Pu, C. Threshold Decomposition of Grey-Scale Soft Morphology into Binary Soft Morphology / Christopher C. Pu, Frank Y. Shih // CVGIP – Graphical Models and Image Processing. – 1995. – Vol. 57, № 6. – P. 522–526.
19. Serra, J. Image analysis and Mathematical Morphology. – New York : Academic Press, 1982. – 610 p.
20. Shih, F. Analysis of the properties of soft morphological filtering using threshold decomposition / Y. Shih Frank, C. Pu Christopher // IEEE Trans. Signal Processing. – 1995. – Vol. 43, № 2. – P. 539–544.
21. Sinha, D. Fuzzy mathematical morphology / Sinha Divyendu, R. Dougherty Edward // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 1992. – Vol. 3, № 3. – P. 286–302.
22. Sussner, P. Classification of Fuzzy Mathematical Morphologies Based on Concepts of Inclusion Measure and Duality / Peter Sussner and Marcos Eduardo Valle // Journal of Mathematical Imaging and Vision. – 2008. – Vol. 32, № 2. – P. 139–159.
23. Tickle, A. Upgrading to a Soft Multifunctional Image Processor for Implementation on a Field Programmable Gate Array with Additional Biasing and Logical Capabilities / Andrew J. Tickle [et al.] // Proc. of SPIE Optical Design and Engineering III / ed. by Laurent Mazuray [et al.]. – 2008. – SPIE Vol. 7100. – 71002H–1–12.
24. Tian, Y. Optimization of Soft Morphological Filters with Parallel Annealing-Genetic Strategy / Ye Tian, Chun-hui Zhao // Proc. of First International Conference on Pervasive Computing Signal Processing and Applications (PCSPA), Harbin, China, 17–19 Sept. 2010. – 2010. – P. 576–581.
25. Wu, M. Fuzzy Morphology and Image Analysis / Minjin Wu // Proc. of the 9th. ICPR, Rome, 14–17 Nov 1988. – 1988. – Vol. 1. – P. 453–455.
26. Yan, X. Edge detection for Feather and down image via BEMD and soft morphology / Xiaofei Yan, Yanqiu Wang // Proc. of International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), Harbin, China 24–26 Dec. 2011. – Vol. 3. – P. 1603–1607.
27. Yang, X. Fuzzy Morphology Based Feature Identification in Image Processing / Xiaoyi Yang // Fuzzy Information and Engineering: Advances in Intelligent and Soft Computing. – 2010. – Vol. 78. – P. 607–615.
28. Гонсалес, Р. Мир цифровой обработки. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс – М.: Техносфера, 2005. – 660 с.
29. Инютин, А. В. Фильтрация изображений с использованием операций мягкой морфологии / А. В. Инютин // Искусственный интеллект. – 2007. – № 3. – С. 217–228.
30. Матерон, Ж. Случайные множества и интегральная геометрия. – М.: Мир, 1978. – 318 с.

Материал поступил в редакцию 15.02.2019

DOUDKIN A. A., INUTIN A. V. Evaluation of the effectiveness of morphological filters to remove noise from PCB layout images

The paper presents an assessment of the effectiveness of morphological filters to remove noise from the images of PCB layers according to the criteria of maximum noise reduction and filter performance, as well as the minimum number of layout distortions that arise in the process of their operation. For evaluation, the tested filters are applied with their various parameters to a set of the images, and then the layout defects are searched and classified.

УДК 004.89

Виссия Х., Краснопрошин В. В., Вальвачев А. Н.

МОНИТОРИНГ СВЕРХБОЛЬШИХ СИСТЕМ

Введение. В условиях глобализации и перехода современного общества от промышленного к цифровому этапу своего развития появились новые типы организационно-технических систем (ОТС) [1]. Они характеризуются большим количеством территориально распределенных гетерогенных компонентов, высоким уровнем автоматизации производства, активным использованием глобальных коммуникаций и интеграцией традиционной деятельности человека с компьютерными технологиями. В современных ОТС производственные, научные, сервисные, образовательные и другие процессы реализуются людьми совместно с роботизированными установками, управляемыми системами с элементами искусственного интеллекта [1, 2]. Примерами современных ОТС являются: объединения государств, экономические кластеры, международные корпорации, банковские объединения, цифровые города, человеко-машинные системы типа CPS [3], IoT [4], ULSS [3]) и др. В литературе подобного

рода организации называют: сложными [5], большими [6], крупномасштабными [7], ультрабольшими [8], сверхбольшими [9].

Одной из наиболее актуальных проблем новых ОТС является запаздывание реакции административных органов (лиц, принимающих решения, ЛПР) на возникновение аварийных ситуаций или снижение эффективности работы отдельных компонентов системы [7, 10]. Причины запаздывания связаны со сложностью оперативного доступа руководства компании к “горячим” данным нижних уровней, гетерогенностью входной информации, субъективностью принимаемых решений и др. Вместе с тем несвоевременность принятия решений может иметь катастрофические последствия, как для отдельных людей, так и для государства в целом. Например, финансовый кризис 2008 г., который во многом был вызван запаздыванием принятия превентивных решений администрации США, привел к краху крупнейших инвестиционных банков, включая Lehman Brothers.

Виссия Херман, Ph.D, генеральный директор компании Vyelex Multimedia Products.

Краснопрошин Виктор Владимирович, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой информационных систем управления Белорусского государственного университета; e-mail: krasnoproshin@bsu.by.

Вальвачев Александр Николаевич, к. т. н., доцент кафедры информационных систем управления Белорусского государственного университета; e-mail: van_955@mail.ru

220050, г. Минск, пр. Независимости, 4.