Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers
Vol. 22 No. 4, 2025
DOI: 10.61882/jiaeee.22.4.83

Ku Wide Band Mono-Pulsed Printed Circuit Array Antenna

Mohammad Reza Salehi[1], Yaqob Qaneh Qarehbagh[2]

[1] PhD Student, Department of Electrical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran
salehimr@ihu.ac.ir
[2] Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran
yqane@ihu.ac.ir

Abstract:

In this paper, the design, simulation and manufacturing of broadband mono-pulse printed circuit array antenna in KU frequency band is presented. According to the need to use a low-volume and light-weight plate structure, the optimal antenna element has been selected. The feeding network is selected and simulated according to the array antenna element. The mono-pulse pattern shape is preserved in the bandwidth range. The simulation of the final structure of the mono-pulse array was done with CST software and a bandwidth of 30% with an average gain of 23 dB was obtained. To validate the designed structure, the measurement results of the constructed antenna are compared and presented with the simulation results. The measurement results were similar to the simulation results.

Keywords: Printed circuit array, Wide band mono-pulsed array, High gain planar array, Wide band planar element

Article Type: Research

Received: 07. 08. 2024

Revised: 23. 04. 2025

Accepted: 05. 07. 2025

Corresponding author: Y.Qaneh Qarehbagh

Corresponding author's address: Elec. Eng. Dep., Imam Hossein Uni. Tehran, Iran

Copyright © 2025 The Authors. Published by Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. Motivation of the work

Today, the use of improved and optimized subsystems in telecommunication and electronic warfare systems is highly important. Utilizing lightweight and compact structures while maintaining desired performance and response characteristics is equally critical. Among the key subsystems in radar and electronic warfare systems are broadband mono-pulse antennas. In this article, a high-bandwidth mono-pulse antenna is investigated and simulated. The wide bandwidth enables the reception of signals across a broader frequency range, while the mono-pulse functionality enhances multi-target tracking within the operational bandwidth. A simpler and lighter antenna structure provides significant practical advantages. Thus, a broadband mono-pulse array antenna with low structural complexity was designed to improve manufacturability and ease of deployment.

2. Contributions

In this research, for the first time, this element has been used in a mono-pulsed array, resulting in a simple, lightweight, high-gain, planar, broadband mono-pulsed array antenna. Compared to other studies on mono-pulsed array antennas, this work achieves superior performance with fewer complexities. None of the recent studies reviewed have simultaneously demonstrated broadband characteristics, low complexity, and high gain.

3. Procedures

To design a high-bandwidth mono-pulsed array antenna, a wideband printed dipole element capable of covering the desired bandwidth was used. The design of the wideband planar element is the first and highly important step in the design process. Various wideband elements are available for use. An element that, in addition to having high bandwidth, can also feature printed circuit board feed ability on a single plane is required. This ultimately enables the realization of an array antenna with important characteristics such as small dimensions, light weight, and high gain. The return loss parameters of the simulated antenna and the fabricated antenna were measured and compared. The sum and difference radiation patterns of the fabricated antenna were measured. The number of elements, bandwidth, maximum gain, efficiency, and manufacturing complexity were compared with recent previous works.

4. Findings

A mono-pulsed array antenna with a 26.6% bandwidth and dimensions of 10×10×0.5 cm, a gain of 23 dB, and an efficiency of 55% was fabricated and measured. This antenna has low structural complexity and is lightweight. Using this antenna, it is possible to receive and track radiated signals in the environment within the Ku frequency band.

5. Conclusion

Given the daily advancements in telecommunications equipment and their miniaturization, it is possible to miniaturize and improve the performance of telecommunication antennas. This reduces manufacturing complexity and helps develop target-tracking antenna structures while maintaining mono-pulse characteristics at high bandwidths. In this article, a wideband Ku-band mono-pulse antenna is presented using lightweight planar structures, which has small dimensions, is lightweight, and has an average gain of 22dB. As shown, all mono-pulse characteristics of the antenna are preserved across the bandwidth. This type of antenna can be used in mobile systems and those with limited installation space.

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال بیست و دوم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۴، صفحات ۸۳-۸۹

DOI: 10.61882/jiaeee.22.4.83

آنتن آرایه مدارچاپی مونوپالس پهن باند Ku

محمدرضاصالحی[۱]، یعقوب قانع قره‌باغ[۲]

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه جامع امام حسین(ع)- تهران- ایران

salehimr@ihu.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه جامع امام حسین(ع)- تهران- ایران

yqane@ihu.ac.ir

چکیده: در این مقاله طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آنتن آرایه مدار چاپی مونوپالس پهن باند در باند فرکانسی KU ارائه شده است. باتوجه به نیاز استفاده از ساختار صفحه‌ای کم حجم و سبک ، عنصر آنتن بهینه انتخاب شده است. شبکه تغذیه‌ای متناسب با نوع عنصر آنتن آرایه انتخاب و شبیه‌سازی شده است. شکل پترن مونوپالس در محدوده پهنای‌باند حفظ شده است. شبیه‌سازی ساختار نهایی آرایه مونوپالسی با نرم‌افزار CST انجام شد و پهنای‌باند ۳۰ درصدی با بهره میانگین ۲۳ دسی بل بدست آمد. برای صحت‌سنجی ساختار طراحی شده، نتایج اندازه‌گیری با نتایج شبیه‌سازی مقایسه و ارائه شده است. نتایج اندازه‌گیری مشابه نتایج شبیه‌سازی بدست‌آمد.

کلمات کلیدی: آرایه مدارچاپی،آرایه مونوپالسی پهن‌باند،آرایه صفحه‌ای بهره بالا،عنصر صفحه ای پهن‌باند

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: یعقوب قانع قره‌باغ

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشگاه جامع امام حسین (ع)-دانشکده‌ی برق

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۴ ©. ناشر این مقاله، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

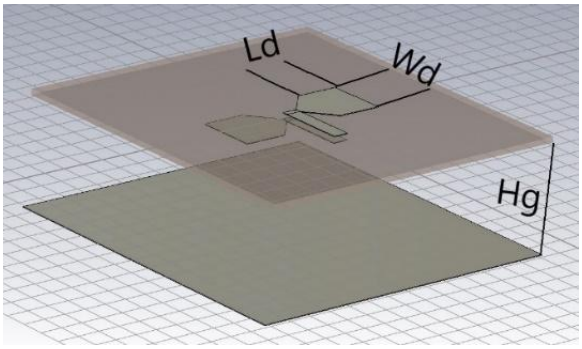
۱- مقدمه

امروزه استفاده از زیر سیستم‌های بهبود یافته و بهینه در سامانه‌های مخابراتی و جنگ الکترونیک از اهمیت بالایی برخوردار است. با بهره‌گیری از ساختارهای سبک و کم حجم در عین حال به همراه داشتن کیفیت و پاسخ مطلوب نیز بسیار مهم است. یکی از زیر سیستم‌های مهم و گلوگاه در سیستم‌های راداری و جنگ الکترونیک، آنتن‌های پهن باند با قابلیت مونوپالسی است. در این مقاله آنتن مونوپالسی با پهنای‌باند بالا مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. در مرجع [۱] یک آنتن آرایه شکافی ۶۴ عنصر خطی با حفره پشتی و تکنولوژی ساخت SIW و با استفاده از تحریک مودهای مرتبه بالاتر در باند Ku ارائه شده است که یک آرایه ۸*۸ عنصر است. بهره آن ۱۹.۸ دسیبل است، پهنای‌باند آن نیز ۱.۳درصد گزارش شده است. لذا بهره و پهنای‌باند امپدانسی آن کم است. در این مرجع اشاره‌ای به آنتن مونوپالس نشده است. در مرجع [۲] یک آنتن شکافدار موجبری راداری براساس تحریک جدید مبتنی بر IRIS در داخل موجبر ارائه شده‌است که آرایه ۱۳۶ عنصر در باند S با پهنای‌باند ۱۳درصد و بهره میانگین ۲۴دسیبل گزارش شده است. پهنای باند آن کم است و مونوپالس نیست. در مرجع [۳] یک آنتن مونوپالس موجبری روزنه‌ای موج‌آهسته با پهنای‌باند کم ارائه شده است. پهنای باند ۱۱.۹۵ تا ۱۲.۲۵ گیگاهرتز را به عنوان پهنای‌باند مونوپالس گلبرگ مجموع و تفاضل معرفی کرده است. به خاطر ساختار موج آهسته در پهنای باند متناظر گلبرگ‌ها با تغییر فرکانس چرخش دارد. در مرجع [۴] یک آنتن آرایه مونوپالس ۴*۴ با پهنای‌باند ۲۳درصد و بهره ۱۹.۴دسیبل و عمق‌صفر ۳۱دسیبل ارائه شده است که پیچیدگی طراحی و پیچیدگی ساخت بالایی را به همراه دارد. بدلیل پیچیدگی بالای ساخت، هزینه ساخت نیز بالا است. در مرجع [۵] یک آنتن آرایه‌ای ریزنوار با تحریک روزنه‌ای گزارش شده است که دارای پهنای باند ۱۱درصدی و پیچیدگی ساخت به نسبت بالایی در شبکه تغذیه دارد همچنین نتایج ساخت آنتن کامل مونوپالس گزارش نشده است و تنها در شبیه‌سازی نتایج ارائه شده است. ۱/۱۲ آنتن اصلی ساخته شده است در جدول مقایسه نتایج تعداد عنصر های بخش ساخته شده و راندمان به درستی گزارش نشده است. پهنای‌باند ارائه شده کم است. در مرجع [۶] یک آنتن آرایه مونوپالس با پهنای‌باند ۲۷درصدی با بهره۲۲دسیبل و عمق صفر ۴۰ دسیبل گزارش شده است. در این آنتن از ساختار روزنه‌ای و موجبرهای GWG استفاده شده است. پیچیدگی ساخت این آنتن بالا است و هزینه ساخت و ماشین‌کاری بالایی دارد. همچنین در الگوهای تشعشعی اندازه‌گیری شده لوچی عمق‌صفر در پهنای باند به صورت قابل توجه‌ای است که خطاهای دقت جهت‌زنی را ایجاد می‌نماید. در مقاله [۷] یک آنتن آرایه ۲*۲ مونوپالس با پهنای باند ۲درصدی، بهره ۱۰.۵۷دسیبل و عمق‌صفر ۳۳ دسیبل گزارش شده‌است که پهنای باند آن کم است و استفاده از ساختار پیشنهادی برای آرایه‌های با تعداد عنصر بیشتر باتوجه به شکل تغذیه آن ممکن نیست. در مقاله [۸] یک آنتن آرایه فازی مونوپالس با پهنای‌باند ۱۵درصدی درگاه مجموع با بهره ۱۱.۸دسیبل و عمق‌صفر ۱۹.۸دسیبل گزارش شده‌است. در این آنتن از چند زیرلایه متفاوت استفاده شده‌است که پیچیدگی ساخت بالایی دارد و شکل مونوپالسی الگوهای تشعشعی از دست رفته است. در مرجع [۹] یک آنتن آرایه مونوپالس با ساختار چندلایه ۳۲*۳۲ عنصر با بهره ۲۸دسیبل، پهنای باند ۲۶درصد و عمق‌صفر ۵۶ دسیبل گزارش شده است. راندمان آنتن ۱۲درصد گزارش شده که کم است همچنین پیچیدگی ساخت بالایی دارد. در مرجع[۱۰] یک آنتن آرایه مونوپالس با پهنای باند ۲درصدی و بهره ۱۳.۶دسیبل و عمق‌صفر ۲۴دسیبل گزارش شده است که پهنای‌باند کمی دارد. در مرجع [۱۱] یک آنتن آرایه ۱۶ در ۱۶ عنصری در باند Ku با پهنای‌باند ۱۲.۹ درصد با VSWR کمتر از ۱.۵ ارائه شده است که از چند لایه تشکیل شده است. همچنین این آنتن دارای بهره ثابت ۳۳ دسی بل در ۱۲.۹ درصد پهنای باند است. در مرجع [۱۲] آنتنی با پهنای باند ۴۰ درصدی از عنصر یاگی ارائه شده است اما بهره ثابتی ندارد و بهره از ۱۳ دسی‌بل تا ۱۷ دسی‌بل در حدود ۴ دسی‌بل متفاوت خواهد بود و بهره‌ای در حدود میانگین ۱۵دسی بل ارائه شده است. مونوپالس در یک راستا است. با استفاده از لنز دی‌الکتریک همگرایی پترن در فرکانس‌های مختلف را بدست آورده است که دارای ابعاد بزرگ، پیچیدگی ساخت و هزینه ساخت بالا است. در مرجع [۱۳] آنتن آرایه ریزنوار سه لایه ارائه شده است، بهره آنتن ۲۴ دسی‌بل و پهنای‌باند آنتن ۱۰ درصد در باند x ارائه شده است که پهنای‌باند کم است. در مرجع [۱۴] آنتن مونوپالس با بهره بالا و پهنای‌باند بالا گزارش شده است که با شبیه‌سازی و جانمایی فیدهای رفلکتور در جای مشخص می‌توان به این موضوع رسید. فیدی جهت بهره‌برداری معرفی نشده است همچنین در مقاله نمونه ساخته شده‌ای گزارش نشده است. آنتن‌های رفلکتوری ابعاد بالا و سنگین می‌باشند. در مرجع [۱۵] به معرفی یک آنتن مونوپالسی ۷۶ عنصری تنک‌سازی‌شده پهن‌باند ۱۳.۹ درصدی در باند x با بهره ۲۴ دسی‌بل ارائه شده است. پهنای باند آنتن کم است. در مرجع [۱۶] در ابتدا آنتن مایکرواستریپ با تغذیه کابل کواکسیال طراحی شده است. برای افزایش پهنای‌باند در مرحله بعد بر روی آنتن رو لایه‌ای قرار داده و سپس یک آرایه ۴×۴ از آرایه آنتن‌ها در کنار یکدیگر قرار داده شده و به شبیه‌سازی آن پرداخته است. با استفاده از زیرلایه روی سطح بالایی آنتن در کنار آنتن به عنوان سطح امپدانسی غیرفعال RIS و با استفاده از زیرلایه روی سطح بالایی آنتن به عنوان سطح بازتابی تکه‌ای PRS و تنها با استفاده از چهار آنتن توانسته به بهره dB۱۲.۶ و پهنای‌باند ۲۵ درصدی دست پیدا کند. پهنای باند افزایش داده است اما مونوپالس گزارش نشده است. یا در مرجع [۱۷] با استفاده از سه زیرلایه که در فاصله نصف طول موج از آنتن قرار دارد و با استفاده از تنها یک آنتن توانسته به بهره

dB۲۰.۸ و پهنای‌باند ۱۵ درصدی دست پیدا کند ولی مونوپالس گزارش نشده‌است. از ایده‌ی شکاف ها با طول متفاوت در [۱۸] برای افزایش پهنای‌باند استفاده شده است. همچنین، برای دستیابی به بهره‌ی بالا در پهنای‌باند وسیع، فاصله‌ی بین شکاف‌ها نیز متفاوت است. بر این اساس، یک آرایه‌ی خطی شکافی تشدیدی با چهار عنصر در ساختارSIW و در فرکانس۶۰ گیگاهرتز طراحی شده است. پهنای‌باند امپدانسی آنتن ۱۸.۸درصد و حداکثر بهره‌ی آن۱۱.۵ دسی بل می‌باشد. ساختار پیشنهاد شده نسبت به آرایه‌های با فواصل یکسان، پهنای‌باند امپدانسی وسیع‌تر و حداکثر بهره‌ی بیشتری دارد ولی مونوپالسی گزارش نشده است.

۲- عنصر پهن باند

استفاده از عنصر پهن باندی که بتواند پهنای‌باند مورد نظر را پوشش و یا تا حدی پوشش دهد اهمیت بالایی دارد. عنصرهای متفاوت پهن‌باندی برای استفاده وجود خواهد داشت. اما عنصری که به جز داشتن پهنای‌باند بالا بتواند خصوصیات مورد نظر دیگر را هم داشته باشد قابل توجه است. ویژگی‌های مهمی از قبیل ابعادکم، سبک و بهره بالا است. با استفاده از رابطه ریاضی می‌توان ابعاد تقریبی عنصر را بدست آورد و در ادامه با شبیه‌سازی عنصر دایپل مدار چاپی روی زیرلایه مدارچاپی ۵۸۸۰ همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است به ابعاد نهایی رسید. در رابطه (۱) امپدانس مشخصه عنصر مدنظر را می‌توان بدست‌آورد.



شکل(۱): عنصر دایپل مدارچاپی تغذیه بالانس در باند Ku

$$Z_C = 120 \ln \cot \frac{\theta_0}{4} \qquad (۱)$$

به طوریکه θ_0 زاویه بازشوندگی هر سمت عنصر می‌باشد، با افزایش θ_0 پهنای‌باند افزایش می‌یابد، معمولا θ_0 بین ۶۰ درجه تا ۹۰ درجه است تا به بهترین پهنای‌باند رسید و همچنین ابعاد کم باشد. در رابطه (۲) می‌توان طول عنصر آنتن مورد نظر را بدست‌آورد:

$$L = \frac{\lambda}{2\sqrt{\varepsilon_{reff}}} \qquad (۲)$$

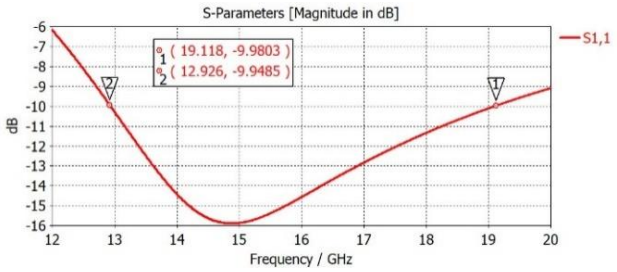
به طوریکه λ طول موج فرکانس پایین پهنای‌باند است با این‌حال با شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به طول دقیق مورد نظر می‌توان دست‌یافت. طول L برابر با ۷ میلی متر است و طول L_d برابر با ۲ میلی متر است. میدان تشعشعی هر عنصر با استفاده از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$E = E_1(1-e^{j\,2kH_g}) \qquad (۳)$$

به صورتیکه E_1 دامنه میدان تشعشعی تابیده شده از هر عنصر است و k عدد موج است H_g فاصله از زمین یا همان صفحه بازتابنده است. فاصله H_g در بهترین حالت معادل $\lambda/4$ است که بیشترین میدان تشعشعی به زمین می‌رسد و بازتابش آن با میدان تشعشعی عنصر جمع می‌شود همانطور که در رابطه (۴) مشاهده می‌کنید.

$$E = 2E_1 t \qquad (۴)$$

فاصله زمین از چهار لبه عنصر آنتن ما باید از نظر ابعادی کمترین باشد تا ابعاد عنصر کوچک باشد و همچنین این کوچک‌سازی،کمترین اثر را روی پاسخ عنصر داشته باشد. اما با توجه به اینکه عنصر طراحی شده قرار است در آرایه آنتنی استفاده شود محدودیت فاصله از اطراف فقط مربوط به عنصرهای اطراف آرایه است. با شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پارامتر های L_d و W_d پهنای‌باند ۳۸ درصدی و برگشتی ۱۰- دسی بل تک عنصر بدست آمده است. پهنای‌باند امپدانسی عنصر در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل(۲): پارامتر پراکندگی S11 برحسب دسی بل عنصر دایپل مدار چاپی تغذیه بالانس در باند Ku

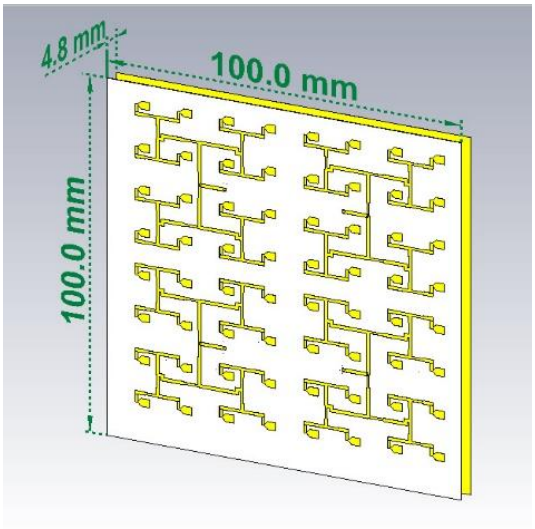
۳- شبکه تغذیه

در طراحی آنتن آرایه‌ای با عنصر پاپیونی نیاز به شبکه تغذیه مناسب است. شبکه تغذیه‌ای که سبک و حجم کمی داشته باشد و در عین حال پهنای‌باند وسیعی را پوشش بدهد. شبکه‌های تغذیه مناسب برای این نوع طراحی یکی از تغذیه‌های مقید است. سیستم تغذیه مقید به دو گروه اصلی سری و موازی و ترکیبات سری-سری، سری-موازی، موازی-سری و موازی-موازی می‌توان تقسیم کرد. روش پیاده‌سازی این شبکه تغذیه به صورت خط موازی است. چراکه در آنتن پیشنهاد شده، تشعشع بازتابیده شده از صفحه زمین باید از صفحه شبکه تغذیه و آرایه طراحی شده بتواند عبور کند. انتخاب زیرلایه مدارچاپی ۵۸۸۰ به دلیل تلفات کم به نسبت دیگر زیرلایه‌ها می‌باشد. تلفات ناشی از خطوط موازی شبکه تغذیه با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد و به همین دلیل نزدیکی بهره آنتن در فرکانس‌های مختلف از ابتدای پهنای‌باند تا انتها اتفاق

افتاده است. در آرایه با افزایش فرکانس بدلیل سطح مقطع موثر بیشتر در فرکانس‌های بالاتر و همچنین فاصله عنصری بیشتر به نسبت فرکانس‌های بیشتر دلیل افزایش بهره آنتن است. شبکه تغذیه موازی-موازی خط موازی در شکل ۳ نشان داده شده است.

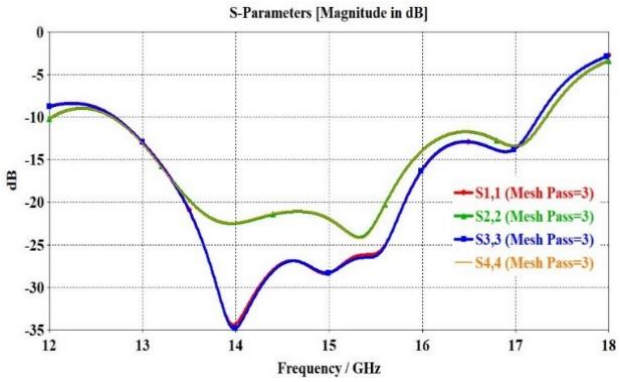
۴- آرایه مونوپالسی پهن باند

آرایه مونوپالسی صفحه‌ای پهن باند ۸ در ۸ پاپیونی مدار چاپی با تغذیه خط موازی با صفحه زمین در فاصله $\lambda/4$ در شکل ۳ نشان داده شده است. ابعاد آرایه ۱۰ سانتی‌متر در ۱۰ سانتی‌متر در ۰.۴۸ سانتی‌متر است. هر ۱۶ عنصر به همراه شبکه تغذیه یکی از آنتن‌های مونوپالسی است. تقارن شبکه تغذیه نسب به محور افقی سبب کاهش سطح گلبرگ جانبی شده است. ابعاد و سبک در کنار بهره بالای آن از ویژگی‌های اصلی این آنتن است.



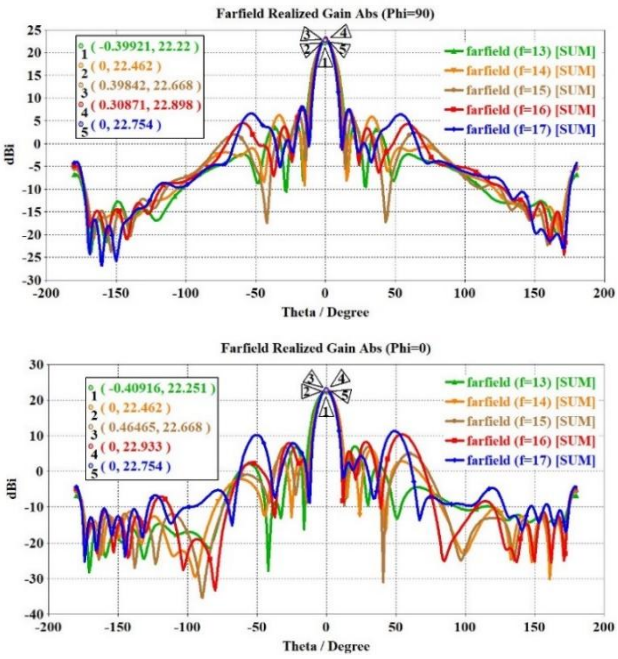
شکل(۳): آرایه ۸ در ۸ پاپیونی مدارچاپی مونوپالس، نمای بالایی آنتن

پاسخ پارامتر پراکندگی برگشتی در شکل ۴ نشان داده شده‌است.



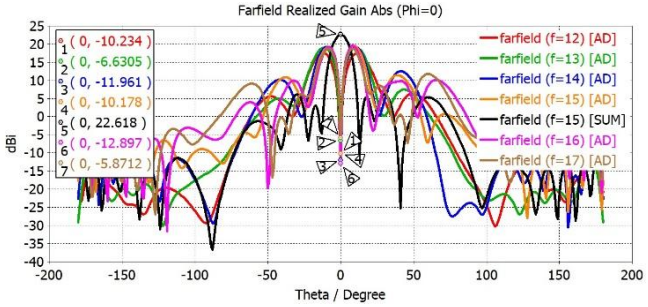
شکل(۴): پارامتر پراکندگی S11 برحسب دسی بل آرایه ۸در۸ مدارچاپی مونوپالس

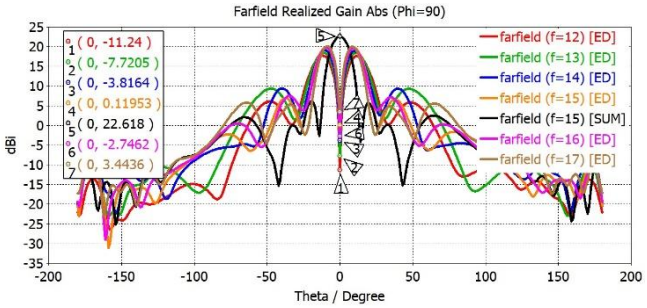
پترن تشعشعی مجموع در دو صفحه تقاطع سمت و ارتفاع در فرکانس‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. عرض گلبرگ در هر دو سمت 12 درجه است. سطح گلبرگ جانبی در فرکانس‌های مختلف در ارتفاع کمتر از ۱۵ دسی‌بل و در سمت کمتر از ۱۲ دسی‌بل است.



شکل(۵):پترن مجموع در دو راستای سمت و ارتفاع آرایه ۸در۸ مونوپالسی

آنتن مونوپالس مطرح شده دارای عمق صفر پترن تفاضلی متفاوت در فرکانس‌های مختلف است. در شکل ۶ پترن تفاضلی در فرکانس‌های اول باند، وسط باند و انتهای باند به همراه پترن مجموع گزارش شده است. عمق صفرهای بدست آمده ۵- دسی بل و نسبت به پترن مجموع حدودا ۳۰ دسی بل است.

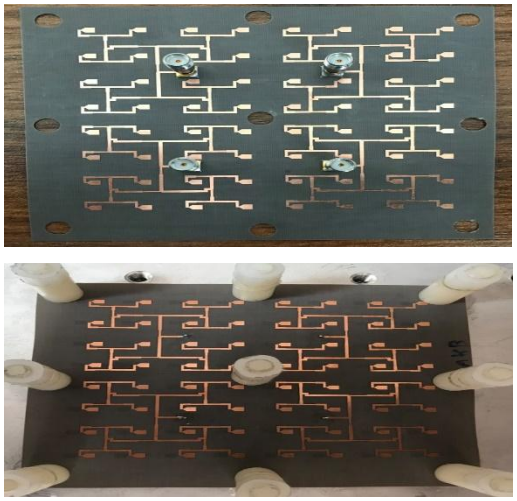




شکل(۶): عمق صفر پترن تفاضلی اول و انتهای باند آنتن آرایه مونوپالسی

۵- نتایج ساخت و اندازه‌گیری

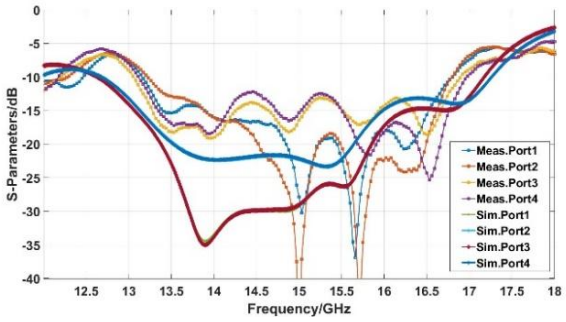
آنتن مونوپالسی صفحه ای ۸ در ۸ پهن باند مدارچاپی روی زیر لایه ۵۸۸۰ با تغذیه خطوط موازی چاپ شده است. صفحه زمین در فاصله ۱/۴ طول موج با ماشین‌کاری ساخته شده است و پایه‌های آنتن با استفاده از ستون‌های تفلونی پیاده‌سازی شده است که در کارآگاه مکانیک تراشکاری آن صورت گرفته است. در شکل ۷ آنتن مونوپالسی پهن باند Ku بر روی زیرلایه مدارچاپی ۵۸۸۰ با e_r برابر ۲.۲ نشان داده شده است. از کانکتورهای روی بردی SMP و کانکتورهای Through مبدل SMP به SMA استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری الگوهای تشعشعی مجموع و تفاضل از ۴ عدد ترکیب‌کننده TBG-120180-3S-180 که هرکدام اختلاف فاز ۱۸۰ درجه ارائه می‌دهند استفاده شده است. برای اندازه‌گیری آنتن از کابل های با تلفات مشخص یکسان و همچنین کانکتورهای با تلفات مشخص یکسان استفاده شده است. برای اتصال شبکه ترکیب‌کننده به آنتن از آچار مخصوص این‌کار استفاده شده است تا کانکتورهای ترکیب‌کننده به آنتن به یک میزان مشخص محکم و متصل شوند. باتوجه به مشخصات ترکیب‌کننده و ایده‌آل نبودن همه شرایط تست سعی بر آن شده است که بهترین نتایج استخراج شود.





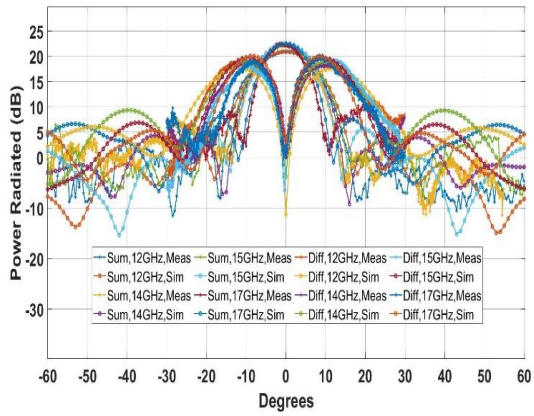
شکل(۷): آنتن مونوپالسی باند Ku ساخته شده که در سه جهت بالا، پایین و سمت نشان داده شده است.

مقایسه نتایج پارامتر های پراکندگی آنتن ساخته شده و شبیه سازی در شکل ۸ آورده شده است. پهنای‌باند آنتن ساخته شده همانطور که نشان داده‌شده‌است پهنای‌باند آنتن شبیه‌سازی را دنبال می‌کند. در ساخت با توجه به استفاده از اتصالات فرکانس بالا، پهنای‌باند امپدانسی آنتن ساخته‌شده کمی کمتر از نتایج شبیه‌سازی شده‌است. اما پهنای‌باند تشعشی آنتن با توجه به حفظ خصوصیات مونوپالسی آنتن ۳۰ درصد است.



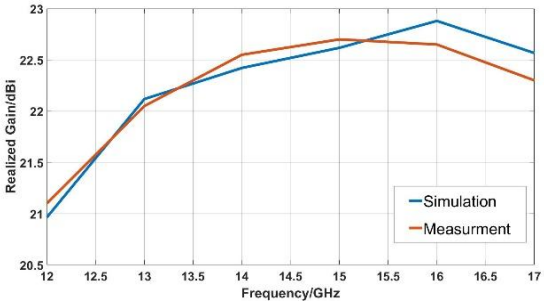
شکل(۸): مقایسه نتایج پارامتر های پراکندگی آنتن ساخته شده و شبیه‌سازی نشان داده شده است.

همچنین مقایسه پترن مجموع ساخت با شبیه‌سازی در شکل ۹ ارائه شده است. همانطور که نشان داده شده است نتایج ساخت با نتایج شبیه‌سازی روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و با خطای نسبتا کمی همدیگر را دنبال می‌کنند. علت ثابت ماندن بهره آنتن را می‌توان به صورت زیر بیان کرد که با افزایش فرکانس بهره بیشتر شده است اما تلفات برد مدار چاپی و کانکتورها نیز بیشتر شده‌است که درنتیجه این اتفاق راندمان در فرکانس‌های پایین بیشتر و در فرکانس‌های بالاتر کمتر است.



شکل(۹): مقایسه نتایج الگو های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

مقایسه بهره بدست‌آمده از آنتن شبیه‌سازی شده و آنتن ساخته شده در شکل ۱۰ ارائه شده است. بهره اندازه‌گیری شده از آنتن ساخته شده حدودا بهره شبیه‌سازی را دنبال می‌کند.



شکل(۱۰): مقایسه گین آنتن شبیه‌سازی شده و آنتن ساخته شده نشان داده شده است

مقایسه کار های اخیر مونوپالسی با این کار در جدول ۱ آورده شده‌است. معیارهای مقایسه عبارتند از تکنولوژی ساخت بکار گرفته شده، تعداد عناصر استفاده شده، پهنای‌باند آنتن، حداکثر بهره، بازدهی و پیچیدگی ساخت آنتن طراحی و ساخته شده است.

جدول(۱): مقایسه این کار با کارهای مراجع اخیر

پیچیدگی ساخت	بازدهی٪	حداکثر بهره	پهنای باند٪	تعداد عناصر	تکنولوژی ساخت	مرجع
متوسط	۶۰	۱۳.۶	۲.۴	۱*۲۰	WG-Slot	[۳]
زیاد	----	۱۹.۴	۲۳	۴*۴	SIW-Multilayer	[۴]
زیاد	۴۰	۲۱.۵	۱۱	۴*۱۶	Slot-Multilayer	[۵]
زیاد	۸۵	۲۲	۲۷	۴*۴	GWG	[۶]
کم	----	۱۰.۵۷	۲	۲*۲	Patch	[۷]
زیاد	۶۸	۱۱.۸	۱۵	۲*۶	Multilayer	[۸]
زیاد	۱۲	۲۸	۲۶	۳۲*۳۲	Multilayer	[۹]
متوسط	۷۰	۱۳.۶	۲	۴*۴	SIW	[۱۰]
کم	۵۳	۲۳	۲۶.۶	۸*۸	Printed Circuit	این کار

۶- نتیجه‌گیری

باتوجه به پیشرفت همه روزه در تجهیزات مخابراتی و کوچک‌سازی آن‌ها، می‌توان به کوچک‌سازی و بهبود نتایج آنتن‌های مخابراتی پرداخت. از پیچیدگی‌های ساخت کم کرد و با حفظ مشخصات مونوپالسی در پهنای‌باند بالا به توسعه ساختار آنتن‌های دنبال‌کننده هدف کمک نمود. در این مقاله با استفاده از ساختار های صفحه‌ای سبک، آنتن مونوپالس پهن باند Ku ارائه شده است که ابعاد کم، سبک و بهره‌ای میانگین ۲۲ دسیبل دارد. همانطور که نشان داده شد در این آنتن تمام خصوصیات مونوپالس آنتن در پهنای‌باند حفظ شده‌است. از این نوع آنتن‌ها می‌توان در سیستم‌های متحرک و دارای محدودیت فضای نصب استفاده نمود.

مراجع

[1] A. Keivaan and h. oraizi, “64-Element Linear Slot Array SIW Cavity-backed Antenna Using Higher Order Excitation”, Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 18, no. 3, pp. 37-42, 2021, doi: 10.52547/jiaeee.18.3.37.

[2] M. Afsahi, H. Zamini, and H. Dalili Oskouei, “Design and Fabrication of Waveguide Slot Array Antenna by New Excitation Method (Using Iris in waveguide)”, Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 19, no. 3, pp. 1-10, 2022, doi: 10.52547/jiaeee.19.3.1.

[3] J.-Y. Deng, L.-Q. Luo, and J.-Y. Yin, “Bidirectionally-fed slow-wave substrate-integrated waveguide monopulse slot array antenna with gain enhancement”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 22, no. 12, pp. 2856-2860, 2023.

[4] K. Han, Z.-X. Jiang, W. Liu, Z.-L. Deng, and G.-L. Huang, “Dual-Polarized SIW-Based Scalable Antenna Array and 2-D Monopulse Beamforming Applications”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2025.

[5] S. M. Hamidi, S. M. J. Razavi, and S. H. M. Armaki, “High efficiency high gain low side lobe level and slant polarization monopulse antenna using cavity backed slot coupled patch antenna”, Scientific Reports, vol. 15, no. 1, p. 1940, 2025.

[6] Z. Huang and B. Zhang, “A compact broadband circularly polarized monopulse slot array antenna based on gap waveguide technology”, Electromagnetics, vol. 45, no. 1, pp. 78-89, 2025.

[7] N. Ahmad, N. Shoaib, H. Nawaz, Q. H. Abbasi, and S. Nikolaou, “Dual-polarized (CP, LP, Slant), series-fed, monopulse planar array antenna”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024.

[8] M. Qu, Z. Chen, J. Su, and Z. Li, “Design of Polarization-Reconfigurable Beam-Scanning Monopulse Phased Array”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 72, no. 3, pp. 2879-2884, 2024.

[9] Z. Wang, Y. Hu, L. Xiang, J. Xu, and W. Hong, “A wideband high-gain planar monopulse array antenna for Ka-band radar applications”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 71, no. 11, pp. 8739-8752, 2023.

[10] H. R. Heidari, P. Rezaei, S. Kiani, and M. Taherinezhad, “A monopulse array antenna based on SIW with circular polarization for using in tracking systems”, AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 162, p. 154563, 2023.

[11] G.-L. Huang, S.-G. Zhou, and T.-H. Chio, “Highly-efficient self-compact monopulse antenna system with integrated comparator network for RF industrial applications”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 1, pp. 674-681, 2016.

[12] Y.-X. Zhang, Y.-C. Jiao, L. Zhang, and J.-X. Wen, “Wideband 2-D monopulse antenna array with higher-order mode substrate integrated waveguide feeding and 3-D printed packaging”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 68, no. 4, pp. 3259-3264, 2019.

[13] D. Nagaraju, B. G. Mathew, and Y. K. Verma, “Compact Broadband Electromagnetically Coupled Stacked Patch Monopulse Antenna Array at X-Band”, in 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2021: IEEE, pp. 1-5.

[14] T. L. Sheret, B. Allen, and C. G. Parini, “Monopulse sum and difference signals with compensation for a failed feed

element", IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 10, no. 6, pp. 645-650, 2016.

[15] H. Kumar and G. Kumar, "Microstrip antenna array with ratrace comparator at X-band for monopulse tracking radar", in 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), 2016: IEEE, pp. 513-514.

[16] S. Jagtap, A. Chaudhari, N. Chaskar, S. Kharche, and R. K. Gupta, "A wideband microstrip array design using RIS and PRS layers", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 3, pp. 509-512, 2018.

[17] K. Konstantinidis, A. P. Feresidis, and P. S. Hall, "Multilayer partially reflective surfaces for broadband Fabry-Perot cavity antennas", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 7, pp. 3474-3481, 2014.

[18] S. Liao, P. Chen, P. Wu, K. M. Shum, and Q. Xue, "Substrate-integrated waveguide-based 60-GHz resonant slotted waveguide arrays with wide impedance bandwidth and high gain", IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 63, no. 7, pp. 2922-2931, 2015.