

Original Research Paper

Optimization of Modern Space Systems by Wide-Band Spoof Surface Plasmon Polaritons Planar Antennas

Mahdi Siasifar¹ , Asghar Keshtkar^{2*} , and Shervin Amiri³ 

1, 2. Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran

3. Department of Electrical Engineering and Information Technology, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 23 November 2025

Revised 04 January 2026

Accepted 6 February 2026

Available Online 01 March 2026

Keywords:

Spoof surface plasmon polaritons

Planar satellite antennas

Leaky-wave antennas

Plasmonics

Metamaterial

The proliferation of satellites in modern space systems has driven the development of launch vehicles capable of deploying multiple satellites in a single mission. The advent of high-throughput geosynchronous and non-geosynchronous satellites (HTS), as well as the development of non-geosynchronous satellite constellations and the need for antennas with multiple spot beams, has challenged the feasibility of using traditional parabolic antennas in multi-satellite launch systems. The traditional design of antennas with multiple spot coverages using one or more parabolic reflectors fed by multiple feeds is very bulky, limiting the number of satellites that can be launched with a launch vehicle. To build satellites that can be placed in multi-satellite launch vehicles, the antennas of modern space systems must be replaced with a suitable planar antenna. One of the proposed new technologies for this purpose is the spoof surface plasmon polariton (SSPP) satellite planar antenna technology. After introducing the general properties and design optimization method of this type of antenna, this paper describes the results obtained from the implementation of a satellite SSPP antenna in the Ku band (12.2 - 11.7 GHz). The impedance bandwidth, maximum antenna gain, and frequency scanning angle of the constructed antenna are 0.98 GHz, 30.18 dB, and 3.6 degrees, respectively, which have a much better performance than other antennas constructed with this technology. To the best of our knowledge, this paper presents two significant developments in SSPP antenna design: an innovative inverted ground-plane for enhanced radiation performance and a standing-wave waveguide feeding methodology for reduced horizontal dimensions.

*Corresponding Author's E-mail: akeshtkar@gmail.com**How to Cite this Article:**

M. Siasifar, A. Keshtkar, and S. Amiri, " Optimization of modern space systems using wide-band planar antennas made with spoof surface plasmon polaritons technology," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 80-94, 2026, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2026.1606>.

**COPYRIGHTS**

© 2026 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. 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/).



بهینه‌سازی سامانه‌های فضایی نوین با استفاده از آنتن‌های مسطح پهن‌بند پلاریتون‌های پلاسمون سطحی مجازی

مهدی سیاسی^۱ ID، اصغر کشتکار^{۲*} ID، و شروین امیری^۳ ID

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی برق، پژوهشکده برق و فناوری اطلاعات، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

چکیده

تعدد ماهواره‌ها در سامانه‌های فضایی جدید، منجر به روی‌آوری به ماهواره‌برهایی با قابلیت حمل چندین ماهواره در یک پرتاب شده است. فراگیر شدن ماهواره‌های زمین‌آهنگ و غیر زمین‌آهنگ با نرخ داده بالا (HTS) و ظهور کهکشان‌های ماهواره‌ای غیر زمین‌آهنگ و نیاز این فناوری‌ها به آنتن‌هایی با پوشش‌های موضعی متعدد، امکان استفاده از آنتن‌های سهموی متداول با چندین فید و انعکاس‌گر را در سامانه‌های پرتاب چندگانه، دچار چالش کرده است. طراحی سنتی آنتن‌های دارای پوشش‌های موضعی متعدد با استفاده از یک یا چند انعکاس‌گر سهموی تغذیه شده با چند فید، بسیار حجیم بوده، تعداد ماهواره‌های قابل پرتاب با یک ماهواره‌بر را محدود می‌کند. برای ساخت ماهواره‌هایی که بتوانند در ماهواره‌برهای با قابلیت حمل چندگانه جای بگیرند، آنتن‌های سامانه‌های فضایی نوین باید با آنتن‌های مسطح جایگزین شوند. یکی از فناوری‌های پیشنهادی نوین، فناوری آنتن‌های مسطح ماهواره‌ای پلاریتون‌های پلاسمون سطحی مجازی (SSPP) است. این مقاله پس از معرفی خواص کلی و روش بهینه‌سازی طراحی این نوع آنتن‌ها، نتایج بدست آمده از ساخت یک آنتن مسطح ماهواره‌ای در باند Ku (۱۲/۲ - ۱۱/۷ گیگاهرتز) را تشریح می‌کند. پهنای باند امیدآnsی، حداکثر بهره آنتن و زاویه اسکن فرکانسی آنتن ساخته شده به ترتیب ۰/۹۸ گیگاهرتز، ۳۰/۱۸ دسی‌بل و ۳/۶ درجه است که عملکرد بسیار بهتری نسبت به دیگر آنتن‌های ساخته شده با این فناوری دارد. در این مقاله برای اولین بار از دو ابتکار تغذیه آنتن SSPP با روش موجبر موج ایستا جهت کاهش ابعاد افقی آنتن و آرایش زمین معکوس برای افزایش بهره استفاده شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۳ آذر ۱۴۰۴
بازنگری ۱۴ دی ۱۴۰۴
پذیرش ۲۷ بهمن ۱۴۰۴
اولین انتشار ۱۰ اسفند ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

پلاریتون‌های پلاسمون سطحی مجازی
آنتن مسطح ماهواره‌ای
آنتن‌های موج نشی
پلاسمونیک
فراامواد

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: akeshtkar@gmail.com

How to Cite this Article:

M. Siasifar, A. Keshtkar, and S. Amiri, " Optimization of modern space systems using wide-band planar antennas made with spoof surface plasmon polaritons technology," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 80-94, 2026, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2026.1606>.



COPYRIGHTS

© 2026 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. 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/).



علائم و اختصارات

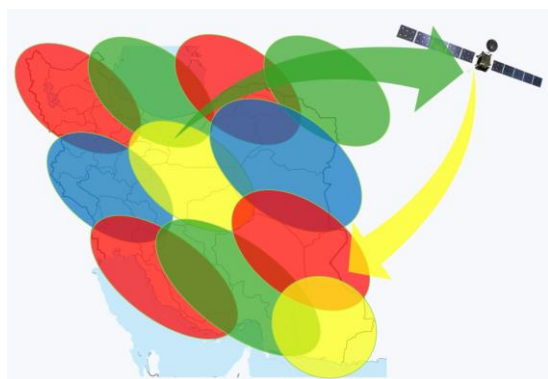
اسکن فرکانسی	Frequency Scanning
پرتو	Beam
پرتو موضعی	Spot Beam
پلاریتون‌های پلاسمون سطحی مجازی	(SSPP) Spoof Surface Plasmon Polaritons
پهنای پرتوی نصف توان	(HPBW) Half Power Beam Width
تکه‌فلز	Patch
ماهواره با نرخ داده بالا	(HTS) High Throughput Satellite
ماهواره زمین‌آهنگ	(GSO) Geostationary Satellite
ماهواره غیر زمین‌آهنگ	(NGSO) Non-Geostationary Satellite
منحنی پاشندگی	Dispersion Curve
محوریاب	Boresight
موج نشتی	(LW) Leaky -Wave

مقدمه

فراگیر شدن کهکشان‌های ماهواره‌ای غیر زمین‌آهنگ و ماهواره‌های زمین‌آهنگ و غیر زمین‌آهنگ با نرخ داده بالا (HTS) و نیاز این فناوری‌ها به آنتن‌هایی که پوشش‌های موضعی متعدد مانند شکل ۱ داشته باشند، فرآیند استفاده از آنتن‌های سهموی قدیمی را دچار چالش کرده است. در شکل ۱ هر رنگ نماینده یک باند فرکانسی است و استفاده از پوشش موضعی در این ماهواره‌ها، امکان استفاده چندین باره از فرکانس را میسر می‌کند و نقش موثری در صرفه‌جویی و استفاده بهینه از منابع فرکانسی دارد. در طراحی سنتی، برای ایجاد پوشش‌های موضعی متعدد، از یک یا چند انعکاس‌گر سهموی که با یک یا چند فید تغذیه می‌شوند، بهره می‌جویند. با گسترش تعداد پوشش‌های موضعی، این نوع طراحی بسیار حجیم و سخت می‌گردد [۲، ۱].

پرتاب کهکشان‌های ماهواره‌ای غیر زمین‌آهنگ پر تعداد با استفاده از آنتن‌های سهموی چندگانه با چندین فید، اقتصادی نیست. یک راه حل برای این مشکل، استفاده از آنتن‌های مسطح به جای آنتن‌های سهموی است که علاوه بر کوچک کردن ماهواره، امکان به اصطلاح کتابی کردن ماهواره‌ها و قراردادن چندین ماهواره روی هم و پرتاب با یک ماهواره‌بر را میسر می‌کند. در این فناوری به منظور کاهش هزینه پرتاب، ماهواره‌ها به صورت کتابی بر روی هم قرار می‌گیرند و بسته به ظرفیت ماهواره‌برها، به صورت دسته‌ای پرتاب می‌شوند. شکل ۲ نحوه پرتاب ۵۱ ماهواره مسطح‌شده شرکت استارلینک با یک ماهواره‌بر که به صورت خشابی روی هم چیده شده‌اند را نشان می‌دهد. فناوری ساخت آنتن‌های مسطحی که قابلیت ارسال و دریافت در چندین پرتو با یک آنتن را دارند، علاوه بر صرفه‌جویی ناشی از کتابی شدن، منجر به کوچک و سبک‌سازی مضاعف ساختار آنتن مورد نیاز در طراحی ماهواره می‌شود و به همین دلیل، مطلوب‌تر از دیگر انواع است.

علاوه بر فناوری آنتن‌های نصب‌شده بر روی ماهواره، در فناوری ارسال و دریافت زمینی سیگنال ماهواره‌ها نیز به دو دلیل، آنتن‌های مسطح و با قابلیت گردش پرتو ترجیح داده می‌شوند. دلیل اول نیاز به اتصال کاربرهای غیر ثابت (مانند ماشین، هواپیما، قطار و کشتی) به شبکه‌های چند رسانه‌ای، جهت تحقق شعار دنیای متصل یعنی دسترسی در همه جا، همه وقت و برای همه کس است. بدیهی است آنتن‌های متداول سهموی برای اینکار خیلی مناسب نیستند و علاوه بر حجم زیاد، مکانیک پیچیده و گران، مقاومت زیاد آن‌ها در برابر باد (اگر با ساختارهای محافظ کروی مهار نشوند)، مخرب است. از طرف دیگر، حفاظ‌های کروی آنتن‌های این نوع کاربرها، بسیار جاگیر و از نظر مکانیکی مشکل‌ساز هستند.



شکل ۱- نمونه پوشش موضعی متعدد ماهواره بر روی زمین (هر رنگ نماینده یک باند فرکانسی متفاوت است).

Fig. 1. Example of multiple spot beam satellite coverage over ground (each color represents a different frequency band).



شکل ۲- پرتاب ۵۱ ماهواره استارلینک مسطح شده [۳].

Fig. 2. Launch of 51 flattened Starlink satellites [3].

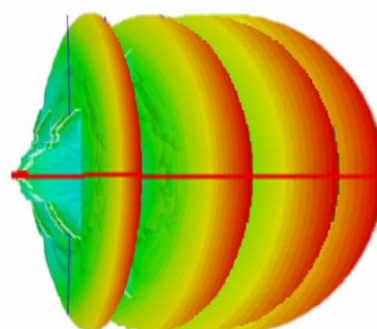
است که در مقایسه با تلفات اهمی نسبتاً پایین دیگر انواع، ویژگی‌های آنتن را کاهش می‌دهد. نقص دوم، فاصله کم بین تکه‌فلزهای تشعشع‌گر و زمین در مایکرواستریپ (عموما ضخامت دی‌الکتریک) در مقایسه با انواع دیگر آنتن است که عملکرد آنتن را در فرکانس‌های بالا کاهش می‌دهد [۵،۴]. از طرفی برای برآورده ساختن برخی الزامات ساخت آنتن مانند بهره و پهنای باند کاری، ناشی از خصوصیات ذاتی باندهای فرکانسی استاندارد مورد استفاده و ماهواره‌های موجود و مشخصات بودجه لینک مربوط به آن و باند پهن مورد نیاز ترمینال‌ها در کاربری‌های جدید، استفاده از حدود چند هزار عنصر در آنتن‌های آرایه فازی مایکرواستریپ برای ارسال و دریافت موفق، اجتناب‌ناپذیر است. به علت افت اهمی این تعداد عنصر، بازده و کارایی آنتن‌های آرایه مایکرواستریپ هنگام نیاز به بهره‌های بالا، پایین آمده و ساخت دقیق مدارات الکترونیکی و پردازش زیادی را می‌طلبد. از این رو اکثر آنتن‌های زمینی آرایه‌ای مایکرواستریپ ثابت یا با قابلیت چرخش پرتو، گران قیمت هستند. یکی از راه‌های ایجاد پرتوهای موضعی متعدد بر روی ماهواره، استفاده از آنتن‌هایی است که می‌توانند پترن‌های متعدد بادبزی مطابق شکل ۳ داشته باشند. این پترن‌ها بر روی زمین، بیضی‌هایی مشابه پوشش‌های موضعی شکل ۱ ایجاد می‌کنند. روش‌های مختلفی برای ایجاد پترن‌های بادبزی متعدد ابداع شده است. به عنوان مثال استفاده از خواص لنز لونیبرگ برای ایجاد این پرتوها، پایه بسیاری از آنتن‌هایی است که در ابتدا بدین منظور معرفی شدند [۶،۵]. روش دیگری که نسبت به آنتن‌های مبتنی بر لنز لونیبرگ اندازه (پروفایل) کوچکتری دارد، استفاده از آنتن‌هایی است که با تغییر فرکانس، پرتو آن‌ها می‌چرخد و به اصطلاح دارای اسکن فرکانسی هستند و پرتوهای بادبزی متعدد را در فرکانس‌های مختلف می‌سازند. هر یک از بادبزن‌های این آنتن‌ها بر روی زمین، یک بیضی درست می‌کند که مشابه پرتو موضعی مورد نیاز در آن فرکانس است. سیستم تغذیه پرتوهای مختلف در این آنتن‌ها بسیار ساده است و نیاز به تغذیه مجزا برای هر پرتو ندارد، چراکه در این روش تنها یک تغذیه حاوی چند موج در چند باند فرکانسی، امکان ایجاد چند پرتو را ایجاد می‌کند. در سیستم‌های 5G و 6G زمینی نیز هر پرتو (فرکانس) از این آنتن‌ها، یک منطقه را پوشش خواهد داد و امکان پوشش در زوایای مختلف با یک آنتن دارای یک ورودی، میسر خواهد شد.

به طور خلاصه، آنتن‌های نوین باید علاوه بر داشتن چند پرتو، جمع و جور بودن از نظر فیزیکی، امکان برآورده کردن چالش‌هایی مانند کاهش تداخل و افزایش راندمان انرژی را نیز داشته باشند. با پیشرفت فناوری و مطرح شدن علم فرامواد و پلاسمونیک، نوع جدیدی از آنتن‌های مسطح موسوم به آنتن‌های مسطح موج نشستی (LW) با خط انتقال پلاسمون‌های پلاریتون سطحی مجازی (SSPP) که به اختصار آنتن‌های LW-SSPP نامیده می‌شوند و خواص

دلیل دوم نیاز به آنتن‌های مسطح نوین، ظهور ماهواره‌های غیر زمین‌آهنگ و ارتفاع پایین متعدد برای ارائه خدمات اینترنتی و شبکه‌های چند رسانه‌ای در چند سال اخیر است. با توجه به حرکت نسبی و طلوع و غروب این ماهواره‌ها نسبت به گیرنده ثابت و متحرک، لازم است در ابتدا ماهواره توسط آنتن قفل و ردگیری شود، سپس قبل از غروب یک ماهواره، ماهواره در حال طلوع دیگری رصد شده، بر روی آن قفل و ردگیری انجام شود تا بلافاصله بعد از غروب ماهواره قبلی، سرویس بدون وقفه، به ماهواره جدید منتقل شود. برای داشتن این قابلیت‌ها، نیاز به آنتن با قابلیت گردش سریع پرتو یا قابلیت ارسال و دریافت بر روی بیش از یک ماهواره در هر لحظه، است. به دو دلیل ذکر شده، صنعت آنتن‌های ارسال و دریافت زمینی ماهواره نیز در حال نوآوری برای حل نیازهای جدید بازار می‌باشد و با عبور از آنتن‌های سهموی، به انواع آنتن‌های صفحه‌ای روی آورده است.

از طرفی دیگر، تکامل سریع شبکه‌های ارتباطات ماهواره‌ای، بی‌سیم و موبایل نسل پنجم (5G) و نسل ششم (6G) نیازمند سیستم‌های آنتن پیشرفته‌ای است که قادر به پشتیبانی از نرخ داده بالاتر، پهنای باند وسیع‌تر و راندمان طیفی بهبود یافته باشند. روش‌های سنتی طراحی آنتن‌های مسطح به دلیل محدودیت در شکل‌دهی پرتو، عملکرد چند باندی و سازگاری با محیط‌های پویا، در برآورده کردن این الزامات با چالش‌هایی روبرو هستند.

یکی از روش‌های سنتی طراحی آنتن مسطح، استفاده از آنتن‌های مسطح آرایه‌ای دارای تکه فلز مایکرواستریپ است. با بکارگیری ساختار مناسب در این نوع آنتن‌ها جهت کنترل دامنه و فاز المان‌ها، امکان تغییر الکترونیکی پرتو و حذف ساختارهای سنتی مکانیکی برای این کار، میسر است. متأسفانه آنتن‌های مایکرواستریپ دو نقص عمده دارند. نقص اول، تلفات اهمی و تشعشعی ناخواسته ذاتی خطوط مایکرواستریپ در فرکانس‌های بالا



شکل ۳- پترن‌های متعدد بادبزی جهت ایجاد پرتوهای موضعی متعدد.

Fig. 3. Multiple fan-shaped patterns for creating multiple spot beams.

مورد نظر را دارند، معرفی گردید. علیرغم بررسی جامع این نوع آنتن‌ها توسط مقالات متعدد، عموماً دو جنبه خاص یعنی اسکن فرکانسی کم (نزدیک به صفر) و بهره زیاد که در ساخت آنتن‌های ارسال و دریافت ماهواره‌ای اهمیت زیادی دارد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است و در بیشتر مقالات، طراحی منجر به آنتن‌های با بهره بسیار کمتر از بهره مورد نیاز فناوری ماهواره‌ای و زاویه اسکن فرکانسی بزرگ، شده است. در این مقاله سعی می‌کنیم با ساخت یک نمونه آرایه آنتن SSPP در باند فرکانسی $11/7 - 12/2$ گیگاهرتز با قطبش خطی، کارایی این آنتن در فناوری ماهواره‌ای را اثبات کنیم و مشخصات آن را در عمل اندازه‌گیری و تحلیل نماییم.

آنتن‌های مسطح موج نشستی (LW) با خط انتقال پلاسمون‌های پلاریتون سطحی مجازی (SSPP)

علم پلاسمونیک که در ابتدا صرفاً در فرکانس‌های نوری کاربرد داشت، حوزه به سرعت در حال رشدی از علم نانوفوتونیک است. این علم به بررسی برهم‌کنش بین میدان‌های الکترومغناطیسی و الکترون‌های آزاد در نانو‌ساختارهای فلزی می‌پردازد. به عبارت دیگر، این علم توجه خود را بر برهم‌کنش بین امواج در سطح نانو و سوپ‌الکترون‌های آزاد موجود در فلزات و اثرات متقابل ناشی از آن متمرکز می‌کند. اساس این علم بر مبنای فرآیند عمل متقابل بین تشعشع الکترومغناطیسی و الکترون‌های هادی در فصل مشترک با فلز یا ریزساختارهای فلزی، می‌باشد. این برهم‌کنش منجر به میدان‌های نزدیک تقویت شده نوری در ابعاد کسری از طول موج، می‌شود. بسته به شرایط، این برهم‌کنش ممکن است یا منجر به تولید میدان‌های بسیار موضعی شود که به پدیده پلاریتون‌های پلاسمون سطحی (SPP) معروف است، یا منجر به پدیده دیگری شود که به

پلاسمون‌های سطحی موضعی (LSP) معروف است [۷]. تمرکز این مقاله، بر روی خواص SPPها است.

فلزات در فرکانس‌های تراهرتز و نوری، گذردهی الکتریکی منفی از خود نشان می‌دهند، لذا در دی‌الکتریک‌های پوشش داده شده با فلزات، علامت گذردهی الکتریکی در دو طرف سطح مشترک فلز-دی‌الکتریک، معکوس است. این خاصیت موجب انتشار امواج سطحی کاملاً محصور شده‌ای در ناحیه سطح مشترک فلز-دی‌الکتریک می‌گردد که از نوع پلاریتون‌های پلاسمون سطحی (SPP) است. معادله انتشار امواج SSP با حل معادلات ماکسول و در نظر گرفتن شرایط مرزی خاص در سطح مشترک فلز-دی‌الکتریک و ضریب دی‌الکتریک وابسته به فرکانس فلزات در فرکانس‌های نوری، بدست می‌آید. حل معادلات مذکور و رسم رابطه بین فرکانس زاویه‌ای (ω) و عدد موج انتشاری یا ثابت فاز (β) به شکل یک منحنی موسوم به منحنی پاشندگی، مودهای قابل انتشار امواج سطحی را برای ساختارهای مختلف مشخص می‌کند. امواج سطحی SPP، تقید شدیدی به سطح و سرعتی کمتر از سرعت انتشار نور دارند. از این رو این امواج، در طبقه‌بندی امواج آهسته با ثابت انتشار بزرگتر از ثابت انتشار نور در هر محیط، قرار می‌گیرند. به دلیل اختلاف ثابت انتشار، امواج موجود در فضا امکان تحریک مستقیم این ساختارها را ندارند و ایزولاسیون خوبی بین محیط و ساختارهای SPP وجود دارد. از آنجاکه حرکت موج در این ساختارها تنها به وسیله یک هادی واقع بر دی‌الکتریک انجام می‌شود، خواص ذکر شده نشان می‌دهد که این ساختارها در صورت طراحی مناسب می‌تواند به صورت یک موجبر تک هادی نیز عمل کند [۷].

بر خلاف فرکانس‌های نوری، در فرکانس‌های ریزموجی، فلزات مشابه هادی الکتریکی کامل (PEC) با گذردهی الکتریکی مثبت رفتار می‌کنند. در این شرایط، به علت حذف گذردهی الکتریکی منفی تابع فرکانس که تنها در فرکانس‌های بالا رخ می‌دهد، شرایط معادلات ماکسول تغییر می‌کند و SPPها تولید نمی‌شوند. با این حال، تحقیقات نشان داده‌اند که ساختارهای مهندسی شده با حفره، سوراخ یا دندانه می‌توانند به طور مصنوعی یا مجازی، اثرات پلاسمونیک را تقلید کنند [۸] که به آن SPP تقلیدی یا طراحی شده یا مجازی و به اختصار SSPP می‌گویند. این سطوح فلزی مهندسی شده به روش‌های خاص، در فرکانس‌های ریزموجی (مایکرووی)، مشابه فلزات در فرکانس‌های نوری، نفوذپذیری الکتریکی منفی دارند. با این دیدگاه، به ساختار SSPP، ساختار فراماده پلاسمونیک نیز گفته می‌شود.

تقریباً هر کاربردی که در SSP در فرکانس‌های نوری میسر بود، در SSPP نیز در فرکانس‌های ریزموجی میسر است. مطالعات بیشتر نشان داده است که SSPPها کاندیداهای خوبی برای ساخت

انواع مختلفی از ساختارهای موجبر دو یا سه بعدی وجود دارد. برای آنتن‌های مسطح با ارتفاع (پروفایل) کم، موجبرهای دو بعدی که معمولاً توسط ساختارهای هندسی فلزی حفره‌دار یا دندان‌دار متناوب متصل به یک صفحه دی‌الکتریک ساخته می‌شوند، بهترین انتخاب هستند. ساختار هندسی حفره‌ها یا دندان‌ها، با تکرار یک سلول واحد در جهت انتشار ساخته می‌شود و انتخاب آن، اولین قدم برای طراحی موجبر SSPP است. پس از انتخاب یک سلول واحد خاص، مرحله دوم یافتن مودهای انتشار موجبر طراحی شده با تکرار سلول واحد انتخاب شده و رسم منحنی پاشندگی آن است. ما از شبیه‌ساز Eigenvalue (مقدار ویژه) نرم‌افزار CST Studio برای رسم منحنی پاشندگی و مشاهده رفتار موجبر در فرکانس‌های مختلف و همچنین سازگاری فرکانس بیشینه قابل انتشار در موجبر در منحنی پاشندگی با فرکانس کاری مورد نیاز، استفاده کردیم.

مناسب بودن ضریب بازتاب (S_{11}) و تلفات یا تضعیف درج ساختار (S_{21}) نیز با شبیه‌سازی پارامترهای S مربوط به موجبر به همراه رابط‌های ورودی/خروجی، با استفاده از شبیه‌ساز Frequency نرم‌افزار CST Studio انجام شد. به علت تفاوت نحوه انتشار موج در واسط‌های متداول دارای دو هادی در ورودی و خروجی مدارات ریزموجی با حالت انتشار موج در موجبر SSPP، علاوه بر تطبیق امپدانس، به تطبیق ممان نیز برای تغذیه موجبر، نیاز داریم [۱۳، ۱۴]. مطالعه ما نشان می‌دهد که موجبر ارائه شده و به تفصیل مورد مطالعه قرار گرفته در مرجع [۱۵]، سازگاری قابل قبولی با الزامات مورد نیاز ما نشان می‌دهد و منجر به ابعاد عملی برای تولید انبوه یک آنتن مسطح کم‌هزینه می‌شود و از این رو، از ساختار کلی آن برای ساخت و تغذیه موجبر مورد نیاز استفاده کردیم.

شکل ۴ نمای بالایی و کناری سلول واحد این ساختار را نشان می‌دهد. طراحی و ساخت سلول واحد با استفاده از زیرلایه با مشخصات Rogers® RO4003C و گذردهی نسبی دی‌الکتریک (ϵ_r)، تانژانت تلفات و ضخامت (t_d) به ترتیب ۳/۵۵، ۰/۰۰۲۷ و ۰/۸۱۳ میلی‌متر و ضخامت مس (t_m) ۳۵ میکرومتر انجام شده است. شعاع حفره دایروی داخل مربع فلزی برابر r و ضلع مربع که همان دوره تناوب سلول واحد است، برابر d (هر دو بر حسب میلی‌متر) در نظر گرفته می‌شود و مقدار بهینه آن پس از رسم منحنی پاشندگی برای چند مقدار r و d و در نظر گرفتن الزامات مورد نیاز، انتخاب می‌گردد.

برای رسم صحیح منحنی پاشندگی، شرایط مرزی بسیار مهم است. بررسی دقیق مقالات و تطابق نتایج شبیه‌سازی و نتایج عملی ساخت آنتن نشان داد شرایط مرزی صحیح که در تنظیمات قسمت Eigenvalue نرم‌افزار CST Studio باید تنظیم شود، به این

بسیاری از دستگاه‌های ریزموجی مسطح و کم‌حجم، هستند. از جمله این دستگاه‌ها، موجبرهای تک‌هادی مسطح بسیار نازک (ضخامت نزدیک به صفر) با تلفات کم هستند که می‌توانند امواج سطحی را به طور موثر هدایت کنند [۹]. طبیعی است که دیگر ساختارهایی که نیاز به استفاده از یک موجبر ریزموجی بهینه دارند (مانند آنتن‌های موج نشستی) نیز با استفاده از این نوع موجبر می‌توانند نتایج بهتری ارائه دهند. از این رو از این ساختارها می‌توان در طراحی انواع آنتن‌های موج نشستی SSPP، یا LW-SSPPA استفاده کرد. از جمله خواص این آنتن‌ها، چرخش پرتو با فرکانس است که به آن خاصیت اسکن فرکانسی می‌گویند و همانطور که قبلاً گفته شد، می‌توان از آن‌ها برای ایجاد پرتوهای متعدد در فرکانس‌های مختلف استفاده کرد [۱۰، ۱۱].

ساخت آنتن‌های موج نشستی با موجبر SSPP

مکانیسم اصلی آنتن‌های موج نشستی، انتشار موج در امتداد یک موجبر با طول چند طول موج و با تلفات کم و نشت آن به شیوه‌ای مناسب برای تغذیه یک ساختار تابشی است، به طوری که کل موج قبل از رسیدن به انتهای موجبر توسط ساختار تابشی، منتشر شود. بنابراین می‌توان به راحتی این آنتن را با موجبر با افت کم تک‌هادی SSPP، ساخت. از آنجاکه امواج سطحی منتشرشونده در موجبر SSPP، از نوع موج آهسته هستند، به خودی خود منتشر نمی‌شوند و با مکانیسمی باید آن‌ها را به موج سریع تبدیل و منتشر کرد. دو روش قاعده‌مند و متداول برای این منظور معرفی شده است که اولی مدولاسیون موجبر مانند روش مرجع [۱۲] و دومی، تحریک یک تکه‌فلز (پیچ) مناسب با روش مجاورت با موجبر است. در این مقاله از روش تحریک تکه‌فلز در مجاورت موجبر استفاده می‌کنیم. مراحل کلی ساخت آنتن آرایه SSPP با بهره بالا، به شرح زیر است:

- ۱- طراحی آنتن SSPP تک شاخه بهینه
- ۲- طراحی ساختار زمین مناسب جهت افزایش بهره آنتن تک شاخه SSPP
- ۳- طراحی آنتن آرایه چند شاخه نهایی

طراحی آنتن SSPP تک شاخه بهینه

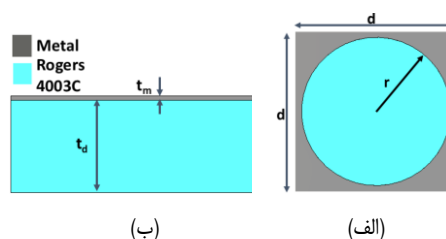
برای طراحی آنتن تک شاخه بهینه، ابتدا باید یک سلول واحد مناسب برای ساخت موجبر SSPP انتخاب کرد. سپس باید روش مناسبی برای تغذیه موجبر ساخته شده با تکرار سلول واحد پیدا کرد و در نهایت با انتخاب ساختار مناسب تشعشع، آنتن تک شاخه نهایی را طراحی کرد.

برخی از پارامترهای SSPP باید برای طراحی آنتن نهایی مورد نظر تنظیم شوند و مستقیماً به خود SSPP ربط ندارند. به عنوان مثال، شبیه‌سازی‌های ما نشان داد که دی‌الکتریک‌های با ثابت‌های دی‌الکتریک یا ضخامت بالا، ممکن است موج را در داخل ساختار محدود کرده، از نشت و تابش مناسب امواج که در یک LWA مورد نیاز است، جلوگیری کنند و بنابراین نباید از آنها در ساخت آنتن‌های SSPP استفاده کرد. نکته دیگر چرخش موج تشعشی از آنتن‌های SSPP با تغییر فرکانس است که در مراجعی مانند [۱۱، ۱۰]، اثبات شده است. فرمول ۳ در مرجع [۱۱] پارامتری به نام حساسیت اسکن را معرفی کرده است که میزان اسکن فرکانسی در اثر تغییر فرکانس را محاسبه می‌کند. طبق این فرمول، حساسیت اسکن رابطه مستقیم با شیب منحنی پاشندگی در نقطه کار ($\beta_{g,f}$) دارد و با انتخاب صحیح نقطه کار در منحنی پاشندگی می‌توان میزان اسکن فرکانسی را کنترل کرد و برای داشتن اسکن فرکانسی کمتر، باید نقطه کار در ناحیه‌ای از منحنی پاشندگی انتخاب شود که شیب کمتری دارد. به عبارت دیگر، آنتن‌هایی که نقاط کارشان در مناطقی از منحنی پاشندگی با شیب کمتر قرار دارد، اسکن فرکانس پایین‌تری دارند. این انتخاب برای کاربری‌هایی مثل دریافت پهن‌بند از ماهواره که تغییر زاویه پترن اصلی آنتن با فرکانس مطلوب نیست، بهترین انتخاب است. برعکس، در کاربردهایی که تغییر زاویه پترن برای ایجاد پوشش‌های موضعی متعدد بر حسب فرکانس نیاز است، انتخاب نقطه کار در نواحی شیب زیاد منحنی مطلوب است. از آنجاکه قصد این مقاله، طراحی یک آنتن نمونه جهت دریافت امواج ماهواره است که در آن چرخش زاویه پرتو اصلی آنتن در باند فرکانسی کاری مطلوب نیست، از نقاطی از منحنی استفاده شد که شیب کمتری دارند.

پس از طراحی موجبر، باید آرایش میدان‌های نزدیک تولید شده توسط آن را بدست آورد تا بتوان بر اساس آن، با قرار دادن تکه‌فلز در نقاط مناسب، پترن تشعشی مورد نظر آنتن را طراحی کرد. شکل ۶ میدان نزدیک الکتریکی مماسی موجبر SSPP را نشان می‌دهد. ماهیت میدان در این شکل به صورت متناوب با دوره تناوب انتشار موج در موجبر است که آنرا λ_g می‌نامیم. بنابراین جهت تحریک هم فاز تکه‌فلزها، ناچار به قرار دادن آنها با فاصله افقی λ_g ، امتداد موجبر هستیم. فاصله پیچ‌ها در دو طرف پیچ، قابل انتخاب و بهینه‌سازی بر اساس فرمول‌های آنتن‌های آرایه‌ای (مانند شکل ۲.۳ در مرجع [۱۷]) است.

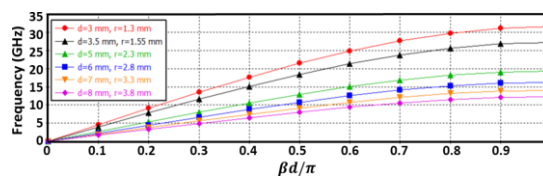
نکته دیگری که باید در انتخاب سلول واحد در نظر گرفته شود، عملی بودن ساخت آن با فناوری موجود است. با توجه به اینکه فناوری ساخت در دسترس ما دقتی برابر ۲/ میلی‌متر داشت، از

شکل است: شرایط مرزی تناوبی در امتداد جهت انتشار SSPP و شرایط مرزی PEC در جهات دیگر و در فاصله‌ای به اندازه کافی دور از سلول واحد. با تنظیمات ذکر شده در نرم‌افزار CST، منحنی پاشندگی ساختار شکل ۴ برای مقادیر مختلف r و d به صورت شکل ۵ رسم شد. مقادیر انتخاب شده برای r و d ، باید به گونه‌ای باشند که فرکانس قطع موجبر، بالاتر از حداکثر فرکانس مورد نیاز آنتن باشد.



شکل ۴- نمای (الف) بالایی (ب) کناری سلول واحد انتخاب شده با زیرلایه دی‌الکتریک Rogers® RO4003C با گذردهی نسبی دی‌الکتریک (ϵ_r)، تانژانت تلفات و ضخامت دی‌الکتریک (t_d) به ترتیب ۳/۵۵، ۰/۰۰۲۷ و ۰/۸۱۳ میلی‌متر و ضخامت فلز (t_m) ۳۵ میکرومتر و دوره تناوب d و شعاع حفره r [۱۶].

Fig. 4. (a) Top view (b) side view of the selected unit cell with dielectric substrate Rogers® RO4003C with dielectric permittivity (ϵ_r), loss tangent and dielectric thickness (t_d) of 3.55, 0.0027, and 0.813 mm, respectively, and metal thickness (t_m) of 35 μ m and periodicity d and cavity radius r [16].

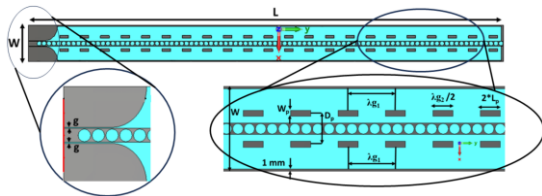


شکل ۵- منحنی پاشندگی سلول واحد انتخاب شده [۱۶].

Fig. 5. Dispersion curve of selected unit cell [16].

نکته دیگر، توجه به نحوه صحیح تغذیه تکه‌فلزهایی است که در دو طرف موجبر جهت تشعشع موج قرار می‌گیرند. در فرآیند بهینه‌سازی آنتن، فاصله این تکه‌فلزهای واقع در دو طرف موجبر، با محاسبه پارامترهای بهینه‌کننده آرایه و به صورت مضربی از طول موج بدست می‌آید. اولین فاصله بهینه دو مرکز تکه‌فلز در دو طرف موجبر SSPP، کمتر از یک طول موج است (شکل ۲.۳ در مرجع [۱۷]). سلول واحد SSPP نباید آنقدر کوچک باشد که به دلیل فاصله زیاد تکه فلزها از خط انتقال، نتواند موج نشتی را به طور مؤثر به تکه‌فلزها منتقل کند و در عین حال، نباید آنقدر بزرگ باشد که به آنها بچسبد و اتصال کوتاه ناخواسته ایجاد کند.

محاسبه اولیه باید با شبیه‌سازی بهینه گردد. چالش دیگر این امر، اثرات جاگزینی مدار ترکیب کننده با مدار باز یا مدار اتصال کوتاه بر روی تطبیق ممان مدار است که طراحی آن، نیازمند شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مدار است. با این توضیحات، ساختار نهایی آنتن تک شاخه SSPP مطابق شکل ۷، انتخاب گردید.



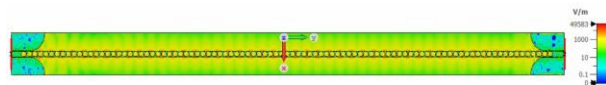
شکل ۷- آنتن پایه SSPP با ۲۲ تکه‌فلز مستطیلی در هر طرف موجبر SSPP. قطر دی‌الکتریک $t_d=0.813$ mm، ضخامت فلز $t_m=35$ μ m، زیرلایه Rogers® RO4003 (ضریب دی‌الکتریک $\epsilon_r=3.55$ ، تانژانت تلفات $\tan\delta=0.0027$)، طول $L=483.6$ mm، عرض $W=37$ mm، $\lambda_{g1}=20.8$ mm، $\lambda_{g2}=17.6$ mm، $L_p=\lambda_{g2}/4=4.4$ mm، $D_p=13.52$ mm، $W_p=2.6$ mm، واسطه اتصال ورودی و خروجی ۵۰ CPW اهمی، دوره تناوب سلول واحد $d=5$ mm، فاصله موجبر و زمین $g=0.4$ mm، شعاع حفره سلول واحد $r=2.3$ mm، زمین به تدریج به سمت بی‌نهایت رونده که با یک چهارم بیضی‌ای ساخته شده است که پس از $2/5$ سلول واحد $(2.5*d)$ آغاز می‌شود و شعاع محور کوچک آن نیز برابر $2.5*d$ و شعاع محور بزرگ آن برابر $((W-d)/2)-g$ است.

Fig. 7. SSPP base antenna with 22 rectangular metal patches on each side of the SSPP waveguide, dielectric thickness $t_d=0.813$ mm, metal thickness $t_m=35$ μ m, Rogers® Ro4003C substrate (dielectric coefficient $\epsilon_r=3.55$, loss tangent 0.0027), length $L=483.6$ mm, width $W=37$ mm, $\lambda_{g1}=20.8$ mm, $\lambda_{g2}=17.6$ mm, $L_p=\lambda_{g2}/4=4.4$ mm, $D_p=13.52$ mm, $W_p=2.6$ mm, input and output interfaces are CPW 50 ohms, unit cell period $d=5$ mm, waveguide-ground gap $g=0.4$ mm, unit cell cavity radius $r=2.3$ mm, a gradually tapering ground towards infinity built by quarter of an ellipse starting after 2.5 unit cells $(2.5*d)$ and with minor axis radius of $2.5*d$ and major axis radius of $((W-d)/2)-g$.

طراحی ساختار زمین مناسب جهت افزایش بهره آنتن تک شاخه SSPP

مرحله بعدی انتخاب زمین مناسب برای افزایش بهره آنتن است. در اکثر آنتن‌های SSPP پیشنهادی، زمین PEC در پایین آنتن قرار دارد. ما از یک طراحی نوآورانه آنتن SSPP با پیکربندی صفحه زمین معکوس (PEC در بالا) استفاده کردیم و سپس، عملکرد آنتن در این حالت را با حالتی که زمین در پایین است، مقایسه کردیم. تا آنجا که ما می‌دانیم، ابتکار استفاده از زمین در بالای آنتن SSPP برای اولین بار توسط نویسندگان این مقاله ارائه می‌شود. باید توجه کرد که نوآوری زمین معکوس در بالای آنتن، با استفاده از فوق

بکارگیری ابعاد کوچکتر اجتناب شد. با در نظر گرفتن تمام موارد فوق، مقادیر $d=5$ mm و $r=2.3$ mm برای سلول واحد انتخاب شد.



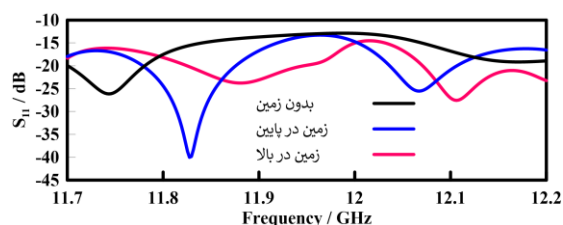
شکل ۶- میدان نزدیک الکتریکی مماسی موجبر SSPP.

Fig. 6. Tangential electric near field of SSPP waveguide.

مرحله بعدی، انتخاب نوع تکه فلز مناسب برای تشعشع آنتن SSPP با در نظر گرفتن الزامات فنی از جمله قطبش آنتن است. از آنجا که پرتو ناشی از انتشار موج در آنتن‌های دارای تکه‌فلز بیضوی اغلب قطبش غیر خطی دارد، مناسب قطبش خطی مورد نیاز این تحقیق نبود و بررسی نشد. برای انتخاب تکه‌فلز مناسب، طراحی سه آنتن با سه نوع تکه فلز متداول (دایروی، مربعی و مستطیلی) انجام و نتیجه مقایسه و در مقاله‌ای جداگانه منتشر شد [۱۶]. بر اساس نتایج این تحقیق، آنتن با تکه‌فلز مستطیلی، بهترین انتخاب برای ساخت آرایه آنتن‌های SSPP با بهره بالا شناخته شد.

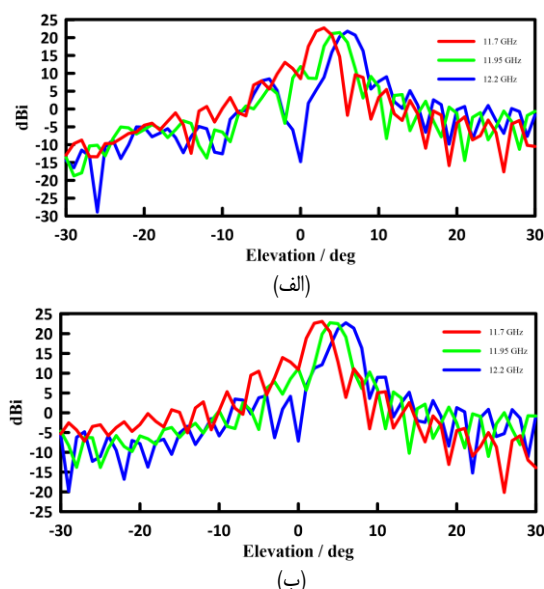
برای تغذیه آنتن نیز از روشی نوآورانه موج ایستا در موجبر SSPP استفاده شد. عموم ساختارهای متداول و سستی موجبرها و آنتن‌های SSPP، دارای دو پورت یکی در ورودی و یکی در خروجی هستند. برای ساخت آنتن ارسال یا دریافت، پورت خروجی این ساختارها، به یک بار ۵۰ اهم منتهی می‌شود تا ساختاری تک پورت، ایجاد شود. هنگامیکه از یک آرایه چند شاخه برای ساخت آنتن استفاده می‌شود، از یک مقسم توان برای اعمال ورودی به مدار و یک ترکیب کننده^۱ توان در خروجی برای تک پورت کردن خروجی شاخه‌ها و اتصال آن به یک بار ۵۰ اهم استفاده می‌شود. از آنجا که اجزایی مانند مقسم و ترکیب کننده جزو ساختارهای تشعشعی نیستند و علیرغم افزایش طول افقی ساختار، در ایجاد بهره تشعشعی نقش ندارند، اضافه کردن آنها به ساختار آنتن، باعث کاهش بازده کل و بازده تشعشعی آنتن می‌گردد. بنابراین هرگونه ابتکاری در حذف یکی از آنها، علاوه بر کاهش طول افقی، باعث افزایش بازده کل و بازده تشعشعی آنتن نیز می‌شود. استفاده نوآورانه از موج ایستا در خط انتقال برای حذف رابط خروجی و مدارهای تطبیق مرتبط به آن (ترکیب کننده خروجی)، برای تغذیه آنتن‌های مایکرواستریپ و تشدیدگر دی‌الکتریک (DRA) از مدت‌ها پیش مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۸]. ما از همین نوآوری در موجبر SSPP خود با قرار دادن تکه فلزها در نصف طول موج از انتهای مدار باز خط انتقال استفاده کرده، پورت خروجی را حذف کردیم. چالش اصلی در انجام اینکار، پیدا کردن فاصله دقیق تکه‌فلزها از انتهای مدار باز یا مدار اتصال کوتاه موجبر SSPP است که تابعی از λ_{g1} است که از نظر تئوری از روی نقطه کار در منحنی پاشندگی محاسبه می‌گردد و مقدار آن پس از

همانطور که قبلاً گفته شد، زاویه پترن باد بزنی با صفحه SSPP، تابعی از فرکانس است. بنابراین با انتخاب ابعاد سلول واحد مناسب و تغییر زاویه چرخش بر حسب فرکانس، به راحتی می‌توان از ساختار آنتن تک شاخه SSPP پیشنهادی جهت ساخت آنتن چند پرتوی که هر پرتوی آن در یک فرکانس عمل می‌کند، استفاده کرد. با توجه به اینکه کاربری آنتن در این مقاله، دریافت امواج ماهواره است، پارامترهای آنتن طوری انتخاب شده‌اند که زاویه چرخش به حداقل برسد. شکل ۹، دامنه شبیه‌سازی شده ضریب انعکاس (S_{11}) ورودی آنتن تک شاخه را در سه حالت بدون زمین، زمین در پایین و زمین در بالا می‌دهد. برای مشاهده این چرخش فرکانس، پترن آنتن تک شاخه را در سه فرکانس ابتدا، وسط و آخر باند برای هر دو حالت زمین در شکل ۱۰، رسم می‌کنیم.



شکل ۹- دامنه شبیه‌سازی شده ضریب انعکاس (S_{11}) ورودی آنتن تک شاخه در سه حالت: بدون زمین، زمین در پایین و زمین در بالا.

Fig. 9. Simulated amplitude of reflection coefficient (S_{11}) of the input of the single-branch antenna for three states: no ground, ground at the bottom, and ground on top.

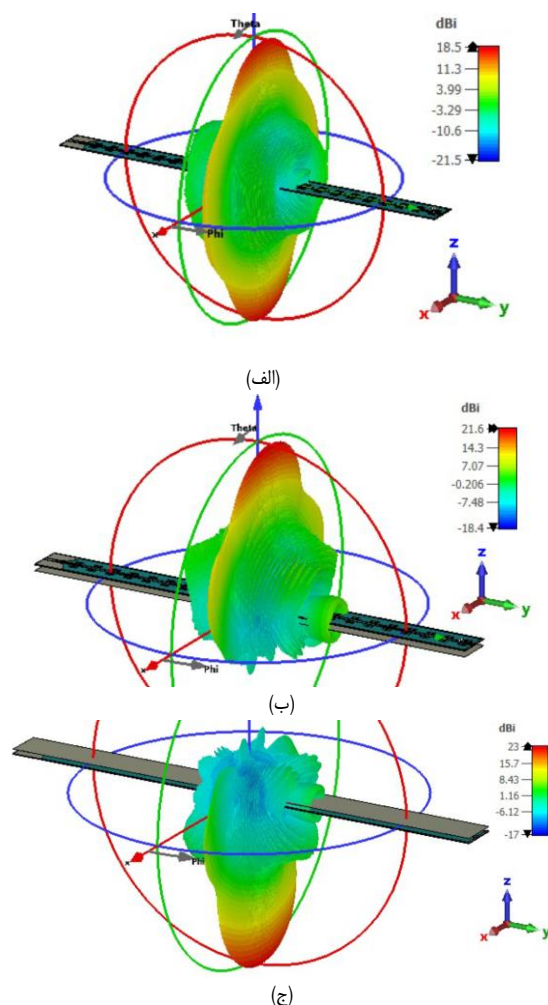


شکل ۱۰- پترن صفحه E آنتن تک شاخه در سه فرکانس: ابتدا، وسط و انتهای باند (۱۱/۷، ۱۱/۹۵ و ۱۲/۲ گیگاهرتز) برای حالت زمین (الف) در پایین و (ب) در بالا هنگامیکه محور Z همراستای پترن اصلی آنتن در نظر گرفته شود.

Fig. 10. Single branch antenna E-Plane pattern in three frequencies: beginning, middle, and end of the band (11.7, 11.95, and 12.2 GHz) for ground (a) at down and (b) on top when the z-axis is aligned with the main antenna pattern.

لایه^۱ متفاوت است، چراکه بر خلاف روش فوق لایه، در اینجا از لایه اضافی که موجب افزایش اندازه (پروفایل) آنتن شود، استفاده نشده، همان زمین موجود مدار، تغییر موقعیت داده می‌شود. برای نشان دادن اثر مکان زمین PEC، بهره آنتن پایه نهایی تک شاخه بدون زمین با ۲۲ تکه‌فلز در هر طرف SSPP که در شکل ۷ نشان داده شده است را با دو حالت دیگر زمین PEC، یکی در پایین و یکی در بالای این آنتن مقایسه می‌کنیم.

شکل ۸ ساختار آنتن تک شاخه SSPP به همراه پترن تشعشی شبیه‌سازی شده آنتن را در فرکانس مرکزی ۱۱/۹۵ گیگاهرتز در سه حالت بدون زمین، زمین در پایین و زمین در بالای آنتن، نشان می‌دهد. مطابق شکل ۸، آنتن در حالت بدون زمین، دارای دو پترن بادبزنی در دو طرف، و در حالت با زمین، دارای یک پترن بادبزنی در یک طرف است.



شکل ۸- آنتن تک شاخه و پترن شبیه‌سازی شده آن در فرکانس مرکزی ۱۱/۹۵ گیگاهرتز در حالت (الف) بدون زمین، (ب) زمین در پایین و (ج) زمین در بالا.

Fig. 8. Single branch antenna and its simulated pattern in the center frequency of 11.95 GHz with (a) no ground, (b) ground at the bottom, and (c) ground on top.

به ساختار زمین در پایین است. میزان اسکن ناخواسته فرکانسی نیز در هر دو ساختار، بسیار ناچیز و کنترل شده است.

طراحی آنتن آرایه چند شاخه نهایی

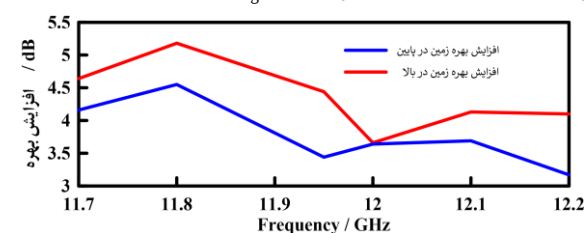
در حالت کلی، بهره بدست آمده با یک شاخه آنتن، کمتر از مقدار حداقل مورد نیاز برای اکثر کاربری‌های متداول دریافت سیگنال‌های ماهواره است. از این رو چاره‌ای جز افزایش بهره با استفاده از آرایه چند شاخه نیست.

اولین گام در طراحی آرایه چند شاخه، طراحی یک مقسم توان مناسب برای تغذیه شاخه‌ها است که در مقاله دیگر مولفین، به تفصیل بررسی شده است [۱۹]. گام دوم، طراحی فواصل بین آرایه‌ها با هدف پیشینه کردن ضریب آرایه است. مشابه حالت محاسبه فاصله دو تکه‌فلز در بالا و پایین موجبر SSPP، برای محاسبه مقدار اولیه فاصله شاخه‌ها از شکل ۲۳ در مرجع [۱۷] استفاده شد. طبق این مرجع، از نظر تئوری آرایه‌ها، اولین فاصله بهینه، در فاصله کمتر از یک طول موج و در حدود $0.6 \lambda_{g1}$ رخ می‌دهد. شبیه‌سازی نشان داد که این فاصله کم، باعث ایجاد تزیوج مخرب بین شاخه‌ها می‌شود و مناسب نیست. به همین دلیل، مقادیر بهینه بعدی به عنوان مقدار اولیه استفاده شد. سپس با استفاده از بهینه‌سازی بهره در شبیه‌ساز Frequency Solver نرم‌افزار CST، این مقادیر بهینه گردید و مقدار نهایی فاصله مرکز به مرکز دو شاخه آنتن مجاور، برابر $\lambda_{g1} = 38.72 \text{ mm}$ بدست آمد. پس از بدست آمدن فاصله بهینه بین شاخه‌ها، طراحی آرایه‌ای هشت شاخه با استفاده از آنتن تک شاخه شکل ۷ و مقسم توان طراحی شده بهینه، انجام شد. آنتن نهایی طراحی شده، دارای طول $50.4/1$ میلیمتر و عرض $3.0/76$ میلیمتر است که در ابعاد بردهای تجاری موجود قابل پیاده‌سازی است.

شکل ۱۲ (الف) شمای نهایی آنتن طراح شده را به همراه پترن شبیه‌سازی شده در فرکانس میانی 11.95 گیگاهرتز در دو حالت زمین

جدول ۱ پارامترهای اصلی شبیه‌سازی شده آنتن تک شاخه را نشان می‌دهد. میزان چرخش پرتو شبیه‌سازی شده در کل باند، برای حالت بدون زمین، زمین در پایین و زمین در بالا، به ترتیب برابر 3° ، 3° و 3° است. فاصله بهینه زمین هنگامیکه زمین در پایین آنتن SSPP قرار می‌گیرد، $D_{g1} = 6 \text{ mm} = 0.239 \lambda_0$ است. هنگامی که زمین در بالای آنتن SSPP قرار می‌گیرد، این فاصله به $D_{g2} = 5 \text{ mm} = 0.199 \lambda_0$ کاهش می‌یابد. طبق جدول ۱، گرچه وجود زمین اندکی بازده تشعشعی و بازده کلی متوسط را کاهش می‌دهد، مقادیر این دو پارامتر در دو حالت زمین تقریباً برابر یکدیگر هستند. علاوه بر آن، این مقادیر، حاکی از بازده بالای آنتن تک شاخه طراحی شده هستند.

شکل ۱۱ افزایش بهره شبیه‌سازی شده آنتن پایه را نسبت به آنتن بدون زمین، در دو حالت با زمین در پایین و با زمین در بالای آنتن SSPP نشان می‌دهد. پروفایل کلی آنتن برای زمین در پایین $D_{g1} + 2t_m + t_d = 6.883 \text{ mm} = 0.274 \lambda_0$ و برای زمین در بالا $D_{g2} + 2t_m + t_d = 5.883 \text{ mm} = 0.234 \lambda_0$ است.



شکل ۱۱- افزایش بهره شبیه‌سازی شده نسبت به آنتن بدون زمین، برای آنتن با زمین PEC در پایین و بالای آنتن SSPP.

Fig. 11. Simulated gain increase in comparison with the antenna without ground for the SSPP antenna with PEC ground at the bottom and on the top.

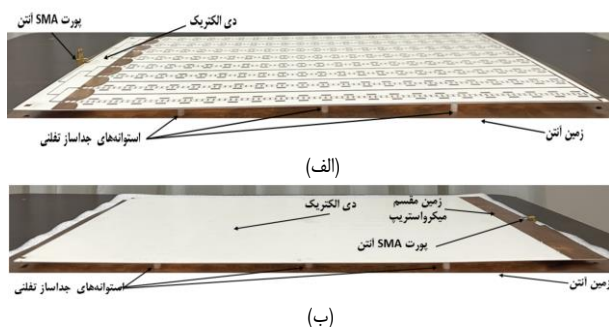
جدول ۱ و شکل ۱۱ نشان می‌دهند که ساختار دارای زمین در بالا، دارای افزایش بهره آنتن بیشتر و پروفایل آنتن کوچک‌تر نسبت

جدول ۱- پارامترهای اصلی شبیه‌سازی شده آنتن تک شاخه SSPP.

Table 1. Main simulated parameters of the single-branch SSPP antenna.

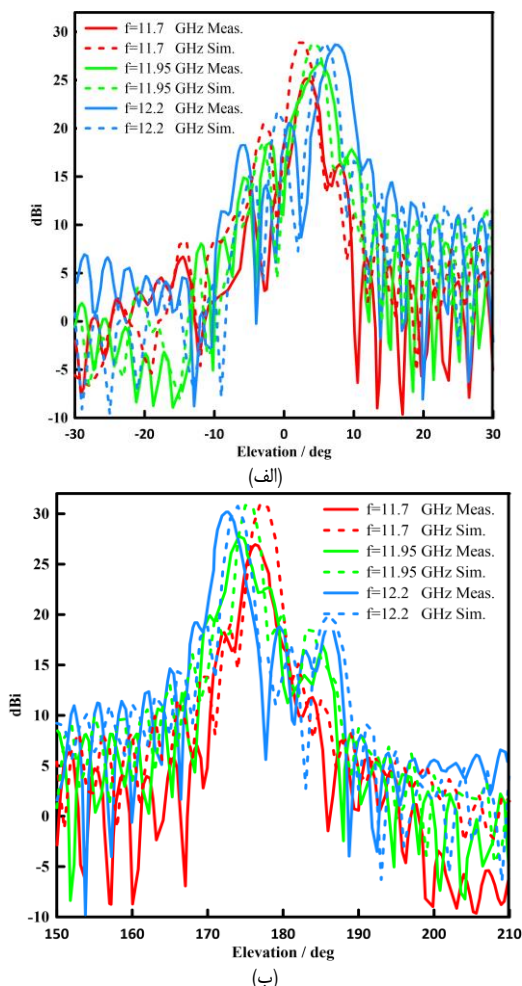
Ground Position	No Ground			Below			Top		
Frequency (GHz)	11.7	11.95	12.2	11.7	11.95	12.2	11.7	11.95	12.2
θ° *	2°	4°	5°	3°	5°	6°	177.3°	176°	174°
Freq. Scanning	5°-2°=3°			6°-3°=3°			177.3°-174°=3.3°		
Max. Gain (dBi)	17.7	18.53	18.63	22.7	21.4	21.8	23.1	22.8	22.7
Radiation Efficiency%	96.63			93.8			93.46		
Average Total Efficiency%	94.32			91.8			92.26		
Optimum Distance from Ground	-			6 mm			8 mm		

* θ° is the angle of the beam peak of the antenna pattern with z axis when z axis is perpendicular to antenna surface.



شکل ۱۳- آنتن نمونه هشت شاخه ساخته شده در حالت زمین (الف) در پایین و (ب) در بالا.

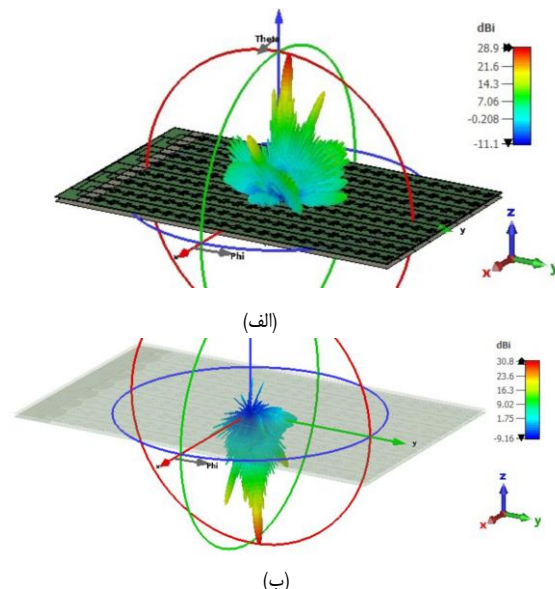
Fig. 13. Fabricated prototype eight-branch antenna with ground at (a) the bottom and (b) the top.



شکل ۱۴- پترن صفحه E آنتن هشت شاخه شبیه سازی شده و اندازه گیری شده در سه فرکانس ابتدا، وسط و آخر باند (۱۱/۷، ۱۱/۹۵ و ۱۲/۲ گیگاهرتز) برای (الف) زمین در پایین و (ب) زمین در بالا.

Fig. 14. Eight-branch antenna simulated and measured E-Plane pattern at three frequencies at the beginning, middle, and end of the band (11.7, 11.95, and 12.2 GHz) for both ground positions at the (a) bottom and (b) top.

در پایین در فاصله ۶ میلیمتری و زمین در بالا در فاصله ۵ میلیمتری نشان می دهد. در قسمت (ب) شکل ۱۲ جهت دیده شدن همه اجزا، ساختار آنتن و زمین بالای آن، به صورت شفاف نمایش داده شده است.



شکل ۱۲- شمای نهایی آنتن هشت شاخه طراحی شده به همراه پترن شبیه سازی شده در فرکانس میانی ۱۱/۹۵ گیگاهرتز و زمین در (الف) پایین آنتن با فاصله ۶ میلیمتر و (ب) بالای آنتن با فاصله ۵ میلیمتر.

Fig. 12. Final schematic of the designed eight-branch antenna with simulated pattern at the middle frequency of 11.95 GHz and ground at (a) the bottom of the antenna with a distance of 6 mm and (b) the top of the antenna with a distance of 5 mm.

شکل ۱۳ آنتن نمونه هشت شاخه ساخته شده را در حالت (الف) زمین در پایین و (ب) زمین در بالای آنتن SSPP نشان می دهد. آنتن در حالت زمین در بالا به صورت معکوس نشان داده شده است، چراکه در صورت قرارگیری زمین در بالای آنتن SSPP، زمین مسی مانع دیده شدن اجزای آنتن می شود. برای جداسازی زمین از آنتن در هر دو حالت، از استوانه با جنس تفلون در پایین و بالای آنتن استفاده شده است. شکل ۱۴ پترن آنتن هشت شاخه شبیه سازی شده و اندازه گیری شده در سه فرکانس ابتدا، وسط و آخر باند (۱۱/۷، ۱۱/۹۵ و ۱۲/۲ گیگاهرتز) را برای هر دو حالت زمین (الف) در پایین و (ب) بالا را نشان می دهد. پارامترهای اصلی شبیه سازی شده و اندازه گیری شده آنتن هشت شاخه در دو حالت زمین از روی شکل ۱۴ استخراج و در جدول ۲ خلاصه شده اند که تطابق بسیار نزدیکی را در مورد مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده مربوط به پارامترهای HPBW، زاویه بیشینه بهره θ و میزان اسکن فرکانسی، نشان می دهد. از طرفی دیگر، گرچه اطلاعات شکل ۱۴ و جدول ۲ تطابق خوبی بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده مقدار بهره بیشینه و SLL در فرکانس های بالا را نشان می دهد، اما با کم شدن فرکانس، تفاوت بین این نتایج افزایش می یابد.

جدول ۲- پارامترهای اصلی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده آنتن هشت شاخه در دو حالت زمین در پایین و بالای آنتن SSPP.

Table 2. Main simulated and measured parameters of the eight-branch antenna in two ground positions at the bottom and top of the SSPP antenna.

Ground Position	Below						Top					
	Simulated			Measured			Simulated			Measured		
Frequency	11.7	11.95	12.2	11.7	11.95	12.2	11.7	11.95	12.2	11.7	11.95	12.2
Max. Gain (dbi)	28.88	28.88	28.87	25.13	25.79	28.68	31.06	30.84	31.06	26.94	27.75	30.17
HPBW	2.9°	2.7°	2.5°	3.23°	3.03°	3.09°	3.1°	2.9°	2.7°	3.15°	4.2°	3.6°
SLL (dB)	-12.8	-10.3	-7.1	-8.88	-8.24	-8.12	-12	-10.8	-12	-8.72	-5.08	-11
θ^{*}	2°	4°	6°	3.3°	5.3°	7.3°	177°	175°	174°	176.3°	174.2°	172.7°
Freq. Scanning	6°-2°=4°			7.3°-3.3°=4°			177°-174°=3°			176.3°-172.7°=3.6°		

θ° is the angle of the antenna beam peak with the z axis when the coordinate system is according to Figure 12.

به بهره بالاتر وجود دارد. گرچه در آنتن‌های مجهز به ساختار چرخش پرتو برای دریافت بیشینه ماهواره‌های زمین‌آهنگ یا غیر زمین‌آهنگ، اسکن فرکانسی برای فرکانس کاری مورد نظر با چرخش پرتو جبران می‌گردد و اهمیتی ندارد، در حالت ایده‌آل، اسکن فرکانسی پارامتر مطلوبی برای آنتن دریافت ماهواره پهن‌بند نیست و باید مقدار آن تا حد امکان نزدیک به صفر باشد. در طراحی این مقاله، میزان اسکن فرکانسی به مقدار اندازه‌گیری شده ناچیز 4° برای زمین در پایین و 6° برای زمین در بالا، کاهش یافته است. با انتخاب نقطه کار مناسب در منحنی پاشندگی، میزان اسکن فرکانس آنتن قابل انتخاب است و بر حسب کاربری، می‌توان مقدار آن را تنظیم کرد. از آنجاکه نقطه کار مدار به فرکانس وابسته است، تغییر خواص مدار با تغییر فرکانس و مصالحه بین تقید امواج به سطح و پهنای باند فرکانسی، یکی از محدودیت‌های بارز فناوری SSPP را مشخص می‌کند. وابستگی ساختار مقسم ورودی به میدل‌های ربع طول موج که تابعی از فرکانس هستند نیز، یکی دیگر از محدودیت‌های ساخت آنتن‌های SSPP با روش پیشنهادی در این مقاله است. حساسیت این فناوری به دقت (تلورانس) فناوری ساخت که در بخش قبل درباره آن بحث شد، محدودیت دیگر این فناوری است.

جدول ۳ مقایسه عملکرد کار این مقاله با برخی آنتن‌های مشابه، از جمله برخی کارهای اخیر را نشان می‌دهد. بررسی مقادیر بهره در جدول ۳ نشان می‌دهد که آنتن پیشنهادی این مقاله در مقایسه با بیشترین بهره مربوط به یک آنتن چهارشاخه مرجع [۲۰]، بهره بسیار مناسب‌تری دارد. مقادیر اسکن فرکانسی موجود در این جدول نیز ناچیز بودن اسکن فرکانسی آنتن پیشنهادی مقاله را به اثبات می‌رساند. مقدار SLL متوسط آنتن پیشنهادی نیز در محدوده سایر آنتن‌های بررسی شده می‌باشد. ارتفاع (پروفایل) آنتن پیشنهادی مقاله فعلی نیز در محدوده بقیه آنتن‌ها است. عرض آنتن پیشنهادی

بررسی آزمایشگاهی نشان می‌دهد که دلیل این تفاوت، حساسیت آنتن به کوچکترین پستی و بلندی زمین مسی آنتن در طول فرآیند ساخت است، زیرا فاصله بهینه زمین PEC بسیار کوچک است و کمترین تغییرات، بسیار تاثیرگذار است. این تفاوت را می‌توان با یک فرآیند ساخت جایگزین تثبیت زمین با نوسانات کمتر در پیاده‌سازی صنعتی مانند استفاده از برد و دی الکتریک ضخیم پوشیده از مس به جای زمین مسی، به حداقل رساند. بهینه‌سازی آنتن در باند فرکانسی $11.7-12.2$ گیگاهرتز با استفاده از شبیه‌سازی انجام شده با نرم‌افزار CST، منجر به $S_{11} < -10$ dB برای حالت زمین در پایین و $S_{11} < -12$ dB برای حالت زمین در بالا در کل پهنای باند فرکانسی 0.5 گیگاهرتزی شد. پس از ساخت، برای اندازه‌گیری ضریب انعکاس، از دستگاه تحلیل گر ارسال/انعکاس Agilent 8720ET استفاده شد. پهنای باند امیدانسی اندازه‌گیری شده ($S_{11} < -10$ dB) برای حالت زمین در پایین آنتن $11.7-12.2$ گیگاهرتز (11.7 تا 12.2 گیگاهرتز) و برای حالت زمین در بالای آنتن، $11.7-12.2$ گیگاهرتز (11.7 تا 12.2 گیگاهرتز) است که هر دو از پهنای باند مورد نیاز 0.5 گیگاهرتز آنتن (11.7 تا 12.2 گیگاهرتز) پهن‌تر هستند. اعداد فوق تطابق مناسب نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری را نشان می‌دهند.

تحلیل نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده

نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن هشت شاخه نمونه ساخته شده در دو حالت زمین در پایین و زمین در بالا نشان می‌دهد که آنتن با زمین در بالا، بهره بیشینه بالاتر و اندازه (پروفایل)، زاویه پهنای پرتو نیم‌توان (HPBW) و زاویه اسکن فرکانس پایین‌تری دارد. آنتن هشت شاخه در هر دو حالت زمین، بهره‌ای در محدوده مورد نیاز برای دریافت سیگنال‌های ماهواره‌ای متعارف، ارائه می‌دهد. در صورت نیاز به بهره بیشتر، امکان افزایش تعداد شاخه‌ها و یا طول آنتن و دستیابی

جدول ۳- مقایسه عملکرد آنتن پیشنهادی با برخی کارهای مشابه

Table 3. Comparison of the performance of the proposed antenna with some similar works.

Reference	Volume ¹ (Profile)	Bandwidth (GHz)	Max. Gain (dB)	Min. Gain (dB)	Average Gain (dB)	A.R.E ¹ %	Average SLL (dB)	F.S.R ³	Array Size
[20]	$5.7 \lambda_0 \times$ $2.56 \lambda_0 \times$ $0.01 \lambda_0 \times$	6-16	18.5	15.22	16.86	8.16	-7.5	91°	4 Branch
[21]	$8.65 \lambda_0 \times$ $0.86 \lambda_0 \times$ $0.015 \lambda_0 \times$	6.3-11	14.2	9	12	95	-10	112°	2×11
[22]	-	5.8-6.8	12.5	11.5	12	-	-7.5	50°	4×4
This Letter ⁴	$20.08 \lambda_0 \times$ $12.34 \lambda_0 \times$ $0.274 \lambda_0 \times$	11.7- 12.2	28.67	25.15	27.1	83.54	-8.41	4°	8×22
This Letter ⁵	$20.08 \lambda_0 \times$ $12.34 \lambda_0 \times$ $0.234 \lambda_0 \times$		30.18	26.94	28.77	80.71	-8.2	3.6°	

¹Length, Width, Height, ²A.R.E: Average Radiation Efficiency, ³F.S.R: Frequency Scanning Range, ⁴ Values for Ground at bottom, ⁵ Values for Ground at top.

می‌کند. با اعمال شرایط خاص به سلول واحد موجبر SSPP آنتن موضوع این مقاله و کم کردن زاویه چرخش پرتو اصلی آنتن تک شاخه در اثر تغییر فرکانس، امکان ساخت آنتن تک شاخه مناسب دریافت سیگنال‌های ماهواره‌ای و افزایش بهره آن با یکارگیری آرایه متشکل از چند شاخه، اثبات گردید. در این مقاله، یک آنتن آرایه گیرنده ماهواره‌ای باند Ku مسطح هشت شاخه‌ای با بهره بسیار بالا از نوع SSPP-LW با زاویه دید محوری^۱ (boresight) شبیه‌سازی و ساخته شده است که در آن موقعیت زمین، هم به صورت متداول (در پایین) و هم به صورت نوآورانه و به صورت معکوس در بالای آنتن قرار دارد. تا آنجا که ما می‌دانیم، این مقاله اولین پیاده‌سازی از طراحی نوآورانه زمین معکوس برای آنتن‌های SSPP را ارائه می‌دهد که اثربخشی آن از طریق اندازه‌گیری‌های آنتن نمونه ساخته شده، تأیید گردید و ویژگی‌های عملکردی بهبود یافته‌ای را در مقایسه با زمین‌های مرسوم نشان می‌دهد. دی‌الکتریک SSPP در پیکربندی زمین معکوس، حفاظت محیطی ذاتی را برای آنتن فراهم می‌کند و در نتیجه نیاز به لایه‌های محافظ اضافی را برطرف می‌کند. تا آنجا که ما می‌دانیم، تکنیک تغذیه نوآورانه موج ایستای خط انتقال SSPP ما، منجر به یک طراحی منحصر به فرد تک پورته و کوچک سازی افقی در آنتن‌های موج نشستی SSPP با تشعشع محوری^۱ می‌شود. اسکن فرکانس ذاتی آنتن‌های موج نشستی SSPP که در کاربرد ما مطلوب نیست، با طراحی مناسب به مقدار اندازه‌گیری شده ناچیز $3/6^\circ$ کاهش یافته است. همچنین، آنتن ساخته شده، دارای مقدار بهره بیشینه بسیار بالای ۳۰/۱۸ dBi و میانگین HPBW بسیار پایین

مقاله به علت تعداد شاخه‌های بیشتر، نسبت به دیگر آنتن‌ها بزرگتر شده است. طول آنتن پیشنهادی برای بالا بردن بهره آنتن تا حد امکان بزرگ طراحی شده است و به همین دلیل نسبت به دیگر آنتن‌ها، بزرگتر است. در ساخت آنتن پیشنهادی مقاله، با قربانی کردن پهنای باند، بهره بیشتر و زاویه اسکن کمتری نسبت به سایر آنتن‌های جدول بدست آمده است که در بررسی محدودیت‌های آنتن SSPP به آن اشاره شد. بررسی خواص آنتن‌های SSPP در این مقاله نشان داد که از اینگونه آنتن‌ها می‌توان هم در آنتن‌های ارسال و دریافت نصب شده در ماهواره، و هم در آنتن‌های ارسال و دریافت سیگنال ماهواره در زمین، استفاده کرد. همچنین زمین در بالای آنتن به شکل یک محافظ برای آنتن عمل می‌کند و از آن در برابر اثرات آب و هوا، محافظت می‌کند. طبق نتایج جدول ۲، آنتن پیشنهادی در این مقاله، در هر دو حالت زمین دارای بهره فوق‌العاده بالا، HPBW باریک و زاویه اسکن ناچیز است.

نتیجه‌گیری

نتایج ساخت آنتن تک شاخه SSPP با پترن بادبزنی که با فرکانس تغییر می‌کند، نشان داد که امکان ساخت آنتن‌های چند پرتوی که هر پرتوی آن در یک فرکانس عمل می‌کند برای کاربری سامانه‌های فضایی چند پرتوی با حجم کم، با این فناوری وجود دارد. این امر در ماهواره‌های زمین‌آهنگ و غیر زمین‌آهنگ HTS و نیز کهکشان‌های ماهواره‌ای غیر زمین‌آهنگ جدید، امکان کوچک کردن سامانه‌های ماهواره‌ها یا پرتاب چندین ماهواره با یک سامانه ماهواره‌ها را عملی

and terahertz regimes,” *Digital Communications and Networks*, vol. 4, no. 4, pp. 244–257, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2017.08.004>.

- [10] G. S. Kong, H. F. Ma, B. G. Cai, and T. J. Cui, “Continuous leaky-wave scanning using periodically modulated spoof plasmonic waveguide,” *Scientific Reports*, vol. 6, 2016, Art. no. 29600, <https://doi.org/10.1038/srep29600>.
- [11] H. W. Yu, Y. C. Jiao, C. Zhang, and Z. Bin Weng, “Dual-linearly polarized leaky-wave patch array with low cross-polarization levels using symmetrical spoof surface plasmon polariton lines,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 3, pp. 1781–1786, 2021, <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3015059>.
- [12] S. Da Xu *et al.*, “A hybrid substrate integrated waveguide and spoof surface plasmon polariton leaky-wave antenna with open stopband suppressed,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 32, no. 11, 2022, <https://doi.org/10.1002/mmce.22413>.
- [13] K. Da Xu, F. Zhang, Y. Guo, L. Ye, and Y. Liu, “Spoof Surface Plasmon Polaritons Based on Balanced Coplanar Stripline Waveguides,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 32, no. 1, pp. 55–58, 2020, <https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2957059>.
- [14] S. Sun, Q. He, S. Xiao, Q. Xu, X. Li, and L. Zhou, “Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves,” *Nat. Mater.*, vol. 11, no. 5, pp. 426–431, 2012, <https://doi.org/10.1038/nmat3292>.
- [15] J. Wang, L. Zhao, Z. C. Hao, and T. J. Cui, “An ultra-thin coplanar waveguide filter based on the spoof surface plasmon polaritons,” *Applied Physics Letters*, vol. 113, no. 7, 2018, Art. no. 071101 <https://doi.org/10.1063/1.5045069>.
- [16] M. Siasifar, A. Keshkar, and S. Amiri, “Optimum patch selection for wideband planar spoof surface plasmon polaritons ku-band satellite receive antenna,” in *2024 11th International Symposium on Telecommunications (IST)*, 2024, pp. 135–140, <https://doi.org/10.1109/IST64061.2024.10843596>.
- [17] V. Rabinovich and N. Alexandrov, *Antenna Arrays And Automotive Applications*, New York, 2013. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1074-4>.
- [18] K. A. Abdalmalak *et al.*, “Standing-wave feeding for high-gain linear dielectric resonator antenna (DRA) array,” *Sensors*, vol. 22, no. 8, 2022, Art. no. 3089, <https://doi.org/10.3390/s22083089>.
- [19] M. Siasifar, A. Keshkar, and S. Amiri, “A novel power divider network with momentum matching for feeding arrays of arbitrary spoof surface plasmon polaritons antennas,” *Tabriz Journal of Electrical Engineering*, early access, 2026, <https://doi.org/10.22034/tjee.2026.69036.5080>.
- [20] J. Wang, K. Xu, X. Kong, R. Xu, and L. Zhao, “Wide-angle beam-scanning leaky-wave antenna array based on hole array SSPPs,” *IEEE Antennas*

و ۳/۱۳^۰ است. عملکرد به دست آمده نشان می‌دهد که طرح پیشگام پیشنهادی در این کار برای استفاده در آنتن‌های مسطح ماهواره‌ای و نیز آنتن‌های مورد استفاده در فناوری 5G، 6G و ماهواره‌های GSO و NGSO مناسب است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] B. Palacin *et al.*, “Multibeam antennas for very high throughput satellites in Europe: Technologies and trends,” in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Paris, France, 2017, pp. 2413–2417, <https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928493>.
- [2] M. Schneider, C. Hartwanger, and H. Wolf, “Antennas for multiple spot beam satellites,” *CEAS Space Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 59–66, 2011, <https://doi.org/10.1007/s12567-011-0012-z>.
- [3] G. Minelli, “Mobile cubesat command and control (MC3) ground network Cubesat flight opportunities,” Naval Postgraduate School, Monterey, CA, USA, <https://www.nasa.gov/wpcontent/uploads/2023/10/na-val-postgraduate-school-ground-network-and-cubesat-program.pdf>
- [4] D. F. Guan, P. You, Q. Zhang, Z. H. Lu, S. W. Yong, and K. Xiao, “A wide-angle and circularly polarized beam-scanning antenna based on microstrip spoof surface plasmon polariton transmission line,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, no. July, pp. 2538–2541, 2017, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2731877>.
- [5] O. Quevedo-Teruel, M. Ebrahimpouri, and F. Ghasemifard, “Lens antennas for 5G communications systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 7, pp. 36–41, 2018, <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700977>.
- [6] T. Driscoll *et al.*, “Performance of a three-dimensional transformation-optical-flattened Luneburg lens,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 12, pp. 13262–13273, 2012, <https://doi.org/10.1364/OE.20.013262>.
- [7] S. A. Maier, *Plasmonics: Fundamentals and Applications*, 1st ed., New York, NY, USA: Springer, 2007, <https://doi.org/10.1007/0-387-37825-1>.
- [8] J. B. Pendry, L. Martín-Moreno, and F. J. Garcia-Vidal, “Mimicking surface plasmons with structured surfaces,” *Science*, vol. 305, no. 5685, pp. 847–848, 2004, <https://doi.org/10.1126/science.1098999>.
- [9] R. S. Anwar, H. Ning, and L. Mao, “Recent advancements in surface plasmon polaritons-plasmonics in subwavelength structures in microwave

- <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3137241>.
- [22] Z. C. Hao, J. Zhang, and L. Zhao, "A compact leaky-wave antenna using a planar spoof surface plasmon polariton structure," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 5, 2019, Art. no. e21617, <https://doi.org/10.1002/mmce.21617>.
- and *Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 7, pp. 1731–1735, 2023, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3262567>.
- [21] L. Ye, Z. Wang, J. Zhuo, F. Han, W. Li, and Q. H. Liu, "A back-fire to forward wide-angle beam steering leaky-wave antenna based on SSPPs," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 5, pp. 3237–3247, 2022,