



Cavity Backed Monopulse antenna with printed patch, 45° linear polarization, high gain and high efficiency

M Hamidi¹ , S.M.J Razavi^{2*}, S.H. Mohseni Armaki³

^{2*} Associate Professor, Malek e Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 2023/03/14, Revised: 2023/07/06, Accepted: 2023/08/06, Published: 2023/08/24)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.8.4>

Abstract

This article presents a comprehensive step-by-step design and simulation process for a new multilayer monopulse antenna operating in the Ku frequency band. The antenna is designed to exhibit high gain, high efficiency, low sidelobe levels, and 45° linear polarization. The radiating element employs a microstrip antenna with waveguide feeding. To mitigate coupling between the radiation elements in the array structure, a metal cavity is strategically placed between the feeding network and the radiation patch. Additionally, a sub-array is designed to simplify the feeding network, incorporating a cavity power divider and feeding slots between the layers to reduce the antenna's overall height. A two-dimensional Chebyshev distribution is employed to design a 1 to 48 power divider. Through simulation, the antenna demonstrates an 11% bandwidth, 38.4 dB gain, sidelobe levels better than 19 dB in both planes, an approximate beam width of 2.4 degrees at the center frequency, efficiency higher than 86%, and a null depth better than -38 dB. The radiation patterns exhibit good symmetry in both the E and H planes. A one-twelfth scale model of the antenna is constructed, with measurement results showing excellent agreement with the simulation.

Keywords: : High gain, High efficiency, 45° Linear polarization, Monopulse antenna.

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: razavismj@mut.ac.ir

آنتن مونو پالس حفره پستی با پیچ چاپی مسطح و قطبش مورب ۴۵ درجه، بهره و بازده بالا

سید محمد حمیدی^۱، سید محمد جواد رضوی^{۲*}، سید محسن محسنی ارمکی^۳

۱- دانشجوی دکتری ۲- دانشیار و ۳- استاد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵، انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.8.4>



* 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، به طراحی و شبیه‌سازی گام‌به‌گام آنتن مونو پالس چندلایه جدید در باند فرکانسی Ku با مشخصاتی از قبیل بهره بالا، بازدهی بالا، سطح گلبرگ فرعی پایین و قطبش مورب پرداخته شده است. عنصر تشعشی ریز نوار بوده و دارای تغذیه موج‌بری می‌باشد. بین شبکه تغذیه و پیچ تشعشی حفره فلزی قرار گرفته است که سبب کاهش تزویج بین عناصر تشعشی در ساختار آرایه می‌شود. برای کاهش پیچیدگی شبکه تغذیه از طراحی زیر آرایه‌ای استفاده شده است که دارای مقسم توان حفره‌ای و شکاف‌های تغذیه در بین لایه‌های آن برای کاهش ارتفاع آنتن می‌باشد. مقسم توان ۱ به ۴۸ دوبردی با توزیع چپ‌شفی طراحی شده است. آنتن شبیه‌سازی شده دارای پهنای باند ۱۱ درصدی، بهره ۳۸٫۴ dB، سطح گلبرگ فرعی بهتر از ۱۹ dB در هر دو صفحه، پهنای پرتو تقریبی ۲٫۴ درجه در فرکانس مرکزی، بازده بالاتر از ۸۶ درصد و عمق صفر بهتر از ۳۸ dB را دارا می‌باشد. الگوهای تشعشی مجموع و تفاضل دارای تقارن خوبی در هر دو صفحه اصلی هستند. یک دوازدهم آنتن ساخته شده که نتایج اندازه‌گیری آن با شبیه‌سازی تطابق مناسبی دارد.

کلیدواژه‌ها: بهره بالا، بازده بالا، قطبش مورب، آنتن مونو پالس

۱- مقدمه

ردگیری در ارتباطات راداری و رادیویی مستقیم نقطه‌به‌نقطه استفاده می‌شد که ابعاد هندسی آنها بزرگی می‌باشد [۲]. در مقایسه با آنتن‌های بازتابنده، آنتن‌های ریز نوار صفحه‌ای به دلیل اندازه کوچک‌تر و وزن سبک‌تر برای کاربردهای راداری و رادیویی بادقت و سرعت بالا مناسب هستند. آنتن‌های ریز نوار با وجود ساخت آسان و هزینه پایین اما به دلیل شبکه تغذیه ریز نوار دارای ضریب کیفیت پایین و بازده کم هستند [۳،۴]. آنتن‌های با ساختار موج‌بری نیز در صورت چندلایه شدن مستعد مشکلات هستند. کیفیت تماس بین لایه‌های فلزی و تعداد موج‌برها به طور قابل توجهی بر عملکرد آنها تأثیر می‌گذارد [۵،۶]. آنتن‌های آرایه شکاف موج‌بری به دلیل تلفات انتقال کم، جذاب هستند؛ اما دارای معایبی نظیر طراحی مشکل در به‌دست‌آوردن قطبش خطی ۴۵ درجه و کاهش پهنای باند با افزایش ابعاد آنتن هستند. در طول دهه گذشته توسعه قابل توجهی در این زمینه صورت گرفته است. در [۷]، آرایه‌ای ۴×۴ از آنتن شکافی طراحی و

روش ردگیری مونو پالس توسط رادارهای ردیابی مدرن و سایر سیستم‌های ارتباطی برای دستیابی به موقعیت زاویه‌ای دقیق اهداف استفاده می‌شود. اصلی‌ترین جزء رادار مونو پالس آنتن مونو پالس است. با استفاده از مجموعه‌ای از دو یا چهار آنتن مشابه، می‌توان موقعیت زاویه‌ای هدف را در دو صفحه سمت و ارتفاع تعیین کرد. بر اساس مقایسه اطلاعات به‌دست‌آمده از دو کانال مجموع و تفاضل جهت‌یابی صورت می‌پذیرد [۱]. در سال‌های اخیر، با توسعه سریع ارتباطات ماهواره‌ای و رادارهای ردیاب بادقت و سرعت بالا، نیاز فزاینده‌ای به آنتن‌های مونو پالس آرایه-ای با بازده بالا، پهن باند، قابلیت‌های انتقال توان بالا، بهره بالا، قطبش مورب خطی ۴۵ درجه و سطح گلبرگ فرعی پایین به وجود آمده است. در گذشته از آنتن بازتابنده و روش‌های سنتی

قسمت پشتی آنتن مونو پالس پیشنهادی دارای چهار درگاه ورودی، با برچسب‌های ΔAz ، ΔEI و بار منطبق است که به ترتیب مجموع، تفاضل سمت، تفاضل ارتفاع و بار تطبیق ۵۰ اهم هستند. شکل ۱ ساختار بلوک دیاگرام آنتن مونو پالس نهایی را نمایش می‌دهد.

۲-۱- طراحی عنصر تشعشی

آنتن حفره‌ای جدید با تغذیه موج‌بری و پیچ تشعشی به‌عنوان عنصر تشعشی استفاده شده است. مطابق با شکل ۲ این آنتن از سه لایه تشکیل شده است. زیرلایه و پیچ تشعش دایره‌ای به قطر ۵٫۴۶ میلی‌متر لایه بالایی را تشکیل می‌دهند که به‌عنوان زیر لایه از راجرز RT5880 با ارتفاع ۰٫۲۵۴ میلی‌متر استفاده شده است. ابعاد اولیه پیچ تشعشی از مرجع [۱۲] بیان می‌شود.

$$a = \frac{F}{\sqrt{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}}} \quad (1)$$

$$F = \frac{8.791 * 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

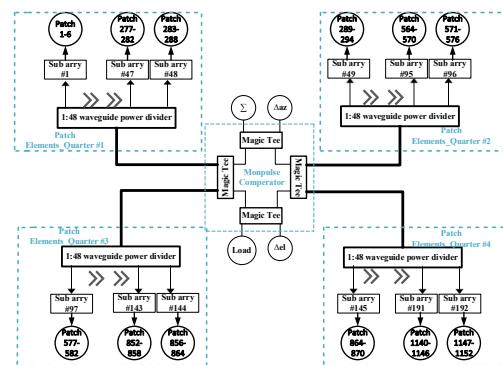
در روابط بالا f_r فرکانس تشدید، h ضخامت زیرلایه و ϵ_r ثابت دی‌الکتریک نسبی است. لایه میانی از یک حفره پشتی به ارتفاع ۲٫۷۳ میلی‌متر تشکیل شده است. حفره باعث افزایش ارتفاع لایه میانی آنتن و در نتیجه سبب افزایش پهنای باند آنتن شده است. خاصیت خازنی آنتن با افزایش ارتفاع لایه میانی کاهش می‌یابد که موجب افزایش بازده آنتن می‌شود. همچنین استفاده از حفره با دیواره فلزی سبب کاهش توزیع متقابل بین عناصر در آنتن آرایه‌ای می‌شود. پایین‌ترین لایه شامل یک موج‌بر تغذیه با عرض ۱۳٫۳ میلی‌متر و ارتفاع ۲٫۱۵ میلی‌متر می‌باشد. ارتفاع موج‌بر تقریباً یک چهارم ارتفاع موج‌بر استاندارد در باند Ku انتخاب شده است. کاهش ارتفاع موج‌بر باعث کاهش ارتفاع آنتن می‌شود. شکاف مورب بر روی دیواره پهن موج‌بر برای تغذیه پیچ تشعش طراحی شده است. طول شکاف ۱۰٫۸ میلی‌متر است که حدود $\frac{\lambda}{2}$ در فرکانس مرکزی است. فاصله شکاف مورب تا انتهای موج‌بر ۱۷٫۳ میلی‌متر است که حدود $\frac{\lambda_g}{2}$ است که λ_g طول موج در موج‌بر است و زاویه آن نسبت به محور برای داشتن قطبش مورب، ۴۵ درجه است. این قسمت از موج‌بر در ساختار نهایی در پشت آنتن بصورت خم شده طراحی می‌شود. با استفاده از این روش، آنتن ریزنوار با تغذیه موج‌بر می‌تواند کمترین تلفات را

ساخته شده است که توسط شبکه GGW^۱ تغذیه می‌شود که به پهنای باند ۶٫۵۶ درصد و بازده ۹۰ درصدی دست‌یافته است. آنتن آرایه ریز نواری تک‌لایه در باند Ku با پهنای باند ۵٫۶ درصد در [۸] طراحی و ساخته شده که با استفاده از شبکه تغذیه نامتقارن موازی سطح گلبگ فرعی را بهبود داده است. در [۹] با استفاده از تغذیه غیرخطی و یک مقایسه‌کننده ریز نواری، یک آنتن ریز نوار ۸×۸ برای باند X پیشنهاد شده است که به سطح گلبگ فرعی ۹٫۸dB برای الگوی مجموع و ۲۱ dB برای الگوی تفاضل دست‌یافته است. در [۱۱،۱۰] آنتن‌های موج‌بر آرایه شکاف‌دار تک‌لایه با استفاده از فناوری SIW به‌صورت مونو پالس دوبعدی طراحی شده‌اند. بیشتر سطح آنتن توسط یک مقایسه‌کننده مونو پالس و شبکه تغذیه اشغال شده است.

در این مقاله آنتن مونو پالس چندلایه جدید در باند فرکانسی Ku باهدف دستیابی به مشخصاتی از قبیل بهره بالا، بازدهی بالا، سطح گلبگ فرعی پایین و قطبش مورب طراحی و شبیه‌سازی شده است. در بخش دوم مقاله مراحل طراحی بخش‌های مختلف آنتن شامل عنصر تشعشی، زیر آرایه، شبکه تغذیه و مقایسه‌گر مونو پالس به‌صورت گام‌به‌گام بیان شده است. در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی آنتن طراحی شده آورده شده است. در بخش چهارم نحوه مونتاژ و ساخت این آنتن شرح داده شده است و یک دوازدهم آنتن ساخته شده و نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی آن با یکدیگر مقایسه شده است.

۲-۲ طراحی آنتن مونو پالس

به‌منظور برآورده کردن الزامات طراحی سیستم، آنتن مونو پالس پیشنهادی باید دارای بهره ۳۷ dB، قطبش خطی ۴۵ درجه، سطح گلبگ فرعی کمتر از ۲۰ dB قابلیت انتقال توان بالا و قابلیت ردگیری اهداف در هر دو جهت سمت و ارتفاع باشد.



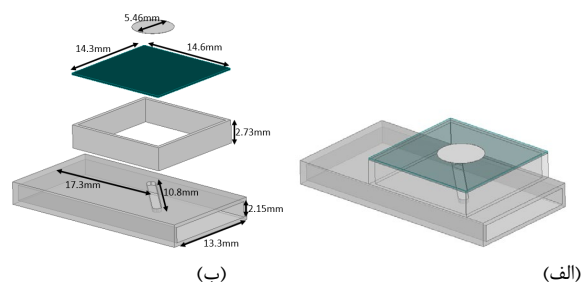
شکل (۱). ساختار بلوک دیاگرام آنتن مونو پالس

^۱ Groove Gap Waveguide

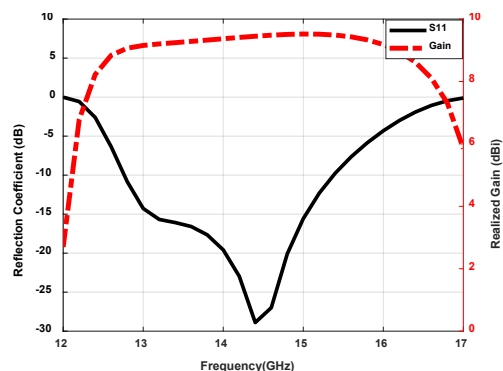
۲-۲- طراحی زیر آرایه

برای داشتن بهره بالا در آنتن، لازم است تعداد زیادی از عناصر تشعشی در کنار یکدیگر قرار گیرند. اگر هر عنصر تشعشی توسط یک موجبر تغذیه شود، شبکه تغذیه آنتن بسیار پیچیده خواهد شد، بنابراین زیر آرایه طراحی شده است. زیر آرایه از 3×2 عنصر تشعشی معرفی شده در بخش قبل تشکیل شده است. شکل ۵ نمای انفجاری از زیر آرایه را نشان می‌دهد که از سه لایه تشکیل شده است. فاصله بین عناصر در صفحه سمت ۱۵،۷ میلی‌متر است. عرض موجبرها ۱۴،۵ میلی‌متر است که نزدیک به $\frac{\lambda_g}{2}$ و تقریباً برابر با فاصله بین آنتن‌ها می‌باشد. لایه‌ها از پایین به بالا معرفی می‌شوند. لایه اول شامل یک تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲ و سه شکاف مایل است که در قسمت بالایی دیوار عریض موجبر قرار دارد. ارتفاع موجبر ۲،۵ میلی‌متر است. با استفاده از یک تقسیم‌کننده توان متقارن، حداکثر توان به شکاف سمت راست تحویل داده می‌شود. زاویه شیارها با یکدیگر برابر و حدود ۳۵ درجه است. به دلیل فاصله $\frac{\lambda_g}{2}$ از یکدیگر به صورت ضربدری قرار می‌گیرند تا فاز خروجی یکسانی را تولید کنند. طول شکاف‌ها ۱۲،۸۵ میلی‌متر و عرض آن ۱،۰۵ میلی‌متر است. لایه بعدی مقسم توان حفره‌ای و شکاف‌های تغذیه در بین لایه‌های آن می‌باشد. با استفاده از این ساختار، تعداد عناصر تشعشی بدون افزایش ارتفاع یا حجم شدن آنتن دو برابر شده است و هر موجبر ۶ آنتن را تغذیه می‌کند. شیارهای تغذیه در فاصله ۱۴،۵ میلی‌متری از یکدیگر در صفحه ارتفاع قرار می‌گیرند که حدود ۰،۶۸ طول موج فرکانس کاری مرکزی (۱۴ گیگاهرتز) است تا از گلبرگ گریتنینگ^۱ جلوگیری شود و بهره تا حد امکان افزایش یابد. یکی از مزایای فناوری ۴۵ درجه این است که در صورت اعمال ضرایب دامنه توزیع شده به عناصر برای کاهش گلبرگ فرعی، کارایی آنتن کاهش نمی‌یابد [۱۴،۱۳]. ابعاد آنتن زیر آرایه ۴۷،۱ میلی‌متر در ۲۹،۸ میلی‌متر است. نتایج پارامتر پراکندگی S_{11} و بهره زیر آرایه شبیه‌سازی شده در شکل ۶ نشان داده شده است. پارامتر پراکندگی S_{11} آرایه از ۱۲،۷ گیگاهرتز تا ۱۵،۴۵ گیگاهرتز کمتر از ۱۰ dB است و پهنای باند آنتن تغییر نکرده است. زیر آرایه دارای یک بهره ثابت در فرکانس کاری است. بهره آنتن ۱۶،۲ dB در فرکانس ۱۴،۷ گیگاهرتز است و بازده آن ۹۷ درصد می‌باشد. الگوهای تشعشی شبیه‌سازی شده زیر آرایه در فرکانس ۱۴،۷ گیگاهرتز در شکل ۷ نشان داده شده است. سطح گلبرگ پشتی ۲۰ dB است.

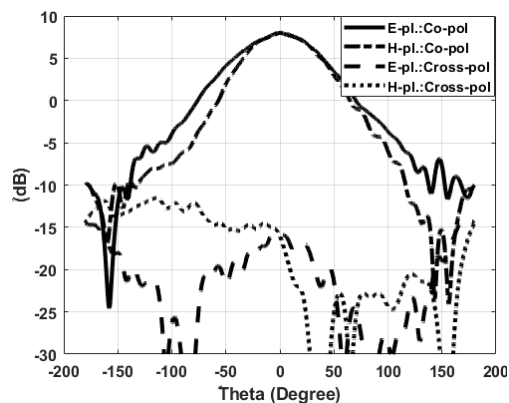
علاوه بر قطبش مایل به دست آورد. مطابق با نتایج شکل ۳ پارامتر پراکندگی S_{11} عنصر تابشی از ۱۲،۷ گیگاهرتز تا ۱۵،۴ گیگاهرتز کمتر از ۱۰ dB است و بهره آن ۸،۱ دسی بل در فرکانس ۱۴،۷ گیگاهرتز می‌باشد. الگوهای تشعشی شبیه‌سازی شده عنصر تشعشی در فرکانس ۱۴،۷ گیگاهرتز در شکل ۴ نشان برای پلاریزاسیون اصلی و متقابل آن نمایش داده شده است که در حدود ۲۲ dB- برای عنصر تکی است که مقدار قابل قبولی می‌باشد. یکی از ویژگی‌های مهم عنصر تابشی پایداری بهره و کم بودن سطح گلبرگ پشتی در فرکانس کاری است.



شکل (۲). (الف) نمای انفجاری از عنصر تشعشی، (ب) عنصر تشعشی



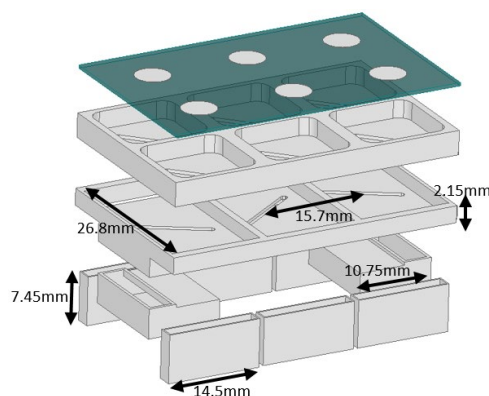
شکل (۳). نمودار کیفیت تطبیق امپدانس ورودی و بهره عنصر تشعشی بر حسب فرکانس



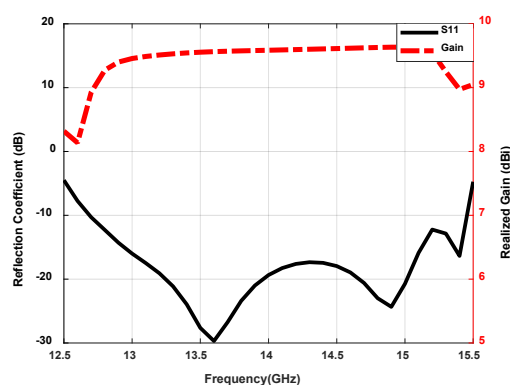
شکل (۴). الگوی تشعشی عنصر در پلاریزاسیون اصلی و متضاد تشعشی در فرکانس ۱۴،۷ گیگاهرتز

^۱ Grating Lobes

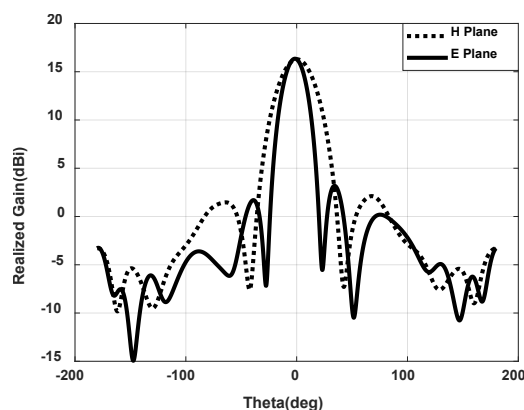
توزیع چپی شف در آنتن‌های آرایه‌ای برای کاهش سطح گلبرگ کناری معمول است که مستلزم طراحی مقسم‌های توان با مقادیر نابرابر بین درگاه‌های خروجی می‌باشد. مقسم‌های توان معمولاً از اتصال دو موج‌بر به یکدیگر به همراه استوانه و ستون‌ها در داخل مسیر موج‌بری تشکیل می‌شوند. یک مقسم توان با توزیع نابرابر را می‌توان با تنظیم اندازه و محل استوانه یا پست مکعبی در داخل آن طراحی کرد. ساختار مقسم توان پیشنهادی در شکل ۸ آورده شده است. راستای افق دارای ۶ درگاه خروجی و راستای ارتفاع دارای ۸ درگاه خروجی می‌باشد؛ بنابراین توزیع دامنه چپی شف با سطح ۲۰ dB و تعداد عنصر ۱۶ و ۱۲ استفاده شده است. سه جزء حیاتی برای شبکه تغذیه وجود دارد. مقسم توان نامتقارن صفحه E-H در ابتدا و انتها و بخش اصلی مقسم‌های توان نامتقارن جدید ۱ به ۳ می‌باشد. هر تقسیم‌کننده توان قبل از استفاده در شبکه تغذیه به طور جداگانه طراحی و شبیه‌سازی شده است. افزودن ضمامم به موج‌بر برای یکسان‌سازی فاز در درگاه‌های خروجی به کار گرفته شده است. در شکل تقسیم‌کننده‌های توان ۱ به ۲ راجع استفاده شده است. در شکل ۹ تقسیم‌کننده توان ۱ به ۳ نشان داده شده است. استفاده از یک مخروط در داخل موج‌بر این مقسم توان باعث بهبود تطابق امپدانس ورودی می‌شود. شعاع بزرگ ۲،۵۹ میلی‌متر، شعاع کوچک ۱،۷۷ میلی‌متر و ارتفاع ۱،۸ میلی‌متر است. محل مخروط تأثیر قابل توجهی بر دامنه خروجی دارد. ۲ میلی‌متر از مرکز به سمت چپ منتقل شده است. شکل ۱۰ دامنه و فاز پارامتر S را برای تقسیم‌کننده توان ۱ به ۳ نشان می‌دهد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن عدم تقارن دامنه و البته فاز یکسان در خروجی‌ها است. دارای تلفات برگشتی کمتر از -۱۲ dB در محدوده فرکانس ۱۲،۵ تا ۱۶ گیگاهرتز و اختلاف فاز کمتر از دو درجه در درگاه‌های خروجی می‌باشد. در نهایت می‌توان شبکه تغذیه را با اتصال موارد ذکر شده در بالا شبیه‌سازی کرد. چندین مکعب به بخش‌هایی از شبکه تغذیه اضافه شده است تا اختلاف فاز در خروجی‌ها به حداقل برسد. خروجی دامنه و فاز ستون اول به‌خاطر سادگی داده شده است. به‌طوری‌که حداکثر اختلاف فاز بین خروجی‌ها حدود ۱ درجه است. در شکل ۱۱ مقدار نسبی دامنه سیگنال رسیده به هر خروجی مشخص شده است. پهنای باند درگاه ورودی از ۱۲،۵ تا ۱۵،۳ گیگاهرتز می‌باشد.



شکل (۵). نمای انفجاری از زیر آرایه



شکل (۶). نمودار ضریب بازگشتی درگاه ورودی و بهره زیرآرایه

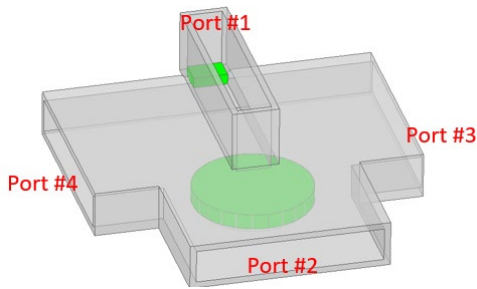


شکل (۷). الگوی تشعشعی زیر آرایه در فرکانس ۱۴،۷ گیگاهرتز

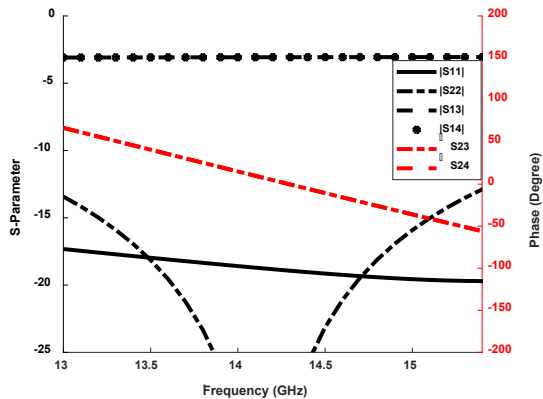
۲-۳- طراحی شبکه تغذیه با ضرایب چپی شف

بهره هر زیر آرایه در فرکانس مرکزی (۱۴،۷ گیگاهرتز) ۱۶ dB می‌باشد و مطلوب دستیابی بهره ۳۸ dB می‌باشد. با تقریب خوبی می‌توان نتیجه گرفت که تعداد زیر آرایه‌ها باید ۱۹۲ برابر شود تا بتوان به این بهره دست‌یافت. در هر ربع آنتن به ۴۸ عدد زیر آرایه احتیاج است و همه ربع‌های آنتن نهایی متقارن هستند (آنتن نهایی ۱۱۵۲ عنصر تشعشع دارد). برای رسیدن به چنین ساختار بزرگی یک مقسم توان ۱ به ۴۸ لازم است. استفاده از

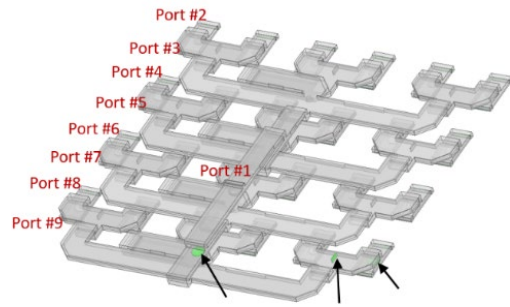
مقایسه‌کننده با اتصال چهار پیونددهنده تی جادویی به یکدیگر شکل می‌گیرد. ویژگی‌های تی جادویی عملکرد شبکه مقایسه-کننده را تعیین می‌کند. چندین تی جادویی فشرده [۱۶،۱۵] و کاربردهای یکپارچه‌سازی آنها در آرایه‌های آنتن مونو پالس با مشخصات مناسب در [۱۸،۱۷] اخیراً پیشنهاد شده است. بیشتر این طرح‌ها با استفاده از پیوند موجبر که دارای اتصال شکافی بین دولایه موجبر است، تحقق می‌یابند. با این وجود، این شکاف تزویج منجر به پهنای باند باریک مقایسه‌کننده می‌شود که پهنای باند عملیاتی سیستم را محدود می‌کند (۱٪ تا ۳٪) [۱۹]. بنابراین ساختار پیشنهادی ساده شده و پهنای باند آن افزایش یافته است. تی جادویی فشرده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مهم‌ترین نکته در طراحی یک موجبر، امکان‌پذیری ساخت آن است. به همین دلیل از پیچیدگی ساخت اجتناب شده است. اساس طراحی آن ادغام دو اتصال موجبر صفحه E,H است. امیدانس ورودی با استفاده از یک استوانه برای ورودی شماره ۱ و یک پست القایی برای ورودی شماره ۲ بهبود یافته است. استوانه دارای شعاع ۴،۴۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱،۲ میلی‌متر است. پست القایی دارای طول ۲،۶۷۵ میلی‌متر و عرض ۱،۹ میلی‌متر است. از رنگ متفاوتی برای نمایش آنها در ساختار استفاده می‌شود. تی جادویی پیشنهادی شبیه‌سازی شده و نتایج آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است. پهنای باند کاری از ۱۳،۰ تا ۱۵،۵ گیگاهرتز را پوشش می‌دهد و دارای خطا فاز کمتر از ۰،۱ درجه می‌باشد.



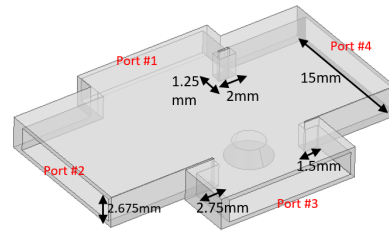
شکل (۱۲). پیونددهنده تی جادویی پیشنهادی



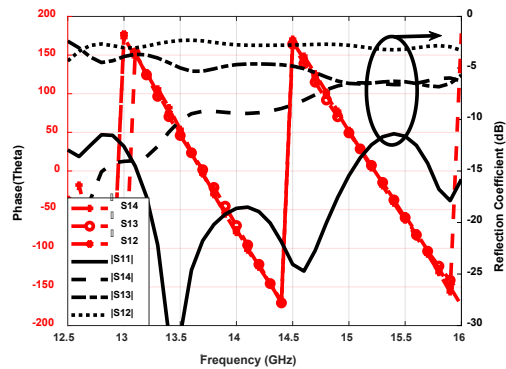
شکل (۱۳). دامنه و فاز پارامتر پراکندگی پیونددهنده تی جادویی پیشنهادی



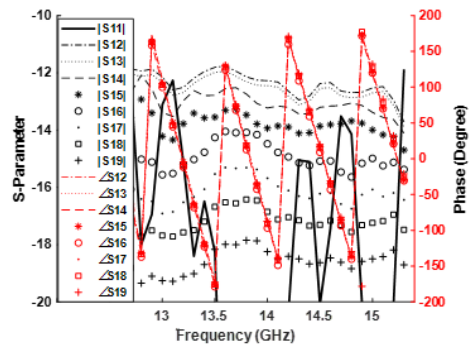
شکل (۸). ساختار کلی مقسم توان ۱ به ۴۸



شکل (۹). ساختار مقسم توان ۱ به ۳



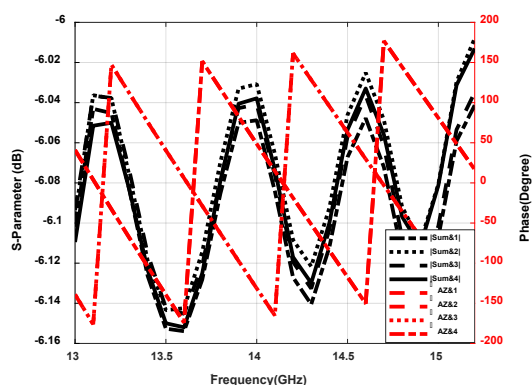
شکل (۱۰). دامنه و فاز پارامتر پراکندگی مقسم توان ۱ به ۳



شکل (۱۱). دامنه و فاز پارامتر پراکندگی برای مقسم توان ۱ به ۴۸

۴-۲- شبکه مقایسه‌گر مونو پالس

پیونددهنده تی جادویی قابل اعتمادترین راه‌حل برای دستیابی به پهنای باند، انتقال توان بالا، بازده بالا و کمترین اختلاف دامنه و خطای فاز در شبکه‌های مقایسه هستند. مهم‌ترین ویژگی آنتن مونو پالس توسط شبکه مقایسه‌کننده آن حاصل می‌شود و شبکه



شکل (۱۶). دامنه و فاز پارامتر پراکنده‌گی شبکه مقایسه گر مونو پالس

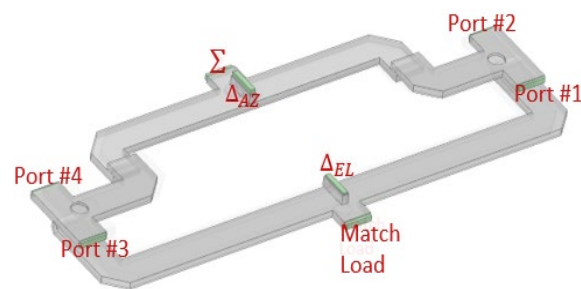
۳- شبیه سازی آنتن مونو پالس نهایی

پس از اتصال قطعات طراحی شده در بخش قبل، آنتن نهایی کامل می‌شود. مقایسه‌کننده مونو پالس دارای چهار درگاه خروجی است که به چهار شبکه تغذیه ۱ تا ۴۸ متصل می‌شوند و هر خروجی شبکه تغذیه به یک زیر آرایه متصل می‌شود و آنتن مونو پالس نهایی تشکیل می‌شود. در شکل ۱۷، ساختار نهایی آنتن مونو پالس پیشنهادی نشان داده شده است. در انتهای آنتن مونو پالس پیشنهادی، چهار درگاه ورودی با برجسب Σ ، ΔAz ، ΔEl و بار تطبیق وجود دارد. اندازه کل آنتن $570 \times 480 \times 45$ میلی‌متر می‌باشد. برای شبیه‌سازی آنتن نهایی به دلیل نسبت ابعاد به فرکانس کار، به سیستمی با ۵۱۲ گیگابایت حافظه داخلی نیاز است. نتایج برای پارامترهای پراکنده‌گی و بهره آنتن مونو پالس پیشنهادی در شکل ۱۸ ارائه شده است. شبیه‌سازی ضرایب بازتاب برای همه درگاه‌ها نشان می‌دهد که پهنای باند امپدانسی زیر -10 dB - تقریباً ۱۱٪ از 13.3 تا 14.8 گیگاهرتز می‌باشد. ایزولاسیون بین خروجی مجموع به تفاضل سمت و ارتفاع به ترتیب بهتر از -38 dB و -56 dB است. بازده تشعشعی آنتن با بهره تحقق یافته آن مطابق با رابطه ۳ مرتبط است.

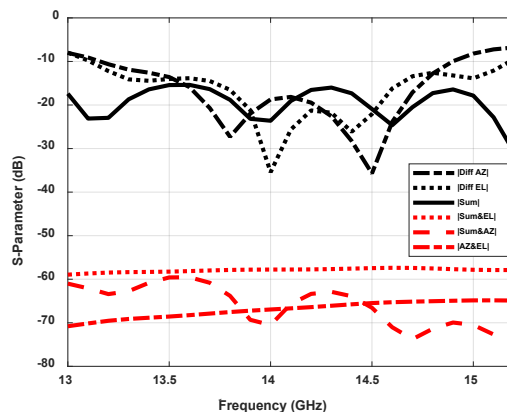
$$\eta_r = \frac{\lambda^2 \times G_r}{4\pi \times A} \quad (3)$$

که در آن G_r بهره آنتن شبیه سازی شده، λ طول موج فضای آزاد و A سطح آنتن است. بهره آنتن 37.85 در 13.7 گیگاهرتز و 38.5 در 14.7 گیگاهرتز است و بازده بیش از ۸۶ درصد در سراسر پهنای باند به دست می‌آید. الگوی تشعشعی مجموع و تفاضل در دو صفحه اصلی در شکل ۱۹ و شکل ۲۰ در فرکانس‌های 14 و 14.7 گیگاهرتز نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سطح گلبرگ فرعی شبیه‌سازی شده برای الگوی مجموع کمتر از -19 dB هستند. عمق صفر الگوهای تفاضل بیشتر از -46 dB است و اختلاف دامنه بین دو بیشینه الگوی تشعشعی تفاضل

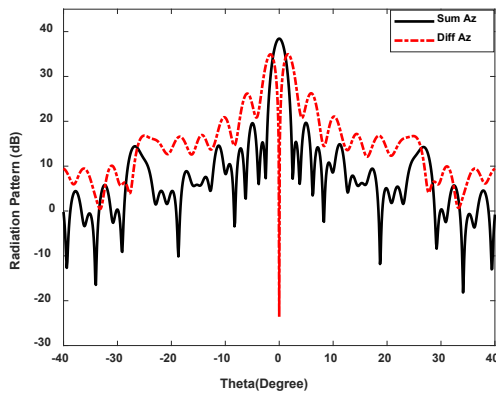
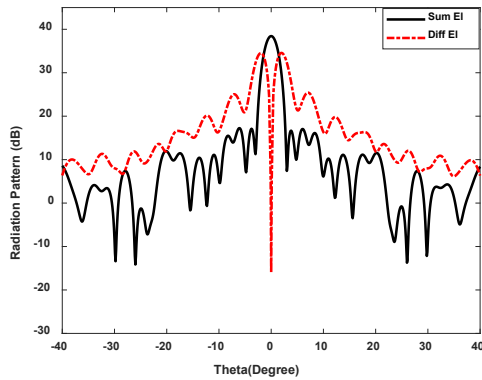
مقایسه‌کننده‌های مونو پالس با ترکیب سیگنال‌های دریافتی الگوهای مجموع و تفاضل را تشکیل می‌دهند. برای دستیابی به ردیابی دقیق، عمق صفر یک مقایسه‌کننده مونو پالس باید بسیار زیاد باشد. برای اطمینان از عمق صفر شدید، ایزولاسیون بالا بین درگاه‌ها باید حفظ شود. مقدار مناسب در مقالات مختلف کمتر از -35 dB گزارش شده است [۲۲-۲۷]. شبکه کامل مقایسه‌کننده مونو پالس در شکل ۱۴ نشان داده شده است. الگوهای مجموع مونو پالس را می‌توان به ترتیب از درگاه مجموع و تفاضل سمت و تفاضل ارتفاع از درگاه‌های Σ ، ΔEL و ΔAZ به دست آورد. به دلیل کمبود فضا، چهارتری جادویی در یک ارتفاع قرار می‌گیرند و توسط خم‌های موج‌بر به هم متصل می‌شوند. شکاف‌های تشعشعی برای انتقال از یک لایه به لایه بعدی استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی مقایسه‌کننده مونو پالس در شکل ۱۵ و ۱۶ آورده شده است. پهنای باند -10 dB درگاه‌های ورودی از 13.2 گیگاهرتز تا 14.8 گیگاهرتز می‌باشد. ایزولاسیون میان خروجی مجموع با خروجی‌های تفاضل بهتر از -60 dB و -57 dB می‌باشد. باتوجه به اینکه هر سه درگاه تقریباً رفتار یکسانی دارند، در شکل ۱۶ مقدار دامنه رسیده به درگاه‌های خروجی از درگاه Σ و فاز رسیدن به درگاه‌های خروجی از درگاه ΔAz مشابه هستند. انتقال توان از درگاه Σ به چهار درگاه خروجی در حد -6 dB حفظ می‌شود و حداکثر تلفات برگشتی حدود 0.15 dB است. خطای فاز رسیده از ΔAz به خروجی‌ها کمتر از 0.2 درجه می‌باشد.



شکل (۱۴). ساختار شبکه مقایسه‌گر مونو پالس پیشنهادی



شکل (۱۵). پارامتر پراکنده‌گی شبکه مقایسه‌گر پیشنهادی



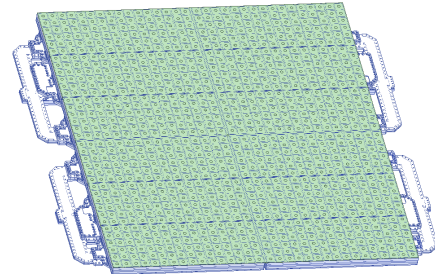
شکل (۲۰). نتایج شبیه سازی الگوی تشعشعی در دو صفحه اصلی در فرکانس ۱۴ گیگاهرتز

۴- مونتاز و نتایج ساخت

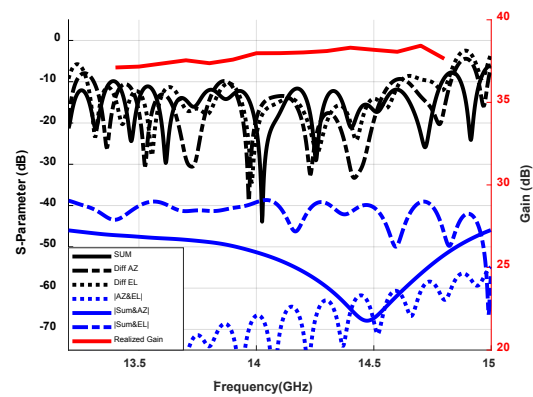
آنتن آرایه‌ای با ۱۱۵۲ عنصر در بخش قبلی طراحی و شبیه سازی شد و بهره ۳۸٫۵ dB به دست آمد. ابعاد آنتن نهایی حدود ۴۸×۵۷ سانتی‌متر است. در مرحله ساخت، یک مدل مکانیکی از آنتن ارائه شده است که از ۱۲ قسمت ۹۶ عنصری تشکیل شده است. با رعایت نکات مکانیکی می‌توان آن را با استفاده از دستگاه CNC ساخت و با استفاده از پیچ مونتاز کرد. ساخت کل آنتن زمان‌بر بوده و مستلزم تأمین هزینه است. بنابراین، تنها یک دوازدهم آنتن ساخته، آزمایش و با شبیه سازی خود مقایسه شده است. در شکل ۲۱ نمای جلو و پشت آنتن یک دوازدهم نشان داده شده است که شامل چهار ورودی است که هر یک از آنها ۲۴ عنصر تابشی را تغذیه می‌کنند. لازم است یک مبدل موج‌بر به کابل کوکسیال طراحی شود تا بتوان این آنتن را تست کرد. شکل ۲۲ نتایج آزمایش و شبیه‌سازی را برای ضرایب پراکندگی بازگشتی برای هر ورودی نشان می‌دهد. اندازه گیری با یک تحلیلگر شبکه اجیلنت^۱ E8364B انجام شده است. پهنای باند ۱۰ dB چهار درگاه حدود ۱۴٫۶٪ (۱۳٫۳-۱۵٫۴ گیگاهرتز) است.

^۱ Agilent

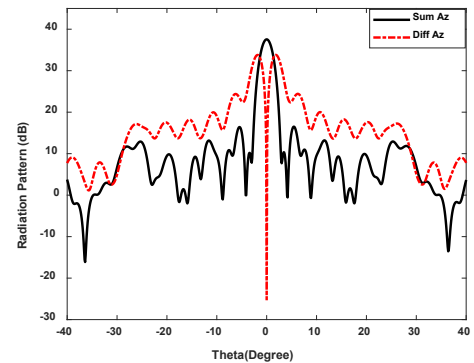
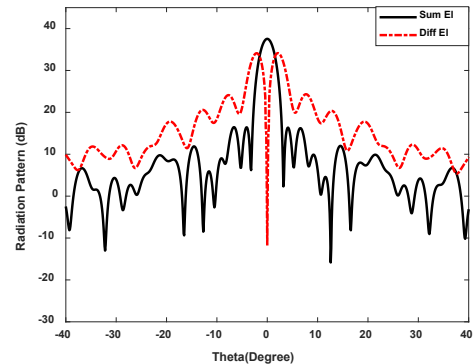
کمتر از ۰٫۲ dB است. الگوهای تشعشعی تقارن خوبی در هر دو صفحه H و E برای الگوهای مجموع و تفاضل دارند.



شکل (۱۷). ساختار نهایی آنتن مونو پالس پیشنهادی



شکل (۱۸). نتایج شبیه سازی پارامتر پراکندگی و بهره آنتن نهایی



شکل (۱۹). نتایج شبیه سازی الگوی تشعشعی در دو صفحه اصلی در

فرکانس ۱۴٫۷ گیگاهرتز

به ترتیب dB ۲۱,۸ و dB ۲۱,۶۵ و dB ۲۱,۳ و dB ۲۱,۱ به دست آمده است. سطح گلبرگ فرعی شبیه سازی شده در فرکانس ۱۴,۷ و ۱۴ گیگاهرتز در صفحه H ۱۱ و ۱۰,۷ و در صفحه E dB ۱۲,۷ و dB ۱۲,۲ است. نتایج اندازه گیری سطح گلبرگ فرعی، به ترتیب اعداد dB ۱۴,۵، dB ۱۲,۶ و dB ۱۲,۳ و dB ۱۳,۱ نشان می دهد. پهنای پرتو شبیه سازی شده در صفحه H به ترتیب ۱۱,۱ و ۱۱,۵ و در صفحه E ۱۷,۵ و ۱۸,۱ درجه است و عرض پرتو اندازه گیری شده به ترتیب اعداد ۱۲,۸، ۱۲,۶، ۱۷,۴ و ۱۸,۴ درجه به دست می آید. تفاوت ناچیز بین بهره شبیه سازی شده و اندازه گیری شده (کمتر از ۰,۴ dB) و سایر مشخصه ها صحت طراحی انجام شده را تأیید می کند. بخش پیچیده طرح در همین آنتن یک دوازدهم می باشد که شامل چندین لایه به همراه تقسیم کننده های توان، شکاف های تغذیه، خمها و پیچ تشعشی است که به صورت فشرده روی هم قرار گرفته اند.

نتایج اندازه گیری ها تطابق خوبی با شبیه سازی دارد. برخی از اختلافات ممکن است به دلیل خطاهای ساخت و تفاوت در پارامترهای ساختاری زیرلایه باشد. الگوهای تشعشی میدان دور آنتن یک دوازدهم در یک اتاقک بدون انعکاس مخروطی اندازه گیری شده است (شکل ۲۳). شکل ۲۴ الگوهای تشعشی هر ورودی را نشان می دهد. آنتن فرستنده همان قطبش آنتن طراحی را دارد. اندازه گیری ها در فرکانس های ۱۴,۷، ۱۴,۴، ۱۴ و ۱۳,۵ گیگاهرتز انجام شده است. سایر درگاه ها در حین آزمایش هر درگاه به بار ۵۰ اهم متصل می شوند. با توجه به مشابه بودن نتایج برای درگاه های مختلف، تنها الگوهای تشعشی برای فرکانس های ۱۴,۷ گیگاهرتز و ۱۴ گیگاهرتز در این مقاله ارائه شده و با نتایج شبیه سازی مقایسه شده است. بهره شبیه سازی شده آنتن یک دوازدهم به ترتیب dB ۲۲,۲، dB ۲۲، dB ۲۱,۷ و dB ۲۱,۴ در فرکانس های ۱۴,۷، ۱۴,۴، ۱۴ و ۱۳,۵ گیگاهرتز به دست آمده است، در حالی که بهره اندازه گیری شده

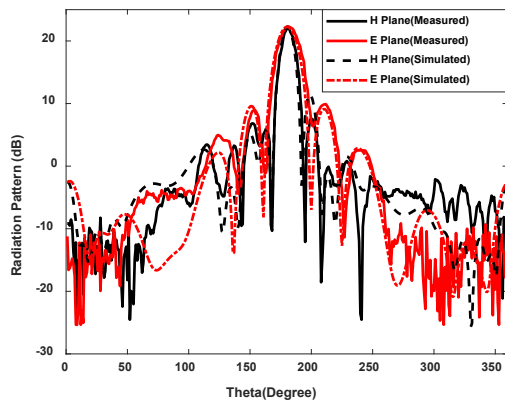
جدول (۱). مقایسه آنتن پیشنهادی با نمونه های مشابه

مرجع	نوع آنتن	تعداد عناصر تشعشی	پهنای باند (%)	فرکانس مرکزی (GHz)	ایزالا سون	بهره (dBi)	بازدهی (%)	عمق صفر (dB)	سطح گلبرگ فرعی (dB)
8	آنتن ریز نوار تک لایه	8*8	5.6	14.25	-	24.5	20	-30	-17
20	آنتن موج بری شکافی	16*16	21	90	-50	30	55	-38	-16
21	آنتن موج بری شکافی	24*24	4	24	-	31	79	-22	-
22	آنتن ریز نوار تک لایه	12*16	2	10.6	-	28.7	-	-35	-19
23	آنتن ریز نوار انباشته	10*10	21	10	-20	24.4	68	-35	-15
24	آنتن ریز نوار چند لایه	32*32	28	33	-	28.6	20.9	-24	-14
25	آنتن ریز نوار انباشته	12*12	10	10	-24	25.4	70	-48	-24
26	آنتن موج بری مجتمع شده زیر لایه	4*4	6.18	9.8	-27	15.5	82	-40	-13
27	آنتن موج بری شکافی	16*16	12.6	95	-	29	35	-26	-22.5
28	آنتن ریز نوار چند لایه	12*12	8	10	26	28	72	-24	-17
یک دوازدهم ساخته شده	آنتن پیشنهادی	4*6	14.6	14.2	-	21.5	85	-	-14.5
آنتن کامل شبیه سازی شده	آنتن پیشنهادی	36*32	11	14.2	-38	37	86	-38	-19

نوآوری در طراحی عنصر تشعشی، تزویج بین عناصر کاهش یافته و بازده آرایه کاهش نمی یابد.



اتاق آنتن محل آزمایش دارای دقت ۰,۸ درجه است و ممکن است موجب تفاوت بین الگوهای تشعشی شبیه سازی و اندازه گیری شود و خطای ساخت و مونتاژ دلیل دیگر این تفاوت می باشد. برای به حداقل رساندن این خطاها علاوه بر پیچ از چسب نقره نیز برای کاهش فاصله بین قطعات و لایه ها استفاده می شود. استفاده از چسب نقره خطاهای تولیدی که منجر به ایجاد شکاف بین لایه ها می شود را از بین می برد. آنتن طراحی شده و یک دوازدهم ساخته شده با چندین نوع آنتن مشابه از نظر مشخصه های اساسی در جدول ۱ مقایسه شده اند. این آنتن پهنای باند وسیع تری نسبت به آنتن ریز نوار چند لایه دارد و نسبت به آنتن موج بر شکافی بازده بالاتری دارد. به دلیل استفاده از حفره ها و



(ب)

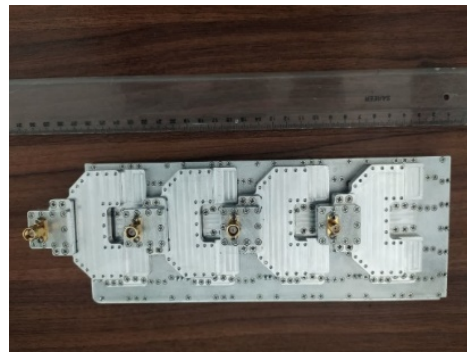
شکل (۲۳). نتایج شبیه سازی و ساخت الگوی تشعشعی یک دوازدهم آنتن برا دو درگاه ورودی (الف) فرکانس ۱۴٫۷ گیگاهرتز (ب) ۱۴ گیگاهرتز

۵- نتیجه گیری

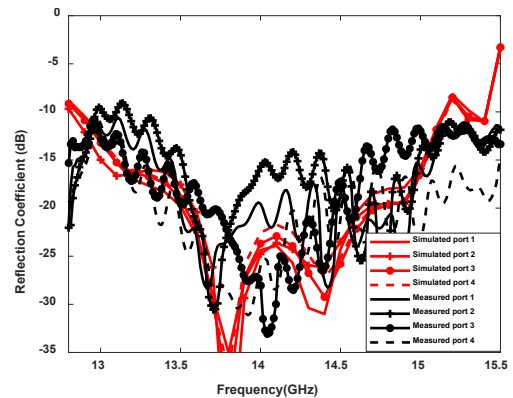
در این مقاله، یک آنتن مونو پالس چندلایه با بهره بالا، قطبش خطی ۴۵ درجه و سطح گلبرگ فرعی پایین بر اساس طرحی نو، برای سیستم‌های ردیابی ارائه شد. ۱۱۵۲ عنصر تابشی در ساختار پیشنهادی وجود دارد. آرایه فرعی برای کاهش پیچیدگی شبکه تغذیه طراحی شده است. برای تکمیل آنتن نهایی، هر خروجی مونو پالس مقایسه‌کننده باید به یک تقسیم‌کننده توان ۱ تا ۴۸ و زیرآرایه به خروجی تقسیم‌کننده توان متصل شود. پهنای باند امپدانسی ۱۰ dB آنتن و ایزولاسیون ۳۸ dB- میان خروجی‌ها بیش از ۱۴ درصد است. الگوهای تشعشعی آنتن پیشنهادی دارای مشخصات مناسبی نظیر سطح گلبرگ فرعی کمتر از ۱۹ dB-، عمق‌های صفر بهتر از ۳۸ dB-، حداکثر بهره تحقق‌یافته ۳۸٫۵ dB و بازده بالای ۸۹ درصد هستند. یک دوازدهم آنتن ساخته و آزمایش شده است که پهنای باند امپدانس آنتن برای هر ۴ درگاه بیش از ۱۴ درصد است. بهره آنتن در فرکانس ۱۴٫۴ گیگاهرتز برای هر درگاه حدود ۲۱٫۷ dB به دست آمده است و بازده تشعشعی در کل محدوده فرکانس بیش از ۸۵٪ است. آنتن پیشنهادی دارای ساختار تغذیه موج‌بری و عنصر تشعشعی ریز نواری است که پهنای باند وسیع‌تری نسبت به آنتن ریز نواری بازده بالاتری نسبت به آنتن موج‌بر شکافی دارد.

۶- مراجع

- [1] Skolnik, M.: 'Introduction to Radar Systems', McGraw-Hill, New York, NY, 3rd Edition, 2001.
- [2] Greco, F., G. Amendola, Luigi Boccia, and Emilio Arneri. "A dual band hat feed for reflector antennas in QV band." In *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-4. IEEE, 2016.



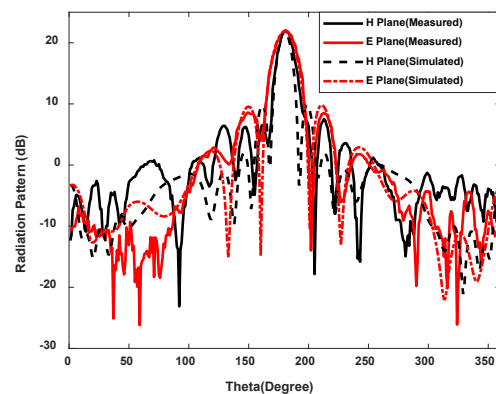
شکل (۲۱). یک دوازدهم آنتن ساخته شده



شکل (۲۲). کیفیت تطبیق امپدانسی ورودی آنتن در حالت شبیه‌سازی و ساخت



شکل (۲۳). آنتن در اتاق آنتن



(الف)

- [20] Vosoogh, Abbas, Abolfazl Haddadi, Ashraf Uz Zaman, Jian Yang, Herbert Zirath, and Ahmed A. Kishk. "W-band low-profile monopulse slot array antenna based on gap waveguide corporate-feed network." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66 pp. 6997-7009, 2018.
- [21] Vazquez-Roy, Jose Luis, Adrián Tamayo-Domínguez, Eva Rajo-Iglesias, and Manuel Sierra-Castañer. "Radial line slot antenna design with groove gap waveguide feed for monopulse radar systems." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* vol. 67 pp. 6317-6324, 2019.
- [22] D. He, T. Zhang, E. Wang, L. Chen and J. Yang, "Design of a Low Sidelobe Monopulse Array Antenna with Hybrid Feeding Structure," 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2019.
- [23] Kumar, Hemant, and Girish Kumar. "Broadband monopulse microstrip antenna array for X-band monopulse tracking." *IET Microwaves, Antennas & Propagation* vol. 12 pp. 2109-2114, 2018.
- [24] Wang, Zixi, Yun Hu, Lei Xiang, Jun Xu, and Wei Hong. "A Wideband High-Gain Planar Monopulse Array Antenna for Ka-Band Radar Applications." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71 pp. 8739-8752, 2023.
- [25] Nagaraju, Dovari, Bivin G. Mathew, and Yogesh 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.
- [26] Sun, Zhichao, Shaobin Liu, Wenhui He, Tong An, Zhiyong Hu, Yuning Yang, and Xinyuan Zheng. "A 2D substrate integrated waveguide monopulse slot antenna array with dual-mode comparator" *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2022.
- [27] Jiang, Xun, Yongrong Shi, Weihua Yu, Fangxiu Jia, Xiaoming Wang, and Qihui Wu. "A Compact Ka-Band Low Side-Lobe Monopulse Antenna Array Based on Mixed Gap Waveguide and Hollow Waveguide Multilayer Feeding Network." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71 pp. 8714-8725, 2023.
- [28] Arand, Bijan Abbasi, and Amir Bazrkar. "Design and implementation of a high efficiency microstrip array antenna for X-band monopulse tracking applications." *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 14 pp. 1272-1282, 2020.
- [3] Li, Mingjian, and Kwai-Man Luk. "Low-cost wideband microstrip antenna array for 60-GHz applications." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.62 pp. 3012-3018, 2014.
- [4] Mavaddat, Ali, Seyyed Hossein Mohseni Armaki, and Ali Reza Erfanian. "Millimeter-Wave Energy Harvesting Using 4×4 Microstrip Patch Antenna Array." *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, vol.14 pp. 515-518, 2014.
- [5] Kim, Dongjin, Jiro Hirokawa, Makoto Ando, Jun Takeuchi, and Akihiko Hirata. "64×64-Element and 32×32-Element Slot Array Antennas Using Double-Layer Hollow-Waveguide Corporate-Feed in the 120 GHz Band." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.62 pp.1507-1512, 2014.
- [6] Tekkouk, Karim, Jiro Hirokawa, Ronan Sauleau, Mauro Ettore, Makoto Sano, and Makoto Ando. "Dual-layer ridged waveguide slot array fed by a Butler matrix with sidelobe control in the 60-GHz band." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63 pp.3857-3867, 2015.
- [7] Sáez, Alejandro Jiménez, Alejandro Valero-Nogueira, Jose Ignacio Herranz, and Bernat Bernardo. "Single-layer cavity-backed slot array fed by groove gap waveguide." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.15 pp. 1402-1405, 2015.
- [8] Wang, Hao, Da-Gang Fang, and X. G. Chen. "A compact single layer monopulse microstrip antenna array." *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 54 pp. 503-509, 2006.
- [9] Colak, Ogun, and Demet S. Armagan Sahinkaya. "SLL suppressed monopulse microstrip antenna design." In *2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, pp. 1855-1856. IEEE, 2014.
- [10] Liu, Bing, Wei Hong, Zhenqi Kuai, Xiaoxin Yin, Guoqing Luo, Jixin Chen, Hongjun Tang, and Ke Wu. "Substrate integrated waveguide (SIW) monopulse slot antenna array." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57 pp.275-279, 2005.
- [11] Cheng, Yu Jian, Wei Hong, and Ke Wu. "94 GHz substrate integrated monopulse antenna array." *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 60 pp.121-129, 2011.
- [12] Bhartia, P., Bahl, I., Garg, R., et al.: 'Microstrip antenna design handbook'(Artech House, Norwood, MA, USA, 2001)
- [13] Tomura, Takashi, Jiro Hirokawa, Takuichi Hirano, and Makoto Ando. "A 45° Linearly Polarized Hollow-Waveguide 16×16-Slot Array Antenna Covering 71–86 GHz Band." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62 pp. 5061-5067, 2014.
- [14] You, Yang, Yunlong Lu, Yi Wang, Wen-Wen Yang, Zhang-Cheng Hao, Qingchun You, and Jifu Huang. "High-performance E-band continuous transverse stub array antenna with a 45° linear polarizer." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vpl. 18 pp. 2189-2193, 2019.
- [15] Hua, Guang, Jiefu Zhang, Jiudong Wu, and Wei Hong. "Design and optimization of a millimetre wave compact folded Magic-T." *International Journal of Antennas and Propagation* 2012.
- [16] Singh, Yatendra Kumar, and Ajay Chakrabarty. "Design and sensitivity analysis of highly compact comparator for ku-band monopulse radar." In *2006 International Radar Symposium*, pp. 1-4. IEEE, 2006.
- [17] Li, Teng, Hongfu Meng, Wenbin Dou, Guifen Xia, and Huaicheng Zhu. "Design of low sidelobe slotted waveguide monopulse antenna array." In *Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, pp. 212-214. IEEE, 2014.
- [18] Najm, Fariba Ghasemi, Amirafshar Moshtaghpour, and Mohsen Kaboli. "Modeling, design and optimization of dual mode circular planar monopulse slot array antenna in X-band." In *2014 22nd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, pp. 788-791. IEEE, 2014.
- [19] Huang, Guan-Long, Shi-Gang Zhou, and Tan-Huat Chio. "Highly-efficient self-compact monopulse antenna system with integrated comparator network for RF industrial applications." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64 pp. 674-681, 2016.