

УДК 004.932.2

Д.В. Ганин, И.Ю. Давыдов

ОБОБЩЕННАЯ ПРОЦЕДУРА ЯРКОСТНОГО СОПОСТАВЛЕНИЯ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ¹

Ганин Дмитрий Владимирович, кандидат экономических наук, доцент, проректор по научной работе и инновационному развитию Нижегородского государственного инженерно-экономического университета. Имеет 35 научных публикаций, в том числе в области теории связи. [e-mail: ngiei135@mail.ru].

Давыдов Иван Юрьевич, магистрант кафедры «Телекоммуникации» Ульяновского государственного технического университета. Имеет 2 публикации в области теории информации. [e-mail: 1Davydov2i@gmail.com].

Аннотация

Описан подход к организации автоматизированной визуальной инспекции печатных плат, в том числе на основе их рентгенограмм. Проведен анализ характерных особенностей изображений рентгенограмм печатных плат. Доказана недостаточная эффективность применяемых в рамках задачи верификации рентгенограмм существующих методов сравнения изображений путем анализа гистограмм или поиска ключевых точек. На основе этого предложен новый алгоритм верификации печатных плат на основе сравнения их рентгенографических изображений. Сравнение производится на основе итерационной процедуры сопоставления бинарных отображений исследуемых изображений с последующей их фрагментацией. Полученные фрагменты подвергаются итеративному яркостному сопоставлению. Формируемые результаты сопоставления пригодны для дальнейшего экспертного исследования с использованием автоматизированных систем. Алгоритм позволяет достичь высокой точности сопоставления. Рассмотрены основные особенности алгоритма, позволяющие повысить быстродействие его работы и качество совмещения обрабатываемых изображений. Предложены некоторые пути оптимизации работы алгоритма.

Ключевые слова: автоматическая инспекция многослойных печатных плат, изображения рентгенограмм, морфологический анализ, яркостное сопоставление.

GENERALIZED PROCEDURE OF BRIGHTNESS COMPARISON OF PRINTED CIRCUIT BOARDS IMAGES OF RADIOGRAPHS

Dmitrii Vladimirovich Ganin, Candidate of Economics, Associate Professor; Vice-Rector for Research and Innovative Development of Engineering Economics State University of Nizhniy Novgorod; an author of 35 articles including ones on communication science. e-mail: ngiei135@mail.ru.

Ivan Iurevich Davydov, Candidate for the Master's Degree at the Department of Telecommunications of Ulyanovsk State Technical University; an author of two articles in the field of information theory. e-mail: 1Davydov2i@gmail.com.

Abstract

The article describes an approach to automated visual inspection of printed circuit boards including one on the basis of their radiographs. The authors analyzed the characteristics of x-ray images of printed circuit boards. The paper shows the lack of efficiency used in the framework of the task of verification of radiographs, the existing methods comparing two images by analyzing a histogram or search of keypoints. Based on that, the authors propose a new algorithm for the verification of printed circuit boards based on the comparison of their radiographic images. The comparison is based on the iterative procedure of matching of the binary representations of the studied images and their subsequent fragmentation. The obtained fragments are subjected to an iterative luminance mapping. Generated matching results are suitable for further expert studies with the use of automated systems. The algorithm allows to achieve high accuracy mapping. The authors consider the main features of the algorithm enhancing the performance of its work and the quality of the matching of the processed images. In the paper we propose some optimization of the algorithm.

Key words: automatic inspection of multilayer printed circuit boards, images of radiographs, morphological analysis, luminance mapping.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 16-47-732011\16.

ВВЕДЕНИЕ

Объективный рост числа вычислительных устройств различного назначения, расширение области их применения в комплексе с трендом миниатюризации такого оборудования требуют широкого применения микроэлектронных компонентов и многослойных печатных плат, позволяющих добиться максимизации плотности размещения электронных компонентов на минимальной единице площади [1].

Как правило, потребителем предъявляются строгие требования к надежности работы микроэлектронных средств. Это обуславливает необходимость верификации печатных плат, в частности с использованием различных методов визуального контроля (автоматических и экспертных). Применение подобных методов позволяет:

- выявлять визуально фиксируемые дефекты разводки токопроводящих дорожек и пайки элементов;
- сигнализировать в случае обнаружения дефектов;
- визуализировать области, содержащие дефекты.

Анализ изображений, проводимый при оптическом контроле, подразумевает применение аппаратов гистограммного анализа, вычисления ключевых точек и бинарных дескрипторов с последующим совмещением изображений и их сравнением [2, 3].

В случае инспекции многослойных плат с целью регистрации дефектов, скрытых в областях, не доступных для проверки с использованием только оптических методов (расположенных между слоями диэлектрика, внутри герметичных непрозрачных компонентов), применяются средства рентгенографии.

Подобный подход накладывает ряд ограничений, связанных с особенностями аппарата формирования рентгенографических изображений. К таким особенностям относятся:

- высокое зашумление изображения;
- отсутствие цветности изображения;
- наличие наложений изображений отдельных проводников и элементов;
- неоднородность фрагментов изображения, расположенных в разных участках снимка;
- образование «тени» (смещение и размытие фиксируемых изображений), отбрасываемой выступающими элементами;
- наличие различий контрастности изображений, вызванных неточностями соблюдения методики их изготовления.

Отрицательная роль описанных выше особенностей существенно возрастает в случаях инспекции печатной платы с применением рентгенограммы эталона.

Влияние описанных выше деструктивных факторов осложняет осуществление анализа невозможностью применения многих традиционных инструментов исследования: в связи с отсутствием цветности изображения применение гистограммного анализа для выделения токопроводящих дорожек невозможно; из-за значительного влияния шумов и размытия контуров объектов отсутствует возможность эффективного вычисления ключевых точек.

Таким образом, перед разработчиком систем поиска дефектов стоит задача нахождения подхода к задаче верификации, учитывающего особенности изображений рентгенограмм.

ОБЩЕННАЯ ПРОЦЕДУРА СОПОСТАВЛЕНИЯ

Предлагается новый алгоритм верификации печатных плат на основе сопоставления изображений их рентгенограмм, сравниваемых с изображением рентгенограммы эталона. Алгоритм строится на идее совмещения двух изображений печатных плат, сравниваемого относительно эталонного, с последующей оценкой подобия фрагментов, полученных изображениями.

Сравнение двух изображений можно разделить на 5 этапов:

1. Подготовка исследуемых изображений;
2. Первичное сравнение и сопоставление двух больших изображений путем совмещения их бинарных представлений;
3. Фрагментация полученных на первом этапе изображений и их сопоставление, базирующееся на применении аппарата яркостного сопоставления;
4. Оценка качества совмещения отдельных соответствующих фрагментов эталона и сравниваемого изображения с последующим выявлением фрагментов, содержащих объем отличий выше порогового;
5. Вывод изображений наиболее различных фрагментов для дальнейшего экспертного исследования.

На этапе подготовки производится первичная обработка изображений, заключающаяся в нахождении границ фрагмента, фиксирующего исследуемый объект, в случае наличия в области исследования фрагментов иных объектов осуществляется перенос требуемого фрагмента с частичным окружением в область для сравнения (отдельную область памяти), заливка всех изображений, не относящихся к исследуемому объекту.

После подготовки генерируется два изображения объекта, содержащие отклонения в положении относительно друг друга.

К изображениям, полученным на первом этапе, диктуется ряд требований, в частности к сопоставимости размеров объектов, фиксируемых на изображении, ограничению угла относительного смещения между ними.

На втором этапе производится грубое совмещение изображений эталонного и сравниваемого объектов. Данный этап включает геометрическое выравнивание и первичное совмещение изображений.

Концепция геометрического выравнивания направлена на уменьшение различий в положении исследуемого и эталонного объектов.

Все операции на втором этапе осуществляются над бинарными представлениями изображений, формируемыми с использованием выражений:

$$Y'_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } Y_{ij} > \gamma; \\ 0, & \text{если } Y_{ij} \leq \gamma, \end{cases}$$

где Y'_{ij} – значение яркости пикселя отображения с координатами i и j ,

Y_{ij} – значение яркости пикселя исходного изображения,

γ – значение порога оценки.

Возможность использования подобного механизма достигается одной из особенностей рентгенографического изображения печатных плат, а именно большой контрастностью исследуемого объекта относительно фона изображения, за счет чего возможно выделение его контура при низких значениях порога оценки γ , независимо от разницы яркости элементов эталона и сравниваемого изображения.

Далее проводится сравнение двух бинарных изображений с вычислением коэффициента совпадения:

$$D = \sum_{x=1}^{K_x} \sum_{y=1}^{K_y} (A_{xy} - B_{xy})^2, \quad (1)$$

где A_{ij} – значение яркости пикселя эталонного изображения с координатами x и y ,

B_{ij} – значение яркости пикселя сравниваемого изображения с координатами x и y [4].

После вычисления разности яркостей производится сопоставление изображений одно относительно другого путем итерационного смещения сравниваемого изображения относительно эталонного.

Процесс совмещения на данном этапе может быть представлен в форме создания множества копий исходного изображения, подвергнутых различным аффинным искажениям (смещение, растяжение, поворот), после чего для каждой из данных копий создается бинарное отображение. Для каждого полученного отображения по выражению (1) вычисляется коэффициент совпадения с эталоном. Среди массива коэффициентов совпадения выбирается наименьший, соответствующая копия исходного изображения считается наилучшей, а все остальные – отбрасываются [5, 6].

По причине ограниченности в современных вычислительных машинах объемов памяти, необходимых для сохранения массива преобразованных копий, и значительного размера исследуемых изображений, предлагается применять итерационный процесс совмещения, на каждом этапе которого производится создание только ограниченного числа искаженных копий, зависящего от параметров системы и размеров изображения. В случае если у одной из вновь полученных копий коэффициент совмещения меньше полученного ранее, предыдущее изображение заменяется на копию и операция повторяется до полной минимизации разностей яркости изображений.

Яростное совмещение крупных изображений дает большую погрешность, что вызвано большим числом элементов изображения и их весовых характеристик. Кроме того, подобные вычисления требуют крайне высоких затрат вычислительной мощности из-за необходимости обработки больших массивов данных, что в свою очередь приводит к росту времени обработки.

С целью повышения точности совмещения и быстродействия системы на последующих этапах операции производятся над отдельными фрагментами соответствующих изображений. Для достижения максимального совпадения изображений предлагается применять механизм яркостного сопоставления фрагментов изображений, аналогичный применяемому на втором этапе, за исключением того, что вычисление коэффициента (1) совпадения производится относительно самих изображений, а не их бинарных отображений.

Полученное в результате работы алгоритма изображение подвергается количественному оцениванию на подобие, с использованием различных метрик. В целом, для оценивания может использоваться метрика (1), однако подобный подход не позволяет учитывать несоответствия, вносимые разностью средних яркостей эталонного и сравниваемого изображений. Для нивелирования негативного влияния возможно применение различных метрик, учитывающих подобные несоответствия, в частности метрики «хи-квадрат»:

$$D_{x_i} = \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^D \frac{(A_{ij} - B_{ij})^2}{A_{ij} + B_{ij}}. \quad (2)$$

По завершении вычисления количественных оценок совпадения возможна дальнейшая их интерпретация, при этом могут использоваться как жесткие модели с одним порогом, определяющим присутствие и отсутствие дефекта на изображении, так и мягкие модели с градацией подобия, позволяющие оценить степень влияния дефекта и снизить степень зависимости получаемого результата от выбранного порога оценивания [7–10].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В ходе исследования процессов работы описанного алгоритма установлено, что на этапе первичного сравнения и сопоставления изображений требуется большой объем ресурсов оперативной памяти. Это обусловлено необходимостью непрерывного хранения в ней нескольких копий изображения, а также их бинарных отображений. Особенно подобная тенденция выражена при обработке больших изображений. Одним из решений, позволяющих сократить объем требуемой памяти, является вычисление требуемого смещения с использованием уменьшенных копий изображений. Полученное в результате смещение применяется к исходному изображению с масштабирующим коэффициентом.

В то же время подавляющая часть времени обработки изображений затрачивается на этапе яркостного сопоставления. Это может быть объяснено большим объемом операций попиксельного сложения и умножения (возведение в степень) при расчете коэффициента (1).

В целях оптимизации процедуры сопоставления произведено ее моделирование с изменением параметров, влияющих на качество и точность сопоставления: размер сопоставляемого фрагмента D , число итераций смещения N для каждого фрагмента и величина шага смещения L .

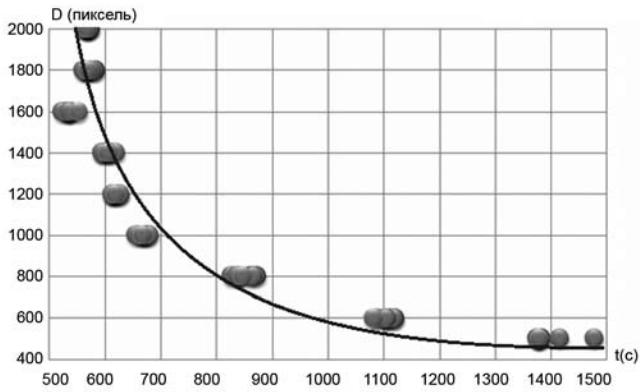


Рис. 1. Зависимость времени обработки t от размера исследуемого фрагмента D

Зависимость времени обработки от размера исследуемого фрагмента представлена на рисунке 1. Исследование проводилось при постоянных значениях числа итераций смещения $N = 10$ и величины шага смещения $L = 10$.

Как видно из рисунка 1, время обработки возрастает при уменьшении размера фрагмента. При этом необходимо отметить, что время обработки каждого фрагмента снижается (уменьшается число операций сложения для фрагмента), но при этом время обработки изображения в целом возрастает из-за увеличения числа фрагментов.

При экспертном анализе полученных в результате сопоставленных изображений установлено, что при уменьшении размеров фрагментов, вплоть до определенного порога, происходит более качественное сопоставление изображений.

Зависимости времени обработки t и качества сопоставления χ^2 от числа итераций смещения N представлены на рисунке 2. Исследование проводилось при постоянных значениях размера сопоставляемого фрагмента $D = 800$ и величины шага смещения $L = 10$.

Как видно из рисунка 2, при увеличении числа итераций смещения время обработки возрастает по закону, схожему с логарифмическим. При этом при увеличении числа итераций наблюдается скачкообразное увеличение качества совмещения, которое сохраняется с его ростом. Подобное поведение обусловлено достижением границы с наибольшим совпадением, и все дальнейшие итерации смещения не дают вклада к приросту точности.

Из этого можно сделать вывод, что при обработке возможно поэтапное увеличение числа итераций обработки, до тех пор пока оценки схожести не станут постоянными.

Зависимости времени обработки t и качества сопоставления χ^2 от величины шага смещения L представлены на рисунке 3. Исследование проводилось при постоянных значениях размера сопоставляемого фрагмента $D = 800$ и числа итераций смещения $N = 10$.

Как видно из рисунка 3, время обработки мало зависит от величины шага смещения. При этом при увеличении величины шага наблюдается рост средней оценки совпадения, что указывает на ухудшение сопоставления. В то же время при минимальном значении размера шага наблюдается ухудшение качества совмещения. Это обусловлено тем, что при малом размере и небольшом числе итераций смещения не происходит перекрывание первичного смещения.

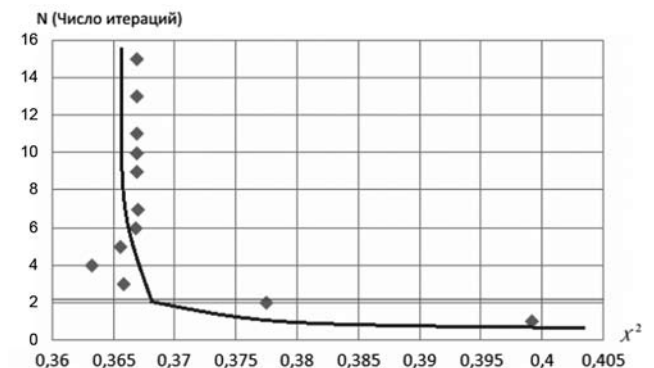
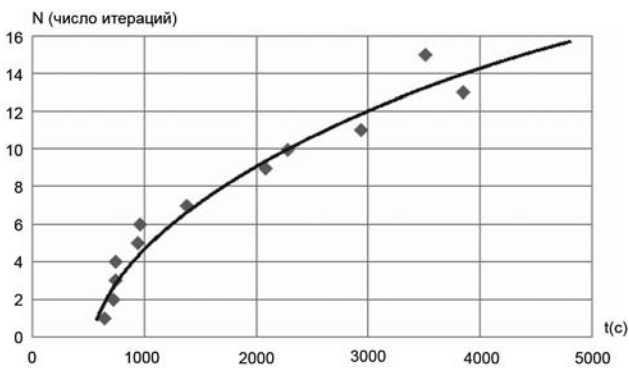


Рис. 2. Зависимости времени обработки t (слева) и качества сопоставления χ^2 (справа) от числа итераций смещения N

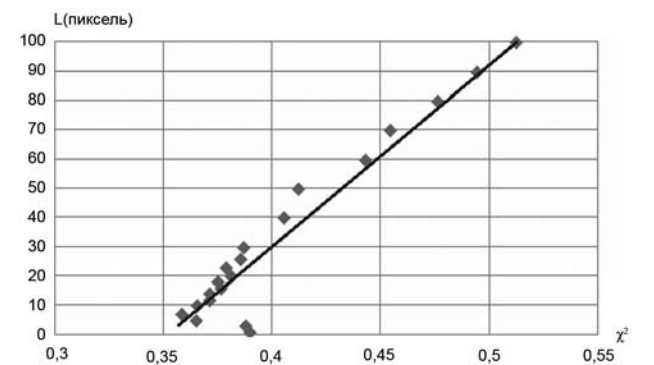
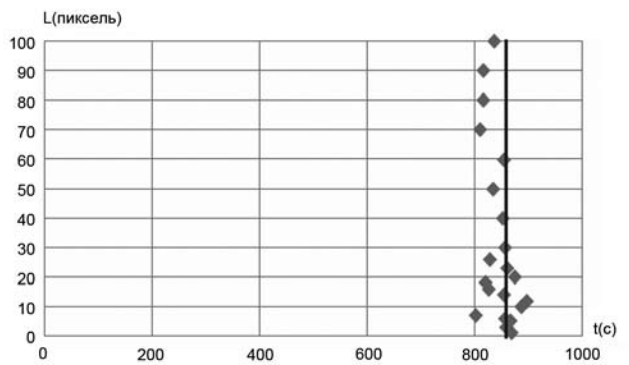


Рис. 3. Зависимости времени обработки t (слева) и качества сопоставления χ^2 (справа) от величины шага смещения L

Из этого можно сделать вывод, что при обработке желательнее использовать минимальный размер шага при изменяемом числе итераций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен новый алгоритм сопоставления изображений рентгенограмм печатных плат, базирующийся на основе яркостного сопоставления. Показаны особенности работы алгоритма, позволяющие повысить быстродействие работы алгоритма и качество совмещения.

Предложенный алгоритм пригоден для гибкой настройки разработчиком или оператором (экспертом) в зависимости от задачи, поставленной при использовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Покровский И. Анализ российского рынка печатных плат 2015 // Компоненты и технологии. – 2015. – № 9 (170). – С. 6–7
2. Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // ICCV '11 Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision. 2011. pp. 2564–2571.
3. Овчинников А. Концепция построения бюджетных систем оптической инспекции качества монтажа печатных плат // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – № 8 (36). – С. 41–44.
4. Бондаренко М.А. Алгоритм совмещения сенсорной и синтезированной видеоинформации в авиационной системе комбинированного видения // Кибернетика и программирование. – 2016. – № 1. – С. 236–257.
5. Ковалев В.А. Анализ текстуры трехмерных медицинских изображений. – Минск : Белорус. наука, 2007. – 263 с.
6. Jiaya Jia, Chi-Keung Tang. Image Registration with Global and Local Luminance Alignment. // ICCV '03 Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision. 2003. Vol. 2. – P. 156.
7. Климов Р.В., Солодовникова Д.Н. Методы формирования индексов мягких решений символов на основе модификации параметров канала со стираниями // Радиотехника. – 2014. – № 11. – С. 90–93.
8. Гладких А.А., Климов Р.В., Чилихин Н.Ю. Методы эффективного декодирования избыточных кодов и их современные приложения. – Ульяновск : УлГТУ, 2016. – 258 с.
9. Гладких А.А., Климов Р.В. Численное моделирование обобщенной процедуры формирования индексов мягких решений // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – Т. 12, № 2. – С. 22–28.
10. Гладких А.А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 379 с.

REFERENCES

1. Pokrovskii I. Analiz rossiiskogo rynka pechatnykh plat 2015 [Analysis of Russian PCB-Market 2015]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies]. 2015, no. 9 (170), pp. 6–7.
2. Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski. ORB: An Efficient Alternative to SIFT or SURF. *ICCV '11 Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision*. pp. 2564–2571.
3. Ovchinnikov A. Kontseptsiiia postroeniia biudzhetykh sistem opticheskoi inspektsii kachestva montazha pechatnykh plat [Design Concept of Budgetary Optical Inspection Systems for Quality Monitoring of PCB Mounting Processes]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti* [Technologies in Electronic Industry], 2009, no. 8 (36), pp. 41–44.
4. Bondarenko M.A. Algoritm sovmeshcheniia sensornoi i sintezirovannoi videoinformatsii v aviatsionnoi sisteme kombinirovannogo videniia [Algorithm for Combining Sensory and Synthesizes Video Information in the Aviation System of Combined Vision]. *Kibernetika i programmirovaniie* [Cybernetics and Programming], 2016, no. 1, pp. 236–257.
5. Kovalev V.A. *Analiz tekstury trekhmernykh meditsinskikh izobrazhenii* [Analysis of 3D Medical Image Texture]. Minsk, Belarus. nauka Publ., 2007. 263 p.
6. Jiaya Jia, Chi-Keung Tang. Image Registration with Global and Local Luminance Alignment. *ICCV '03 Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*. 2003, vol. 2, p. 156.
7. Klimov R.V., Solodovnikova D.N. Metody formirovaniia indeksov miagkikh reshenii simvolov na osnove modifikatsii parametrov kanala so stiraniiami [Model of Soft Decisions Based on Ensure Channel Parameters Modification]. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2014, no. 11, pp. 90–93.
8. Gladkikh A.A., Klimov R.V., Chilikhin N.Iu. *Metody effektivnogo dekodirovaniia izbytochnykh kodov i ikh sovremennye prilozheniia* [Methods of the Effective Decoding of Redundant Codes and the Its Modern Applications]. Ulyanovsk, USTU Publ., 2016. 258 p.
9. Gladkikh A.A., Klimov R.V. Chislennoe modelirovaniie obobshchenoi protsedury formirovaniia indeksov miagkikh reshenii [Numerical Simulation of the Generalized Procedure of Formation of Indices of Soft Decisions]. *Infokommunikatsionnye tekhnologii* [Information and Communication Technologies], 2013, vol. 12, no. 2, 2013, pp. 22–28.
10. Gladkikh A.A. *Osnovy teorii miagkogo dekodirovaniia izbytochnykh kodov v stiraushchem kanale svyazi* [Fundamentals of the Theory of Soft Decoding of Redundant Codes in the Erasure Communication Cannel]. Ulyanovsk, USTU Publ., 2010. 379 p.