



Simulation and Investigation of Electromagnetic Wave Propagation of TTW Radars in Brick and Concrete Walls for Industrial Imaging Applications

Hossein Malekpoor ^{a*}

^a Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, 38156-8-8349, Iran. h.malekpoor.sh@gmail.com

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Malekpoor H. Simulation and Investigation of Electromagnetic Wave Propagation of TTW Radars in Brick and Concrete Walls for Industrial Imaging Applications. *Industrial Innovations*. 2026;4(1):21-33.

 <https://doi.org/10.61882/jii.4.1.21>

KEYWORDS

Continuous wave radars;
Ultra-wideband;
Imaging.

ABSTRACT

This paper presents ultra-wideband continuous wave radars in the frequency sweep of 0.5 to 8 GHz, which search for moving and stationary objects behind walls. As electromagnetic waves propagate from one homogeneous medium to another create a change in the wave impedance at the boundary of the medium. Impedance mismatch generally leads to reflection, absorption, and transmission of electromagnetic waves. Therefore, it is necessary to investigate the reflection coefficient and transmission coefficient of different materials to understand their behavior towards electromagnetic waves. The main advantages of ultra-wideband for short-range radar tracking and imaging include very good resolution, high power efficiency, low interference, and the ability to detect moving or stationary targets in various industrial environments. Through-The-Wall (TTW) radars have emerged in recent years as a new method of industrial and non-destructive imaging. The operation of these radars is based on the emission and reception of electromagnetic waves through physical obstacles such as brick and concrete walls.

Extended Abstract

1. Introduction

With Ultra-wideband radar operates using very narrow or short pulses that result in very large transmission bandwidths. UWB technology has been applied to many new applications that will benefit government, public safety, businesses, and consumers. The recent Federal Communications Commission 2 vote for UWB has increased interest in researching this technology for imaging systems; for example, through-wall imaging 3, ground-penetrating radars 4, surveillance systems and medical imaging devices, vehicle radar systems, communication and measurement systems. The main advantages of UWB for short-range radar tracking and imaging include very good resolution, high power efficiency, low interference, and the ability to detect moving or stationary targets in complex environments.

2. Approach

The real and imaginary parts of the dielectric constant of a material are evaluated by measuring an insertion transfer function, which is defined as the ratio of two frequency domain signals measured in the presence and absence of the material under test. It includes a schematic diagram of the measurement setup. Measurements are made in the time domain using short-duration pulses or in the frequency domain using sinusoidal signals. The transmitting and receiving antennas are held at fixed locations and adjusted for maximum reception. The material to be measured is placed approximately midway between the two antennas. The distance between the antennas should be large enough to allow the material to be in the vicinity of each antenna.

* Corresponding author.

E-mail address: h.malekpoor.sh@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.61882/jii.4.1.21>

Received: December 6, 2025; Received in revised form: January 1, 2026; Accepted: January 7, 2026.

Article type: Research Paper



3. Findings

In this paper, ultra-wideband continuous wave radars in the frequency sweep of 0.5 to 8 GHz are presented, which search for moving and stationary objects behind walls. As electromagnetic waves propagate from one homogeneous medium to another, a change in wave impedance is created at the boundary of the medium. Through-The-Wall (TTW) radars have been proposed in recent years as one of the new methods of industrial and non-destructive imaging. The operation of these radars is based on the propagation and reception of electromagnetic waves through physical obstacles such as brick and concrete walls. The aim of the project is to investigate the propagation through walls made of common building materials and thereby obtain the ultra-wideband properties of these materials. In this paper, reflection and transmission coefficients are calculated for bricks, wooden materials, concrete walls, etc. Information on the electromagnetic properties of building materials in the ultra-wideband frequency range (1.3–10.6 GHz) is considered.

4. Conclusion

The hollow concrete wall shows a high transmission loss of about 8 dB. Here it is clear that the frequency of 1 GHz is preferred to the frequency of 5 GHz, with a transmission gain of 10 dB. One of the consequences of the amplitude and phase fluctuations is the associated sidelobe clutter. The level of clutter decreases with time and is negligible for distances greater than 1 m. This clutter hinders the detection of human targets because it may obscure the target of interest, although differential measurements can improve the situation. Concrete slabs have a different electromagnetic behavior. The transmission coefficient decreases from -7 dB to -25 dB. This result shows that lower frequency, thinner wall thickness and L-band of 1 to 2 GHz are a good choice with respect to the penetration criterion.



شبیه‌سازی و بررسی انتشار امواج الکترومغناطیسی رادارهای TTW در دیوارهای با جنس آجر و بتن برای کاربردهای تصویربرداری صنعتی

حسین ملک‌پور الف*

الف گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. h.malekpour.sh@gmail.com

واژگان کلیدی	چکیده
رادارهای موج پیوسته؛ فراپهن باند؛ تصویربرداری.	در این مقاله رادارهای موج پیوسته فراپهن باند در سوئیپ فرکانسی ۰/۵ تا ۸ گیگاهرتز ارائه شده است که این رادارها اجسام متحرک و ثابت پشت دیوارها را جست‌وجو می‌کند. هم‌زمان با انتشار امواج الکترومغناطیسی از یک محیط همگن به محیطی دیگر، یک تغییر امپدانس موج در مرز محیط ایجاد می‌شود. عدم تطبیق امپدانس به‌طور کلی منجر به بازتاب، جذب و انتقال امواج الکترومغناطیسی می‌شود. بنابراین لازم است که میزان ضریب بازتاب و ضریب انتقال مواد مختلف مورد بررسی قرار گیرد تا رفتار آن‌ها نسبت به امواج الکترومغناطیسی درک شود. مزایای اصلی فراپهن باند برای ردیابی و تصویربرداری رادار برد کوتاه، شامل وضوح بسیار مناسب، بازده قدرت بالا، تداخل کم و توانایی تشخیص اهداف متحرک یا ثابت در محیط‌های مختلف صنعتی است. رادارهای <i>Through-The-Wall (TTW)</i> در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از روش‌های نوین تصویربرداری صنعتی و غیرمخرب مطرح شده‌اند. عملکرد این رادارها مبتنی بر انتشار و دریافت امواج الکترومغناطیسی از میان موانع فیزیکی مانند دیوارهای آجری و بتنی است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷	

۱- مقدمه

فناوری رادار عبور از دیوار (TTW) برای شناسایی، شمارش، مکان‌یابی و ردیابی افراد درون ساختمان‌ها با استفاده از فرکانس‌هایی در محدوده UHF تا باند S استفاده می‌شود [۱-۸]. هنگام مطالعه رادارهای TTW، تأثیر دیوارها بر سیگنال‌های رادار باید پیش‌بینی شود و امواج رادار TTW باید بتوانند از انواع مختلف دیوارها (مانند آجر، بلوک بتنی، بتن خشن و تخته گچی) عبور کنند تا حضور یک فرد یا هدف در پشت دیوار حس شود [۹]. یک روش شبیه‌سازی برای یک فرستنده-گیرنده RF front-end یک سیستم رادار FMCW برای اندازه‌گیری برد و سرعت یک هدف خاص توسعه داده شد [۱۰]. این روش بر روی یک رادار FMCW که با فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز (یعنی در باند S کار می‌کند) اجرا شد. در مقابل، باند فرکانسی مورد بررسی در مطالعه ما باند X (به‌ویژه فرکانس ۹ گیگاهرتز) است. در این فرکانس، مطالعات مختلف، توسعه رادارهای UWB-FMCW را برای تشخیص اشیاء ثابت یا متحرک پشت دیوارها بررسی کرده‌اند [۱۱-۱۳]. فناوری "چند ورودی-چند خروجی" (MIMO) (احمد و همکاران ۲۰۲۲) به دلیل مزایای متعدد آن، در بسیاری از تحقیقات در این زمینه [۱۴-۱۶] و سایر زمینه‌ها مانند شبکه‌های حسگر [۱۷] و RFID [۱۸] و رادار استفاده قرار گرفته است. مطالعات جدیدتر، سهم قابل توجهی در مباحث مطرح‌شده در این مقاله داشته‌اند. به‌عنوان مثال، مطالعه وانگ و همکاران [۱۹] پیشرفت‌هایی را در طراحی الگوریتم با هدف افزایش شناسایی هدف از شیخ‌های چندمسیره و کلاتر در سیستم‌های رادار SISO IR-UWB بررسی می‌کند. علاوه بر این، تکنیک‌های جدید برای سرکوب تداخل

* نویسنده مسئول؛

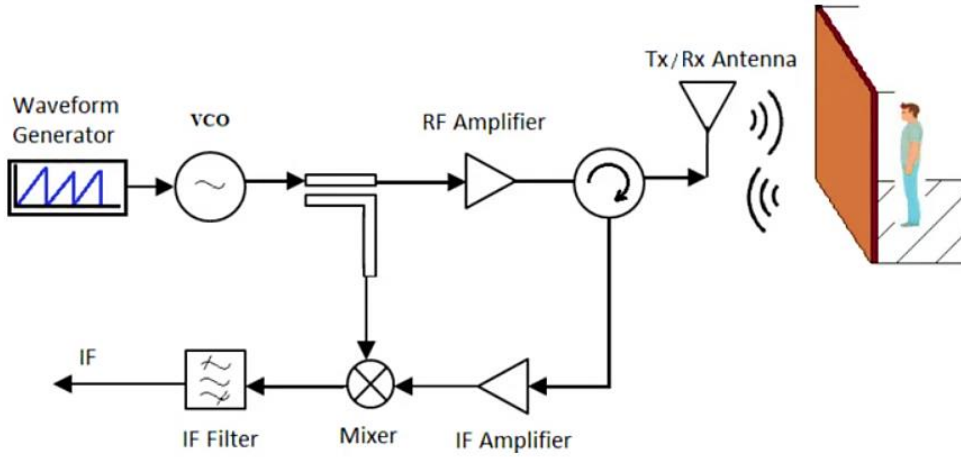
در سیستم‌های راداری FMCW، به‌ویژه با پیاده‌سازی شبکه‌های بدون نظارت و ویژگی‌محور، نتایج امیدوارکننده‌ای را به همراه داشته است [۲۰-۲۲]. علاوه بر این، پیشرفت در فناوری‌های رادار، تشخیص فعالیت انسان از طریق دیوار را تا حد زیادی ارتقا داده و بینش‌های ارزشمندی را برای کاربردهای مختلف، از جمله امنیت و نظارت، ارائه می‌دهد [۲۳-۳۰]. همچنین، توسعه سیستم‌های راداری نوآورانه از طریق دیوار با باند W، به‌ویژه آن‌هایی که از اسکن سکتور و لوله‌های موج متحرک استفاده می‌کنند، پتانسیل قابل توجهی را برای بهبود قابلیت‌های نفوذ سیگنال نشان داده‌اند [۲۴]. دانشمندان در آزمایشگاه ملی شمال غربی اقیانوس آرام (PNNL) اسکنرهای موج میلی‌متری پیشرفته‌ای را برای ایست‌های بازرسی امنیتی مانند فرودگاه‌ها توسعه داده‌اند. این سیستم‌ها از تکنیکی به نام هولوگرافی میکروویو استفاده می‌کنند که داده‌های فاز و دامنه دقیق را در سراسر سطح ثبت می‌کند تا تصاویر واضحی از سلاح‌های پنهان و اقلام ممنوعه تولید کند [۲۵]. در تحقیقی که در [۲۶] شرح داده شده است، سیگنال‌های توالی دودویی با حداکثر طول (M-sequence) با پهنای باند فوق وسیع (UWB) برای دیدن از میان یک دیوار آجری و تصویربرداری از اشیاء استفاده شدند. محققان با موفقیت تصاویر سه نوع مختلف از اشیاء پنهان شده در پشت دیوار را اسکن و ایجاد کردند. روش آنها شامل یک رویکرد ساده برای در نظر گرفتن این واقعیت بود که امواج رادیویی با سرعت‌های مختلف در داخل دیوار حرکت می‌کنند. با اندازه‌گیری ضخامت دیوار و گذردهی آن، آن‌ها توانستند اشیاء را در مکان‌های واقعی خود به‌طور دقیق مشخص و تصویربرداری کنند [۲۹].

رادار فرایپهن باند با استفاده از پالس‌های بسیار باریک یا کوتاه که منجر به پهنای باند انتقال بسیار بزرگ می‌شود، عمل می‌کند. فناوری UWB برای بسیاری از برنامه‌های جدید به‌کار گرفته شده است که به نفع دولت، ایمنی عمومی، مشاغل و مصرف‌کنندگان خواهد بود. رأی اخیر کمیسیون ارتباطات فدرال ۲ برای UWB، علاقه به تحقیق در مورد این فناوری را برای سیستم‌های تصویربرداری افزایش داده است؛ به‌عنوان مثال، تصویربرداری از طریق دیوار ۳، رادارهای قابل نفوذ به زمین ۴، سیستم‌های نظارت و دستگاه‌های تصویربرداری پزشکی، سیستم‌های راداری وسایل نقلیه، سیستم‌های ارتباطات و اندازه‌گیری. مزایای اصلی UWB برای ردیابی و تصویربرداری رادار برد کوتاه، شامل وضوح بسیار مناسب، بازده قدرت بالا، تداخل کم و توانایی تشخیص اهداف متحرک یا ثابت در محیط پیچیده است.

با دانستن گذردهی نسبی مواد ساختمانی می‌توان ضرایب بازتاب و ضرایب انتقال را محاسبه کرد. سیگنال‌های فرایپهن باند نه تنها در مورد سیگنال‌های باند باریک هنگام انتشار از طریق دیوارها ضعیف می‌شوند، بلکه به دلیل خاصیت پراکندگی دیوارها دچار اعوجاج می‌شوند؛ بنابراین، اندازه‌گیری باندباریک اگرچه در ارائه برخی از درک عمومی مفید است، اما برای تجزیه و تحلیل انتشار فرایپهن باند، شبیه‌سازی و مدل‌سازی کانال کافی نیست.

هدف از پروژه، بررسی انتشار از طریق دیوارها است که از مصالح ساختمانی معمولی ساخته شده است و از این طریق خصوصیات فرایپهن باند این مواد را به دست آورد. در این مقاله ضرایب بازتاب و انتقال را برای آجر، مواد چوبی، دیواربتنی و ... محاسبه شده است. اطلاعات در مورد خواص الکترومغناطیسی مصالح ساختمانی در محدوده فرکانس فرایپهن باند (۱۰/۶ - ۳/۱) گیگاهرتز در نظر گرفته شده است.

در این مقاله رادارهای موج پیوسته فرایپهن باند در سوئیپ فرکانسی ۰/۵ تا ۸ گیگاهرتز ارائه شده است که این رادارها اجسام متحرک و ثابت پشت دیوارها را جست‌وجو می‌کند. هم‌زمان با انتشار امواج الکترومغناطیسی از یک محیط همگن به محیطی دیگر، در آن‌ها یک تغییر امپدانس موج در مرز محیط ایجاد می‌شود. رادارهای *Through-The-Wall (TTW)* در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از روش‌های نوین تصویربرداری صنعتی و غیرمخرب مطرح شده‌اند. عملکرد این رادارها مبتنی بر انتشار و دریافت امواج الکترومغناطیسی از میان موانع فیزیکی مانند دیوارهای آجری و بتنی است.

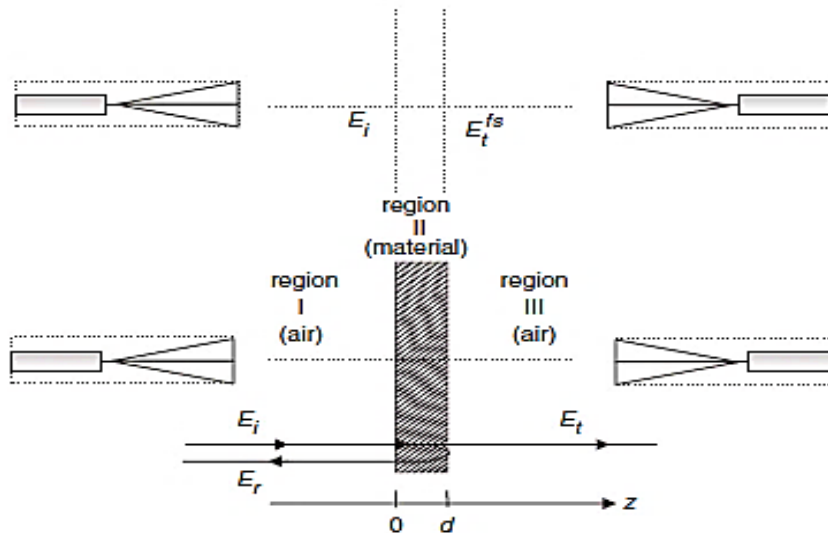


شکل ۱ بلوک دیاگرام رادار موج پیوسته پهن باند

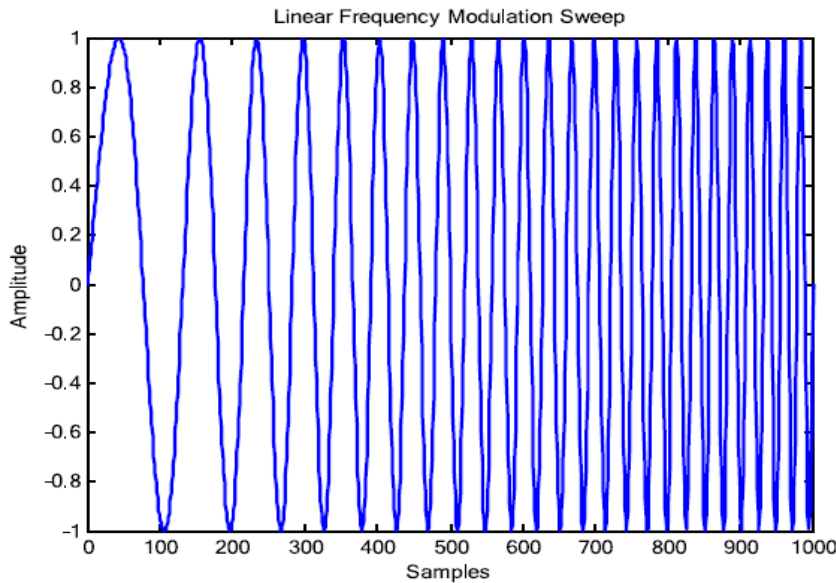
۲- ساختار و شبیه‌سازی رادار فراپهن باند

۲-۱- روش‌های اندازه‌گیری

قسمت‌های حقیقی و موهومی ثابت‌دی‌الکتریک یک ماده از طریق اندازه‌گیری یک تابع انتقال درج ارزیابی می‌شود که به‌عنوان نسبت دو سیگنال حوزه فرکانس که در وجود و عدم وجود ماده تحت آزمایش اندازه‌گیری می‌شود؛ تعریف می‌شود. شکل ۱ نمودار شماتیک تنظیم اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌ها در حوزه زمان با استفاده از پالس‌های کوتاه‌مدت یا در حوزه فرکانس با استفاده از سیگنال‌های سینوسی انجام شود. آنتن‌های فرستنده و گیرنده در مکان‌های ثابت نگهداری می‌شوند و برای دریافت حداکثر تنظیم می‌شوند. ماده مورد سنجش تقریباً در نقطه میانی بین دو آنتن قرار می‌گیرد. فاصله بین آنتن‌ها باید به‌اندازه کافی بزرگ باشد تا مواد در ناحیه دور هر آنتن قرار بگیرند.



شکل ۲ طرح آزمایشی برای "فضای آزاد" (در عدم وجود لایه ماده) و "از طریق" (لایه ماده در محل اندازه‌گیری)



شکل ۳ سیگنال حوزه زمان رادار موج پیوسته

شکل ۳ نمودار دامنه در حوزه زمان سیگنال ارسالی را در طول یک پیمایش FMCW معمولی نشان می‌دهد. فرض بر این است که فرکانس سیگنال ارسالی تغییر می‌کند درحالی‌که دامنه آن ثابت می‌ماند.

پس از آماده‌سازی سیستم اندازه‌گیری، ابتدا سیگنال حوزه زمان مرجع $V_t^{fs}(t)$ با اسیلوسکوپ نمونه‌گیری اندازه‌گیری می‌شود یا سیگنال حوزه فرکانس مرجع $V_t^{fs}(j\omega)$ در عدم وجود مواد با یک آنالایزر شبکه اندازه‌گیری می‌شود. سپس، سیگنال حوزه زمان $V_t(t)$ یا سیگنال حوزه فرکانس $V_t(j\omega)$ با ورقه ماده در محل اندازه‌گیری می‌شود. تابع انتقال مورد نظر محاسبه می‌شود:

$$H(j\omega) = \frac{FFT(V_t(t))}{FFT(V_t^{fs}(t))} = \frac{V_t(j\omega)}{V_t^{fs}(j\omega)} \quad (1)$$

که در آن $\omega = 2\pi f$ فرکانس زاویه‌ای است و از تبدیل فوریه (FFT) برای تبدیل سیگنال‌های حوزه زمان نمونه‌برداری شده به داده‌های حوزه فرکانس استفاده می‌شود. انجام اندازه‌گیری‌های فضای داخلی و فضای آزاد در شرایط مشابه دشوار است. برای غلبه بر این چالش، دیوارها برای به‌دست آوردن مرجع فضای آزاد و اندازه‌گیری‌های دیواری بر روی یک سکوی متحرک ساخته شده و یا سوار شده بودند [۱].

۲-۲- تکنیک چندپالس

اندازه‌گیری‌های فضای آزاد از طریق دیوار، اگر در داخل یک محفظه بدون آکو که در آن تمام اجزای چندضلعی و بازتاب‌های کف و سقف جذب می‌شوند، انجام شود، دقیق‌تر خواهند بود. در حالت ایده‌آل، نمونه‌ای که باید اندازه‌گیری شود، باید بی‌نهایت عریض باشد تا از پراکندگی لبه‌ها جلوگیری شود. نمونه‌های مورد آزمایش باید از فاصله بسیار زیادی با آنتن قرار داشته باشند، به‌طورمعمول چندین متر برای محدوده فرکانس موردعلاقه و ابعاد آنتن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه جذب‌کننده‌ها و محفظه اجازه حرکت آسان نمونه‌های بزرگ را نمی‌دهند، حفظ این الزامات کار راحتی نیست. خوشبختانه می‌توان از گیت‌های زمانی برای کاهش چشمگیر اثرات ناخواسته مانند بازتاب از دیوارهای اطراف و پراکندگی از لبه‌ها استفاده کرد. برای اجرای مؤثر گیت‌های زمانی، باید سه شرط رعایت شود. ابتدا، آنتن گیرنده و آنتن فرستنده باید از سطح بازتابنده قرار بگیرند. ثانیاً، نمونه‌ها باید دارای ابعاد سطح نسبتاً زیادی باشند تا اثرات لبه به حداقل برسد. سرانجام باید در تطبیق، فاصله بین آنتن و نمونه انعطاف‌پذیری وجود داشته باشد. از تایم گیتینگ نیز می‌توان برای جداسازی قسمت مورد نظر سیگنال دریافت شده استفاده کرد؛ یعنی پاس اول سیگنال پالس که از طریق اسلب منتقل می‌شود. در این کاربرد ضخامت نمونه باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا تأخیر کافی را به همراه داشته باشد. بنابراین، نه تنها بزرگنمایی و استخراج پالس پاس اول همچنین حتی از بین بردن تمام

پالس‌های تأخیر به دلیل بازتاب‌های متعدد در داخل صفحه، امکان‌پذیر می‌شود. در بخش‌های بعدی تکنیک‌های آنالیز مبتنی بر تکنیک‌های تک پالس، تکنیک‌های چندپالس و حل تقریب برای مواد کم اتلاف ارائه شده است.

به منظور تعیین ثابت‌دی‌الکتریک مختلط از تابع انتقال اندازه‌گیری شده، یک عبارت ریاضی برای $H(j\omega)$ لازم است. برای محاسبه $H(j\omega)$ ، فرض بر این است که یک موج صفحه‌ای یکنواخت قطبی با پلاریزه X که نمایانگر میدان دور ناحیه فاریلد محلی آنتن فرستنده است که به طور معمول روی صفحه‌ای از مواد با ضخامت d اتفاق می‌افتد. این ماده دارای یک ثابت‌دی‌الکتریک مختلط نامعلوم $\epsilon = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ است.

موج صفحه‌ای قاطع، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، موج منعکس شده‌ای در ناحیه I (هوا)، مجموعه‌ای از امواج حرکت‌کننده به جلو و عقب، در منطقه II (ماده) و یک موج منتقل شده در منطقه III (هوا) ایجاد می‌کند. با اعمال شرایط مرزی برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در رابط‌های صفحه-هوا، ضریب انتقال را می‌توان به روش ساده محاسبه کرد. نتیجه به قرار زیر می‌باشد:

$$T = \frac{E_t e^{-j\beta_0 d}}{E_i} = \frac{4}{e^{\gamma d} \left(2 + \frac{\eta_1 + \eta_2}{\eta_2 \eta_1} \right) + e^{-\gamma d} \left(2 - \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_2 \eta_1} \right)} \quad (2)$$

که داریم:

$$\beta_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad (3)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 (\epsilon_r' - j\epsilon_r'')} \quad (4)$$

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_0 (\epsilon_r' - j\epsilon_r'')}} \quad (5)$$

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \quad (6)$$

تابع انتقال مربوط می‌شود به ضریب انتقال توسط $H(j\omega) = T e^{j\beta d}$ است. همچنین لازم به ذکر است که ضریب انتقال T معادل پارامتر پراکندگی S_{21} است. در عبارت پارامتر پراکندگی S_{21} ، پارامتری که به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\left(x + \frac{1}{x} \right) \sinh(xp) + 2 \cosh(xp) - \frac{2}{S_{21}} = 0 \quad (7)$$

که داریم:

$$S_{21}(j\omega) = H(j\omega) e^{j\omega \tau_0} (8 - 1)x = \sqrt{\epsilon_r'} \quad (8)$$

$$P = j\beta_0 d \quad \tau_0 = \frac{c}{d} \quad (9)$$

این معادله را می‌توان به صورت عددی برای ثابت‌دی‌الکتریک مختلط با استفاده از الگوریتم‌های جستجوی دوبعدی حل کرد. برای مواد کم‌اتلاف، ثابت‌دی‌الکتریک مختلط با استفاده از آن قابل ارزیابی است.

ثابت‌دی‌الکتریک برخی از مواد مورد استفاده در مقاله طبق معادله (۷) محاسبه شده و در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول ۱ مواد عایق دیوار و ضریب دی‌الکتریک	
ثابت‌دی‌الکتریک	مواد ساختمانی
۶/۰-۲/۷j	بتن
۰-۵/۴۵j	آجر

۳- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل پارامتری

۳-۱- محاسبه ضرایب بازتاب و انتقال

برای یک ساختار دیوار چندلایه طبقه‌بندی شده، از پلتفرم^۱ توسعه‌یافته برای شبیه‌سازی پراکندگی^۲، تضعیف^۳ و تأخیر دیوار استفاده شده است. یک موج مسطح به صورت پلاریزاسیون قطبی عمودی با زاویه برخورد θ_0 در شبیه‌سازی برای شبیه‌بودن به مجموعه آزمایش استفاده می‌شود. با فرض $\epsilon_i, \sigma_i, \mu_i$ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی^۴، رسانایی و نفوذپذیری لایه i و θ_i زاویه انتشار موج در لایه i ، از روش تکراری بر اساس روابط زیر برای محاسبه ضریب بازتاب (T_{\perp}) و ضریب انتقال (Γ_{\perp}) استفاده می‌شود. ضریب Γ_{\perp} و ضریب T_{\perp} برای مورد قطبی‌شدگی عمود از طریق رابط‌های لایه‌های i می‌باشد.

$$A_i = \frac{e^{\psi_i}}{2} [A_{i+1}(1 + Y_{i+1}) + B_{i+1}(1 - Y_{i+1})] \quad (10)$$

$$B_i = \frac{e^{-\psi_i}}{2} [A_{i+1}(1 - Y_{i+1}) + B_{i+1}(1 + Y_{i+1})] \quad (11)$$

$$A_{N+1} = 1 \quad B_{N+1} = 0 \quad (12)$$

$$\Gamma_{\perp} = \frac{B_0}{A_0} \quad T_{\perp} = \frac{1}{A_0} \quad (13)$$

که

$$Y_{i+1} = \frac{\cos\theta_{i+1}}{\cos\theta_i} \sqrt{\frac{\epsilon_{i+1} - j\frac{\sigma_{i+1}}{w}}{\epsilon_i - j\frac{\sigma_i}{w}}} \quad (14)$$

$$\psi_i = d_i Y_i \cos\theta_i \quad (15)$$

$$Y_i = \pm \sqrt{j\omega\mu_i(\sigma_i + j\omega\epsilon_i)} \quad (16)$$

برای یک ساختار دیوار تک‌لایه این مدل را می‌توان مطابق با فرمول‌های زیر ساده کرد. با فرض ϵ^* و d ضریب نفوذپذیری مختلط و ضخامت دیوار، θ_0 زاویه برخورد است. درحالی‌که θ_1 زاویه شکست در دیوار است، طبق قانون اسنل $k_0 \sin\theta_0 = k_1 \sin\theta_1$ داریم. سپس ضریب بازتاب Γ_{\perp} و ضریب انتقال T_{\perp} طبق معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\Gamma_{0w}(1 - e^{-j2k_1 \cos\theta_1 d})}{1 - \Gamma_{0w}^2 e^{-j2k_1 \cos\theta_1 d}} \quad (17)$$

$$T_{\perp} = \frac{(1 - \Gamma_{0w}^2) e^{-jk_1 \cos\theta_1 d}}{1 - \Gamma_{0w}^2 e^{-j2k_1 \cos\theta_1 d}} \quad (18)$$

که

$$K_1 = \omega \sqrt{\mu \epsilon^*} \quad (19)$$

¹ Platform

² Dispersion

³ Attenuation

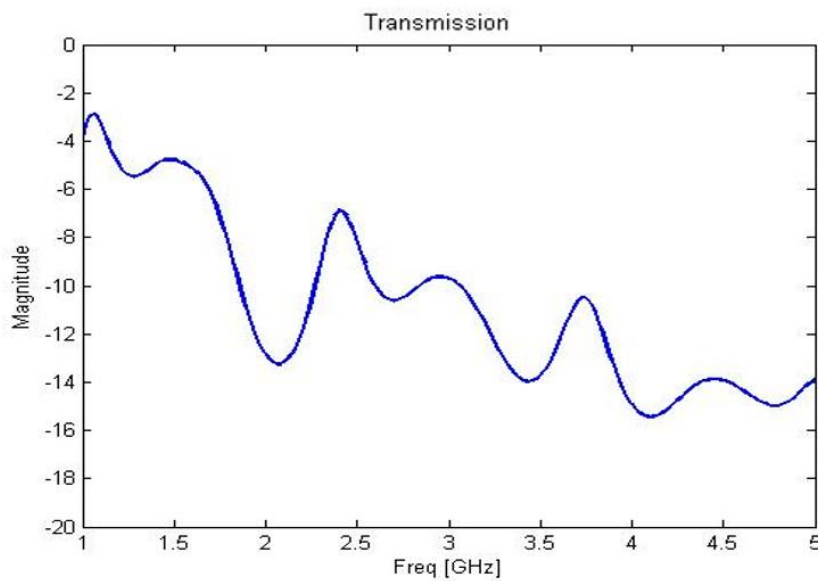
⁴ Permittivity

$$\Gamma_{0w} = \frac{\sqrt{\epsilon_0} \cos \theta_0 - \sqrt{\epsilon^*} \theta_1}{\sqrt{\epsilon_0} \cos \theta_0 + \sqrt{\epsilon^*} \theta_1} \quad (20)$$

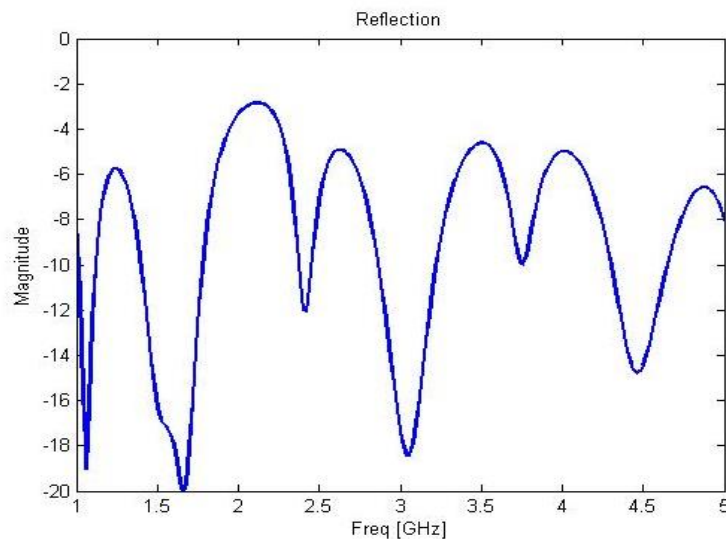
ضریب انتقال T_1 داده شده یک عدد مختلط وابسته به فرکانس است. اندازه آن میزان تضعیف در طول دیوار را نشان می‌دهد؛ در حالی که فاز آن تأخیر زمانی از طریق دیوار را نشان می‌دهد.

در حال حاضر ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مختلط مصالح ساختمانی مختلف اندازه‌گیری شده‌است و به مدل شبیه‌سازی آورده می‌شود تا پراکندگی (انتشار) دیوار را محاسبه کند. خواص دی‌الکتریک تابع فرکانس هستند و منجر به اعوجاج سیگنال می‌شوند.

با استفاده از روابط (۱) تا (۱۱) ضرایب بازتاب و انتقال برای یک دیوار بتنی بیست سانتی‌متری با یک شکاف هوایی ۱۲ سانتی‌متری که گذردهی نسبی آن $z/0.2 - 6/0$ می‌باشد شبیه‌سازی کرده‌ایم که نتیجه شبیه‌سازی آن در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است.

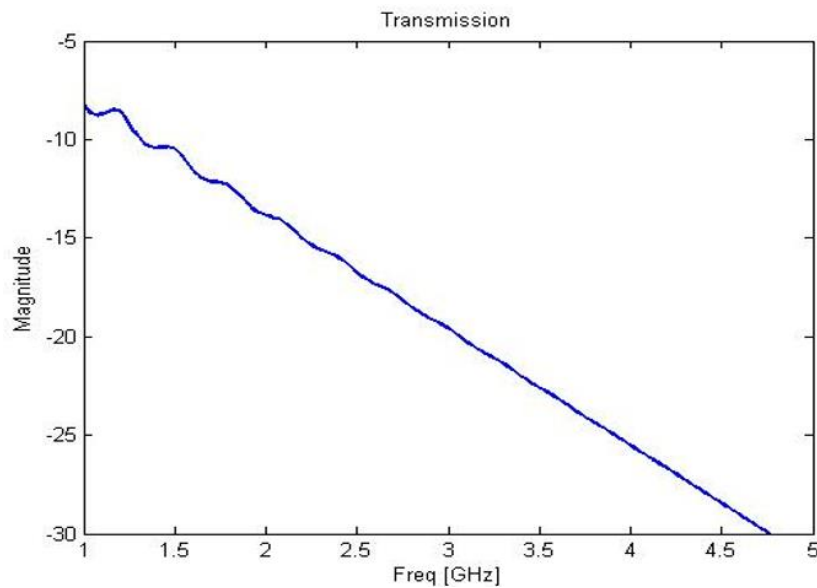


شکل ۴ نمودار ضریب انتقال دیوار بتنی با شکاف هوایی

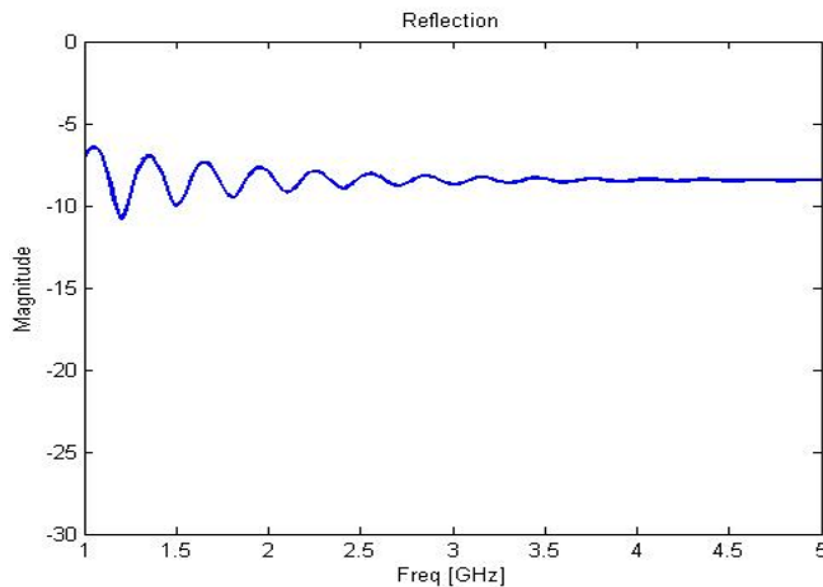


شکل ۵ نمودار ضریب بازتاب دیوار بتنی با شکاف هوایی

هم‌چنین نمودار ضریب بازتاب و انتقال یک دیواربتنی توپر در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده می‌شود. دامنه ضریب انتقال تا -30 دسی‌بل و دامنه ضریب بازتاب تا -10 دسی‌بل کاهش پیدا کرده است.

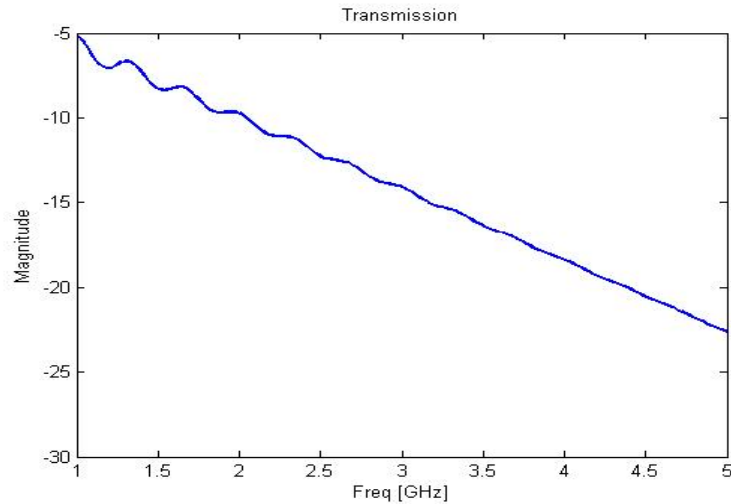


شکل ۶ نمودار ضریب انتقال دیوار بتنی بیست سانتی‌متری

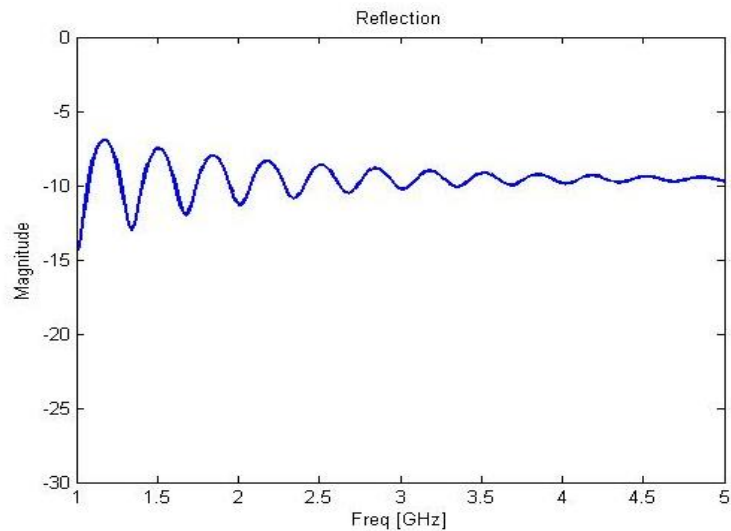


شکل ۷ نمودار ضریب بازتاب دیوار بتنی بیست سانتی‌متری

نمودار ضرایب بازتاب و انتقال برای دیوار آجری بیست سانتی‌متری نیز در شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده می‌شود. دامنه ضریب انتقال تا -23 دسی‌بل و دامنه ضریب بازتاب تا -14 دسی‌بل کاهش پیدا کرده است.



شکل ۸ نمودار ضریب انتقال دیوار آجری بیست سانتی متری



شکل ۹ نمودار ضریب بازتاب دیوار آجری بیست سانتی متری

۴- نتیجه گیری

دیوار بتنی توخالی، تلفات انتقال بالایی حدود ۸ دسی بل را نشان می دهد. در این جا واضح است که فرکانس ۱ گیگاهرتز به فرکانس ۵ گیگاهرتز ترجیح داده شده است و دارای گین انتقال ۱۰ دسی بل می باشد. یکی از نتایج و پیامدهای نوسانات دامنه و فاز، با کلاتر سایید لوبها همراه است. سطح کلاترها در زمان کاهش پیدا می کند و برای فاصله های بیش از ۱ متر ناچیز است. این کلاترها مانع کشف اهداف انسانی می شوند؛ زیرا ممکن است هدف موردعلاقه را پنهان کنند، گرچه اندازه گیری های دیفرانسیلی می توانند وضعیت را بهبود بخشد. ورقه های بتنی رفتار الکترومغناطیسی متفاوتی دارند. ضریب انتقال از -۷ دسی بل به -۲۵ دسی بل کاهش می یابد. این نتیجه نشان می دهد که فرکانس پایین تر، ضخامت دیوار کم تر و باند L تا ۲ گیگاهرتز انتخاب مناسبی با توجه به معیار نفوذ است.

۵- منابع

- [1] Acar YE, Saritas I, Yaldiz E. An S-band zero-IF SFCW through-the-wall radar for range, respiration rate, and DOA estimation. *Measurement*. 2021; 186:110221. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110221>
- [2] Aftanas M, Zaikov E, Drutarovsky M, Sachs J. Through wall imaging of the objects scanned by M-sequence UWB radar system. In: 2008 18th International Conference Radioelektronika. Prague: IEEE; 2008. p. 1-4.
- [3] Ahmad F, Bin Abbas W, Khalid S, et al. Performance enhancement of mmWave MIMO systems using machine learning. *IEEE Access*. 2022;10:73068-73078.
- [4] Ali F, Vossiek M. Detection of weak moving targets based on 2-D range-Doppler FMCW radar Fourier processing. In: German Microwave Conference Digest of Papers. 2010. p. 214-217.
- [5] Alotaibi M. PAPR reduction scheme using OFDM multicarrier signals smart constellation in wireless sensor networks. *Umm Al-Qura Univ J Eng Archit*. 2019;9:31-43.
- [6] Alotaibi M. Multi-criteria decision making to detect multiple moving targets in radar using digital codes. *Sensors*. 2022;22:3176.
- [7] Alotaibi M, Murad M, Alhuthali SAH, et al. MIMO radio frequency identification: a brief survey. *Sensors*. 2022;22:4115.
- [8] Asensio-López A, Blanco-del-Campo A, Gismero-Menoyo J, et al. High range-resolution radar scheme for imaging with tunable distance limits. *Electron Lett*. 2004;40:1085-1086.
- [9] Cheraghinia M, Shahid A, Luchie S, Gordebeke GJ, Caytan O, Fontaine J. A comprehensive overview on UWB radar: Applications, standards, signal processing techniques, datasets, radio chips, trends and future research directions. *IEEE Commun Surv Tutor*. 2025;27:2283-2324.
- [10] Cooper KB, Dengler RJ, Chattopadhyay G, et al. A high-resolution imaging radar at 580 GHz. *IEEE Microwireless Compon Lett*. 2008;18:64-66.
- [11] Duarte CC, Dorta Naranjo BP, Lopez AA, Del Campo AB. CWLFM radar for ship detection and identification. *IEEE Aerosp Electron Syst Mag*. 2007;22:22-26.
- [12] Eid AM, Nahhas AM. System simulation of RF front-end transceiver for frequency modulated continuous wave radar. *Int J Comput Appl*. 2013;75:16-23.
- [13] Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the [2] dielectric spectrum of tissues. *Phys Med Biol*. 1996;41:2271-2293.
- [14] Ghavami M, Michael L, Kohno R. *Ultra wideband signals and systems in communication engineering*. John Wiley & Sons; 2007.
- [15] Hu Z, Zeng Z, Wang K, et al. Design and analysis of a UWB MIMO radar system with miniaturized Vivaldi antenna for through-wall imaging. *Remote Sens*. 2019;11:1867.
- [16] Huang Y, Brennan PV, Patrick D, et al. FMCW based MIMO imaging radar for maritime navigation. *PIER*. 2011;115:327-342.
- [17] Hussein K, Zekry A, Abouelatta M, et al. Low-cost L-band FMCW radar for motion detection behind multiple walls. In: *International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering*. Springer; 2022. p. 694-702.
- [18] Jahagirdar DR. A high dynamic range miniature DDS-based FMCW radar. In: 2012 IEEE Radar Conference. IEEE; 2012. p. 0870-0873.
- [19] Le M, Le D-K, Lee J. Multivariate singular spectral analysis for heartbeat extraction in remote sensing of UWB impulse radar. *Sens Actuators, A*. 2020;306:111968.
- [20] Leuschen C, Kanagaratnam P, Yoshikawa K, et al. Field experiments of a surface-penetrating radar for Mars. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE; 2002. p. 3579-3581.
- [21] Maaref N, Millot P. Array-based UWB FMCW through-the-wall radar. In: *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*. IEEE; 2012. p. 1-2.
- [22] Maaref N, Millot P, Pichot C, Picon O. A study of UWB FM-CW radar for the detection of human beings in motion inside a building. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*. 2009;47:1297-1300.

- [23] Moll J, Simon J, Malzer M, et al. Radar imaging system for in-service wind turbine blades inspections: Initial results from a field installation at a 2 MW wind turbine. *Prog Electromagn Res*. 2018;162:51-60.
- [24] Muqaibel A, Safaai-Jazi A, Bayram A, et al. Ultrawideband through-the-wall propagation. *IEE Proc-Microwaves, Antennas Propag*. 2005;152:581-588.
- [25] Nekrasov A, Hoogeboom P. A Ka-band backscatter model function and an algorithm for measurement of the wind vector over the sea surface. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*. 2005;2:23-27.
- [26] Park S-G, Kim Y-H. Designing of a low resolution FMCW radar for small target detection under ground clutter. In: 2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). 2011. p. 1-4.
- [27] Schellenberg J, Chedester R, McCoy J. Multi-channel receiver for an E-band FMCW imaging radar. In: 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. IEEE; 2007. p. 1359-1362.
- [28] Sheen DM, McMakin DL, Hall TE. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection. *IEEE Trans Microw Theory Tech*. 2001;49:1581-1592.
- [29] Steinhauer M, Ruoss H-O, Irion H, Menzel W. Millimeter-wave-radar sensor based on a transceiver array for automotive applications. *IEEE Trans Antennas Propag*. 2008.
- [30] Yousaf J, Yakoub S, Karkanawi S, Hassan T, Almajali E, Zia H. Through-the-wall human activity recognition using radar technologies: A review. *IEEE Open J Antennas Propag*. 2024;5:1815-1837.