



Non-line-of-sight (NLOS) imaging in short and long-wave infrared wavelengths



M. Roueinfar*, M. Salmanian

* Instructor of Imam Hossein University, Tehran, Iran

(Received: 2023/08/19, Revised: 2023/10/09, Accepted: 2023/10/06, Published: 2023/12/22)

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

ABSTRACT

This paper presents a method for Non-Line Of Sight (NLOS) imaging that works passively in the long-wave infrared and actively in the short-wave infrared. An LWIR camera, an uncooled camera with 320×240 pixels and a size of $30 \mu\text{m}$ per pixel, is used for imaging in the long-wave infrared. In this passive imaging, the image of a hot object, such as a soldering iron, was successfully captured. In other imaging, which is actively performed in short-wave infrared by using a light source with a short-wave infrared wavelength and aiming it at an object that is not in the camera's direct field of view, the wave reflected from a reflective surface enters the SWIR camera model SX-1.7-320 and finally the target image is captured. The images obtained from non-line-of-sight (NLOS) imaging demonstrate the efficacy of this technique in both the long-wave infrared (LWIR) and short-wave infrared (SWIR) wavelengths under passive and active modes, respectively. The validation of this imaging method is conducted by comparing the captured images with the original images, employing the Mean Squared Error (MSE) and Root Mean Squared Error (RMSE) criteria.

Keywords: Non-line-of-sight imaging, long wave infrared, short wave infrared, resolution.

Cite this article: M. Roueinfar*, M. Salmanian "Non-line-of-sight (NLOS) imaging in short and long-wave infrared wavelengths" Radar, vol.11 , no.2 , pp.61-70 , .

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 دید غیرمستقیم NLOS در طول موج مادون قرمز موج کوتاه و بلند

محمد روئین فر*، مهدی سلمانیان

۱- مری، ۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵، 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 از اهداف خارج از دیدمستقیم یا Non-Line of Sight Imaging در طول موج مادون قرمز بلند (LWIR) به صورت غیرفعال و در طول موج مادون قرمز کوتاه (SWIR) به صورت فعال ارائه شده است. در تصویربرداری خارج از دیدمستقیم در طول موج مادون قرمز موج بلند از یک دوربین LWIR که یک دوربین uncooled Camera-320×240 pixel بوده و اندازه هر پیکسل آن 30 μm است، استفاده شده است. در این تصویربرداری که به صورت غیرفعال انجام شده تصویر یک جسم گرم نظیر هویه با موفقیت بازیابی شده است. در تصویربرداری خارج از دیدمستقیم دیگر که در طول موج مادون قرمز موج کوتاه به صورت فعال انجام شده با استفاده از یک منبع نور با طول موج مادون قرمز موج کوتاه و تابش آن به یک جسم که در دیدمستقیم دوربین قرار ندارد، موج منعکس شده از یک سطح بازتابنده، وارد دوربین SWIR مدل SX-1.7-320 شده و نهایتاً تصویر هدف بازیابی می شود. نتایج تصویربرداری موفقیت این نوع تصویربرداری در طول موج های مادون قرمز موج بلند و موج کوتاه به ترتیب در حالت غیرفعال و فعال را نشان می دهد. تصاویر به دست آمده از تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS کارایی این روش را به ترتیب در طول موج های LWIR و SWIR در حالت های غیرفعال و فعال نشان می دهند. اعتبار سنجی این روش تصویربرداری با مقایسه تصاویر به دست آمده با تصاویر اصلی، با استفاده از معیارهای MSE و RMSE انجام می شود.

کلیدواژه ها: تصویربرداری دید غیرمستقیم، مادون قرمز موج بلند، مادون قرمز موج کوتاه، وضوح

۱. مقدمه

کاربردهای امنیتی و دفاعی است [۲]. به عنوان مثال، در کاربردهای دفاعی و امنیتی، تصویربرداری غیرمستقیم NLOS می تواند به طور گسترده در جنگ شهری مورد استفاده قرار گیرد. همین طور در جلوگیری از تصادفات خصوصاً در نقاط کور و موقعیت هایی که دید کافی برای راننده وجود ندارد، تصویربرداری NLOS می تواند به راننده کمک کند [۱]. کاربرد دیگر در پارکینگ هایی است در آن، دید کافی وجود ندارد و تصویربرداری NLOS می تواند برای رانندگان راهنمای مناسبی باشد. کاربردهای متنوع دیگری در حوزه پزشکی وجود دارد. به عنوان مثال در تصویربرداری به روش آندوسکوپی از اعضای داخلی بدن انسان، استفاده از تصویربرداری NLOS می تواند فواید و مزایای قابل توجهی داشته باشد. از جمله کاربردهای متنوع دیگر، می توان به کاربرد این نوع تصویربرداری در عملیات امداد و نجات و عملیات آتش نشانی در تصویربرداری از فضاهای غیرقابل مشاهده در دید غیرمستقیم اشاره داشت.

تصویربرداری از اهداف خارج از دیدمستقیم NLOS^۱ امروزه به عنوان یک فناوری نوظهور، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این نوع تصویربرداری قادر به تصویربرداری از اشیاء خارج از دیدمستقیم و اصطلاحاً اشیاء پنهان است. در تصویربرداری دیدمستقیم LOS^۲ نور بازتابیده شده از جسم مستقیماً وارد حسگر می شود. اما در تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS با توجه به مسیر مستقیم الخط نور، تصویربرداری از اهداف خارج از دیدمستقیم به سادگی ممکن نیست [۱]. کاربردهای این نوع تصویربرداری در زمینه های مختلف نظیر رانندگی با خودروهای خود ران، کمک به راننده با استفاده از تصویربرداری از نقاط کور و خارج از دید راننده، تصویربرداری پزشکی و تصویربرداری مرتبط با

^۱ Non-Line of Sight.^۲ Line of Sight.

استاد: روئین فر، محمد، سلمانیان، مهدی "تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS در طول موج مادون قرمز موج کوتاه و بلند"، رادار، ۱۱(۲)،

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.6.4>، ۱۴۰۲، ۶۱-۷۰

می‌توانند شدت [۶] یا اطلاعات همدوسی محدود [۷، ۳۱ و ۳۲] را جمع‌آوری کنند و معمولاً تصویر دوبعدی باکیفیت پایین را بازسازی می‌کنند. درحالی‌که چند کار اخیر می‌تواند هم‌شکل و هم عمق شیء پنهان را تخمین بزند [۹، ۸].

چالش‌های بسیاری در هنگام تحقق تصویربرداری NLOS وجود دارد. در اولین چالش، به دلیل تلفات مرتبه بالا نسبت به فاصله و همین‌طور نویز محیط در طول فرآیند انتقال نور، تصویربرداری NLOS با SNR^6 کم، یک مسئله پیچیده است که سبب می‌شود بازسازی دوبعدی باکیفیت بالا کار بسیار سختی شود [۱۰]. صحنه و اشیاء پنهان متفاوت ممکن است اندازه‌گیری‌های یکسانی داشته باشند که پیچیدگی مسئله را عمیق‌تر می‌کند [۱۱]. دومین چالش اینکه، وضوح مکانی نتایج بازسازی توسط منطقه اسکن (اندازه روزنه) و وضوح زمانی سیستم محدود می‌شود. زمانی که اندازه منطقه پنهان بزرگ یا پیچیده باشد، وضوح مکانی توسط پیچیدگی محاسباتی محدود می‌شود [۱]. سومین چالش، طولانی بودن زمان جمع‌آوری داده است [۱۲]. تصویربرداری تفکیک زمانی NLOS مرسوم، برای جمع‌آوری داده نیاز به یک فرآیند اسکن دارد که این روش را برای تصویربرداری بلادرنگ و باکیفیت بالا مشکل می‌سازد. اگرچه آشکارسازهای آرایه‌ای (نظیر آرایه SPAD) وعده حذف فرآیند اسکن را می‌دهند [۱۳]، اما آن‌ها هنوز به اندازه کافی کشف نشده‌اند. باوجود مشکلات و چالش‌های فوق، بسیاری از روش‌های نوظهور تصویربرداری NLOS تحت سناریوهای خاصی در سال‌های اخیر به موفقیت رسیده‌اند. روش‌های مرسوم متکی بر نوع چیدمان تصویربرداری و چگونگی روشنایی شیء پنهان (به‌عنوان مثال، فعال یا غیرفعال) بوده که با توسعه سه عامل تأثیرگذار در تصویربرداری همراه خواهد بود. سامانه‌های سخت‌افزاری پیشرفته، مدل‌های تصویربرداری مستقیم و دقیق، الگوریتم‌های بازسازی مؤثر.

به‌عنوان مثال، [۱۴] یک چیدمان هم-کانون و تلسکوپ دوگانه را برای تکمیل تصویربرداری شگفت‌انگیز در فاصله ۱/۴۳ کیلومتری مورد استفاده قرار داده است. همچنین Liu و همکاران از میدان فازور برای تبدیل مدل تصویربرداری NLOS به LOS استفاده کرده [۱۵، ۱] و به بازسازی صحنه پیچیده باکیفیت بالا دست‌یافته است. [۱۶] به طرز ماهرانه‌ای بازسازی NLOS را به یک مسئله دکانولوشن سه‌بعدی تبدیل

در تصویربرداری NLOS بازسازی تصویر جسم پنهان، با استفاده از تجزیه و تحلیل انعکاس پراشیده از بر روی یک سطح بازتابنده انجام می‌شود [۲]. یکی از مهم‌ترین چالش‌های این نوع تصویربرداری، نسبت سیگنال به نویز SNR کم و وضعیت دشوار تصویربرداری است. با توجه به توسعه سریع حسگرهای حساس به فوتون و الگوریتم‌های تصویربرداری، قابلیت‌های تصویربرداری اپتیکی در سال‌های اخیر بسیار بهبود یافته است. در تصویربرداری دیدمستقیم، تصویربرداری باکیفیت بالا را می‌توان در مسافت‌های نسبتاً طولانی به دست آورد. با این حال، به دلیل محدودیت فیزیکی ذاتی نور مرئی، تصویربرداری اپتیکی مرسوم برای دیدن اشیاء خارج از خط دیدمستقیم دشوار است. برای غلبه بر این محدودیت، تصویربردار، انعکاس پراکنده شده از یک سطح بازتابنده^۱ به اشیاء پنهان را تجزیه و تحلیل می‌کند.

بر اساس آنکه از یک منبع نور قابل کنترل استفاده شود یا خیر، روش‌های تصویربرداری NLOS را می‌توان به دودسته تصویربرداری فعال^۲ و تصویربرداری غیرفعال^۳ تقسیم کرد. در روش‌های تصویربرداری فعال NLOS اغلب از منابع نور بیرونی خارجی گران‌قیمت با وضوح زمانی بالا (به‌عنوان مثال، لیزر فوق‌سریع) برای روشن کردن سطح بازتابنده استفاده می‌کنند. هم‌زمان، یک آشکارساز حساس تفکیک زمانی برای تشخیص نور منعکس شده به ترتیب از سطح بازتابنده، شیء پنهان و مجدداً سطح بازتابنده استفاده می‌شود. نور مؤثر جمع‌آوری شده اغلب به‌عنوان نور سه جهشی^۴ شناخته می‌شود زیرا توسط سه سطح (سطح بازتابنده، شیء پنهان و مجدداً سطح بازتابنده) به ترتیب پشت سر هم منعکس می‌شود. سپس، نور سه جهشی جمع‌آوری شده، به‌منظور بازسازی تصویر شیء پنهان، توسط الگوریتم‌های مختلف نظیر پیش‌تجسم^۵ [۳]، روش‌های معکوس [۴] و روش‌های مبتنی بر موج [۵] تجزیه و تحلیل می‌شود. از آنجایی که روش‌های تصویربرداری فعال NLOS قادر به جمع‌آوری انواع مختلفی از اطلاعات از جمله شدت، زمان و همدوسی هستند، این روش‌ها قابلیت بازسازی سه‌بعدی با وضوح بالا را دارند. از سوی دیگر، روش‌های غیرفعال از منبع نور خارجی قابل کنترل استفاده نمی‌کنند، بلکه از نور محیط یا نور ساطع شده توسط اشیاء پنهان برای تکمیل تصویربرداری دید غیرمستقیم استفاده می‌کنند. باوجود هزینه کم، روش‌های غیرفعال معمولاً فقط

¹ Relay Wall.

² Active.

³ Passive.

⁴ Three Bounce.

⁵ Back-Projection.

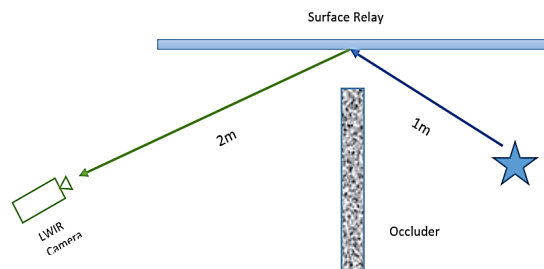
⁶ Signal to Noise Ratio.

NLOS فعال با منبع تابش ثالث در طول موج SWIR ارائه خواهد شد و در بخش نتیجه‌گیری حاصل ارائه خواهد گردید.

۲- تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS

غیرفعال مادون قرمز

شکل ۱ شما تیک چیدمان تصویربرداری NLOS غیرفعال در طول موج مادون قرمز را نشان می‌دهد. جسم حرارتی هدف در سمت راست، به‌طور مستقیم تابش به دوربین مادون قرمز در سمت چپ را ندارد چراکه یک مانع بین هدف و دوربین مادون قرمز قرار دارد. تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS غیرفعال از انعکاس پرتو مادون قرمز از طریق یک سطح منعکس کننده انجام می‌شود.



شکل (۱). شما تیک چیدمان تصویربرداری NLOS غیرفعال در طول موج LWIR.

در تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS، دمای جسم پنهان از توزیع پراکندگی تفکیک شده و مکان تخمین زده شده قابل تخمین است [۲۶]. انرژی پرتو مادون قرمز تابیده شده از فاصله دور از یک جسم حرارتی که آن با E نشان داده می‌شود، مطابق با قانون استفان-بولتزمن^۴ مطابق با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E = \sigma T^4 \quad (1)$$

که در رابطه فوق، σ ثابت استفان-بولتزمن است و T دمای ترمودینامیک جسم است. رابطه فوق نشان می‌دهد که انرژی پرتو مادون قرمز تابیده شده از فاصله دور با توان چهارم دمای ترمودینامیک جسم رابطه مستقیم دارد. نور تابیده شده به‌صورت دیدمستقیم به مانع رسیده و در طول مسیر تضعیف می‌شود. میزان تضعیف بستگی به مسافت طی مسیر توسط پرتو مادون قرمز دارد و بر اساس قانون مربع معکوس بیان می‌شود. نوری که به مانع به طریق دیدمستقیم می‌رسد به‌طور پراکنده از مانع منعکس شده و سپس توسط دوربین ضبط می‌شود. مقیاس a_d از توزیع پراکندگی به‌صورت بیان می‌شود

کرده است. همه این فعالیت‌ها تا حد زیادی توسعه تصویربرداری NLOS را ارتقا داده است.

در کنار روش‌های مرسوم تصویربرداری NLOS، کاربرد یادگیری عمیق در تصویربرداری NLOS نیز به‌سرعت توسعه یافته است. با توجه به اصول طراحی شبکه، روش‌های یادگیری عمیق مورد استفاده در تصویربرداری NLOS به دودسته تقسیم می‌شوند: شبکه‌های end-to-end [۱۷]، شبکه‌های مبتنی بر فیزیک [۱۹، ۱۸]. در مقایسه با الگوریتم‌های معمولی، الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌توانند با یادگیری کامل صحنه اولیه، به‌طور خودکار ویژگی‌ها را استخراج نموده و بازسازی اشیاء پنهان را کامل کنند. اگرچه تصویربرداری NLOS مبتنی بر یادگیری عمیق هنوز در مراحل اولیه خود است اما چشم‌انداز تحقیقاتی گسترده‌ای برای کاربردهای عملی دارد. علاوه بر این، برخی از انواع جدید صحنه‌های NLOS، مانند "تصویربرداری از پشت موانع" [۲۰] که از دو انعکاس در پشت موانع استفاده می‌کند و همین‌طور تصویربرداری از طریق سوراخ کلید نیز در مرجع [۲۱] پیشنهاد شده است. تصویربرداری دید غیرمستقیم حرارتی، که در طول موج مادون قرمز موج بلند^۱ LWIR مطرح است، به دلیل دسترسی آسان به تابشگر، آشکارساز یا دوربین مادون قرمز مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در مرجع [۲۲]، ۲۹ و ۳۰، برای تصویربرداری در طول موج مادون قرمز موج بلند، منبع گرمای پنهان هدف به‌عنوان منبع نور عمل می‌کند. این مسئله به یک مسئله جهش واحد ساده می‌شود. ضمن آنکه، بازتاب سطوح هدف دارای بازتاب بسیار قوی‌تری در طول موج مادون قرمز موج بلند نسبت به نور مرئی است. در مرجع [۲۳] روشی برای حذف نویز در تصویربرداری طول موج مادون قرمز موج بلند ارائه شده است. همچنین یک روش تصویربرداری مادون قرمز موج بلند با استفاده از نوع پلاریزاسیون و یادگیری عمیق به‌منظور بازسازی تصویر هدف در مرجع [۲۴] ارائه شده است. در مرجع [۲۵] روشی برای تخمین موقعیت و دمای یک هدف در دید غیرمستقیم از روی انعکاس موج از روی دیوار در طول موج مادون قرمز دور^۲ ارائه شده است. در این مقاله یک روش تصویربرداری دید غیرمستقیم در دو طول موج مادون قرمز موج کوتاه^۳ SWIR و موج بلند ارائه خواهد شد. ابتدا در بخش ۲ تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS غیرفعال در طول موج LWIR انجام خواهد شد و نتایج آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه و در بخش به بررسی نتایج تصویربرداری دید غیرمستقیم

¹ Long-Wave Infrared.

² Far Infrared.

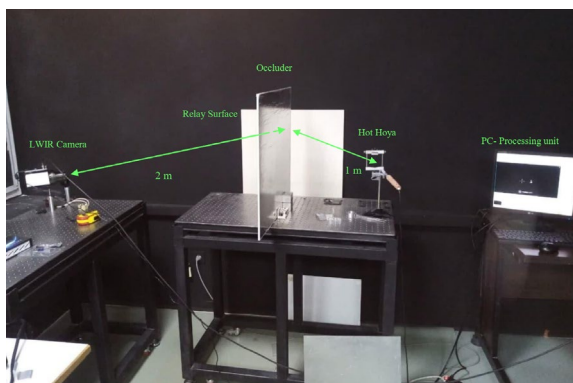
³ Short-Wave Infrared.

⁴ Stefan-Boltzmann law.

کیفیت تصاویر SWIR به ترکیب سطح جسم و میزان انعکاس نور بستگی دارد. اجسام با سطح براق یا منعکس‌کننده معمولاً تصاویر بهتری در این باند ایجاد می‌کنند، حتی اگر سرد باشند. نتیجه آنکه اجسام گرم‌تر معمولاً تصاویر باکیفیت‌تری در باند LWIR ایجاد می‌کنند، زیرا تابش حرارتی آن‌ها بیشتر است. اما در باند SWIR، دمای جسم کمتر اهمیت دارد و بیشتر به ویژگی‌های انعکاسی جسم بستگی دارد [۲۷]. بنابراین در این مقاله، برای تصویربرداری در طول موج LWIR از یک جسم گرم و برای تصویربرداری در طول موج SWIR از یک جسم سرد دمای محیط و سرد استفاده شده است. در ادامه روش تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS غیرفعال در طول موج LWIR و تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS فعال در طول موج SWIR ارائه خواهد شد.

۳- تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS غیرفعال در طول موج LWIR

در این سناریو در طول موج LWIR و به صورت غیرفعال، تصویربرداری NLOS انجام خواهد شد. تابشگر در این سناریو یک جسم گرم و یک هویه داغ است که حرارت آن به‌عنوان تابشگر در سناریوی تصویربرداری غیرفعال در نظر گرفته شده است. سناریوی تصویربرداری NLOS غیرفعال در باند LWIR به صورت شماتیک مطابق با شکل ۱ است. شکل ۲ تصویر واقعی از چیدمان این سناریوی تصویربرداری را نشان می‌دهد.



شکل (۲). تصویر واقعی از چیدمان تصویربرداری NLOS غیرفعال در طول موج LWIR.

دوربین مورد استفاده با توجه به امکانات موجود و در دسترس، یک دوربین LWIR بوده که یک دوربین uncooled Camera-320*240 pixel است که هر پیکسل آن 30 μm است. شکل زیر تصویر واقعی این دوربین را نشان می‌دهد.

$$a_k = \frac{Ek_d}{\hat{y}^2} \quad (2)$$

که در رابطه فوق k_d بازتاب پراکندگی مانع و \hat{y} فاصله تخمینی بین جسم و مانع است. در یک دمای مشخص می‌توان انرژی پرتو مادون قرمز را محاسبه کرد. در یک فاصله مشخص بین جسم و مانع و با فرض داشتن مقیاس a_d ، بازتاب پراکندگی مانع k_d به دست می‌آید. با به دست آوردن بازتاب پراکندگی مانع، می‌توان دمای نامعلوم یک جسم پنهان را مطابق با رابطه زیر به دست آورد:

$$T = \left(\frac{a_d \hat{y}^2}{k_d \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

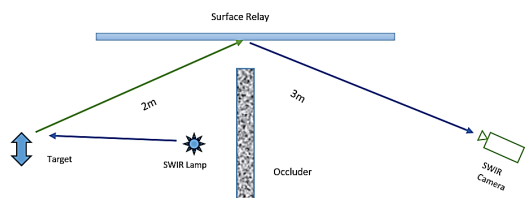
طول موج LWIR عمدتاً تابش حرارتی اجسام را که در دمای محیطی قرار دارند ثبت می‌کند، به عبارت دقیق‌تر ناشی از گرمای ذاتی اجسام است. این محدوده تابش که در طول موج‌های ۱۴-۸ μm قرار دارند، برای شناسایی اجسام در محیط‌های سرد و تاریک نیز کاربرد دارد، زیرا تمامی اجسام به‌طور طبیعی مقداری تابش حرارتی دارند که توسط دوربین‌های LWIR قابل شناسایی است. طول موج SWIR عمدتاً برای شناسایی انعکاس نور مادون قرمز از اجسام استفاده می‌شود و نه فقط تابش حرارتی [۲۷]. به عبارت دیگر، اجسام سرد نیز می‌توانند در تصاویر SWIR قابل مشاهده باشند، چراکه این باند تابش‌های منعکس شده از منبع نور خارجی را ثبت می‌کند. در نتیجه، برای تصویربرداری با امواج مادون قرمز در باندهای LWIR و SWIR، نیازی نیست که جسم مورد تصویربرداری حتماً گرم باشد، زیرا این باندها می‌توانند تابش‌های حرارتی و منعکس شده از اجسام مختلف را ثبت کنند. البته، تفاوت‌هایی در میزان شدت و کیفیت تصاویر در طول موج‌های مادون قرمز موج بلند (LWIR) موج کوتاه (SWIR) وجود دارد. این تفاوت‌ها بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و نحوه تعامل امواج مادون قرمز با اجسام مختلف است: ۱- شدت: امواج LWIR عمدتاً تابش حرارتی اجسام را ثبت می‌کنند. بنابراین، اجسام گرم‌تر معمولاً تصاویر با شدت بیشتر و وضوح بهتری در این باند ایجاد می‌کنند اما امواج SWIR عمدتاً انعکاس نور مادون قرمز از سطح اجسام را ثبت می‌کنند. بنابراین، شدت تصویر به میزان انعکاس نور از جسم بستگی دارد و نه لزوماً به دمای آن. ۲- کیفیت تصویر: کیفیت تصاویر LWIR به دمای اجسام بستگی دارد. اجسام گرم‌تر تابش بیشتری دارند و در نتیجه تصاویر واضح‌تری ایجاد می‌کنند. در محیط‌های سردتر یا برای اجسام سرد، تصاویر ممکن است وضوح کمتری داشته باشند.

LWIR به دست آمده را نشان می دهد.

۴- تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS فعال با

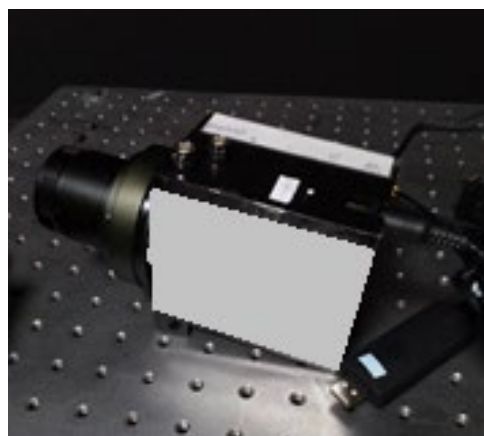
منبع تابش ثالث در طول موج SWIR

در این سناریو در طول موج SWIR و به صورت فعال، تصویربرداری NLOS انجام خواهد شد. تابشگر در این سناریو یک منبع SWIR است که یک هدف فلزی را روشن می کند. پس از برخورد تابش SWIR به هدف و انعکاس نور تابیده به صفحه منعکس کننده^۱، تصویر هدف توسط دوربین SWIR که در دید غیرمستقیم نسبت به هدف قرار دارد، اخذ شده و نمایش داده می شود. تصویر شماتیک چیدمان تصویربرداری NLOS فعال در باند SWIR با منبع تابش ثالث SWIR مطابق با شکل ۶ است:



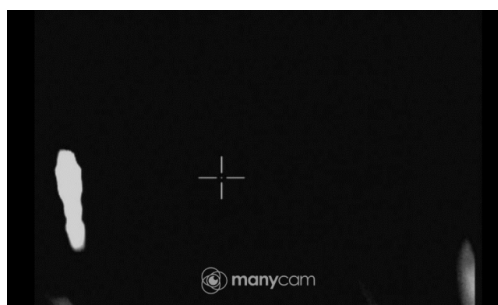
شکل (۶). شماتیک چیدمان تصویربرداری NLOS غیرفعال در طول موج SWIR.

در شکل ۷ تصویر واقعی این چیدمان مشاهده می شود. در این چیدمان تصویربرداری، بین هدف و دوربین یک مانع انسداد کننده^۲ وجود دارد و بنابراین هدف در دید غیرمستقیم از مشاهده گر که یک دوربین SWIR است قرار داد. در سمت چپ شکل ۷، هدف توسط یک تابشگر یا لامپ SWIR روشن شده و بخشی از تابش SWIR را منعکس می کنند. پس از برخورد پرتو منعکس شده با سطح منعکس کننده، مجدداً انعکاس دیگری وجود خواهد داشت که پرتو منعکس شده به دوربین SWIR رسیده و تصویر هدف در دوربین SWIR تشکیل خواهد شد. دوربین مورد استفاده با توجه به امکانات موجود و در دسترس، یک دوربین SWIR با مدل SX-1.7-320 است. به منظور تمرکز هدف در تصویر تشکیل شده در دوربین SWIR، برای داشتن یک تصویر متمرکز و با کیفیت از هدف، عدسی دوربین SWIR برای بهترین حالت تنظیم می شود. شکل ۸ تصویر واقعی این دوربین و جدول مشخصات فنی آن را نشان می دهد.



شکل (۳). دوربین LWIR از نوع uncooled Camera-320*240 pixel

نتایج تصاویر به دست آمده توسط دوربین LWIR مطابق با شکل های زیر است:



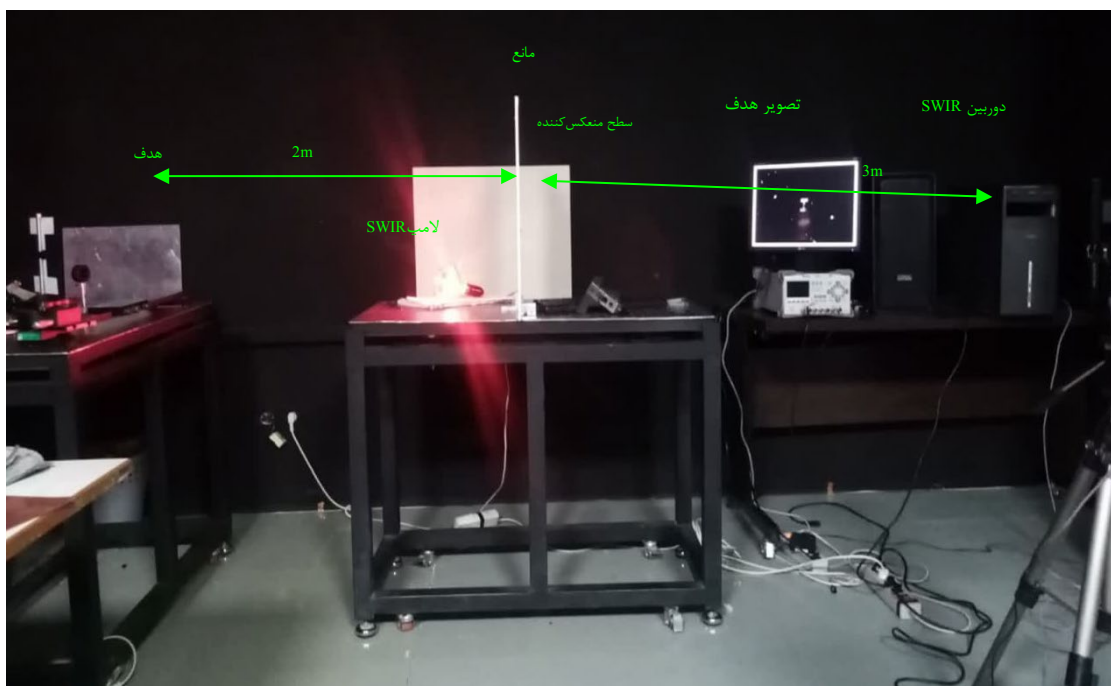
شکل (۴). نتایج تصاویر به دست آمده توسط دوربین LWIR در تصویربرداری NLOS غیرفعال.



شکل (۵). نتایج به دست آمده توسط دوربین LWIR در تصویربرداری NLOS غیرفعال.

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود تصویربرداری NLOS در طول موج LWIR از یک جسم گرم نظیر هویه داغ با موفقیت انجام شده است. شکل زیر تصویر هم زمان هدف و تصویر آن را که با تصویربرداری NLOS طول موج

¹ Surface Relay.
² Occluder.

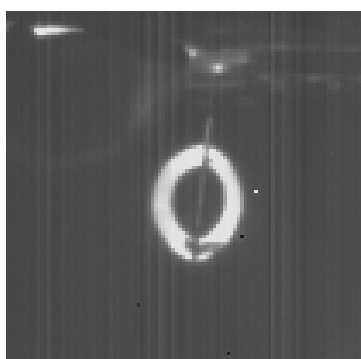


شکل (۷). نتایج تصاویر به دست آمده توسط دوربین SWIR در تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS غیرفعال



شکل (۱۰). تصویر هدف I روشن شده توسط تابشگر SWIR

نتایج حاصل از تصویربرداری NLOS فعال به دست آمده از دوربین SWIR برای دو هدف مندرج در شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب مطابق با شکل ۱۱ و ۱۲ است.

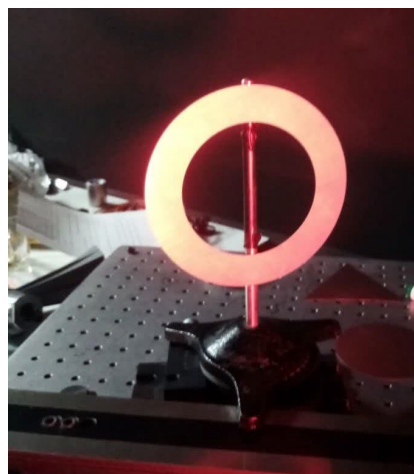


شکل (۱۱) تصویر به دست آمده حرف O در تصویربرداری NLOS فعال در دوربین SWIR



شکل (۸). دوربین SWIR با مدل SX-1.7-3208

از دو هدف به شکل O و I در چیدمان شکل ۷ تصویربرداری شده که به ترتیب در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

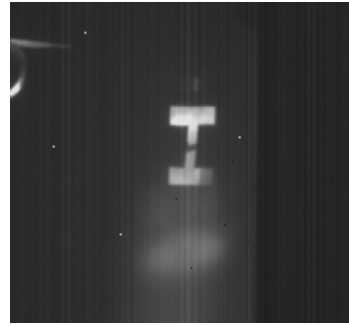


شکل (۹). تصویر هدف O روشن شده توسط تابشگر SWIR.

RMSE بهتری دارد. در طول موج SWIR یکی از دلایل بالاتر بودن مقادیر MSE و RMSE نسبت به طول موج LWIR را می‌توان انعکاس ناخواسته از محیط و کاهش کیفیت تصاویر به دست آمده برشمرد. به عبارت دیگر علت نتایج مطلوب‌تر LWIR نسبت به SWIR آن است که طول موج‌های حرارتی ناشی از ذات جسم گرم بوده به طوری که این ناحیه طول موجی که در محدوده $8-14 \mu\text{m}$ است به میزان کمتری در محیط داخل آزمایشگاه وجود دارد. در حالی که طول موج SWIR که ناشی از یک منبع نوری (ناشی از خود جسم نیست) است و در محدوده حدود $1/1-2/5 \mu\text{m}$ بوده و علاوه بر منبع نور اصلی، نور خورشید، نور لامپ سقفی داخل آزمایشگاه و سایر منابع SWIR در آزمایشگاه وجود دارد. همچنین قطر عدسی اپتیکی دوربین LWIR حدود $3/5 \text{ cm}$ است که در حالی که قطر عدسی اپتیکی دوربین SWIR حدود 2 cm است در نتیجه سطح سیگنال به نویز ثبت شده توسط LWIR از SWIR بیشتر است. از سوی دیگر جسم در دید غیرمستقیم نسبت به دوربین قرار دارد و همین موضوع، باعث افت محسوس نسبت سیگنال به نویز در تصاویر به دست آمده خواهد شد. طبیعی است که هر چه فاصله جسم تا دوربین بیشتر باشد، میزان واگرایی پرتو بیشتر خواهد بود و این میزان افت در نسبت سیگنال به نویز محسوس-تر خواهد بود و باعث کاهش بیشتر نسبت سیگنال به نویز و کاهش کیفیت تصویر به دست آمده خواهد شد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله تصویربرداری دید غیرمستقیم NLOS در طول موج مادون قرمز موج کوتاه و موج بلند انجام شده است. در تصویربرداری خارج از دید مستقیم در طول موج مادون قرمز موج بلند از یک دوربین LWIR که یک دوربین uncooled Camera- $320 \times 240 \text{ pixel}$ بوده و اندازه هر پیکسل آن $30 \mu\text{m}$ است، استفاده شده است. در این تصویربرداری که به صورت غیرفعال انجام شد، تصویر یک جسم گرم نظیر هویه داغ با موفقیت بازیابی شده است. در تصویربرداری خارج از دید مستقیم NLOS که در طول مادون قرمز موج کوتاه SWIR به صورت فعال انجام شد با استفاده از یک منبع نور در باند SWIR و تابش آن به یک جسم که در دید مستقیم دوربین قرار ندارد، موج منعکس شده از یک سطح بازتابنده، وارد دوربین SWIR مدل SX-1.7-320 و نهایتاً تصویر هدف بازیابی شد. نتایج تصویربرداری موفقیت این نوع تصویربرداری در طول موج‌های LWIR و SWIR به ترتیب در حالت غیرفعال و فعال را نشان داده و اعتبار سنجی این روش تصویربرداری با مقایسه تصاویر به دست آمده با تصاویر اصلی، با استفاده از معیارهای MSE و RMSE انجام شده است.



شکل (۱۲) تصویر به دست آمده حرف I در تصویربرداری NLOS فعال در دوربین SWIR

برای مقایسه تصویر اصلی و تصویر به دست آمده از دو معیار MSE و RMSE استفاده شده که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (۵)$$

که در روابط فوق، x_i ها پیکسل‌های تصویر اصلی و \hat{x}_i ها پیکسل‌های تصویر به دست آمده (متناظر با تصویر اصلی) است و N تعداد کل پیکسل‌های تصویر است. مقادیر اندازه‌گیری شده برای دو معیار MSE و RMSE برای دو تصویر به دست آمده برای طول موج‌های مادون قرمز موج بلند و موج کوتاه مطابق با جدول زیر است:

جدول ۱- مقایسه مقادیر MSE و RMSE تصاویر به دست آمده نسبت به تصویر اصلی

طول موج	تصویر	MSE	RMSE
LWIR	تصویر هویه	0.0654	0.2557
SWIR	تصویر ۱ (شکل O)	0.1074	0.3278
	تصویر ۲ (شکل I)	0.1256	0.3544

همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود، بر اساس دو معیار MSE و RMSE میزان شباهت تصویر به دست آمده برای دو طول موج LWIR و SWIR قابل قبول است. هرچند این معیار برای تصویر به دست آمده در طول موج LWIR به دلیل حرارت بالای جسم و حرارت بالا نیز ناشی از ذات جسم بوده به طوری که سایر طول موج‌های مزاحم داخل محیط، اثر کمتری در آشکارسازی ایفا کرده در نتیجه مقادیر MSE و

۵. مراجع

- [13] S. W. Seidel, J. Murray-Bruce, Y. Ma, C. Yu, W. T. Freeman, and V. K. Goyal, "Two-Dimensional Non-Line-of-Sight Scene Estimation From a Single Edge Occluder," *IEEE Transactions on Computational Imaging*, vol. 7, pp. 58–72, 2021, doi: 10.1109/tci.2020.3037405.
- [14] C. Thrampoulidis et al., "Exploiting Occlusion in Non-Line-of-Sight Active Imaging," *IEEE Transactions on Computational Imaging*, vol. 4, no. 3, pp. 419–431, Sep. 2018, doi: 10.1109/tci.2018.2829599.
- [15] X. Liu, S. Bauer, and A. Velten, "Analysis of Feature Visibility in Non-Line-Of-Sight Measurements," 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 10132–10140, Jun. 2019, doi: 10.1109/cvpr.2019.01038.
- [16] I. Gkioulekas, A. Levin, F. Durand, and T. Zickler, "Micron-scale light transport decomposition using interferometry," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 34, no. 4, pp. 1–14, Jul. 2015, doi: 10.1145/2766928.
- [17] I. Gkioulekas, A. Levin, F. Durand, and T. Zickler, "Micron-scale light transport decomposition using interferometry," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 34, no. 4, pp. 1–14, Jul. 2015, doi: 10.1145/2766928.
- [18] C. Jin, M. Tang, L. Jia, X. Tian, J. Yang, K. Qiao, and S. Zhang, "Scannerless Non-Line-of-Sight Three Dimensional Imaging with a 32x32 SPAD Array," arXiv:2011.05122.
- [19] C. Wu et al., "Non-line-of-sight imaging over 1.43 km," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, no. 10, Mar. 2021, doi: 10.1073/pnas.2024468118.
- [20] A. Pediredla, A. Dave, and A. Veeraraghavan, "SNLOS: Non-line-of-sight Scanning through Temporal Focusing," 2019 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), pp. 1–13, May 2019, doi: 10.1109/iccp.2019.8747336.
- [21] S. Xin, S. Noursias, K. N. Kutulakos, A. C. Sankaranarayanan, S. G. Narasimhan, and I. Gkioulekas, "A Theory of Fermat Paths for Non-Line-Of-Sight Shape Reconstruction," 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 6793–6802, Jun. 2019, doi: 10.1109/cvpr.2019.00696.
- [22] X. Liu, J. Wang, L. Xiao, Z. Shi, X. Fu, and L. Qiu, "Non-line-of-sight imaging with arbitrary illumination and detection pattern," *Nature Communications*, vol. 14, no. 1, Jun. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-38898-4.
- [23] M. Kaga, T. Kushida, T. Takatani, K. Tanaka, T. Funatomi, and Y. Mukaigawa, "Thermal non-line-of-sight imaging from specular and diffuse reflections," *IPSP Transactions on Computer Vision and Applications*, vol. 11, no. 1, Nov. 2019, doi: 10.1186/s41074-019-0060-4.
- [24] C. Hashemi, T. Sasaki, and J. Leger, "Parallax-Driven Denoising of Passive Non-Line-of-Sight Thermal Imagery," 2023 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), pp. 1–12, Jul. 2023, doi: 10.1109/iccp56744.2023.10233749.
- [25] T. Maeda, Y. Wang, R. Raskar, and A. Kadambi, "Thermal Non-Line-of-Sight Imaging," 2019 IEEE International Conference on Computational Photography
- [1] M. O'Toole, D. B. Lindell, and G. Wetzstein, "Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform," *Nature*, vol. 555, no. 7696, pp. 338–341, Mar. 2018, doi: 10.1038/nature25489.
- [2] X. Liu et al., "Non-line-of-sight imaging using phasor-field virtual wave optics," *Nature*, vol. 572, no. 7771, pp. 620–623, Aug. 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1461-3.
- [3] A. Velten, T. Willwacher, O. Gupta, A. Veeraraghavan, M. G. Bawendi, and R. Raskar, "Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging," *Nature Communications*, vol. 3, no. 1, Mar. 2012, doi: 10.1038/ncomms1747.
- [4] V. Arellano, D. Gutierrez, and A. Jarabo, "Fast back-projection for non-line of sight reconstruction," *ACM SIGGRAPH 2017 Posters*, Jul. 2017, doi: 10.1145/3102163.3102241.
- [5] F. Heide, L. Xiao, W. Heidrich, and M. B. Hullin, "Diffuse Mirrors: 3D Reconstruction from Diffuse Indirect Illumination Using Inexpensive Time-of-Flight Sensors," 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 3222–3229, Jun. 2014, doi: 10.1109/cvpr.2014.418.
- [6] D. B. Lindell, G. Wetzstein, and M. O'Toole, "Wave-based non-line-of-sight imaging using fast f-k migration," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 38, no. 4, pp. 1–13, Jul. 2019, doi: 10.1145/3306346.3322937.
- [7] X. Liu, S. Bauer, and A. Velten, "Phasor field diffraction based reconstruction for fast non-line-of-sight imaging systems," *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, Apr. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-15157-4.
- [8] X. Liu, S. Bauer, and A. Velten, "Phasor field diffraction based reconstruction for fast non-line-of-sight imaging systems," *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, Apr. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-15157-4.
- [9] M. Batareseh, S. Sukhov, Z. Shen, H. Gemar, R. Rezvani, and A. Dogariu, "Passive sensing around the corner using spatial coherence," *Nature Communications*, vol. 9, no. 1, Sep. 2018, doi: 10.1038/s41467-018-05985-w.
- [10] A. Beckus, A. Tamasan, and G. K. Atia, "Multi-Modal Non-Line-of-Sight Passive Imaging," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 28, no. 7, pp. 3372–3382, Jul. 2019, doi: 10.1109/tip.2019.2896517.
- [11] J. Boger-Lombard and O. Katz, "Passive optical time-of-flight for non line-of-sight localization," *Nature Communications*, vol. 10, no. 1, Jul. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-11279-6.
- [12] C. Saunders, R. Bose, J. Murray-Bruce, and V. K. Goyal, "Multi-Depth Computational Periscopy with an Ordinary Camera," *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 9299–9305, May 2020, doi: 10.1109/icassp40776.2020.9054518.

Persian).<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1396.5.3.2.5>

[30] M. Nasiri, S. Chehrehza, S. A. Mirmahdavi, “Small Target Enhancement in Infrared Image using Local Statistical Weighted Entropy,” *Journal Of Electronical & Cyber Defence*, vol. 4, no. 2, 2016. (in Persian).<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1395.4.2.6.0>

[31] H. Moslemi, I. Abaspur Kazerouni, A. Rabaninejad, “Hand Vessels Authentication Using SVM Classification in Infrared Images,” *Journal Of Electronical & Cyber Defence*, vol. 5, no. 3, 2017. (in Persian).<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1396.5.3.3.6>

[32] K. Eyvazi, M. A. Karami, “Optimizing Plasmonic Color Filter for Imaging Sensor,” *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 7, no. 2, 2020. (in Persian).<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1398.7.2.12.7>

(ICCP), pp. 1–11, May 2019, doi: 10.1109/iccphot.2019.8747343.

[26] M. Kaga, T. Kushida, T. Takatani, K. Tanaka, T. Funatomi, and Y. Mukaigawa, “Thermal non-line-of-sight imaging from specular and diffuse reflections,” *IPSI Transactions on Computer Vision and Applications*, vol. 11, no. 1, Nov. 2019, doi: 10.1186/s41074-019-0060-4.

[27] <https://www.photonicsonline.com/doc/swir-mwir-and-lwir-one-use-case-for-each-0001>.

[28] A. Nazar, N. A. Jasem, and N. Kh. Abdalameer, “Optimized Design of Optical Filters for LWIR Region,” *Journal of Optics*, vol. 53, no. 3, pp. 1914–1917, Aug. 2023, doi: 10.1007/s12596-023-01295-7.

[29] F. S. Marvasti, M. Nasiri, M. R. Mousav, “Flying Small Target Detection in Infrared Images Based on Adaptive

Top-Hat Transform,” *Journal Of Electronical & Cyber Defence*, vol. 5, no. 3, 2017. (in