



کاربرد پرتونگاری صنعتی در عیب‌یابی و تشخیص ساختار بردهای مدار چاپی با روش وردش اصلاح شده

امیر موافقی^{۱*}، مهدی میرزاپور^۲، عفت یاحقی^۳، بهروز رکرک^۴، کوثر نومیدی پیرپشته^۳، بهنام آرزایک^۵
۱. مرکز مهندسی مواد، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران- ایران
۲. گروه ریاضی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، صندوق پستی: ۶۵۱۷۸-۳۸۶۹۵، همدان - ایران
۳. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، صندوق پستی: ۳۴۱۴۸-۹۶۸۱۸، قزوین- ایران
۴. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران
۵. مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

*Email: amovafeghi@aeoi.org.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۷/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

چکیده

پرتونگاری بردهای الکترونیکی برای شناسایی مدارات، نحوه اتصالات و خرابی آن‌ها و همچنین ساخت مجدد کاربرد زیادی در مهندسی الکترونیک دارد. در این روش با عبور پرتو ایکس از بردهای یک یا چندلایه نحوه اتصالات آن‌ها و چگونگی چینش قطعات و لایه‌های درونی مشخص می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به علت پراکندگی پرتو ایکس و ضخامت کم اتصالات مسی روی بردها و ابعاد کوچک اجزای الکترونیکی در پرتونگاره‌ها مات شدگی وجود دارد. در این تحقیق برای بالا بردن کنتراست از روش تغییرات کامل اصلاح شده (MTV) با گرادیان متناوب که یک روش تکراری بر اساس تغییرات گرادیان در تغییرات کامل است استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد با اجرای الگوریتم MTV روی پرتونگاره‌های بردهای مختلف کنتراست افزایش یافته و علاوه بر مشخص تر شدن اتصالات مسی، اجزای داخلی قطعات الکترونیکی نیز واضح تر شده‌اند. از نظر متخصصین حدود ۲۰ تا ۴۰٪ بهبود کنتراست در تصاویر بازسازی شده دیده می‌شود. این اطلاعات می‌تواند در شناسایی و تعمیر و یا ساخت بردها در مهندسی معکوس استفاده شود.

کلیدواژه‌ها: پرتونگاری صنعتی، مهندسی معکوس، برد الکترونیکی، روش تغییرات کامل اصلاح شده، پردازش تصویر

The use of industrial radiography in troubleshooting and diagnosing of printed circuit boards structure by the Modified Total Variation method

A. Movafeghi^{1*}, M. Mirzapour², E. Yahaghi³, B. Rokrok⁴, K. Nomidi-Porposhteh³, B. Arezabak⁵

1. Leading Materials Organization, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.BOX: 14395-836, Tehran-Iran
2. Department of Mathematics, Faculty of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, P.O.Box: 65178-38695, Hamedan - Iran
3. Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Imam Khomeini International University, P.O.BOX: 34148-96818, Qazvin - Iran
4. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran
5. Iran Nuclear Regulatory Authority, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

Research Article

Received 15.10.2022, Accepted 8.1.2023

Abstract

A large number of printed board circuits (PCBs) are analyzed by X-ray imaging in reverse engineering for the purpose of identifying their connections, their damage, and how they are linked together. Using this method, an X-ray is passed through single or multi-layer boards in order to determine how they are connected and how the parts are arranged. According to the findings, there is fogging in the radiographs due to X-ray scattering and the thinness of copper connections on the boards as well as the small sizes of electronic components. This research employs the Modified Total Variation method (MTV) with alternating gradient, which is an iterative method based on gradient changes in Total Variation, to increase contrast. Based on the results of the implementation of the MTV algorithm on radiographs of various ranges, the contrast has increased, and besides the copper connections, the internal components of the electronic components have also become clearer. Reconstructed images show a contrast improvement of approximately 20 to 40%, according to experts. Using this information, it is possible to repair or build boards in reverse engineering.

Keywords: Industrial radiography, Reverse engineering, Printed circuit board, Modified total variation method, Image Processing



۱. مقدمه

بردهای الکترونیکی مجموعه‌ای از قطعات و اجزای الکترونیکی نظیر آی سی، خازن و مقاومت است که بر روی یک برد سوار شده و کاربرد خاصی مانند کنترل سیستم و تقویت‌کنندگی و ... دارند و در صنایع مختلف از قبیل صنایع الکترونیکی، صنایع سنگین، خودروسازی و لوازم خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساخت مدارهایی با بُرد مدار چاپی نسبت به سیم‌بندی مستقیم ارزان‌تر و سریع‌تر است و خطاهای سیم‌کشی اپراتور هم در این روش حذف می‌شود. بردها در مباحث الکترونیکی با عنوان فیبر مدارهای چاپی^۱ PCB شناخته می‌شود که با رنگ‌های سبز، نارنجی و آبی در بازار موجود هستند. این بردها بر اساس ساختار و نوع کاربرد می‌توانند تک لایه (یک‌رو)، دولایه (دورو) و چند لایه^۲ در صنایع مختلف مورد ساخته شوند [۱]. برد یک‌رو برای طراحی و تولید وسایل برقی و الکتریکی ساده کاربرد فراوانی دارد. هم‌چنین، این نوع فیبرهای خام از متریال مختلفی مانند فایبرگلاس و آلومینیم طراحی و تولید می‌شوند. در فیبر مدار چاپی یک لایه، کلیه قطعات و متعلقات الکتریکی در یک طرف PCB سوار می‌شوند. در بردهای دولایه، لایه نازک مسی در هر دو طرف فیبر به چشم می‌خورد و برخلاف بردهای یک لایه قابلیت مونتاژ قطعات الکترونیکی در هر دو طرف برد وجود دارد. در ساختار مدار چاپی چند لایه بیش‌تر از دولایه مس وجود دارد. اتصال لایه‌های رسانا به یک‌دیگر در برد الکترونیکی چندلایه از طریق سوراخ‌های موجود بر روی برد انجام می‌گیرد. این مدل از انواع برد الکترونیکی به لحاظ بر خورداری از پیچیدگی‌های زیاد و قیمت بالاتر، در لوازم الکترونیکی پیشرفته به کار می‌رود [۱].

برای عیب‌یابی بردها روش‌های متعدد غیرمخرب وجود دارد. لو و همکارانش با استفاده از ترموگرافی و روش پردازش تصویر بر مبنای متوسط‌گیری حباب‌های لحیم‌ها [۲] را بررسی کرده‌اند. لیو و همکارانش با استفاده از روش‌های ارتعاشی [۳] و لیزر صوتی [۴] خرابی‌های موجود در لحیم‌کاری را بررسی کرده‌اند. هانگ و همکاران روش‌های بینایی ماشین را برای عیب‌یابی در بردهای الکترونیکی و مدارات مجتمع^۳ IC [۵] توسعه داده‌اند. به‌طور کلی روش‌های عیب‌یابی برد باید غیرمخرب باشد و آسیب ثانویه به برد وارد نشود [۶-۷]. فو و همکارانش از روش توموگرافی کامپیوتری برای ارزیابی و بررسی چگونگی ساخت بردها استفاده کرده‌اند [۸] و در حال حاضر

روش پرتونگاری نیز یکی از روش‌های مرسوم برای عیب‌یابی بردهای الکترونیکی است [۹-۱۱]. روش‌های پردازش تصویر مانند شبکه عصبی و مشتقات آن و تصاویر دو بعدی و سه بعدی که اطلاعات مختلفی را در مورد بردهای الکترونیکی می‌دهند در این حیطه کاربردهای زیادی دارند [۱۲-۱۳].

در بسیاری از موارد در تجهیزات الکترونیکی نیاز به ساخت یک برد مشابه و عیب‌یابی یک برد مورد نظر است که طرح و نقشه آن به دلایل قدیمی بودن دستگاه و یا انحصاری بودن دستگاه موجود نمی‌باشد در این حالت می‌توان با مهندسی معکوس به اطلاعاتی در مورد مدار دست پیدا کرد و یک دستگاه، قطعه یا محصول از روی نمونه مشابه ساخت. باید دقت شود که که استفاده از این روش تنها در موارد خاص مانند صنایع نظامی و صنایع سنگین توجیه اقتصادی دارد. برای به‌دست آوردن اطلاعات برد می‌توان از نرم‌افزارهای مخصوص استخراج اطلاعات و پرتونگاری استفاده کرد. این نرم‌افزارها، به کاربران کمک می‌کند که مدل سه بعدی قطعات را به صورت مجزا یا در یک اسمبلی مشاهده کنند و قبل از شروع فرایند ساخت، بتوانند ایرادها و اشکالات احتمالی را رفع کنند. با توجه به ورودی و خروجی‌های سیستم می‌توان اطلاعات لازم برای ساخت مدل سه بعدی را به‌دست آورد [۶]. پرتونگاری قابلیت خوبی برای نحوه شناخت اتصالات اجزای مدار به ما می‌دهد [۲]. هم‌چنین با این روش اطلاعاتی در مورد عیب‌یابی مانند لحیم‌کاری پل‌ها، قطعی سیم، اتصالات کوتاه، فقدان لحیم‌کاری در اتصالات، ترک خوردگی، و در بعضی موارد خرابی داخل قطعه قابل حصول هستند [۳].

در پرتونگاری از یک تیوب اشعه ایکس استفاده می‌شود که پرتوهای فوتونی آن از جسم عبور کرده و بر روی آشکارساز که می‌تواند فیلم و یا صفحات فسفری و یا آشکارسازهای دیجیتال باشد ظاهر می‌شود. ضخامت و ضریب تضعیف مواد باعث تضعیف اشعه ایکس شده و مقدار پرتو ایکس روی آشکارساز را تغییر می‌دهد و باعث می‌شوند نقاطی در فیلم تاریک‌تر یا روشن‌تر دیده شوند [۸]. در پرتونگاری به‌صورت ذاتی پراکندگی پرتو ایکس وجود دارد. به منظور کاهش پراکندگی که باعث مات شدگی تصویر می‌شود از صافی‌های خاصی کاربرد دارند که می‌توانند تا حدی نویز سیستم را کم کنند. ولی به‌خاطر پراکندگی ایکس، عملیات ظهور و ثبوت در پرتونگاری سنتی که با فیلم انجام می‌شود و نویزهای الکترونیکی در سیستم‌های دیجیتال تصاویر پرتونگاری غالباً مات‌شدگی و تباين یا کنتراست کمی دارند [۱۴-۱۵]. کم کردن انرژی می‌تواند کنتراست

1. Printed Circuit Board
2. Multi- Layer PCB
3. Integrated Circuit



۲.۲ الگوریتم تغییرات کلی اصلاح شده (MTV) با گرادینان متناوب در این مقاله به منظور بهبود کیفیت تصاویر بردهای الکترونیکی و افزایش تباین آن‌ها از استراتژی حذف پس‌زمینه مبتنی بر یک مدل وردش تعمیم‌یافته بهره می‌گیریم. برای این منظور ابتدا یک مدل نویززدایی که شامل تابع تغییرات کلی تعمیم‌یافته است را حل نموده و سپس جواب حاصل را از تصویر داده شده تفریق نموده تا تصویر با کیفیت حاصل شود. ابتدا با تعریف تابع TV و نسخه تعمیم‌یافته آن شروع می‌کنیم. فرض کنیم $x \in \mathbb{R}^{N_1 \times N_2}$ یک تصویر دلخواه باشد. تابع TV برای اولین بار توسط رودین، اوشر و فاطمی برای کاهش نویز و بهبود کیفیت تصاویر پیشنهاد شد [۱۹]. حالت گسسته تابع TV به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$TV(x) = \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} \sqrt{(x[n_1+1, n_2] - x[n_1, n_2])^2 + (x[n_1, n_2+1] - x[n_1, n_2])^2} \quad (1)$$

تابع TV (۱) در کنار قابلیت کاهش نویز و افزایش وضوح لبه‌ها در تصویر، در شناسایی و حفظ خطوط و لبه‌های اریب (مایل) ضعف داشته و باعث بلوره شدن این خطوط می‌شود. همچنین در صورت چرخش تصویر در زاویه‌های دلخواه، لزوماً مقدار TV ثابت باقی نخواهد ماند. علاوه بر این مقدار عددی پیکسل‌های ایزوله به صورت معناداری کمتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شوند. برای غلبه بر این کاستی‌ها، نسخه‌های مختلفی از تابع TV پیشنهاد شده است، به طور مثال [۱۴-۱۶] را ببینید. در این مقاله، مشابه با [۱۶] یک نسخه اصلاح شده از TV، که از این پس با MTV نمایش می‌دهیم، را بازتعریف می‌کنیم. برای این منظور نیاز به تعریف برخی از نمادها داریم. فرض کنید $Dx \in (\mathbb{R}^2)^{N_1 \times N_2}$ بیانگر عملگر تفاضل متنهای بوده و به صورت زیر تعریف شود:

$$(Dx)_1[n_1, n_2] = x[n_1+1, n_2] - x[n_1, n_2] \quad (2)$$

$$(Dx)_2[n_1, n_2] = x[n_1, n_2+1] - x[n_1, n_2] \quad (3)$$

همچنین فرض کنید نمادهای L_1, L_2, L_3 و L_4 بیانگر عملگرهای درون‌یابی دوخطی بوده که بر روی درایه‌های دوگان تصویر x یعنی زوج تصویر $u = (u_1, u_2)$ ، به صورت رابطه ۴ عمل می‌کنند:

راديوگرافي را بالا ببرد ولی کاهش فوتون‌ها در آشکارساز را به دنبال خواهد داشت. بنابراین انتخاب انرژی راديوگرافي باید بهینه گردد تا نویز ناشی از کاهش فوتون‌ها اتفاق نیفتد. علاوه بر آن برای افزایش تباین روش‌های پردازش تصویر کاربرد دارند که در حوزه‌های مکان و زمان به کار می‌روند. یکی از روش‌های مهم روش تغییرات کلی (TV) است که برای حداقل کردن آن از روش‌های مختلف نورم ۱ و ۲ استفاده شده است [۱۶-۱۸].

در این تحقیق ساختار داخلی و عیوب احتمالی بردهای مختلف تلفن همراه و بردهای الکترونیکی با پرتونگاری بررسی شده است. در این تحقیق از یک اصلاح روش تغییرات کلی استفاده شده تا تباین (کنتراست) پرتونگاره‌ها بهبود یابد و ساختار بردها جهت استخراج اطلاعات برای مهندسی معکوس و شناسایی عیوب احتمالی بهتر انجام شود.

۲. روش کار

۱.۲ پرتونگاری

برای پرتونگاری بردهای الکترونیکی، از یک تمولد اشعه ایکس صنعتی با انرژی حداکثر ۳۰۰ kV و ابعاد کانونی 3 mm^2 استفاده شده است. مقدار ولتاژ در این آزمایش (انرژی) دستگاه پرتونگاری تا حداکثر ۱۴۰ kV تنظیم شده و از سیستم CR برای ثبت پرتوهای عبوری استفاده شده است. جریان ۲ تا ۴ میلی آمپر و زمان پرتودهی ۱ تا ۳ دقیقه بوده است و فاصله منبع از برد ۸۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. از یک صفحه سربی به ضخامت ۳ میلی‌متر برای کم کردن اثر پس پراکندگی پرتوها در زیر بردهای تحت آزمایش استفاده شده است. در تمام آزمون‌های پرتونگاری از استانداردهای EN-۱۲۶۸۱-۲ و ISO-۱۷۶۳۶-۲ برای تکرارپذیری آزمایشات استفاده شده است [۱۹-۲۰].

در این تحقیق ۴ برد الکترونیکی یک لایه مربوط به یک کامپیوتر و یک سیستم مبدل و چند لایه یک موبایل پرتونگاری شده است. مشخصات پرتونگاری در جدول ۱ آورده شده است. انتخاب بردها بر اساس پیچیدگی و کاربرد خاص آن‌ها صورت گرفته است.

جدول ۱. مشخصات پرتونگاری بردهای مدار چاپی

نام اثر	ولتاژ (کیلوولت)	جریان (میلی ولت)	زمان (دقیقه)
برد ۱ تک لایه	۹۰	۲	۳
برد ۲ تک لایه	۱۴۰	۴	۱
برد ۳ تک لایه	۱۴۰	۴	۲
تلفن همراه برد چندلایه	۱۴۰	۲	۴



$$(\text{Prox}_{aG}(v))_c[n_1, n_2] = v_c[n_1, n_2] - \frac{v_c[n_1, n_2]}{\max(\frac{|vc[m_1, n_2]|}{a\lambda}, 1)}, \quad \forall C \in \{\downarrow, \leftrightarrow, \bullet\}. \quad (8)$$

بنابراین، با قراردادن $CV = -(L_{\downarrow}^* v_{\downarrow} + L_{\leftrightarrow}^* v_{\leftrightarrow} + L_{\bullet}^* v_{\bullet})$ انتخاب پارامترهای $0 < \tau < 1/8$ ، $0 < \gamma < 1/3$ و $\mu > 0$ و تخمین بردارهای شروع $x^{(0)}$ و $v^{(0)}$ و $u^{(0)}$ برای $i = 0, 1, 2, \dots$ تکرارهای الگوریتم تقریب گرادیان متناوب برای حل مسأله (۶) به صورت زیر است:

$$\begin{cases} x^{(i+1)} := \text{prox}_{\mu F}(x^{(i)} - \tau D^*(Dx^{(i)} + Cv^{(i)} + \mu u^{(i)})), \\ v^{(i+1)} := \text{prox}_{\gamma G}(\tau C^*(Dx^{(i+1)} + Cv^{(i)} + \mu u^{(i)})), \\ u^{(i+1)} := u^{(i)} + \frac{Dx^{(i+1)} + Cv^{(i+1)}}{\mu}. \end{cases} \quad (9)$$

نشان داده شده است که تکرارهای $x^{(i)}$ در نهایت به جواب \bar{x} همگرا می‌شوند [۲۲-۲۳]. حال با تفریق تصویر پس‌زمینه \bar{x} از تصویر داده شده y ، تصویر باکیفیت و با تباین بالاتر \hat{x} به دست می‌آید، در واقع خواهیم داشت:

$$\hat{x} = y - \bar{x}. \quad (10)$$

در فصل بعد نتایج اجرای الگوریتم حذف پس‌زمینه مبتنی بر MTV را از جنبه‌های مختلف بررسی و گزارش می‌کنیم.

۳. نتایج

در این تحقیق برای شناسایی مدارات چاپی و اجزای بردها به منظور استخراج اطلاعات برای مهندسی معکوس از پرتونگاری استفاده شده است. با توجه به تباین کم تصاویر از روش MTV استفاده شده است. ابتدا تصاویر پرتونگاری مطابق بخش ۱.۲ تهیه شده و سپس با برنامه‌ی نوشته شده در نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۱۸ بارگذاری و با الگوریتم مورد نظر پردازش شده‌اند در شکل ۱ تصویر یک برد الکترونیکی تک لایه که شامل ICهای مختلف است نشان داده شده است. پایه‌های ICها و قسمت نیمه‌هادی و نحوه اتصالات پایه‌ها در پرتونگاره مشهود است. برای پردازش پرتونگاره‌ها با توجه به مرجع [۳]، μ ، λ و τ به ترتیب ۰.۱۵، ۱ و ۰.۱۶ در نظر گرفته شده و تعداد تکرار ۱۰۰۰ بوده است. شکل ۱ ب که پردازش شده شکل ۱ الف است علاوه بر اتصالات سیم‌های مسی که در پرتونگاره اصلی به‌سختی دیده می‌شوند نقاط لحیم‌کاری روی سوراخ‌ها (نشانه‌گر ۱)، ناحیه نیمه‌هادی داخل ICها و اتصالات فلزی آنها (نشانه‌گر ۲ و ۳)، و داخل مقاومت‌ها (نشانه‌گر ۵) مشخص هستند. اطلاعات به‌دست آمده به‌خصوص در نحوه اتصالات پایه‌ها برای پیاده‌سازی مدار جهت مهندسی معکوس مفید است.

$$\left\{ \begin{aligned} (L_{\downarrow} u)_\downarrow[n_1, n_2] &= u_\downarrow[n_1, n_2], \\ (L_{\downarrow} u)_\uparrow[n_1, n_2] &= (u_\uparrow[n_1, n_2] + u_\uparrow[n_1, n_2 - 1] + u_\uparrow[n_1 + 1, n_2] + u_\uparrow[n_1 + 1, n_2 - 1]) / 4, \\ (L_{\leftrightarrow} u)_\downarrow[n_1, n_2] &= (u_\downarrow[n_1, n_2] + u_\downarrow[n_1 - 1, n_2] + u_\downarrow[n_1, n_2 + 1] + u_\downarrow[n_1 - 1, n_2 + 1]) / 4, \\ (L_{\leftrightarrow} u)_\uparrow[n_1, n_2] &= u_\uparrow[n_1, n_2], \\ (L u)_\downarrow[n_1, n_2] &= (u_\downarrow[n_1, n_2] + u_\downarrow[n_1 - 1, n_2]) / 2, \\ (L u)_\uparrow[n_1, n_2] &= (u_\uparrow[n_1, n_2] + u_\uparrow[n_1, n_2 - 1]) / 2. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

هم‌چنین فرض کنید "*" بیانگر عملگر الحاقی باشد. در این صورت MTV به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۱]:

$$MTV(x) = \min_{v_{\downarrow}, v_{\leftrightarrow}, v_{\uparrow} \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2}} \left\{ \|v_{\downarrow}\|_{1,2} + \|v_{\leftrightarrow}\|_{1,2} + \|v_{\uparrow}\|_{1,2} : L_{\downarrow}^* v_{\downarrow} + L_{\leftrightarrow}^* v_{\leftrightarrow} + L_{\uparrow}^* v_{\uparrow} = DX \right\} \quad (5)$$

که در آن فضاهای برداری v_{\downarrow} ، v_{\leftrightarrow} و v_{\uparrow} جواب (یا یکی از جواب‌های ممکن) مسأله (۵) بوده می‌باشند. باید توجه داشت که عناصر v_{\downarrow} ، v_{\leftrightarrow} و v_{\uparrow} بردارهایی در فضای \mathbb{R}^+ می‌باشند. هم‌چنین فضای جواب مسأله (۵) ناتهی است و می‌توان حداقل یک جواب برای آن یافت.

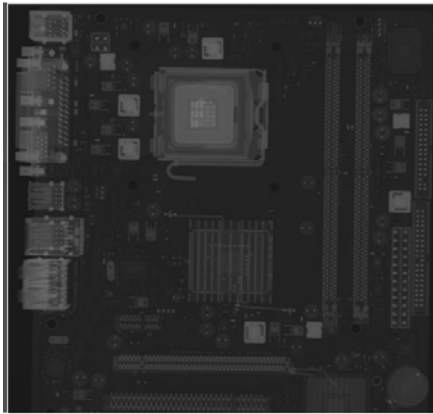
حال مسأله برای بهینه‌سازی زیر، که مبتنی بر MTV تعریف شده در (۵) می‌باشد، را در نظر می‌گیریم:

$$\bar{x} = \arg \min_{x \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2}} \left\{ \frac{1}{\gamma} \|x - y\| + \lambda MTV(x) \right\}. \quad (6)$$

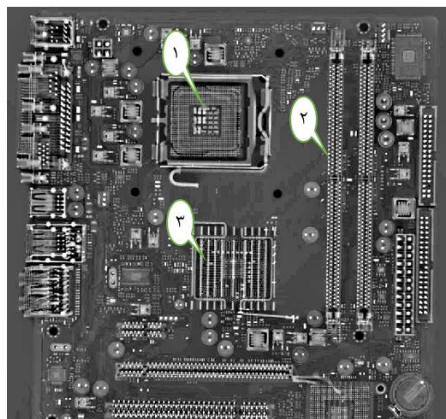
برای حل مسأله بهینه‌سازی غیرخطی (۶) روش‌های مختلفی وجود دارد اما روش تقریب گرادیان متناوب [۱۹] یک روش تکراری کارآمد برای حل مسأله (۶) می‌باشد. این روش مبتنی بر تقریب متناوب گرادیان‌های دو تابع $F(x) = \frac{1}{\gamma} \|x - y\|$ و $G(x) = \lambda MTV(y)$ می‌باشد. این تقریب‌ها برای پارامتر دلخواه $\alpha > 0$ و هر پیکسل دلخواه $[n_1, n_2]$ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\text{Prox}_{aF}(y) = \frac{(x + ay)}{1 + a}, \quad (7)$$

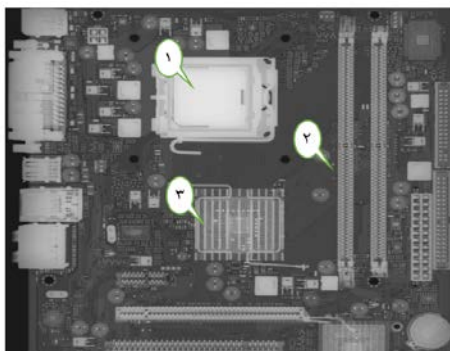




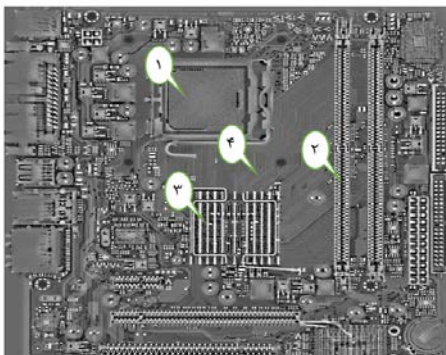
(الف)



(ب)

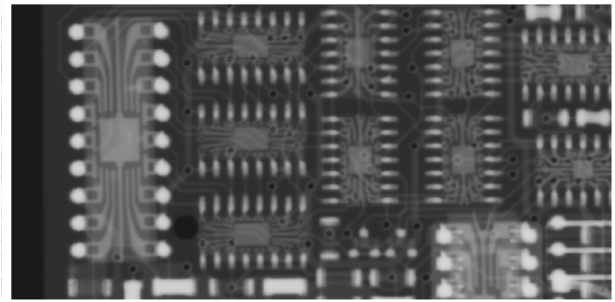


(ج)

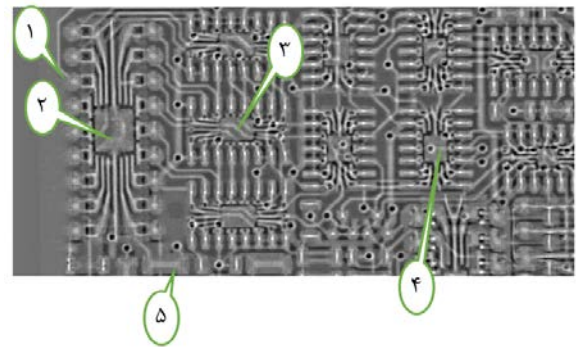


(د)

شکل ۲. الف) پرتونگاره برد اصلی کامپیوتر با ولتاژ ۱۴۰، ب) تصویر بازسازی شده آن، ج) پرتونگاره برد اصلی کامپیوتر با ولتاژ ۴۰، د) تصویر بازسازی شده آن.



(الف)



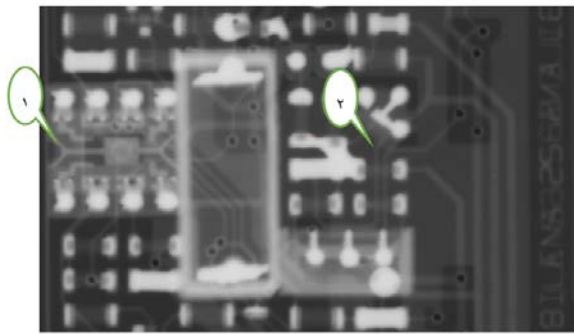
(ب)

شکل ۱. الف) پرتونگاره اصلی یک برد یکرفه شامل IC، ب- تصویر پردازش شده برد.

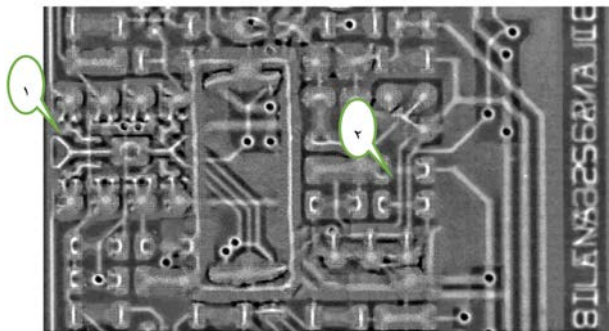
در شکل ۲ الف و ج پرتونگاره یک برد کامپیوتری با دو تنظیم مختلف پرتونگاری مطابق ردیف ۲ و ۳ در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. در دو شکل ۲ ب و د تصاویر بازسازی شده آن‌ها دیده می‌شوند. مقایسه تصاویر بازسازی شده با پرتونگاره‌های اصلی نشان می‌دهند که اجزای مدار مانند پردازشگر اصلی (نشانگر ۱)، اسلات‌های حافظه (نشانگر ۲)، پل‌های برد اصلی (نشانگر ۳) و سایر اجزای برد در شکل ۲ ب بهتر از شکل ۲ الف دیده می‌شوند.

در تصویر بازسازی شده شکل ۲ ب مشخصات داخل پردازشگر اصلی (نشانگر ۱) به خوبی دیده می‌شوند ولی در این تصویر اتصالات مسی روی برد اصلی به سختی قابل تشخیص هستند. در شکل ۲ د اگرچه مشخصات پردازشگر اصلی دیده نمی‌شود ولی اتصالات مسی روی برد (نشانگر ۴) مشخص هستند. پردازشگر اصلی شامل نیمه‌هادی با لایه پلاستیکی است که در داخل آن اتصالات فلزی برای ارسال سیگنال‌ها وجود دارد با زیاد شدن انرژی، پرتو ایکس بیشتر نفوذ کرده و اطلاعات داخل پردازشگر نشان داده می‌شود. سیم‌های مسی هرچند عدد اتمی مناسبی برای تضعیف پرتو ایکس دارند ولی به خاطر ضخامت کم در تصویر دیده نمی‌شوند. با کم شدن انرژی این لایه‌های مسی قابل مشاهده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به جنس و ضخامت اجزای تشکیل‌دهنده بردها گاهی استفاده از دو انرژی متفاوت می‌تواند اطلاعات مفیدی در جهت مهندسی معکوس در اختیار کاربر قرار دهد.



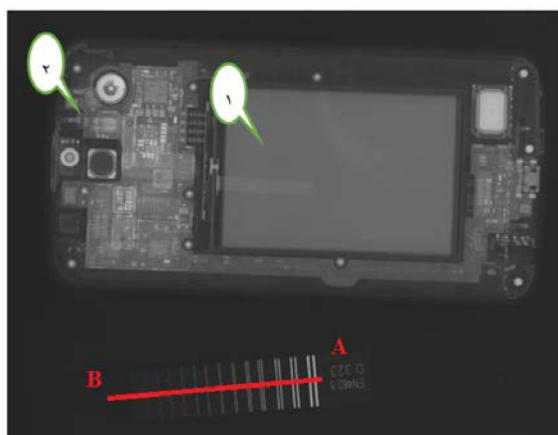


(الف)

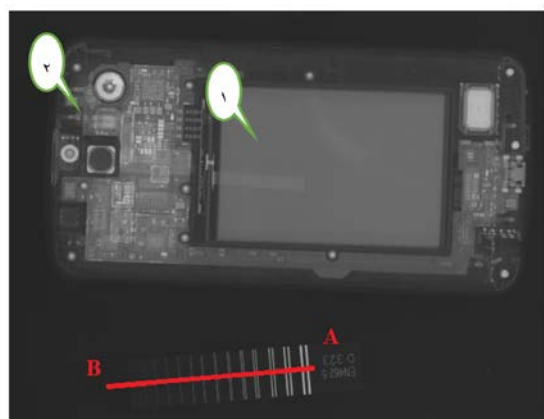


(ب)

شکل ۳. برد دولایه: الف) پرتونگاره اصلی ب) تصویر بازسازی آن.



(الف)



(ب)

شکل ۴. تلفن همراه، الف) پرتونگاره اصلی ب) تصویر بازسازی آن.

در شکل ۳ الف و ب پرتونگاره یک برد دولایه و تصویر بازسازی شده آن نشان داده شده است. اجزای داخلی IC و سیم‌های اتصالی آن در شکل به خوبی دیده می‌شوند (نشانگر ۱). همچنین مقاومت‌ها و سایر اجزای برد نیز به خوبی مشخص هستند، در تصویر بازسازی شده هم اتصالات لحیم‌کاری و پین‌های قطعات واضح‌تر دیده می‌شوند. بررسی شکل ۳ الف نشان می‌دهد که خطوط مسی در رو و پشت برد این خطوط وجود دارند (نشانگر ۲). خطوط مسی روی برد روشن‌تر از خطوط مسی پشت برد دیده می‌شوند. در تصویر بازسازی شده هر چند خطوط مسی واضح‌تر شده‌اند، ولی به دلیل افزایش کنتراست تشخیص این‌که کدام اتصال مربوط به روی و پشت برد، مشکل است. بنابراین هنگام کار با این الگوریتم لازم است که تصویر پرتونگاره اصلی و بازسازی شده هم‌زمان بررسی شوند تا اشتباهی صورت نگیرد.

در شکل ۴ الف پرتونگاره یک تلفن همراه نشان داده شده که اجزای داخلی آن مانند کنترل‌کننده‌های صفحه کریستال مایع^۱ LCD (نشانگر ۱) و میکروفن و بلندگو (نشانگر ۲) روی تصویر مشخص هستند. در تصویر بازسازی شده این اجزا مشخص‌تر هستند و ساختار آن‌ها بهتر قابل تشخیص است.

اجرای الگوریتم روش MTV برای یک تصویر با ابعاد ۸۲۰ در ۱۳۲۰ حدود ۲۴ ثانیه با یک پردازنده Core-i۹ و با ۱۶ GB حافظه حدود ۲۴ ثانیه طول می‌کشد. ولی با توجه به این‌که اطلاعات پردازشی به صورت مستقیم استفاده نمی‌شود و ترکیبی از اطلاعات استخراج شده از روش‌های مختلف نرم‌افزاری و پرتونگاری است، طولانی بودن زمان پردازش مشکلی در روند مهندسی معکوس به وجود نمی‌آورد.

برای بررسی تأثیر فیلتر بر کیفیت تصویر، تلفن همراه با یک DIQI^۲ که برای بررسی کیفیت پرتونگاره استفاده می‌شود، پرتونگاری شده است. در شکل ۵ خط پروفایل در دو مسیر DIQI نشان داده شده در شکل ۴ (AB) روی پرتونگاره اصلی و روی تصویر بازسازی شده (A₁B₁) رسم شده است. دیده می‌شود که خطوط دوتایی در پرتونگاره ۵ جفت خط و در تصویر بازسازی شده ۶ جفت خط قابل شناسایی هستند. در نقاط نشان داده با پیکان کاملاً مشخص است که جفت خط‌های ۵ و ۶ در تصویر بازسازی شده مشخص‌تر هستند. از آنجایی که قابلیت تشخیص خطوط جفت بیانگر کیفیت تصویر است، تصویر بازسازی شده کنتراست و قدرت تفکیک بهتری نسبت به پرتونگاره اصلی دارند.

1. Liquid-Crystal Display
2. Duplex Image Quality Indicator

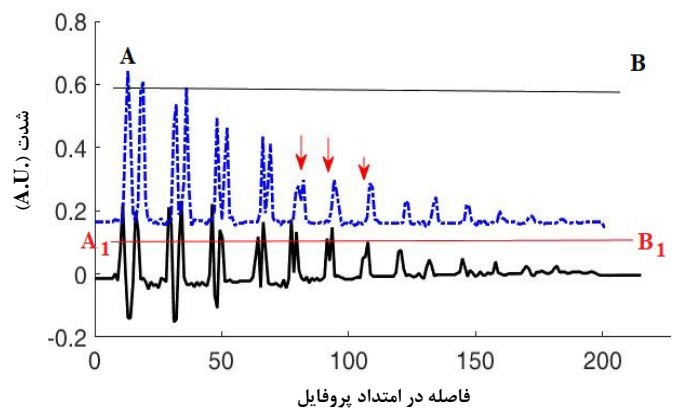


و اجزای بردها را به خوبی شناسایی کنند. در این تحقیق با بهبود تباین پرتونگاره‌ها قسمتی از اطلاعات پرتونگاره‌ها که می‌تواند به مهندسی معکوس کمک کنند، واضح‌تر می‌شود. استفاده هم‌زمان تصاویر بازسازی شده و پرتونگاره‌های اصلی اطلاعات مناسبی در مورد نحوه اتصالات، اجزای الکترونیکی برد، نحوه لحیم‌کاری، محل سوراخ‌های روی برد و خرابی و قطع شدگی‌های اتصالات مسی را می‌دهد.

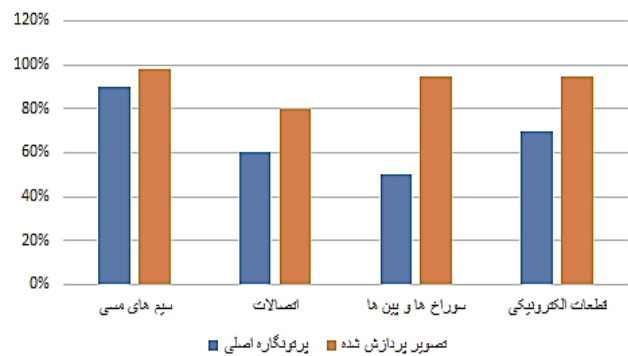
مراجع

1. Azin A, Zhukov A, Narikovich A, Ponomarev S, Rikkonen S, Leitsin V. Nondestructive testing method for a new generation of electronics. *MATEC Web of Conferences*. 2018;143:04007. YSSIP-2017 <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814304007>.
2. Lu X, He Z, Su L, Fan M, Liu F, Liao G, Shi T. Detection of micro solder balls using active thermography technology and k-means algorithm. *IEEE Trans Ind Inf*. 2018;14(12):5620–5628.
3. Liu S, Ume I.C. Vibration analysis based modeling and defect recognition for flip-chip solder-joint inspection. *J. Electron. Packag*. 2002;124:221–226.
4. Liu S, Erdahl D, Ume C, Achari A. A novel method and device for solder joint quality inspection by using laser ultrasound. In Proceedings of the Electronic Components and Technology Conference. *Las Vegas, NV, USA*. 2000 21–24 May;408–415.
5. Huang CY, Hong JH, Huang E. Developing a machine vision inspection system for electronics failure analysis. *IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol*. 2019;9(9):1912–1925.
6. Aryan P, Sampath S, Sohn H. An Overview of Non-Destructive Testing Methods for Integrated Circuit Packaging Inspection. *Sensors*. 2018;18:1981. doi:10.3390/s18071981.
7. Bansal A, Ramakrishna G, Liu K. A New Approach for Early Detection of PCB Pad Cratering Failures. *Cisco Systems Inc., San Jose, CA*. 2011.
8. Fu Z, Goyal D, Thomas J, Crawley A, Ramsey A. 3D X-ray computed tomography (CT) for electronic packages. Proc. of the 29th International Symposium for Testing and Failure Analysis. *Santa Clara, CA (USA)*. 2003.
9. Global Industry Analysts. Inc, Industrial X-Ray Inspection Systems-Market Analysis. *Trends, and Forecasts. USA*. 2019.
10. ASTM E801-21, Standard Practice for Controlling Quality of Radiographic Examination of Electronic Devices. *ASTM International*. 2021.
11. ASTM E1161-21. Standard Practice for Radiologic Examination of Semiconductors and Electronic Components. *ASTM International*. 2021.

برای ارزیابی نتایج از نظرات پنج متخصص پرتونگاری و ۳ متخصص مهندسی معکوس استفاده شد. در این نظرسنجی از آن‌ها خواسته شد که با مقایسه پرتونگاره اصلی و تصویر پردازش شده به اجزای تصویر امتیازی بین ۱ تا ۱۰ بدهند. نتایج این امتیازدهی در شکل ۶ آورده شده است. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که تصاویر پردازش شده سیم‌های مسی، اتصالات، محل پین‌ها و اجزای الکترونیکی را مشخص‌تر کرده و بهبود کنتراست مناسبی در این نواحی دیده می‌شود. سیم‌های مسی با حدود ۹۸٪ و ۸۵٪ و اتصالات با ۸۰٪ و ۶۰٪ امتیاز به ترتیب در تصاویر بازسازی شده و پرتونگاره‌ها هستند. به‌طور نسبی بهبود حدود ۲۰٪ تا ۴۰٪ در تصاویر بازسازی شده دیده می‌شود.



شکل ۵. خط پروفایل رسم شده در دو مسیر AB روی پرتونگاره اصلی و روی تصویر بازسازی شده A₁B₁.



شکل ۶. نتایج ارزیابی متخصصین.

۴. نتیجه‌گیری

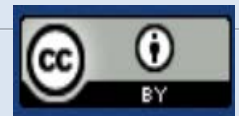
در این تحقیق از روش تغییرات کلی اصلاح شده با گرادیان متناوب برای ارتقا پرتونگاره‌های بردهای الکترونیکی جهت استخراج اطلاعات در جهت مهندسی معکوس استفاده شده است. پرتونگاره‌های تهیه شده به روش CR اطلاعات مناسبی را در اختیار کارشناسان مهندسی معکوس قرار می‌دهد تا اتصالات



12. Zhang Q, Zhang M, Gamanayake Ch, Yuen Ch, Geng Z, Jayasekara H, Woo Ch.-w, Low J, Liu X, Guan Y.L. Deep learning based solder joint defect detection on industrial printed circuit board X-ray images, *Complex & Intelligent Systems*. 2022;8:1525–1537. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00600-w>.
13. Villaraga-Gómez H, Bell J.D. Modern 2D & 3D X-ray technologies for testing and failure analysis, ISTFA Proceedings, 45th International Symposium for Testing and Failure Analysis. November. 2019. DOI: 10.31399/asm.cp.istfa2019p0014.
14. Yahaghi E, Mirzapour M, Movafeghi A. Enhancing flaw detection in aluminum castings by two different mixed noise removal methods. *Phys. Scr.* 2020;95: 075302. 9. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab8d00>.
15. Yahaghi E, Hosseini-Ashrafi M.E, Comparison of the performance of three domain transform filters for radiographic contrast enhancement of welded objects. *Insight*. 2020 June;62(6).
16. Rudin Leonid I, Stanley Osher, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1992;60(1-4):259-268.
17. Chambolle Antonin, Stacey E. Levine, Bradley J. Lucier. An upwind finite-difference method for total variation-based image smoothing. *SIAM Journal on Imaging Sciences*. 2011;4(1):277-299.
18. Abergel R, Moisan L. The Shannon total variation. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*. 2017;59(2):341-370.
19. ISO-17636-2. Non-destructive Testing of Welds—Radiographic Testing—Part 2: X- and Gamma-Ray Techniques with Digital Detectors. *International Organization for Standardization*. Geneva. 2013.
20. EN-12681-2. Founding. Radiographic Testing. Techniques with Digital Detectors. *European Standards Organization*. 2017.
21. Condat L. Discrete total variation: New definition and minimization. *SIAM Journal on Imaging Sciences*. 2017;10(3):1258-1290.
22. Shiqian Ma. Alternating proximal gradient method for convex minimization. *Journal of Scientific Computing*. 2016;68(2):546-572.
23. Deng W, Yin W. On the global and linear convergence of the generalized alternating direction method of multipliers. *Journal of Scientific Computing*. 2016;66(3):889-916.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

موافقی، امیر، میرزاپور، مهدی، یاحقی، عفت، رکرک، بهروز، نومیدی پیرپشته، کوثر، آرضایک. بهنام. (۱۴۰۳)، کاربرد پرتونگاری صنعتی در عیب‌یابی و تشخیص ساختار بردهای مدار چاپی با روش وردش اصلاح شده. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۱۰۷(۱)، ۶۲-۶۹. DOI: 10.24200/nst.2023.1238.1806

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1533.html

