



3D Terahertz Point Cloud Image Extraction at 100 GHz frequency in Active Reflection mode based on Disparity Method

M. Salmanian, M. Roueinfar*, S. Babanezhad

*Instructor of Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran

(Received: 2023/08/15, Revised: 2023/11/19, Accepted: 2023/12/11, Published: 2023/12/22)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.10.8>

Abstract

This article presents terahertz imaging at a frequency of 100 GHz in reflective mode, at a distance of 4 m, and under different angles from the target. The terahertz signal source is an Impatt diode that produces a signal at a frequency of 100 GHz. One of the challenges in terahertz imaging is to obtain a three-dimensional geometry or volume image of the target under the terahertz signal radiation so that more information can be obtained from the target, especially when the target is embedded in a way that cannot be understood under an angle. From that, the importance of this issue is doubled, especially at the entrance of security places or military sites, when it is used to inspect people or equipment. The proposed imaging method irradiates the terahertz signal to the target through a lens. The target is placed on a rotating tripod and starts rotating for unequal steps. The return signal from the target under different angles within the field of view of the optical system is focused by a Cassegrain parabolic reflector and forms a two-dimensional image on a 32x32 pixel array camera. The camera captures a set of 2D terahertz images with transformed intensity patterns from the target at different angles. By using the semi-global matching algorithm, two images from the set of recorded images are compared pixel by pixel, and a 3D point cloud is retrieved from the target.

Keywords: Terahertz, 3D Points Cloud, Semi Global Matching, Reflective.

Cite this article: M. Roueinfar*, M. Salmanian, S. Babanezhad "3D Terahertz Point Cloud Image Extraction at 100 GHz frequency in Active Reflection mode based on Disparity Method" Radar, vol.11 , no.2 , pp.101-112 .

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.6.4>

© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

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



تصویربرداری ابر نقاط سه بعدی ترا هرتز در فرکانس ۱۰۰ GHz در حالت بازتابی فعال مبتنی بر روش نابرابری

مهدی سلمانیان، محمد روئین فر*، سعید بابا نژاد

۱- کارشناسی ارشد، ۲- مربی، ۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰، انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.6.4>

چکیده

در این مقاله یک روش تصویربرداری مبتنی بر ابر نقاط متراکم سه بعدی ترا هرتز در فرکانس ۱۰۰ GHz در حالت بازتابی، در فاصله ۴ m و تحت زوایای مختلف از هدف ارائه شده است. هدف از تصویربرداری سه بعدی ترا هرتز، دستیابی به هندسه سه بعدی یا تصویر حجمی از هدف تحت تابش سیگنال ترا هرتز است تا بتوان اطلاعات بیشتری از هدف کسب کرد خصوصاً در مواقعی که هدف به شکلی تعبیه شده است که تحت یک زاویه نمی توان درک درستی از آن به دست آورد. در روش تصویربرداری پیشنهادی، سیگنال ترا هرتز از طریق یک عدسی، به هدف تابانده می شود. منبع تولید سیگنال ترا هرتز از نوع دیود Impatt است که سیگنال ترا هرتز را در فرکانس ۱۰۰ GHz تولید می کند. هدف بر روی یک سه پایه دوار قرار گرفته و به ازای گام های غیر یکسان شروع به چرخش می کند. سیگنال برگشتی از هدف تحت زوایای مختلف در محدوده میدان دید سیستم اپتیکی، توسط یک بازتابنده سهموی کسگرین متمرکز شده و بر روی یک دوربین ترا هرتز آرایه ۳۲*۳۲ پیکسل تشکیل تصویر دوبعدی می دهد. مجموعه ای از تصاویر ترا هرتز دوبعدی با الگوی شدت متحول شده از هدف، تحت زوایای مختلف توسط دوربین ترا هرتز ثبت می شود. با استفاده از الگوریتم تناظر یابی شبه سرا سری، دو تصویر از مجموعه تصاویر ثبت شده با یکدیگر به صورت پیکسل به پیکسل مقایسه شده و یک ابر نقاط سه بعدی از هدف بازیابی می شود. نتایج شبیه سازی و مقایسه نتایج تصاویر بازیابی شده از هدف با تصویر واقعی با توجه به محدودیت های سیستم تصویربرداری ترا هرتز، نشان دهنده موفقیت این روش تصویربرداری در حالت بازتابی است.

کلیدواژه ها: ترا هرتز، ابر نقاط سه بعدی، نابرابری، تناظر یابی شبه سرا سری، بازتابی

و امنیتی [۱]-[۹] مورد استفاده قرار گرفته است.

۱. مقدمه

برای دستیابی به تصاویر دوبعدی ترا هرتز، اغلب از ادوات نوری و الکترونیکی بهره می برند. باین حال، تصاویر دوبعدی مسطح فقط اطلاعات محدودی را ارائه می دهند به خصوص زمانی که هدف مورد نظر یک ساختار سه بعدی است که در بیشتر موقعیت ها چنین است. در واقع برای رسیدن به اطلاعات ساختار داخلی، تصاویر مقطعی و شکل حجمی هدف نیاز به استخراج ابر نقاط متراکم حجمی یا همان تصاویر سه بعدی است. اهمیت این موضوع به ویژه در ورودی مکان های امنیتی یا سایت های نظامی به ازای زمانی که جهت بازرسی افراد یا تجهیزات مورد استفاده قرار می گیرد، دوچندان می شود. روش های مختلفی برای دستیابی به تصاویر سه بعدی ترا هرتز از یک شیء وجود دارد [۳۹]، [۴۰].

امواج الکترومغناطیسی ترا هرتز ناحیه ی فرکانسی بین بازه طیفی مادون قرمز و ماکروویو است و محدود فرکانسی از ۱۰۰ GHz تا ۱۰ THz را پوشش می دهد [۱]. از کاربردهای رایج ترا هرتز، تصویربرداری از اجسام و افراد است که از ویژگی شفافیت طیف ترا هرتز بهره می برد در حالی که بسیاری از اجسام در برابر نور مرئی و امواج مادون قرمز غیر شفاف هستند. عدم تحریک بافت های زنده منجر به استفاده گسترده از این طیف الکترومغناطیسی در پزشکی شده است. در مقایسه با طول موج های ماکروویو، طول موج باند ترا هرتز کوتاه تر است که منجر به وضوح تصویر بالاتر می شود. این ناحیه به طور گسترده ای برای کاربردهای تصویربرداری مانند پزشکی، آثار هنری، کنترل کیفی مواد غذایی

استاد: سلمانیان، مهدی، روئین فر، محمد، بابا نژاد، سعید "تصویربرداری ابر نقاط سه بعدی ترا هرتز در فرکانس ۱۰۰ GHz در حالت بازتابی

فعال مبتنی بر روش نابرابری"، رادار، ۱۱(۲)، ۱۱۲-۱۰۱، ۱۴۰۲. [Dor: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.6.4](https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.6.4)

[۲۴]. با این حال، چرخش تحت زوایایی با اندازه ثابت، نیازمند زمان اندازه گیری طولانی به ویژه برای اجسام پیچیده و بزرگ است. چیدمان سوم رادار THz^7 CW است که از موج پیوسته مدوله شده با فرکانس (FMCW)^۸ استفاده می کند [۲۷]-[۲۵]. رادار FMCW THz برای استفاده در کاربردهای تصویربرداری از اهداف پنهان در فواصل ۴ تا ۲۵ m مورد مطالعه قرار گرفته است. مقدار وضوح در عمق نمونه، توسط محدوده فرکانس جاروب شده تعیین می شود و معمولاً از ۵ mm تا ۱ cm است. روش چهارم توموگرافی همدموس نوری^۹ (OCT) است که برای نمونه، در تصویربرداری مادون قرمز و ناحیه THz [۲۸] مورد استفاده قرار گرفته است. در فن OCT مبتنی بر دامنه زمانی (TD)، از یک منبع THz-CW با همدموسی کم و یک تداخل سنج Mickelson استفاده می شود [۲۹]. در اینجا، سیگنال های THz با همدموسی پایین با تزریق نویز گسیل خودبه خودی تقویت شده (ASE)^{۱۰} از تقویت کننده نوری به فوتودیود تولید می شوند [۳۱]-[۳۰]. THz-TD-OCT دارای مزایای متعددی است که از جمله آن ها می توان به این موارد اشاره داشت: مقرون به صرفه است، نیاز به پردازش سیگنال پیچیده را از بین می برد، برای هر هدفی قابل استفاده است و از اثر الگوی تداخل^{۱۱} رنج نمی برد [۳۲]. در حالی که این روش در تصویربرداری توموگرافی از اجسام موفق بوده است، با این حال، حرکت مکانیکی آینه مرجع در تداخل سنج، برای به دست آوردن اطلاعات عمق، باعث افزایش زمان اندازه گیری شده است. همان طور که اشاره شد متداول ترین نوع از دستگاه های تصویربرداری ترا هرترز سه بعدی که برای فواصل عملیاتی استفاده می شود عموماً از یک منبع پیوسته مدوله شده با پهنای باند مشخص و یک اسکتر دوبعدی استفاده می کند تا با استفاده از یک الگوریتم مشخص تصویر سه بعدی را بازیابی کند. الگوریتم های متنوعی برای بازسازی سه بعدی تصاویر ترا هرترز وجود دارد، متناسب با روش های تصویربرداری که به آن اشاره شد، سه نوع متداول از الگوریتم های تصویربرداری سه بعدی ترا هرترز شامل الگوریتم تجسم فیلتر شده (FBP)^{۱۲}، مهاجرت برد (RMA)^{۱۳} و مهاجرت شیفت فاز (PMA)^{۱۴} است.

تعداد وسیعی از سامانه های تصویربرداری ترا هرترز سه بعدی مانند TOF، عدسی فرنل و توموگرافی، مبتنی بر مقطع نگاری

روش اول روش زمان پرواز (TOF)^۱ است. در این روش از اختلاف زمان پرواز پالس های منعکس شده از قسمت های مختلف جسم برای به دست آوردن اطلاعات عمق استفاده می شود از طرفی نیازی به چرخش هدف برای دستیابی به نماهای مختلف آن نیست. [۱۳] [۱۰] روش دوم، روش مبتنی بر عدسی فرنل^۲ است. از عدسی های فرنل می توان برای به دست آوردن تصاویر سه بعدی با بهره برداری از وابستگی فاصله کانونی به فرکانس استفاده کرد که به کمک این ویژگی، اطلاعات طیفی منجر به استخراج اطلاعات عمق هدف می شود [۱۶]-[۱۴]. همچنین روش هایی وجود دارند که از مجموعه ای از داده های تصویربرداری با زوایای دید متفاوت نسبت به هدف مورد نظر استفاده می کنند. این روش به عنوان مقطع نگاری یا توموگرافی^۳ شناخته می شود به طوری که برای بازسازی هدف، از تصاویر تجسم های^۴ به دست آمده از هدف مبتنی بر تغییر زاویه نسبت به جسم، استفاده می شود [۱۷]. از میان روش های مختلف تصویربرداری ترا هرترز سه بعدی، توموگرافی به شکل گسترده و در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی استفاده می شود.

منابع ترا هرترز متداول مورد استفاده برای تصویربرداری توموگرافی به منابع پالسی و پیوسته تقسیم می شوند. تصویربرداری توموگرافی ترا هرترز، اغلب مبتنی بر منابع پالسی ترا هرترز بودند و به عنوان ترا هرترز توموگرافی زمان پرواز [۲۱]-[۱۸] نیز شناخته می شوند. در این روش پالس ترا هرترز به هدف مورد آزمایش برخورد کرده و با مشاهده دامنه و زمان بندی پالس های ترا هرترز منعکس شده از جسم، تصویر سه بعدی استخراج می شود. اگرچه تصویربرداری توموگرافی زمان پرواز یک فن مؤثر به ویژه برای تفکیک پذیری کمتر از ۱۰ mm است اما اندازه، هزینه و پیچیدگی این روش تصویربرداری که ملزم به استفاده از لیزرهای پالسی فمتوثانیه^۵ و سایر اجزای مورد نیاز برای جمع آوری داده ها است، از مشکل های این نوع از تصویربرداری سه بعدی است [۲۱].

نوع دیگری از تصویربرداری توموگرافی مبتنی بر توموگرافی محاسباتی^۶ (CT) است که از پالس یا موج پیوسته به عنوان منبع ارسالی استفاده می کند [۲۲]، [۲۳]. هدف بر روی یک پایه چرخان نصب شده و تصاویر سه بعدی را می توان با چرخاندن جسم، ثبت تصاویر تحت زوایای مختلف و اعمال الگوریتم پردازشی به دست آورد. نه تنها ساختار داخلی، بلکه اطلاعات طیف سنجی جسم نیز با دستگاه های CT مبتنی بر پالس THz قابل دستیابی است

⁷ CW THz radar.

⁸ Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW).

⁹ Optical Coherence Tomography (OCT).

¹⁰ Amplified Spontaneous Emission (ASE) Noise.

¹¹ Interference Pattern.

¹² Filtered Back Projection (FBP)

¹³ Range Migration Algorithm (RMA)

¹⁴ Phase Shift Migration Algorithm (PMA)

¹ Time of Flight (TOF).

² Fresnel lenses.

³ Tomography.

⁴ Projection.

⁵ Femtosecond Pulse Lasers.

⁶ Computed Tomography (CT).

مختلف، بازسازی تصویر مبتنی بر الگوریتم تناظر یابی شبه سراسری^۲ انجام می‌شود که به زمان پردازش محدودتری نیاز است. در روش THz FMCW اگرچه فواصل تصویربرداری طولانی‌تر تا حدود ۲۵ m امکان‌پذیر است، اما این روش تصویربرداری نیازمند منبع ترا هرتز پیوسته و پهن باند بوده که علاوه بر تحمیل هزینه‌های گزاف، حجم داده‌های دریافتی قابل‌ملاحظه است. درحالی‌که در روش پیشنهادی صرفاً از یک سیگنال ترا هرتز پیوسته 100 GHz فاقد پهنای باند و یک آشکارساز آرایه‌ای 32*32 پیکسل استفاده شده که با ثبت صرفاً دو تصویر از هدف در دو زاویه متفاوت، بازسازی تصویر انجام می‌شود. به‌طور خلاصه، روش تصویربرداری پیشنهادی با سایر روش‌ها در جدول ۱ مقایسه شده است.

جدول (۱). مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌های تصویربرداری سه‌بعدی ترا هرتز

روش	حالت	پهنای باند منبع ترا هرتز	زمان پردازش	حجم داده
عدسی فرنل	عبوری	دارد	بالا	زیاد
توموگرافی	عبوری	دارد	بالا	زیاد
TOF	عبوری/بازتابی	دارد	بالا	زیاد
FMCW	بازتابی	دارد	بالا	زیاد
روش پیشنهادی	بازتابی	ندارد	کم	کم

الگوریتم تناظر یابی شبه سراسری در سال ۲۰۰۵ برای اولین بار توسط هرشمولایر^۳ جهت استخراج ابر نقاط سه‌بعدی از زوج تصاویر استریو^۴ استفاده شده است. علت به‌کارگیری این الگوریتم تشابه نحوه ثبت داده‌های توسط دوربین تصویربرداری ترا هرتز است البته تفاوت‌هایی نیز وجود دارد که به آن اشاره خواهد شد [۳۴].

در این مقاله یک روش تصویربرداری سه‌بعدی ترا هرتز در حالت بازتابی در فاصله حدوداً ۴ m از هدف با استفاده از یک منبع ترا هرتز پیوسته بدون پهنای باند، بدون مدولاسیون و مبتنی بر الگوریتم پردازشی تناظر یابی شبه سراسری ارائه شده است.

است این روش‌های تصویربرداری عموماً از الگوریتم FBP بهره می‌برد به طوری که مقاطع مختلف یک جسم را بازسازی کرده و نهایتاً از روی هم قرار گرفتن آن‌ها یک تصویر سه‌بعدی از عمق تصویر می‌دهد [۳۳].

روش تصویربرداری ترا هرتز مبتنی بر چندین منبع فرستنده و یک گیرنده (MISO)^۱ با مدولاسیون FMCW با ثبت داده‌های بازتابی از هدف و با استفاده از الگوریتم مهاجرت برد RMA تصویر سه‌بعدی از هدف را بازتابی می‌کند [۳۳]، [۳۹] - [۳۶].

الگوریتم بازتابی تصویر مبتنی بر PMA تا حدودی زیادی شبیه به الگوریتم RMA است با این تفاوت که از اطلاعات فاز برگشتی نیز جهت افزایش دقت مکانی سیستم تصویربرداری استفاده می‌شود و اینکه سناریوی تصویربرداری مانند روش RMA است [۳۳].

هر سه الگوریتم اشاره شده توانایی بازسازی تصویر سه‌بعدی از هدف را دارند با این تفاوت که چیدمان تصویربرداری متفاوت از چیدمان تصویربرداری این مقاله است. در تصویربرداری مبتنی بر الگوریتم BPA عموماً از مقاطع داخل جسم تصویربرداری می‌شود و اینکه عموماً در مود عبوری فرایند تصویربرداری انجام می‌شود. همچنین مسافت تصویربرداری کوتاه و حدود ۱۰ الی ۵۰ cm است. در تصویربرداری مبتنی بر الگوریتم RMA از چندین منبع فرستنده و گیرنده استفاده می‌شود و در تصویربرداری مسافت بلند کاربرد دارد. موارد اشاره شده برای RMA در مورد PMA نیز صدق می‌کند.

در روش تصویربرداری پیشنهادی ارائه شده در این مقاله از یک سیگنال پیوسته حدود 100 GHz بهره برده می‌شود که پهنای باندی ندارد. برخلاف روش‌های مبتنی بر عدسی فرنل و توموگرافی که عموماً به صورت عبوری بوده و از منبع پالسی بهره می‌برند، روش تصویربرداری پیشنهادی در حالت بازتابی بوده و اهداف مورد تصویربرداری، اجسامی غیر شفاف نسبت به طول موج سیگنال تراهرتز در نظر گرفته شده است.

از سوی دیگر هزینه خرید و تأمین منابع پالسی ترا هرتز قابل‌ملاحظه بوده و اجتناب‌ناپذیر است. علاوه بر آن تصویربرداری در حالت بازتابی کاربردهای متنوعی در دنیای واقعی دارد. در روش TOF از منبع پالس ترا هرتز استفاده می‌شود. بازسازی تصویر از ثبت سیگنال‌های بازگشتی از هدف که منجر به حجم داده قابل‌ملاحظه‌ای خواهد شد، مبتنی بر الگوریتم FBP بوده که به زمان پردازش بیشتری نیاز دارد درحالی‌که در روش تصویربرداری پیشنهادی، با ثبت دو تصویر از هدف تحت دو زاویه

² Semi Global Matching (SGM)

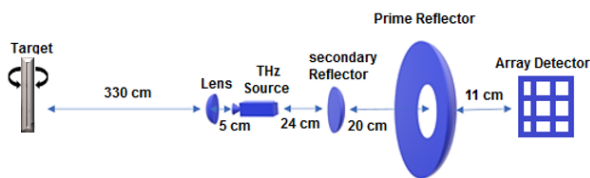
³ Heiko Hirschmüller

⁴ Stereo Image Pair

¹ Multi Input Single Output (MISO)

آلومینیومی با ابعاد $200 \times 40 \times 40$ mm است و بر روی یک سه پایه نصب شده و حول محور مرکزی سه پایه به اندازه $\pm 4/5$ درجه که در محدود میدان دید سیستم اپتیکی است می چرخد.

پرتو ترا هرتز تابیده به هدف پس از برخورد، دچار بازتاب شده که توسط بازتابنده 70 cm در شکل ۱ بانام Prime Reflector و ساختار کسگرین^۲ به بازتابنده ثانویه Secondary Reflector هدایت می شود. بازتابنده ثانویه در فاصله 20 cm از رفلکتور 70 cm قرار دارد. پرتو منعکس شده از بازتابنده ثانویه بر روی یک دوربین ترا هرتز 32×32 پیکسل با اندازه پیکسل $1/5$ mm و ناحیه Tera-1024 کانونی می شود. مدل این دوربین 115×115 mm کانونی می شود. مدل این دوربین Tera-1024 بوده و در بازه طول موجی $6-43$ mm فعال است.



شکل (۱). چیدمان تصویربرداری ترا هرتز

در ادامه مجموعه‌ای از تصاویر دوبعدی از هدف به ازای بازه زاویه $\pm 4/5$ توسط دوربین ترا هرتز ثبت می شود. برخلاف تصویربرداری مرئی که چرخش هدف از روی تصاویر ثبت شده کاملاً مشهود است در ناحیه ترا هرتز یک الگوی شدتی از هدف ثبت شده و زمانی که هدف شروع به چرخش می کند یا سیستم تصویربرداری تحت زوایای مختلفی از هدف تصویر ثبت کند، مشاهده می شود که میزان شدت رسیده به دوربین ترا هرتز به ازای زوایای مختلف، متفاوت بوده و این ویژگی ناشی از آن است که حین چرخش، سهم سیگنال ترا هرتز بازتابی که به دوربین می رسد از نواحی مختلف هدف متفاوت است. با استفاده از تصاویر دوبعدی ترا هرتز ثبت شده و الگوریتم تناظر یابی شبه سرا سری که مبتنی بر روش نابرابری است ابر نقاط سه بعدی از جسم که معادل با تصویر سه بعدی از جسم است، استخراج خواهد شد.

۲-۱. نابرابری دوچشمی^۳

همان طور که در ابتدا بخش ۲ اشاره شد، روش تصویربرداری مبتنی بر نابرابری دوچشمی است. در فرایند مبتنی بر نابرابری دوچشمی با دو تصویر از یک هدف که از زوایای اندکی متفاوت گرفته شده اند، جهت بازتابی عمق هدف استفاده می شود. در این روش مجموعه‌ای از نقاط متناظر در هر دو تصویر پیدا می شود سپس با استفاده از روش مثلثاتی^۴ مطابق شکل ۲،

منبع سیگنال پیوسته ترا هرتز با زاویه واگرایی ± 9 درجه و فرکانس حدود 100 GHz بعد از طی مسافت حدود $3/3$ m به نمونه تحت چرخش اصابت کرده و مجدد به داخل سامانه اپتیکی کانونی کننده هدایت می شود. دوربین ترا هرتز با ابعاد 32×32 پیکسل و اندازه پیکسل $1/5$ mm پشت اپتیک کانونی کننده تعبیه شده است. مجموعه‌ای از تصاویر ترا هرتز دوبعدی از هدف به ازای بازه زاویه‌ای محدود $\pm 4/5$ درجه توسط دوربین ترا هرتز ثبت می شود. تصاویر دوبعدی ثبت شده با استفاده از الگوریتم تناظر یابی شبه سرا سری و مبتنی بر روش نابرابری^۱ ابر نقاط سه بعدی از هدف را استخراج کرده که منجر به تصویر سه بعدی از هدف خواهد شد. در ادامه این مقاله و در بخش ۲ به بررسی روش پیشنهادی تصویربرداری سه بعدی ترا هرتز در حالت بازتابی پرداخته می شود. در بخش ۳ نتایج روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته و در مورد آن بحث خواهد شد. در بخش ۴ نتیجه گیری ارائه شده است.

۲. روش پیشنهادی تصویربرداری مبتنی بر ابر نقاط

سه بعدی

در سامانه‌های تصویربرداری ترا هرتز برای اینکه بتوان از هدف تصویر گرفت باید هدف در میدان دید سیستم تصویربرداری باشد اما چالش موجود آن است که سطح مقطعی از هدف که در امتداد میدان دید سامانه تصویربرداری است بعضی اطلاعاتی کاملی از ماهیت هدف نمی دهد یا در حالت بحرانی تر آنکه اگر هدف به میزان کوچکی چرخش داشته باشد، با توجه به ویژگی آینه‌ای امواج ترا هرتز (رفت و برگشت امواج باید در راستای مستقیم یا همان میدان دید سامانه تصویربرداری باشد) بخش عمده‌ای از سیگنال منعکس شده به گیرنده بر نمی گردد. در نتیجه عملاً اطلاعات از بین رفته و تصویر واضح حاصل نمی شود. علاوه بر این، در صورتی که منبع ترا هرتز تک فرکانس و فاقد پهنای باند باشد، اطلاعات عمق هدف در تصویر به دست آمده نیز از بین خواهد رفت.

روش پیشنهادی تصویربرداری ترا هرتز سه بعدی در حالت بازتابی مبتنی بر نابرابری دوچشمی و در فاصله 4 m تابشگر از هدف مورد تصویربرداری مطابق با چیدمان مندرج در شکل ۱ است. در این چیدمان منبع ترا هرتز در فرکانس حدود 100 GHz از نوع دیود Impatt انتخاب شده و توان تابشگر در حدود 80 mW است. سیگنال ترا هرتز با استفاده از یک عدسی واگرا با فاصله کانونی 5 سانتیمتر به جسم مورد تصویربرداری که در فاصله $3/35$ متری از منبع قرار دارد می تابد. جسم مورد تصویربرداری یک پروفیل

² Cassegrain.

³ Binocular.

⁴ Triangulation.

¹ Disparity.

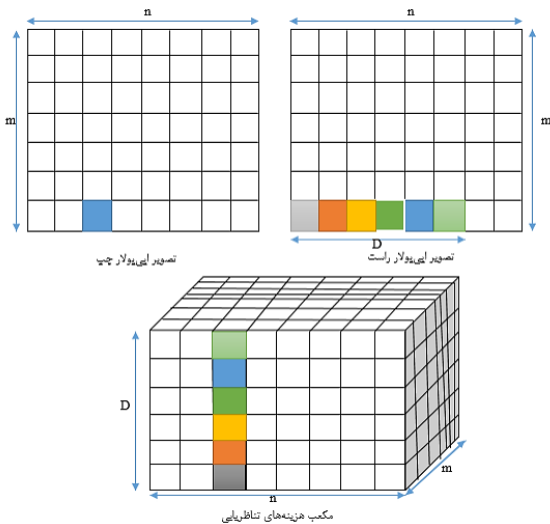
محاسبه نابرابری تشکیل شده است.

۱-۲-۱. محاسبه هزینه تناظر یابی

هر پیکسل در تصویر سمت چپ با توجه به کمترین و بیشترین نابرابری ممکن، می‌تواند با یکی از پیکسل‌های تصویر راست متناظر باشد. معیار تناظر، بر اساس تابعی تحت عنوان تابع هزینه انجام می‌شود. در استفاده از این تابع ابتدا یک پنجره اطراف پیکسل‌های مظنون به تناظر تعریف‌شده، سپس درجات خاکستری پنجره‌ها از هم کسر می‌شوند. از مجموع قدر مطلق اختلاف^۲ SAD درجات خاکستری پنجره‌ها، مقدار تابع هزینه‌ی به دست می‌آید.

$$C_{SAD}(p, d) = \sum_{p \in N_p} |W_L(p) - W_R(p - d)| \quad (3)$$

در رابطه ۳، $W_L(p)$ پنجره‌ای در تصویر سمت چپ حول نقطه p و $W_R(p - d)$ پنجره‌ای در تصویر راست حول نقطه $p - d$ با مقدار نابرابری d است.



شکل (۳). نحوه محاسبه هزینه‌های تناظر یابی و چگونگی ایجاد مکعب مقادیر

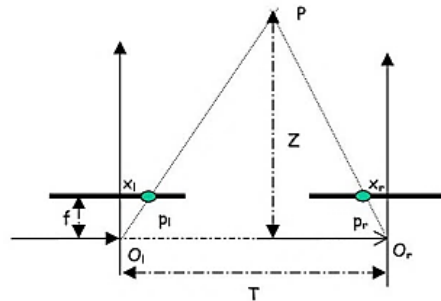
برای هر پیکسل در تصویر چپ، با جستجو بر روی تصویر راست، برداری از مقادیر هزینه‌های تناظر یابی محاسبه می‌شود. به این ترتیب مکعبی از مقادیر هزینه‌های تناظر یابی ایجاد می‌شود که ابعاد افقی آن برابر با ابعاد تصویر چپ و ارتفاع آن به اندازه دامنه تغییرات نابرابری است.

۱-۲-۲. ترکیب هزینه‌های تناظر یابی

در مرحله‌ی محاسبه‌ی هزینه‌های تناظر یابی، به دلیل وجود مقدار هزینه‌ی یکسان در همسایگی‌ها امکان تناظر یابی صحیح کاهش

هنگامی که تمام پارامترهای سیستم شناخته شده باشند می‌توان اطلاعات عمق را بازیابی کرد. در این روش به ازای زمانی که فقط پارامترهای دوربین در دسترس باشد، عمق را می‌توان به درستی و با یک ضریب مقیاس بازیابی کرد. در صورتی که هیچ کدام از پارامتر دوربین مشخص نباشد، عمق هدف با یک تبدیل تصویر^۱ به دست می‌آید.

مطابق شکل ۲، P_L و P_R تصویر نقطه سه‌بعدی P بر روی صفحه دوربین سمت چپ و راست هستند. O_L و O_R مبدأ سیستم مختصات دوربین‌های چپ و راست هستند. بر اساس رابطه ۱ بین مثلث‌های مشابه (P, P_L, P_R) و (P, O_L, O_R) نشان داده شده در شکل ۲، مقدار عمق Z نقطه P را می‌توان به دست آورد:



شکل (۲). نحوه قرارگیری و ثبت یک نقطه توسط دوربین مبتنی بر روش نابرابری

$$Z = f * T / D \quad (1)$$

در رابطه ۱، f فاصله کانونی سیستم اپتیکی، T فاصله بین دو دوربین نصب‌شده و D پارامتر نابرابری است که توسط رابطه ۲ نمایش داده شده است.

$$D = x_L - x_R \quad (2)$$

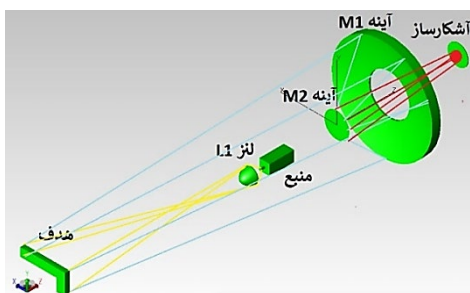
بر اساس رابطه ۲ پارامتر نابرابری D از اختلاف فاصله موقعیت نقاط تصویر سمت چپ و راست به ازای یک نقطه یکسان از هدف به دست می‌آید. در نتیجه بر اساس رابطه ۲ می‌توان مقدار پارامتر نابرابری D را برای تمامی نقاط تشکیل‌دهنده هدف به دست آورد.

نابرابری با استفاده از الگوریتم تناظر یابی شبه سرا سری تخمین زده می‌شود. در این الگوریتم برای همه‌ی پیکسل‌ها فرآیند تناظر یابی انجام می‌شود. در این فرآیند ممکن است پیکسلی متناظر نداشته باشد که در این صورت مقدار محاسبه شده، همان مقدار نابرابری در آن نقطه است. الگوریتم از سه مرحله شامل محاسبه هزینه‌های تناظر یابی، ترکیب هزینه‌ها و

² Sum of Absolute Difference (SAD).

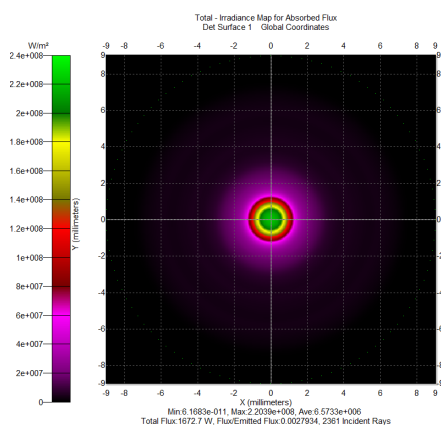
¹ Projective transformation.

در چیدمان آزمایشگاهی بازتابی شکل ۱ حدود ۳/۳۵ m بین منبع ترا هرتز و هدف و حدود ۴ m بین آشکارساز و هدف فاصله وجود دارد. منبع ورودی ترا هرتز با طول موج ۳ mm و زاویه واگرایی $\pm 9^\circ$ درجه بوده و در فاصله کانونی عدسی L1 که حدوداً برابر با ۵۰ mm است، قرار می‌گیرد. عدسی L1 با فاصله کانونی حدود ۵۰ mm، ضخامت ۵۰ mm، قطر ۱۰۰ mm و ضریب شکست ۱/۴۶ است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نور توسط عدسی L1 در نزدیک کانون، جمع شده و سپس واگرا می‌شود. نور واگرا بعد از انتشار در فاصله حدوداً ۳۳۰۰ mm به هدف برخورد کرده و بخشی از پرتوها به طرف آینه M1 هدایت می‌شود. آینه M1 پرتوهای بازتابی از هدف را به سمت آینه M2 تابانده و توسط این آینه، پرتوها به سمت دوربین ترا هرتز هدایت شده و تشکیل تصویر می‌دهد.



شکل (۴). مسیر انتشار پرتو در چیدمان شبیه‌سازی شده با تعداد محدودی از پرتو ترا هرتز [۳۵]

بخشی از پرتوها به طرف آینه M1 هدایت می‌شود. آینه M1 پرتوهای بازتابی از هدف را به سمت آینه M2 تابانده و توسط این آینه، پرتوها به سمت دوربین ترا هرتز هدایت شده و تشکیل لکه کانونی شده می‌دهد.



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

شکل ۵ پروفایل عرضی شدت ثبت شده توسط دوربین به ازای یک طول مشخص را نشان می‌دهد که مطابق شکل، در مرکز بیشترین شدت و با میل به کناره‌ها، از میزان شدت کاسته

می‌یابد؛ لذا ترکیب هزینه‌ها از جهت‌های مختلف پیشنهاد شده است [۳۴]. ترکیب هزینه‌ها برای تک‌تک درایه‌های مکعب هزینه‌های تناظر یابی انجام می‌شود. در این مرحله بر اساس مقدار هزینه‌های تناظر یابی و مقدار اختلاف نابرابری، از ۲ یا ۱۶ جهت، هزینه‌ها ترکیب می‌شوند [۳۴]. برای این کار مطابق رابطه ۴ در هر جهت ترکیبی از مقادیر هزینه‌ها محاسبه می‌شود.

$$L_r(p, d) = C(p, d) + \min\{L_r(-r, d), L_r(p - r, d - 1) + P_1, L_r(p - r, d + 1) + P_1, \min_i L_r(p - r, i) + P_2\} - \min_k L_r(p - r, k) \quad (4)$$

p موقعیت پیکسلی است که ترکیب توابع هزینه برای آن انجام می‌شود. $C(p, d)$ مقدار هزینه پیکسل حاضر در نابرابری d $L_r(p, d)$ مسیری است که به نقطه p ختم می‌شود، r مقدار شعاع همسایگی، P_1 ترم تنبیهی برای هزینه‌هایی که مقدار نابرابری پیکسلشان با نابرابری پیکسل مرکزی یک واحد اختلاف دارند، P_2 ترم تنبیهی برای هزینه‌هایی که مقدار نابرابری پیکسلشان با نابرابری پیکسل مرکزی بیش از یک واحد اختلاف دارند، پس از محاسبه‌ی رابطه‌ی ۴ برای ۸ یا ۱۶ جهت، هزینه تمامی مسیرها با هم جمع شده و به عنوان هزینه‌ی ترکیبی در مکعب ترکیب هزینه‌ها ذخیره می‌شود.

$$S(p, d) = \sum_r L_r(p, d) \quad (5)$$

طبق رابطه‌ی ۵ مقادیر تمامی مسیرها با هم جمع می‌شوند. پس از محاسبه رابطه ۵ برای تمامی آرایه‌های مکعب مقادیر هزینه‌های تناظر یابی، مکعب جدیدی به دست می‌آید که به آن مکعب ترکیب هزینه‌ها^۱ گفته می‌شود.

۳-۱-۲. محاسبه نابرابری

پس از ترکیب هزینه‌ها، نابرابری هر پیکسل قابل محاسبه است. نابرابری یک پیکسل، از محل کمترین هزینه‌ی ترکیب شده به دست می‌آید. بنابراین اگر مکعب ترکیب هزینه‌ها S باشد، مقدار نابرابری از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$D = \min_d S(p, d) \quad (6)$$

با محاسبه مقدار نابرابری D برای همه پیکسل‌ها و اعمال آن به رابطه ۱ عمق پیکسل‌ها به دست آمده و یک ابر نقاط سه بعدی از تصویر سمت چپ به دست می‌آید.

۲-۲. شبیه‌سازی اپتیکی

^۱ Cost Combination Cube.

به اندازه دامنه تغییرات نابرابری D است. مطابق با رابطه ۶، نهایتاً نابرابری D برابر با کمینه مقدار هزینه محاسبه شده است. با تعیین مقدار نابرابری D به ازای هر پیکسل و اعمال آن به رابطه ۱ عمق تمامی نقاط به دست آمده و در نتیجه یک ابر نقاط سه بعدی از هدف ساخته می شود.

با استفاده از چیدمان تصویربرداری ترا هرترز و یک سه پایه مدور که هدف بر روی آن در فاصله ۴m از سیستم اپتیکی تعبیه شده است، تصویر دوبعدی در اندازه ۳۲*۳۲ پیکسل ثبت می شود. هدف نصب شده بر روی سه پایه به اندازه یک گام کوچک حدود ۱ درجه چرخیده و مجدد تصویر دوبعدی ثبت می شود. فرایند چرخش هدف به ازای میدان دید سیستم اپتیکی کسگرین که حدود $\pm 4/5$ درجه است، انجام می شود. دو تصویر با اندازه ۴۵۰*۶۲۵۶ پیکسل از مجموعه از تصاویر ثبت شده به عنوان ورودی به الگوریتم تناظر یابی شبه سراسری اعمال شده و به ازای هر یک از پیکسل های تصویر سمت چپ در مقایسه با تصویر سمت راست، الگوریتم کمینه هزینه ترکیبی میزان نابرابری را برای هر پیکسل محاسبه کرده و در نهایت مقدار عمق هر پیکسل و ابر نقاط سه بعدی تصویر را استخراج می کند.

۳. نتایج و بحث

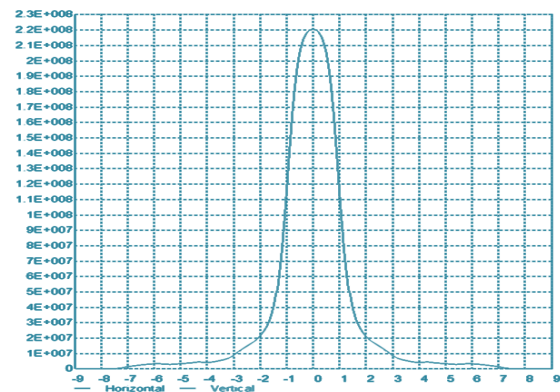
سیستم تصویربرداری ترا هرترز در شکل نمایش داده شده است. در این چیدمان از یک پروفیل مهندسی ۴۰*۴۰ cm با طول حدود ۱۰ cm و در فاصله حدود ۴ m به عنوان هدف استفاده شده و با استفاده از یک پیچ و مهره، هدف به سه پایه عکاسی الصاق شده به طوری که حین چرخاندن محور سه پایه، پروفیل مهندسی به شکل کامل یکسان چرخش کند.



شکل (۷). چیدمان تصویربرداری ترا هرترز ۴ m

باید به این نکته اشاره کرد که منظور از چرخش در چیدمان تصویربرداری، چرخش حول ارتفاع پروفیل مهندسی است. سه پایه عکاسی این قابلیت را دارد که حول

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 ۳۳۰۰ mm.

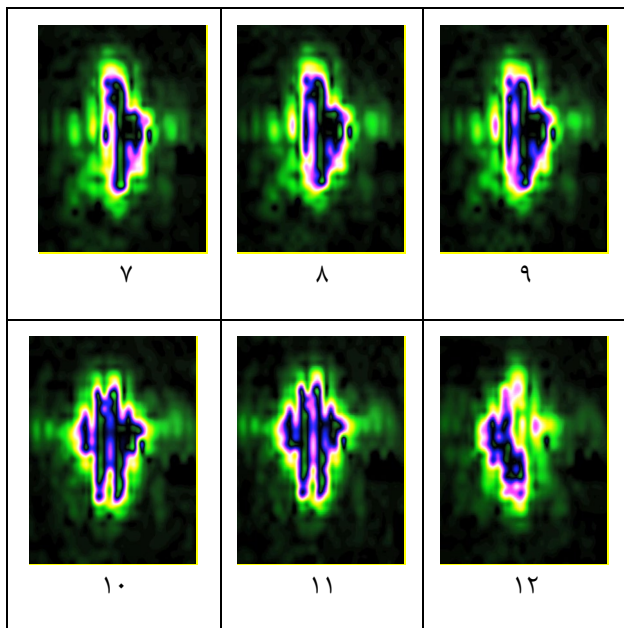
باید به این نکته اشاره کرد که در شکل ۳ تنها تعداد محدودی از پرتوهای ترا هرترز هدایت شده در چیدمان، نشان داده شده تا بتوان مسیر انتشار پرتو در این سیستم تصویربرداری را به درستی نشان داد. در حالت شبیه سازی با تعداد پرتوهای بالا، مسیر حرکت پرتو ترا هرترز به درستی قابل تشخیص نبوده و همچنین به دلیل چگالی حجمی بالای پرتوها، تعدادی از ادوات چیدمان آزمایشگاهی به سختی قابل مشاهده خواهد بود.

۴-۲ بخش پردازش

مطابق رابطه مثلثاتی ۱ از بخش ۲-۱ برای اینکه بتوان پارامتر Z یا عمق هر یک از نقاط (به عنوان نمونه نقطه P) تصویر یک هدف را به دست آورد، باید پارامترهای f فاصله کانونی، T فاصله بین آشکارسازها و D پارامتر نابرابری معلوم باشند.

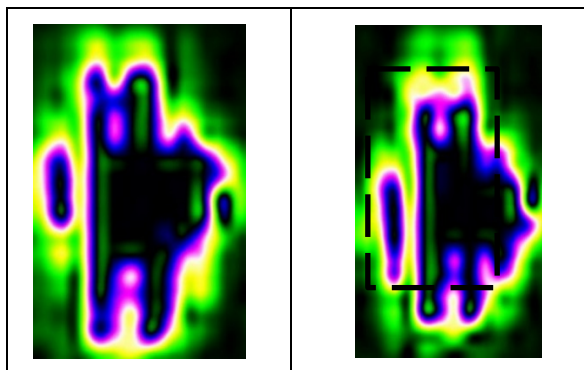
برای محاسبه پارامتر نابرابری D ، از نقطه p توسط دوربین تحت دو زاویه مختلف، تصویر ثبت می شود. مکان پیکسل ثبت شده برای نقطه p در هر کدام از تصاویر مقدار متفاوتی است. اختلاف این دو مقدار، تحت عنوان پارامتر نابرابری D شناخته می شود. این پارامتر برای تمامی نقاط هدف بایستی محاسبه شود. برای محاسبه پارامتر نابرابری D هر یک از نقاط هدف از الگوریتم تناظر یابی شبه سراسری استفاده می شود. در الگوریتم پیشنهادی، به ازای هر پیکسل در تصویر سمت چپ، مناظر آن در تصویر سمت راست به دست می آید که برای این فرایند، یک تابع هزینه مطابق رابطه ۳ محاسبه می شود.

برای هر پیکسل در تصویر سمت چپ، با جستجو بر روی تصویر راست، برداری از مقادیر هزینه در جهت های مختلف محاسبه می شود، به طوری که مکعبی از هزینه ها مطابق با رابطه ۴ به دست می آید که ابعاد افقی آن برابر با ابعاد تصویر چپ و ارتفاع آن



تغییر در تصویر ترا هرتز وابسته به زاویه چرخش است، به طوری که تصویر ۱ تا ۶ معادل با زاویه ۰ تا حدود ۴/۵ درجه است. با چرخش پروفیل جزئیات قسمت‌های مختلف توسط دوربین ثبت می‌شود. در تصویر شماره ۶ که در انتهای بازه میدان دید قرار دارد بخش قابل ملاحظه‌ای از تصویر به دلیل اینکه از میدان دید خارج شده قابل مشاهده نخواهد بود. در این نقطه، پروفیل مجدد از ۴/۵ به صفر درجه می‌چرخد و مجدداً تصویر توسط دوربین ثبت می‌شود. تصویر ۱۲ نیز به ازای مقدار زاویه کمتر از صفر است که مشاهده می‌شود مجدد نیمی از تصویر که از میدان دید سیستم اپتیکی خارج شده دیگر قابل مشاهده نبوده و اطلاعات الگوی شدتی آن قسمت، از بین می‌رود.

برای بازیابی تصویر سه بعدی ترا هرتز از دو عدد از تصاویر به نمایش درآمده در جدول ۱ استفاده می‌شود، ذکر این نکته لازم است که تصاویر بایستی یک تغییر کوچکی با یکدیگر داشته باشند تا بتوان از آن یک الگوی سه بعدی استخراج کرد. شکل ۶ دو نمونه از تصاویر دوبعدی ترا هرتز را نشان می‌دهد که با استفاده از آن‌ها تصویر سه بعدی استخراج می‌شود.



شکل (۱۰). دو نمونه از تصاویر ثبت شده ترا هرتز از پروفیل مهندسی

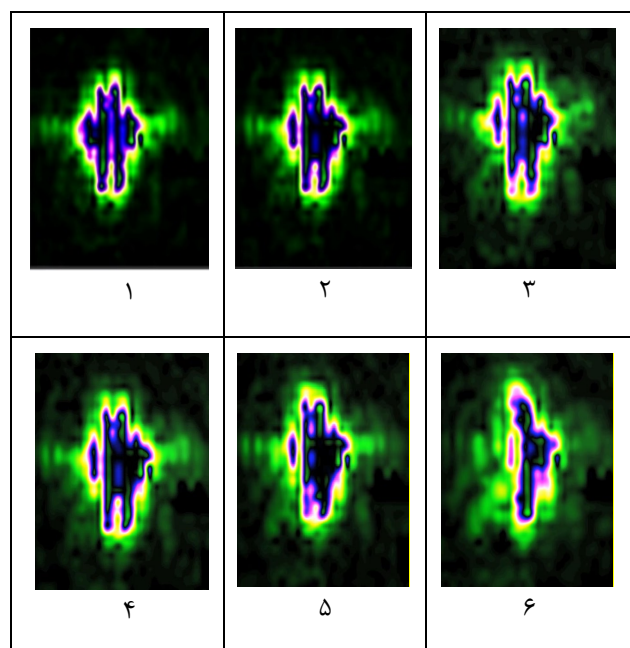
سه درجه آزادی بچرخد. پروفیل نصب شده بر روی سه پایه در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل (۸). پروفیل مهندسی 40*40*110 mm

به ازای پروفیل مهندسی در مکان اولیه (بدون هیچ چرخش) شروع به ثبت تصویر کرده در ادامه با گام‌های دستی و کاملاً آهسته شروع به چرخاندن محور سه پایه عکاسی کرده و تغییرات توسط دوربین ترا هرتز آرایه‌ای مدل Tera-4096 ثبت می‌شود. در شکل ۹ تحول چرخش پروفیل مهندسی از روی تصاویر ثبت شده توسط دوربین ترا هرتز مشخص است.

شکل (۹). تصاویر ترا هرتز دوبعدی ثبت شده از پروفیل در زوایای مختلف



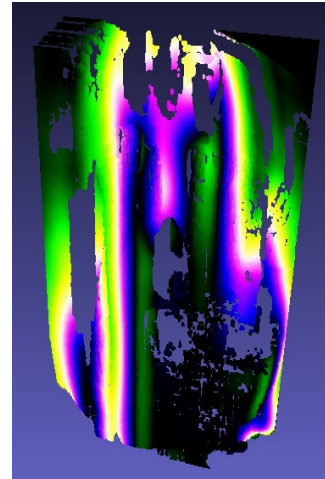
آرایه‌ای تراهرتز $۳۲*۳۲$ پیکسل و یک سیستم بازتابنده اپتیکی کسگرین، یک روش تصویربرداری بازتابی فعال از هدف در فاصله حدوداً ۴ m جهت استخراج تصویر ابر نقاط سه‌بعدی از هدف پیشنهاد و ارائه شد.

در روش‌های رایج تصویربرداری تراهرتز سه‌بعدی معمولاً پالس تراهرتز به داخل هدف نفوذ می‌کند یا سیگنال تراهرتز منبع دارای پهن باند بوده و یا اینکه سیستم اپتیکی دارای فاصله کانونی متغیر با فرکانس است که در هر سه حالت منجر به استخراج تصویر سه‌بعدی از هدف می‌شود، در این پژوهش با توجه به محدودیت‌های موجود برای اولین بار از یک منبع ۱۰۰ GHz پیوسته بدون پهنای باند، بدون مدولاسیون، دوربین تراهرتز $۳۲*۳۲$ پیکسل و مبتنی بر روش نابرابری استفاده شد. برای بازیابی تصویر نیز از الگوریتم تناظر یابی شبه سراسری استفاده شد. هدف بر روی یک سه‌پایه چرخان نصب شده و حول محور سه‌پایه و به ازای زاویه ۰ تا $۴/۵$ درجه در محدود میدان دید سیستم اپتیکی چرخیده و تصاویر دوبعدی $۳۲*۳۲$ پیکسل توسط دوربین ثبت شد. با استفاده از دو تصویر از مجموعه از تصاویر و تناظر یابی پیکسل به پیکسل مقدار نابرابری یا عدم تشابه بین هر دو پیکسل متناظر تخمین زده شده و در ادامه عمق هرکدام از پیکسل‌ها محاسبه شد. در نهایت تصویر سه‌بعدی یا به عبارت دقیق‌تر ابر نقاط متراکم سه‌بعدی از تصویر دوبعدی استخراج شد. با تغییر اندازه تصاویر $۳۲*۳۲$ پیکسل به $۴۵۰*۶۲۵۶$ پیکسل، ابر نقاط متراکم سه‌بعدی مشابه با پروفیل آلومینیوم به دست آمد.

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

تصویر تراهرتز سه‌بعدی استخراج شده از شکل ۱۰ به صورت ابر نقاط سه‌بعدی در شکل ۱۱ است که در دو نمای مختلف نمایش داده شده است. تصویر سه‌بعدی بازیابی شده از ناحیه با کادر نقطه‌چین از شکل ۱۰ است که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.



شکل (۱۱). تصویر سه‌بعدی تراهرتز بازیابی شده

در تصویربرداری تراهرتز برخلاف تصویربرداری مرئی که چرخش جسم در تصاویر ثبت شده کاملاً مشخص و مشهود است، چرخش قابل‌رؤیت نیست و صرفاً کاهش یا افزایش میزان شدت در آن بخش از تصویر است که نشان‌دهنده آن است که آن قسمت از تصویر مستقیماً در میدان دید سیستم قرار دارد یا خیر. زمانی که شدت تصویر ناحیه تحت نمایش کم می‌شود، کاملاً مشخص است که تصویر آن قسمت از هدف تحت چرخش بوده و زمانی که تصویری بر روی دوربین تراهرتز ثبت نشود به معنای آن است که پرتوهای بازتابیده شده از هدف به جایی غیر از دوربین برخورد می‌کند. در سیستم تصویربرداری این پروژه طول موج منبع تراهرتز حدود ۳ mm است از طرفی پیکسل سایز دوربین تراهرتز حدود $۱/۵\text{ mm}$ و تفکیک‌پذیری سیستم معادل $۴/۸۶\text{ mm}$ است.

به این ترتیب با توجه به اینکه طول موج منبع توانایی تفکیک حدود ۳ mm را دارد و اینکه پیکسل سایز دوربین نیز حدود $۱/۵\text{ mm}$ است اما به دلیل اینکه تفکیک‌پذیری سیستم اپتیکی معادل $۴/۸۶\text{ mm}$ است دقت مکانی تصویربرداری در حالت بیشینه حدود $۴/۸۶\text{ mm}$ است که نشان‌دهنده آن است که تفکیک‌پذیری در این سیستم تصویربرداری توسط اپتیکی سیستم محدود می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از یک منبع ۱۰۰ GHz ، دوربین

- and D. Abbott, "2-D wavelet segmentation in 3-D T-ray tomography," *IEEE Sensors J.*, vol.7, pp.342–343, 2007.
- [23]-B. Recur, A. Younus, S. Salort, P. Mounaix, B. Chassagne, P. Desbarats, J.-P. Caumes, and E. Abraham, "Investigation on reconstruction methods applied to 3D terahertz computed tomography," *Opt. Express*, vol.19, pp.5106–5117, 2011.
- [24]-M. Imamura, S. Nishina, A. Irisawa, T. Yamashita, and E. Kato, "3D imaging and analysis system using terahertz waves," *Proc. IEEE Int. Conf. on IR. MMW. THz. waves.*, Rome, Italy, 2010.
- [25]-H. Quast and T. Löffler, "3D-terahertz-tomographic for material inspection and security," *J. Conf. Infrared Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz*, Sept. 2009.
- [26]-H. Quast, A. Keil, T. Hoyer, and T. Loeffler, "All-electronic 3D terahertz imaging for the NDT of composites," *2nd Int. Symp. NDT. In Aerospace 2010 – We.4.B.3*, 2010.
- [27]-K.B. Cooper, R.J. Dengler, N. Lombart, T. Bryllent, G. Chattopadhyay, E. Schlecht, J. Gill. C. Lee, A. Skalare, I. Mehdi, and P.H. Siegel, "Penetrating 3-D imaging at 4- and 25-m range using a submillimeter-wave radar," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.56, no.12, pp.2771–2778, Dec. 2008.
- [28]-D. Huang, E.A. Swanson, C.P. Lin, J.S. Schuman, W.G. Stinson, W. Chang, M.R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C.A. Puliafito, and J.G. Fujimoto, "Optical coherence tomography," *Science*, vol.254, pp.1178–1181, 1991.
- [29]-T. Isogawa, T. Kumashiro, H.-J. Song, K. Ajito, N. Kukutsu, K. Iwatsuki, and T. Nagatsuma, "Tomographic imaging using photonically generated low-coherence terahertz noise sources," *IEEE Trans. THz Sci. Tech.*, vol.2, no.5, pp.485–492, 2012.
- [30]-H.-J. Song, N. Shimizu, N. Kukutsu, T. Nagatsuma, and Y. Kado, "Microwave photonic noise source from microwave to sub-terahertz wave bands and its applications to noise characterizations," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.56, pp.2989–2997, 2008.
- [31]-H.-J. Song, N. Shimizu, T. Furuta, A. Wakatsuki, and T. Nagatsuma, "Sub-terahertz noise generation with a photodetector and wavelength sliced optical noise signals and its application to spectroscopy measurement," *Appl. Phys. Lett.*, vol.93, 241113, 2008.
- [32]-T. Nagatsuma, T. Kumashiro, Y. Fujimoto, K. Taniguchi, K. Ajito, N. Kukutsu, T. Furuta, A. Wakatsuki, and Y. Kado, "Millimeter wave imaging using photonics-based noise source," *J. Conf. Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Sept. 2009.
- [33]-A. Barket, W. Hu, B. Wang, W. Shahzad and J. Malik, "Selection criteria of image reconstruction algorithms for terahertz short-range imaging applications," *Expert Systems with Applications*, vol. 30 pp. 3071-3080, 2022. <https://doi.org/10.1364/OE.457840>.
- [34] H. Hirschmuller, "Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information," *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, arrays for off-axis THz holography and real-time THz imaging," *Sensors (Basel)* 16(12), 221, 2016.
- [7] Daniel M. Mittleman, "Twenty years of terahertz imaging [Invited]," *Opt. Express*, vol.26, no.8, pp. 9417-9431, 2018., 2008.
- [8]-Niklason, L.T., et al., Digital tomosynthesis in breast imaging. *Radiology*, 1997. 205(2): p. 399-406.
- [9] M. Roinfar, M. Salmanian, A. Aghakasiri, A. Bashiri and S. Babanejad, "Single Pixel Imaging using Compressive Sensing and Spatial Light Modulator", *Journal of Radar and Optical Remote Sensing and GIS*, vol. 4, pp. 7-16, 2021. (In Persian)
- [10]-Takayanagi, J., et al., High-resolution time-of-flight terahertz tomography using a femtosecond fiber laser. *Optics Express*, 2009. 17(9): p. 7549-7555.
- [11]-Zhong, H., et al., Nondestructive defect identification with terahertz time-of-flight tomography. *IEEE Sensors Journal*, 2005. 5(2): p. 203-208.
- [12]-K. Ajito and Y. Ueno, "THz chemical imaging for biological applications," *IEEE Trans. Tera. Sci. Tech.*, vol.1, pp.293–300, 2011.
- [13]-A.J. Fitzgerald, B.E. Cole, and P.F. Today, "Nondestructive analysis of tablet coating thickness using terahertz pulsed imaging," *J.Pharm. Sci.*, vol.94, pp.177–183, 2005.
- [14]-Jahns, J. and S.J. Walker, Two-dimensional array of diffractive microlenses fabricated by thin Film deposition. *Applied optics*, 1990. 29(7): p. 931-936.
- [15]-Wang, S. and X.-C. Zhang, Tomographic imaging with a terahertz binary lens. *Applied Physics letters*, 2003. 82(12): p. 1821-1823.
- [16]-Walsby, E., et al., Multilevel silicon diffractive optics for terahertz waves. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2002. 20(6): p. 2780-2783.
- [17] -Cho, S.-H., et al., Fast terahertz reflection tomography using block-based compressed sensing. *Optics Express*. 19(17): p. 16401-16409.
- [18]-W.L. Chan, J. Deibel, and D.M. Mittleman, "Imaging with terahertz radiation," *Rep. Progr. Physics*, vol.70, pp.1325–1379, Aug. 2007.
- [19]-K. Ajito and Y. Ueno, "THz chemical imaging for biological applications," *IEEE Trans. Tera. Sci. Tech.*, vol.1, pp.293–300, 2011.
- [20]-A.J. Fitzgerald, B.E. Cole, and P.F. Today, "Nondestructive analysis of tablet coating thickness using terahertz pulsed imaging," *J.Pharm. Sci.*, vol.94, pp.177–183, 2005. 7555, 2009.
- [21]-Takayanagi, H. Jinno, S. Ichino, K. Suizu, M. Yamashita, T. Ouchi, S. Kasai, H. Ohtake, H. Uchida, N. Nishizawa, and K. Kawase, "High-resolution time-of-flight terahertz tomography using a femtosecond fiber laser," *Opt. Express*, vol.17, pp:8-12.
- [22]-X.-X. Yin, B.W.-H. Ng, B. Ferguson, S.P. Micken,

[37] M. Mozaffari, S. Samadi, “Sampling Rate Reduction and System Performance Improvement of FMCW Radar Using Dual Compressed Sensing Technique,” *Journal of Rada*, vol. 4, no.3, pp. 39-53, 2016. (In Persian).

[38] 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

[39] M. Roueinfar, M. Salmanian, A. Aghakasiri, A. Bashiri, S. Babanezhad, "Single Pixel Imaging using Compressive Sensing and Spatial Light Modulator", *Journal of Radar and Optical Remote Sensing and GIS*, vol:1;no:4,pp:7-16,2021.

2005.

[35] 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>

[36] M. R. Zakerhaghighi, M. Mivehchy, and M. F. Sabahi, “Implementation and Assessment of Jamming Effectiveness Against an FMCW Tracking Radar Based on a Novel Criterion,” *Journal of Rada*, vol. 7, no. 1, pp. 103–116, Dec. 2020. (In Persian)
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1398.7.1.9.7>