

ارزیابی عملی روش فراتفکیک پذیری در تصاویر ماهواره‌ای بر مبنای پیاده‌سازی یک دوربین تصویربرداری

مهدی مفیدی^۱، حسن حاج قاسم^{۲*}، احمد عقیفی^۳

۱- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۲- دانشیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۳- دانشیار، مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۴/۰۸/۲۴، پذیرش: ۹۵/۰۲/۱۴)

چکیده

تهیه و پردازش داده‌های مکانی و مکان‌یابی صحیح اماکن حساس با افزایش قابلیت پدافند غیرعامل، ضریب امنیتی آن‌ها را افزایش و آسیب‌پذیری احتمالی از سوی دشمن را به شدت کاهش می‌دهد. امروزه چگونگی دست‌یابی به تفکیک‌پذیری بالاتر در تصاویر ماهواره‌ای با توجه به تولید اطلاعات مکانی دقیق‌تر، از موضوعات مورد توجه حوزه دفاعی است. در این مقاله، به طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم تصویربرداری ماهواره‌ای جارویی با امکان دریافت فرمان، ذخیره‌سازی و بازیابی تصویر پرداخته شده است. نحوه تصویربرداری ذاتی مبتنی بر حرکت آشکارساز همراه با به‌کارگیری یک الگوریتم فراتفکیک‌پذیری با رابطه‌ای بهبود یافته، امکان ارتقاء وضوح تصویر نهایی را نسبت به نسخه ابتدایی آن فراهم می‌سازد. الگوریتم فراتفکیک‌پذیری پیشنهادی که مشارکت مؤثرتر قاب‌های با خطای کمتر را در فرآیند بازسازی دربردارد، بر روی داده‌های واقعی دوربین ساخته‌شده، اعمال می‌گردد. ارزیابی بصری و همچنین معیارهای CPBD و Q-Metric عملکرد بهتر آن را نسبت به سایر روش‌های بررسی شده نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: فراتفکیک‌پذیری، خطای تطبیقی، جاروب خطی، سیستم تصویربرداری ماهواره‌ای.

Experimental Evaluation of Super-Resolution Technique in Satellite Images Based on a Camera Prototype Implementation

M. Mofidi, H. Hajghassem*, A. Afifi

University of Tehran

(Received: 15/11/2015; Accepted: 03/05/2016)

Abstract

Generating and processing of spatial data for positioning of critical facilities increase the passive defence capability and security index, while decreasing the effects of possible attacks, significantly. Nowadays, accessing to satellite images with higher resolutions, due to the more accurate results, is an attractive issue in the field of defence systems. In this paper, a pushbroom imaging system has been implemented which is capable of receiving commands, storing and reloading images. The scanning-based camera plus an improved super-resolution algorithm will result in an output super-resolved image, in comparison with initial input. The proposed algorithm which incorporates less erroneous frames in the reconstruction process has been applied on the real-world camera outputs. Visual evaluation, the Q-Metric and CPBD factors show that the performance of our algorithm is better than the other methods.

Keywords: Super-Resolution, Adaptive Error Term, Linear Scan, Satellite Imaging System

*Corresponding Author E-mail: hajghassem@ut.ac.ir

۱. مقدمه

فرا تفکیک پذیری^۲ (SR) استفاده نمود. ایده اصلی موجود در SR ترکیب اطلاعات غیر اضافی موجود در چند قاب تصویری LR به منظور ایجاد تصویری با تفکیک پذیری بالاتر نسبت به هر کدام از قاب های اولیه است. بر مبنای تعداد تصاویر در دسترس، دو رویکرد اساسی جهت دسته بندی الگوریتم های SR در نظر گرفته می شود: روش های مبتنی بر یادگیری و روش های مبتنی بر بازسازی [۳].

در روش های نوع اول سعی بر این است که با استفاده از یک سری اطلاعات از پیش آموزش داده شده در یک دامنه خاص از تصاویر بتوان ارتباط بین تصویر LR ورودی و تصویر با تفکیک پذیری بالای^۳ (HR) خروجی را یافت [۳]. روش های نوع دوم بر مبنای اطلاعات موجود در خود تصاویر و بر مبنای قواعدی همچون حفظ لبه ها، امتداد دادن لبه ها، و درون یابی مابین پیکسل ها عمل می کنند [۴]. الگوریتم های آماری از جمله بیشینه درست نمایی^۴ [۵]، بیشینه سازی احتمال پسین^۵ [۶] و بیزین تغییر پذیر [۷] از جمله الگوریتم های بازسازی اند. هر یک از این الگوریتم ها به طور کلی متشکل از دو جمله "خطای داده" و "منظم سازی" می باشند.

نرم های خطای L1 و L2 از جمله انتخاب های ممکن برای جمله خطای داده هستند. نرم L1 نسبت به نویز ضربه و خطای ثبت تصویر عملکرد بهتری دارد و نرم L2 در برابر نویز گاوسی مقاوم است [۲]. نرم L1-L2 تطبیقی نیز پیشنهاد شده است [۸] که عملکرد آن دارای ترکیبی از رفتار هر دو نرم است. در بین روش های منظم سازی معیار تغییرات کل دوسویه^۶ (BTV) توانایی بالایی در حفظ جزئیات تصویر داشته ارائه شده است [۴].

در اینجا نیز به دلیل اهمیت جزئیات و لبه ها در تصویر بازسازی شده، خصوصاً تصاویر ماهواره ای، از BTV برای منظم سازی تصویر خروجی استفاده شده است. در این مقاله ابتدا به طراحی مفهومی و جزئی دوربین پیشنهادی و سپس پیاده سازی آن پرداخته می شود. با توجه به این که حسگر تصویر بردار^۷ (CCD) مورد استفاده از نوع خطی بوده و حرکت اساس کار این دسته از آشکارسازها را تشکیل می دهد، در نهایت جابجایی های تصادفی بین قاب های دریافتی از یک ناحیه وجود خواهد داشت. این جابجایی های غیر کنترل شده نوعی افزونگی اطلاعات در قاب های دریافتی ایجاد می کند که امکان به کارگیری الگوریتم های SR را در راستای ارتقاء تفکیک پذیری ممکن خواهد ساخت. بنابراین، در این حالت ضمن بررسی نظریه کلی SR، یک

افزایش بازدارندگی، کاهش آسیب پذیری و تسهیل مدیریت بحران در مقابل تهدیدات و اقدامات نظامی دشمن از جمله اهداف اصلی در حوزه پدافند غیرعامل است. در این راستا می توان به چند اصل اساسی در این حوزه یعنی مکان یابی و تحلیل مکانی، شناسایی و همچنین اعلام خطر اشاره نمود. پیاده سازی بهینه هر یک از این اصول می بایست بر مبنای داده های صحیح و دقیق صورت گیرد. یکی از انواع این داده ها تصاویر ماهواره ای هستند. بدیهی است کاربرد تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک پذیری بالا در مکان یابی (مانند تهیه نقشه عکسی و سیستم اطلاعات جغرافیایی)، در شناسایی (مانند تشخیص استتار و موقعیت یابی) و اعلام خطر (مانند پایش خسارات ناشی از حملات جنگی و انجام اقدامات بازدارنده متناسب) بسیار گسترده است. به طور طبیعی دقت مکانی بالاتر یک تصویر جزئیات بیشتر و خروجی دقیق تری را در اختیار کاربر قرار می دهد. با این حال، از یک طرف دسترسی به قدرت تفکیک پذیری بالا نیازمند حجم و وزن بالای محموله تصویر برداری است که از طرف دیگر این امر، نصب آن را در ماهواره های کوچک مانند میکرو ماهواره ها دشوار خواهد ساخت. بنابراین، طراحی یک سیستم تصویر برداری ماهواره ای که توانم با قابلیت به کارگیری در ماهواره های کوچک و کم هزینه، امکان استفاده از الگوریتم های پردازشی را داشته باشد، کمک شایانی به این موضوع و در نتیجه افزایش قدرت دفاعی در حوزه های ذکر شده خواهد نمود. محموله تصویر بردار یک ماهواره به طور کلی شامل دو بخش اپتیک و الکترونیک است. در یک ماهواره محدودیت های سخت افزاری در هر یک از این دو بخش از یک سو و شرایط محیطی و تصویر برداری از یک جسم از فاصله ای دور از سوی دیگر، در کاهش کیفیت و تفکیک پذیری می تواند تأثیر بسزایی داشته باشد [۱].

برای جبران نسبی این کاستی می توان از جبران سازهای نرم افزاری که هزینه بسیار کمتر و بعضاً کاربرد بیشتری را در مقایسه با تغییرات در سخت افزار دارند، بهره برد. چرا که به روزرسانی ادوات تصویر برداری یک ماهواره کوچک پرتاب شده، تقریباً غیرممکن است. بدین معنا که در اینجا، یک گام پس-پردازشی جهت به دست آوردن تصاویر با تفکیک پذیری فضایی بالاتر از یک رشته تصاویر با وضوح پایین تر^۱ (LR) که از یک صحنه گرفته شده اند می تواند راهگشا باشد. نکته مهم اینکه تصاویر LR مرجع می توانند (الف) در زمان واحد توسط چندین حسگر دریافت شده باشند یا ب) در زمان های متفاوت با یک حسگر یکسان اخذ شده باشند [۲]. با توجه به موارد ذکر شده و همچنین در نظر گرفتن عواملی همچون نمونه برداری کاهشی شدید در تصویر برداری ماهواره ای، نویز، مات شدگی و لرزش می توان به منظور بهبود کیفیت وضوح تصویر خروجی از روش

² Super Resolution (SR)

³ High Resolution (HR)

⁴ Maximum Likelihood (ML)

⁵ Maximum A-Posteriori (MAP)

⁶ Bilateral Total Variation (BTV)

⁷ Charge Coupled Device (CCD)

¹ Low Resolution (LR)

یک اپتیک با فاصله کانونی و دهانه اپتیکی به ترتیب، به صورت زیر قابل تحقق است. $D = 2.44(\lambda H / GSD) = 6.4cm$, $f = Hx / GSD = 52.5cm$ در محاسبات ذکر شده ابعاد یک میکروماهواره (حدود $50 \times 50 \times 50$ cm³) در نظر گرفته شده است. با توجه به موارد فوق مشخصات پیشنهادی دوربین در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات پیشنهادی دوربین

پارامتر	مقدار
ارتفاع (H)	۳۰۰ کیلومتر
باند طیفی (λ)	مرئی (۰/۷-۰/۴ میکرومتر)
قدرت تفکیک پذیری (GSD)	۸ متر
حسگر تصویربرداری	CCD
روش تصویربرداری	جاروب خطی
تعداد پیکسل (N)	$N = Swath / GSD \approx 2048$
اندازه دهانه اپتیکی (D)	۱۲/۸ سانتیمتر
ابعاد پیکسل (X)	۱۴*۱۴ (میکرومتر) ^۲
فاصله کانونی (f)	۵۲/۵ سانتیمتر
نرخ شاتر (t)	۱ میلی ثانیه
پهنای پوشش	۱۶ کیلومتر

۲-۱. بلوک دیاگرام کلی دوربین ماهواره

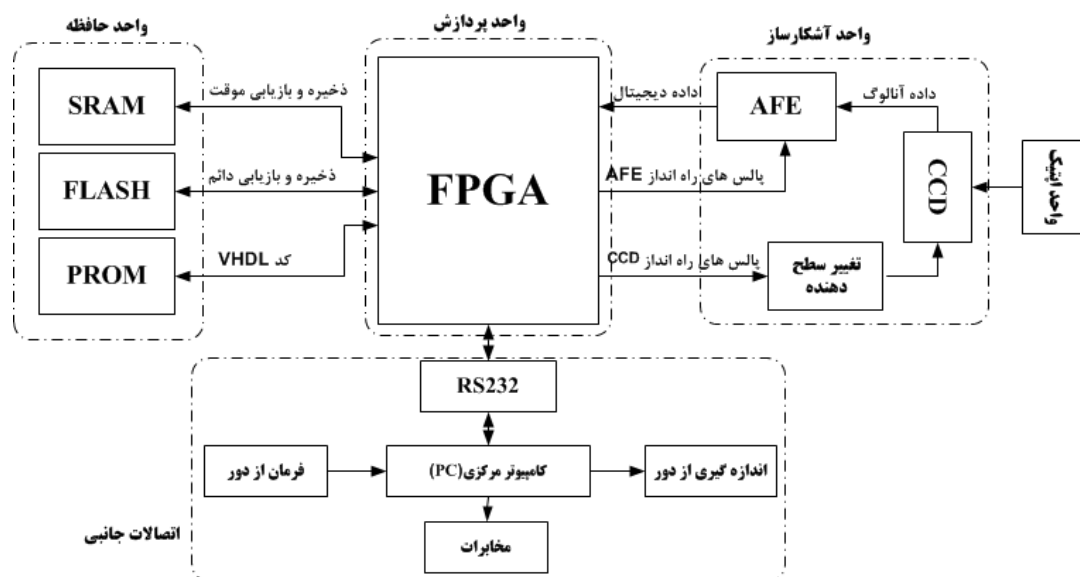
در این بخش بلوک دیاگرام کلی دوربین ماهواره ارائه و در ادامه به شرح سخت افزار و نرم افزارهای پیاده سازی شده، پرداخته می شود. دوربین ساخته شده مشتمل بر چند واحد اصلی آشکارساز، پردازش، حافظه، توان، کامپیوتر مرکزی و اپتیک است، که بلوک دیاگرام پیشنهادی آن در شکل (۱) آمده است.

الگوریتم SR برای بهبود تفکیک پذیری تصاویر پیشنهاد و پیاده سازی می گردد. به طور کلی دوربین ساخته شده یک طرح آزمون واقعی برای الگوریتم SR پیشنهادی خواهد بود.

در ادامه این مقاله، بخش دوم به طراحی کلی دوربین با پارامترهای مشخص الکترونیکی پرداخته است. در بخش سوم روند پیاده سازی بخش الکترونیک توصیف شده است. در بخش چهارم کلیات الگوریتم SR معرفی و روش پیشنهادی آورده شده است. بخش پنجم مشتمل بر نتایج دریافتی از دوربین و اعمال الگوریتم پیشنهادی بوده و در نهایت، نتیجه گیری در بخش ششم آمده است.

۲. طراحی و محاسبات سیستمی

هدف کلی طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی دوربین تصویربرداری تک طیفی ماهواره‌ای با قدرت تفکیک پذیری زمینی زیر ۱۰ متر و ارتفاع فرضی پروازی ۳۰۰ کیلومتر است، که امکان ارتقاء تصاویر در آن از طریق فراتفکیک پذیری امکان پذیر است. شاخص های ارتفاع مدار، قدرت تفکیک پذیری زمینی، پهنای پوشش و محدوده طیفی تصویربرداری با توجه به هدف از پیش تعیین شده، مشخص می شود. نوع حسگر تصویربرداری و روش تصویربرداری از طریق مطالعات آماری تعیین می گردد. تعداد پیکسل، فاصله کانونی، دهانه مجموعه اپتیکی و نرخ شاتر الکترونیکی با توجه به محاسبات و طراحی که در ادامه ذکر شده، به دست می آید. با توجه به سرعت متوسط ماهواره های ارتفاع پایین (۸ Km/s) و قدرت تفکیک پذیری زمینی^۱ حدود ۸ متر، نرخ شاتر الکترونیکی مربوط به CCD برابر $t = GSD / V = 1ms$ نظر گرفته شده است. تفکیک پذیری مذکور، به وسیله



شکل ۱. بلوک دیاگرام پیشنهادی کلی دوربین ماهواره

ذخیره‌شده و همچنین فرمان‌های مورد نیاز جهت تنظیمات بخش آشکارساز را بر عهده دارد.

همچنین ارسال اطلاعات از طریق واحد اندازه‌گیری از دور مانند دمای بخش آشکارساز و دمای بخش پردازنده و نیز ارسال داده‌های تصویر به واحد مخابرات، از دیگر وظایف این بخش است که این قسمت‌ها توسط کامپیوتر و با واسطه پروتکل RS232 شبیه‌سازی شده است. در واحد حافظه، PROM جهت ذخیره‌سازی دائمی برنامه FPGA، FLASH جهت ذخیره‌سازی دائمی اطلاعات مربوط به تصاویر گرفته شده و SRAM جهت ذخیره‌سازی موقت اطلاعات مربوط به تصاویر در بخش پردازش استفاده می‌شود. همچنین کلیه واحدهای الکترونیکی، توان مصرفی خود را از طریق رگولاتورهای مختلف دریافت می‌کنند.

۲-۲. اجزاء بخش الکترونیک دوربین ماهواره

در شکل (۲) اجزاء بخش الکترونیک دوربین ساخته شده نمایش داده شده است. پایه‌های Φ CLK، Φ SHUT و Φ PROG پالس‌های کنترل‌کننده‌ی تراشه CCD را تشکیل می‌دهند. پالس Φ ROG تولیدکننده پالس مورد نیاز برای آرایه خروجی بوده و بارهای جمع شده درون پیکسل CCD را جهت هدایت به بیرون، از طریق تعدادی سلول انتقال عمودی به شیفت رجیسترهای انتقال افقی منتقل می‌کند. این کار با کمک پالس Φ CLK که تولیدکننده کلاک اصلی CCD است، امکان‌پذیر می‌شود. با کنترل پالس Φ SHUT به صورت الکترونیکی می‌توان عملیات نورگیری را تحت کنترل درآورد. این پالس دارای دامنه صفر تا ۵ ولت است. از آنجایی که FPGA توانایی تولید پالس ۳/۳ ولت را دارد، بنابراین این پالس‌ها پس از عبور از یک تغییر سطح دهنده ولتاژ وارد CCD می‌شوند و نهایتاً خروجی تولیدشده در پایه Vout به AFE انتقال پیدا می‌کند. قبل از استفاده از AFE بایستی ثبات‌های داخلی آن را پیکره‌بندی کرد. از پایه‌های SDATA، SCLK و SLOAD موجود بر روی تراشه AFE، برنامه‌ریزی ثبات‌های داخلی، یعنی ثبات CONFIG، ثبات MUX، ثبات بهره PGA و ثبات OFFSET استفاده می‌شود. از پالس SCLK به عنوان پالس کلاک، از پالس SDATA جهت نوشتن و خواندن اطلاعات لازم جهت پیکره‌بندی ثبات‌ها و از پالس SLOAD به عنوان پالسی جهت اعتبارسنجی اطلاعات موجود بر پالس SDATA استفاده می‌شوند. پس از پیکره‌بندی، AFE جهت راه‌اندازی به پالس‌های CDSCLK1، CDSCLK2 و ADCCLK نیاز دارد. پالس CDSCLK1 نمونه‌برداری از سطح مرجع شکل موج CCD و پالس CDSCLK2 نمونه‌برداری از سطح داده‌های

پس از آن که نور دریافتی توسط واحد اپتیک وارد حسگر CCD خطی می‌شود، به تناسب مقدار انرژی موجود در نور برخوردی، در پیکسل‌های آن بار الکتریکی ایجاد خواهد شد. سپس بارهای جمع‌شده درون المان آشکارساز از طریق سلول‌های انتقال عمودی به شیفت رجیسترهای انتقال افقی منتقل شده و از آنجا به صورت سریال به تقویت‌کننده آشکارساز منتقل می‌گردد. راه‌اندازی CCD نیازمند تعدادی پالس‌های راه‌انداز است که این پالس‌ها با توجه به CCDهای مختلف متفاوت می‌باشند. امروزه استفاده گسترده از FPGAها به عنوان هسته اصلی مدیریت و پردازش داده در پیاده‌سازی مدارات دیجیتال ماهواره به دلیل داشتن قابلیت‌های بسیار بالا مرسوم شده است [۹]. در اینجا برای ایجاد پالس‌های راه‌انداز از پردازنده FPGA سری اسپارتنان ۳ استفاده می‌شود. این پالس‌ها جهت تطبیق سطح ولتاژ FPGA با ولتاژ مورد نیاز CCD، پس از عبور از یک تغییر سطح دهنده^۱، وارد CCD می‌شوند. خروجی ایجادشده از CCD که به صورت ولتاژ آنالوگ بوده وارد مبدل آنالوگ به دیجیتال^۲ می‌شود.

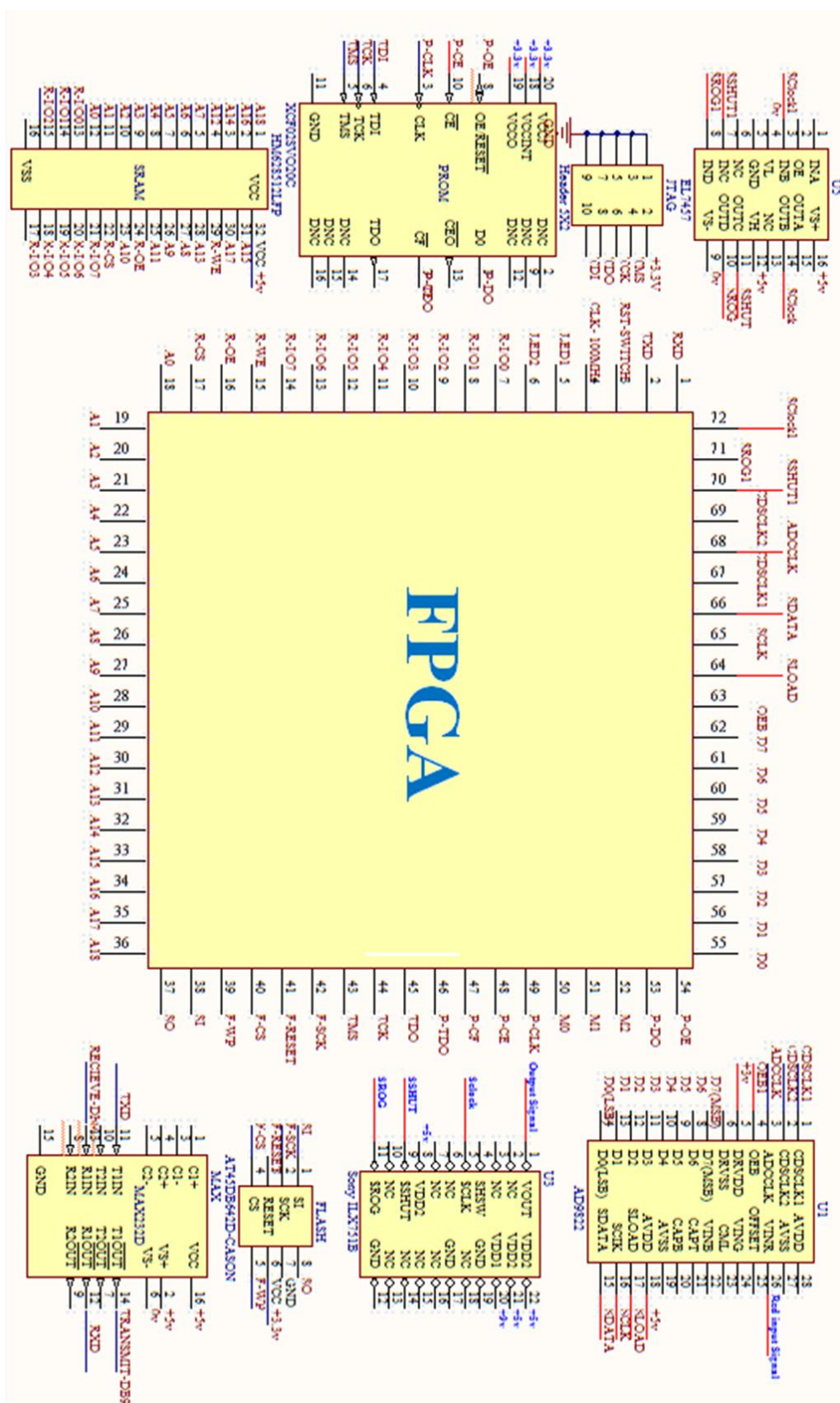
در این قطعه ولتاژ قبل و بعد از تزریق بار اندازه گرفته شده و از تفاضل آن‌ها مقدار بار پیکسل تخمین زده و تقویت می‌شود. در یک نمونه‌برداری از اطلاعات آنالوگ دریافت شده از CCD در یکی از دو حالت SHA^۳ یا CDS^۴ صورت می‌گیرد. حالت SHA غالباً در مواردی که حسگر تصویربردار یک آفست مشخص داشته و نمونه‌برداری نسبت به آن آفست انجام می‌پذیرد، به کار گرفته می‌شود. در اینجا از حالت CDS استفاده شده است که طی آن در فاصله زمانی خواندن یک پیکسل، دو بار از موج ورودی نمونه‌برداری و از تفاضل آن‌ها خروجی تخمین زده می‌شود. پس از این مرحله و همچنین عملیات تقویت‌کنندگی، داده‌های ورودی آنالوگ به خروجی دیجیتال تبدیل خواهد شد. این قطعه نیز مشابه CCD، به پالس‌هایی برای راه‌اندازی نیاز دارد که تعدادی به عنوان کلاک برای همزمانی و تعدادی به صورت سریال و برای دادن اطلاعات لازم برای برنامه‌ریزی ثبات‌های داخلی مبدل آنالوگ به دیجیتال، توسط FPGA تأمین می‌شوند. بخش پردازنده ضمن تأمین کلاک راه‌انداز CCD و کلاک برای همزمانی مدارات نمونه‌برداری و برنامه‌ریزی ثبات‌های داخلی مبدل آنالوگ به دیجیتال، وظیفه‌ی جمع‌آوری داده دیجیتال شده را به عهده دارد. این بخش از طریق ارتباط با کامپیوتر مرکزی وظیفه دریافت فرمان‌ها از واحد فرمان از دور مانند روشن و خاموش شدن دوربین، فرمان ذخیره تصویر، فرمان ارسال تصویر

^۱ Level Shifter

^۲ Analogue Front End(AFE)

^۳ Sample-and-Hold Amplifier(SHA)

^۴ Correlated Double Sampler(CDS)



۴. پیاده‌سازی بخش الکترونیک

در این بخش نتایج آزمون قطعات و عملکرد کلی سیستم نشان داده شده است.

۳-۱. مدهای کاری دوربین

در پیاده‌سازی بخش الکترونیک سه حالت عملیاتی زیر در نظر گرفته شده است که با توجه به دستور دریافت شده از بخش فرمان از دور، دوربین در یکی از این سه حالت کار می‌کند:

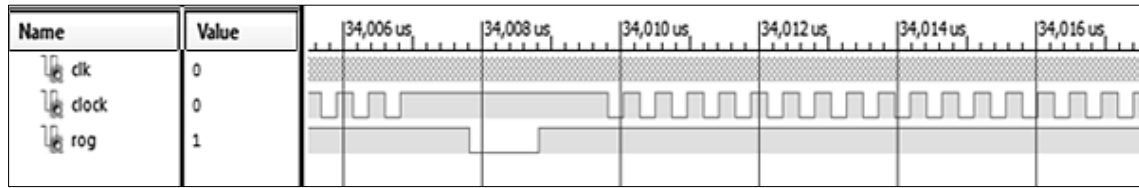
- مد بلادرنگ: در این حالت تصاویر به‌طور موقت در SRAM ذخیره و سپس جهت ارسال به واحد مخابرات (کامپیوتر مرکزی) از آن بازخوانی می‌شود.
- مد ذخیره: در این حالت تصاویر پس از ذخیره موقت در SRAM به صورت دائم در FLASH ذخیره می‌شود.
- مد ارسال: در این حالت تصاویر ذخیره‌شده در حافظه FLASH بازخوانی شده و به واحد مخابرات (کامپیوتر مرکزی) ارسال می‌شود.

۳-۲. نتایج شبیه‌سازی و آزمون بخش سخت‌افزار

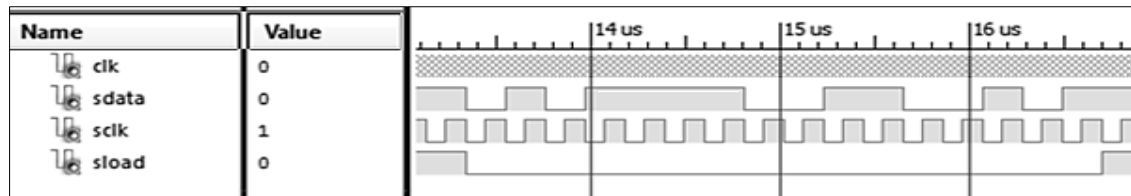
در این بخش، نتایج حاصل از تست و شبیه‌سازی برنامه‌های نوشته‌شده با زبان VHDL در نرم‌افزار Xilinx ISE (version 14.1) و درگاه سریال برنامه Code Vision آورده شده است.

در شکل‌های (۳-الف) و (۴-الف) پالس‌های Φ ROG و Φ CLK جهت راه‌اندازی CCD نشان داده شده است. دوره تناوب پالس Φ CLK با توجه به نرخ شاتر ۱ms و ۲۰۸۷ پیکسل CCD، برابر ۴۸۰ns بوده که توسط کریستال خارجی ایجاد می‌شود. در AFE هر کانال دارای تنظیم آفست منحصر به فرد خود است. به‌عنوان مثال در شکل (۳-ب) پیکره‌بندی ثبات OFFSET با عدد "۰۱۰۱۱۱۱۰۱۱۰۱۰۱۰۱" به عنوان یکی از چهار ثبات داخلی AFE نشان داده شده است. مطابق شکل در پالس SDATA بیت ابتدایی صفر نمایان گر نوشتن در ثبات‌ها و بیت‌های آدرس ۱۰۱ برای مشخص کردن نوع ثبات بوده و پس از درج سه بیت "۱" بی‌اثر، در ادامه بیت‌های D0 تا D8 محدوده‌ی آفست را از ۳۵۰mV- تا ۳۵۰mV+ در ۵۱۲ حالت مختلف کنترل می‌کنند. در تمام این مدت پالس SLOAD در حالت "۰" است. علاوه بر پیکره‌بندی AFE، در شکل‌های (۳-ج) و (۴-ب) پالس‌های CDSCLK1، CDSCLK2 و ADCCLK جهت راه‌اندازی AFE برای تولید داده‌ها نشان داده شده است.

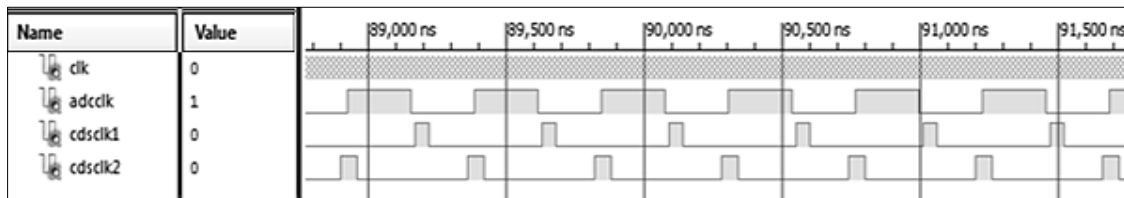
تفاوت بین این دو ولتاژ با توجه به ثبات OFFSET شیفت پیدا کرده و در ادامه با مقدار تنظیم‌شده در ثبات PGA مقیاس‌بندی می‌شود. سپس ولتاژ خروجی PGA وارد ADC شده و در آنجا با توجه به کلاک ADCCLK نمونه‌برداری انجام می‌شود و در نهایت داده‌ها را به‌صورت ۸ بیتی به خروجی ارسال می‌کند. در واقع FPGA به‌عنوان هسته اصلی بخش پردازنده دارای وظایفی از جمله دریافت خروجی دیجیتال شده AFE، تولید پالس‌های راه‌انداز CCD و AFE، ذخیره اطلاعات به‌طور موقت در SRAM، ذخیره اطلاعات به‌طور دائم در حافظه FLASH، ارتباط با حافظه PROM جهت ذخیره دائمی برنامه FPGA و ارتباط با رابط RS232 جهت شبیه‌سازی زیرسامانه‌های فرمان از دور، اندازه‌گیری از دور و واحد مخابرات است. برنامه‌ریزی FLASH توسط یک فرآیند سه مرحله‌ای خواندن، پاک کردن و نوشتن انجام می‌شود. عملیات پاک کردن می‌تواند به صورت بلوکی، سکتوری، کل تراشه و یا سطح یک صفحه انجام شود. عملیات نوشتن در داخل حافظه به صورت نوشتن در بافر، نوشتن از بافر به حافظه اصلی و یا نوشتن مستقیم در حافظه اصلی امکان‌پذیر است. خواندن از حافظه هم می‌تواند از طریق بافرها، خواندن یک صفحه حافظه اصلی و خواندن پیوسته از حافظه اصلی انجام گیرد. برای هر یک از این دستورات عمل‌ها یک Opcode مخصوص وجود دارد. حافظه FLASH با اعمال "۰" منطقی به پایه \overline{CS} فعال شده و توسط یک واسط سه‌سیمه که مشتمل بر ورودی سریال (SI)، خروجی سریال (SO) و کلاک سریال (SCK) است، قابل دسترسی است. حافظه SRAM دارای ۱۹ پایه A0-A18 برای آدرس‌دهی، ۸ پایه R-I/O0-R-I/O7 برای نوشتن و خواندن داده ۸ بیتی و ۳ پایه کنترلی R-WE, R-OE, R-CS است که با تنظیم آن‌ها انواع حالات نوشتن یا خواندن فراهم می‌شود. شبیه‌سازی ارتباط بخش پردازنده دوربین با واحدهای اندازه‌گیری از دور، فرمان از دور و مخابرات با استفاده از MAX232 و پورت DB-9 انجام شده است. این قطعه امکان برقراری ارتباط دوطرفه همزمان را فراهم می‌سازد. ورودی گیرنده MAX از پایه RECIEVE به PC و خروجی RXD آن به FPGA متصل می‌شود، درحالی‌که ورودی فرستنده TXD از FPGA و خروجی آن از طریق پایه TRANSMIT به PC وارد می‌شود. در ارتباط سریال داده به‌صورت بیت به بیت فرستاده می‌شود، به همین دلیل باید قبل از ارسال به صورت سریال و به‌صورت بسته‌های ۸ بیتی ارسال شود.



(الف)



(ب)

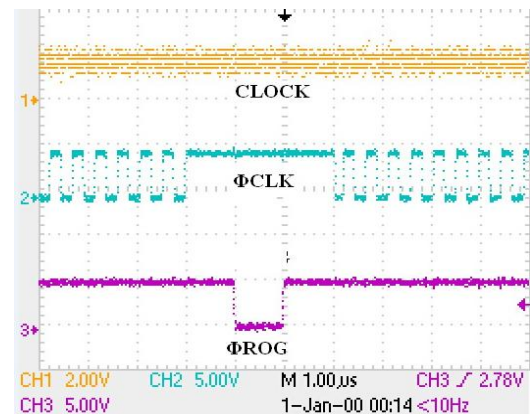


(ج)

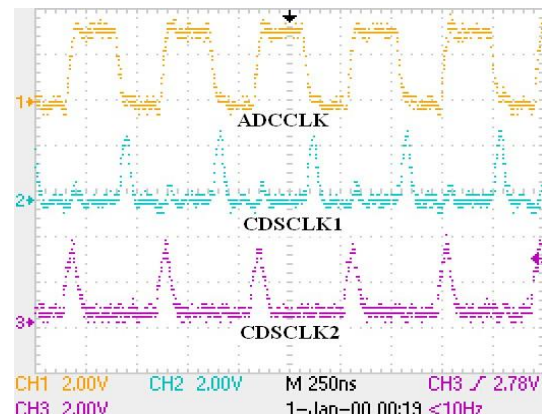
شکل ۳. نتایج شبیه‌سازی، (الف) راه‌اندازی CCD، (ب) پیکره‌بندی AFE، (ج) راه‌اندازی AFE در نرم‌افزار ISE

همان‌طور که ذکر شد یکی از انواع نوشتن در داخل حافظه، نوشتن مستقیم در حافظه اصلی است که ترکیب دو عملیات نوشتن در بافر و نوشتن از بافر به حافظه اصلی است. عملیات با لبه پایین‌رونده \overline{CS} آغاز شده و با کلاک‌زنی SCK از طریق ورودی سریال، Opcode مخصوص به دستورالعمل در این حالت بسته به انتخاب بافر ۱ یا ۲ به ترتیب کد ۸۲ یا ۸۵ هگز به حافظه فرستاده می‌شود. سپس ۳ بایت آدرس شامل آدرس ۱۳ بیتی صفحه مورد نظر و شماره بایت ۱۱ بیتی از صفحه که نوشتن باید از آنجا آغاز گردد، فرستاده می‌شود. بعد از فرستادن این بیت‌ها، داده از ورودی خوانده شده و در بافر نوشته می‌شود. با یک شدن پایه \overline{CS} ، ابتدا صفحه مورد نظر پاک شده و سپس اطلاعات از بافر روی آن نوشته می‌شود.

برای خواندن مستقیم از یک صفحه حافظه اصلی باید ابتدا کد D2 هگز به حافظه فرستاده شده و سپس ۳ بایت آدرس فرستاده می‌شود که شامل آدرس ۱۳ بیتی صفحه مورد نظر و شماره بایت ۱۱ بیتی از صفحه که خواندن باید از آنجا آغاز گردد، است. پس از فرستادن این بیت‌ها باید ۴ بایت بی‌اثر جهت تأخیر فرستاده شود که صفر یا یک بودن آن اهمیتی ندارد. پس از اتمام ارسال ۴ بایت بی‌اثر، با توجه به آدرس صفحه و شماره بایت مورد نظر بیت‌ها یک به یک در خروجی FLASH قرار می‌گیرند. دریافت خروجی از FLASH تا پایان صفحه مورد نظر ادامه دارد. پایه \overline{CS} در تمام مراحل خواندن باید صفر باشد.



(الف)

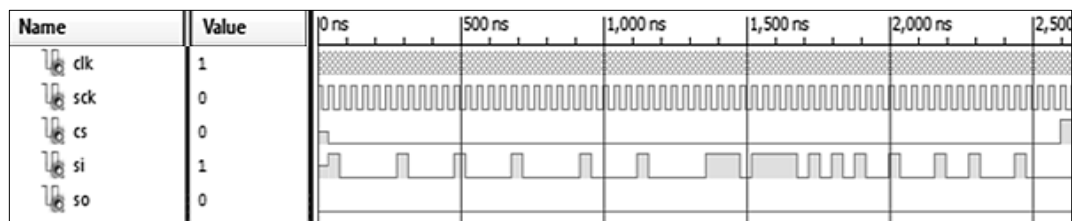


(ب)

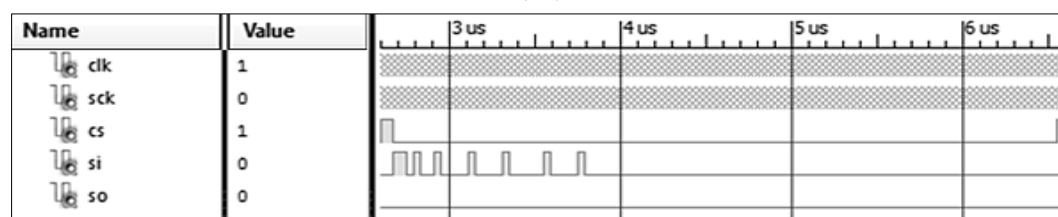
شکل ۴. نتایج آزمون، (الف) راه‌اندازی CCD، (ب) راه‌اندازی AFE

در کامپیوتر نمایش داده می‌شود. شکل (۵-الف) شبیه‌سازی نوشتن مستقیم، (۵-ب) شبیه‌سازی خواندن مستقیم و شکل (۵-ج) خروجی ترمینال سریال در کامپیوتر را نمایش می‌دهد.

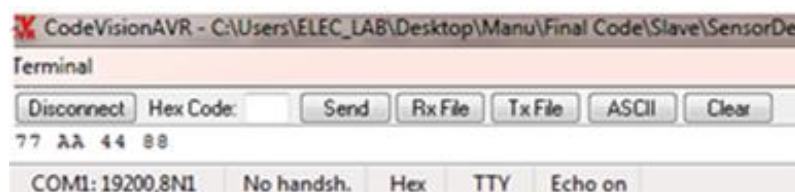
بسه طـــــور مثال ۴ بایست داده "۰۱۱۱۰۱۱۱۱۰۱۰۱۰۱۰۰۰۱۰۰۰۱۰۰۰۱۰۰۰" در بایست ۵۲۸ از صفحه ۵۲۸ با کلاک SCK با فرکانس ۵۰ مگاهرتز نوشته شده و مجدداً از همان صفحه بازخوانی و از طریق ترمینال سریال



(الف)

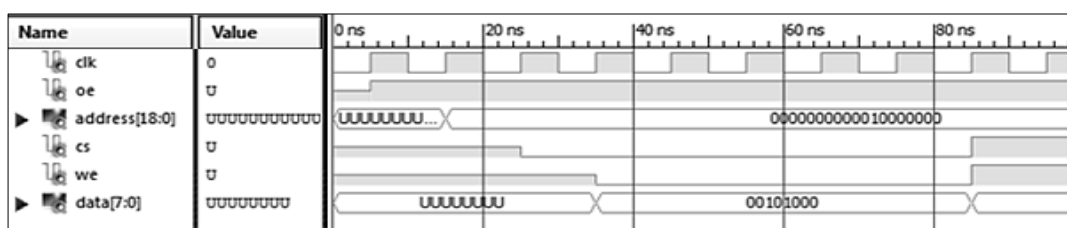


(ب)

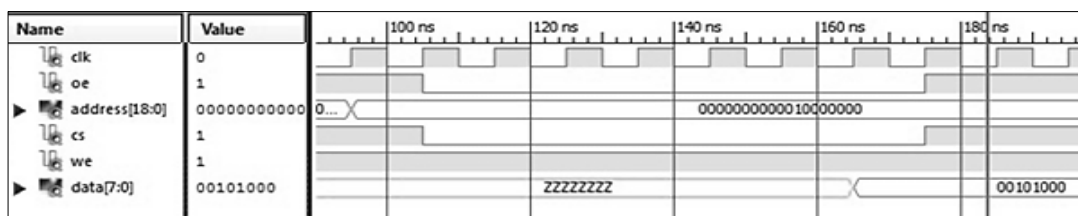


(ج)

شکل ۵. نتایج شبیه‌سازی الف) نوشتن مستقیم در FLASH، ب) خواندن مستقیم از FLASH، ج) خروجی ترمینال سریال در نرم‌افزار ISE



(الف)



(ب)

شکل ۶. نتایج شبیه‌سازی، الف) نوشتن در SRAM، ب) خواندن از SRAM در نرم‌افزار ISE

خطاهای کوچک به صورت خطی رفتار نماید، می تواند نتایج قابل قبولی ایجاد کند. در [۸] تابع برآورد خطایی پیشنهاد شده است که این شرایط را فراهم می سازد:

$$\rho(x, a) = a\sqrt{a^2 + x^2} - a^2 \quad (۳)$$

که در آن عبارت $\rho(x, a)$ تابع خطای داده و a عددی مثبت است. در رابطه (۳)، با ثابت ماندن پارامتر a زمانی که x به حد کافی کوچک باشد $\rho(x, a) = x^2/2$ و رفتار آن مشابه نُرم L_2 است و زمانی که x به حد کافی بزرگ باشد $\rho(x, a) \approx a|x| - a^2$ و عملکرد آن مشابه نُرم L_1 خواهد شد. انتقال حالت از نُرم L_1 به نُرم L_2 با انتخاب مناسب پارامتر آستانه a امکان پذیر است. به طوری که با توجه به تابع نفوذ رابطه (۳)، $\psi(x, a) = ax/\sqrt{a^2 + x^2}$ ، هنگامی که a به سمت صفر میل می نماید تابع نفوذ شکل نُرم L_1 را به خود می گیرد و با افزایش a معیار خطا محدوده بزرگ تری از خطاها را مانند نُرم L_2 می پذیرد. با جایگذاری رابطه (۳) در (۲) و ساده سازی، جواب به صورت زیر تغییر می یابد:

$$\hat{X}_H = \arg \min_{X_H} \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \left(a_k \sqrt{a_k^2 + y_{k,u}^2} \right) \quad (۴)$$

که در آن $y_k = DH_k F_k X_H - X_L^{(k)}$ و U برابر تعداد کل پیکسل های تصویر LR و a_k پارامتر آستانه برای k -امین قاب است. نکته بسیار مهم نحوه انتخاب پارامتر a_k به عنوان یک معیار برای اهمیت هر قاب LR ورودی است، به طوری که قابها با خطای بزرگ تر سهم کمتری را در تصویر HR بازسازی شده داشته باشند. در این راستا یک روش در [۸] پیشنهاد شده است که با وجود پاسخ مناسب، پیچیدگی بالا و محاسبات سنگینی را به فرآیند تخمین اعمال می کند. با الهام از [۱۲]، رابطه جدیدی را معرفی می نماییم که در عین سادگی می تواند نتایج قابل قبولی را ارائه دهد. با در نظر گرفتن $X_H(0)$ به عنوان اولین تخمین HR در فرآیند بازسازی SR، که حاصل درون یابی دوخطی از یکی از قاب های LR است، a_k را به شکل زیر تعریف می نماییم:

$$a_k = \exp\left(\frac{(E_k - E_{k_{\max}})^2}{MAD(E_k)}\right) \quad (۵)$$

که در معادله فوق $\|DH_k F_k X_H(0) - X_L^{(k)}\|_2 / U$ به عنوان خطای قاب k -ام تعریف می گردد. در این حالت با افزایش خطای هر یک از قابها، ضمن ایجاد اثر کاهشی بر روی پارامتر a_k ، تأثیر قاب با خطای بیشتر، در فرآیند بازسازی کاهش می یابد. MAD معیار پراکندگی آماری برای محاسبه تغییرات کل داده است [۱۲].

۳-۴. اضافه نمودن تنظیم کننده به فرآیند بازسازی

بازسازی فراتفکیک پذیری یک مسئله معکوس است که هدف آن عکس نمودن اثرات تخریبی بر روی رشته های از تصاویر ورودی است. در چنین حالتی مسئله SR می تواند جواب واحد نداشته باشد و از این رو وجود مقداری نویز در اندازه گیری ها، انحرافات

در تحقیقات انجام شده در حوزه SR، الگوریتم های آماری که جزء روش های مبتنی بر بازسازی، حوزه وسیعی را شامل می شوند. در بخش بعد، ابتدا تخمین گر M که از جمله مقبول ترین تخمین گرهای این حوزه است بررسی شده و سپس ترکیبی جدید از آن برای بازسازی تصاویر دریافتی دوربین پیشنهاد می گردد.

۲-۴. بازسازی SR تصویر بر مبنای تخمین گر M

میزان دقت در ثبت تصاویر LR، سطح نویز، میزان مات شدگی و همچنین وجود نقاط پرت^۱ از جمله مهم ترین عواملی هستند که در موفقیت یک الگوریتم SR بسیار تأثیر گذارند. در این میان، خانواده گسترده تخمین گرهای M به علت مقاوم بودن در برابر عوامل تخریب کننده، در بحث SR بسیار مورد توجه هستند [۱۱]. در زمینه SR، تخمین M ، مبتنی بر به حداقل رساندن تابع هزینه ای است که تفاوت بین تصاویر LR و تصویر HR تخمین زده شده را اندازه گیری می کند. بر مبنای تخمین گر فوق جواب مسئله SR می تواند به وسیله کمینه سازی تابع زیر حاصل شود:

$$\hat{X}_H = \arg \min_{X_H} \left[\sum_{k=1}^K \rho(DH_k F_k X_H - X_L^{(k)}) \right] \quad (۲)$$

که در آن ρ تابع تخمین فاصله بین هر تصویر LR ورودی و تصویر HR تخمینی بوده و خطای داده نام دارد. این تابع مثبت، متقارن و زوج است، که کمینه واحدی در $x=0$ دارد. سایر پارامترها مشابه رابطه (۱) توصیف می گردند. علت نام گذاری تخمین M ، ارتباط نزدیک تابع ρ با تخمین گر ML است. $\psi(\cdot) = (\partial/\partial X)(\rho(\cdot))$ مشتق اول ρ نسبت به X_H است و به عنوان تابع نفوذ مطرح می شود. این تابع میزان تأثیر پذیری و یا بالعکس، قدرت تخمین گر را در برابر خطا مشخص می نماید. از جمله انتخاب های متداول برای ρ ، نُرم های L_1 و L_2 می باشند [۲]. با در نظر گرفتن نُرم L_2 یعنی، $\rho(x) = x^2$ ، خواهیم داشت؛ $\psi(x) = x$ که در این صورت تابع به صورت خطی با خطا رفتار کرده و سبب کاهش کارایی تخمین گر در برابر خطاهای بزرگ (مثلاً نقاط پرت) خواهد شد. با این حال، نُرم L_2 منجر به میانگین گیری می شود و برای کم کردن اثر خرابی های ناشی از نویز گوسی، موثر است. از سوی دیگر با انتخاب نُرم L_1 یعنی، $\rho(x) = |x|$ داریم؛ $\psi(x) = \text{sign}(x)$. در این حالت تخمین گر به علت اختصاص وزن مشابه (۱- یا ۱) و ثابت برای تمامی خطاها تفاوتی بین خطاهای بزرگی که اغلب به علت پرتی ها یا خطاهای مرحله ثبت ناشی می شود، با خطاهای کوچکی که مرتبط با نویز مشاهده های هستند، قائل نمی گردد. در نتیجه معیار خطای L_1 نسبت به L_2 ، تخمینگری با واریانس زیاد است. در نتیجه، استفاده از معیار خطایی که ترکیبی از مزایای دو نُرم L_1 و L_2 باشد و به عبارت دیگر، سهم خطاهای بزرگ را کاهش داده و در برابر

^۱ Outlier

$$\nabla \hat{X}_H^n = \left[\sum_{k=1}^K (DH_k F_k)^T \frac{a_k}{\sqrt{a_k^2 + R_k^2}} R_k \right] + \left[\sum_{l=-P}^P \sum_{m=-P}^P \alpha^{|l|+|m|} [I - S_x^{-l} S_y^{-m}] \frac{c}{\sqrt{c^2 + Z_n^2}} Z_n \right] \quad (9)$$

که در آن، $Z_n = \hat{X}_H^n - S_x^l S_y^m \hat{X}_H^n$ و $R_k = DH_k F_k \hat{X}_H^n - X_L^{(k)}$ ، S_x^{-l} و S_y^{-m} ترانزاده ماتریس‌های S_x^l و S_y^m هستند و اثر انتقال در جهت مخالف S_x^l و S_y^m را دارند. پارامتر c شدت جریمه گرادیان محلی را کنترل می‌کند. c به‌عنوان عددی ثابت که عملیات جریمه سوئیچ شیب از شدید به خفیف را انجام می‌دهد، در نظر گرفته می‌شود. در آزمایش‌ها، پارامتر λ برای بهترین نتایج بصری ممکن انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش بعدی، کارایی الگوریتم پیشنهادی را نمایش خواهد داد.

۵. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم SR

آزمایش‌های انجام‌شده در این بخش جهت ارزیابی و مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی و صرفاً بر روی تصاویر دریافتی از دوربین انجام شده است. در این حالت پارامترهای مورد نیاز برای مدل مشاهده تصویر، نظیر جابجایی بین قاب‌های کم وضوح (F_k) ، مات‌شدگی (H_k) و نویز اضافه‌شونده برای ما مجهول بوده و لازم است این پارامترها تخمین زده شوند. به منظور تخمین پارامتر F_k ، از روش ارائه‌شده در [۱۴]، استفاده شده است. این روش از رویکرد همبستگی فاز که روشی قوی در تخمین شیفت‌های کسری است، بهره گرفته است. همچنین فیلتر پایین‌گذر گوسی $5\% \times 5$ با واریانس معادل یک و میانگین صفر، برای مدل‌سازی H_k به کار گرفته و در نهایت نویز اضافه‌شونده نیز توسط روش مطرح‌شده در [۱۵] تخمین زده خواهد شد. پارامترها در روش پیشنهادی به صورت ثابت در تمامی آزمایش‌های، $\lambda=0.05$ ، $\alpha=0.5$ ، $P=2$ ، $\beta=2$ ، $c=5$ در نظر گرفته شده است. جهت پیاده‌سازی الگوریتم‌ها تعداد چهار قاب LR اخذ شده از هر یک از تصاویر HR شکل (۹-الف) بصورت تصادفی در FLASH ذخیره گردید. به‌طور مثال یک قاب اخذ شده از هر تصویر در شکل (۹-ب) نمایش داده شده است. هر یک از تصاویر دریافتی LR دارای اندازه 360×196 پیکسل هستند که با در نظر گرفتن ضریب افزایش مقیاس ۲ به 720×392 تبدیل خواهند شد. به‌منظور مقایسه بهتر عامل خطای داده به ترتیب با نرم L_1 ، نرم L_2 و روش پیشنهادی پیاده‌سازی و عامل منظم‌ساز نیز در هر سه حالت توسط BTV اعمال شده است.

در این بخش به منظور ارزیابی کمی تصویر نهایی و کارایی الگوریتم مورد استفاده از دو محک Q-Metric و CPBD^۲ که جزء

شدیدی را در جواب نهایی ایجاد خواهد کرد [۲]. بنابراین، در نظر گرفتن جمله‌ی تنظیم‌کننده برای به‌دست آوردن پاسخی پایدار، نیازی ضروری است. جمله تنظیم‌کننده معمولاً به صورت عامل اضافه‌شونده در کمینه‌سازی کلی رابطه (۱)، به‌صورت زیر ظاهر می‌شود:

$$\hat{X}_H = \arg \min_{X_H} \left(\rho(X_L^{(k)}, DH_k F_k X_H) + \lambda Y_R(X_H) \right) \quad (6)$$

که در آن $\rho(X_L^{(k)}, DH_k F_k X_H)$ همان عامل خطای داده، $Y_R(X_H)$ تابع هزینه منظم‌سازی و λ پارامتر منظم‌سازی است ($\lambda > 0$). از آنجایی که لبه‌ها دارای اطلاعات مهمی در تصویر هستند از میان جملات تنظیم‌کننده، به دنبال تنظیم‌کننده‌ای هستیم که علاوه بر ایجاد لبه‌هایی تیزتر، همواری را نیز در بافت تصویر نهایی حفظ نماید. الگوریتم تغییرات کل دوسویه (BTV)، نقشی کارآمد در حذف نویز و مات‌شدگی دارد که در [۴] برای اولین بار مورد استفاده قرار گرفته است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y_R(X_H) = \sum_{l=-P}^P \sum_{m=-P}^P \alpha^{|l|+|m|} \|X_H - S_x^l S_y^m X_H\| \quad (7)$$

که S_x^l و S_y^m عملگرهایی متناظر با جابجایی تصویر X_H به ترتیب با l و m پیکسل در جهات افقی و عمودی است. وزن α ، برای ایجاد اثر وزنی کاهشی روی مجموع جمله تنظیم‌کننده اعمال می‌شود. پارامتر P ، اندازه متناظر با کرنل فیلتر دو سویه را تعریف می‌کند. ضرایب کوچک α ضمن تیز نمودن لبه‌ها، نویز را نیز تقویت می‌کند و مقادیر بزرگ‌تر α به از بین بردن نویز کمک نموده ولی از سویی دیگر منجر به هموارسازی تصویر HR حاصل خواهد شد.

حال، هدف به دست آوردن تخمین \hat{X}_H در یک فرآیند تکرارشونده است تا تابع هزینه کل در رابطه (۶) مینیمم شود. از آنجایی که آرگومان رابطه (۶) محدب بوده و لذا مشتق‌پذیر است، استفاده از یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت پیاده‌سازی فرآیند تکرارشونده، امکان‌پذیر می‌گردد. با استفاده از روش بهینه‌سازی تندترین شیب^۱، تخمین HR جاری به وسیله تابع به‌روزرسانی ذیل هدایت می‌شود [۱۳]:

$$\hat{X}_H^{n+1} = \hat{X}_H^n - \beta \nabla \hat{X}_H^n, \quad n = 1, 2, \dots \quad (8)$$

n به تعداد تکرارها اشاره دارد، ∇ عامل مشتق‌گیر بوده و β گام بهینه‌سازی است. انتخاب مناسب گام β در سرعت همگرایی و زمان رسیدن به جواب مطلوب نقش موثری دارد. در نهایت با جایگذاری رابطه (۷) در رابطه (۶) و جانشانی عبارت حاصل در رابطه (۸) تخمین بعدی تصویر HR حاصل می‌شود. برای $\nabla \hat{X}_H^n$ خواهیم داشت:

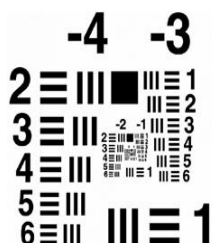
^۲ Cumulative Probability of Blur Detection (CPBD)

^۱ Steepest Descent (SD)

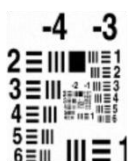
وضوح بالاتری دارند. این امر در قسمت بریده شده تصاویر که با بزرگنمایی نشان داده شده است، نمایان است. علت بهبود نسبی می تواند ناشی از انتخاب تطبیقی پارامتر آستانه هر قاب متناسب با خطای قاب باشد. نتایج حاصل بر مبنای ملاک ارزیابی بصری و معیارهای کمی (جدول ۲)، عملکرد بهبود یافته الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر روش ها را نمایش می دهد.

جدول ۲. نتایج معیارهای کمی تصاویر تحت آزمایش

نام تصویر	روش مورد استفاده	CPBD	Q-Metric
میدان آزادی	درونیابی دوخطی	۰/۴۷۶۳	۱۵/۵۸۰۱
	$L_2+BTv[17]$	۰/۴۹۲۵	۱۶/۲۰۸۳
	$L_1+BTv[4]$	۰/۴۷۸۲	۱۸/۰۷۳۲
حافظیه	روش پیشنهادی	۰/۵۱۵۳	۲۰/۲۴۸۱
	درونیابی دوخطی	۰/۳۸۴۹	۲۰/۵۲۳۶
	$L_2+BTv[17]$	۰/۴۶۱۲	۲۱/۱۰۲۶
اعداد	$L_1+BTv[4]$	۰/۵۰۸۱	۲۶/۸۳۳۸
	روش پیشنهادی	۰/۶۱۹۷	۲۷/۹۰۹۹
	درونیابی دوخطی	۰/۳۱۸۶	۱۲۶/۴۷۳۵
	$L_2+BTv[17]$	۰/۵۴۰۴	۱۳۲/۶۳۵۴
	$L_1+BTv[4]$	۰/۶۰۲۵	۱۴۵/۶۶۲۹
	روش پیشنهادی	۰/۶۹۱۸	۱۵۲/۶۸۷۸



(الف)



(ب)

شکل ۹. (الف) تصویر HR اصلی، (ب) نمونه ای از تصاویر LR ذخیره شده

معیارهای ارزیابی در فرآیندهای فاقد تصویر مرجع هستند استفاده می شود. معیار CPBD که به عنوان شاخص تیز بودن لبه های تصویر و به عبارت بهتر، نشانگر مات شدگی کمتر تصویر، شناخته می شود، نتیجه ای در بازه [۰-۱] ایجاد می کند که بزرگ تر بودن این مقدار، معرف کیفیت بهتر تصویر است. CPBD به صورت زیر تعریف می شود [۱۶]:

$$P_{BLUR} = P(e_i) = 1 - \exp\left[-\frac{w(e_i)}{w_{JNB}(e_i)}\right]^\delta \quad (10)$$

$$CPBD = P(P_{BLUR} \leq P_{JNB}) = \sum_{P_{BLUR}=0}^{P_{BLUR}=P_{JNB}} P(P_{BLUR}) \quad (11)$$

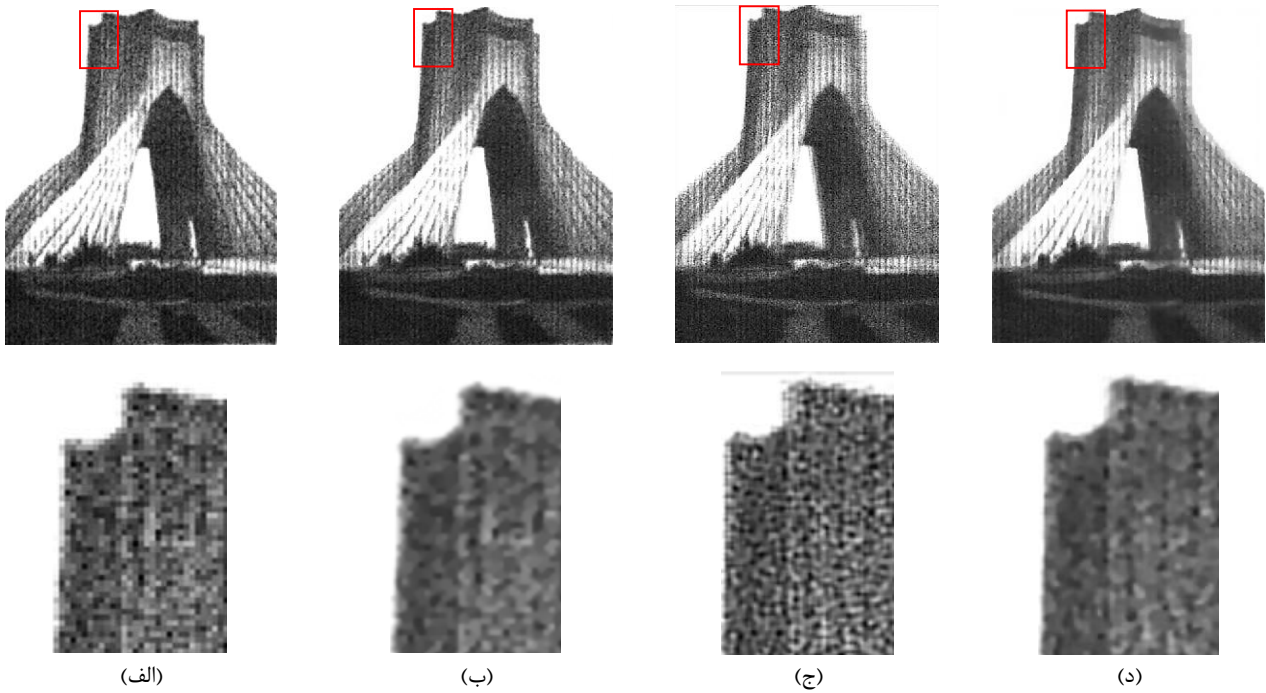
که در آن، $w(e_i)$ پهنای لبه e_i و $w_{JNB}(e_i)$ پهنای لبه ای است که مات شدگی در آن از لحاظ بصری قابل تشخیص است و با توجه به هیستوگرام تصویر، در بازه ۳ تا ۵ تغییر می کند. P_{BLUR} و P_{JNB} نیز به ترتیب احتمال مات شدگی و مات شدگی قابل تشخیص در لبه ها هستند. δ ثابت و برابر ۳/۶ فرض شده است. معیار Q-Metric نیز بر اساس تجزیه مقدار تکین ماتریس گرادیان تصویر به ارزیابی میزان تیز بودن و کنتراست تصویر می پردازد. این معیار در تصاویر آغشته به نویز و مات شدگی عملکرد مطلوبی از خود نشان می دهد. بزرگی مقدار این شاخص نمایانگر تیز تر بودن لبه های تصویر و کنتراست بالاتر آن است و بصورت زیر توصیف می گردد [۱۶]:

$$Q-Metric = s_1 \frac{s_1 + s_2}{s_1 - s_2} \quad (12)$$

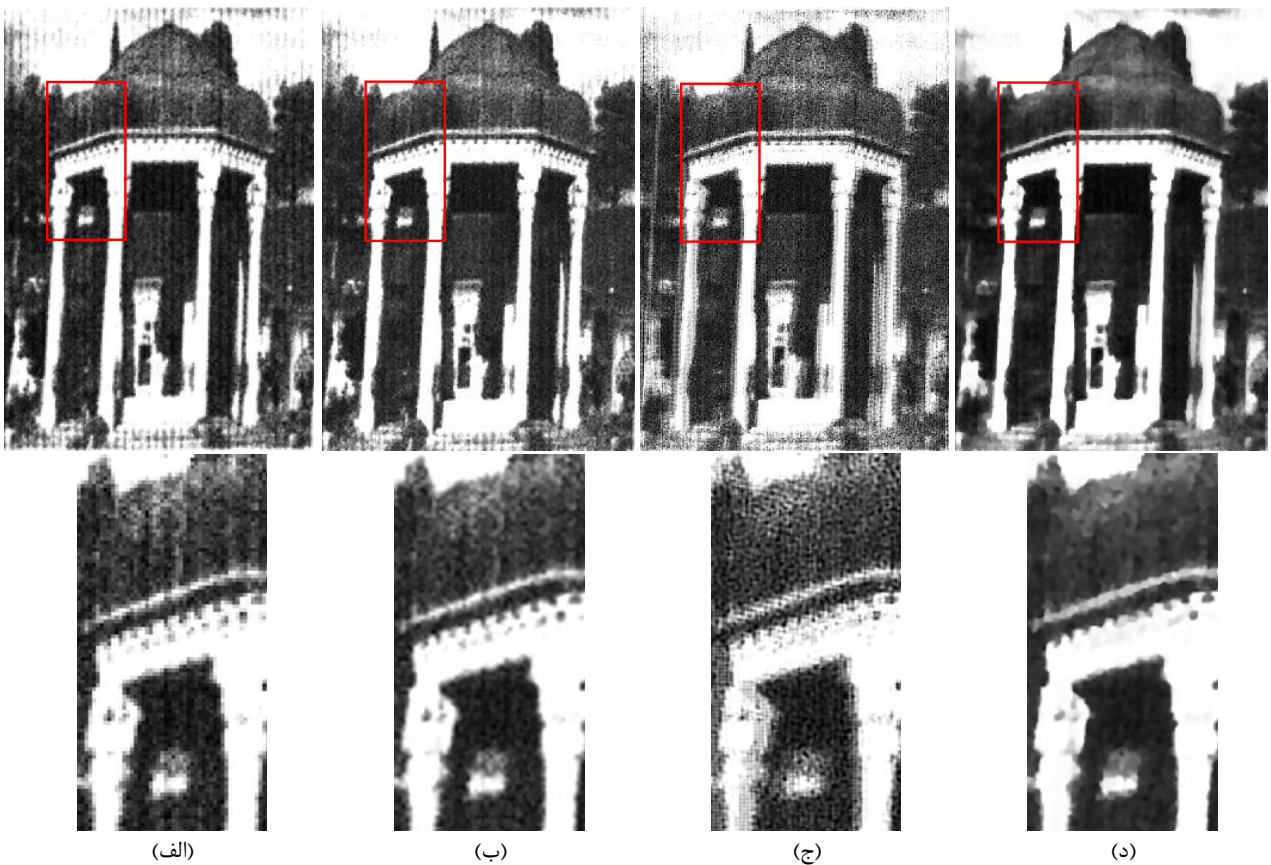
که در آن، s_1 و s_2 مقادیر تکین یک قطعه از تصویر را به ترتیب در جهت گرادیان و در جهت عمود بر آن مشخص می کنند که نمایشگر انرژی موجود، در هر یک از جهات مذکور می باشند.

همان طور که در شکل های (۱۰-۱۲) ملاحظه می شود درون یابی دوخطی^۱ به عنوان روشی پایه در درونیابی، قادر به بازسازی جزئیات نبوده و تصویر کیفیت پایین تری نسبت به سایر روش ها دارد. به عبارت دیگر در این روش اثر بلوک شدگی در لبه ها و همچنین غیریکنواختی در کل تصویر، خصوصاً در قسمت بزرگنمایی شده مشهودتر است. در روش $L_2+BTv[17]$ ، کیفیت تصویر حاصل L_2+BTv به علت تقویت نویز مطلوب نیست. در این روش جزئیات (مخصوصاً در شکل (۱۲) که شامل اعداد و جزئیات قابل تمایز است) از بین رفته و عملکرد ضعیف تری نسبت به سایر روش ها ارائه می دهد. در روش $L_1+BTv[4]$ ، در عین حال که تصویر هموارتر شده، لبه ها اندکی مشخص ترند و تصویر از لحاظ بصری نسبت به دو روش دیگر مطلوب تر است. در نهایت نتایج حاصل از روش پیشنهادی نیز در شکل های (۱۰-۱۲) آورده شده است. ملاحظه می گردد علاوه بر حفظ یکنواختی در کل تصویر بافت تصویر بیشتر حفظ شده و در حذف نویز موفق تر عمل نموده است. همچنین لبه ها مشخص تر شده و جزئیات

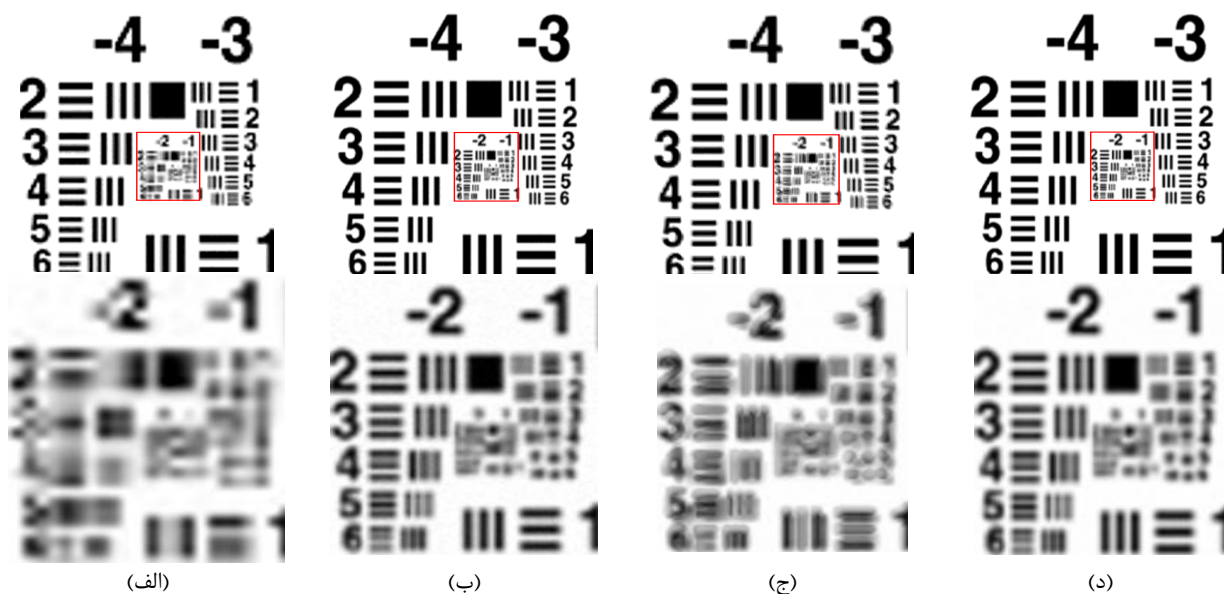
¹ Bilinear Interpolation



شکل ۱۰. تصاویر بازسازی‌شده میدان آزادی، (الف) درون‌یابی دوخطی، (ب) روش مرجع [۴]، (ج) روش مرجع [۱۷] و (د) روش پیشنهادی



شکل ۱۱. تصاویر بازسازی‌شده حافظیه، (الف) درون‌یابی دوخطی، (ب) روش مرجع [۴]، (ج) روش مرجع [۱۷] و (د) روش پیشنهادی



شکل ۱۲. تصاویر بازسازی شده اعداد، (الف) درون‌یابی دوخطی، (ب) روش مرجع [۴]، (ج) روش مرجع [۱۷] و (د) روش پیشنهادی

۶. نتیجه‌گیری

یکی از چالش‌های اصلی در حوزه پدافند غیرعامل دست‌یابی به اطلاعات مکانی صحیح و دقیق از عوارض زمینی است. تصویربرداری ماهواره‌ای ضمن کمک به این موضوع، به‌طور طبیعی با داشتن تفکیک‌پذیری بالاتر در تصاویر، امکان تفسیر و پردازش بهتر اطلاعات اولیه را فراهم می‌سازد. در این مقاله فرآیند طراحی و ساخت یک سیستم تصویربرداری جاروبی با استفاده از یک CCD خطی، به‌نحوی که امکان افزایش تفکیک‌پذیری تصویر نهایی را فراهم سازد، ارائه گردید. بدین منظور در قدم اول مطابق با اهداف تعیین‌شده ابتدا یک نمای کلی و سپس یک طراحی جزئی از سخت‌افزار بیان شد. در قدم دوم و پس از مونتاژ طرح پیشنهادی به راه‌اندازی و آزمون گام به گام سخت‌افزار پرداخته شد. نهایتاً در قدم سوم با هدف اصلی افزایش وضوح و با توجه به ماهیت جاروبی تصویربرداری اقدام به اعمال الگوریتم‌های پردازشی فراتفکیک‌پذیری بر روی تصاویر خروجی سیستم شد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند با به‌کارگیری روش‌های نرم‌افزاری امکان دسترسی به تفکیک‌پذیری‌های بالاتر از یک سخت‌افزار ثابت و به نوعی غلبه نسبی بر محدودیت آن در تفکیک‌پذیری تصویر امکان‌پذیر است. نتایج حاصل بهبود عملکرد الگوریتم پیشنهادی را نسبت به دیگر روش‌ها نشان می‌دهد.

۷. مراجع

- [4] Farsiu, S.; Robinson, M.; Elad, M.; Milanfar, P. "Fast and Robust Multiframe Super Resolution"; IEEE Trans. Image Process 2004, 13, 1327-1344.
- [5] Schultz, R. R.; Stevenson, R. L. "Extraction of High-Resolution Frames from Video Sequences"; IEEE Trans. Image Process 1996, 5, 996-1011.
- [6] Hardie, R. C.; Barnard, K. J.; Armstrong, E. E. "Joint MAP Registration and High-Resolution Image Estimation Using a Sequence of Undersampled Images"; IEEE Trans. Image Process 1997, 6, 1621-1633.
- [7] Babacan, S. D.; Molina, R.; Katsaggelos, A. K. "Variational Bayesian super resolution"; IEEE Trans. Image Process 2011, 20, 984-999.
- [8] Zeng, X.; Yang, Y. "A Robust Multiframe Super-Resolution Algorithm Based on Half-Quadratic Estimation with Modified BTV Regularization"; Digital Signal Process 2013, 23, 98-109.
- [9] Ames, B. "FPGAs and DSPs Square Off in Military Designs"; Military & Aerospace Electronics 2004.
- [10] BenEzra, M.; Zomet, A.; Nayar, S. K. "Video Super-Resolution Using Controlled Sub-pixel Detector Shifts"; IEEE Transaction on Pattern Analysis & Machine Intelligence 2005, 27, 977-998.
- [11] Maronna, R.; Martin, D.; Yohai, V. "Robust Statistics: Theory and Methods"; Wiley Press, 2006.
- [12] Vrigkas, M.; Nikou, C.; Kondi, L. P. "A Fully Robust Framework for MAP Image Super-Resolution"; IEEE Int. Conference on Image Process 2012, 2225-2228.
- [13] Bahy, R.; Salma, G.; Mahmoud, T. "Registration of Multi-Focus Images Using Hough Transform"; Proc. of 29th NRSC, 2012.
- [14] Setiyono, B.; Hariadi, M.; Purnomo, M. "Survey of Superresolution Using Phased Based Image Matching"; J. Theor. Appl. Inform. Tech. 2012, 43, 245-253.
- [15] Immerkær, J. "Fast Noise Variance Estimation"; Comp. Vis. Image Understanding 1996, 64, 300-302.
- [16] Zhang, H.; Yang, Z.; Zhang, L.; Shen, H. "Super-Resolution Reconstruction for Multi-Angle Remote Sensing Images Considering Resolution Differences"; Remote Sensing 2014, 6, 637-657.
- [17] Panagiotopoulou, A.; Anastassopoulos, V. "Super-Resolution Image Reconstruction Techniques: Trade-Offs Between the Data-Fidelity and Regularization Terms"; Information Fusion 2012, 13, 185-195.
- [1] Balli, G. B. "Micro-Satellite Camera Design"; M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2003.
- [2] Milanfar, P. "Super-Resolution Imaging"; CRC Press, 1st Edition, 2011.
- [3] Su, H.; Tang, L.; Wu, Y.; Tretter, D. "Spatially Adaptive Block-Based Super-Resolution"; IEEE Trans. Image Process 2012, 21, 1031-1045.