



Terahertz Single-Pixel Imaging Based on Compressed Sensing and Mechanical Mask

R. HashemiSiavashani, M. Roueinfar*^{ORCID}, A. Chamanmotlagh, M. Salmanian

*Instructor of Imam Hossein University, Tehran, Iran

(Received: 2024/04/25, Revised: 2024/07/16, Accepted: 2024/08/03, Published: 2024/08/28)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.1.4>

Abstract

Terahertz single-pixel imaging is an emerging technology that has received considerable attention in recent years for the purpose of imaging targets. Single-pixel terahertz imaging has several advantages that are critical for medical, industrial, and especially security applications. This method is a novel approach that provides the possibility of acquiring a terahertz image of the target, instead of using expensive terahertz cameras, with only a single-pixel terahertz detector. The main idea behind this imaging technique is to successively radiate the terahertz beam to the object and measure and record the output voltage of the single-pixel terahertz detector for each terahertz beam irradiation. Each time the terahertz beam is emitted, using different masks or a uniquely patterned mask, the terahertz beam is spatially modulated and then directed onto the object. Therefore, the object is illuminated repeatedly with a different pattern of terahertz radiation, and the detector voltage values vary for each mask or each irradiation instance. By recording and processing the values of the single-pixel detector and using the compressed sensing technique, the image of the object can be reconstructed. One of the most important challenges of single-pixel terahertz imaging is imaging speed. In this paper, a mechanical mask is used due to its availability and lower cost. In the simulation results, the recovered images are compared with the original image using MSE and SSIM metrics. The evaluation results indicate the success of this single-pixel imaging approach with a mechanical mask and a compressed sensing reconstruction algorithm.

Keywords: Terahertz imaging, Single-pixel imaging, Spatial light modulator, Compressed sensing

Cite this article: R. HashemiSiavashani, M. Roueinfar, A. Chamanmotlagh, M. Salmanian “Terahertz Single-Pixel Imaging Based on Compressed Sensing and Mechanical Mask” Radar, vol.12 , no.1 , pp.23-35 , .

DOR:

© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

*Corresponding Author Email: mrooein@ihu.ac.ir



تصویربرداری تک پیکسل ترا هرتز مبتنی بر سنجش فشرده و ماسک مکانیکی

رضا هاشمی سیاوشانی، محمد روئین فر^{*}، ابوالفضل چمن مطلق، مهدی سلمانیان

۱-کارشناسی ارشد، ۲-مربی، ۳-دانشیار، ۴-کارشناسی ارشد، دانشگاه امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳، انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.1.4>

چکیده

تصویربرداری تک پیکسلی ترا هرتز فناوری نوظهوری است که در سال‌های اخیر جهت تصویربرداری اهداف مدنظر مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. تصویربرداری تک پیکسلی ترا هرتز دارای چندین مزیت است که برای کاربردهای پزشکی، صنعتی و به‌ویژه در زمینه‌های امنیتی قابل توجه است. این روش، ایده نوآورانه‌ای است که امکان دستیابی به تصویر ترا هرتز هدف را به‌جای استفاده از دوربین‌های ترا هرتز گران‌قیمت، تنها با یک آشکارساز تک پیکسل ترا هرتز فراهم می‌کند. ایده اصلی در این روش تصویربرداری، تابش متوالی پرتو ترا هرتز به جسم و اندازه‌گیری و ثبت ولتاژ خروجی آشکارساز تک پیکسل ترا هرتز به ازای هر بار تابش پرتو ترا هرتز است. در هر بار تابش پرتو ترا هرتز، با استفاده از ماسک‌های مختلف یا هر ماسک که الگوی منحصربه‌فردی دارد پرتو ترا هرتز مدوله مکانی شده و سپس به جسم می‌تابد. بنابراین جسم هر بار با یک الگوی متفاوتی از تابش پرتو ترا هرتز، روشن می‌شود و مقادیر ولتاژ آشکارساز به ازای هر ماسک یا هر بار تابش متفاوت خواهد بود. با ثبت و پردازش مقادیر آشکارساز تک پیکسل و با بهره‌مندی از روش سنجش فشرده، نهایتاً تصویر جسم بازیابی می‌شود. یکی از مهم‌ترین چالش‌های تصویربرداری ترا هرتز تک پیکسل، سرعت تصویربرداری است. در این پژوهش روی طراحی ساده و هزینه پایین ماسک طراحی شده در مقایسه با مقالات دیگر و البته الگوریتم به‌کاربرده شده است و همچنین در مقابل هزینه بسیار بالای آشکارسازهای ارائه‌ای ترا هرتز، با این روش صرفاً با یک پیکسل بازسازی تصویر انجام شده است. علاوه بر این نتایج شبیه‌سازی تصاویر بازیابی شده با تصویر اصلی با معیار MSE و $SSIM$ مقایسه می‌شود که نتایج ارزیابی حاکی از موفقیت این روش تصویربرداری تک پیکسل با ماسک مکانیکی و الگوریتم پردازشی سنجش فشرده است.

کلیدواژه‌ها: تصویربرداری ترا هرتز، تصویربرداری تک پیکسل، مدولاتور مکانی نور، سنجش فشرده

۱. مقدمه

استفاده می‌شود، با کمک این فناوری می‌توان از افراد تصاویری با کمک امواج الکترومغناطیسی به دست آورد. امواج ترا هرتز به دلیل طول موج کوتاه‌تر قدرت تفکیک بهتری دارند. با قابلیت نفوذ امواج ترا هرتز نسبت به اشعه ایکس در اجسامی مانند پوشاک و لباس می‌توان از اشیاء فلزی و همین‌طور اجسام غیرفلزی پنهان شده در داخل لباس تصویر تهیه کرد که با روش‌های معمول قابل شناسایی نیستند. مزیت روش تصویربرداری با امواج ترا هرتز، ناچیز بودن انرژی فوتون‌ها نسبت به امواج ایکس بوده و بنابراین خطر جهش انرژی در سلول‌ها و ایجاد سلول‌های سرطانی در آن وجود ندارد [۳].

معمولاً تصویربرداری در باندهای مختلف مرئی و نامرئی مانند

طیف ترا هرتز^۱ بر اساس پیشوند T (Tera) نام‌گذاری شده و می‌توان این طیف را از منظر فناوری‌های منحصربه‌فرد مورد نیاز برای تولید و تشخیص مواد تعریف کرد. کاربردهای گسترده‌ای از جمله شناسایی مواد، غربالگری‌های امنیتی، تصویربرداری‌های پزشکی، صنعتی و حتی مرمت آثار هنری مواردی هستند که جزء توانمندی‌های تصویربرداری ترا هرتز قرار می‌گیرند که تحول قابل توجهی در عرصه تصویربرداری ایجاد کرده است [۲، ۱].

در روش‌های معمول برای کنترل افراد و پایش امنیتی در اماکن پررفت‌وآمد و حساس معمولاً از تصویربرداری با اشعه ایکس^۲¹ Terahertz.² X-ray.

استاد: هاشمی سیاوشانی، رضا، روئین فر، محمد، چمن مطلق، ابوالفضل، سلمانیان، مهدی "تصویربرداری تک پیکسل ترا هرتز مبتنی بر

سنجش فشرده و ماسک مکانیکی"، رادار، (۱)۱۲، ۳۵-۲۳، ۱۴۰۳.

به دقت بسیار بالای دستگاه برش و اثرات پراش از لبه‌های تیز پیکسل‌های مربعی، پیکسل‌های هر ماسک به شکل دایره در نظر گرفته شده که نسبت به کارهای مشابه یک رویکرد جدید است.

۲. تصویربرداری تک پیکسل

برای تشکیل تصویر با آشکارساز تک پیکسل، معمولاً به منظور کاهش اثر پرتو عبوری یا بازتابی از جسم، ابتدا از مدولاسیون مکانی نور استفاده می‌شود. با این کار اثر بعضی از پیکسل‌های جسم در آشکارساز تک پیکسل حذف خواهد شد. با افزایش تعداد دفعات تصویربرداری و به عبارت دیگر با افزایش تعداد اسنپ‌شات‌ها^۳، هر بار الگوی مدولاسیون مکانی نور تغییر می‌کند و هر بار اثرات تعداد مشخصی از پیکسل‌ها در آشکارساز تک پیکسل ثبت می‌شود. با استفاده از الگوی مکانی نور^۴ و مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی آشکارساز تک پیکسل در هر عکس لحظه‌ای^۵ و بهره‌مندی از روش‌های پردازشی، تصویر جسم باز یابی خواهد شد [۱۰, ۹, ۸, ۷].

روش جاروب مکانیکی روشی ارزان‌تر ولی کندتر نسبت به سایر روش‌ها است [۱]. با توجه به ارزان‌قیمت‌تر بودن این روش یک گیرنده تک پیکسل نسبت به یک ارائه‌ای از آن‌ها در باند ترا هر تزی بسیار مناسب به نظر می‌رسد. سامانه‌های تک پیکسلی مبتنی بر ماسک با استفاده از ماسک‌هایی که از برخی پیکسل‌های آن امواج ترا هر تزی عبور می‌کند و از برخی پیکسل‌ها امواج عبور نمی‌کنند، و سپس با اندازه‌گیری‌های مختلف که با تغییر الگوی روی ماسک انجام می‌دهیم تصویر را بازسازی می‌کنند. تعداد اندازه‌گیری‌ها در این روش می‌تواند کمتر یا مساوی تعداد پیکسل‌ها باشد. در صورتی که تعداد اندازه‌گیری‌ها کمتر از تعداد پیکسل‌ها باشد باید با استفاده از الگوریتم‌های حسگری فشرده^۶ تصویر را بازسازی کرد.

تشکیل یک تصویر کامل با استفاده از آشکارساز تک پیکسلی، از فن تصویربرداری تک پیکسلی با SLM های مدوله‌کننده سریع، الکترونیک سرعت بالا و قابلیت‌های محاسباتی ریاضی قدرتمند می‌تواند صورت بگیرد. برای درک بهتر این موضوع شکل ۲-۷ مقایسه‌ای بین آشکارساز تک پیکسلی با آشکارساز N پیکسلی را نشان می‌دهد که استفاده از یک پیکسل در N اندازه‌گیری در مقابل یک اندازه‌گیری با N پیکسل است با هم در چه رابطه‌ای هستند. با این مقایسه، در تصویربرداری تک پیکسلی، زمان تصویربرداری با ضریبی از T کاهش پیدا می‌کند و طبق شکل تصویربرداری تک پیکسلی با انتخاب یک روش و سامانه مناسب، می‌تواند در زمان کوتاه‌تری نیز انجام شود [۱۱].

مادون قرمز و فرابنفش با استفاده از CCD^۱ انجام می‌گیرد. آرایه‌ای از حسگرهای آشکارساز است که نور را در ناحیه طیفی معینی، به تصویر تبدیل کرده و تصویر خروجی را به صورت دیجیتال که مجموعه‌ای از میلیون‌ها پیکسل است تبدیل می‌کند. ساخت آشکارسازهای آرایه‌ای CCD در نواحی طیفی ترا هر تزی بسیار پرهزینه و گران‌قیمت است. با توجه به این محدودیت‌ها، تصویربرداری تک پیکسلی روشی است که برای گرفتن تصاویر با استفاده از یک آشکارساز تک پیکسل (فوتودیود) و یک سری مدولاتور مکانی نور^۲ SLM (ماسک) بدون نیاز به استفاده از CCD انجام می‌شود. مزیت این روش آن است که می‌توان بدون تحمیل هزینه‌های گزاف، ساختار مشابهی را به عنوان جایگزین مناسب برای CCD ترا هر تزی و آرایه‌ها و دوربین‌های چند پیکسلی بکار برد. ضمن آنکه در بعضی موارد آشکارسازهای تک پیکسلی از دوام بیشتری نیز برخوردار هستند [۴]. هر چند تصویربرداری ترا هر تزی به روش تک پیکسل منجر به افزایش پیچیدگی محاسباتی خواهد شد اما آشکارسازهای تک پیکسل ترا هر تزی به مراتب هزینه پایین‌تری نسبت به CCD های ترا هر تزی دارد.

اولین بار در سال ۲۰۰۸ از مدارات چاپی برای پیاده‌سازی ماسک (مدولاتور مکانی نور) استفاده شد [۵]. در این کار از صفحات مدارات چاپی که در روی آن یک الگوی رندوم چاپ شده است، به عنوان ماسک استفاده شده است. در این کار ۶۰۰ ماسک مختلف با الگوهای مختلف ساخته شده است. اشکالی که به این کار وارد است زمان بر بودن تعویض مکانیکی ماسک‌ها است. در واقع عوض کردن ۶۰۰ ماسک به صورت مکانیکی برای دستیابی به تصویر این روش را برای کاربردهای واقعی، غیر عملی می‌کند.

برای افزایش سرعت تعویض مکانیکی ماسک‌ها، برخی گروه‌ها از یک دیسک چرخان به عنوان ماسک در تصویربرداری ترا هر تزی استفاده کردند. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۰ گروهی در دانشگاه لیورپول از این روش برای تصویربرداری ترا هر تزی استفاده کردند [۶]. در تقسیم‌بندی این دسته از SLM ها بانام ماسک‌های مکانیکی نامیده شد.

نوآوری این مقاله ارائه یک روش تصویربرداری ترا هر تزی تک پیکسلی مبتنی بر سنجش فشرده و استفاده از یک ماسک مکانیکی ارزان‌قیمت است. همچنین طراحی و ساخت یک ماسک مکانیکی با الگوی دوسطحی تصادفی با توزیع برنولی در ابعاد ۲۰*۱۰۰ پیکسل که ۸۱ ماسک مکانیکی با همبستگی متقابل کوچک تولید کرده و در چیدمان آزمایشگاهی تصویربرداری ترا هر تزی تک پیکسلی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به مشکل بودن سوراخ‌کاری پیکسل‌ها با شکل مربعی، هزینه بالا و نیاز

^۳ Snapshot.

^۴ SLM.

^۵ Snapshot.

^۶ Compressed sensing.

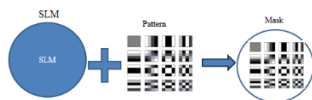
^۱ Charge-Coupled Device.

^۲ Spatial Light Modulation.

در تصویربرداری ترا هرترز تک پیکسلی، استفاده از ایده سنجش فشرده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تئوری و نتایج سنجش فشرده نشان می‌دهد که یک سیگنال می‌تواند از تعداد محدودی از مشاهدات، با بازنگری تئوری نمونه‌برداری استاندارد نایکوئیست بازسازی شود یعنی در این ایده نشان داده می‌شود که با نرخ کمتر از نرخ نمونه‌برداری نایکوئیست می‌توان به تصویر مدنظر دست‌یافته به گونه‌ای با این کار باعث پایین آوردن حجم داده‌های دریافتی شده و در نتیجه حافظه کمتری جهت ذخیره‌سازی داده‌ها نیاز است. این ایده از یک معماری جدید همراه با استفاده از یک آشکارساز تک پیکسلی برای ساخت یک سیستم تصویربرداری مبتنی بر سنجش فشرده پیاده شد. در چنین این سامانه تصویربرداری از یک مدولاتور مکانی نور یا SLM استفاده می‌گردد این مدولاتور وسیله‌ای است که می‌تواند میان جسم و منبع نور ارسالی یا جسم و آشکارساز تک پیکسلی قرار گیرد در اینجا یا نور مدوله‌شده‌ای از منبع به سمت جسم ارسال می‌کند یا پرتو خارج‌شده از صحنه را مدوله می‌نماید و مشاهدات حاصل را در آشکارساز جمع‌آوری می‌کند [۱۱].

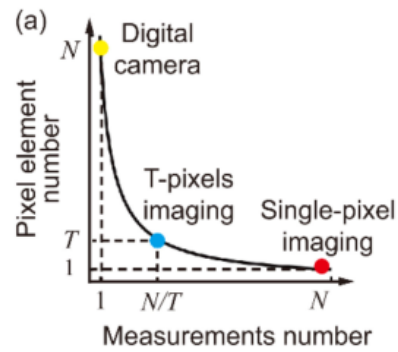
۲-۱ مدولاتور مکانی نور

مدولاتور مکانی نور (SLM) بستر سخت‌افزاری است که الگوی طراحی شده را بر روی نور ورودی، پیاده می‌کند. در واقع بسته به مکانیسم عملکرد مدولاتور با اعمال یک الگوی مشخص به سمت مدولاتور، نور ورودی را بر روی آن کانونی یا موازی شده می‌نماید و متناسب با الگوی ماسک، مدوله می‌شود به طوری که با مشاهده پروفایل نور در خروجی SLM متوجه مدولاسیون پرتو نور با استفاده از الگوی کامپیوتری خواهیم شد. SLM ها بسته به اجزا تشکیل دهنده، جنس و نحوه کار تقسیم‌بندی می‌شوند که شامل ماسک‌های مکانیکی، 1 DMD، 2 LCD، 3 LCOS، 4 LED و Meta Material است که به‌طور گسترده‌ای در دستگاه‌های تصویربرداری تک پیکسل مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۳ بلوک دیاگرام کلی یک ماسک نوری را نشان می‌دهد.



شکل ۳: بلوک دیاگرام ماسک.

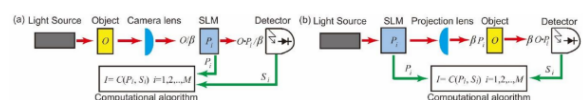
آن گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود تفاوت ماسک‌های مختلف در سیستم تصویربرداری، به تفاوت آن در SLM یا الگوهای به‌کارگرفته شده برمی‌گردد. الگوهای مورد استفاده شامل طیف متنوعی از ماتریس‌های مختلف بوده که تعدادی از این الگوها



شکل ۱: مقایسه روش آشکارساز تک پیکسلی با آشکارساز چند پیکسلی [۱۱].

تصویربرداری تک پیکسلی با دو معماری تصویربرداری با منبع نوری یکسان در شکل ۲ نشان داده شده است. (چپ) انعکاسی: ابتدا جسم توسط منبع نور روشن می‌شود، سپس توسط عدسی پرتوهای واگرا شده به سمت صفحه کانونی هدایت می‌شوند، تا جایی که به مدولاتور مکانی نور برخورد می‌کند، مدولاتور مکانی نور تصویر را با ماسک‌های مختلف مدوله می‌کند و در آخر شدت نور منعکس شده یا عبوری توسط یک آشکارساز تک پیکسلی اندازه‌گیری می‌شود در پایان نیز اندازه‌گیری‌های به‌دست آمده توسط یک الگوریتم محاسباتی که در طراحی ماسک‌ها استفاده شده برای بازسازی تصویری از جسم استفاده می‌گردد. (راست) عبوری: در این روش تصویربرداری، جسم توسط نور توزیع شده و ساختار تولیدشده از ماسک‌های مختلف در یک SLM و هدایت آن توسط عدسی به هدف روشن می‌شود و سپس شدت نور منتقل شده توسط یک آشکارساز تک پیکسلی اندازه‌گیری می‌شود. در پایان با مشاهدات متوالی با الگوهای متفاوت که توسط الگوریتم‌های مختلف این الگوها ساخته می‌شوند و در هنگام ساخت بر روی ماسک‌ها بارگذاری می‌گردند اندازه‌گیری‌های لازم انجام می‌شود و با پردازش‌های بعدی بر روی داده، امکان بازیابی تصویر صحنه مدنظر را فراهم می‌سازد [۱۱].

توضیح بیشتر آن که بعد از تمرکز پرتوهای نوری مدوله‌شده بر روی آشکارساز تک پیکسل از یک مبدل دیجیتال برای دستیابی به داده دیجیتال از آشکارساز تک پیکسل استفاده شده است. توجه به این نکته لازم است که SLM و هدف قابلیت تغییر به‌طور کامل را دارند. اگر SLM قبل از هدف قرار گیرد، گفته می‌شود که پرتو در روشنایی مدوله‌شده و اگر SLM بعد از هدف قرار گیرد، گفته می‌شود که طرف آشکارساز مدوله‌شده است.



شکل ۲: چیدمان‌های تصویربرداری تک پیکسلی ترا هرترز [۱۱].

¹ Digital Micro Mirror Device (DMD).

² Liquid Cristal Device (LCD).

³ Liquid Cristal On Silicon (LCOS).

⁴ Light Emitting Diode (LED).

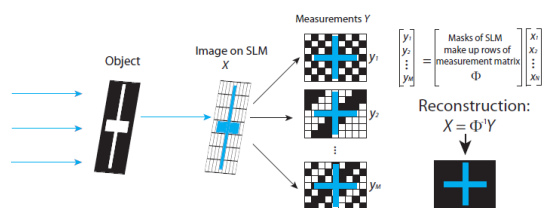
شامل: الگوی دودویی^۱، تصادفی^۲، فوریه، تبدیل کسینوسی گسسته (DCT)^۳، هادامارد، موجک^۴ و ماتریس گوسی^۵ است.

از لحاظ تاریخی، زمینه تصویربرداری تک پیکسلی ترا هر تزی تقریباً بلافاصله پس از اولین دوربین تک پیکسلی مبتنی بر CS در سال ۲۰۰۶ برای نور مرئی با استفاده از دستگاه میکرو آینه دیجیتال کنترل شده با رایانه (DMD) برای مدولاسیون مکانی نشان داده شده آغاز شد [۵]. با این حال برای ترا هر تزی هیچ راه حل جایگزینی برای مدولاسیون مکانی نور در حال حاضر وجود ندارد. اگرچه کنترل مکانی (سطح پیکسل) پرتوهای ترا هر تزی محدوده تحقیقاتی فعال در زمینه فرا مواد است [۱، ۲]، مدولاتورهای ترا هر تزی همچنان دست و پاگیر، پیچیده و گران هستند. علی‌رغم نزدیک به یک دهه تحقیق در این زمینه، چالش فنی اصلی برای تصویربرداری تک پیکسلی ترا هر تزی توانایی تولید مدولاتورهای دقیق با سرعت بالا است.

انتخاب روش مناسب برای مدولاسیون مکانی نور در طیف ترا هر تزی، یکی از مهم‌ترین عوامل در تصویربرداری تک پیکسلی ترا هر تزی است. مدولاسیون مستقیم پرتو ترا هر تزی روشی است که در آشکارسازی تک پیکسلی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. ماسک‌های مکانیکی یکی از انواع مدولاسیون مکانی نور است که می‌تواند برای طیف ترا هر تزی مورد استفاده قرار گیرد. این نوع ماسک‌ها بر اساس الگوی تعریف شده بر روی صفحات فلزی یا بردهای PCB و یا هر ساختار دیگر قابل پیاده‌سازی هستند. این ماسک‌ها در مسیر پرتو ترا هر تزی قرار می‌گیرند و به‌عنوان مدوله‌کننده پرتو عمل می‌کنند که نمونه‌ی این ماسک‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

انتخاب روش مناسب برای مدولاسیون مکانی نور در طیف ترا هر تزی، یکی از مهم‌ترین عوامل در تصویربرداری تک پیکسلی ترا هر تزی است. مدولاسیون مستقیم پرتو ترا هر تزی روشی است که در آشکارسازی تک پیکسلی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. ماسک‌های مکانیکی یکی از انواع مدولاسیون مکانی نور است که می‌تواند برای طیف ترا هر تزی مورد استفاده قرار گیرد. این نوع ماسک‌ها بر اساس الگوی تعریف شده بر روی صفحات فلزی یا بردهای PCB و یا هر ساختار دیگر قابل پیاده‌سازی هستند. این ماسک‌ها در مسیر پرتو ترا هر تزی قرار می‌گیرند و به‌عنوان مدوله‌کننده پرتو عمل می‌کنند که نمونه‌ی این ماسک‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

انتخاب روش مناسب برای مدولاسیون مکانی نور در طیف ترا هر تزی، یکی از مهم‌ترین عوامل در تصویربرداری تک پیکسلی ترا هر تزی است. مدولاسیون مستقیم پرتو ترا هر تزی روشی است که در آشکارسازی تک پیکسلی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. ماسک‌های مکانیکی یکی از انواع مدولاسیون مکانی نور است که می‌تواند برای طیف ترا هر تزی مورد استفاده قرار گیرد. این نوع ماسک‌ها بر اساس الگوی تعریف شده بر روی صفحات فلزی یا بردهای PCB و یا هر ساختار دیگر قابل پیاده‌سازی هستند. این ماسک‌ها در مسیر پرتو ترا هر تزی قرار می‌گیرند و به‌عنوان مدوله‌کننده پرتو عمل می‌کنند که نمونه‌ی این ماسک‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: فرآیند تصویربرداری تک پیکسلی که در آن از مدولاسیون مکانی برای تشکیل تصویر استفاده شده است [۷].

درستی تصویربرداری، عملکرد و سرعت این رویکرد به‌طور اساسی به الگوهای تصویربرداری و ویژگی‌های آن‌ها در فرآیند تصویربرداری بستگی دارد و با توجه به روش تصویربرداری یکی از

۳. الگوریتم‌های بازیابی تصویر مبتنی بر سنجش

فشرده

مطابق با مرجع [۲۲] در زمینه بازسازی سیگنال‌های تنک با استفاده از حسگری فشرده، الگوریتم‌های متعددی توسعه یافته‌اند که می‌توانند به دسته‌های اصلی شامل الگوریتم‌های بهینه‌سازی

¹ Binary.

² Random.

³ Discrete Cosine Transforms (DCT).

⁴ Wavelets.

⁵ Gaussian.

⁶ Discrete Cosine Transform.

محاسباتی آن چالش برانگیز است. الگوریتم BCS^{14} [۲۵] با مدل سازی نویز به صورت چگالی احتمال پسین، به مسائل رگرسیون خطی با قید تنکی تبدیل می شود و انعطاف پذیری بالایی دارد، اما نیاز به فرضیات توزیع احتمال دارد. الگوریتم های Bregman با حل مسائل بدون قید از طریق تکرارهای منظم، مانند SB^{15} که به دلیل ماهیت موازی خود محاسبات سریع تری ارائه می دهد، برای ماتریس های بزرگ مناسب اند. این الگوریتم ها مزیت سرعت را دارند، اما بهینه سازی آن ها پیچیده است و به تنظیمات خاصی نیاز دارد. در نهایت، الگوریتم های TV که برای تصاویر دوبعدی طراحی شده اند، مانند الگوریتم $TV-QC^{16}$ ، با حفظ دقیق لبه ها کیفیت تصویر بهتری ارائه می دهند و نیازی به دیکشنری تنک خاص ندارند. الگوریتم $TV-DS^{17}$ و الگوریتم $TVAL3^{18}$ نیز در این دسته قرار دارند که $TVAL3$ به دلیل کارایی بالا و پذیرش انواع ماتریس های اندازه گیری، بهترین عملکرد جامع را دارد، هر چند سرعت برخی از این الگوریتم ها پایین است. این دسته بندی ها نشان دهنده تنوع رویکردها در بازسازی سیگنال ها با استفاده از حسگری فشرده است و پایه ای برای توسعه روش های جدید در این حوزه فراهم می کند. در جدول ۱ زیر الگوریتم های استفاده شده در کارهای مختلف و مشابه، برای بازسازی تصویر در سامانه های تک پیکسلی آورده شده است.

جدول ۱ الگوریتم های استفاده شده در مراجع مختلف برای بازیابی تصویر در سامانه های تصویربرداری تک پیکسلی باند ترا هرتر

نام	دانشگاه	سال	الگوریتم بازیابی
Shen Hao[17]	Liverpool	2012	Total Variation(TV)
Lin Liu[18]	Liverpool	2017	Nesta Algorithm
Chan[19]	Rice	2008	SPGL1+TV
Liu Jihong[20]	National University of Defense Technology	2009	SL_0

همان طور که در جدول فوق مشخص است، روش ها و الگوریتم های استفاده شده در مراجع مختلف برای بازسازی تصویر در سامانه های تصویربرداری تک پیکسلی باند ترا هرتر، به سه دسته مهم تقسیم می شوند. روش های حداقل سازی نورم L_1 ،

محدب^۱، الگوریتم های Greedy، الگوریتم های بهینه سازی غیر محدود^۲، الگوریتم های Bregman و الگوریتم های TV^3 تقسیم بندی شوند. الگوریتم های بهینه سازی محدود با تبدیل مسئله بازسازی به یک مسئله بهینه سازی محدود و استفاده از روش های برنامه ریزی خطی، به ویژه الگوریتم هایی مانند BP^4 که با تجزیه سیگنال به مجموعه ای از عناصر دیکشنری با کمینه سازی نورم L_1 عمل می کند، شناخته می شوند. این الگوریتم به دلیل پایداری در بهینه سازی سرا سری و ارتباط نزدیک با برنامه ریزی خطی از مزیت هایی برخوردار است، اما معایبی مانند پیچیدگی محاسباتی بالا و سرعت پایین که آن را برای مسائل با مقیاس بزرگ نامناسب می کند، دارد. همچنین الگوریتم های $BPDN^5$ و $LASSO^6$ که برای مدیریت نویز در داده ها طراحی شده اند، با تنظیم پارامترهایی مانند λ عملکرد خوبی در برابر نویز نشان می دهند، هر چند همچنان با چالش های محاسباتی مواجه اند. الگوریتم DLP^7 و DS^8 نیز در این دسته قرار دارند که با مدیریت نویز و حل مسائل برنامه ریزی خطی بهینه عمل می کنند، اما محدودیت هایی در سرعت و مقیاس پذیری دارند [۲۲]. الگوریتم های Greedy که به دنبال یافتن بهترین راه حل محلی در هر تکرار هستند، شامل الگوریتم هایی مانند OMP^9 می شوند که با انتخاب ستون های ماتریس با بیشترین همبستگی با باقی مانده و استفاده از کمترین مربعات، بازسازی سریع و ساده ای ارائه می دهد. این الگوریتم به دلیل سادگی اجرا و مقاومت نسبی در برابر نویز محبوبیت دارد، اما نیازمند اطلاعات اولیه از تنکی سیگنال است و تضمینی برای تنکی راه حل نهایی ندارد. الگوریتم های بهبود یافته مانند $CoSaMP^{10}$ و SP^{11} که در هر تکرار چندین اتم انتخاب می کنند، انعطاف پذیری بیشتری دارند، اما نیاز به اندازه گیری های بیشتر دارند. الگوریتم IHT^{12} سرعت خوبی دارد، اما همچنان به اطلاعات اولیه وابسته است. الگوریتم های بهینه سازی غیر محدود با جایگزینی نورم L_p به جای L_1 که $p < 1$ است، سیگنال ها را با اندازه گیری های کمتر بازسازی می کنند. الگوریتم $IRLS^{13}$ با استفاده از تقریب اول مرتبه نورم L_2 وزن دار، راه حل صریح ارائه می دهد و در برابر نویز عملکرد خوبی دارد، اما پیچیدگی

¹ Convex Optimization.

² Non-Convex Optimization.

³ Total Variation.

⁴ Basis Pursuit.

⁵ Basis Pursuit Denoising.

⁶ Least Absolute Shrinkage and Selection Operator.

⁷ Dual Lagrange Pursuit.

⁸ Decomposition Shrinkage.

⁹ Orthogonal Matching Pursuit.

¹⁰ Compressive Sampling Matching Pursuit.

¹¹ Subspace Pursuit.

¹² Iterative Hard Thresholding.

¹³ Iteratively Reweighted Least Squares.

¹⁴ Bayesian Compressive Sensing.

¹⁵ Split Bregman.

¹⁶ Total Variation Quadratic Constrained.

¹⁷ Total Variation Decomposition Shrinkage.

¹⁸ Total Variation Alternating Lagrangian.

منظور از نورم TV، نورم L1 گرادیان گسسته سیگنال است که برای تصاویر طبیعی مناسب است زیرا تفاوت شدت پیکسل بین پیکسل‌های همسایه معمولاً کم است که باعث می‌شود گرادیان بین آن‌ها تنک باشد. نورم TV به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\|\mathbf{x}\|_{TV} = \sum_{i,j} \|\nabla \mathbf{x}(i,j)\| \quad (4)$$

$$\nabla \mathbf{x}(i,j) = \begin{pmatrix} D_1 \mathbf{x}(i,j) \\ D_2 \mathbf{x}(i,j) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$D_1 \mathbf{x}(i,j) = \mathbf{x}(i+1,j) - \mathbf{x}(i,j) \quad (6)$$

$$D_2 \mathbf{x}(i,j) = \mathbf{x}(i,j+1) - \mathbf{x}(i,j)$$

مسئله اساسی که در این دسته باید حل شود، مسئله زیر است.

$$\min \|\mathbf{x}\|_{TV} \quad s.t. \quad \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|_2 < \sigma \quad (7)$$

چندین الگوریتم رایج در این دسته وجود دارد که در ادامه توضیحات هر یک از آن‌ها آمده است.

۳-۳-۱- الگوریتم L1 Magic

اولین دسته مربوط به L1 Magic است. این پکیج تنها یک الگوریتم تک نیست و مجموعه‌ای از چند الگوریتم داخل یک پکیج نرم‌افزاری است. این پکیج ابزار مناسبی برای کاربردهای آموزشی است و به همین خاطر بسیار معروف است. در این پکیج هم قابلیت حل مسئله با استفاده از نورم L1 و هم قابلیت حل مسئله با نورم TV وجود دارد.

۳-۳-۲- الگوریتم TVAL3

الگوریتم بعدی الگوریتم TVAL3 است. این الگوریتم هر مسئله بهینه‌سازی به شکل زیر را حل می‌کند.

$$\min f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad s.t. \quad h(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \quad (8)$$

تنها شرط مفروض در مسئله بالا مشتق‌پذیر بودن h نسبت به x و y و مشتق‌پذیر بودن f نسبت به x است. در مسئله موردنظر ما f و h را به شکل زیر در نظر می‌گیریم.

$$f = \|\mathbf{x}\|_{TV} \quad (9)$$

$$h = \mathbf{y} - \Psi \mathbf{x}$$

روش‌های حداقل سازی نورم TV^۱ و الگوریتم‌های خاص نظیر SPGL1^۲ و NESTA^۳. در ادامه به توضیح مختصر هر یک از این دسته‌ها پرداخته شده است.

۳-۱- الگوریتم‌های مبتنی بر حداقل سازی نورم L1

این دسته از الگوریتم‌ها مبتنی بر تنک بودن سیگنال است. یک تصویر معمولاً در حوزه پیکسل تنک نیست، اما می‌تواند با استفاده از تبدیل‌هایی نظیر DCT^۴ یا Wavelet به یک ماتریس تنک تبدیل شود. سیگنال تنک می‌شود. به همین خاطر در این الگوریتم‌ها نیاز هست تا تصویر، ابتدا به حوزه‌ای که در آن سیگنال تنک است، منتقل و سپس الگوریتم اعمال شود.

۳-۲- الگوریتم SPGL1

یک روش عددی برای حل مسائل بهینه‌سازی با نورم L1 است الگوریتم SPGL1 یکی از سه مسئله زیر را حل می‌کند. مسئله اول، مسئله LASSO است. این مسئله در زیر آمده است.

$$\min \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|_2 \quad s.t. \quad \|\mathbf{x}\|_1 < \tau \quad (1)$$

که در رابطه فوق، A ماتریس نمونه‌برداری تصادفی یا همان ماتریس ماسک بوده که معمولاً تنک، تصادفی با توزیع گاوسی یا برنولی و نامعین است. x بردار تصویری است که می‌خواهیم آن را بازیابی کنیم، b بردار مشاهدات یا اندازه‌گیری‌ها و τ مقدار آستانه یا محدودیت تنکی نام دارد. مسئله دوم، مسئله basis pursuit یا denoise است که در رابطه زیر آمده است.

$$\min \|\mathbf{x}\|_1 \quad s.t. \quad \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|_2 < \sigma \quad (2)$$

در رابطه فوق σ سطح نویز یا خطای مجاز است. مسئله سوم، مسئله basis pursuit است که مطابق با رابطه زیر است.

$$\min \|\mathbf{x}\|_1 \quad s.t. \quad \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (3)$$

مسئله فوق به مسئله Basis Pursuit معروف است [۲۱]. این دسته از الگوریتم‌ها مسئله بهینه‌سازی را به وسیله برنامه‌نویسی خطی حل می‌کنند. BP با برنامه‌نویسی خطی ارتباط دارد. پیچیدگی محاسباتی این الگوریتم به اندازه مسئله و داده‌های ورودی بستگی دارد اما برای سیگنال‌های تنک کارآمد است.

۳-۳- الگوریتم‌های مبتنی بر Total Variation

¹ Total Variation.

² Spectral Projected Gradient for L₁-minimization.

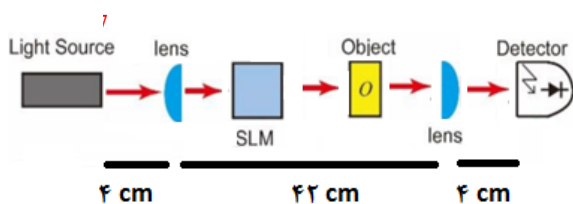
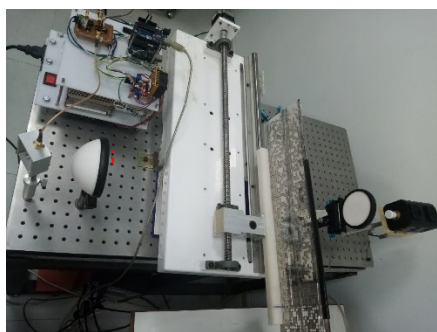
³ Nesterov's Algorithm for Sparse Approximation.

⁴ Discrete Cosine Transform.

۴. چیدمان تصویربرداری ترا هرتز تک پیکسل با ماسک خطی

طبق شکل ۵ برای آزمایش عملی تصویربرداری تک پیکسل در حوزه ترا هرتز، ابتدا چیدمان با ماسک خطی راهاندازی می‌شود، برای این کار لازم است لیست تجهیزات موردنیاز را تهیه کرد. تجهیزات موردنیاز طبق لیست زیر است:

۱. منبع ترا هرتز، ۲. دو عدد عدسی، ۳. ماسک خطی، ۴. بال اسکرو، ۵. مدار تقویت کننده سیگنال، ۶. مبدل آنالوگ به دیجیتال، ۷. آشکارساز تک پیکسل، ۸. پردازنده



شکل ۵: چیدمان آزمایشگاهی تصویربرداری تک پیکسل با ماسک خطی. منبع ترا هرتز، عدسی‌ها، ماسک و آشکارساز تک پیکسل را با تنظیم ارتفاع در مسیر خط دید مستقیم همدیگر قرار داده تا بیشینه پرتوها به آشکارساز برسد.

۴-۱ ماسک مکانیکی خطی

با عبور سیگنال ترا هرتز از هر یک از ماسک‌های مکانیکی تعبیه شده بر روی مسیر خطی، سیگنال در حوزه مکانی مدوله شده یا به عبارت دیگر الگوی ماسک به سیگنال ترا هرتز اعمال می‌شود. در ادامه سیگنال ترا هرتز مدوله شده به هدف که به شکل L و Γ از جنس آلومینیم است برخورد می‌کند. با توجه به اینکه هدف از جنس فلز بوده، سیگنال ترا هرتز را بازتاب کرده، اما از سایر قسمت‌های هدف، سیگنال عبور می‌کند. سیگنال ترا هرتز عبوری، در این قسمت توسط عدسی L2 که مشابه عدسی L1 است و قبل از آشکارساز قرار گرفته، بر روی آشکارساز کانونی می‌شود. آشکارساز تک پیکسل، سیگنال ترا هرتز را به یک سطح ولتاژ قابل اندازه‌گیری تبدیل می‌کند.

این الگوریتم نیز از جمله الگوریتم‌های مبتنی بر تکرار است. این الگوریتم سریع بوده و برای حداقل سازی تغییرات کلی طراحی شده و مستقیماً مسائل حداقل سازی نورم L1 را حل نمی‌کند. این الگوریتم عملکرد خوبی در حضور نویز داشته و سرعت بازیابی این الگوریتم مناسب است.

۳-۳-۳ مجموعه نرم‌افزاری NESTA

الگوریتم NESTA بر اساس روش گرادیان شتاب‌یافته نستروف برای بهینه‌سازی محدب است. [۲۰]. سرعت همگرایی این الگوریتم بهتر از L1 Magic است. این الگوریتم هم مشابه الگوریتم قبلی قابلیت حل مسئله با استفاده از نورم L1 و هم قابلیت حل مسئله با نورم TV را دارد. این مجموعه نرم‌افزاری هم به صورت مجزا و هم در برنامه Matlab پیاده‌سازی شده است. این مجموعه هر دو مسئله‌ی زیر را حل می‌کند.

$$\min \|x\|_1 \quad s.t. \quad \|Ax - b\|_2 < \sigma \quad (10)$$

$$\min \|x\|_{TV} \quad s.t. \quad \|Ax - b\|_2 < \sigma \quad (11)$$

در جدول ۲ الگوریتم‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند و مزایا و معایب هر یک آورده شده است.

جدول ۲- مقایسه الگوریتم‌های مختلف بازیابی تصویر

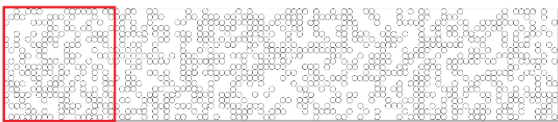
الگوریتم	مزایا	معایب
SPGL1	پکیج نرم‌افزاری آماده مناسب برای داده‌های تنک-یکی از سریع‌ترین الگوریتم‌ها برای داده‌های تنک ورودی مناسب برای داده‌های مختلط- مناسب برای ابعاد بزرگ سیگنال مجهول	این الگوریتم ممکن است کند تر از NESTA باشد اما برای مسائل تنک در مقیاس بزرگ کارآمدتر است.
NESTA	پکیج نرم‌افزاری آماده-قابلیت پیاده‌سازی الگوریتم L1 و TV-min-سرعت بازسازی مناسب	سرعت بازیابی کمتر نسبت به الگوریتم TVAL3
TVAL3	عملکرد خوب در حضور نویز- سرعت بالاتر بازیابی مناسب برای تصویر (با توجه به اینکه تصویر واقعی ذاتاً تنک نیست).	عملکرد ضعیف‌تر نسبت به NESTA در سیگنال به نویزهای خیلی کم
SL0	در مسائل پراکنده دقت بالا دارد- داده‌های با تعداد مؤلفه کمتر را بازسازی می‌کند	در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده زمان‌بر است- در مسائل بزرگ و پیچیده به خوبی مقیاس نمی‌کند. SL0 برای برخی از مسائل تنک به خوبی عمل می‌کند اما برای بهینه‌سازی پیچیده به‌طور کارآمد مناسب نیست.

عدد ماسک مربعی ۱۰ سانتیمتری 20×20 پیکسل تشکیل شده است و در مقابل عدسی منبع ترا هر تزی قرار می‌گیرد تا پرتو را مدوله کند و به جسم برسد. برای تولید ماسک با الگوی دوسطحی، از نوع تصادفی برنولی با ابعاد کلی 20×100 پیکسل و اندازه پیکسل ۵mm از نرم‌افزار متلب بهره برده شده و از کد دستوری $\text{rand}(n,m)$ استفاده می‌شود. در این کد دستوری n و m به ترتیب سطر و ستون برابر ۲۰ و ۱۰۰ است. با کد دستوری یک الگوی دوسطحی تصادفی با توزیع برنولی و ابعاد تولید می‌شود. (شکل ۷)



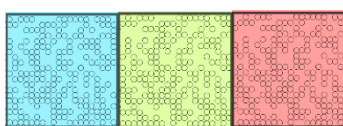
شکل ۷: الگوی دوسطحی تصادفی با ابعاد 20×100 پیکسل.

علاوه بر الگوی تولیدشده، یک فایل mat با نام A که شامل ماتریس A با ابعاد 20×100 با مقادیر ۰ و ۱ به ازای پیکسل‌های سیاه‌وسفید بوده، تولید خواهد شد که الگوی ماسک در برنامه متلب می‌باشد. علت اینکه ابعاد هر ماسک در راستای عرضی حدود ۲۰ پیکسل با قطر ۵mm در نظر گرفته شده، ابعاد عدسی و هدف تصویربرداری است. همچنین تعداد پیکسل‌های در راستای طول نیز حدود ۱۰۰ عدد در نظر گرفته شده که هر پیکسل دارای قطر ۵mm بوده که برابر طول کلی ۵۰۰mm خواهد شد این اندازه برابر با بیشینه بازه حرکتی موتور خطی است. با توجه مشکل بودن سوراخ‌کاری پیکسل‌ها با شکل مربعی، هزینه بالا، نیاز به دقت بسیار بالای دستگاه برش و اثرات پراش از لبه‌های تیز پیکسل‌های مربعی، پیکسل‌ها به شکل دایره در نظر گرفته می‌شود. شکل ۹ تصویری از ماسک مکانیکی خطی با اندازه کلی 20×100 پیکسل، با پیکسل‌های دایره‌ای به قطر ۵mm را نشان می‌دهد.



شکل ۸: ماسک مکانیکی خطی با پیکسل‌های دایره‌ای.

شکل ۹ تصویری از ماسک‌های اول تا سوم را نشان می‌دهد که به ترتیب از سمت چپ به راست بارنگ قرمز، زرد و آبی نشان داده شده است.



شکل ۹: ماسک‌های ۱-۲-۳ از چپ به راست.

ولتاژ ثابت شده بر روی آشکارساز به ازای فرکانس مدولاسیون پالس منبع ترا هر تزی حدود ۱/۵ KHz، به ازای زمانی که ماسک مکانیکی در مسیر سیگنال ترا هر تزی قرار ندارد، حدود ۱/۸۵۷ تا ۲۷ است. حین عبور ماسک خطی، بخش عمده‌ای از سیگنال توسط ماسک بازتاب شده و مابقی عبور می‌کند به نحوی که سطح سیگنال ثبت شده توسط آشکارساز به علت تفاوت تعداد پیکسل‌های عبوری و بازتاب‌دهنده در هر ماسک نسبت به ماسک مجاور در میزان ولتاژ ثبت شده توسط دستگاه اندازه‌گیری متفاوت است. سیگنال دریافتی از آشکارساز توسط مدار آنالوگ به دیجیتال به پردازش منتقل می‌شود و توسط نرم‌افزار پایتون خروجی به دست آمده به فایل mat تبدیل می‌گردد و این فایل در الگوریتم NESTA در نرم‌افزار متلب فراخوانی می‌شود و پس از اجرای الگوریتم تصویر خروجی چیدمان تصویربرداری تک پیکسل ترا هر تزی به دست آمده می‌آید. بلوک دیاگرام این بخش در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶: بلوک دیاگرام بخش پردازش.

۲-۴ طراحی و ساخت ماسک مکانیکی خطی 20×100 پیکسل

تفاوت ماسک‌های مختلف در سیستم تصویربرداری، به تفاوت آن در SLM یا الگوهای به کار گرفته شده برمی‌گردد. الگوهای مورد استفاده شامل طیف متنوعی از ماتریس‌های مختلف بوده که تعدادی از این الگوها شامل: الگوی دودویی، تصادفی، فوریه، تبدیل کسینوسی گسسته (DCT)، هادامارد، موجک و ماتریس گوسی است.

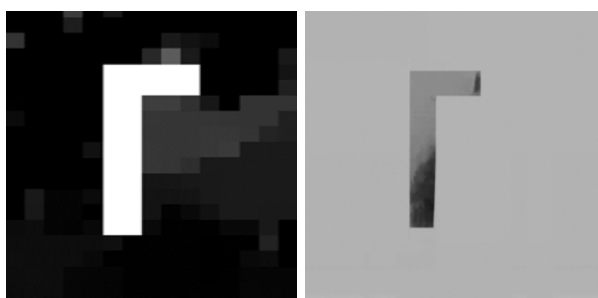
مدولاسیون مکانی تولیدشده توسط ماسک مکانیکی بر اساس الگوی دودویی هست، منظور از الگوی دودویی این است که پرتو ترا هر تزی مطابق با الگو در پیکسل‌های ۰ اجازه عبور ندارد و در پیکسل‌های ۱ اجازه عبور دارد، مزیت ماسک‌های مکانیکی نظیر ارزان بودن و در دسترس بودن است [۲۳، ۲۷، ۲۶، ۲۸].

به منظور ساخت ماسک خطی، تمامی ماسک‌ها را بعد از تعیین الگو و شبیه‌سازی آن با نرم‌افزار متلب، که توزیع تصادفی برنولی دارد، با فرمتی مانند jpg همراه با یک فایل دیگر که شامل ماتریس دربردارنده مقادیر هر کدام از پیکسل‌های ماسک است، در یک پوشه ذخیره می‌کنند. اندازه هر پیکسل ماسک ۵mm که توسط سوراخ‌کاری لیزری ایجاد است. این ماسک خطی از جنس استیل است از ورقی با ضخامت ۱ mm و اندازه پیکسل ۵ mm که بر روی بال اسکرو نصب شده است قرار دارد، این ماسک از ۸۱



شکل ۱۲: تصویر بازسازی شده به روش NESTA با استفاده از ۸۱ ماسک.

سپس هدفی به شکل Γ از جنس آلومینیم در مسیر پرتو قرار می-گیرد، همان طور که در شکل ۱۳ مشخص است، در وسط تصویر یک حرف Γ نمایش داده می شود و با تصویر جسم مطابقت دارد.



شکل ب

شکل الف

شکل ۱۳: الف- تصویر شیء ب- تصویر بازسازی شده با روش NESTA با استفاده از ۸۱ ماسک و استفاده از فیلتر برای حذف نویز.

همان طور که در شکل ۱۳-ب مشاهده می شود، استفاده از تعداد ماسک بیشتر و انتخاب مناسب $\mu(F)$ در الگوریتم NESTA، تأثیر بسزایی در تصویر بازیابی شده داشته است. در ادامه اثرات ناشی از دو پارامتر تعداد ماسک مورد استفاده و پارامتر $\mu(F)$ در الگوریتم بازسازی تصویر بر اساس معیار MSE^1 مورد بررسی قرار گرفته است. این معیار با فرض مقایسه بین تصویر بازیابی شده و تصویر اصلی به صورت زیر تعریف می شود:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (12)$$

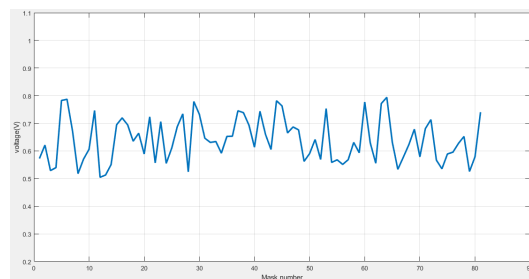
در رابطه فوق، n تعداد پیکسل های تصویر بازیابی شده پس از تبدیل ماتریس تصویر به بردار Y با ابعاد $1 \times n$ است. شکل ۱۵ تصاویر بازیابی شده را به ازای تعداد ماسک های مختلف نشان می دهد.

شکل ۱۰ تصویر ماسک ساخته شده از جنس استیل، بر اساس الگوی شکل ۸ ساخته شده است.



شکل ۱۰: ماسک مکانیکی ساخته شده.

برای تابش ترا هرتز از منبع ترا هرتز ۱۰۰ گیگاهرتز با طول موج ۳ میکرومتر با توان ۱۰۰ mW و واگرایی $\pm 9^\circ$ درجه استفاده شده که با یک پالس TTL به منبع ترا هرتز، سیگنال ترا هرتز مدوله پالس می شود. نمودار ولتاژ دریافتی به ازای ماسک های مختلف در شکل ۱۱ آمده است.



شکل ۱۱: نمودار ولتاژ دریافتی به ازای ماسک های مختلف.

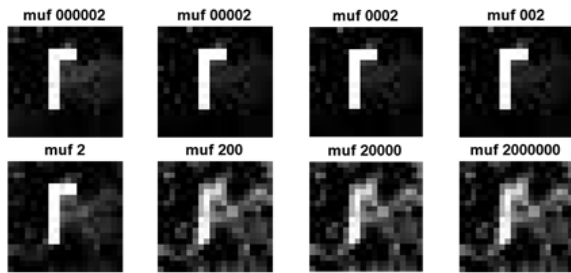
۳-۴ بازسازی تصویر با استفاده از الگوریتم NESTA

روش ها و الگوریتم های استفاده شده در مراجع مختلف برای بازسازی تصویر در سامانه های تصویربرداری تک پیکسلی باند ترا هرتز شامل سه دسته TV-min و SPGL1 و استفاده از پکیج نرم-افزاری NESTA است.

به طور کلی الگوریتم های بازسازی در حوزه ی تصویربرداری تک پیکسلی به دودسته الگوریتم های مبتنی بر حداقل کردن (کمینه سازی) نورم L1 و الگوریتم های مبتنی بر نورم TV تقسیم بندی می شوند. منظور از TV، نورم L_1 گرادیان گسسته سیگنال است [۲۲]. با این تعریف چون اختلاف دو پیکسل کناری در یک تصویر بسیار کم بوده و در نتیجه این نورم بسیار مناسب برای تصویر است تصویر طبیعی برای نورم TV تنک است. این مجموعه سرعت بازیابی بسیار خوبی دارد و برای کاربردهایی تصویربرداری تک پیکسلی بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. برای بازسازی تصویر نیز از الگوریتم NESTA مبتنی بر نورم TV استفاده می کنیم. در اولین گام جسمی را در مسیر منبع و آشکارساز قرار نمی دهیم و از فضای بدون هدف تصویربرداری می کنیم. تصویر بازسازی شده در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

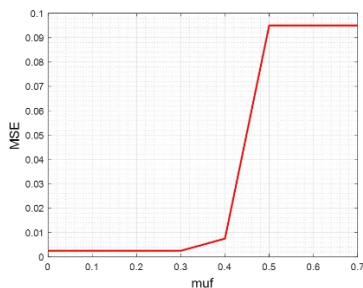
¹ Mean Squared Error.

در رابطه فوق F_1 و F_2 دو ستون مختلف و دلخواه از ماتریس F هستند. (F_i, F_j) حاصل ضرب نقطه‌ای بین این دو ستون است. $\|F_1\|_2$ و $\|F_2\|_2$ نرم‌های اقلیدسی یا L_2 این ستون‌ها هستند. اگر مقدار همبستگی متقابل کم باشد، نشان می‌دهد که ستون‌ها اطلاعات متفاوتی دارند و کمتر به هم وابسته هستند و ستون‌های ماتریس خوب تفکیک شده‌اند. در ماتریس‌هایی که برای سنجش فشرده استفاده می‌شوند، ماتریس با همبستگی متقابل کم مفید است، زیرا این موضوع اجازه می‌دهد که از تعداد کمتری اندازه‌گیری استفاده کرد و بازسازی دقیق‌تر و باکیفیت بهتری از سیگنال اصلی به دست آورد. بنابراین، در زمان انتخاب یا طراحی ماتریس‌های اندازه‌گیری کاهش همبستگی متقابل اغلب یک هدف است. شکل ۱۷ تصاویر بازیابی شده با روش NESTA را به ازای مقادیر مختلف $\mu(F)$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، به ازای $\mu(F)$ کوچک‌تر تصاویر بازیابی شده باکیفیت‌تری خواهیم داشت.



شکل ۱۶: تصاویر بازیابی شده با الگوریتم NESTA به ازای مقادیر مختلف $\mu(F)$.

برای کمی کردن میزان کیفیت تصویر بازیابی شده، اثر مقادیر مختلف پارامتر $\mu(F)$ در افزایش کیفیت تصویر بازیابی شده، با معیار MSE در شکل ۱۷ ارزیابی می‌شود.

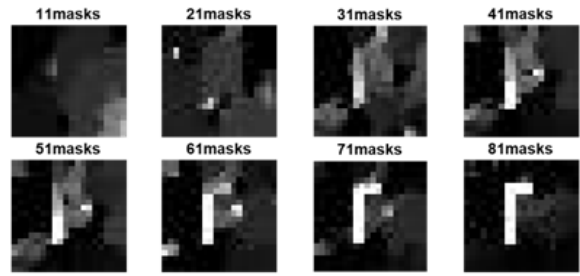


شکل ۱۷: خطای MSE تصاویر بازیابی شده و تصاویر اصلی برحسب مقادیر

مختلف پارامتر $\mu(F)$.

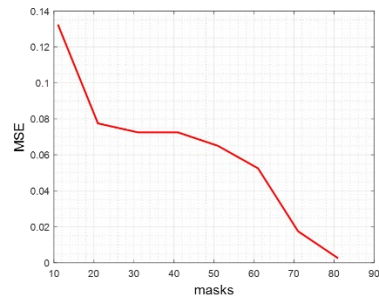
مطابق با شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار پارامتر $\mu(F)$ الگوریتم NESTA، میزان خطای MSE افزایش یافته و میزان کیفیت تصویر بازیابی شده کاهش خواهد یافت.

۴. نتیجه‌گیری



شکل ۱۴: تصاویر بازیابی شده با الگوریتم NESTA به ازای تعداد ماسک‌های مختلف.

مطابق با شکل ۱۴ تصاویر بازیابی شده با تعداد ماسک‌های مختلف شامل ۱۱، ۲۱، ۳۱، ۴۱، ۵۱، ۶۱، ۷۱ و ۸۱ ماسک مشاهده می‌شود. در این شکل، افزایش تعداد ماسک مورد استفاده در فرایند تصویربرداری تک پیکسل ترا هر تزی، کیفیت تصویر بازیابی شده را بهبود می‌بخشد. برای کمی کردن میزان کیفیت تصویر بازیابی شده، اثر تعداد ماسک در افزایش کیفیت تصویر بازیابی شده، با معیار MSE در شکل ۱۶ مقایسه می‌شود.



شکل ۱۵: خطای MSE تصاویر بازیابی شده و تصاویر اصلی برحسب تعداد ماسک‌های مورد استفاده در فرایند تصویربرداری.

همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد ماسک مقدار MSE کاهش می‌یابد و نتیجتاً کیفیت تصویر بازیابی شده افزایش می‌یابد. ضمن اینکه بر کیفیت تصویر می‌افزاید. از سوی دیگر میزان خطای MSE نیز به‌طور قابل توجهی کمتر می‌شود و در کیفیت تصویر نهایی به‌دست آمده مؤثر است. از طرفی با توجه به وجود نویز در تصاویر به‌دست آمده برای آنکه خروجی تصویر باکیفیت‌تر شوند در روند بازسازی برای کاهش نویز از فیلترهای نرم‌افزاری پایین گذر با آستانه گذاری مناسب باهدف حذف نویز مناسب استفاده شده است.

پارامتر $\mu(F)$ در الگوریتم NESTA نشان‌دهنده‌ی همبستگی متقابل یک ماتریس است که بیشترین شباهت بین هر دو ستون متفاوت از آن ماتریس را نشان می‌دهد. به‌طور ریاضی، این معیار به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu(F) = \max_{i \neq j} \frac{\langle F_i, F_j \rangle}{\|F_i\|_2 \|F_j\|_2}$$

T.Sun, K.F.Kelly, and R.G.Baraniuk "Single-Pixel Imaging via Compressive Sampling", IEEE Signal Processing Magazine.83, March.2008.

[11] Ming-Jie Sun and Jia-Min Zhang," Single-Pixel Imaging and Its Application in Three-Dimensional Reconstruction: A Brief Review", Sensor Journal,2019.

[12] S.Augustin, S. Frohmann, P.Jung and H.W.Hübers, "Mask Responses for Single-Pixel Terahertz Imaging", Scientific Reports, 8:4886, 6.March, 2018.

[13] A.Valles, J.HE, S.Ohno, T.Omatsu and K.Miyamoto, "Broadband high-resolution terahertz single-pixel imaging", Optics Express, Vol. 28, No. 20, 28868-28881, 14.September, 2020.

[14] Donoho, David L, "For most large underdetermined systems of linear equations the minimal 1-norm solution is also the sparsest solution". Communications on pure and applied mathematics 59: 797–829. doi:10.1002/cpa.20132, (2006).

[15] Candès, Emmanuel J. ; Romberg, Justin K. ; Tao, Terence, "Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements" (PDF). Communications on Pure and Applied Mathematics 59 (8): 1207–1223, (2006).

[16]S. Majumder, S. Gupta, and S. Dubey, "Compressive Sensing Based Active Imaging System Using Programable Coded Mask and a Photodiode," IEEE Photonics Journal, vol. 15, no. 3, pp. 1–7, Jun. 2023, doi: 10.1109/jphot.2023.3273579.

[17] H. Shen, L. Gan, N. Newman, Y. Dong, C. Li, Y. Huang and Y. C. Shen, "Spinning disk for compressive imaging," Opt. Lett., 2012. vol. 37, no. 1, pp. 46-48,

[18]L Gan, L Liu, YC Shen, "Golay sequence for partial Fourier and Hadamard compressive imaging", 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), (2013) 6048-6052.

[19] W. L. Chan, M. L. Moravec, R. G. Baraniuk, and D. M. Mittleman, "Terahertz imaging with compressed sensing and phase retrieval," 2007 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), pp. 1–2, May 2007, doi: 10.1109/cleo.2007.4452877.

[20]H. Mohimani, M. Babaie-Zadeh, and C. Jutten, "A Fast Approach for Overcomplete Sparse Decomposition Based on Smoothed l_0 Norm," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 57, no. 1, pp. 289–301, Jan. 2009, doi: 10.1109/tsp.2008.2007606.

[21]S. S. Chen, D. L. Donoho, and M. A. Saunders, "Atomic Decomposition by Basis Pursuit," SIAM Review, vol. 43, no. 1, pp. 129–159, Jan. 2001, doi: 10.1137/s003614450037906x.

[22]W. Zhao, L. Gao, A. Zhai, and D. Wang, "Comparison of Common Algorithms for Single-Pixel Imaging via Compressed Sensing," Sensors, vol. 23, no. 10, p. 4678, May 2023, doi: 10.3390/s23104678.

[23]A. Vallés, J. He, S. Ohno, T. Omatsu, and K. Miyamoto, "Broadband high-resolution terahertz single-pixel imaging," Optics Express, vol. 28, no. 20, p. 28868, Sep. 2020, doi: 10.1364/oe.404143.

[25] H. Zayyani, M. Babaie-Zadeh, and C. Jutten, "An Iterative Bayesian Algorithm for Sparse Component

در این تحقیق، یک سامانه تصویربرداری ترا هرتز سریع‌تر و کارآمد بر اساس مفهوم سنجش فشرده ارائه شد که در بخش سخت‌افزار آن مجموعه‌ای از ماسک‌ها پیاده‌سازی شد که تأثیر اندازه‌گیری‌ها، تأثیر نسبت سیگنال به نویز و محدودیت حرکتی ماسک و سرعت دستیابی تصویر نسبت به سامانه‌های بررسی شده دیگر بهبود قابل توجهی داشت. در این طرح با رویکردی در چیدمان آزمایشگاهی یعنی با متوالی شدن ماسک‌ها در یک مسیر و تغییر در شکل پیکسل‌ها سرعت تصویربرداری ترا هرتز نسبت به سخت‌افزار تصویربرداری مکانیکی قبل که نیاز بود در هر بار تعویض کردند به حداقل برسند و با موفقیت به تصاویر هدف دست‌یافته شود و با تحلیل میزان خطای نرمالیزاسیون آن‌ها با توجه به تغییر تعداد ماسک‌ها و پارامتر همبستگی بین ماسک‌ها مشاهده شد تأثیرات بسزایی در دستیابی به تصاویر داشت، یعنی با افزایش تعداد ماسک نمونه‌برداری کیفیت تصاویر نهایی بهبود یافت و با کاهش پارامتر همبستگی بین ماسک‌ها نیز این تأثیر بر تصاویر به‌دست‌آمده دیده شد.

۵. مراجع

[1] A.Y. Pawar, D.D. Sonawane, K.B. Erande, and D.V. Derle, "Terahertz technology and its applications", Elsevier, ScienceDirect, 157-163, 31.March, 2013.

[2] M.P. Edgar, G.M.Gibson, and M.J. Padgett, "Principles and prospects for single-pixel imaging", Nature Photonics, December.2018.

[3] E. Brundermann et al., Terahertz Techniques, Springer Series in Optical Sciences 1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, DOI 10.1007/978-3-642-02592-1

[4] Z.Xie, X.Wang, J.Ye, S.Feng, W.Sun, T.Akalin and Y.Zhang, "Spatial Terahertz Modulator", Scientific Reports, 3: 3347, 26.November, 2013.

[5] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, Laska J, Sun T, Kelly K F, and Baraniuk R G, "Single-pixel imaging via compressive sampling," IEEE Sig. Proc. Mag., vol. 25, pp. 83-91, March (2008)

[6] H. Shen, N. Newman, L. Gan, S. C. Zhong, Y. Huang and Y. C. Shen, "Compressed terahertz imaging system using a spin disk," 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Rome, 2010, pp. 1-2, doi: 10.1109/ICIMW.2010.5612977.

[7] D. Shrekenhamer, C.M. Watts, and W.J. Padilla," Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator," Optical Society of America, Optics Express, May, 2013.

[8] L. Zanotto, R.Piccoli, J.Dong1, R.Morandotti and L.Razzari "Single pixel terahertz imaging: a review", Opto Electron Adv 3, Vol. 3, No.9,2000121-15, 23.September, 2020.

[9] R.I. Stantchev, X.Yu, T.Blu and E.Pickwell-MacPherson "Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector", Nature Communications, 11:2535, 2020.

[10] M.F.Duarte, M.A.Davenport, D.Takhar, J.N.Laska,

12, 1, 47-58, 2024.
DOR: 20.1001.1.26455153.1403.12.1.6.4.

[28] M. Roinfar, M. Salmanian, A. Aghakasiri, A. Bashiri and S. Babanejad, "Single-pixel terahertz imaging at 100 GHz frequency in active reflection mode based on mechanical spatial modulator", Journal Scientific Journal of Applied Electromagnetics, vol. 12, no.1, pp. 47-57, 2021. (In Persian)
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.1.6.4>

Analysis in Presence of Noise," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 57, no. 11, pp. 4378–4390, Nov. 2009, doi: 10.1109/tsp.2009.2025154.

[26] M. Roueinfar, A. Aghakasiri, M. Salmanian, A. Bashiri, and S. Babanezhad, "Single-Pixel THz imaging using mechanical SLM and compressive sensing," Jun. 2023, doi: 10.21203/rs.3.rs-3080349/v1.

[27] M. Roueinfar; M. Salmanian; A. Aqakasiri; A. Bashiri; S. Babnezhad. "Single-Pixel Terahertz Imaging at 100 GHz Frequency in Active Reflection Mode Based on Mechanical Spatial Modulator", Applied Electromagnetics,

