



Conformal Leaky Wave Antennas Based on SIW Structure with Circular Polarization

H. Zamini¹, M. Afsahi^{2*}, H. R. Dalili Oskouei³, M. Mohammadi Shirkolaei⁴

² Associate Professor, University of Semnan, Semnan, Iran

(Received: 2023/05/07, Revised: 2023/07/07, Accepted: 2023/07/25, Published: 2023/08/24)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.7.3>

Abstract

In this article, a conformal leaky wave antenna with a substrate-integrated waveguide (SIW) structure on a new unit cell substrate is presented. The use of this new method eliminates the main problem of this type of antenna, which is the existence of a stop band (OSB), and enables the antenna to radiate in Broadside as well. In this article, after introducing the new unit cell, a flat leaky wave antenna with an integrated waveguide structure under the layer, which is able to continuously scan from -76.6 to $+27$ degrees by changing the feeding frequency, was designed and investigated. At the end, the proposed flat antenna is adapted on the surface of a cylinder with a radius of 425 mm. A conformal leaky wave antenna is able to continuously scan from -43 to $+37$ degrees by changing the feeding frequency. As a result, a scan with circular polarization from negative to positive angles, which also includes broadside radiation, has been obtained.

Keywords: : Leaky wave antenna, Substrate integrated waveguide, Composite right/left-handed (CRLH), Broadside Frequency, Conformal LWA.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

Authors



*Corresponding Author Email: m_afsahi@semnan.ac.ir

آنتن‌های موج نشتی خمیده مبتنی بر ساختار SIW با پلاریزاسیون دایروی

حسن زمینی^۱، مجید افصحی^{۲*}، حمیدرضا دلیلی اسکویی^۳، مرتضی محمدی شیرکلایی^۴

۱- دانشجوی دکتری و ۲- دانشیار، دانشگاه سمنان ۳- دانشیار و ۴- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۳، انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.7.3>



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

نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

در این مقاله، یک آنتن موج نشتی غیرمسطح خمیده با ساختار موج‌بر مجتمع شده در زیر لایه (SIW^1) بر بستر سلول واحد جدیدی ارائه شده است. استفاده از این روش مشکل عمده این نوع آنتن‌ها که وجود باند توقف (OSB^{2*}) بوده را مرتفع ساخته و آنتن را قادر به تشعشع در جهت عمود بر راستای آنتن (پهلوی آتش^۳) نیز می‌سازد. در این مقاله بعد از معرفی سلول واحد جدید ابتدا یک آنتن موج نشتی مسطح با ساختار موج‌بر مجتمع شده در زیر لایه طراحی و بررسی گردیده که قادر است از زاویه $۷۶/۶-۲۷+$ تا $۲۷+$ درجه را به طور پیوسته با تغییر فرکانس تغذیه جاروب نماید. در انتها آنتن مسطح پیشنهادی روی سطح یک استوانه به شعاع ۴۲۵ میلی‌متر تطبیق شده است. آنتن موج نشتی غیرمسطح نصب شده روی استوانه قادر است از زاویه $۴۳-۳۷+$ درجه را به طور پیوسته با تغییر فرکانس تغذیه جاروب نماید. در نتیجه یک جاروب با قطبش دایروی از زوایای منفی تا مثبت که شامل تشعشع عمود بر راستای آنتن نیز می‌باشد، حاصل گردیده است.

کلیدواژه‌ها: آنتن موج نشتی، موج‌بر مجتمع شده در زیر لایه، ساختار مرکب راست‌گرد-چپ‌گرد، آنتن موج نشتی غیرمسطح خمیده (تغییر شکل یافته)

۱- مقدمه

صفحه‌ای به دلیل طراحی و ساخت آسان مورد توجه قرار گرفته است. بارزترین مزیت این آنتن‌ها توانایی چرخش پرتو تابشی و پایش فضا می‌باشد. تغذیه ساده آنتن‌های موج نشتی برجسته-ترین مزیت آن نسبت به آنتن‌های آرایه فازی است. در آنتن‌های آرایه فازی، برای پایش فضا هر عنصر تشعشعی به طور جداگانه با اختلاف دهنده فاز و شبکه تغذیه پیچیده تحریک می‌شود. چرخش پرتو تابشی در آنتن‌های موج نشتی با تغییر فرکانس و یا یک اهرم خارجی انجام می‌شود. در حقیقت هر عاملی که ثابت فاز را نسبت به عدد موج فضای آزاد تغییر دهد موجب تغییر راستای پرتو آنتن می‌شود. از سال ۲۰۰۹ میلادی تا کنون آنتن‌های موج نشتی بر پایه موج‌برهای مجتمع شده در زیر لایه (SIW) طراحی و ساخته شده‌اند.

طراحی نمونه‌های اولیه از آنتن‌های موج نشتی توسط موج‌برهای معمولی انجام شده است. این‌گونه ساختارها هزینه زیادی داشته و ترکیب آن‌ها با سایر اجزای مدارات مسطح، مشکلاتی به همراه دارد [۳]. موج‌بر مجتمع شده در زیر لایه یک نوع موج‌بر مستطیلی است که از دو صفحه فلزی که توسط زیرلایه‌ی دی‌الکتریک از هم جدا شده، تشکیل شده است و

آنتن موج نشتی^۲ نوعی آنتن موج رونده می‌باشد که در آن امواج در طول هدایت در ساختار، به فضای بیرون نشت می‌کنند. تعریف دیگری برای آنتن‌های موج نشتی بیان شده است که آن یک ساختار دو دهانه‌ای نامیده می‌شود که موج در راستای انتشار از دهانه ورودی به دهانه خروجی به بیرون نشت می‌کند و الگو تشعشعی آنتن را شکل می‌دهد. این آنتن‌ها با ایجاد اختلال (به صورت یک پارچه یا متناوب) در یک ساختار هدایت‌کننده موج تحقق می‌یابند [۱]. اولین آنتن موج نشتی توسط آقای هنسن [۲] در سال ۱۹۴۰ میلادی با معرفی ساختار یک موج‌بر مستطیلی دارای یک شکاف طولی پیوسته بر دیواره باریک موج‌بر پیوسته مطرح شد. در سال‌های اخیر ساختار آنتن موج نشتی

* رایانامه نویسنده مسئول: m_afsahi@semnan.ac.ir

¹* SIW: Substrate Integrated Waveguide

²* Open Stop Band

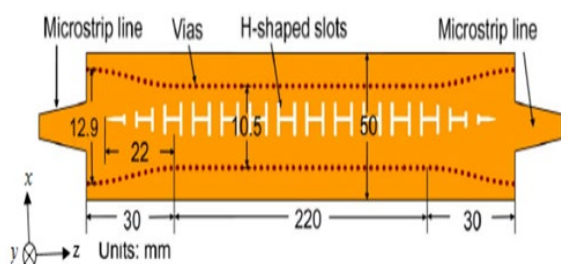
³* Broadside

² Leaky-Wave Antenna

درجه گردیده است. در بازه فرکانسی ۱۰/۶۵ تا ۱۲/۹۵ گیگا هرتز دارای قطبش دایروی می‌باشد. برای صحت طراحی ساختار پیشنهادی، نتایج با استفاده از دو نرم افزار تمام موج (HFSS و CST) با هم مقایسه شده‌اند. در نهایت مقادیر مقایسه نتایج آنتن پیشنهادی با سایر آنتن‌ها در جدول (۳) آورده شده است.

۲- بررسی یک آنتن موج نشتی ذاتا راستگرد

ساختار آنتن پیشنهادی در مقاله [۸] یک موج‌بر مجتمع شده در زیرلایه با شکاف H شکل است. این ساختار شامل شکاف‌های طولی و عرضی به طور همزمان است و این امر باعث می‌شود تا هر دو جریان‌های سطحی J_x و J_y را قطع کند. شکل (۱) ساختار این آنتن را نشان می‌دهد [۸]. این ساختار در بازه فرکانسی ۹/۹ GHz تا ۱۱/۷ GHz، بهره بین ۸ تا ۱۵ دسیبل دارد. این آنتن از زاویه ۱۵+ تا ۸۰+ درجه را به خوبی جاروب فرکانسی می‌کند ولی قادر به جاروب زوایای منفی نمی‌باشد.



شکل (۱): آنتن موج نشتی با شکاف H شکل [۸].

آنتن‌های موج نشتی از لحاظ منطقه جاروب زاویه‌ای، به سه حالت زیر تقسیم می‌شوند:

- ۱- آنتن موج نشتی راستگرد (RH^3).
- ۲- آنتن موج نشتی چپگرد (LH^4).
- ۳- آنتن موج نشتی مرکب راستگرد_چپگرد ($CRLH^5$).

اکثر آنتن‌های موج نشتی دارای پرتو روبه‌جلو هستند، یعنی از نزدیکی‌های پهلوی آتش تا سر آتش را به خوبی جاروب می‌کنند؛ همانند آنتن‌های H و I شکل پیشنهاد شده در مقاله‌های [۸] و [۹] که از نوع آنتن موج نشتی راستگرد هستند. یک مشکل عمده آنتن‌های موج نشتی وجود باند توقف است که منجر به عدم تشعشع در فرکانس پهلوی آتش می‌شود. دلیل آن این است که موج رونده در آنتن موج نشتی به موج ساکن در فرکانس پهلوی آتش تبدیل می‌شود [۱۰].

دیواره جانبی را ردیفی از سوراخ‌ها پر شده با فلز (وایا)^۱ ایجاد می‌کنند. استفاده از مواد دی‌الکتریک و وایا این امکان را به SIW می‌دهد که مزایایی از قبیل تلفات کم، حجم کم و سازگاری با مدارهای مسطح را داشته باشد و علاوه بر این، مزایایی همانند موج‌برهای مستطیلی متداول از قبیل ضریب کیفیت، ظرفیت توان قابل حمل و ایزولاسیون بسیار خوب را داشته باشد.

استفاده روزافزون از آنتن‌های موج نشتی در ماهواره‌ها، ادوات پزشکی و اسکن بارهای گمرکی و غیره [۷-۴]، باعث شده تا تحقیقات در حوزه این نوع آنتن‌ها علاوه بر افزایش جاروب فرکانسی از محدوده عقب تا به جلو جهت رفع مشکل استفاده از این نوع آنتن‌ها در سطوح خمیده باشد. علاوه بر موضوعات فوق مشکل دیگر این نوع آنتن‌ها وجود باند توقف (OSB) است که منجر به عدم تشعشع در فرکانسی می‌شود که پرتو آنتن عمود بر راستای آنتن (پهلوی آتش) است. همان‌طور که اشاره گردید، یکی از مهم‌ترین نیازمندی‌های مهم در سیستم‌های ارتباطی و راداری، وجود یک آنتن باقابلیت نصب بر روی سطوح غیرمسطح و دارای زاویه جاروب وسیع جهت پوشش فضا می‌باشد. به دلیل مزیت انطباق‌پذیری، این نوع آنتن‌ها قابلیت نصب بر روی بدنه پهپادها و هواپیماها را دارند. علاوه بر این می‌توان با نصب این آنتن‌ها بر روی ستون‌ها و سطوح خمیده در گیت‌های فرودگاهی و مکان‌های حساس جهت اسکن افراد و وسایل از آن بهره برد. آنتن‌های موج نشتی خمیده جزء آنتن‌های غیرمسطح و پیاده-سازی شده روی یک سطح هستند و می‌توان به راحتی آنها را روی سطوح منحنی، خم و پیاده‌سازی نمود. لازم به توضیح می‌باشد که آنتن‌های موج نشتی خمیده تمام مزایای آنتن‌های موج نشتی مسطح را دارا هستند.

هدف از این مقاله معرفی و طراحی آنتن موج نشتی بر پایه موج‌بر مجتمع شده در زیرلایه است که علاوه بر جاروب از عقب تا روبه‌جلو، قادر به تشعشع پهلوی آتش بوده و قابلیت پیاده‌سازی روی سطوح خمیده را داشته باشد. برای این منظور ابتدا به بررسی یک آنتن مسطح پرداخته شده است. آنتن پیشنهادی مسطح با سلول واحد معرفی شده در بازه فرکانسی ۸/۶ تا ۱۲/۸ گیگا هرتز قادر به جاروب زاویه‌ای ۷۶/۶- تا ۲۷+ درجه گردیده و در بازه فرکانسی ۱۰/۷ تا ۱۲/۵ گیگا هرتز دارای قطبش دایروی می‌باشد. همچنین دارای بیشینه بهره ۱۶/۶ دسی بل می‌باشد. سپس آنتن غیر مسطح خمیده^۲ طراحی و مورد بررسی قرار گرفته است. آنتن پیشنهادی غیر مسطح خمیده در بازه فرکانسی ۸/۹ تا ۱۳/۲ گیگا هرتز قادر به جاروب زاویه‌ای از ۴۳- تا ۳۷+

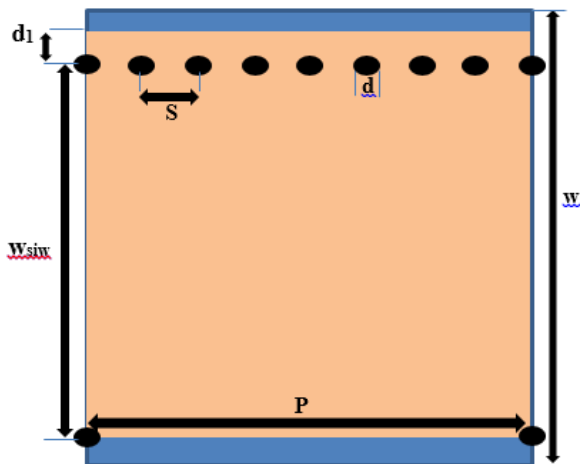
³ RH: Right Handed

⁴ LF: Left Handed

⁵ CRLH: Composite Right/Left-Handed

¹ Via

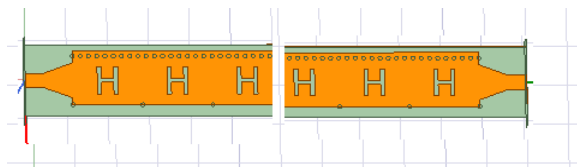
² Conformal



شکل (۲): شکل سلول زیر لایه پیشنهادی.

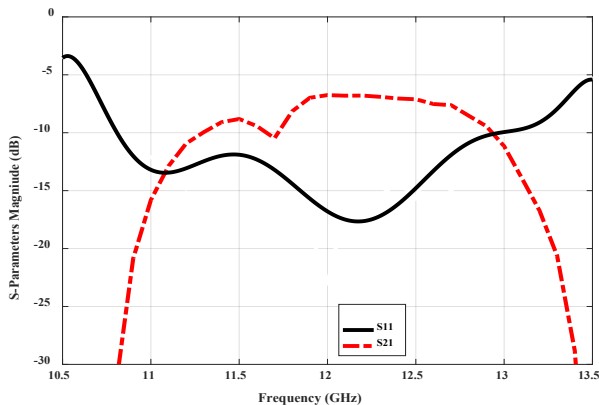
۳-۱- آنتن SIW پیشنهادی با شکاف H شکل

سلول زیر لایه آنتن پیشنهادی که در شکل (۲) نشان داده شده است این توانایی را به آنتن های ذاتا راستگرد می دهد که بتوانند زوایای منفی را نیز جاروب نمایند. برای اثبات این موضوع آنتن SIW با شکل H در سلول واحد پیشنهادی طراحی شده است. (شکل ۳).



شکل (۳): آنتن SIW با شکاف H شکل با سلول زیر لایه پیشنهادی.

متغیرهای پراکندگی آنتن SIW با شکاف H شکل، در شکل (۴) نشان داده است. مشاهده می شود که ضریب انعکاس در پهنای باند ۱۰/۷ GHz تا ۱۳/۴ GHz کمتر از ۸ dB- بدست آمده است. نمودار ضریب انتقال نیز نشان دهنده عملکرد تابش خوب آنتن است.



شکل (۴): نمودار متغیرهای پراکندگی آنتن H شکل معرفی شده.

یکی از مزیت های استفاده از مواد دی الکتریک در زیر لایه این است که علاوه بر انتشار موج به صورت عادی، انتشار موج به صورت چپ گرد نیز میسر می شود. روش های متفاوتی برای پیاده سازی ساختار مرکب راست گرد_چپ گرد وجود دارد، از جمله می توان به خازن های اینتر دیجیتال اشاره کرد. آنتن پیشنهاد شده در مقاله [۱۱] از این نوع می باشد. آنتن های موج نشستی مرکب راست گرد_چپ گرد، پرتو اصلی را در دو جهت روبه عقب و روبه جلو جاروب می کنند. با فراهم کردن شرط تعادل برای سلول واحد CRLH، یک جاروب پیوسته از عقب تا جلو که شامل پهلو آتش نیز می شود حاصل می گردد. اما فراهم کردن شرط تعادل برای این نوع آنتن ها آسان نیست. تحقیقات محدودی در این زمینه انجام شده است.

فناوری حذف بازگشتی (RC¹) به همراه شکاف ای طولی و عرضی نامتقارن موازی یا متقاطع که در آنتن های پیشنهادی در مقاله [۱۲] و [۱۳] استفاده شده است از این نوع هستند.

در این مقاله، سه مرحله ذیل مورد بررسی قرار گرفته است:

- ۱- معرفی سلول واحد.
- ۲- طراحی و شبیه سازی یک آنتن موج نشستی مسطح بر پایه موج بر مجتمع شده در زیر لایه معرفی شده.
- ۳- پیاده سازی آنتن پیشنهادی مسطح بند فوق به شکل آنتن غیر مسطح و پیاده سازی شده روی سطح یک استوانه.

در مراحل فوق، بررسی دقیق رفتار فرکانسی انجام شده است.

۳- معرفی ساختار مورد استفاده

در طراحی آنتن های پیشنهادی این مقاله از سلول زیر لایه ارائه شده در مقاله [۱۴] استفاده شده است (شکل ۲).

سلول پیشنهادی شامل دو ردیف وایا با قطر d می باشد. فاصله مرکز به مرکز دو وایا مجاور در ردیف بالا به اندازه s می باشد. فاصله مرکز به مرکز دو وایا مجاور در ردیف پایین به اندازه p می باشد. این دو ردیف وایا با فاصله w_{siw} از هم قرار دارند. مقادیر متغیرهای w_{siw} ، d و s از روابط (۱) الی (۳) محاسبه شده است [۱۵-۱۶].

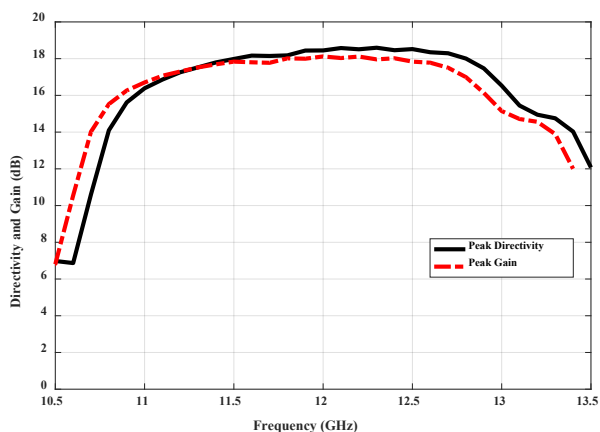
$$d \leq \frac{\lambda_g}{5} \quad (1)$$

$$S \leq 2d \quad (2)$$

$$w_{siw} = w_{eff} + s * (0.766e^{0.4482d/s} - 1.176e^{-1.214d/s}) \quad (3)$$

(۳)

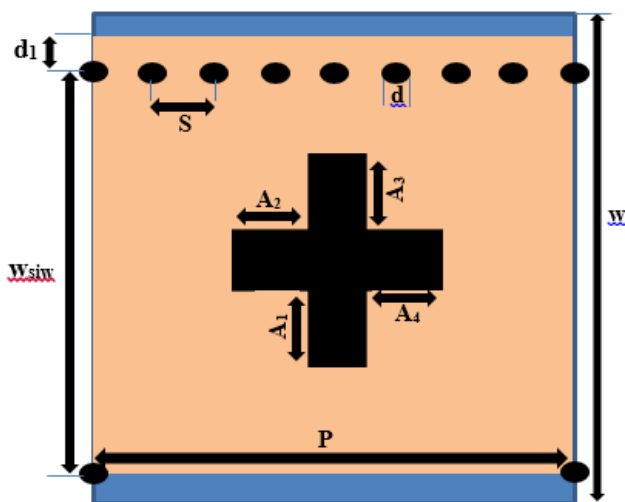
¹ Reflection Cancellation Technique



شکل (۷): بهره و جهت دهی آنتن H شکل معرفی شده.

۴- طراحی سلول واحد آنتن پیشنهادی

آنتن‌های موج نشستی از شکاف‌هایی که در روی سطح فوقانی موج‌بر تعبیه شده است برای نشت توان به فضای پیرامون استفاده می‌کنند. در آنتن‌های مختلف، شکل قرارگیری شکاف‌ها متفاوت می‌باشد. در آنتن موج نشستی، طراحی سلول واحد دارای اهمیت زیادی می‌باشد. زیرا با بررسی سلول واحد می‌توان بسیاری از خواص و رفتارهای فرکانسی آنتن را تشخیص داد. سلول واحد آنتن مسطح پیشنهادی در شکل (۸) نشان داده شده است.



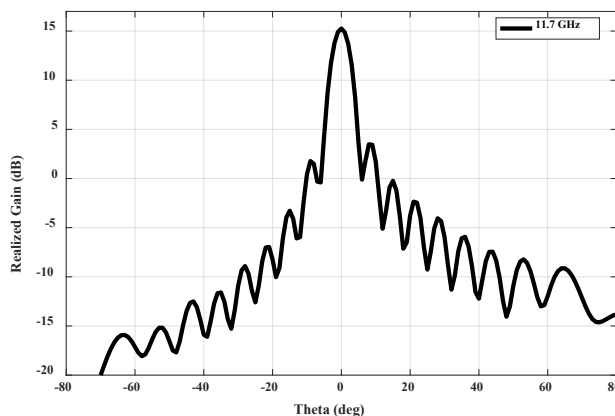
شکل (۸): سلول واحد پیشنهادی.

اندازه متغیرهای ساختار سلول واحد پیشنهادی در (جدول ۱) آمده است.

جدول (۱): اندازه متغیرهای سلول واحد (برحسب mm)

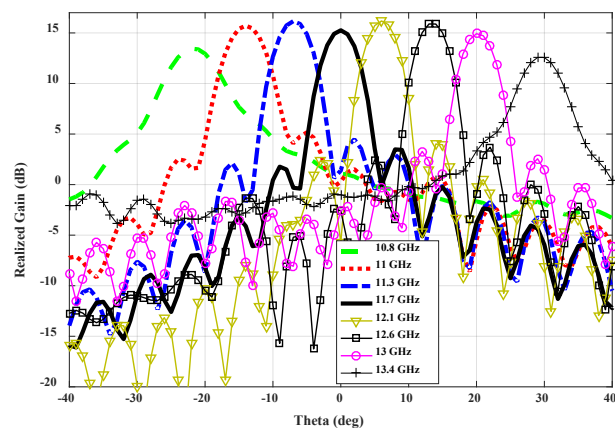
s	۲	d ₁	۱/۸	A ₃	۳
d	۰/۸	P	۱۶	A ₄	۱/۵
w	۱۸/۱۴	A ₁	۳	h	۰/۷۵۷
W _{siw}	۱۲/۵۴	A ₂	۱/۵		

الگوی تابش آنتن در فرکانس ۱۱/۷ GHz در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۵) نشان داده شده است این آنتن در فرکانس ۱۱/۷ GHz، تشعشع پهلو آتش را نیز دارا می‌باشد.



شکل (۵): الگوی تابش آنتن در فرکانس ۱۱/۷ GHz.

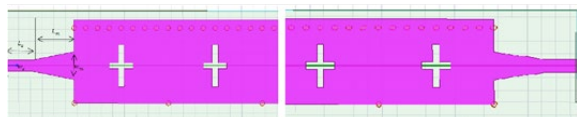
در شکل (۶) الگوی پرتو چند فرکانس مختلف در بازه فرکانسی ۱۰/۸ GHz تا ۱۳/۴ GHz نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود آنتن ارائه شده، قادر است در این بازه فرکانسی، از زاویه ۲۳- تا ۳۱+ درجه را به طور پیوسته با تغییر فرکانس تغذیه جاروب نماید.



شکل (۶): الگوی تابش آنتن H شکل معرفی شده در فرکانسهای مختلف.

در شکل (۷) نمودار بهره و جهت‌دهی آنتن بر حسب فرکانس نشان داده شده است. بهره آنتن تقریباً یکنواخت و بالای ۱۶ dB می‌باشد. مشاهده می‌شود که آنتن بهره و جهت‌دهی مطلوبی در بازه فرکانسی ۱۰/۸ GHz تا ۱۳/۴ GHz دارد و به معنی تشعشع موج نشستی از آنتن با بهره مناسب در کل ناحیه جاروب می‌باشد.

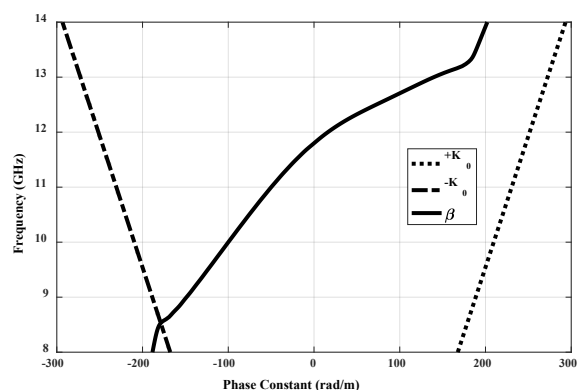
پهنای ۱ mm می باشد. طول آنتن با احتساب بخش تغذیه ۲۴۷mm می باشد. در آنتن ارائه شده از زیر لایه Rogers RT5880 با $\epsilon_r = 2.2$ و تانژانت تلفات 0.001 با عرض $18/14$ mm و ارتفاع 0.787 mm استفاده شده است. ارتفاع و قطر وایا به ترتیب 0.787 mm و 0.8 mm و فاصله متوالی بین دو وایا در ردیف بالایی ۲ mm و ردیف پایینی ۱۶ mm و فاصله عرضی مرکز به مرکز دو ردیف وایا $12/54$ mm می باشد.



شکل (۱۰): آنتن مسطح پیشنهادی.

یکی از مزایای آنتن های موج نشستی بر پایه ساختار موج بر مجتمع شده در زیر لایه، تغذیه ساده با استفاده از خط ریزنوار^۱ است. تغذیه این ساختار به نحو مطلوبی، تلفات بازگشتی ساختار را کم می کند. در آنتن مسطح پیشنهادی از خطوط ریزنوار باریک شونده^۲ در دو سر آنتن استفاده شده است. مقادیر L_t و W_t طول و عرض خط باریک شونده برای برقراری تطبیق امپدانس می باشند. اندازه متغیر L_s برای جلوگیری از تداخل مدهای ناخواسته ناشی از کانکتور SMA می باشد. تغذیه آنتن با یک خط میکرواستریپ به طول $11/5$ میلی متر است که برای تطبیق امپدانس عرض آن از $4/64$ mm در محل اتصال آنتن به $1/92$ mm در محل اتصال کانکتور SMA کاهش پیدا می کند. اندازه متغیر L_s برابر با $4/5$ mm است.

نمودار پاشندگی آنتن مسطح پیشنهادی در شکل (۱۱) آمده است.

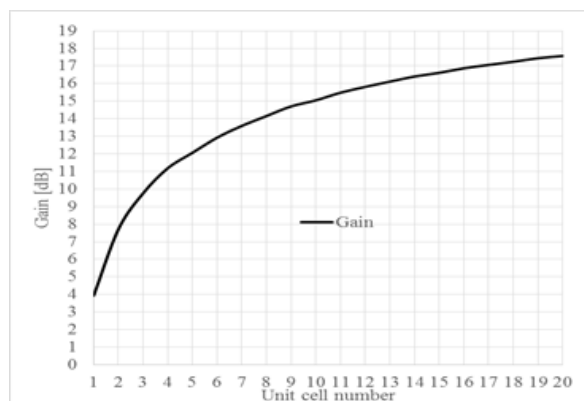


شکل (۱۱): نمودار پاشندگی آنتن مسطح پیشنهادی.

۴-۱- طراحی آنتن موج نشستی مسطح پیشنهادی

تعداد سلول واحد اهمیت زیادی در عملکرد آنتن دارد. اگر تعداد سلول واحد به اندازه کافی نباشد میزان توانی که به بار تطبیقی در انتهای ساختار می رسد زیاد شده و مقدار توان نشستی به بیرون ساختار کمتر از میزان مورد نظر است و در نتیجه عملکرد تشعشعی نامناسب آنتن را به دنبال خواهد داشت [۱۷].

برای به دست آوردن تعداد سلول واحد می توان از منحنی بهره ساختار استفاده کرد به طوری که تعداد سلول واحد را مرحله به مرحله زیاد کرد و در هر مرحله بهره آنتن را برای یک فرکانس مشخص مثلاً $11/815$ GHz (فرکانس پهلو آتش) اندازه گیری کرد. ملاحظه می شود که بهره آنتن پس از یک تعداد معینی از سلول واحد افزایش چندانی ندارد. شکل (۹) منحنی بهره آنتن مسطح پیشنهادی بدون قسمت تطبیق امپدانس نسبت به تعداد سلول واحد در فرکانس $11/815$ GHz را نشان می دهد. از نمودار مشخص می شود که از حدود ۱۴ سلول پایه به بعد، بهره آنتن با افزایش تعداد سلول واحد تغییر چندانی ندارد. در طراحی آنتن سعی می شود که ابعاد آنتن به حداقل برسد؛ بنابراین با توجه به نمودار بهره، تعداد ۱۴ سلول واحد برای طراحی آنتن در نظر گرفته شده است.

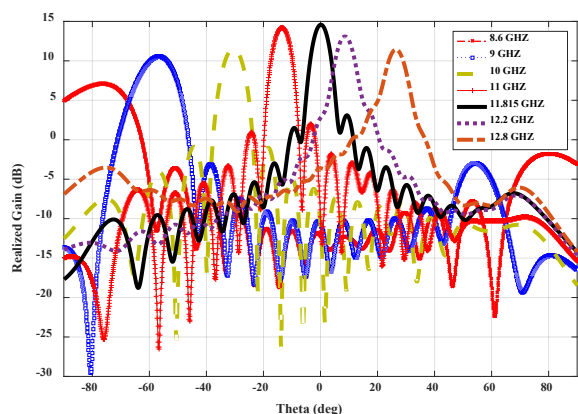


شکل (۹): منحنی بهره آنتن نسبت به تعداد سلول واحد در فرکانس $11/815$ GHz.

آنتن مسطح پیشنهادی بر روی یک موج بر مجتمع زیر لایه پیاده شده است. موج بر از دو صفحه پهن رسانا در بالا و پایین، یک زیر لایه و وایاهایی که دو صفحه بالا و پایین را به هم متصل می کنند تشکیل شده است. شکافها بر روی صفحه بالایی زیر لایه ایجاد شده است و تشعشع از طریق آنها صورت می گیرد. دو نوع شکاف عرضی و طولی در صفحه بالایی زیر لایه وجود دارد. نمای آنتن مسطح پیشنهادی در شکل (۱۰) آمده است. صفحه بالایی زیر لایه، دارای ۱۴ شکاف می باشد که با فاصله p از هم قرار دارند. اندازه شکاف طولی و عرضی به ترتیب 7 mm و 4 mm و به

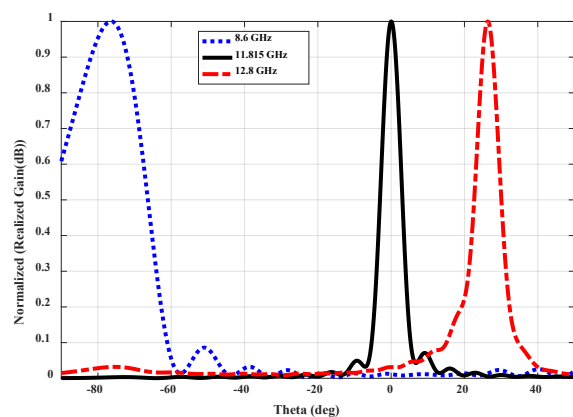
¹ Microstrip

² Taper



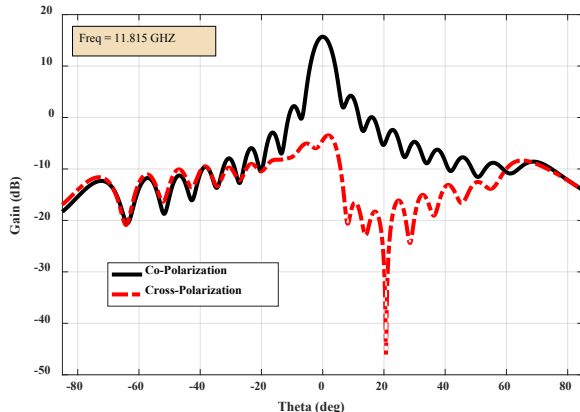
شکل (۱۳): الگوی تابش آنتن در چند فرکانس مختلف

در شکل (۱۴) پترن نرمالیزه در سه نقطه انتهای چپگرد و برودساید و انتهای راستگرد ترسیم شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود آنتن پیشنهادی قادر است در فرکانس پهلوآتش نیز بدون افت بهره نسبت به فرکانس‌های مجاور تشعشع کند.



شکل (۱۴): پترن نرمالیزه آنتن در فرکانس‌های ۸/۶ GHz، ۱۱/۸۱۵ GHz و ۱۲/۸ GHz

در شکل (۱۵)، نمودارهای co-pol و cross-pol آنتن طراحی شده در فرکانس ۱۱/۸۱۵ GHz نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود پلاریزاسیون متقاطع این آنتن در فرکانس گذر برابر با ۲۰ dB می‌باشد.



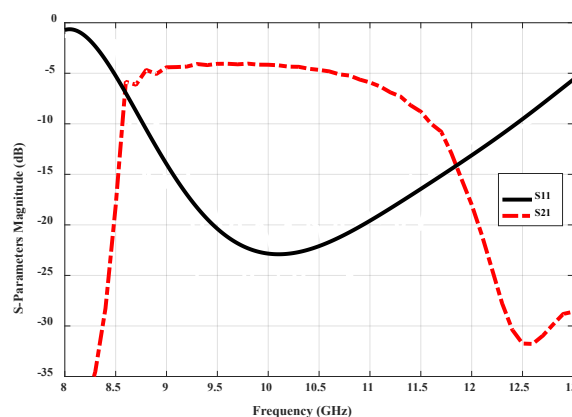
شکل (۱۵): الگوی تابش در فرکانس ۱۱/۸۱۵ GHz

همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است نمودار پاشندگی آنتن مسطح پیشنهادی در محدوده فرکانسی ۸/۶ GHz تا ۱۴ GHz در ناحیه نشستی قرار دارد. ساختار پیشنهادی در محدوده ۸/۶ GHz تا ۱۱/۸۱۵ GHz خاصیت چپ گردی دارد (ثابت فاز منفی اما شیب نمودار مثبت- سرعت فاز و سرعت انرژی در خلاف جهت هم می‌باشند). این ساختار در محدوده ۱۱/۸۱۵ GHz تا ۱۳/۵ GHz خاصیت راستگردی دارد (ثابت فاز و شیب نمودار مثبت- سرعت فاز و سرعت انرژی جهت هم می‌باشند). در فرکانس ۱۱/۸۱۵ GHz مقدار ثابت فاز صفر شده (فرکانس گذر) و پترن آنتن در این فرکانس عمود بر راستای آنتن (پهلواتش) می‌باشد.

۴-۲- نتایج شبیه سازی

آنتن مسطح پیشنهادی (شکل ۱۰) به کمک نرم‌افزار HFSS شبیه سازی شده است.

نمودار متغیرهای پراکندگی آنتن در شکل (۱۲) آمده است. همانطوری که مشاهده می‌شود ضریب انعکاس در پهنای باند ۸/۶ GHz تا ۱۲/۵ GHz کمتر از ۱۰ dB- اندازه‌گیری شده است. نمودار ضریب انتقال نیز نشان دهنده عملکرد تابش خوب آنتن است.



شکل (۱۲): متغیر پراکندگی آنتن مسطح پیشنهادی.

در شکل (۱۳) الگوی پرتو چند فرکانس نمونه در بازه ۸/۶ GHz تا ۱۲/۸ GHz نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود آنتن طراحی شده قادر است از زاویه ۷۶/۶- تا ۲۷+ درجه را به طور پیوسته با تغییر فرکانس تغذیه جاروب نماید.

جدید، همان آنتن موج نشستی خمیده می باشد. آنتن های موج نشستی خمیده تمام مزایای آنتن های موج نشستی را دارا هستند. به همین دلایل، امروزه در وسایل نقلیه، ماهواره، پهپاد، هواپیما و غیره کاربردهای زیادی دارند. در طراحی این نوع آنتن ها از روابط آنتن های SIW استفاده می شود. خصوصیات تشعشی آنتن های موج نشستی خمیده، عمدتاً توسط ثابت انتشار پیچیده آنها تعیین می شود. برای توضیح درباره فیزیک انتشار و طراحی آنتن های موج نشستی خمیده، از شکل منحنی آنتن پیشنهادی در مقاله های [۱۸-۱۹] استفاده شده است.

۵-۱- طراحی آنتن غیر مسطح خمیده

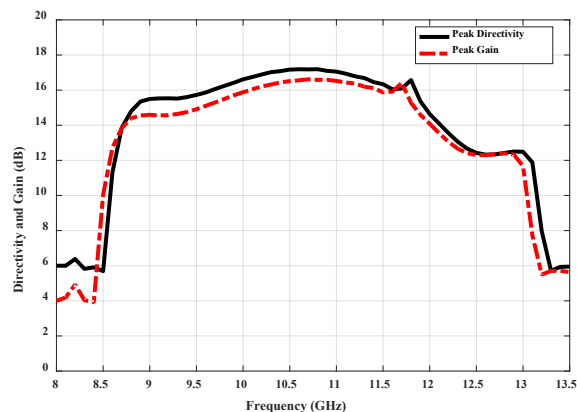
در طراحی آنتن خمیده پیشنهادی، از ساختار سلول واحد آنتن مسطح پیشنهادی شکل (۸) استفاده شده است. پهنای شکافها به کمک نرم افزار HFSS بهینه شده است. اندازه متغیرهای ساختار سلول واحد در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): اندازه متغیرهای سلول واحد شکل (۸).

پارامتر	اندازه (mm)
S	۲
d	۰/۸
w	۲۸/۵۴
w _{siw}	۱۲/۵۴
d _۱	۲
P	۱۶
A _۱	۳
A _۲	۱/۵
A _۳	۳
A _۴	۱/۵
h	۰/۷۵۷

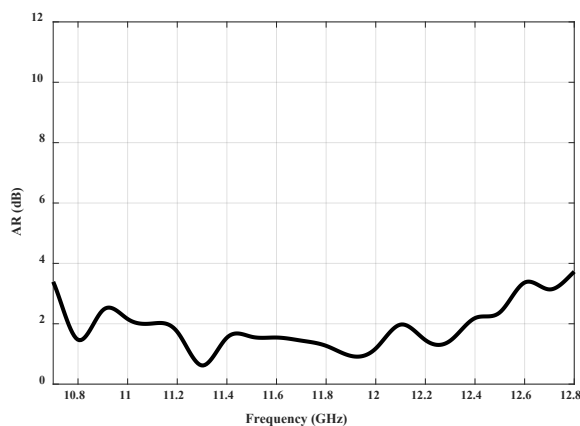
آنتن مسطح پیشنهادی روی سطح یک استوانه به شعاع ۴۲۵ میلیمتر خم و پیاده سازی شده است. عملکرد استوانه در محور Z در جهت Y ($Z(y)$) بصورت دایروی است که آنتن خمیده پیشنهادی بصورت قطاعی از این دایره می باشد. زاویه جاروب مورد نظر در زاویه ۴۵ درجه ($\theta_{rad} = 45^\circ$) تنظیم شده است. برای دستیابی به زاویه جاروب مورد نظر شعاع استوانه تقریباً برابر با $R = 15\lambda_0$ انتخاب و طول آنتن هم برابر با $L_{Antenna} = 10\lambda_0$ می باشد. در آنتن ارائه شده از زیر لایه Rogers RT5880 با عرض ۲۸/۵۴ mm استفاده شده است. ارتفاع و قطر وایا به ترتیب ۰/۷۸۷ mm و ۰/۸ mm و فاصله متوالی بین دو وایا در یک ردیف ۲ mm و در دیگری ۱۶ mm و فاصله عرضی مرکز به

در شکل (۱۶) نمودار بهره و جهت دهی آنتن پیشنهادی بر حسب فرکانس نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می شود آنتن بهره و جهت دهی مطلوبی در محدوده فرکانسی ۸/۶GHz تا ۱۲/۸ GHz دارد. این به معنی تشعشع موج نشستی از آنتن با بهره مناسب در کل ناحیه جاروب می باشد.



شکل (۱۶): بهره و جهت دهی آنتن مسطح پیشنهادی.

در شکل (۱۷) نمودار AR^1 آنتن موج نشستی مسطح پیشنهادی نشان داده شده است. تقریباً در بازه فرکانسی ۱۰/۷GHz تا ۱۲/۵ GHz گیگا هرتز مقدار AR کمتر از ۳ dB است که نشان دهنده قطبش دایروی آنتن موج نشستی در این بازه فرکانسی است.



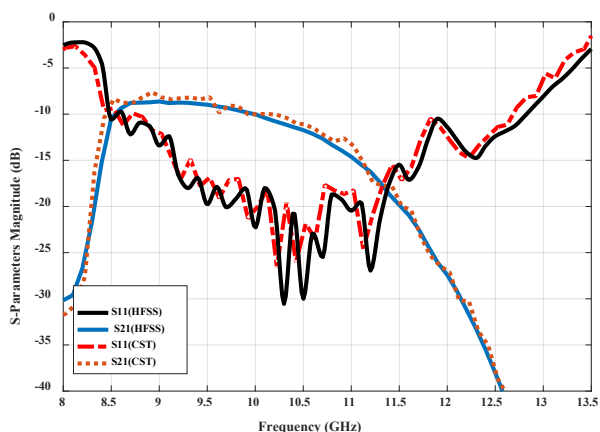
شکل (۱۷): نمودار AR آنتن پیشنهادی.

۵- آنتن های موج نشستی خمیده

آنتن های موج نشستی خمیده جزء آنتن های غیر مسطح و پیاده سازی شده بر روی یک سطح هستند. اگر در زیر لایه آنتن های موج نشستی مبتنی بر موج بر مجتمع شده در زیر لایه از مواد انعطاف پذیر استفاده شود می توان به راحتی آنها را روی سطوح منحنی مختلف، خم و پیاده سازی نمود. آنتن تغییر شکل یافته

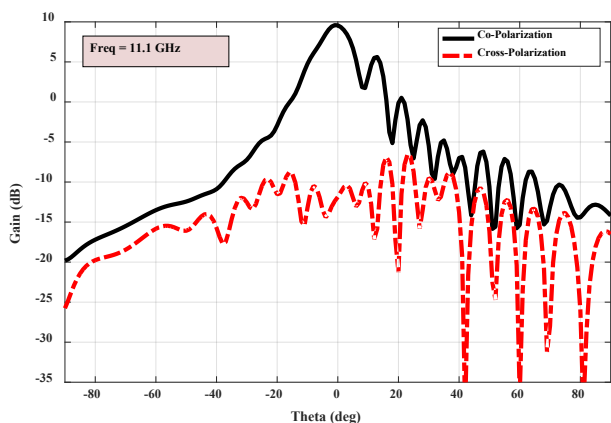
¹ Axial Ratio

نتایج شبیه‌سازی متغیرهای ضریب انعکاس و ضریب انتقال آنتن غیرمسطح خمیده پیشنهادی در شکل (۲۰) آمده است. نمودار خط ممتد نتایج حاصل از نرم افزار HFSS و نمودار خط چین نتایج حاصل از نرم افزار CST می‌باشد. همانطوریکه مشاهده می‌شود ضریب انعکاس در پهنای باند $8/6$ GHz تا $12/85$ GHz کمتر از -10 dB - اندازه‌گیری شده است. نمودار ضریب انتقال نیز نشان دهنده عملکرد تابش خوب آنتن است.



شکل (۲۰): نمودار پراکندگی آنتن غیر مسطح پیشنهادی.

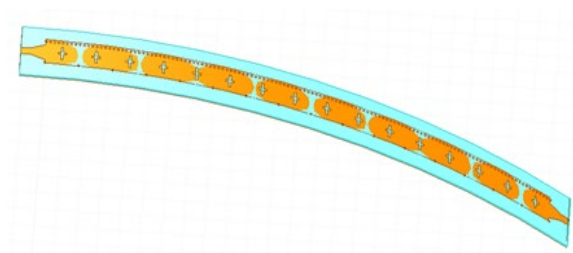
در شکل (۲۱)، نمودارهای co-pol و cross-pol آنتن غیر مسطح طراحی شده در فرکانس $11/1$ GHz گیگاهرتز نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود پلاریزاسیون متقاطع این آنتن در فرکانس گذر برابر با 20 dB می‌باشد.



شکل (۲۱): الگو تابش در فرکانس $11/1$ GHz.

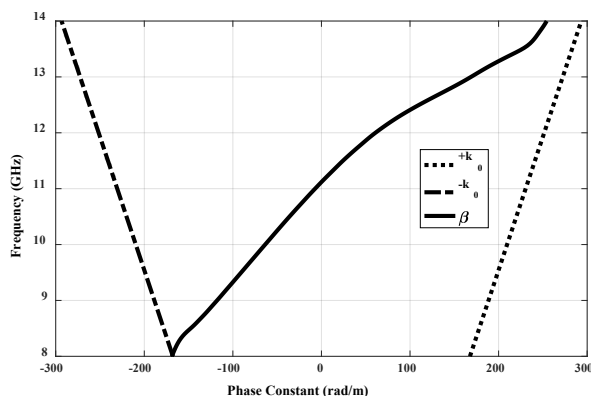
در شکل (۲۲-الف) الگوی پرتو چند فرکانس نمونه حاصل از نرم افزار HFSS و در شکل (۲۲-ب) الگوی بدست آمده از نرم افزار CST در بازه $8/9$ GHz تا $13/2$ GHz نشان داده شده است. همچنین در شکل (۲۳) پترن نرمالیزه در سه نقطه انتهایی چپگرد، برودساید و انتهایی راستگرد ترسیم شده است.

مرکز دو ردیف وایا $12/54$ mm می‌باشد. تغذیه آنتن با یک خط میکرواستریپ به طول $11/5$ mm که برای تطبیق امپدانس عرض آن از $6/903$ mm در محل اتصال آنتن به $2/611$ mm در محل اتصال کانکتور SMA کاهش پیدا می‌کند. آنتن غیرمسطح پیشنهادی با استفاده از دو نرم‌افزار تمام موج HFSS و CST شبیه‌سازی و در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

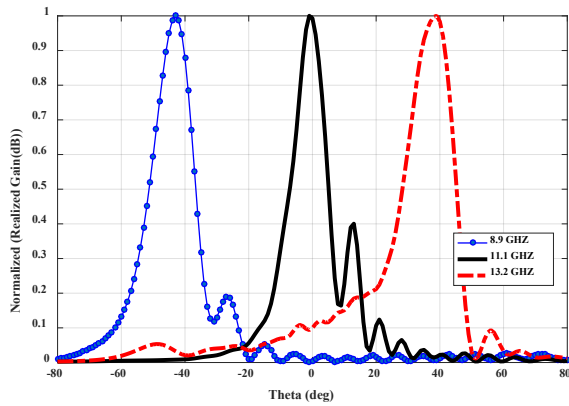


شکل (۱۸): آنتن غیر مسطح خمیده پیشنهادی.

نمودار پاشندگی آنتن غیرمسطح خمیده پیشنهادی در شکل (۱۹) آمده است. همانطور که در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود نمودار پاشندگی آنتن مسطح پیشنهادی در محدوده فرکانس 8 GHz تا 14 GHz در ناحیه نشتی قرار دارد. ساختار پیشنهادی در محدوده $8/8$ GHz تا $11/1$ GHz خاصیت چپ گردی دارد (ثابت فاز منفی اما شیب نمودار مثبت- سرعت فاز و سرعت انرژی در خلاف جهت هم می‌باشند). این ساختار در محدوده $11/1$ GHz تا $13/2$ GHz خاصیت راستگردی دارد (ثابت فاز و شیب نمودار مثبت- سرعت فاز و سرعت انرژی هم جهت می‌باشند). در فرکانس $11/1$ GHz مقدار ثابت فاز صفر شده (فرکانس گذر) و پترن آنتن در این فرکانس عمود بر راستای آنتن (پهلواتش) می‌باشد.

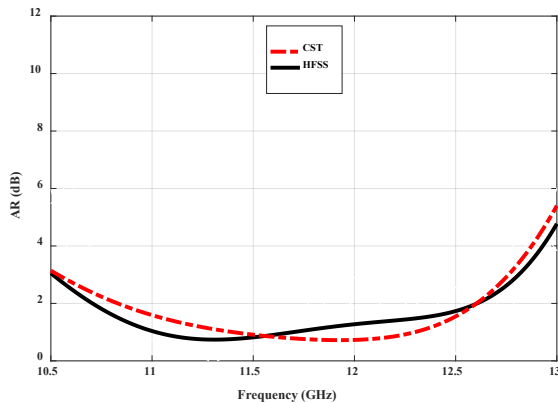


شکل (۱۹): نمودار پاشندگی آنتن غیر مسطح پیشنهادی.



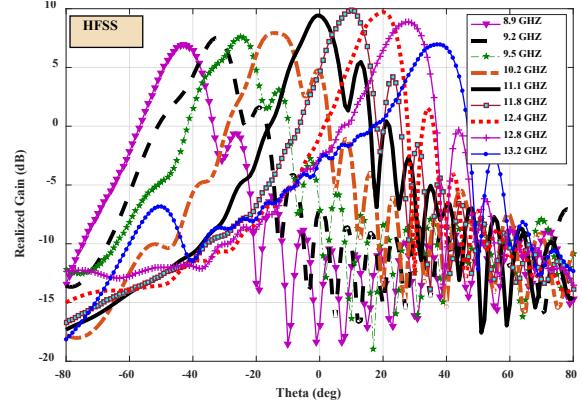
شکل (۲۳): بهره نرمالیزه در فرکانس های ۸/۹GHz، ۱۱/۱GHz و ۱۳/۲GHz.

در شکل (۲۴) نمودار AR آنتن موج نشستی خمیده پیشنهادی نشان داده شده است. نمودار خط ممتد نتایج حاصل از نرم افزار HFSS و نمودار خط چین نتایج حاصل از نرم افزار CST می باشد. تقریباً در بازه فرکانسی ۱۰/۶۵ GHz تا ۱۲/۹۵ GHz مقدار AR کمتر از ۳ dB است که نشان دهنده قطبش دایروی آنتن موج نشستی در این بازه فرکانسی است.

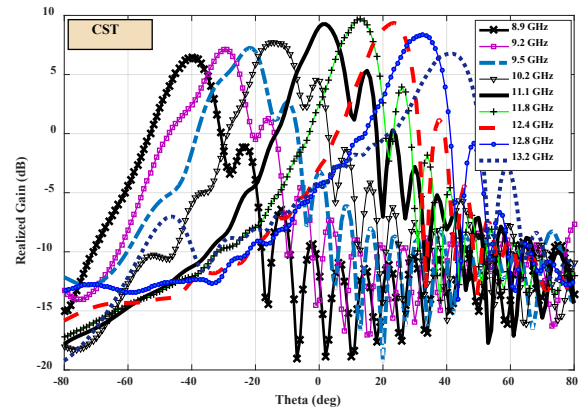


شکل (۲۴): نمودار AR آنتن غیر مسطح پیشنهادی.

همانطوریکه مشاهده می شود آنتن طراحی شده قادر است از زاویه -۴۳ تا $+۳۷$ درجه را به طور پیوسته با تغییر فرکانس تغذیه جاروب نماید.



(الف)



(ب)

شکل (۲۲): الگو تابش آنتن خمیده طراحی شده (الف): با نرم افزار HFSS (ب): با نرم افزار CST.

جدول (۳): مقایسه آنتن پیشنهادی با برخی آنتن های ارائه شده در مقالات

Antenna Ref.	پهنای باند عملیاتی (GHz)	زاویه جاروب (Deg.)	باند فرکانسی دارای قطبش دایروی (GHz)	بیشینه بهره (dB)
آنتن SIW با طول و عرض نامتقارن مقاطع [۱۱]	۹/۲ تا ۱۴/۱	-۶۰ تا $+۲۰$ (۸۰)	۹/۲ تا ۱۴/۱	۱۵
آنتن SIW با طول و عرض نامتقارن موازی [۱۲]	۱۲ تا ۱۶/۵	-۳۲ تا $+۲۷$ (۵۹)	ندارد	۱۲/۵
آنتن SIW غیر مسطح خمیده مقاله [۱۳]	۷/۳ تا ۱۰/۳	-۸۹ تا $+۱۹$ (۱۰۳)	ندارد	۱۲
آنتن SIW غیر مسطح خمیده مقاله [۲۰]	۱۴ تا ۱۸	$+۲۰$ تا $+۹۰$ (۷۰)	ندارد	۱۳
آنتن پیشنهادی مسطح	۸/۶ تا ۱۲/۸	$-۷۶/۶$ تا $+۲۷$ (۱۰۳/۶)	۱۰/۷ تا ۱۲/۵	۱۶/۶
آنتن غیر مسطح خمیده پیشنهادی	۸/۹ تا ۱۳/۲	-۴۳ تا $+۳۷$ (۸۰)	۱۰/۶۵ تا ۱۲/۹۵	۱۰/۳۲

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک آنتن موج نشستی غیرمسطح خمیده از نوع موجبر مجتمع شده در زیر لایه بر بستر سلول واحد جدیدی ارائه شده است. استفاده از این روش، علاوه بر جاروب زوایای منفی مشکل عمده این نوع آنتن‌ها را که وجود باند توقف بوده را مرتفع ساخته و آنتن قادر به تشعشع پهلو آتش نیز می‌باشد.

در این مقاله ابتدا سلول واحدی با زیر لایه جدید جهت طراحی آنتن‌های موج نشستی مبتنی بر موجبر مجتمع شده در زیر لایه معرفی گردید که آنتن‌های ذاتاً راست‌گرد را قادر به انتشار موج روبه‌عقب تا پهلو آتش و از آنجا تا روبه‌جلو می‌سازد و این فرضیه توسط آنتن با شکل شکاف H اثبات گردید. سپس به طراحی و شبیه‌سازی آنتن مسطح موردنظر پرداخته شده است. آنتن پیشنهادی مسطح با سلول واحد معرفی شده در بازه فرکانسی ۸/۶ GHz تا ۱۲/۸ GHz قادر به جاروب زوایای از ۱۰/۷-۲۷+ درجه گردیده است و در بازه فرکانسی ۱۰/۷ GHz تا ۱۲/۵ GHz دارای قطبش دایروی می‌باشد. همچنین دارای بیشینه بهره ۱۶/۶ دسی‌بل می‌باشد. در انتها آنتن مسطح پیشنهادی روی سطح یک استوانه به شعاع ۴۲۵ mm پیاده‌سازی شده است. آنتن غیر مسطح نصب شده روی استوانه با سلول واحد معرفی شده در بازه فرکانسی ۸/۹ GHz تا ۱۳/۲ GHz گیگا هرتز قادر است از زاویه ۴۳- تا ۳۷+ درجه را به طور پیوسته با تغییر فرکانس تغذیه جاروب نماید و در بازه فرکانسی ۱۰/۶۵GHz تا ۱۲/۹۵ GHz دارای قطبش دایروی می‌باشد. در نتیجه یک جاروب با قطبش دایروی از زوایای منفی تا مثبت که شامل تشعشع پهلو آتش نیز می‌باشد، حاصل گردیده است. برای صحت طراحی ساختار پیشنهادی، نتایج با استفاده از دو نرم افزار تمام موج (HFSS و CST) با هم مقایسه شده‌اند. در نتایج حاصل از دو نرم افزار تطبیق بسیار خوبی دیده می‌شود. در انتها متغیرهای اساسی ساختار پیشنهادی آنتن مسطح و آنتن غیر مسطح خمیده، با چند ساختار پیشنهادی در سالهای اخیر مقایسه و در جدول ۳ ارائه شده است.

۷- مراجع

- [5] M. Mohammadi, J. Ghalibafan, "Analysis and Design of a High Pass Waveguide Filter of the Ferrite Blade with Tunable Rejection Band", *Applied electromagnetics*, vol. 8, issue 2, 2020, pp. 25-31, Doi: 20.1001.1.26455153.1399.8.2.4.6, (Persian).
- [6] S. Saidi, F. H. Kashani, N. K. Bercheloi, "Presenting the design algorithm, simulation and construction of three-frequency leaky wave antenna based on holographic method", *Applied Electromagnetism*, Vol. 9, No. 2, 2021, pp. 47-58, (Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1400.9.2.6.5>
- [7] D. Zarifi, A. Farahbakhsh, A. M. Soleimani, "Extraction of electromagnetic parameters of a homogeneous and isotropic metamaterial blade using state space method", *Applied Electromagnetism*, Vol. 2, No. 2, 2014, pp. 1-9, (Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1393.2.2.1.1>
- [8] J. Liu, Y. Li, and Y. Long.; "Substrate integrated waveguide Leaky-Wave antenna with H-Shaped slots", *IEEE Trans. Antenna Propag.*, vol. 60, no. 8, pp. 3962-3967, 2012.
- [9] J. Liu, D. R. Jackson, Y. Long.; "Substrate integrated waveguide (SIW) Leaky-Wave antenna with transver slots", *IEEE Trans. Antenna Propag.*, vol. 60, no. 1, pp. 20-29, 2012.
- [10] D. R. Jackson, C. Caloz, and T. Itoh, "Leaky-wave antennas," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2194-2206, Jul. 2012.
- [11] M. M. Sabhi and A. A. Heidari.; "A Compact CRLH Circularly Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Substrate-Integrated Waveguide", *IEEE Trans. Antenna Propagation.*, vol. 66, no. 9, SEPTEMBER 2018.
- [12] S. Barzegari, K. Forooraghi, and B. A. Arand.; "Circularly Polarized Backward, Broadside and Forward Beam scanning Cross slot Load Periodic Planar Leaky Wave Antenna", *IET Microwaves, Antenna & Propagation*, 2020.
- [13] R. Agrawal, P. Belwal, and S. Gupta.; "Asymmetric Substrate Integrated Waveguide Leaky Wave Antenna with Open Stop Band Suppression and Radiation Efficiency Equalization through Broadside", *Radioengineering*, vol. 27, no.2, pp. 409-416, June 2018.
- [14] K. Karmokar and Y. J. Guo.; "Continuous Backward-to-Forward Beam-Scanning Conformal Leaky-Wave Antenna." *IEEE Asia-Pacific Conference on Antenna and Propagation*, 2018.
- [15] M. Bozzi, A. Georgiadis, and K. Wu.; "Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas", *IET Microwaves, Antennas and Propagation*. vol. 5, no. 8, pp. 909-920, 2011.
- [16] Z. Kordibororoujeni and J. Bornemann.; "Designing the Width of substrate integrated waveguide Structures", *IEEE Microwave and Wireless Component Letters.*, vol. 23, no. 10, pp. 518-520, 2013.
- [17] F. Nazarzadeh, M. H. Neshati, and M. S. Majedi.; "Leaky Wave Antenna Based On Quasi -TEM Mode of Substrate Integrated Waveguide." *23rd Iranian Conf, Tehran*, pp. 493-496, 2015.
- [18] A. J. Martinez-Ros and J. Gomez.; "Continuous Tapered Microstrip Leaky Wave Antennas." *Communication and information Technologies Universidad poltecnica de Cartagena cartagene* 2020.
- [19] E. Çelenk and N. T. Tokan, "Frequency Scanning Conformal Sensor Based on SIW Metamaterial Antenna," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 14, pp. 16015-16023, 15 July 2021.
- [20] A. J. Martinez-Ros, J. L. Gómez-Tornero, and G. Goussetis, "Conformal Tapered Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 12, pp. 5983-5991, Dec. 2014.
- [1] C. Caloz and T. Itoh.; "Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications", *Johan Wiley & Sons*, 2005.
- [2] W. W. Hansen, "Radiating electromagnetic Waveguide, U.S. Patent no. 2, 402, 622, 1940.
- [3] D. Deslandes and K. Wu.; "Design consideration and performance analysis of substrate integrated waveguide components", *Microwave Conference. 32 nd European*, pp. 1-4, Nov. 2002.
- [4] Sh. Tavaneipour, M. A. Jozveh Vaziri.; "Investigation of Performance Changes of Leaky Wave Antennas in the Aerodynamic Heating Phenomenon of Hypersonic Projectiles", *Radar*, vol. 5, No. 4, 2016, pp. 33-38, (Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1396.5.4.4.4>