

Single-Pixel Terahertz Imaging at 100 GHz Frequency in Active Reflection Mode Based on Mechanical Spatial Modulator

M. Roueinfar^{*1}, M. Salmanian², A. Aqakasiri³, A. Bashiri⁴, S.Babanezhad⁵

*Researcher Imam Hossein University, Tehran, Iran

(Received: 2024 /04/04 revised: 2024/05/29 Accepted:2024/06/21 published: 2024/07/14)

Abstract

In this paper, a terahertz single-pixel imaging method at 100 GHz frequency in reflective mode and at a distance of 4 meters from the target is presented. The source of terahertz signal generation is an Impatt diode, which produces terahertz signal in pulse shape at 100 GHz frequency. One of the most important obstacles in the progress of terahertz technology is easy access to radiation sources and especially detectors sensitive to terahertz waves. In the proposed imaging method, the terahertz signal is generated with a modulating pulse and is irradiated to the target through a lens. The return signal from the target is focused by a parabolic Cassegrain reflector and the focused signal passes through a spatial light modulator and finally enters a single pixel detector. The spatial light modulator or SLM, which is a mechanical mask, causes the terahertz beam to pass through different masks with its linear movement, and therefore, for each mask, we will have a different detected voltage value at the output of the single pixel detector. By using the Compressive Sensing algorithm, the output voltage values of the detector for each mask, as well as the profile of different masks passing through the path of the terahertz beam, the target image is recovered. The simulation results and comparing the results of the images recovered from the target with the real image show the success of this imaging method in reflective mode.

Keywords: Terahertz Imaging, Reflective Mode, Single-Pixel Detector, Compressive Sensing, Spatial Modulator, Mask

* Corresponding author E-mail: mrooein@ihu.ac.ir

علمی - پژوهشی

تصویربرداری تک پیکسلی تراهرتز در فرکانس 100 GHz در حالت بازتابی فعال مبتنی بر

مدولاتور مکانی مکانیکی

محمد روئین فر^۱، مهدی سلمانیان^۲، علی آقا کثیری^۳، عباس بشیری^۴، سعید بابا نژاد^۵

۱- پژوهشگر، ۲ و ۴- دانشجوی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران ۳- دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۸، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳)



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

در این مقاله، یک روش تصویربرداری تک پیکسلی تراهرتز در فرکانس 100 GHz در حالت بازتابی و در فاصله 4 متری از هدف ارائه شده است. منبع تولید سیگنال تراهرتز از نوع دیود Impatt بوده که به صورت پالسی، سیگنال تراهرتز را در فرکانس 100 GHz تولید می کند. یکی از مهم ترین موانع در مسیر پیشرفت فناوری تراهرتز، دسترسی آسان به منابع تابش و به ویژه آشکارسازهای حساس به امواج تراهرتز است که به دلیل همین محدودیت، استفاده از آشکارسازهای تک پیکسل تراهرتز مورد توجه قرار گرفته است. در روش تصویربرداری پیشنهادی، سیگنال تراهرتز با یک پالس مدوله کننده، تولید شده و از طریق یک لنز، به هدف تابانده می شود. سیگنال برگشتی از هدف، توسط یک بازتابنده سهموی کسگرین متمرکز شده و سیگنال متمرکز، از یک مدولاتور مکانی نوری عبور کرده و نهایتاً وارد یک آشکارساز تک پیکسل می شود. مدولاتور مکانی نور یا SLM که یک ماسک مکانیکی است، با حرکت خطی خود سبب عبور پرتو تراهرتز از ماسک های مختلف شده و بنابراین به ازای هر ماسک، مقدار ولتاژ آشکار شده متفاوتی در خروجی آشکارساز تک پیکسل خواهیم داشت. با استفاده از الگوریتم سنجش فشرده، مقادیر ولتاژ خروجی آشکارساز به ازای هر ماسک و همین طور پروفایل ماسک های مختلف عبوری در مسیر پرتو تراهرتز، تصویر هدف بازیابی می شود. نتایج شبیه سازی و مقایسه نتایج تصاویر بازیابی شده از هدف با تصویر واقعی، نشان دهنده موفقیت این روش تصویربرداری در حالت بازتابی است.

کلیدواژه ها: تصویربرداری تراهرتز، حالت بازتابی، آشکارساز تک پیکسل، سنجش فشرده، مدولاتور مکانی، ماسک.

۱- مقدمه

سبب یونش بافت های زیستی نمی شوند. همچنین امواج تراهرتز به جهت جذب شدید در آب، بر خلاف امواج میکروویو، در بدن انسان نفوذ نمی کند. حتی اگر سبب افزایش دما هم شود، باز هم به لایه های پوستی محدود می شود. این خواص سبب می شود که تابش تراهرتز یک ابزار مناسب برای تصویربرداری پزشکی در نظر گرفته شود که در چند سال اخیر نیز پیشرفت چشمگیری داشته است [۱]. بیشترین گذر امواج تراهرتز از مواد نارسای خشک مانند لباس، چوب، کاغذ و پلاستیک است. این ویژگی، این امکان را فراهم می کند که در کاربردهای امنیتی از امواج تراهرتز در آشکارسازی اشیاء پنهان شده استفاده کرد [۲].

در حالت کلی سیستم های تصویربرداری تراهرتز به دو دسته تصویربرداری الکترونیکی و تصویربرداری فوتونیک تقسیم شده و هر یک از این دسته ها با دو روش فعال^۳ و غیرفعال^۴ قابل پیاده سازی هستند. روش های تصویربرداری غیرفعال از تشعشعات طبیعی و یا بازتاب هایی که از خود اجسام منتشر می شود، استفاده می کنند.

امواج تراهرتز، امواج الکترومغناطیسی هستند که در محدوده فرکانسی^۱ 10 THz - 0.1 THz بین نواحی طیفی مادون قرمز و میکروویو قرار دارند [۱]. در گذشته به دلیل محدودیت دسترسی به منابع و آشکارسازهای تراهرتز، استفاده از این باند در حاله ای از ابهام قرار داشت. با پیشرفت تکنولوژی ساخت منابع و آشکارسازهای تراهرتز، اقبال به استفاده از این امواج فزونی یافت و در کاربردهای متنوعی نظیر تشخیص پزشکی، تصویربرداری امنیتی، ارتباطات باند وسیع، طیفسنجی^۲ مولکولی و سایر کاربردهای دیگر مورد استفاده قرار گرفت [۱]. طیفسنجی تراهرتز در حوزه زمان و فرکانس کاربردهای فراوانی در علوم مختلف داشته و انواع مولکول های زیستی، داروها، بافت های سرطانی، پروتئین ها و باکتری ها توسط این روش طیفسنجی شده اند [۲]. امواج تراهرتز دارای فوتون های کم انرژی هستند، بنابراین برخلاف اشعه ایکس،

mrooein@ihu.ac.ir

* رایانامه نویسنده مسئول:

³ Active

⁴ Passive

¹ Terahertz (10¹² Hz)

² Spectroscopy

مقادیر و الگوی هر ماسک در بخش پردازش، بازیابی تصویر کامل هدف با استفاده از الگوریتم پردازش سنجش فشرده^۴ انجام خواهد شد. مطابق با [۱۱] با فرض آنکه هدف از N پیکسل تشکیل شده باشد، برای داشتن یک تصویر کامل از هدف با استفاده از یک آشکارساز تک پیکسل به N بار تصویربرداری یا N اندازه‌گیری در آشکارساز تک پیکسل و به عبارت دیگر به N ماسک نیاز داریم. باتوجه به محدودیت‌های پیاده‌سازی و عملی، تحقق تعداد N ماسک به تعداد پیکسل‌های هدف عملاً ممکن نیست و در عمل معمولاً تعداد ماسک‌های بکار رفته و اعمال شده به SLM از تعداد ماسک‌های موردنیاز برای بازیابی تصویر کامل هدف کمتر است. به عبارت دیگر تعداد اندازه‌گیری‌های محدود و اصطلاحاً تُنکی^۵ را در اختیار خواهیم داشت که برای بازیابی تصویر کامل از یک هدف، از روش پردازشی سنجش فشرده که مبتنی بر بازیابی داده‌ها از ورودی‌های تُنک است، استفاده خواهد شد.

تحقق فیزیکی SLMها در تصویربرداری تراهرتز، به روش‌های مختلفی قابل پیاده‌سازی است که عبارتند از DMD^۶ [۱۲-۱۴]، LCD^۷ [۱۵]، فرا مواد^۸ [۱۶-۱۸] و ماسک‌های مکانیکی [۱۹-۲۳]. ماسک‌های مکانیکی با استفاده از یک الگوی نرم‌افزاری از ماتریس‌های تصادفی متشکل از "صفر" و "یک" بر روی یک بستر فیزیکی فلزی مانند مس، استیل یا حتی طلا پیاده‌سازی می‌شود. این نوع ماسک، ساختار ساده‌تر و ارزان‌تری نسبت به سایر ماسک‌های دیگر دارد. بر اساس ابعاد هدف، طول موج و تفکیک‌پذیری موردنیاز، مساحت مشخصی از یک فلز به ماسک اختصاص داده شده و ابعاد ماتریس متناسب با مساحت ماسک خواهد بود. به عبارت دیگر ابعاد هر درایه ماتریس برابر با ابعاد یک مربع یا دایره کوچکی خواهد بود که در یک ماسک وجود دارد. به‌ازای هر "صفر" در ماتریس تصادفی الگو، یک مربع یا دایره پوشیده شده از فلز داریم و به‌ازای هر "یک" در ماتریس تصادفی الگو، یک مربع یا دایره عاری از هرگونه فلز که یا سوراخ شده و یا از مواد عایق پر شده داریم. طرح مدارچاپی^۹ PCB نمونه و مصداق شناخته شده‌ای برای این گونه از ماسک‌هاست. از طرفی سایر پیکسل‌های ماسک مکانیکی (مربع یا دایره‌های پیاده شده بر روی ماسک) در مقایسه با سایر انواع SLM، عملاً بزرگ‌تر بوده در نتیجه ماسک‌های مکانیکی معمولاً تفکیک‌پذیری پایین‌تری دارند. البته با استفاده از تکنیک‌های نرم‌افزاری می‌توان تفکیک‌پذیری روش تصویربرداری مبتنی بر ماسک مکانیکی را افزایش داد. ماسک‌های مکانیکی بر خلاف سایر ماسک‌ها از مکانیزم

درحالی‌که در روش‌های فعال، وجود یک یا چند منبع ارسال سیگنال تراهرتز ضروری است [۳]. روش‌های تصویربرداری فعال نسبت به روش‌های تصویربرداری غیرفعال بازه پویای بالاتری داشته و در شرایط محیطی نامناسب عملکرد بهتری دارند. دلیل این امر، وجود قابلیت کنترل و افزایش سطح توان تابشی منبع تراهرتز و در نتیجه دستیابی به بازه پویای بالاتر در سیستم‌های تصویربرداری فعال است. اگر ابعاد صحنه‌ای که در معرض تصویربرداری قرار دارد، نسبت به طول موج بزرگ‌تر باشد، لازم است از آرایه‌ای از منابع و آشکارسازها و یا از جاروب مکانیکی استفاده کرد [۳].

روش‌های تصویربرداری مدرن، عملاً از آرایه‌ای از پیکسل‌های آشکارساز تشکیل شده‌اند به طوری که هر کدام از پیکسل‌های آشکارساز، قسمتی از نور عبوری یا بازتابی از هدف را آشکارسازی و نهایتاً تصویر کلی هدف

را تشکیل می‌دهند [۵-۶]. پیاده‌سازی روش‌های تصویربرداری آرایه‌ای تراهرتز، پرهزینه بوده و از لحاظ تکنولوژی ساخت آشکارساز آرایه‌ای، پیچیدگی‌های فراوانی دارند. به‌عنوان یک جایگزین برای این روش، می‌توان به روش استفاده از یک آشکارساز تک پیکسل در ضمن بهره‌بردن از یک ماسک^۲ در مسیر پرتو تراهرتز اشاره داشت [۴]. باتوجه به ارزان‌قیمت‌تر بودن آشکارساز تک پیکسل نسبت به آشکارساز آرایه‌ای، روش‌های تصویربرداری مبتنی بر آشکارساز تک پیکسل، موردتوجه قرار گرفته است [۷-۱۰] و [۲۸].

برخلاف دوربین که از آرایه‌ای از آشکارسازها تشکیل شده، روش‌های تصویربرداری تک پیکسل، علاوه بر بهره‌مندی از یک آشکارساز تک پیکسل، از یک ماسک متشکل از یک مدولاتور مکانی نور^۳ SLM و یک الگوی ماسک، استفاده می‌کنند. الگوی ماسک، یک ماتریس "صفر" و "یک" با یک توزیع آماری مشخص است. این الگو به SLM اعمال شده و مدولاسیون مکانی نور بر روی SLM مطابق با الگوی ماسک اعمال می‌شود. منظور از مدولاسیون مکانی نور، برنامه‌ریزی SLM به گونه‌ای است که مطابق با ماتریس الگوی ماسک، پرتو تراهرتز در نقاطی از SLM که عناصر ماتریس "یک" هستند، عبور کرده و در نقاطی که عناصر ماتریس "صفر" هستند، پرتو تراهرتز عبور نکرده و جذب شود. به عبارت دیگر با یک الگوی ماسک و یک SLM، پرتو تراهرتز مدوله مکانی شده و این پرتو مدوله شده هدف تصویربرداری را روشن می‌کند. در این روش همه نقاط هدف روشن نمی‌شود و برآیند پرتوهای مدوله شده و تابیده شده به هدف، به‌ازای هر ماسک در آشکارساز تک پیکسل دریافت خواهد شد. با افزایش تعداد ماسک‌ها، آشکارساز تراهرتز، مقادیر مختلفی از ولتاژ خروجی آشکارساز را ثبت و اندازه‌گیری خواهد کرد که با استفاده از این

^۴ Compressive Sensing

^۵ Sparse

^۶ Digital Micro Mirror Device

^۷ Liquid Cristal Device

^۸ Metamaterial

^۹ Printed Circuit Board

^۱ Dynamic Range

^۲ Mask

^۳ Spatial Light Modulator

هر لحظه یک ماسک ۲۰ در ۲۰ پیکسل، پرتو تراهرتز را مدوله کرده که پس از برخورد باهدف و انعکاس از آن، وارد آشکارساز می‌شود. آشکارساز تک پیکسل به‌ازای هر ماسک، یک مقدار ولتاژ در خروجی خود ثبت کرده که با ذخیره این مقادیر و داشتن ماتریس‌های متناظر با هر ماسک و در ادامه با استفاده از الگوریتم‌های سنجش فشرده، تصویر هدف بازیابی می‌شود. در ادامه این مقاله و در بخش ۲ به بررسی روش پیشنهادی تصویربرداری تک پیکسلی تراهرتز در حالت بازتابی پرداخته می‌شود. در بخش ۳ نتایج روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته و در مورد آن بحث خواهد شد و در بخش ۴ نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی تصویربرداری تراهرتز تک پیکسلی در حالت بازتابی و در فاصله ۴ متری آشکارساز تک پیکسل تراهرتز از هدف مطابق با چیدمان مندرج در شکل ۱ است. در این چیدمان، منبع یا تابشگر تراهرتز در فرکانس ۱۰۰ GHz از نوع دیود Impatt انتخاب شده و توان تابشگر در حدود ۸۰ mW است. سیگنال تراهرتز با زمان وظیفه ۶۶٪ و فرکانس ۱/۳ kHz مدوله پالسی شده و با استفاده از یک لنز واگرا بافاصله کانونی ۵ سانتیمتر به هدف که در فاصله ۳/۳۵ متری از منبع تراهرتز قرار دارد، می‌تابد. هدف یک پروفیل آلومینیومی است که از دو ضلع افقی و عمودی به طول ۲۰ سانتیمتر ساخته شده است. مطابق با شکل ۱ پرتو تراهرتز تابیده به هدف پس از برخورد، دچار بازتاب شده که توسط بازتابنده ۵۰ سانتیمتری به‌عنوان Prime Reflector با ساختار کسگرین^۱ به بازتابنده ثانویه به‌عنوان Secondary Reflector هدایت می‌شود.

- ناحیه دید^۲ این سامانه باتوجه‌به رابطه ۱ محاسبه می‌شود. در این سیستم تصویربرداری اندازه فاصله کانونی برابر با ۲۰۰ mm و D_s اندازه سنسور ۱۰ mm است در نتیجه میدان دید معادل با $2/864$ درجه است.

$$\text{FoV} = 2 \text{ Arctan} (D_s / 2f) \quad (1)$$

در ساختار کسگرین شکل ۱، بازتابنده ثانویه در فاصله ۲۰ سانتیمتری از رفلکتور ۵۰ سانتیمتری قرار دارد. پرتو منعکس شده از بازتابنده ثانویه پس از عبور از یک ماسک مکانیکی وارد آشکارساز تک پیکسل تراهرتز می‌شود. در این سامانه تصویربرداری، قطبش سیگنال منبع ۱۰۰ GHz عمودی است. با توجه به اینکه ماسک مکانی مانند یک فیلتر فضایی عمل می‌کند و صرفاً باعث تغییر بر روی پروفایل شدت سیگنال تراهرتز برگشتی می‌شود، تأثیری بر روی مولفه میدان الکتریکی سیگنال نداشته و قطبش سیگنال برگشتی

ساده‌تری برای ساخت برخوردار بوده که موجب شده هزینه‌های ساخت آن کاهش یابد، همچنین تعداد الگوهای قابل پیاده در این ماسک نسبت به سایر مدولاتورهای مکانی محدودتر بوده که منجر به کاهش حجم پردازش داده‌ها می‌شود. از طرفی این نوع ماسک، ناحیه طیفی گسترده‌ای از مرئی، مادون‌قرمز، تراهرتز و سایر باندهای الکترومغناطیسی را جهت مدولاسیون مکانی نور، پوشش می‌دهند. مراجعی که مبتنی بر مدولاتور مکانی مکانیکی بوده و از ماسک‌های مکانیکی استفاده کرده‌اند، در جدول زیر خلاصه شده است.

جدول (۱). مقایسه ماسک‌های مکانیکی

شمار ° مرجع	فرکانس THz	تصویربرداری (بازتابی/عبور ی)	ابعاد ماسک	نوع ماسک
[۳۳]	۱۳-۲	عبوری	۳۲× ۳۲	ماسک فلزی دوار با پیکسل مربعی
[۳۴]	۰/۱۴	عبوری	۳۲× ۳۲	ماسک PCB دوار با پیکسل مربعی
[۳۵]	۰/۱۴	عبوری	۳۲× ۳۲	ماسک فلزی دوار با پیکسل دایره‌ای
[۳۶]	۲/۴۵	عبوری	۱۵× ۱۷	ماسک PCB خطی با پیکسل مربعی
[۳۷]	۲/۵۲	عبوری	۱۰× ۱۵	ماسک فلزی دوار با پیکسل دایره‌ای
[۳۸]	۰/۰۹۳	بازتابی	۱۰× ۱۰	ماسک خطی فلزی با پیکسل مربعی

در تمامی مراجع جدول فوق، فاصله بین هدف و منبع تابش کمتر از ۰/۵ متر گزارش شده است. از آنجایی که کار تحقیقاتی انجام شده در این مقاله برای فاصله ۴ متر است، می‌تواند به عنوان تنها مرجعی که در این فاصله تصویربرداری بازتابی با روش آشکارساز تک پیکسل و مدولاتور مکانی مکانیکی انجام شده در نظر گرفته شود که به عنوان نوآوری این مقاله محسوب می‌شود. در این مقاله یک روش تصویربرداری تک پیکسلی تراهرتز در حالت بازتابی در فاصله حدوداً ۴ متری از هدف ارائه شده است. مدولاسیون مکانی نور توسط یک ماسک مکانیکی خطی با ابعاد ۲۰ در ۱۰۰ پیکسل با توزیع آماری برنولی انجام می‌شود. اندازه هر پیکسل بر روی این ماسک معادل با ۵ میلی‌متر است. این ماسک با استفاده از یک Ball screw از مسیر پرتو تراهرتز عبور کرده و در

^۱ Cassegrain

^۲ Field of view (FoV)

پیکسل‌ها در راستای عرض ماسک، یعنی ۲۰ پیکسل، با توجه به ابعاد لنز که در حدود ۱۰ سانتیمتر است، انتخاب شده است. همینطور تعداد پیکسل‌ها در راستای طول ماسک، یعنی ۱۰۰ پیکسل که معادل با ۵۰ سانتیمتر است متناسب با محدوده مجاز حرکتی Ball screw انتخاب شده است. شکل ۲ الگوی پیاده شده بر روی ماسک مکانیکی را نشان می‌دهد.



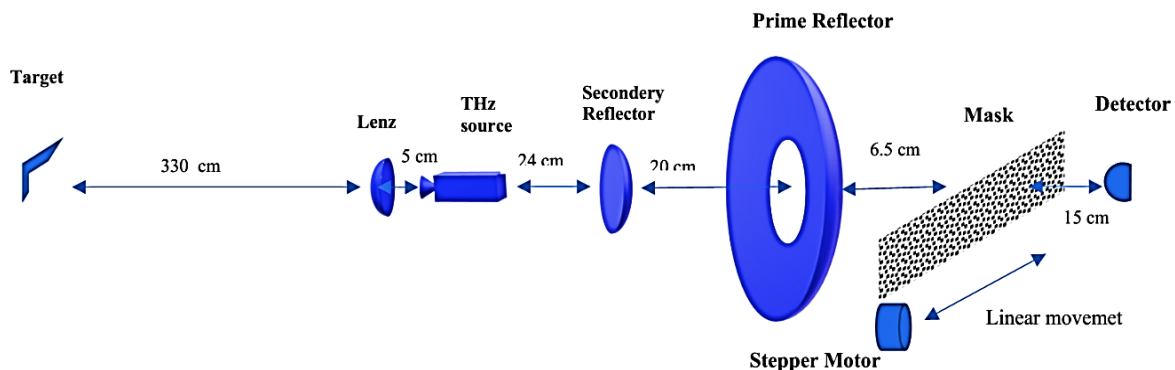
شکل (۲) - الگوی دوسطحی تصادفی با ابعاد 20×100 پیکسل

در شکل ۲ ماسک شماره ۱، با مربع مشکی رنگ نشان داده شده است. لازم به ذکر است برای تولید ماسک‌های شماره ۲ تا ۸۱ تنها به اندازه یک ستون به سمت راست، جابجایی لازم است که این جابجایی توسط حرکت خطی ایجاد شده توسط مجموعه Ball screw و موتور پله انجام می‌شود. سوراخ‌کاری پیکسل‌ها به شکل مربع علاوه بر سختی در سوراخ‌کاری، متضمن هزینه بالا، دقت بسیار بالایی دستگاه برش و اثرات پراش از لبه‌های تیز پیکسل‌های مربعی است. به همین دلیل پیکسل‌ها از شکل مربع به دایره تغییر شکل پیدا کرد. با توجه به ساختار فلزی ماسک مکانیکی پیکسل‌های سفید به دایره‌های توخالی تغییر پیدا کرد. این ساده‌سازی منجر به کاهش میزان پراش از پیکسل‌ها، کاهش هزینه، کاهش دقت دستگاه سوراخ‌کاری و کاهش زمان مورد نیاز برای ساخت ماسک مکانیکی خطی شد. شکل ۳ تصویری از ماسک مکانیکی خطی با همان ابعاد ولی با پیکسل‌های دایره‌ای را نشان می‌دهد که در عمل مورد استفاده قرار گرفته است.

از روزه‌های ماسک عبور می‌کند. از طرفی آشکارساز نیز از نوع دیود شاتکی با بایاس صفر است که نوع آنتن آن Log-spiral است. نویز معادل توان حدود $7 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ در فرکانس 100 GHz است. همچنین از یک لنز سیلیکونی جهت متمرکز کردن پرتو بر روی آشکارساز بهره‌برده شده است. این آشکارساز از نوع Ultrafast بوده و در بازه طول موجی $0.42-6 \text{ mm}$ فعال است. ماسک مکانیکی همانطور که ذکر شد یک ماسک ۲۰ در ۱۰۰ پیکسل بوده که ابعادی در حدود ۱۰ سانتیمتر در ۵۰ سانتیمتر دارد. این ماسک توسط یک موتور پله و یک Ball screw به صورت خطی حرکت کرده و این حرکت خطی، در هر لحظه یک ماسک متفاوت در مسیر پرتو تراهرتز قرار داده و به عبارت دیگر، در هر لحظه مدولاسیون مکانی متفاوتی برای پرتو تراهرتز اعمال خواهد شد. با یک حرکت خطی کامل، ۸۱ ماسک، پرتو تراهرتز برگشتی از هدف را مدوله می‌کند. مدت زمانی که ۸۱ ماسک مختلف سیگنال تراهرتز بازتابی از هدف را مدوله می‌کند حدود 60 s و مدت زمانی پردازش داده‌ها و تبدیل آن به تصویر هدف نیز حدود 3 s است. به این ترتیب مدت زمان لازم برای تشکیل تصویر حدود 63 s است که عکس این مقدار نرخ فریم سیستم تصویر برداری را تعیین می‌کند که حدود 16 frame/s است.

۲-۱- ماسک مکانیکی

برای تولید ماسک، از الگوی دوسطحی سیاه‌وسفید از نوع تصادفی برنولی استفاده شده که توسط نرم‌افزار متلب تولید می‌شود. این الگو بر روی یک صفحه فلزی از جنس استیل با ابعاد فیزیکی کلی 10×50 سانتیمتر پیاده شده که در این ابعاد 20×100 پیکسل قرار دارد و اندازه هر پیکسل 5 mm است. با توجه به آنکه طول موج پرتو تابشگر در حدود 3 mm است، اندازه هر پیکسل بر روی ماسک کمی بیشتر از این مقدار یعنی 5 mm در نظر گرفته شده است. تعداد



شکل (۱). چیدمان تصویربرداری تک پیکسلی تراهرتز در حالت بازتابی فعال در فاصله ۴ متری آشکارساز تک پیکسل تراهرتز از هدف

وجود نخواهد داشت. اگر در تصویر بازایی شده، هر دو هدف قابل تشخیص باشد، فاصله بین دو هدف همان میزان تفکیک پذیری سیستم خواهد بود در غیر این صورت باید فاصله بین دو هدف را افزایش داد و مجدداً تصویر را بازایی کرد، این فرایند تا زمانی که ۲ هدف قابل تشخیص باشند، تکرار می شود. علت اینکه اندازه پیکسل برابر ۵ mm در نظر گرفته شده آن است که اندازه پیکسل باید بزرگتر از اندازه طول موج نور ورودی باشد که برابر ۳ mm است، این امر باعث می شود که حین عبور سیگنال تراهرتز از پیکسل های دایره توخالی، سیگنال میرا نشده و در نتیجه سطح سیگنال ثبت شده در آشکارساز افت نکند. به عبارت دیگر اگر اندازه پیکسل در بازه ۳ mm تا ۵ mm باشد سطح ولتاژ پایین آمده و اگر اندازه پیکسل از ۵ mm بزرگتر شود باعث کاهش تعداد ستون های ماسک مکانیکی خواهد شد. در واقع اگر اندازه پیکسل از ۵ mm بزرگتر بشود، ابعاد ماسک بزرگتر از ۵×۱۰۰ پیکسل می شود به طوری که این افزایش ابعاد ماسک، منجر به افزایش طول Ball screw در چیدمان آزمایشگاهی است. به این ترتیب موتور پله توانایی اسکن ماسک های با طول بزرگتر از ۵ mm را نخواهد داشت که باعث از دست رفتن تعدادی از ماسک ها شده و نهایتاً منجر به کاهش کیفیت تصویر بازایی شده خواهد شد. در نتیجه، باید طول موتور خطی تغییر کند که به دلیل عدم دسترسی به طول بزرگتر این کار امکان پذیر نبود. همچنین باید به این نکته توجه کرد این افزایش طول منجر به افزایش اندازه و وزن چیدمان تصویربرداری نیز خواهد شد.

۲-۳ شبیه سازی اپتیکی

در چیدمان آزمایشگاهی بازتابی حدود ۳/۳۵ m بین منبع تراهرتز و هدف و حدود ۴ m بین آشکارساز و هدف فاصله وجود دارد. منبع ورودی تراهرتز با طول موج ۳ mm و زاویه واگرایی $\pm 9^\circ$ درجه بوده و در فاصله کانونی لنز L1 که حدوداً برابر با ۵۰ mm است، قرار می گیرد. لنز L1 با فاصله کانونی حدود ۵۰ mm، ضخامت ۵۰ mm، قطر ۱۰۰ mm و ضریب شکست ۱/۴۶ (ضریب شکست TPX^۲) است. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، نور توسط لنز L1 در نزدیک کانون، جمع شده و سپس واگرا می شود. نور واگرا بعد از انتشار در فاصله حدوداً ۳۳۰۰ mm به هدف برخورد کرده و بخشی از پرتوها به طرف آینه M1 هدایت می شود. آینه M1 پرتوهای بازتابی از هدف را به سمت آینه M2 تابانده و توسط این آینه، پرتوها به سمت آشکارساز هدایت شده و کانونی می شود. ذکر این نکته ضروری است که در شکل ۴، جهت جلوگیری از ازدحام المان ها و پرتوها ماسک مکانیکی مشاهده نمی شود؛ ولی عملاً وجود دارد.



شکل (۳). ماسک مکانیکی ساخته شده با پیکسل های دایره ای

در شکل فوق همان طور که مشاهده می شود از هر طرف ماسک به اندازه ۱cm فضای خالی در نظر گرفته شده که علت آن ملاحظات مکانیکی جهت اتصال ماسک مکانیکی بر روی پایه متحرک Ball screw است.

۲-۴ تفکیک پذیری

باتوجه به اهمیت میزان تفکیک پذیری در سیستم تصویربرداری در این بخش به نحوه تعیین تفکیک پذیری اشاره می شود. پارامترهایی که در تعیین تفکیک پذیری سیستم تصویربرداری تک پیکسل مؤثر است عبارتند از معیار رایلی^۱، اندازه طول موج منبع نوری تراهرتز، اندازه پیکسل یا قطر هر روزنه بر روی ماسک و ابعاد هر یک از ماسک ها. با این وجود، برای تعیین دقیق میزان تفکیک پذیری می توان از الگوی USAF-1951 [۲۶] بهره برد یا از دو هدف فلزی که در فاصله معین از یکدیگر قرار گرفته اند، استفاده کرد. معیار رایلی اشاره شده برای بازتابنده کسگرین کانونی کننده قبل از آشکارساز به صورت زیر است.

$$x = 2.44 \frac{\lambda}{D} f \quad (۲)$$

در رابطه فوق x ، فاصله بین دو نقطه قابل تفکیک بر روی آرایه آشکارساز، λ طول موج منبع نور، D قطر لنز و f فاصله کانونی لنز در شکل ۱ است. در این چیدمان با توجه به اینکه $D = 200$ mm، $f = 500$ mm و $\lambda = 3$ mm است، مقدار $x = 3$ mm بدست می آید. به عبارت دیگر دو نقطه به فاصله ۳ mm از هم بر روی هدف قابل شناسایی است. اما با توجه به اینکه در این چیدمان آزمایشگاهی از آشکارساز آرایه ای استفاده نشده و فرایند بازسازی تصویر به صورت پردازشی صورت می گیرد، می توان گفت که تصویر بازایی شده دارای تفکیک پذیری ۲۰×۲۰ پیکسل است که اندازه هر پیکسل برابر ۵ mm است. با این حال جهت تعیین دقیق تفکیک پذیری یا باید از الگوی USAF فلزی ۱۶ بهره برد یا ۲ هدف فلزی را در فواصل بزرگتر از ۳ mm تعبیه کرد. علت انتخاب عدد ۳ mm آن است که طول موج منبع تراهرتز معادل این عدد بوده به عبارت دیگر اهداف با فواصل کمتر از ۳ mm قابل تفکیک نخواهند بود و امکان بازایی تصویر

^۲ Polymethyl pentene

^۱ Rayleigh Criterion

انتشار پرتو در این سیستم تصویربرداری را به درستی نشان داد. در حالت شبیه سازی با تعداد پرتوهای بالا، مسیر حرکت سیگنال تراهرتز به درستی قابل تشخیص نبوده و همچنین به دلیل چگالی حجمی بالای پرتوها، تعدادی از ادوات چیدمان آزمایشگاهی به سختی قابل مشاهده خواهد بود.

در این سیستم تصویربرداری برای اینکه شدت قابل ملاحظه تری به آشکارساز برسد می توان، توان منبع نور ورودی را افزایش داد که عملاً کار بسیار پر هزینه ای است. راه جایگزین می تواند استفاده از یک آشکارساز با سطح مقطع بزرگ تر باشد که منجر به افزایش شدت جمع آوری شده توسط آشکارساز می شود. این انتخاب نیز پر هزینه خواهد بود.

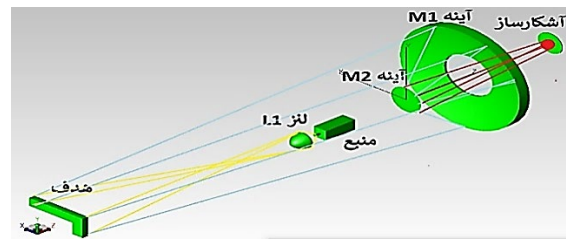
بهترین راهکار می تواند استفاده از یک سیستم موازی ساز در جلوی منبع باشد به طوری که زاویه واگرایی منبع نور را کاهش داده یا به عبارت دقیق تر، مانع از واگرایی قابل ملاحظه پرتو حین انتشار شود. پرتوهای بازتاب شده از هدف که مقدار قابل ملاحظه ای دارند، به آینه M1 برخورد کرده و به سمت آینه M2 هدایت می شود. آینه M2 نیز، پرتوهای بازتابی را بر روی آشکارساز متمرکز می کند. طراحی و ساخت یک ماژول موازی ساز هزینه کمتری نسبت به انتخاب های قبلی دارد.

علاوه بر این مشاهده می شود که از لنز L1، پرتوهای بازتابی از سطح اولیه لنز، مشاهده می شود. به عبارت دقیق تر، بخشی از پرتوی تراهرتز اصلاً از لنز L1 عبور نمی کند که برای جلوگیری از این پدیده، عموماً از لایه نازک ضد بازتاب بر روی سطح اولیه لنز استفاده می شود. همچنین بر روی آشکارساز نیز یک لنز سیلیکونی تعبیه شده که بخشی از سیگنال ورودی به آشکارساز را بازتاب می دهد، به منظور حل این چالش نیز می توان از لایه ضد بازتاب بر روی سطح استفاده کرد.

۴-۲ فرآیند تشکیل تصویر با استفاده از ماسک های

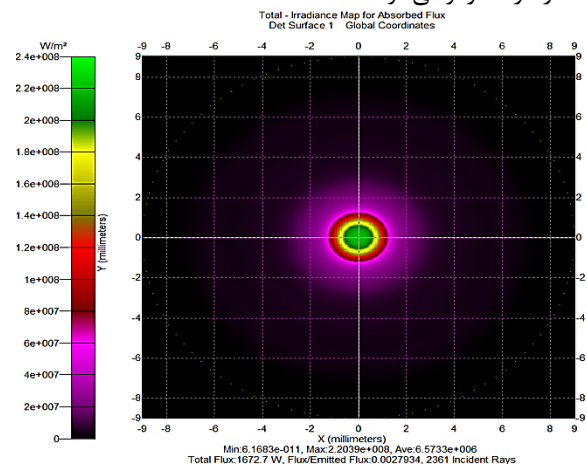
مکانی و سنجش فشرده:

مطابق با چیدمان شکل (۱)، پس از تابش منبع تراهرتز و عبور پرتو تراهرتز از لنز L1، پرتو تراهرتز به هدف برخورد می کند. پس از بازتاب پرتو تراهرتز از هدف از سطح بازتابنده اولیه و ثانویه منعکس شده و در ادامه از معرض ماسک هایی که به صورت خطی توسط یکی موتور پله ای، پرتو تراهرتز را مدوله مکانی می کنند، عبور کرده و نهایتاً در آشکارساز دریافت می شود. به ازای عبور هر ماسک یک مقدار مشخص ولتاژ در آشکارساز ثبت و ذخیره می شود. به مقادیر ثبت شده در آشکارساز، مقادیر اندازه گیری شده اطلاق می کنیم و آن را با بردار $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{m \times 1}$ نشان می دهیم که m تعداد ماسک ها و بنابراین تعداد مقادیر اندازه گیری شده در آشکارساز است. سرعت حرکت خطی ماسک ها به گونه ای است که به ازای عبور هر



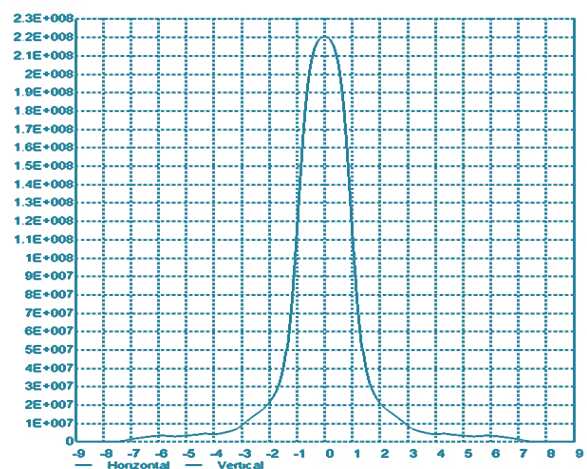
شکل (۴). مسیر انتشار پرتو در چیدمان شبیه سازی شده با تعداد محدودی از پرتو

ماسک مکانیکی در فاصله حدود ۶/۵ cm از آینه M1 قرار دارد به طوری که پرتوهای کانونی شونده از آینه M2 به آشکارساز، در این مسیر، توسط ماسک مکانیکی فلزی مدوله شده و در انتها بر روی آشکارساز متمرکز می شود.



شکل (۵). توزیع شدت نور ثبت شده بر روی آشکارساز

شکل ۵ پروفایل عرضی شدت ثبت شده توسط آشکارساز به ازای یک طول مشخص را نشان می دهد که مطابق شکل، در مرکز بیشترین شدت و با میل به کناره ها، از میزان شدت کاسته می شود. همچنین در شکل ۶ نمودار شدت قابل مشاهده است که تقریباً دارای توزیع گوسی است.



شکل (۶). چیدمان بازتابی به ازای فاصله بین منبع نور تا هدف حدود ۳۳۰ mm باید به این نکته اشاره کرد که در شکل ۴ تنها تعداد محدودی از پرتوهای هدایت شده در چیدمان، نشان داده شده تا بتوان مسیر

$$\mathbf{x} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{y} \quad (7)$$

از آنجا که ماتریس \mathbf{M} یک ماتریس مربعی نیست ناگزیر به استفاده از روش‌های سنجش فشرده^۲ هستیم. مطابق با [۳۲] بردار \mathbf{x} که معادل با تصویر هدف است را می‌توان با نورم L_0 بازیابی کرد. از آنجا که این مسئله تنک، غیرمحدب بوده و بنابراین یک مسئله NP-hard است، مطابق با [۳۲] می‌توان آن را با جایگزینی با نورم L_1 به صورت زیر حل کرد:

$$\min \|\mathbf{x}\|_1 \quad s.t. \quad \mathbf{y} = \mathbf{M}\mathbf{x} \quad (8)$$

جایی که $\|\cdot\|_1$ بیانگر نورم L_1 است. رابطه فوق به عنوان مسئله Basis pursuit (BP) نیز شناخته می‌شود [۳۰]. همینطور مسئله رابطه γ را می‌توان با نورم TV به صورت زیر حل کرد:

$$\min \|\mathbf{x}\|_{TV} \quad s.t. \quad \mathbf{y} = \mathbf{M}\mathbf{x} \quad (9)$$

مطابق با [۲۹] نورم TV در فرم ایزوتروپیک به‌عنوان نورم L_2 گرادیان گسسته ماتریس تصویر $\nabla \mathbf{X}$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\|\mathbf{X}\|_{TV} := \sum_{i,j} \|\nabla \mathbf{X}\|_2, \quad (10)$$

$$\nabla \mathbf{X} = [(\mathbf{X}(i+1, j) - \mathbf{X}(i, j))(\mathbf{X}(i, j+1) - \mathbf{X}(i, j))] \quad (11)$$

برای حل دو مسئله بهینه‌سازی تعریف شده در روابط ۱۰ و ۱۱ از الگوریتم NESTA استفاده می‌کنیم [۲۹].

۵-۲ بخش پردازش

در این بخش با استفاده از ۸۱ الگوی مختلف ماسک، ۸۱ مقدار اندازه‌گیری شده در آشکارساز تراهرتز خواهیم داشت که همه این مقادیر با استفاده از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال برد آردوینو^۳ در یک بردار مشاهده \mathbf{y} ثبت خواهد شد. از سوی دیگر مقادیر مشتمل بر صفر و یک برای هر ماسک نیز معادل با یک ماتریس 20×20 است. هر ماتریس مربوط به یک ماسک، تبدیل به یک بردار 1×400 شده و به ازای ۸۱ ماسک مورد استفاده یک ماتریس 81×400 بنام ماتریس $M \in \mathbb{C}^{81 \times 400}$ خواهیم داشت. هم بردار \mathbf{y} و هم ماتریس M معلوم است اما تصویر هدف مجهول است که در قالب یک ماتریس 20×20 پیکسل بوده و ما آن را برداری کرده و به صورت بردار $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{400 \times 1}$ نشان می‌دهیم. در این الگوریتم از حداقل سازی نورم l_1 ^۴ استفاده شده و بیشینه تکرار مجاز در الگوریتم ۵۰۰۰ بار اجرا و خطای مجاز الگوریتم 10^{-6} در نظر گرفته شده است. با استفاده از نرم افزار متلب و با استفاده از این الگوریتم، تصویر هدف بازیابی خواهد شد. علاوه بر الگوریتم‌های سنجش فشرده، پیش پردازش‌هایی نظیر

ماسک، یک مقدار ولتاژ در آشکارساز ثبت و ذخیره می‌شود. به عبارت دیگر حرکت ماسک‌های خطی با ثبت و ذخیره داده‌های اندازه‌گیری شده توسط آشکارساز همزمان است.

از سوی دیگر تصویر هدف، تصویری است که فرض می‌کنیم برای ما مجهول است و باید بازیابی شود. این فرض خصوصاً در مواقعی که هدف پنهان شده و توسط چشم بصری قابل رویت نیست ملموس‌تر است. ما تصویر مجهول هدف را به صورت یک ماتریس $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ نشان داده و آن را به صورت زیر برداری^۱ می‌کنیم:

$$\mathbf{x} = \text{vec}(\mathbf{X}) \in \mathbb{C}^{n \times 1} \quad (3)$$

به طوری که $n = N \times N$ است و N ابعاد ماتریس تصویر در هر راستا است. از سوی دیگر هر ماسک را هم‌اندازه با ماتریس تصویر به صورت $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ انتخاب کرده و هر ماسک را به صورت زیر برداری می‌کنیم.

$$\mathbf{a}_i = [A_{i1} \quad A_{i2} \quad \dots \quad A_{in}] = \text{vec}(\mathbf{A}_i) \in \mathbb{C}^{1 \times n} \quad (4)$$

به طوری که \mathbf{A}_i ماسک i ام و \mathbf{a}_i بردار ماسک i ام است. حال بردار ماسکها را در ردیفهای ماتریس \mathbf{M} که به آن ماتریس ماسک می‌گوییم قرار می‌دهیم.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{a}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \dots & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & \dots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{m1} & M_{m2} & M_{m3} & M_{mn} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{m \times n} \quad (5)$$

که \mathbf{a}_1 تا \mathbf{a}_m به ترتیب ماسک‌های اول تا m هستند به طوری که $A = M_{ij}$ و M_{ij} می‌توانند مقادیر صفر یا یک اختیار کنند. مقدار صفر به معنی عدم اجازه عبور پرتو تراهرتز در آن نقطه (پیکسل) انقطه (ک مکانیکی است و مقدار صفر نیز به معنی عبور پرتو تراهرتز از آن نقطه (پیکسل) انقطه (نتخاب مقادیر صفر و یک در هر ماسک به صورت تصادفی و با توزیع برنولی [۳۱] انجام می‌شود.

بر اساس توضیحات فوق، بردار اندازه‌گیری \mathbf{y} که همان مقادیر ولتاژ ثبت شده در آشکار است را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$\mathbf{y} = \mathbf{M}\mathbf{x} \quad (6)$$

در توضیح رابطه فوق ذکر این نکته لازم است که هر ردیف ماتریس \mathbf{M} معادل یک ماسک است که با ضرب در بردار مجهول \mathbf{x} یک مقدار یا یک درایه از بردار اندازه‌گیری \mathbf{y} بدست می‌آید. حال مسئله بازیابی بردار مجهول \mathbf{x} از اتریس معلوم \mathbf{M} و بردار معلوم \mathbf{y} است. رای بازیابی بردار \mathbf{x} می‌توان از مسئله معکوس زیر استفاده کرد.

² Compressive Sensing

³ Arduino

⁴ Norm

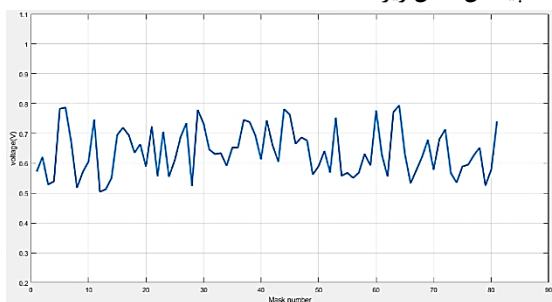
¹ Vectorize

یک سیگنال^۱ TTL با فرکانس ۱/۳kHz با زمان وظیفه ۶۶ درصد جهت مدولاسیون پالس سیگنال تراهرتز به منبع تراهرتز اعمال می‌شود. شکل زیر سیگنال TTL را نشان می‌دهد.



شکل (۸). سیگنال TTL جهت مدولاسیون پالس سیگنال تراهرتز

با استفاده از چیدمان شکل ۱ سیگنال مدوله شده پالسی تراهرتز پس از تولید توسط منبع و واگرایی توسط لنز، به هدف برخورد کرده و پس از بازتاب از هدف، توسط بازتابنده‌های اولیه و ثانویه متمرکز می‌شود. پرتو تراهرتز متمرکز شده پس از عبور از الگوهای مختلف ماسک شکل ۲ که با حرکت خطی ماسک ایجاد می‌شود، مدوله مکانی شده و نهایتاً پرتو تراهرتز مدوله مکانی شده به آشکارساز تک پیکسل می‌رسد. با توجه به حرکت خطی ماسک مکانیکی، بدیهی است که در هر لحظه یک الگوی منحصر بفرد پرتو تراهرتز را مدوله می‌کند؛ بنابراین در هر لحظه مقدار ولتاژ متفاوتی در آشکارساز تک پیکسل خواهیم داشت. این مقدار ولتاژ، برآیند پرتو تراهرتز عبوری از پیکسلهایی از ماسک مکانیکی است که اجازه عبور داشته اند. ولتاژ دریافتی به ازای ماسک های مختلف در آشکارساز تک پیکسل شکل زیر آمده است.



شکل (۹). نمودار ولتاژ دریافتی به ازای ماسک های مختلف

بر اساس مقادیر به دست آمده و رابطه ۳ و با استفاده از الگوریتم Nesta به بازیابی تصویر هدف می‌پردازیم. ابتدا با در نظر گرفتن تنها ۵۰ الگوی ماسک تصویر را بازیابی می‌کنیم. لازم به ذکر است در شرایط عادی و بدون استفاده از الگوریتم های سنجش فشرده با فرض استفاده از الگوهای تصادفی ماسک، نیاز به ۴۰۰ الگوی ماسک داشتیم تا بتوان تصویر هدف را بازیابی کرد. در اینجا از ۱۲/۵ درصد

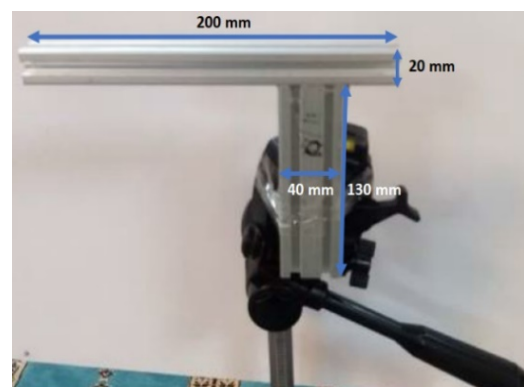
حذف نویز و افزایش بهره مورد نیاز است. سرعت نمونه برداری مبدل آنالوگ به دیجیتال برد آردوینو نیز بر روی بیشینه تنظیم می‌شود. با توجه به اینکه کریستال روی برد آردوینو دارای فرکانس کاری برابر با ۱۶ مگاهرتز بوده و کلاک مبدل آنالوگ به دیجیتال روی این برد $\frac{1}{128}$ این مقدار است، در نتیجه کلاک مبدل آنالوگ به دیجیتال برابر با ۱۲۵ کیلوهرتز می باشد. حال با فرض ۱۳ بیتی بودن، داده خروجی ماکزیم نرخ نمونه برداری این قطعه برابر با ۹/۶۱۵ کیلوهرتز می باشد.

۱-۵-۲ اعمال فیلتر دیجیتال برای حذف نویز

باتوجه به ضرورت حرکت خطی ماسکها و استفاده از یک Ball screw و موتور پله برای تولید این حرکت خطی، یک نویز ناخواسته بر روی مقادیر اندازه گیری شده توسط آشکارساز ظاهر می‌شود. برای حذف این نویز ناشی از مجموعه تولید حرکت خطی، از فیلتر دیجیتال استفاده می‌شود. در این بین پیاده سازی فیلترهای با مرتبه بالا به صورت آنالوگ امری دشوار و در بعضی موارد ناممکن است. در مقابل، پیاده سازی فیلترهای دیجیتال بر روی سیستم های کامپیوتری، دستیابی به شاخص های مورد نظر را تا حد بسیار زیادی آسان ساخته است. در طراحی فیلتر دیجیتال، به منظور دستیابی به شاخص هایی نظیر flatness و sharpness از فیلترهای مرتبه فیلتر بالاتر استفاده می‌کنیم. برای پیاده سازی فیلتر از محیط FDAtool در متلب استفاده شده و یک فیلتر پایین گذر FIR با فرکانس قطع ۱/۲ kHz پیاده سازی و اعمال شده است.

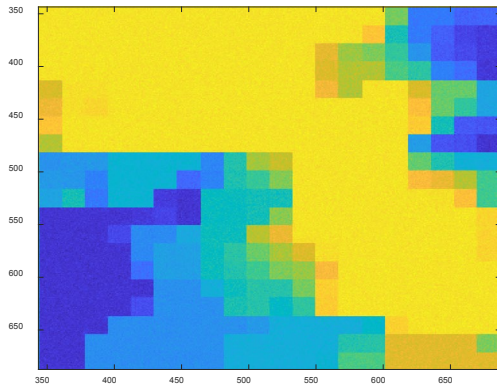
۳- نتایج و بحث

مطابق با شکل زیر، هدف از پروفایل های آلومینیومی ساخته شده است.



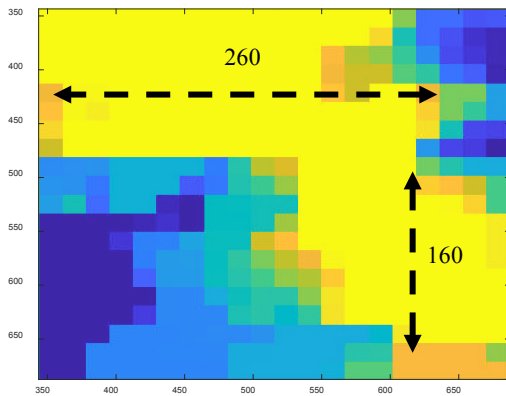
شکل (۷). هدف ساخته شده از پروفیل آلومینیومی

¹ Transistor-Transistor Logic



شکل (۱۲). تصویر بازیابی شده از هدف با استفاده از ۸۱ الگوی ماسک قبل از اعمال فیلتر دیجیتال

با استفاده از فیلتر دیجیتال، تصویر هدف بازیابی شده پس از اعمال فیلتر دیجیتال مطابق با شکل زیر خواهد بود.



شکل (۱۳). تصویر بازیابی شده از هدف با استفاده از ۸۱ الگوی ماسک پس از اعمال فیلتر دیجیتال

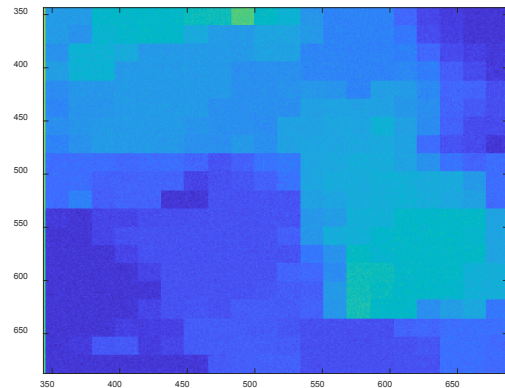
همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با اعمال فیلتر دیجیتال و با استفاده از ۸۱ ماسک و ثبت مقادیر بدست آمده توسط آشکارساز تک پیکسل تراهرتز، تصویر بازیابی شده بدست آمده است. در تصویر فوق، ابعاد افقی و عمودی هدف در تصویر بازسازی شده با ضریب ۰/۸ سانتیمتر متناسب با تصویر اصلی هدف است. برخی مغایرت‌ها در تناظر یک به یک تصویر بازسازی شده و تصویر اصلی هدف، می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- پایه نگهدارنده هدف
- پایین بودن نسبت سیگنال به نویز در مود بازتابی
- برای مقایسه تصویر اصلی و تصویر بازیابی شده از معیار MSE استفاده می‌کنیم که به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

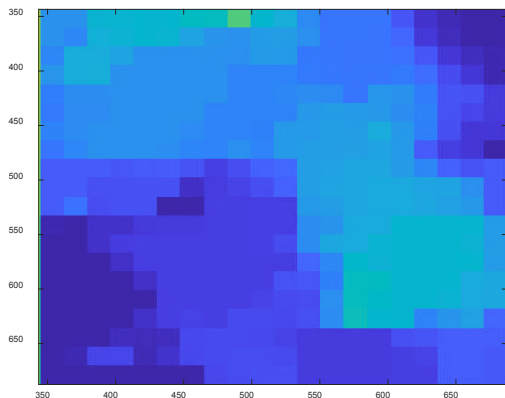
خطای MSE برای تعداد ۵۰ ماسک و ۸۱ ماسک، قبل و بعد از اعمال فیلتر دیجیتال مشابه جدول زیر است.

الگوهای ماسک استفاده کرده‌ایم. تصویر بازیابی شده از هدف مطابق با شکل زیر است.



شکل (۱۰). تصویر بازیابی شده از هدف با استفاده از ۵۰ الگوی ماسک قبل از اعمال فیلتر دیجیتال

باتوجه به وجود نویز ناشی از مجموعه حرکتی و موتور پله و با استفاده از فیلتر دیجیتال، تصویر هدف بازیابی شده پس از اعمال فیلتر دیجیتال مطابق با شکل زیر خواهد بود.



شکل (۱۱). تصویر بازیابی شده از هدف با استفاده از ۵۰ الگوی ماسک پس از اعمال فیلتر دیجیتال

در مرحله بعد، بجای ۵۰ الگوی ماسک، ما از ۸۱ الگوی ماسک استفاده می‌کنیم. مطابق با شکل ۲ این ۸۱ الگو با عبور خطی ماسک با پیکسل‌های دایره‌ای امکانپذیر است. همان‌طور که پیشتر نیز ذکر شد، هر الگو متناظر با یک ماتریس ۲۰×۲۰ است. با حرکت خطی ماسک به اندازه یک ستون، الگوی جدید با اضافه کردن ستون جدید و حذف ستون قبلی ساخته می‌شود.

بنابراین، مطابق شکل ۱ با عبور خطی کامل ماسک مکانیکی، امکان عبور ۸۱ الگو و مدوله کردن پرتو تراهرتز با این ۸۱ الگو فراهم است و همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود دارای ۸۱ مقدار ولتاژ در آشکارساز تک پیکسل است. ضمن آنکه در این حالت ما از ۲۰ درصد الگوهای ماسک استفاده کرده‌ایم. تصویر بازیابی شده از هدف قبل از اعمال فیلتر دیجیتال مطابق با شکل زیر است.

221,2016.

- [7] D. aniel M. Mittleman, "Twenty years of terahertz imaging [Invited]," *Opt. Express*, vol.26, no.8, pp. 9417-9431,2018.
- [8] Y. Zhao, L. Zhang, G. Duan, X. Liu, and C. Zhang, "Single-pixel terahertz imaging via compressed sensing," *Proc. SPIE 8195, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging*, 2011.
- [9] M.F. Duarte, M.A. Davenport, D. Takhar, J. Laska, T. Sun, K.F. Kelly, and R. G. Baraniuk, "Single-pixel imaging via compressive sampling," *IEEE Sig. Proc. Mag.*, vol. 25, pp. 83-91, March 2008.
- [10] J. Kappa, D. Sokoluk, S. Klingel, et al., "Electrically Reconfigurable Micromirror Array for Direct S Spatial Light Modulation of Terahertz Waves over a Bandwidth Wider Than 1 THz," *Nature, Sci Rep* 9, 2597,2019.
- [11] M. Sun and J. Zhang, "Single-Pixel Imaging and Its Application in Three-Dimensional Reconstruction: A Brief Review", *Sensor Journal*,2019.
- [12] B. Lee, "Introduction to ± 12 Degree Orthogonal Digital Micro mirror Devices (DMDs)Mirror (Pixel)," 2018.
- [13] Z. Zhang, X. Wang, G. Zheng, and J. Zhong, "Fast Fourier single-pixel imaging via binary illumination," Springer US, 2017.
- [14] Z. Zhang, X. Ma, and J. Zhong, "Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition," *Nature Publishing Group*, 2015.
- [15] S. An, N. Saqueeb, and K. Sertel, "Compressive Terahertz Imaging using a Single-bit," *IEEE*, 2018.
- [16] H. Shen, "Compressed Sensing on Terahertz Imaging," 2012.
- [17] T. A. O. Matsu and K. A. M. Iyamoto, "Broadband high-resolution terahertz single-pixel imaging."
- [18] T. Vasile, V. Damian, D. Coltuc, and M. Petrovici, "Optics & Laser Technology Single pixel sensing for THz laser beam pro fi ler based on Hadamard Transform," Elsevier, 2016.
- [19] Y. Ma, J. Grant, S. Saha, and D. R. S. Cumming, "Terahertz single pixel imaging based on a Nipkow disk," 2012.
- [20] E. S. Ermeidan, "Enhancing the image resolution in a single-pixel sub-THz imaging system based on compressed sensing," 2020.
- [21] Y. He et al. "High-resolution sub-sampling incoherent x-ray imaging with a single-pixel detector," AIP Publishing, LLC, 2020.
- [22] Y. Hayasaki and R. Sato, "Single - pixel camera with hole - array disk," Springer Japan, 2020.
- [23] C. M. Watts et al. "Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators," *Nature Publishing Group*, 2014.
- [24] W. Lee, H. Jung, H. Jo, M. S. Kang, and H. Lee, "Terahertz Single-Pixel Imaging System with Electrically Tunable Metamaterial Spatial Light Modulator," 2019–2020.
- [25] S. Rout, "Active Metamaterials for Terahertz Communication and Imaging Active Metamaterials for Terahertz Communication and Imaging A dissertation submitted by Saroj Rout in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in c 2016, Saroj Rout Advisor : Professor Sameer Sonkusale," 2016.
- [26] "How to read an usaf 1951 target", <https://www.optowiki.info/faq/how-to-read-target>

جدول (۲). خطای MSE

۸۱	۵۰	تعداد ماسک	خطای MSE
۰.۰۶۱۲	۰.۰۹۹۸	قبل از اعمال فیلتر دیجیتال	
۰.۰۲۳۴	۰.۰۶۵۰	پس از اعمال فیلتر دیجیتال	

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از یک منبع ۱۰۰ GHz، آشکارساز تک پیکسل و یک مدولاتور مکانی از نوع مکانیکی، یک روش تصویربرداری بازتابی فعال از هدف در فاصله حدوداً ۴ متر از آشکارساز تک پیکسل تراهرتز پیشنهاد و ارائه شد. بر خلاف تصویربرداری متداول که از آرایه ای از پیکسل ها جهت تصویر برداری استفاده می کند، صرفاً از یک تک پیکسل برای تصویربرداری استفاده شده است. برای بازیابی تصویر از مدولاتور مکانی نور و الگوریتم سنجش فشرده استفاده شده است. فرآیند مدولاسیون سیگنال بازتابی از هدف با استفاده از ماسک های خطی مبتنی بر الگوی تصادفی صورت گرفت. به ازای هر یک ماسک، سیگنال مدوله متناظر با آن، توسط آشکارساز تک پیکسل ثبت شده و با استفاده از مبدل، به داده دیجیتال تبدیل شد. داده های به دست آمده به دلیل وجود لرزش در مجموعه حرکت خطی شامل موتور پله ای و Ball Screw به تصویر هدف نویز اضافه کرد که منجر به کاهش کیفیت تصویر هدف می شد. با اعمال فیلتر دیجیتال، کیفیت تصویر بازیابی شده از نظر معیار MSE بهبود یافت. همینطور با افزایش تعداد ماسک ها از ۵۰ ماسک به ۸۱ ماسک کیفیت تصویر بازیابی شده از نظر معیار MSE افزایش یافت.

۵- مراجع

- [1] Y. S. Lee, "Terahertz Optics," *Principles of Terahertz Science and Technology*, pp. 1–56, Oct. 2008.
- [2] A. Rostami, H. Rasooli, H. Baghban, "Terahertz Technology Fundamentals and Applications," Springer, 2011.
- [3] V. Krozer et al, "Terahertz Imaging Systems with Aperture Synthesis Techniques," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 7, pp. 2027-2039, July 2010.
- [4] M. F. Duarte, M. A. Davenport, D. Takhar, J. N. Laska, T. Sun, K. F. Kelly, and R. G. Baraniuk, "Single-pixel imaging via compressive sampling," *IEEE Signal Process. Mag.* vol.25, no.2, pp. 83–91. 2008.
- [5] Zh. Jiang and X. Zhang, "Terahertz imaging via electrooptic effect," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 12, pp. 2644-2650, Dec. 1999.
- [6] E. Hack, L. Valzania, G. Gäumann, M. Shalaby, C. P. Hauri, and P. Zolliker, "Comparison of thermal detector arrays for off-axis THz holography and real-time THz imaging," *Sensors (Basel)* 16(12),

- [32] Zh. Zhang, Y. Xu, J. Yang, X. Li, and D. Zhang, "A survey of sparse representation: Algorithms and applications.", *IEEE Access*, vol. 3, no. 1, pp. 490-530, 2015.
- [33] "Compressed Sensing on Terahertz Imaging, pp. 115-135, Oct. 2017.
- [34] 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.
- [35] "Terahertz Imaging with Compressed Sensing," *Optical Compressive Imaging*, pp. 115-135, Oct. 2012.
- [36] T. Vasile, V. Damian, D. Coltuc, and M. Petrovici, "Single pixel sensing for THz laser beam profiler based on Hadamard Transform," *Optics & Laser Technology*, vol. 79, pp. 173-178, May 2016.
- [37] Y. Ma, J. Grant, S. Saha, and D. R. S. Cumming, "Terahertz single pixel imaging based on a Nipkow disk," *Optics Letters*, vol. 37, no. 9, p. 1484, Apr. 2012.
- [38] U. Alkus, E. S. Ermeydan, A. B. Sahin, I. Cankaya, and H. Altan, "Enhancing the image resolution in a single-pixel sub-THz imaging system based on compressed sensing," *Optical Engineering*, vol. 57, no. 04, p. 1, Apr. 2018.
- [27] <https://candes.su.domains/software/nesta/>.
- [28] J. Shiri, A. Malekzadeh, "EIT-Based Graphene Nanostructure Detectors for Detecting Materials Using Terahertz Waves," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 6, no. 1, 2018 (In Persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1397.6.1.6.2>
- [29] J. A. Lima, F. B. da Silva, R. von Borries, C. J. Miosso, and M. C. Q. Farias, "Isotropic and anisotropic filtering norm-minimization: A generalization of the TV and TGV minimizations using NESTA," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 85, p. 115856, Jul. 2020.
- [30] E. J. Candes, J. Romberg, and T. Tao, "Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information.", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 2, pp. 489-509, 2006.
- [31] R. Baraniuk, M. Davenport, R. DeVore, and M. Wakin, "A Simple Proof of the Restricted Isometry Property for Random Matrices.", *Constructive Approximation*, vol. 28, pp. 253-263, 2008.