

Fractal Slotted Leaky-Wave Antenna Based on SIW and Balanced CRLH Transmission Line with Enhanced Backward Bandwidth Scanning and Gain in X-Band

Hossein Mashhadi¹  | Loghman Asadpor²  | Yashar Zehforoosh³  | Tohid Sedghi⁴ 

¹Department of Electrical Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
h.mashhadi@iau.ac.ir

²Department of Electrical Engineering, Microwave & Antenna Research Center, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
loghman.asadpour@iau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Microwave & Antenna Research Center, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
yashar.zehforoosh@iau.ac.ir

⁴Department of Electrical Engineering, Microwave & Antenna Research Center, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
tohid.sedghi@iau.ac.ir

Correspondence

Loghman Asadpor, Assistant Professor of Department of Electrical Engineering, Microwave & Antenna Research Center, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
loghman.asadpour@iau.ac.ir

Main Subjects:

Antenna Design

Paper History:

Received: 13 August 2024

Revised: 25 August 2024

Accepted: 3 September 2024

Abstract

This paper presents the design and analysis of a slotted leaky-wave antenna (LWA) based on a first-order Vicsek fractal geometry integrated with a balanced composite right/left-handed transmission line (CRLH-TL). The proposed antenna, realized on a substrate-integrated waveguide (SIW) platform, aims to enhance frequency bandwidth and maintain a stable high gain across the X-band. The upper layer of the SIW is etched with a Vicsek-shaped fractal slot, while two radiating patches are embedded beneath these slots. The balanced CRLH unit cell enables continuous beam scanning from backward to forward directions without any cutoff at broadside. Experimental results confirm that the antenna achieves a scanning range from -79° to $+81^\circ$ with a nearly constant gain exceeding 14 dB over the 7.3–13 GHz band. Compared with the previous non-fractal SIW slot antenna, the proposed design demonstrates a 16.3 % improvement in effective bandwidth and increases the peak gain from 12.83 dB to 14.2 dB. The good agreement between simulation and measurement validates the effectiveness of integrating Vicsek fractal geometry for improving radiation performance, gain uniformity, and scanning bandwidth in SIW-based leaky-wave antenna applications.

Keywords: Leaky-wave antenna, Beam scanning, Antenna gain, Composite Right/Left-Handed Transmission Line (CRLH), Slotted waveguide, Substrate-Integrated Waveguide (SIW).

Highlights

- Using fractal structure to enhance bandwidth and achieve broader frequency coverage.
- Antenna design based on balanced CRLH-TL for cutoff-free broadside scanning.
- Maintaining a constant gain across entire frequency band and improving of backward scanning bandwidth.

Citation: H. Mashhadi, L. Asadpor, Y. Zehforoosh, and T. Sedghi, "Fractal Slotted Leaky-Wave Antenna Based on SIW and Balanced CRLH Transmission Line with Enhanced Backward Bandwidth Scanning and Gain in X-Band," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 58, pp. 126–145, 2026, doi:10.71656/jce.2026.1129061 [in Persian].

COPYRIGHTS

©2026 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



1. Introduction

Leaky Wave Antennas (LWAs) are traveling-wave radiators capable of scanning the main beam direction with frequency variation [1, 2]. Compared with conventional array antennas, they provide high gain, broad bandwidth, and simple feeding networks, making them suitable for beam-steering and frequency-scanning systems. The integration of Composite Right/Left-Handed Transmission Lines (CRLH-TLs) has introduced metamaterial-based LWAs enabling continuous backward-to-forward beam scanning [3]. To realize such functionalities, Substrate-Integrated Waveguide (SIW) technology offers a low-loss and planar platform that inherits the advantages of traditional waveguides—such as high-quality factor and excellent isolation—while remaining compact and compatible with integrated planar circuits [4].

In this study, a new Vicsek fractal slot-based balanced CRLH-SIW LWA is proposed to address these limitations. The first-order Vicsek geometry enhances current distribution, extends the effective scanning bandwidth by approximately 16 %, and raises the maximum gain from 12.83 dB to 14.2 dB compared with the previous design [5].

2. Innovation and contributions

This work is based on the previously balanced CRLH-SIW leaky-wave antenna (LWA) reported in [6]. While the overall transmission-line configuration remains balanced, the slot geometry in the top metal layer has been replaced and optimized—from a conventional H-shaped slot to a first-order Vicsek fractal pattern—to achieve higher efficiency and wider scanning bandwidth. This geometric modification leads to several important improvements, summarized as follows:

Bandwidth Enhancement:

The adoption of the first-order Vicsek slot increases the effective surface current path and coupling capacitance between unit cells. As a result, the proposed antenna achieves an approximately 16 % broader scanning bandwidth with continuous backward-to-forward radiation and no stopband at broadside.

Improved and Stable Gain Performance:

Benefiting from the refined field confinement of the Vicsek geometry within the balanced CRLH-SIW framework, the maximum gain rises from 12.83 dB to 14.2 dB (≈ 10.6 % improvement). Additionally, the antenna maintains gain fluctuations below 3 dB across 7.3–13 GHz, indicating stable radiation efficiency throughout the operating band.

Smoother and Wider Beam Scanning:

The modified dispersion characteristics of the Vicsek-based unit cell enhance the phase-constant variation, allowing a more uniform scanning response from the backward to forward regions without broadside distortion or scanning discontinuity.

3. Materials and Methods

The proposed leaky wave antenna (LWA) is developed using Substrate Integrated Waveguide (SIW) technology and a balanced Composite Right/Left-Handed Transmission Line (CRLH TL) configuration. The final design is composed of 15 identical unit cells aligned along the longitudinal axis, forming a periodic balanced structure responsible for controlled phase progression and continuous radiation.

The slots are etched into the upper ground layer of the SIW, and the rectangular patches are placed beneath the slots. Metal vias are used to form the lateral walls of the SIWs. For the design of the unit cell with length P_{uc} , two substrates of 5880 RT Duroid with physical characteristics ($\epsilon_r = 2.2$ and $\tan\delta = 0.0009$) are used. The total height of the SIW structure is $h_1 + h_2 = 41$ mils, and the rectangular patches are placed within the SIW structures at a height of $h_1 = 31$ mils.

4. Results and Discussion

The results that were examined after the simulation are as follows, and we will explain each of them in detail Dispersion diagram for the Vicsek Fractal Slotted CRLH SIW unit cell.

The dispersion curve of the proposed Vicsek fractal slotted CRLH-SIW unit cell demonstrates a smooth transition from the left-handed to the right-handed region, confirming the balanced CRLH property. The intersection of the air line with the dispersion curve occurs at 8.48 GHz, marking the broadside radiation point without any stopband. The left-handed region extends from 7.3 to 8.48 GHz, while the right-handed region covers 8.48 to 13 GHz. Compared with the previous H-slot design [5], introducing the Vicsek fractal slot increases the effective series capacitance CL , lowers the transition frequency, and consequently improves radiation efficiency and gain stability. The dispersion diagram, extracted from simulated S-parameters, verifies continuous beam scanning through the entire X-band with high agreement to theoretical CRLH behavior.

Bloch impedance diagram for the Vicsek Fractal Slotted CRLH SIW unit cell.

The Bloch impedance diagram of the proposed Vicsek fractal slotted CRLH-SIW unit cell confirms proper impedance balance and matching for the full-length leaky-wave antenna. The real part of the Bloch impedance is averaged across the radiating region to determine the optimal width of the tapered line that transforms a

50- Ω microstrip line into the antenna input. At the balanced frequency (8.48 GHz), the imaginary part of the Bloch impedance reaches its minimum, indicating excellent matching and complete transition between LH and RH bands.

Beam scanning versus frequency for Vicsek Fractal Slotted CRLH SIW antenna.

The frequency scanning behavior of the proposed Vicsek fractal slotted CRLH SIW LWA demonstrates continuous and stable beam steering across the 7.3–13 GHz band. As frequency increases, the main beam smoothly scans from the backward (-79°) region to the forward ($+81^\circ$) region, passing through the broadside (0°) direction without any cut-off or radiation gap. This seamless scanning behavior confirms the balanced CRLH condition with proper left-handed to right-handed transition. Compared to the previous H-slotted design [5], the proposed Vicsek fractal slot significantly broadens the effective scanning range and maintains higher gain uniformity at extreme angles.

5. Conclusion

In this paper, a leaky wave antenna (LWA) employing first-order Vicsek fractal-shaped slots on the upper ground layer and implemented on a CRLH-based substrate integrated waveguide (SIW) platform has been proposed and experimentally validated. The design achieves a continuous backward-to-forward beam scanning over the frequency range of 7.3 GHz to 13 GHz, covering angles from -79° to 81° , without exhibiting any broadside cutoff at 0° . Throughout the scanning band, the antenna maintains a nearly constant gain above 12 dB, with a maximum measured gain of 14.2 dB and a gain variation below 3 dB across the X band. These results confirm that the proposed Vicsek fractal slotted CRLH SIW LWA offers stable and high directive radiation, representing a practical solution for wide-angle beam scanning applications in modern X-band communication systems.

6. Acknowledgement

The authors extend their gratitude to the Microwave Laboratory of Urmia Islamic Azad University (in particular) and the Antenna Laboratory of K. N. Toosi University of Technology for providing the experimental facilities that significantly contributed to the progress of this study.

References

- [1] M. M. Sabahi, A. A. Heidari, and M. Movahhedi, "A Circularly Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Balanced Right-Handed/Left-Handed Transmission Lines," *23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*, Tehran, 2015 [in Persian].
- [2] Y. J. Guo and R. W. Ziolkowski, *Advanced Antenna Array Engineering for 6G and Beyond Wireless Communications*. John Wiley & Sons, inc., Hoboken, New Jersey, 2022, doi: [10.1002/9781119712947](https://doi.org/10.1002/9781119712947).
- [3] M. M. Sabahi, A. A. Heidari, and M. Movahhedi, "A Compact CRLH Circularly Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Substrate-Integrated Waveguide," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 9, pp. 4407-4414, Sept. 2018, doi: [10.1109/TAP.2018.2851278](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2851278).
- [4] A. M. Malekshah, A. R. Attari, and M. S. Majedi, "Improved design of uniform SIW leaky wave antenna by considering the unwanted mode", in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 8, pp. 6378–6382, Feb. 2020, doi: [10.1109/TAP.2020.2975292](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2975292).
- [5] H. Mashhadi, L. Asadpor, Y. Zehforoosh, and T. Sedghi, "Slotted Substrate-Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna with Improved Backward Scanning Bandwidth and Constant Gain in X-band," *IETE Journal of Research*, vol. 70, no. 6, pp. 5510-5517, 2023, doi: [10.1080/03772063.2023.2265866](https://doi.org/10.1080/03772063.2023.2265866).

Declaration of Competing Interest: The authors do not have a conflict of interest. The content of the paper is approved by the authors.

Author Contributions: **Hossein Mashhadi:** Software, methodology, writing; **Loghman Asadpor:** Resources, methodology, original draft preparation; **Yashar Zehforoosh:** Resources, manuscript editing; **Tohid Sedghi:** Resources, manuscript editing.

Open Access: Journal of Southern Communication Engineering is an open-access journal. All papers are immediately available to read and reuse upon publication.

آنتن موج نشستی شکافدار فرکتالی بر پایه SIW و خط انتقال CRLH متعادل با قابلیت اسکن پهنای باند پشت‌تاب بهبود یافته و افزایش گین در باند X

حسین مشهدی^۱ | لقمان اسدیپور^۲ | یاشار زهفروش^۳ | توحید صدقی^۴

چکیده:

در این پژوهش، طراحی و تحلیل یک آنتن موج‌نشستی شکافدار مبتنی بر هندسه‌ی فرکتال جعبه‌ای مرتبه‌اول Vicsek بر پایه‌ی خط انتقال راستگرد-چپگرد متعادل (Balanced CRLH-TL) ارائه شده است. هدف از این ساختار، بهبود پهنای‌باند فرکانسی و دستیابی به بهره‌ی ثابت بالا در کل باند X است. آنتن پیشنهادی از آرایه‌ای از سلول‌های واحد موجبر مجتمع‌شده روی زیرلایه (SIW) تشکیل شده که لایه‌ی فوقانی آن با شکافی به فرم فرکتال Vicsek برش داده شده و دو پیچ تشعشی در زیر این شکاف‌ها تعبیه شده‌اند. سلول CRLH متعادل به کار رفته، امکان اسکن پیوسته‌ی فرکانسی از ناحیه‌ی پشت‌تاب تا جلوتاب را بدون وقوع باند قطع در پهلوتاب فراهم می‌سازد. در مقایسه با آنتن موج‌نشستی SIW مسطح معرفی شده در کار پیشین (مقاله اول نویسنده‌گان)، ساختار فعلی با بهره‌گیری از هندسه‌ی Vicsek توانسته است بهره را از ۸۳dB12 به ۱۶/۳dB2/14 افزایش دهد و پهنای باند مؤثر را نیز حدود ۱۶/۳ درصد گسترش دهد. الگوی تشعشی اندازه‌گیری شده در دامنه‌ی فرکانسی ۳/۷GHz تا ۱۳GHz دارای زاویه‌ی اسکن ۷۹- تا ۸۱ درجه و بهره‌ی ثابت بزرگ‌تر از ۱۴dB در کل باند X است. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری سازگاری خوبی نشان می‌دهند و استفاده از هندسه‌ی Vicsek به عنوان شکاف فرکتالی، روش مؤثری برای افزایش بهره و بهبود عملکرد تشعشی آنتن‌های موج‌نشستی SIW در کاربردهای میکروویوی محسوب می‌شود.

کلیدواژه‌ها: آنتن موج نشستی، اسکن پرتو، بهره آنتن، خط انتقال راستگرد-چپگرد (CRLH)، موجبر شکافدار، موجبر مجتمع شده بر روی زیرلایه (SIW).

^۱ گروه برق، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
h.mashhadi@iau.ac.ir

^۲ گروه برق، مرکز تحقیقات آنتن و میکروویو، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
loghman.asadpour@iau.ac.ir

^۳ گروه برق، مرکز تحقیقات آنتن و میکروویو، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
yashar.zehforoosh@iau.ac.ir

^۴ گروه برق، مرکز تحقیقات آنتن و میکروویو، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
tohid.sedghi@iau.ac.ir

نویسنده مسئول:

*لقمان اسدیپور، استادیار، گروه برق، مرکز تحقیقات آنتن و میکروویو، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
loghman.asadpour@iau.ac.ir

موضوع اصلی:

طراحی آنتن

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۳ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۴ شهریور ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳ شهریور ۱۴۰۳

تازه‌های تحقیق:

- استفاده از ساختار فرکتال برای افزایش پهنای باند و پوشش وسیع‌تری از فرکانس‌ها.
- طراحی آنتن بر پایه خط انتقال راستگرد-چپگرد متعادل جهت اسکن بدون باند قطع در پهلوتاب.
- حفظ گین ثابت در کل باند فرکانسی، و بهبود پهنای باند اسکن رو به عقب.

COPYRIGHTS

©2026 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



۱-مقدمه

آنتن ها انواع مختلفی دارند که از نظر نوع تشعشع نیز باهم متفاوت هستند [۱،۲] و آنتن های موج نشتی^۱ نوعی از آنتن های انتشار امواج هستند که معمولاً در یک باند فرکانسی گسترده تشعشع می کنند و قادرند بخشی از فضا را به صورت زاویه ای اسکن کنند. در این آنتن ها، با تغییر فرکانس، زاویه پرتو اصلی تشعشع نسبت به خط عمود بر صفحه آنتن تغییر می کند. آنتن موج نشتی نوعی از ساختار موج رونده است که هم زمان با انتشار موج در طول ساختار خود، تشعشع نیز انجام می دهد [۳،۴]. آنتن های موج نشتی (LWA) دارای روزه تشعشعی الکتریکی بزرگی به اندازه چندین طول موج هستند. از مزایای LWA نسبت به آنتن های آرایه ای معمولی، می توان به ساختار تغذیه ساده با افت کم و توانایی ارائه بهره بالا بدون نیاز به شبکه پیچیده تغذیه اشاره کرد. این آنتن ها معمولاً در کاربردهای اسکن فضا با فرکانس استفاده می شوند و به دلیل عدم نیاز به شبکه تغذیه پیچیده، گزینه ای مناسب و اقتصادی برای جایگزینی با آنتن های آرایه ای هستند. آنتن های موج نشتی معمولی از پهلوتاب^۲ تا جلوتاب^۳ را اسکن فرکانسی می کنند. همچنین، خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی^۴ (CRLHTLs) ساختارهای ماکروویوی مصنوعی هستند که ویژگی های خاص الکترومغناطیسی، از جمله انتشار معکوس موج، را از خود بروز می دهند. این ساختارها تحت عنوان گروهی از ساختارهای مهندسی شده با نام فراماده^۵ در علم الکترومغناطیس طبقه بندی می شوند و در دهه اخیر کاربردهای زیادی یافته اند. ترکیب این دو ایده، یعنی طراحی یک آنتن موج نشتی مبتنی بر خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی، ویژگی ممتاز جدیدی به آنتن های موج نشتی می افزاید و آن اسکن فرکانسی در الگوی پشت تاب^۶ است. این ساختارها به عنوان آنتن های موج نشتی فراماده نیز شناخته می شوند. [۵]. برای پیاده سازی چنین ایده ای، نیاز به یک ساختار مناسب برای طراحی آنتن وجود دارد. در سال های اخیر، موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه^۷ به عنوان گزینه ای مطلوب برای ساخت انواع آنتن های موج نشتی مطرح شده اند [۶]. آنتن های موج نشتی معمولاً یا بر روی موجبرهای فلزی یا با استفاده از خطوط ریزنواری طراحی می شوند. موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه در واقع حد واسطی بین خطوط ریزنواری و موجبرها هستند که علاوه بر حفظ ویژگی های موجبرهای مستطیلی معمولی، از جمله ضریب کیفیت بالا، توان حمل بالا و ایزولاسیون عالی، قابلیت ترکیب با سایر ساختارهای ریزنواری را نیز دارند. این فناوری مزایای اضافی مانند کم بودن تلفات، هزینه پایین و حجم کوچک را نیز ارائه می دهد. مهم ترین مزیت فناوری SIW این است که امکان تجمیع تمامی اجزاء سیستم، شامل ساختارهای غیرفعال، عناصر فعال و حتی آنتن ها، بر روی یک زیرلایه واحد را فراهم می آورد [۷،۸].

به طور کلی، اولین مد مرتبه بالا برای تشعشع در جهت جلوتاب، فقط در آنتن های موج نشتی معمولی و مسطح مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، ساختارهای متناوب مبتنی بر آنتن های موج نشتی می توانند در جهت پشت تاب نیز تشعشع کنند. در دهه گذشته، از پیکربندی های ترکیبی راستگرد-چپگرد (CRLH) در طراحی آنتن های موج نشتی فراماده برای دستیابی به اسکن پیوسته پرتو اصلی از پشت تاب تا جلوتاب با تغییرات فرکانس بهره برداری شده است [۵]. طراحی های مختلفی از آنتن های موج نشتی مبتنی بر فراماده ارائه شده است. در مرجع [۹]، آنتن موج نشتی با ساختار موجبر مجتمع شده در زیرلایه (SIW) بر اساس CRLH معرفی شده است که می تواند پرتو را از 65° تا 58° اسکن کرده و بهره ای برابر با 1 dBi ارائه دهد. در مرجع [۱۰]، آنتن موج نشتی با ساختار SIW دارای شکاف های اینتردیجیتال، با بهره ای حدود 8 dB و زوایای اسکن از 70° تا 60° به نمایش گذاشته شده است. در مرجع [۱۱]، از موجبر مستطیلی در آنتن موج نشتی CRLH استفاده شده است که در آن به بهره ای برابر با $8/64 \text{ dB}$ و اسکن پیوسته پرتو از 70° تا 70° دست یافته است. در مرجع [۱۲]، آنتن موج نشتی با ساختار SIW صفحه ای دارای شکاف با بهره ای ثابت در دامنه اسکن از 66° تا 78° پیشنهاد شده است.

همچنین در مقاله پیشین نویسندگان [۱۷]، تمرکز اصلی بر بهبود پهنای باند اسکن، حذف باند قطع در Broadside، و حفظ گین بالا در سراسر باند X بود. این دستاورد با استفاده از سلول های مبتنی بر CRLH متعادل و شکاف های H شکل در لایه

¹ Leaky Wave Antenna² Broadside³ Forward⁴ Composite Right/Left Handed Transmission lines⁵ Metamaterial (MTM)⁶ Backward⁷ Substrate Integrated Waveguide (SIW)

بالایی SIW حاصل شد. طراحی مزبور با حفظ یکپارچگی ساختار توانست محدودیت‌های متداول آنتن‌های موج‌نشتی کلاسیک، از جمله پهنای‌بند محدود در اسکن پشت‌تاب را تا حد زیادی برطرف کند. با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی همچنان باقی مانده بود؛ از جمله عدم کنترل کافی بر مسیر جریان سطحی برای بهبود خلوص الگو در تمام زوایای اسکن، محدودیت عملکرد پایدار در فرکانس‌های پایین‌تر، و نیاز به افزایش بیشتر پهنای‌بند اسکن با حفظ گین یکنواخت در محدوده‌ای وسیع‌تر. در کار حاضر، این محدودیت‌ها با معرفی هندسه فرکتالی Vicsek در طراحی شکاف‌های سطحی لایه بالایی SIW مورد هدف قرار گرفته‌اند. در نتیجه، آنتن پیشنهادی علاوه بر حفظ گین ثابت در باند X، افزایش تقریبی ۱۶٪ در پهنای‌بند اسکن و افزایش مقدار گین از ۱۲/۸۳dB در مقاله اول [۱۷] به ۱۴/۲dB را به نمایش می‌گذارد.

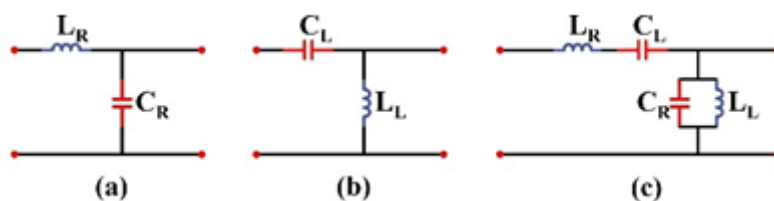
در این مقاله، یک آنتن موج‌نشتی (LWA) با شکاف‌هایی به شکل فرکتال جعبه‌ای مرتبه اول Vicsek و ساختار SIW-CRLH جهت بهبود زاویه اسکن در جهت پشت‌تاب با بهره ثابت در باند X ارائه شده است. در این ساختار، امکان اسکن فرکانسی پشت‌تاب تا جلوتاب بدون باند قطع در پهلوتاب فراهم آمده است. سلول واحد شکاف‌دار پیشنهادی شامل یک لایه بالایی با شکاف به شکل فرکتال جعبه‌ای مرتبه اول Vicsek و دو پچ مستطیل شکل بین لایه‌های بالایی و پایینی SIW است. آنتن موج‌نشتی (LWA) پیشنهادی شکاف‌دار برای افزایش اسکن بیم در جهت پشت‌تاب و جلوتاب با بهره ثابت بالا بهینه شده است.

۲- مبانی تئوری

در ابتدا به بررسی مبانی تئوری خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی و همچنین به اصول و ساختار آنتن‌های موج‌نشتی می‌پردازیم و سپس روش‌های طراحی این نوع آنتن‌ها را بیان می‌کنیم و در نهایت ساختار آنتن پیشنهادی و عملکرد آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲-۱- خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی

در شکل ۱ مدار معادل خط انتقال راستگرد^۱، خط انتقال چپگرد^۲ و خط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی نشان داده شده است. در مدارهای معادل، L_L ، C_L ، L_R ، C_R به ترتیب خازن و اندوکتانس در یک سلول RH-TL و LH-TL هستند.



شکل ۱: مدار معادل (a) RH-TL (b) LH-TL (c) CRLH-TL

Figure 1. Equivalent circuit of (a) RH-TL, (b) LH-TL, and (c) CRLH-TL

طول هر سلول از طول موج خط انتقال بسیار کوچک‌تر است. از روابط (۱-۳) به ترتیب ثابت فاز این خطوط به دست می‌آید [۴، ۱۳].

$$\beta_{RH-TL} = \omega \sqrt{L_R C_R} > 0 \quad (1)$$

$$\beta_{LH-TL} = -\frac{1}{\omega \sqrt{L_L C_L}} < 0 \quad (2)$$

$$\beta_{Balanced-CRLH-TL} = \omega \sqrt{L_R C_R} - \frac{1}{\omega \sqrt{L_L C_L}} \quad (3)$$

در این روابط ω فرکانس زاویه‌ای است. با توجه به روابط ۱ و ۲ ثابت فاز در خطوط انتقال راستگرد (RH-TL) مقداری مثبت و در خطوط انتقال چپگرد (LH-TL) مقداری منفی دارد. از روابط ۴ و ۵ به ترتیب سرعت فاز و سرعت گروه را می‌توان به دست آورد.

¹ Right Hand Transmission Line

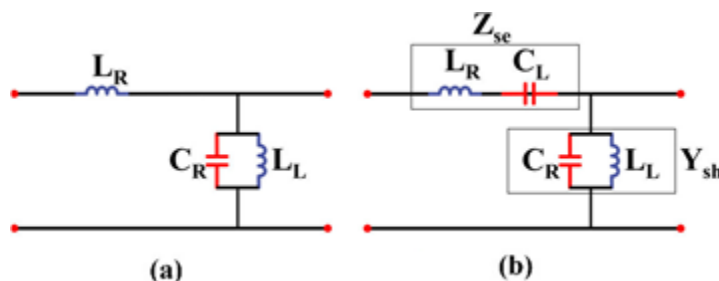
² Left Hand Transmission Line

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (4)$$

$$V_g = \frac{1}{d\beta/d\omega} \quad (5)$$

بر طبق روابط ۴ و ۵ و با توجه به روابط ۱ و ۳ سرعت فاز در RH-TL، مثبت و در LH-TL، منفی و سرعت گروه در هر سه خط انتقال، مثبت است و بنابراین توان در هر سه خط انتقال از سمت مولد به سمت بار (در آنتن موج نشستی فراماده از دهانه ورودی به دهانه خروجی) انتقال می‌یابد. ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ) و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (μ) معادل در خط راستگرد، مثبت و در خط چپگرد، منفی هستند. محیطی که هم‌زمان دارای ضریب گذردهی و نفوذپذیری منفی باشد، فراماده چپگرد نامیده می‌شود [۴، ۱۳].

CRLH-TL یک کاندید و گزینه مناسب برای پیاده‌سازی آنتن‌های موج نشستی (LWA) در دامنه فرکانسی ماکروویو و میلی‌متری است. آنتن موج نشستی یکی از کاربردهای ساختار CRLH-TL است که به‌طور مستقیم از این ساختار استفاده می‌کند. مدار CRLH از دو پارامتر اصلی تئوری مدار یعنی اندوکتانس و ظرفیت تشکیل شده است. (مقاومت در نظر گرفته نمی‌شود). امپدانس سری (Z_{se}) ترکیبی از اندوکتانس سری (L_R) و خازن (C_L) است، درحالی‌که ادمیتانس موازی، ترکیبی از اندوکتانس موازی (L_L) و خازن (C_R) است. ما در این مقاله تصمیم به استفاده از فناوری SIW برای طراحی آنتن موج نشستی خود گرفته‌ایم زیرا این فناوری امکان ادغام آسان با سایر اجزای ماکروویو را فراهم می‌آورد و برای ادغام با ساختارهای ریزنواری نیز بسیار مناسب است. با توجه به شکل ۱ و با مقایسه مدار معادل پایه SIW و مدار معادل پایه CRLH در شکل ۲، تنها چیزی که برای تکمیل مدار CRLH با استفاده از SIW نیاز است، خازن سری است که می‌توان آن را از شرایط متعادل CRLH استنباط کرد [۱۱، ۱۴، ۱۷]. مدار معادل پایه ساختار SIW-CRLH بر اساس طراحی گزارش‌شده در مقاله قبلی نویسندگان [۱۷] در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این کار، هندسه شکاف H- شکل مقاله اول با هندسه فرکتال Vicsek جایگزین شده تا ویژگی‌های امپدانس و ناحیه تشعشعی در باند X بهبود یابد.



شکل ۲: مدار معادل (a) SIW (b) CRLH
Figure 2. Equivalent circuit of (a) SIW, (b) CRLH

۲-۲- آنتن موج نشستی

آنتن‌های موج نشستی (LWA) ساختارهای دو پورت هستند که در آنها موج درحالی‌که از پورت ورودی به پورت خروجی حرکت می‌کند، نشسته و الگوی پرتو آنتن را تشکیل می‌دهد. این شکاف‌ها موج را از طریق مسیر جریان نشسته می‌دهند. ساختار CRLH-TL متعادل به‌عنوان کاندید و گزینه‌ای امیدوارکننده برای طراحی آنتن‌های موج نشستی با قابلیت اسکن پیوسته فرکانس از جهت پشت‌تاب به جلوتاب، با پوشش کامل جهت پهلوتاب و بدون باند توقف، شناخته شده است و به همین دلیل کاربرد جذابی در زمینه مهندسی آنتن‌ها دارد. آنتن پیشنهادی با استفاده از ساختار CRLH-TL متعادل طراحی شده است، جایی که رزونانس‌های LH و RH برابر هستند. ثابت فاز CRLH-TL متعادل می‌تواند با استفاده از رابطه ۳ به دست آید [۴، ۱۷]. آنتن موج نشستی CRLH پیشنهادی دارای قابلیت اسکن از جهت پشت‌تاب به جلوتاب (شامل جهت پهلوتاب) است، همان‌طور که در بخش‌های بعدی توضیح داده شده است. طراحی SIW آنتن موج نشستی پیشنهادی می‌تواند با استفاده از روش‌هایی که در روابط ۶ تا ۸ خلاصه شده‌اند، انجام شود [۴، ۱۷].

$$W_{eff} = W_{SIW} - \frac{d^2}{0.95p} \quad (6)$$

$$W_{eff} = W_{SIW} - 1.08 \frac{d^2}{p} + 0.1 \frac{d^2}{W_{SIW}} \quad (7)$$

$$W_{SIW} = \frac{2W_{eff}}{\pi} \cot^{-1} \left(\frac{\pi p}{4W_{eff}} \ln \frac{\pi p}{2d} \right) \quad (8)$$

که در آن d قطر وایاها، p فاصله بین وایاها و W_{eff} فاصله مرکز به مرکز بین دو ردیف وایاها است. زاویه اسکن در آنتن‌های موج نشستی معمولی می‌تواند از رابطه ۹ به دست آید [۴].

$$\theta = \sin^{-1}(\beta(\omega)/k_0) \quad (9)$$

که در آن θ زاویه پرتو اصلی آنتن و k_0 عدد موج فضای آزاد است. در رابطه ۹ زاویه θ تابعی از ω است. مقادیر منفی و صفر $\beta(\omega)$ به ترتیب می‌توانند منجر به مقادیر منفی و صفر θ (زاویه‌های پشت‌تاب و پهلوتاب) شوند. طبق روابط ۱-۳ و ۹ پرتو آنتن در باند چپگرد (LH) از پشت‌تاب تا پهلوتاب ($0 < \theta < 90^\circ$) و در باند راستگرد (RH) از پهلوتاب تا جلوتاب ($90^\circ < \theta < 180^\circ$) را اسکن می‌کند. در $\beta = 0$ پرتو آنتن در جهت پهلوتاب ($\theta = 0^\circ$) قرار دارد. برای هر دو باند چپگرد (LH) و راستگرد (RH)، باید شرط $|\beta| \leq k_0$ برقرار باشد تا موج به بیرون نشت کند و ساختار به‌عنوان آنتن عمل کند. ناحیه $|\beta| \leq k_0$ ناحیه موج سریع (مد نشستی یا آنتنی) و خارج از این ناحیه، ناحیه موج آهسته (مد هدایتی یا موجبری) است. البته این رابطه در تئوری صادق است. در حالت عملی، زمانی که پرتو آنتن به پشت‌تاب یا جلوتاب نزدیک می‌شود، به دلیل افزایش اندازه β ، تحریک مد موج سطحی بیشتر از تحریک مد موج نشستی می‌شود که در این حالت موج کمتری به بیرون نشت می‌کند. یکی از چالش‌های طراحی آنتن‌های موج نشستی، نزدیک‌تر کردن هر چه بیشتر پرتو آنتن به جلوتاب یا پشت‌تاب است.

۳- روش طراحی و ساختار آنتن پیشنهادی و شرح عملکرد آن

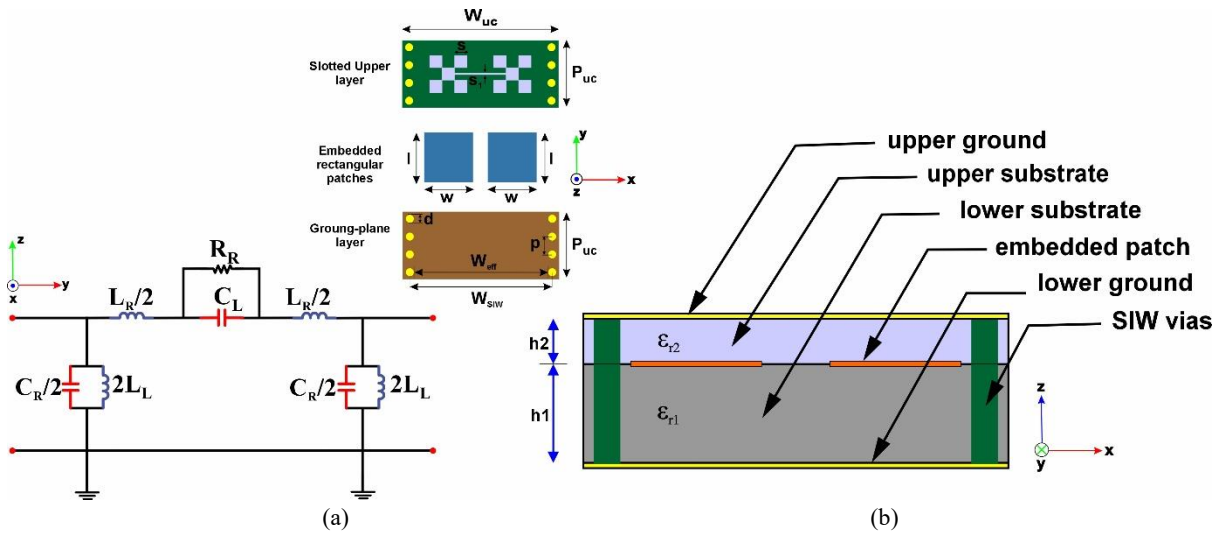
آنتن موج نشستی پیشنهادی بر اساس فناوری SIW و مبتنی بر خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی (CRLH-TLs) با قابلیت اسکن فرکانسی از پشت‌تاب تا جلوتاب طراحی شده است. طراحی این آنتن را می‌توان در دو مرحله تحلیل کرد. مرحله اول تحلیل ساختار سلول واحد و مرحله دوم تحلیل ساختار آنتن آرایه‌ای شکافدار نهایی.

۳-۱- طراحی و آنالیز سلول واحد آنتن CRLH-SIW

سلول واحد به کار گرفته شده در ساختار آنتن، یک سلول متعادل CRLH مبتنی بر SIW است که شامل یک شکاف به شکل فرکتال جعبه‌ای مرتبه اول Vicsek و دو پچ میکرواستریپ مستطیلی است که بین صفحات زمین بالایی و پایینی قرار گرفته‌اند. شکاف‌ها در لایه زمین بالایی SIW برش داده شده‌اند و پچ‌های مستطیلی در زیر شکاف‌ها قرار گرفته‌اند. برای تشکیل دیواره‌های جانبی SIW‌ها، از وایاهای فلزی (vias) استفاده شده است. ساختار و نمای مقطعی سلول واحد SIW-CRLH و همچنین مدار معادل سلول واحد در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. برای طراحی سلول واحد به طول P_{uc} ، از دو زیرلایه $RT\ Duroid$ ۵۸۸۰ با مشخصات فیزیکی ($\epsilon_r = 2.2$ و $\tan\delta = 0.0009$) استفاده شده است. ارتفاع کل ساختار SIW برابر با $h1+h2=4\text{ mil}$ بوده و پچ‌های مستطیلی در ارتفاع $h1=3\text{ mil}$ بین ساختارهای SIW قرار داده شده‌اند. عرض ساختار سلول واحد و عرض مؤثر SIW به ترتیب W_{uc} و W_{eff} هستند. ابعاد پچ‌های تعبیه‌شده و شکاف‌های فرکتال جعبه‌ای مرتبه اول Vicsek با نمادهای l ، w ، S ، S_1 نشان داده شده است.

مدار معادل ارائه‌شده در مقاله دوم نویسندگان با مدار معادل مقاله اول یکسان است و در هر دو، از مدل شبکه π متامتریال CRLH متعادل به‌عنوان توصیف پایه رفتار الکتریکی سلول واحد استفاده شده است. این مدل، شکل کلی و روابط حاکم بر ترکیب مؤلفه‌های LH و RH را مستقل از جزئیات هندسه فیزیکی نشان می‌دهد و تغییرات تنها در مقادیر پارامترهای المان‌ها مانند (C_L, L_L, C_R, L_R) به‌واسطه تغییر ساختار، ایجاد شده است. مدل مدار معادل به «نوع رفتار» خط و نه «شکل فیزیکی شکاف» بستگی دارد. به عبارت دیگر، چه شکاف به‌صورت H ساده باشد، چه از هندسه فرکتالی پیچیده مانند Vicsek استفاده شود، شکل کلی مدار معادل (شبکه π متعادل CRLH) بدون تغییر باقی می‌ماند و تنها مقادیر المان‌ها به‌واسطه تغییر در هندسه

و ابعاد فیزیکی، تغییر می کنند.



شکل ۳: نمای سطح مقطع سلول واحد آنتن موج نشتی پیشنهادی، جزئیات سلول واحد SIW-CRLH و مدار معادل سلول واحد
Figure 3. Cross-sectional view of the proposed LWA unit cell, details of the SIW-CRLH unit cell, and the equivalent circuit of the unit cell.

فرآیند طراحی باید از تجزیه و تحلیل سلول واحد آغاز شود، که در آن، نمودارهای پراکندگی و همچنین امپدانس بلوخ^۱ سلول واحد پیشنهادی بررسی می شود. مطابق دستورالعمل های اصلی برای طراحی آنتن های موج نشتی فراماده، مسئله اساسی برای ساختار سلول واحد آنتن، به دست آوردن نمودار Dispersion است. نمودار Dispersion همان نمودار ثابت فاز سلول واحد CRLH-TL بر حسب فرکانس است که قدرمطلق ضریبی از آن و بر حسب رادیان رسم شده است. از قطع نمودار Dispersion با خط نوری^۲، ناحیه موج سریع (مد تشعشعی یا آنتنی) و ناحیه موج آهسته (مد هدایتی یا موجبری) برای ساختار نهایی پیش بینی می شود. همچنین از متعادل بودن ساختار CRLH-TL یعنی عدم وجود فاصله بین باند راستگرد و چپگرد و در نتیجه داشتن تشعشع در پهلوتاب (در فرکانس ۸/۴۸GHz) اطمینان حاصل می شود. این نمودار از پارامترهای پراکندگی حاصل از شبیه سازی در نرم افزار HFSS به دست می آید. این نمودار از پارامترهای S سلول واحد با استفاده از رابطه ۱۰ یا توسط پارامترهای ABCD آن با استفاده از رابطه ۱۱ و خط ایرلاین (AirLine) با استفاده از رابطه ۱۲ استخراج شده است [۴،۵].

$$\beta p = \cos^{-1} \left[\frac{1 - s_{11}s_{22} + s_{12}s_{21}}{2s_{21}} \right] \quad (10)$$

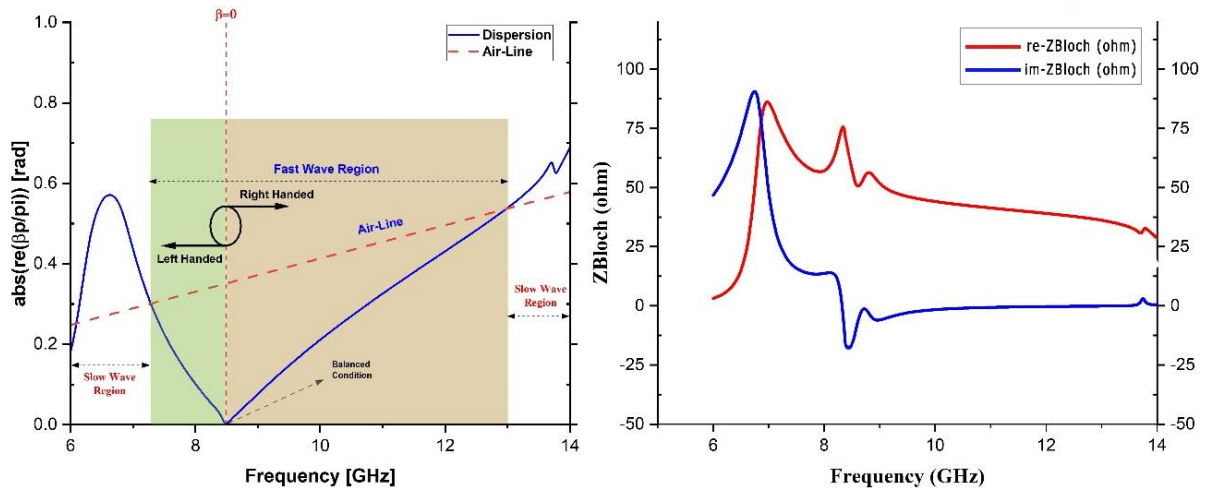
$$\beta p = \text{phase} \left(A \pm \sqrt{A^2 - 1} \right) \quad (11)$$

$$\text{Airline} = \omega p / c_0 \quad (12)$$

خط ایرلاین مناطق موج سریع $\beta \leq k_0$ و همچنین موج آهسته $\beta \geq k_0$ را مشخص می کند (که در آن k_0 عدد موج فضای آزاد است). در شکل ۴، نمودار پراکندگی سلول واحد CRLH SIW و نمودار امپدانس بلوخ برای سلول واحد نشان داده شده است.

¹ Bloch Impedance

² Air Line



شکل ۴: نمودار پراکندگی سلول واحد CRLH SIW پیشنهادی و نمودار امپدانس بلوخ برای سلول واحد.

Figure 4. Dispersion diagram of the proposed CRLH SIW unit cell and Bloch impedance diagram for the unit cell.

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، شرایط تعادل در حدود ۸/۴۸GHz برآورده می‌شود. خطوط نقطه‌چین در شکل ۴ خط Air Line است ($k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$) که از بالاترین فرکانس حدود ۱۳GHz و کمترین فرکانس حدود ۷/۳GHz عبور می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که محدوده فرکانسی برای ناحیه دست چپی (LH) حدوداً از ۷/۳GHz تا ۸/۴۸GHz است، درحالی‌که برای ناحیه دست راستی (RH) محدوده فرکانسی حدوداً از ۸/۴۸GHz تا ۱۳GHz است. مطابق شکل ۴ و مقایسه با نتایج مقاله اول نویسندگان [۱۷]، نقطه تعادل در ساختار پیشنهادی از حدود ۹/۰۲GHz به ۸/۴۸GHz انتقال یافته است. این کاهش فرکانس تعادل ناشی از افزایش ظرفیت سری C_L اثر همدسه فرکتال Vicsek است. در شکاف فرکتالی Vicsek مسیره‌های موازی و زوایای متعدد بین لبه‌های فلزی، سطح مؤثر صفحات خازنی را زیاد می‌کند، CL بزرگ‌تر بنابراین عملکرد بهتر در فرکانس‌های پایین و پایداری بهره را خواهیم داشت. برای تطبیق امپدانس LWA، نمودار امپدانس بلوخ سلول واحد می‌تواند اطلاعات مفیدی را ارائه دهد. امپدانس بلوخ را می‌توان از پارامترهای S یا پارامترهای ABCD سلول واحد به ترتیب توسط رابطه ۱۳ یا ۱۴ با استفاده از شبیه‌سازی حالت هدایت سریع در HFSS استخراج کرد [۴،۵].

$$Z_B = \frac{2jZ_0 S_{21} \sin(\beta p)}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}} \quad (13)$$

$$Z_B = \frac{-(A - D) \pm \sqrt{(A + D)^2 - 4}}{2C} \quad (14)$$

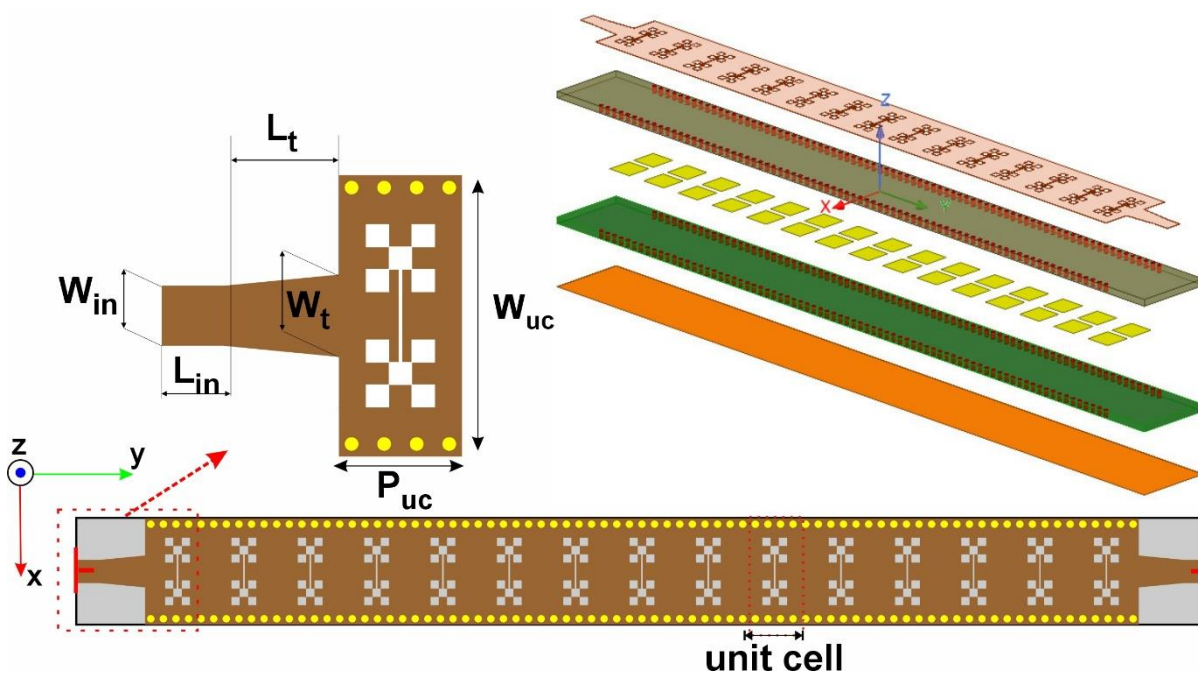
که در آن Z_0 امپدانس مشخصه ماتریس S است (اینجا ۵۰ اهم). میانگین بخش حقیقی امپدانس بلوخ در کل منطقه تشعشی محاسبه می‌شود و این مقدار برای تعیین عرض مناسب برای یک taper line استفاده می‌شود که باید یک خط میکرواستریپ ۵۰ اهم را به میانگین امپدانس بلوخ تبدیل کند. قسمت موهومی امپدانس بلوخ در ناحیه تشعشی RH بسیار نزدیک به صفر است و تطابق خوبی را ارائه می‌دهد.

در ساختار CRLH-SIW پیشنهادی، فرکانس ۸/۴۸GHz نقطه‌ی تعادل بین باند چپ‌گرد و راست‌گرد است ($\beta = 0$)، که در آن موج از حالت باند LH به باند RH منتقل می‌شود. در همین فرکانس، نمودار امپدانس بلوخ نیز کمینه‌ی قسمت موهومی و بیشینه‌ی تطابق را نشان می‌دهد، که به‌طور دقیق‌تر به معنای تعادل کامل امپدانی در این نقطه است. این ویژگی باعث می‌شود که موج در حالت پهلوتاب با کمترین بازتاب تشعشع کند و عملکرد تشعشی بهینه‌ای را ارائه دهد. نوسانات موجود در نمودار امپدانس بلوخ در نزدیکی $\beta = 0$ بخش طبیعی و مفیدی از ساختار CRLH متعادل هستند و به بهبود تطابق امپدانس و کارایی سیستم کمک می‌کنند، بدون اینکه بر عملکرد کلی آنتن تأثیر منفی بگذارند. این ویژگی‌ها موجب می‌شوند که آنتن در این فرکانس خاص عملکردی بهینه و کم‌نوسان داشته باشد و در نهایت منجر به بهبود بهره و ثبات در کل باند فرکانسی شود. قسمت موهومی امپدانس بلوخ در ناحیه تشعشی RH بسیار نزدیک به صفر است و تطابق خوبی را ارائه می‌دهد. مقدار منفی

آن بر روی ناحیه تشعشعی LH ممکن است با خاصیت القایی وایاهای SIW لغو شود. همچنین، موقعیت اولین سلول واحد را می توان تغییر داد تا تطبیق راکتانس بهتری ارائه شود.

۳-۲- ساختار آرایه شکاف دار نهایی آنتن موج نشتی

همان گونه که در مقاله اول نویسندگان [۱۷] نیز بیان شده است، آرایش سلول های واحد CRLH-SIW در راستای محور طول موجبر، اساس ایجاد موج نشتی محسوب می شود. در این پژوهش، همان پیکربندی پایه از [۱۷] به عنوان ساختار مرجع در نظر گرفته شده، اما شکاف H-شکل در سلول واحد به شکاف فرکتال جعبه ای مرتبه اول Vicsek جایگزین شده است تا ضمن حفظ تعادل، ظرفیت سری را افزایش دهد و در نتیجه پهنای باند و زاویه اسکن بهبود یابد. هندسه شکاف ها یکی از عوامل تعیین کننده اصلی در عملکرد آنتن، به ویژه در زمینه آنتن های آرایه فازی، محسوب می شود. شکل، اندازه و موقعیت شکاف ها بر روی پارامترهای مختلفی مانند فرکانس رزونانس، پهنای باند، الگوی تابشی، و قابلیت اسکن زاویه پرتو تأثیر می گذارد. ساختار نهایی آنتن شامل یک آرایه از ۱۵ سلول واحد است که به صورت طولی در امتداد طول موجبر در جهت P_{uc} قرار گرفته اند. همچنین دو خط انتقال ریزنواری Tapered line در دو سمت و به منظور تطبیق امپدانس با دهانه ورودی ۵۰ اهم به این ساختار اضافه شده است. شکل ۵ نمای بالایی ساختار آنتن نهایی و نمای سه بعدی و تفکیک شده از لایه های ساختار آنتن نهایی را نمایش می دهد.



شکل ۵: نمای بالایی ساختار آنتن و نمای سه بعدی و تفکیک شده لایه های آنتن پیشنهادی.

Figure 5. Top view of the antenna structure and three-dimensional, segmented view of the proposed antenna layers.

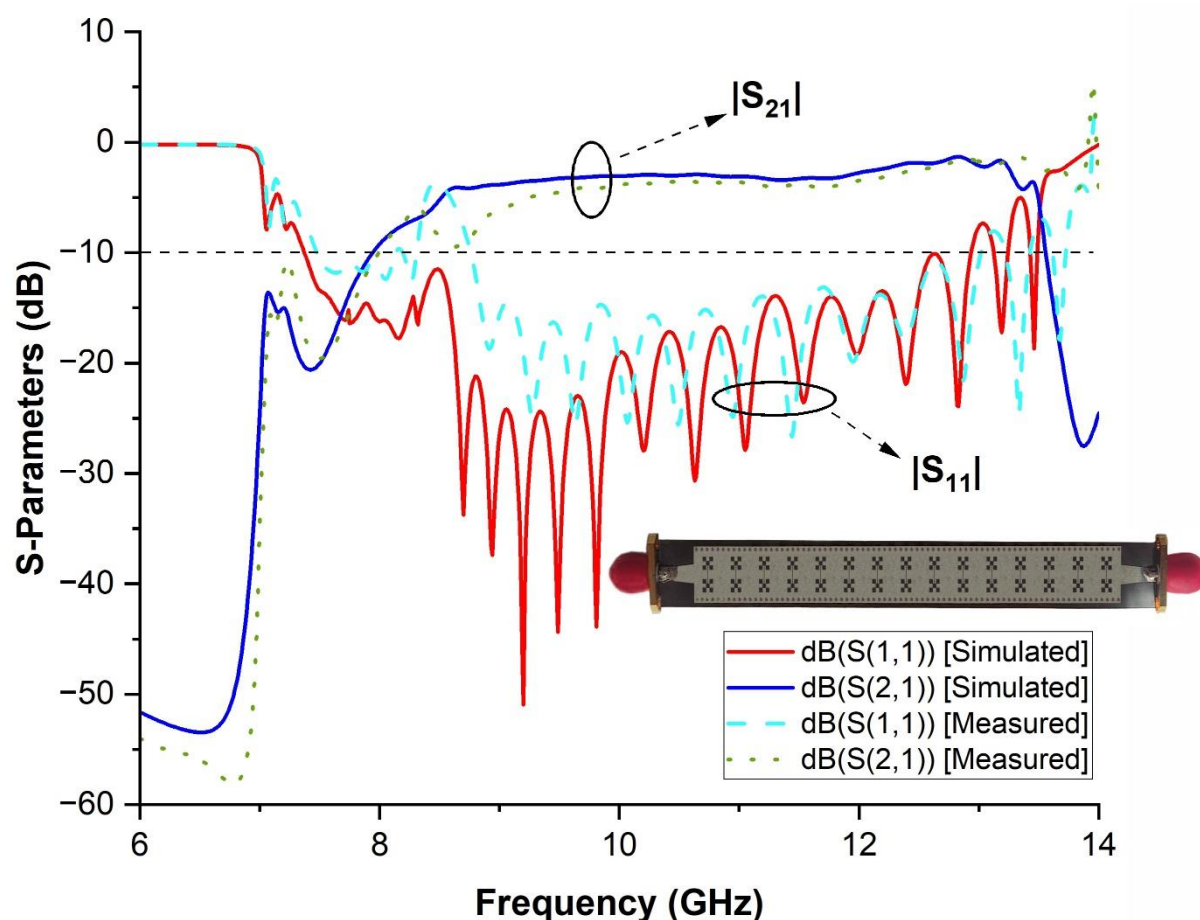
ساختار پایه بر مبنای مدل CRLH-SIW مرجع [۱۷] طراحی شده و هندسه شکاف با فرکتال Vicsek اصلاح گردیده است. پارامترهای طراحی ساختار سلول واحد و پارامترهای فیزیکی آنتن بهینه شده نهایی (نگاه کنید به شکل ۳) عبارتند از: $d=4/4$, $p=1/8$, $d=0/9$, $L_{in}=3$, $W_{in}=2/9$, $L_t=5/7$, $W_t=4$, $W_{eff}=12$, $P_{uc}=6/2$, $W_{uc}=13/45$, $W=4/4$ هستند. اندازه کلی آنتن ۱۳۵/۵ میلی متر در ۱۳/۴۵ میلی متر است.

استفاده از پیچ ها و شکاف های فرکتال جعبه ای مرتبه اول VICSEK در لایه زمین بالایی و ماهیت خازنی آنها باعث شده تا این شکاف ها علاوه بر تشعشع، نقش خازن سری برای خط انتقال چپگرد را هم بازی کنند. وایاهای دیواره SIW نیز همانطور که در فرکانس های راستگرد، نقش دیواره موجبری را ایفا می کنند، در فرکانس های چپگرد، نقش اندوکتانس موازی برای خط انتقال چپگرد را بر عهده می گیرند [۱۲، ۱۷]. بنابراین خازن دست چپی (C_L) توسط شکاف های روی لایه زمین بالایی و پیچ های تعبیه شده در زیر شکاف ها و اندوکتانس دست چپی (L_L) توسط دیوارهای وایای فلزی مدل می شوند. گرادیان ولتاژ که بین لایه

زمین بالایی شکافدار و لایه زمین پایینی SIW توسعه می‌یابد، خازن موازی توزیع شده (خازن دست راستی C_R) را فراهم می‌کند، همچنین توزیع جریانی که در لایه زمین بالایی جریان دارد، اندوکتانس سری توزیع شده (اندوکتانس دست راستی L_R) را ایجاد می‌کند. پس اندوکتانس دست راستی (L_R) و خازن دست راستی (C_R) توسط لایه زمین بالایی شکافدار و لایه زمین پایینی مدل می‌شوند. شرایط متعادل ساختار زمانی رخ می‌دهد که تأثیرات LH و RH دقیقاً در فرکانس معین به توازن برسند. یعنی حاصل ضرب خازن دست چپ و اندوکتانس دست راست برابر با حاصل ضرب اندوکتانس دست چپ و خازن دست راست باشد ($L_R C_L = L_L C_R$). به این ترتیب امکان ایجاد یک باند LH و تشعشع در پشت تاب فراهم می‌آید. بنابراین آنتن نهایی طراحی شده، یک آنتن موج نشی SIW مبتنی بر CRLH-TL و با قابلیت اسکن فرکانسی از سمت پشت تاب تا جلوتاب است.

۴- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آنتن پیشنهادی با نرم افزار Ansoft HFSS انجام شده است. آنتن پیشنهادی LWA ساخته شده و پارامترهای S شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: نمای بالایی از CRLH-SIW LWA ساخته شده و پارامترهای S آنتن پیشنهادی نسبت به فرکانس.

Figure 6. Top view of the fabricated CRLH-SIW LWA and S-parameters of the proposed antenna versus frequency.

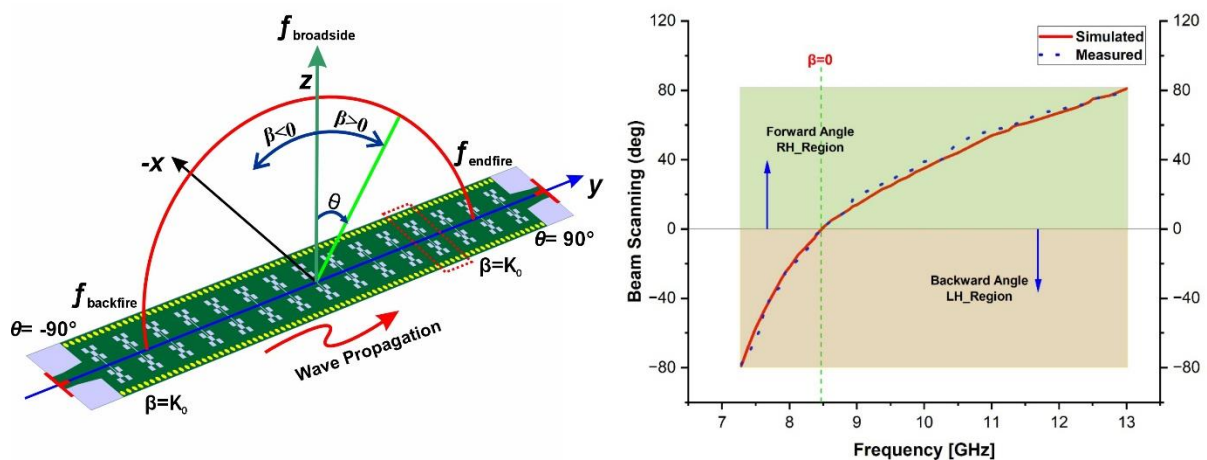
نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تطابق بسیار خوبی را در کل باند کارکرد (۷/۳ تا ۱۳ گیگاهرتز) نشان می‌دهند. نمودار S_{11} بیانگر بازتاب توان در دهانه ورودی آنتن است و مقدار آن در بیشتر نقاط باند پایین‌تر از -۱۰ dB قرار دارد؛ این موضوع نشان می‌دهد که بخش تغذیه و خط انتقال به درستی با ساختار تشعشعی تطبیق داده شده‌اند. همچنین S_{21} به عنوان شاخص انتقال توان در کل ساختار، در محدوده صفر تا -۲ dB قرار دارد که بیانگر انتقال تقریباً کامل توان به ناحیه تشعشعی است.

در فرکانس‌های پایین (ناحیه دست چپی LH) مقدار S_{21} نسبتاً کمتر است زیرا بخشی از توان به صورت پرتو پشت تاب نشت می‌کند، اما با افزایش فرکانس و ورود به ناحیه دست راستی RH، بازدهی تشعشع افزایش یافته و S_{21} به مقادیر نزدیک به صفر

دسی بل می رسد. تغییرات پیوسته S_{11} و S_{21} در کل باند بدون باند قطع، تأییدی بر برقراری شرط تعادل CRLH در فرکانس $۸/۴۸\text{GHz}$ است.

باید توجه داشت که در آنتن های موج نشستی، S_{21} به تنهایی نمایانگر تلفات بیرونی (تشعشع) و درونی (رسانا و دی الکتریک) است. در این ساختار، محاسبه ثابت نشستی توسط روابط (۱۵) تا (۱۸) نشان می دهد که بیش از ۸۵ درصد از توان ورودی به صورت تشعشعی در طول آنتن پخش می شود و تلفات رسانا و دی الکتریک ناچیزند. بنابراین، پارامترهای S به طور کامل اثبات می کنند که آنتن پیشنهادی دارای تطبیق پایدار و بازده تشعشعی بالاست.

شکل ۷ نمودار زاویه اسکن پرتو اصلی آنتن را نسبت به فرکانس نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، پرتو اصلی با افزایش فرکانس از جهت پشت تاب به سمت پهلو تاب و سپس به جهت جلوتاب اسکن می شود. زاویه اسکن پرتو اصلی به طور پیوسته از -۷۹° درجه تا ۸۱° درجه به صورت پیوسته و بدون باند قطع در صفر درجه در باند فرکانسی $۷/۳\text{GHz}$ تا ۱۳GHz است.



شکل ۷: اسکن پرتو شبیه سازی شده و اندازه گیری شده در برابر فرکانس.
Figure 12. Simulated and measured beam scanning versus frequency.

دامنه اسکن در این مقاله -۷۹° تا ۸۱° ، کمی وسیع تر از مقاله اول نویسندگان [۱۷] -۷۹° تا ۸۰° است، هرچند تفاوت چشمگیر نیست اما نکته مهم حفظ پارامترهای عملکردی (که معمولاً در نمودارها نمایش داده می شوند) در این زوایا است. همانطور که در بخش های قبل اشاره شد، استفاده از ساختار شکاف فراکتال در مقاله دوم، به احتمال زیاد منجر به پایداری بهتر گین و تطابق امپدانس در زوایای اسکن دورتر می شود. حداکثر زاویه اسکن آنتن در جهت جلوتاب، نسبت به کارهای پیشین به طور قابل ملاحظه ای بهبود یافته است. همچنین، داشتن تشعشع در جهات پهلو تاب و پشت تاب، نسبت به ساختارهای معمولی آنتن های موج نشستی یک امتیاز محسوب می شود. پهنای باند مد تشعشعی حدود $۵/۷\text{GHz}$ است و نسبت به ساختارهای [۱۰، ۱۸، ۲۲] بهبود یافته است.

برای دستیابی به پارامتر S_{11} پایین به منظور به حداقل رساندن بازتاب و تضمین انتقال کارآمد توان، و داشتن پارامتر S_{21} بالا که نشان دهنده اتصال قوی بین خط تغذیه و آنتن موج نشستی (LWA) است، در حالی که تلفات داخلی (تلفات دی الکتریک و رسانا) کم هستند، تضمین می کند که مقدار قابل توجهی از تشعشع (تلفات خارجی) از طریق شکاف ها به دست می آید. ثابت نشستی یا ثابت تضعیف ساختار نشستی توسط پارامترهای S در رابطه ۱۵ و یا پارامترهای ABCD در رابطه ۱۶ تعریف می شود که L طول ساختار نشستی است. ثابت نشستی در مفهوم LWA تابعی از فرکانس است. ثابت نشستی نمایانگر تشعشع در طول آنتن است و معمولاً می توان از آن برای محاسبه بازدهی تشعشع همان طور که در رابطه ۱۷ آمده است، استفاده کرد. توجه داشته باشید که ثابت تضعیف به طور کلی به عنوان تلفات کل در طول خط انتقال و آنتن تعریف می شود. این ثابت تنها در صورت خطوط انتقال بدون تلفات می تواند به عنوان ثابت نشستی در نظر گرفته شود. این موضوع را می توان با استفاده از رابطه ۱۸ با α_c و α_d که ثابت های تضعیف به دلیل تلفات رسانا و دی الکتریک هستند، و α که ثابت نشستی واقعی است، بیان کرد [۴، ۵].

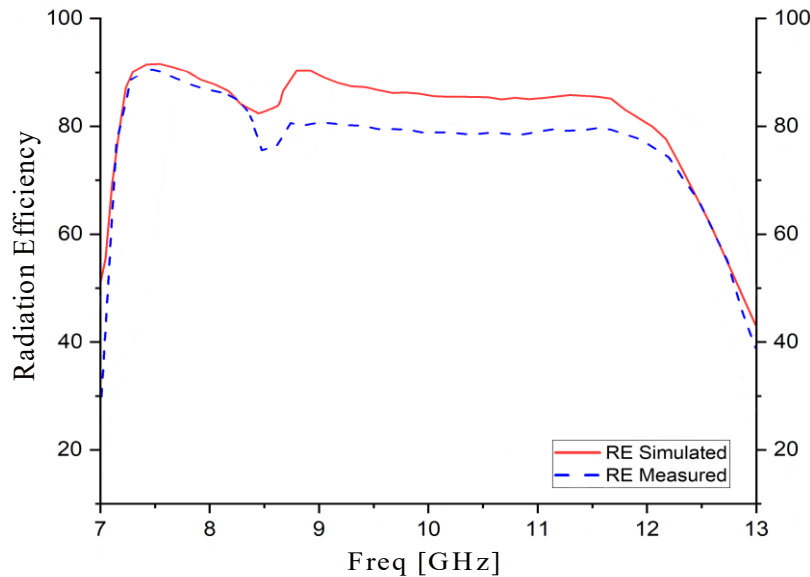
$$\alpha = \frac{-1}{2L} \ln \frac{|s_{21}|^2}{(1-|s_{11}|^2)} = \frac{-1}{L} \ln |s_{21}| \Rightarrow \text{for } |s_{21}| \ll 1 \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{1}{L} \left(\ln A \pm \sqrt{A^2 - 1} \right) \quad (16)$$

$$R_e = 1 - \frac{P(L)}{P(0)} = [1 - \exp(-2\alpha L)] \quad (17)$$

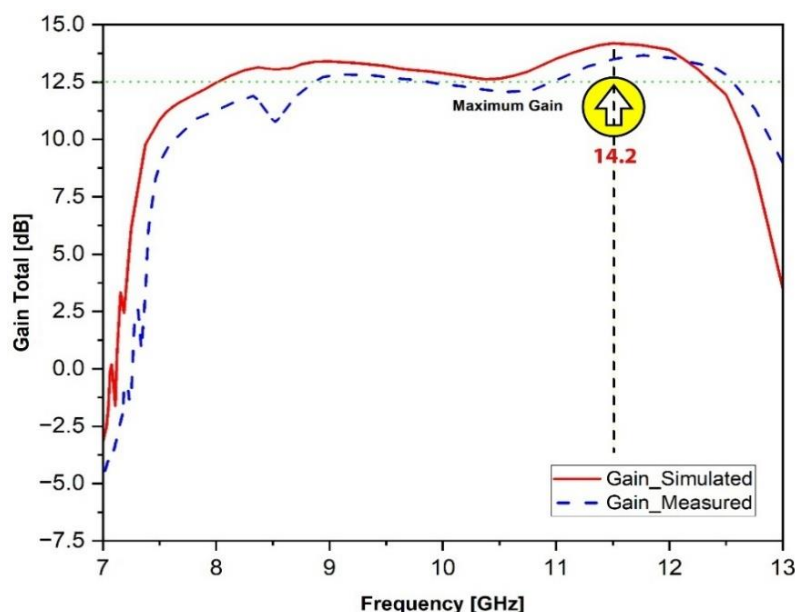
$$\alpha_{tot} = \alpha + \alpha_d + \alpha_c \quad (18)$$

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، راندمان تشعشع بالا است و به‌طور متوسط به ۸۷٪ در باند X می‌رسد.



شکل ۸: بازده تشعشعی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی در برابر فرکانس.
Figure 8. Simulated and measured radiation efficiency of the proposed antenna versus frequency.

می‌توان مشاهده کرد که بازده تشعشع آنتن پیشنهادی در کل باند فرکانسی باند X به‌طور متوسط حدود ۸۷٪ است که نسبت به ساختار پایه [۱۷] با بازده تقریبی ۸۳٪ بهبود قابل‌توجهی دارد. این افزایش مستقیماً ناشی از هندسه Vicsek و افزایش یکنواختی میدان در طول شکاف‌های فرکتالی است که موجب کاهش تلفات رسانا و دی‌الکتریک در بدنه SIW می‌شود. نمودار بهره پرتو اصلی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی به ازای فرکانس‌های مختلف در شکل ۹ مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، بهره اندازه‌گیری شده پرتو اصلی در پهنای باند فرکانسی ۷/۳GHz تا ۱۳GHz به‌طور تقریبی بیش از ۱۲dB است. بهره پرتو اصلی با تغییر کمتر از ۳dB در باند فرکانسی موردنظر ثابت و دارای بیشینه بهره ۱۴/۲dB در باند X است که نسبت به ساختار پایه [۱۷] با بیشینه ۱۲/۸۳dB، بهبودی معادل ۱۰/۶ درصد را نشان می‌دهد. یکنواختی منحنی‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری بیانگر پایداری شرایط تشعشعی و صحت تعادل CRLH در کل باند فرکانسی است. افزایش بهره حاصل از هندسه Vicsek مرتبه اول، به‌دلیل افزایش خازن سری C_L و توزیع یکنواخت‌تر میدان تشعشعی بر روی شکاف‌های فرکتالی، سبب کاهش تلفات رسانا و افزایش چگالی جریان مؤثر در دیواره‌های SIW گردیده است. نتیجه آن، تشکیل پرتو با تمرکز بهتر و کاهش نوسانات بهره در محدوده گذار از ناحیه LH به RH است.

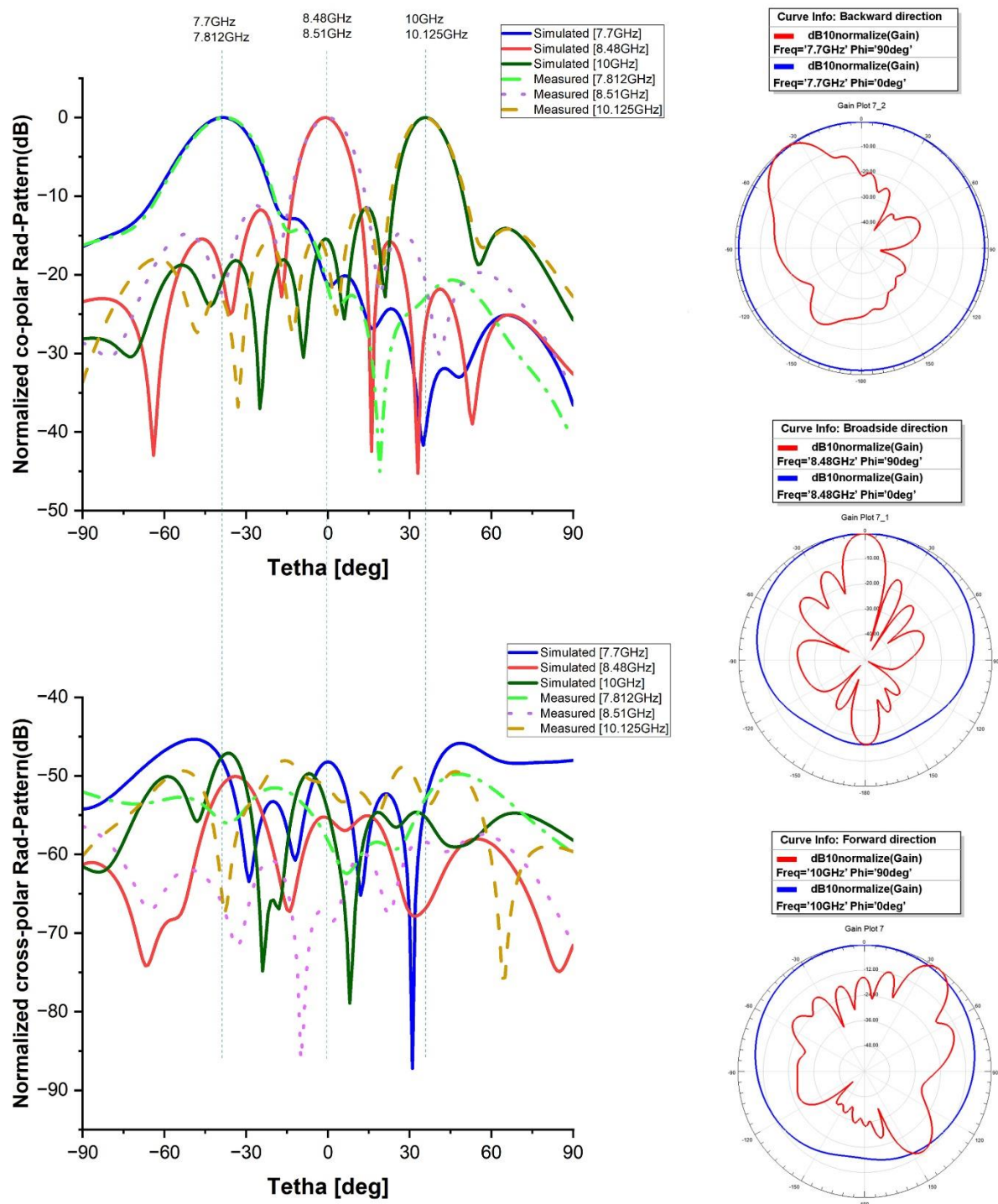


شکل ۹: نمودار بهره تشعشی آنتن پیشنهادی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بر حسب فرکانس.
Figure 9. Simulated and measured radiation gain versus frequency for the proposed antenna.

در ادامه، بهره تشعشی نرمالیزه شده در صفحه اصلی تشعشع آنتن در شکل ۱۰ برای چند فرکانس دلخواه به‌منظور نمایش اسکن فرکانسی در تمامی جهت‌ها رسم شده است. پترن‌های تشعشی نرمالیزه اندازه‌گیری شده در صفحه E-Plane (y-z) و در صفحه H-Plane (x-z) در فرکانس ۷/۷GHz (در جهت پشت‌تاب)، در فرکانس ۸/۴۸GHz (در جهت پهلوتاب) و فرکانس ۱۰GHz (در جهت جلوتاب) در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

این رفتار پیوسته بیانگر تحقق کامل شرط تعادل CRLH است که موجب تغییر علامت مؤلفه β در ساختار موجبر و انتقال پرتو از ناحیه LH به RH می‌شود. در تمام فرکانس‌های بررسی‌شده، بیشینه تشعشع در راستای زاویه اصلی تابش متمرکز بوده و سطوح کناری (Side Lobes) کمتر از -۱۵dB باقی مانده است، که نشان‌دهنده هدایت منسجم انرژی تابشی و طراحی مناسب آرایه ۱۵ سلولی طولی است. پترن‌ها همچنین نشان می‌دهند که پهنای باند زاویه‌ای (Angular Beamwidth) در حالت پهلوتاب کاهش محسوسی دارد، که با افزایش بهره در همان فرکانس هم‌راستا است. این رفتار ناشی از افزایش مؤلفه تشعشع اصلی و کاهش تلفات جانبی در هندسه Vicsek است.

در سیستم‌های مخابراتی و راداری، بالا بودن co-polarization و پایین بودن cross-polarization به معنای بهینه بودن عملکرد آنتن است، زیرا نشان‌دهنده این است که آنتن بیشتر انرژی را در جهت و قطبش صحیح انتقال می‌دهد. این موضوع به کاهش تلفات سیگنال، افزایش برد سیستم، و بهبود کیفیت کلی ارتباط کمک می‌کند. منحنی پترن تشعشی نرمالیزه شده co-polar و cross-polar در صفحه اصلی تشعشع آنتن، عملکرد آنتن پیشنهادی برای اسکن فرکانسی در تمامی جهت‌ها را نمایش می‌دهد. برای چند فرکانس دلخواه در جهت‌های پشت‌تاب، پهلوتاب و جلوتاب الگوهای تشعشی co-polar و cross-polar در شکل ۱۰ برای نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده تحلیل و ارائه شده‌اند. اختلاف زیاد اندازه co-polar نسبت به cross-polar نشان‌دهنده عملکرد بهینه آنتن در حفظ جهت قطبش موردنظر است. co-polarization تعیین‌کننده میزان انرژی است که آنتن در جهت درست قطبش تشعشع می‌کند یا دریافت می‌کند. این مؤلفه باید تا حد امکان قوی باشد تا اطمینان حاصل شود که سیگنال اصلی با قدرت و وضوح کافی انتقال یا دریافت می‌شود. به‌طور کلی، بهینه‌سازی co-polarization یک هدف اصلی در طراحی آنتن‌ها است، زیرا مستقیماً بر کارایی و عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارد. همچنین کاهش cross-polarization به بهبود بهره آنتن، افزایش دقت و کارایی سیستم‌های مخابراتی، و کاهش تداخل کمک می‌کند. بالا بودن cross-polarization می‌تواند باعث ایجاد تداخل در سیگنال‌های هم‌قطبش شود. در بسیاری از کاربردهای حساس، کاهش cross-polarization یک هدف مهم در طراحی آنتن است. پرتو اصلی با افزایش فرکانس از پشت‌تاب تا جلوتاب را اسکن می‌کند. باید توجه داشت که در بعضی نقاط اختلاف کوچکی بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری وجود دارد که احتمالاً به دلیل خطای ساخت است.



شکل ۱۰: بهره تشعشی شبیه‌سازی شده نرمالیزه (سمت راست) در صفحات E-Plane (y-z) و H-Plane (x-z)، در جهت‌های پشت‌تاب، پهلوتاب و جلوتاب و پترن تشعشی (سمت چپ) co-polar و cross-polar نرمالیزه شده آنتن پیشنهادی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده برای فرکانس‌های مختلف از LH تا RH

Figure 10: Normalized simulated radiation gain (right) in the E-Plane (y-z) and H-Plane (x-z) planes, in the backward, broadside, and forward directions, and the normalized co-polar and cross-polar radiation patterns (left) of the simulated and measured proposed antenna for different frequencies from LH to RH.

همان‌گونه که در شکل ۱۰ برای پترن‌های تشعشی مشاهده می‌شود، الگوهای co-polar و cross-polar آنتن پیشنهادی در باند فرکانسی ۷/۳ تا ۱۳ گیگاهرتز، نسبت تفکیک قطبشی قابل‌توجهی را نشان می‌دهند که نسبت به ساختار پایه [۱۷] به‌طور محسوسی بهبود یافته است. در ساختار مرجع [۱۷]، اختلاف میان مؤلفه‌های co-polar و cross-polar به‌طور میانگین حدود

۱۸ dB در محدوده ۸ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز بود، درحالی که در آنتن فعلی این اختلاف به بیش از ۲۵dB افزایش یافته است. این افزایش نشان دهنده کاهش تلفات ناشی از جریان‌های عرضی و میدان‌های ناخواسته در اطراف شکاف‌های فرکتالی است. هندسه Vicsek مرتبه اول، با افزایش خازن سری C_L و بهبود توزیع میدان در ناحیه لبه‌های شکاف، موجب کاهش نشستی انرژی در جهات متقاطع و پایداری قطبش غالب TM_{10} گردیده است. همچنین به لطف تعادل دقیق بین شاخه‌های LH و RH در ساختار CRLH، انحنای پرتو در گذار LH-RH بدون افزایش cross-polar صورت گرفته است، به گونه‌ای که در فرکانس‌های بالا (ناحیه جلوتاب) بیشترین قدرت تشعشع در جهت قطبش مطلوب و کمتر از ۲۵dB- در مؤلفه متقاطع اندازه‌گیری شده است.

در مجموع، مقایسه با آنتن مرجع [۱۷] نشان می‌دهد که آنتن پیشنهادی ضمن حفظ توان اسکن پیوسته از 79° تا 81° ، موفق به افزایش حدود ۳۳٪ در نسبت co/cross polarization شده است، که این بهبود مستقیماً بیانگر کاهش تداخل قطبشی و افزایش کارایی تابش در کل مسیر اسکن است. این ویژگی‌ها، آنتن پیشنهادی را برای کاربردهای پیشرفته راداری و ارتباطات با حساسیت قطبشی بالا کاملاً مناسب می‌سازند.

به منظور ارزیابی جامع عملکرد آنتن CRLH-SIW پیشنهادی، مقایسه‌ای عددی بین این آنتن و ساختارهای مطرح قبلی از جمله آنتن مرجع [۱۷] انجام شده است. این تحلیل به طور کامل در جدول ۱ ارائه شده و شامل مقایسه پارامترهای کلیدی عملکردی مانند نوع آنتن، قابلیت تشعشع در پهلوتاب، تعداد سلول‌های واحد، پهنای باند فرکانسی، حداکثر بهره و دامنه اسکن فرکانسی است. نتایج این مقایسه نشان‌دهنده برتری آنتن پیشنهادی در مقایسه با سایر آنتن‌های مورد بررسی از لحاظ ویژگی‌های عملکردی است. علاوه بر این، تحلیل‌های بیشتر حاکی از این است که آنتن پیشنهادی در حوزه‌های خاصی نظیر پایداری بهره و گستردگی دامنه اسکن نیز بهبودهایی قابل توجه را نسبت به آنتن‌های موجود ارائه می‌دهد. این مزایا، نشان‌دهنده پتانسیل بالای آنتن پیشنهادی برای کاربردهای پیشرفته در حوزه‌های مختلف ارتباطات و رادار هستند. همچنین این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مستقیم هندسه Vicsek در افزایش C_L و تثبیت تعادل CRLH در سراسر باند X است.

جدول ۱: مقایسه آنتن موج نشستی متعادل مبتنی بر SIW-CRLH-TL مطالعه شده در این مقاله با آنتن‌های مرجع.

Table 1. Comparison Between the SIW-Based Balance CRLH-TL LWA studied in this Paper and Reference Antennas.

References	Antenna Type	Beam at Broadside	Unit Cell	Frequency Band (GHz)	Scanning Range	Maximum Gain
T.Yang et al. [7]	Folded SIW LWA	Yes	25	5.1 to 6.9	58° to -65°	3.5
Dong and Itoh. [4]	HM SIW LWA	Yes	15	12.8 to 8.6	60° to -70°	10.8
Y.Weitsch et al. [9]	LWA	Yes	50	3 to 5.3	70° to -70°	10.15
Nasimuddin et al. [10]	Multilayered SIW LWA	Yes	15	7.5 to 13	78° to -66°	10
Karmokar et al. [16]	SIW LWA	Yes	14	7.6 to 11	45° to -74°	10.6
Zhang et al. [17]	SIW LWA	Yes	6	13.5 to 17.8	30° to -57°	9.15
Wu et al. [18]	LWA	Yes	20	3.9 to 4.9	67° to -61°	10.5
Pravesh Belwal et al. [19]	SIW LWA	Yes	10	9.5 to 15.2	30° to -28°	13.8
Nasimuddin et al. [20]	Multilayered SIW LWA	Yes	15	8.25 to 13	66° to -60°	13.1
Cao et al. [21]	SIW LWA	Yes	12	24 to 27	13° to -17°	13
H. Mashhadi et al. [15]	Multilayered SIW LWA	Yes	15	7.6 to 12.5	80° to -79°	12.83
Proposed Antenna	Multilayered SIW LWA	Yes	15	7.3 to 13	81° to -79°	Max 14.2

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک LWA با شکاف‌های به شکل فرکتال جعبه‌ای مرتبه اول Vicsek در لایه زمین بالایی، مبتنی بر CRLH-SIW برای بهبود پهنای باند اسکن پشت‌تاب-جلوتاب با بهره ثابت بیشتر از ۱۲dB ارائه شده است. این طراحی ادامه و توسعه کار انجام‌شده در آنتن مرجع [۱۷] است، با این تفاوت که در نسخه فعلی، هندسه فرکتالی Vicsek موجب افزایش خازن سری C_L و در نتیجه کاهش فرکانس تعادل از ۹/۰۲ به ۸/۴۸ گیگاهرتز، افزایش پهنای باند از ۴/۹ به ۷/۵ گیگاهرتز (بهبود تقریباً ۱۶/۳ درصد) و افزایش بیشینه بهره از ۱۲/۸۳dB به ۱۴/۲dB (بهبود ۱۰/۶ درصد) شده است. برای دریافت اطلاعات بیشتر در مورد شکل فرکتال جعبه‌ای مرتبه اول و مرتبه‌های بالای Vicsek به مرجع [۲۴] رجوع شود. آنتن پیشنهادی قادر به اسکن کامل فضا از سمت پشت‌تاب تا جلو تاب (79° تا 81° درجه) بدون باند قطع در پهلوتاب (صفر درجه) در باند فرکانسی از ۷/۳GHz تا ۱۲GHz است. LWA پیشنهادی برای دستیابی به اسکن بیم با بهره ثابت در باند فرکانس موردنظر مفید و کاربردی است.

این آنتن پیشنهادی می‌تواند به‌طور عملی بهره‌ثابتی با تغییر کمتر از ۳dB در باند فرکانسی موردنظر فراهم کند و حداکثر بهره‌ای برابر با ۱۴/۲dB در باند X ارائه دهد. عملکرد و قابلیت‌های آنتن پیشنهادی به‌طور تجربی در آزمایشگاه میکروویو دانشگاه آزاد واحد ارومیه و آزمایشگاه آنتن دانشگاه «خواجه نصیرالدین طوسی» مورد تأیید قرار گرفته است.

مراجع

- [1] S. Rezaee and Y. Zehforoosh, "Design of a Planar Multiband Antenna Using Metamaterials, " *Journal of Southern Communication Engineering*, vol.11, no. 43, pp. 15-26, 2022,doi: [10.30495/jce.2022.689028](https://doi.org/10.30495/jce.2022.689028), [in Persian].
- [2] MM. Maleki, T. Aribi, and A. Shadmand, "Implementation of a Miniaturized Planar 4-Port Microstrip Butler Matrix for Broadband Applications," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol 9, no.1, January 2020 ,doi: [10.22070/jce.2020.5295.1154](https://doi.org/10.22070/jce.2020.5295.1154), [in Persian].
- [3] M. M. Sabahi, A. A. Heidari, and M. Movahhedi, "A Circularly Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Balanced Right-Handed/Left-Handed Transmission Lines" *23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*, Tehran , 2015 [in Persian].
- [4] Y. J. Guo and R. W. Ziolkowski, "Advanced Antenna Array Engineering for 6G and Beyond Wireless Communications," *John Wiley& Sons, inc.*, Hoboken, New Jersey, Online ISBN:9781119712947, 2022, doi :[10.1002/9781119712947](https://doi.org/10.1002/9781119712947).
- [5] M. M. Sabahi, A. A. Heidari, and M. Movahhedi, "A Compact CRLH Circularly Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Substrate-Integrated Waveguide," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 9, pp. 4407-4414, Sept. 2018, doi: [10.1109/TAP.2018.2851278](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2851278).
- [6] A. M. Malekshah, A. R. Attari, and M. S. Majedi, "Improved Design of Uniform SIW Leaky Wave Antenna by Considering the Unwanted Mode," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 8, pp. 6378-6382, Aug. 2020, doi: [10.1109/TAP.2020.2975292](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2975292).
- [7] S. Asadi, H. Zahra, A. Kiyani, A. Pourziad, and S. M. Abbas, "Composite Right/Left Handed Leaky Wave Antenna Using Complementary Omega Shape on Half Mode Substrate Integrated Waveguide," *IEEE International Symposium On Antennas And Propagation (ISAP)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2023, pp. 1-2, doi: [10.1109/ISAP57493.2023.10388549](https://doi.org/10.1109/ISAP57493.2023.10388549).
- [8] H. Dolatkah and Z. Atlasbaf, "An improved SIW Leaky Wave Antenna Based on a Compact CRLH unit cell," *arXiv:2305.07897v1*, 2023, doi: [10.48550/arXiv.2305.07897](https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.07897).
- [9] T. Yang, P.-L. Chi, and R. Xu, "Novel composite right/left-handed leaky-wave antennas based on the folded substrate integrated waveguide structures," *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 29, pp. 235-248, 2012, doi: [10.2528/PIERC12040215](https://doi.org/10.2528/PIERC12040215).
- [10] Y. Dong and T. Itoh, "Composite Right/Left-Handed Substrate Integrated Waveguide and Half Mode Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Structures," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 3, pp. 767-775, March 2011, doi: [10.1109/TAP.2010.2103025](https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2103025).
- [11] Y. Weitsch and T. F. Eibert, "Analysis and design of a composite left/right-handed leaky wave antenna based on the H10 rectangular waveguide mode," *Advances in Radio Science*, vol. 6, pp. 49-54, 2008, doi: [10.5194/ars-6-49-2008](https://doi.org/10.5194/ars-6-49-2008).

- [12] Nasimuddin, Z. N. Chen, and X. Qing, "Slotted SIW leaky-wave antenna with improved backward scanning bandwidth and consistent gain," *11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Paris, France, 2017, pp. 752-755, doi: [10.23919/EuCAP.2017.7928339](https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928339).
- [13] M. Z. Ali and Q. U. Khan, "High Gain Backward Scanning Substrate Integrated Waveguide Leaky Wave Antenna," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 1, pp. 562-565, Jan. 2021, doi: [10.1109/TAP.2020.3006389](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3006389).
- [14] X. Zou, D. Yu, Y. Fan, J. Li, and W. Luo, "A Substrate-Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna Based on Eye-Shaped Transverse Slot," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 11, pp. 7947-7952, Nov. 2021, doi: [10.1109/TAP.2021.3083758](https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3083758).
- [15] R. Agarwal, R. L. Yadava, and S. Das, "A Multilayered SIW-Based Circularly Polarized CRLH Leaky Wave Antenna," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 10, pp. 6312-6321, Oct. 2021, doi: [10.1109/TAP.2021.3082618](https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3082618).
- [16] P. Kumar, T. Ali, and M. M. M. Pai, "Electromagnetic Metamaterials: A New Paradigm of Antenna Design," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 18722-18751, 2021, doi: [10.1109/ACCESS.2021.3053100](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053100).
- [17] H. Mashhadi, L. Asadpor, Y. Zehforoosh, and T. Sedghi, "Slotted Substrate-Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna with Improved Backward Scanning Bandwidth and Constant Gain in X-band," *IETE Journal of Research*, 2023, doi: [10.1080/03772063.2023.2265866](https://doi.org/10.1080/03772063.2023.2265866).
- [18] D. K. Karmokar, Y. J. Guo, P. -Y. Qin, S. -L. Chen, and T. S. Bird, "Substrate Integrated Waveguide-Based Periodic Backward-to-Forward Scanning Leaky-Wave Antenna With Low Cross-Polarization," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 8, pp. 3846-3856, Aug. 2018, doi: [10.1109/TAP.2018.2835502](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2835502).
- [19] H. Zhang, Y. Jiao, G. Zhao, and C. Zhang, "CRLH-SIW based leaky wave antenna with low cross-polarisation for Ku-band applications," *Electron Lett*, vol. 52, no. 17, pp. 1426-1428, 2016, doi: [10.1049/el.2016.1825](https://doi.org/10.1049/el.2016.1825).
- [20] G.C. Wu, G.M. Wang, H.X. Peng, J.G. Liang, and X-J. Gao, "Design of leaky-wave antenna with wide beam-scanning angle and low cross-polarisation using novel miniaturized composite right/left-handed transmission line," *IET Microw Antennas Propag*, vol. 10, no. 7, pp. 777-783, 2016, doi: [10.1049/iet-map.2015.0462](https://doi.org/10.1049/iet-map.2015.0462).
- [21] P. Belwal, R. Agrawal, and SC. Gupta "Substrate integrated waveguide leaky wave antenna with low cross polarization in X-Ku band," *Int J RF Microw. Comput. Aided Eng.*, vol. 28, no. 5, 2018, doi: [10.1002/mmce.21590](https://doi.org/10.1002/mmce.21590).
- [22] N. Nasimuddin, Z. N. Chen, and X. Qing, "Substrate Integrated Metamaterial-Based Leaky-Wave Antenna With Improved Boresight Radiation Bandwidth," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 7, pp. 3451-3457, July 2013, doi: [10.1109/TAP.2013.2256094](https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2256094).
- [23] W. Cao, Z. N. Chen, W. Hong, B. Zhang, and A. Liu, "A Beam Scanning Leaky-Wave Slot Antenna With Enhanced Scanning Angle Range and Flat Gain Characteristic Using Composite Phase-Shifting Transmission Line," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 11, pp. 5871-5875, Nov. 2014, doi: [10.1109/TAP.2014.2350512](https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2350512).
- [24] Sh. Yang , R. Cui , J. Liu, M. Wang, and L. Gao, "Fractal study of interporosity flow function and shape factor in rough fractured dual porous media," *Chemical Engineering Science*, vol. 280, p. 118960, 2023, doi: [10.1016/j.ces.2023.118960](https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118960).