

Single-layer, Low-cost, and Broadband Reflectarray Antenna Using Inhomogeneous Dielectric and a Class of Cross Bow-tie Elements

Mahmood Rafaei-Booket*, Mahdiah Bozorgi

Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mails: booket@znu.ac.ir; bozorgi@znu.ac.ir

* Corresponding author

Short Abstract

In this paper, a class of low-cost, and single-layer reflectarray antenna is proposed for X-band in which an array of cross bow-tie patches is printed on an inhomogeneous substrate. Such an inhomogeneous substrate is made up periodic air-holes drilled within FR4 dielectric. In analyzing the unit cell of such a structure, two different parameters of cross bow-tie patch (length and angle) are varied and a phase range close to 700° is obtained that is a good choice for designing a broadband reflectarray. In the design procedure, an efficient phase synthesis technique is applied to minimize the adverse effects of frequency dispersion causing by the differential space phase delay at different frequencies. This technique optimizes the metallization arrangement, and helps to design a reflectarray with a good frequency response. To validate the obtained numerical results, a $270 \times 270 \times 2.4 \text{ mm}^3$ reflectarray with focal length 26.9cm is fabricated and measured. Measurements show a peak gain 28.1dB with a 1.5-dB gain bandwidth of 34% and maximum efficiency 57.5%. It is experimentally shown that the gain and bandwidth of the reflectarray with inhomogeneous dielectric is better than homogeneous one.

Keywords

Reflectarray antenna, inhomogeneous substrate, low-cost and broadband antenna, bow-tie patch.

1- Short Introduction

The main drawback of the microstrip reflectarray is its narrow bandwidth. For solving this problem, the various unit cells have been reported in the literature. The most of the reported unit cells are multilayer and complex ones. These shortcomings have motivated us to design a new single-layer structure with low-complexity and low-cost properties. Besides, the reflectarray's advantages of high-gain, low Side Lobe Level (SLL), and wide operating bandwidth should be maintained. Therefore, a flexible unit cell composed of a class of bow-tie patch on a low-cost dielectric (FR4) is proposed to design a reflectarray in X-band. Drilling air rods within the host medium leads to obtaining an inhomogeneous substrate and low-loss one. In addition, an optimum arrangement of cross bow-tie elements using a phase synthesis approach leads to implementation a low-cost, broadband and high-gain reflectarray antenna. The maximum gain of such a single-layer structure is 28.1dBi which is more than the gain value of one with homogeneous FR4 substrate (=26.9dB) and its 1.5dB gain bandwidth is 34% which is more than one of reflectarray without air rods (=22%).

2- Proposed Work and Methodology (including comprision, simulation/experimental results and discusion)

A new unit cell including a class of cross bow-tie patch on an inhomogeneous substrate is proposed. Using a phase synthesis procedure in the design step, an optimized element arrangement on reflectarray aperture is obtained. Designed structure is a broadband, high-gain, and low SLL reflectarray.

3- Conclusion

A metal cross bow-tie array on a low-cost inhomogeneous substrate is utilized to implement a broadband, low-cost, and high efficient reflectarray. The unit cell has more than one parameter to extract its phase diagram and such a flexibility helps us to select optimum element distribution. It is demonstrated that the inhomogeneity of substrate leads to increasing the phase range of the unit cell and decreasing its loss in comparison with homogeneous one. In the design step, a phase synthesis approach is applied to implement a reflectarray with 27×27 elements in X-band. Measured results show a maximum gain 28.1dBi, and efficiency 57.5% at 10.5GHz, 1.5dB gain-bandwidth of 34% (8.7~12.3GHz), and $|SLL| < -18\text{dB}$.

4- References (2-3 references)

- [1] J. Huang, J. A. Encinar, "Reflectarray Antennas", Hoboken. NJ: John Wiley & Sons, 2008.
- [2] J. Ethier, M. R. Chaharmir, J. Shaker, "Loss reduction in reflectarray designs using sub-wavelength coupled-resonant elements", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 11, pp. 5456-5459, 2012.
- [3] M. Rafaei-Booket, S. M. Mousavi, "Efficient analysis method and design aproach for broadband reflectarray with isotropic/-artifiacial anisotropic substrates", IET Microwaves, Antenas & Propagation, vol. 14, no. 10, pp. 1108-1116, 2020.

پیاده‌سازی آنتن آرایه بازتابی تک‌لایه، کم‌هزینه و پهن‌بند با استفاده از زیرلایه غیرهمگن و پچ‌های پاپیونی

محمود رفائی بوکت

استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

مهديه بزرگی

استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

در این مقاله، نوعی آنتن آرایه بازتابی تک‌لایه و کم‌هزینه در باند X معرفی می‌شود که در آن، آرایه‌ای از پچ‌های پاپیونی شکل روی زیرلایه‌ای غیرهمگن چاپ شده‌اند. ساخت زیرلایه غیرهمگن با استفاده از حفره‌های هوایی متناوبی است که داخل عایق FR4 سوراخکاری شده است. در تحلیل سلول واحد این ساختار، از دو پارامتر مختلف پچ پاپیونی (طول و زاویه) برای حصول دیگرام فازی استفاده شده است که در مجموع، محدوده‌ای فازی نزدیک به 70° درجه بدست آمده است که گزینه خوبی برای طراحی آنتن آرایه بازتابی پهن‌بند است. در روند طراحی آنتن، از روش سنتز فاز کارآمدی استفاده می‌شود تا تأثیرات نامطلوب پاشندگی فرکانس در پهنای باند کاری آنتن کاهش یابد. این روش، چیدمان عناصر پچ آرایه را بهینه می‌سازد و به طراحی آنتن آرایه بازتابی با پاسخ فرکانسی خوب کمک می‌کند. برای ارزیابی درستی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، آنتن آرایه بازتابی با زیرلایه غیرهمگن و با ابعاد $270 \times 270 \times 2.4 \text{ mm}^3$ و فاصله کانونی $26/9$ سانتیمتر شده است. اندازه‌گیری‌ها، بیشینه بهره 28.1 dB و بازده $57/5$ درصد را نشان می‌دهد بطوری‌که پهنای باند بهره 1.5-dB آن 34 درصد است. این نتایج با بهره حاصل از اندازه‌گیری آنتن آرایه بازتابی با زیرلایه همگن نیز مقایسه شده است. نشان داده می‌شود که استفاده از زیرلایه غیرهمگن سبب افزایش بهره بیشینه و پهنای باند آنتن بازتابی پیشنهادی شده است.

کلمات کلیدی

آنتن آرایه بازتابی، زیرلایه غیرهمگن، پچ پاپیونی، آنتن کم‌هزینه و پهن‌بند.

نام نویسنده مسئول: دکتر محمود رفائی بوکت

ایمیل نویسنده مسئول: booket@znu.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۰۴

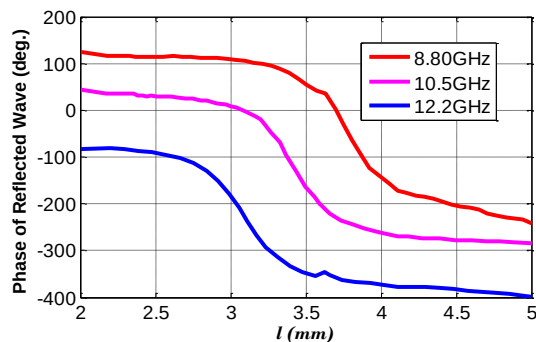
۵- مقدمه

[۷-۵] پیشنهاد شده است. هرچند استفاده از ساختارهای چندلایه باعث افزایش محدوده فازی و پهنای باند نسبی آنتن آرایه بازتابی می‌شود [۸] ولی وزن، تلف، پیچیدگی و هزینه ساخت آن را نیز افزایش می‌دهد. برای حل مشکل دوم، دو راهکار مختلف در مقالات بیان شده است: اولین راهکار براساس طراحی سلول واحد با محدوده فازی زیاد است که با سعی و خطا حاصل می‌شود که روندی بسیار خسته‌کننده و زمانبر است و به عناصر پیچیده و چندلایه منتج می‌شود [۵-۸]. راهکار بعدی، استفاده از روش بهینه‌سازی برای کمینه‌کردن خطاهای تحقق فاز مربوط به هر عنصر است که در فرکانس‌های وسط، ابتدا و انتهای باند کاری آنتن آرایه بازتابی اعمال می‌شود [۹]. هر چند راهکار دوم روشی مفید است اما رابطه واضحی بین مقادیر تابع خطای عناصر در روند بهینه‌سازی وجود ندارد و منجر به عملکرد غیربهینه‌ای از آنتن آرایه بازتابی می‌شود.

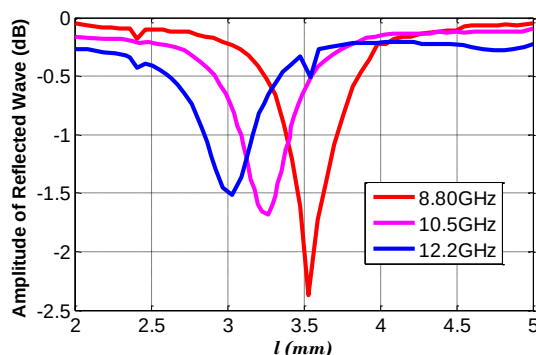
در این مقاله، هم از عنصری جدید با محدوده فازی زیاد و هم از روش بهینه‌سازی جدیدی برای چیدمان دقیق و بهینه عناصر روی روزه آرایه بازتابی استفاده می‌شود تا آنتن آرایه بازتابی پهن‌بندی در باند فرکانسی X حاصل شود. عنصر استفاده شده نوعی پچ پاپیونی است که دارای دو درجه آزادی برای گرفتن تغییرات فازی است که این خود مزیتی در طراحی بهینه آنتن آرایه بازتابی

امروزه آنتن‌های چاپی نقش مهمی در سامانه‌های مخابراتی دارند [۱، ۲]. نوعی از این آنتن‌ها، آنتن‌های بازتابی هستند که در مخابرات فضایی، مخابرات زمینی، مخابرات ماهواره‌ای، تصویربرداری تهرتری، سنجش از راه دور و سایر کاربردهای دیگر استفاده می‌شوند. آنتن‌های آرایه بازتابی جایگزین مناسبی برای آنتن‌های بازتابی مرسوم هستند و با فناوری آنتن‌های آرایه فازی هم ترکیب شده‌اند که قابلیت استفاده در کاربردهای مذکور را دارند. توسعه چشمگیر آنتن‌های آرایه بازتابی به ویژگی‌های استثنایی آنها برمی‌گردد که این ویژگی‌ها عبارتند از: سبکی، کوچک بودن آنها و انعطاف‌پذیری که در کنترل الگوی تشعشعی‌شان وجود دارد. برخلاف آنتن‌های بازتابی مرسوم، در پیاده‌سازی آنتن‌های آرایه بازتابی نیاز به ساخت قالب‌های بزرگ و گران‌قیمت نیست که این امر سبب مقرون به صرفه بودن چنین آنتن‌هایی می‌شود [۳]. با وجود این، پهنای باند کاری آنتن‌های آرایه بازتابی باریک است که نقطه ضعف اصلی این آنتن‌ها است. دلایل پهنای باند باریک این آنتن‌ها، به پهنای باند کم سلول واحد سازنده آنها و تاخیر فاز فضایی دیفرانسیلی موج تابشی از آنتن تغذیه به تک‌تک عناصر آرایه برمی‌گردد [۴، ۳]. برای حل مشکل اول، عناصر پهن‌بند چندلایه و پیچیده

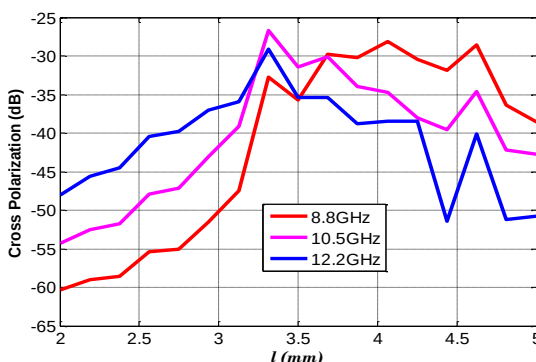
طراحی آنتن آرایه بازتابی، نتایج بهره حاصل از اندازه‌گیری آن با نتایج حاصل از اندازه‌گیری آنتن با زیرلایه همگن مقایسه می‌شود.



(الف)



(ب)



(پ)

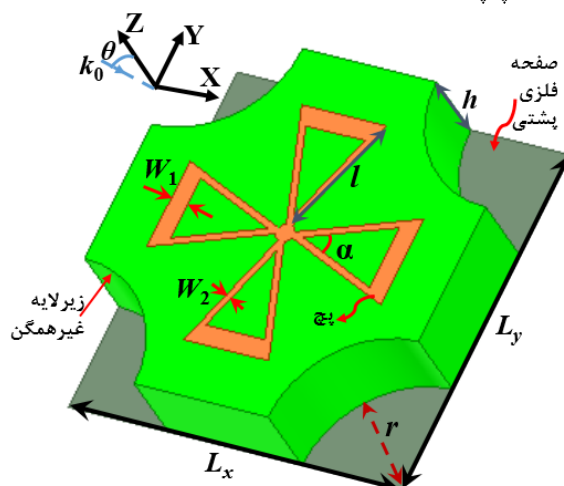
شکل ۲- (الف) دیاگرام فازی، (ب) دیاگرام دامنه و (پ) منحنی تغییرات اندازه قطبش متعامد سلول واحد پیشنهادی برحسب تغییرات طول بازوی (l) . در این حالت $\alpha=30^\circ$ و $r=0$.

مشخص می‌شود که کاربرد زیرلایه غیرهمگن سبب افزایش پهنای‌بند، بهره و بازده بیشینه آنتن آرایه بازتابی نسبت به آنتن با زیرلایه همگن شده است.

۶- سلول واحد پیشنهادی

در شکل ۱ ساختار هندسی سلول واحد و ابعاد طراحی آن نشان داده شده است. در گام اول، زیرلایه این عنصر بصورت همگن ($r=0$) از ماده FR4 با ضریب گذردهی الکتریکی $4/4$ و تانژانت تلفات 0.029 در نظر گرفته شده است. این زیرلایه ارزان و با تلف پیش از این در [۱۵-۱۰] نیز برای طراحی آنتن آرایه بازتابی بررسی شده است. بطور مشخص در [۱۲]، نشان داده شده است که برخلاف انتظار، استفاده از زیرلایه با تلف با ضخامت بیشتر، تلف بازتابی کمتری نسبت به زیرلایه نازک آن دارد. بنابراین ضخامت (h) زیرلایه $2/4$ میلی‌متر انتخاب

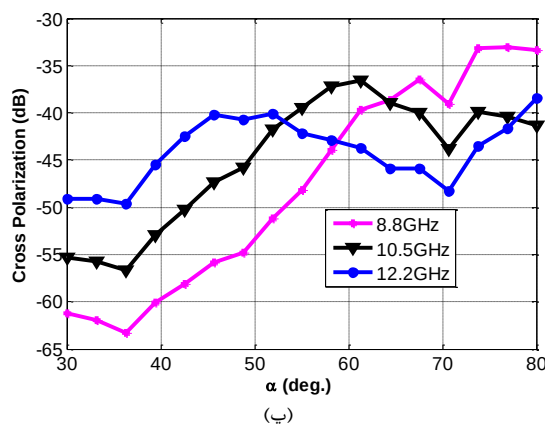
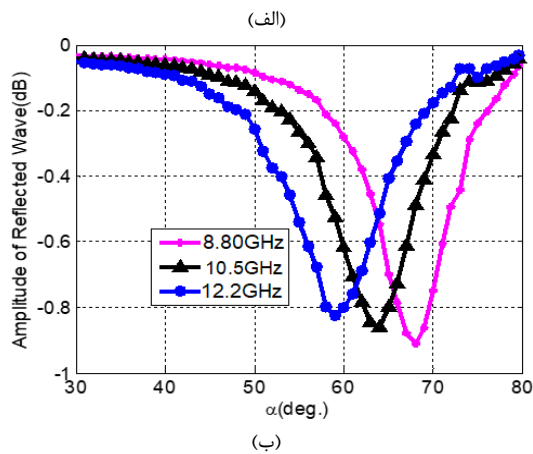
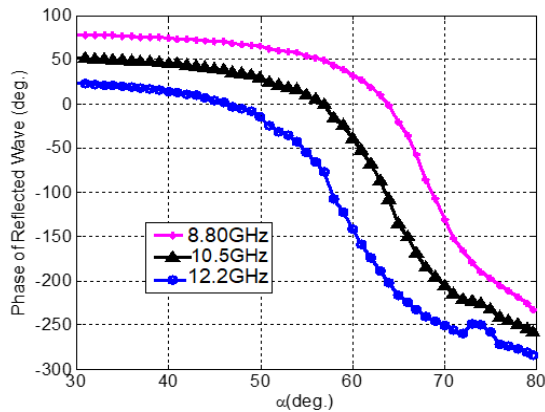
پهن‌بند است. دو پارامتر طول و زاویه، قابلیت تغییر در این عنصر را دارند بدون اینکه نیازی به بزرگ‌کردن ابعاد سلول واحد باشد. چنین عنصری روی ماده تک‌لایه FR4 چاپ شده است.



شکل ۱- نمایش سه‌بعدی سلول واحد پیشنهادی که هندسه کلی و پارامترهای طراحی آن روی شکل مشخص شده‌اند.

از آنجا که یکی از عوامل اصلی گران بودن قیمت آنتن‌های آرایه بازتابی به قیمت زیاد عایق‌های کم‌تلف برمی‌گردد، برای کاهش هزینه ساخت این آنتن‌ها راهکارهایی گزارش شده است که یکی از آن‌ها استفاده از زیرلایه ارزان FR4 است [۱۱، ۱۰]. البته در استفاده از چنین زیرلایه پرتلفی در باند فرکانسی X، با در نظر گرفتن تمهیداتی چون ضخامت بیشتر [۱۳، ۱۲] و کاهش دوره تناوب آرایه به کمتر از نصف طول موج [۱۴]، نشان داده‌اند که زیرلایه FR4 می‌تواند برای پیاده‌سازی آنتن آرایه بازتابی در این فرکانس‌ها قابل استفاده باشد. ما در این کار علاوه بر تمهیدات مذکور، از غیرهمگن کردن زیرلایه هم برای کاهش تلف FR4 استفاده کرده‌ایم. چنین زیرلایه غیرهمگنی با ایجاد حفره‌های هوایی متناوب داخل محیط میزبان حاصل می‌شود که سبب کاهش ضریب گذردهی الکتریکی موثر FR4 و تلف آن می‌شود و حتی وزن آرایه را کم می‌کند. با استفاده از نرم‌افزار HFSS، دیاگرام‌های فازی و دامنه سلول واحد پیشنهادی استخراج شده و برای طراحی آنتن آرایه بازتابی با تغذیه از وسط استفاده می‌شود. در مرحله طراحی از روش بهینه‌سازی [۱۵، ۱۶] استفاده می‌شود که روشی برای سنتز فاز و کم کردن تأثیرات نامطلوب پاشندگی فرکانسی است که از تأخیر فاز فضایی دیفرانسیلی در فرکانس‌های مختلف داخل پهنای باند مطلوب ناشی می‌شود. این روش، چیدمان سلول‌های آرایه را بهینه می‌سازد و به طراحی آنتن آرایه بازتابی با پاسخ فرکانسی مناسب کمک می‌کند. منظور از پاسخ فرکانسی مناسب افزایش پهنای باند و کاهش اندازه سطح گلبرگ فرعی ($|S_{LL}|$) است. با استفاده از عنصر پاپیونی و روش سنتز فاز، آرایه بهینه‌ای حاصل می‌شود که برای تغذیه آن، آنتن شیپوری با سطح روزنه کوچک نیز طراحی شده است. در گام بعدی، با در نظر گرفتن موارد گفته شده، کل سامانه یعنی آرایه مسطح به همراه آنتن تغذیه در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که آنتن آرایه بازتابی حاصل، آنتنی پهن‌بند و با بازده بالا است. شایان ذکر است که اطلاق «پهن‌بند» و «بازده بالا» به طرح پیشنهادی، به علت بیشتر بودن پهنای باند و بازده آن نسبت به وضعیتی است که ساختارهای چندلایه، پیچیده و با هزینه زیاد ساخته شده‌اند. با توجه به تانژانت تلفات زیرلایه ارزان FR4، پیش‌بینی چنین بهبودی دور از انتظار بود. برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، آنتن آرایه بازتابی با زیرلایه غیرهمگن ساخته شده و اندازه‌گیری می‌شود. همچنین، برای ارزیابی درست تأثیرات استفاده از زیرلایه غیرهمگن در

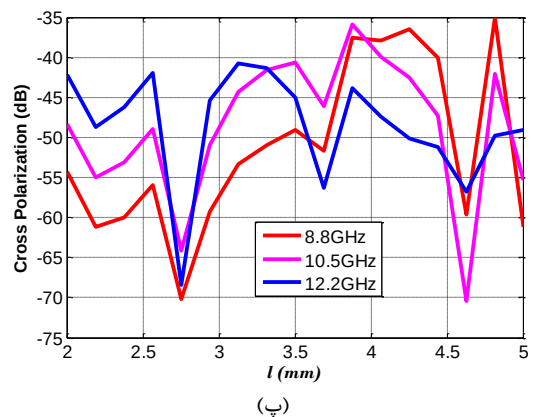
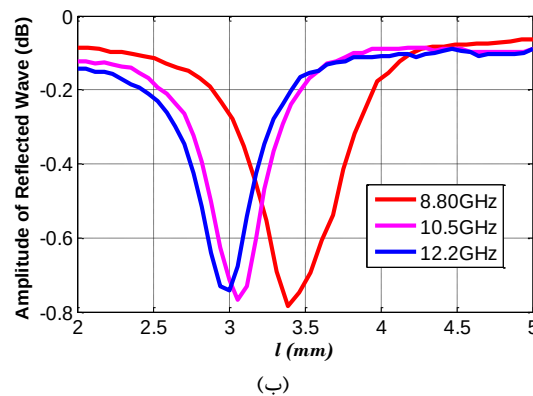
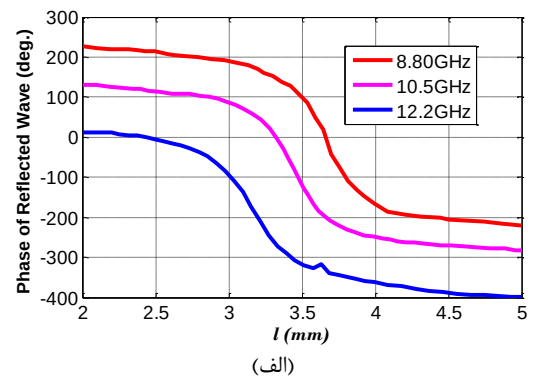
است. از شکل ۱، مشخص است که عنصر پیشنهادی، قابلیت تغییر در طول بازو (l) و هم در زاویه (α) را دارد.



شکل ۴ - (الف) دیاگرام فازی، (ب) دیاگرام دامنه و (پ) منحنی تغییرات اندازه قطبش متعامد سلول واحد پیشنهادی برحسب تغییرات زاویه (α). در این حالت $l=5\text{mm}$ و $r=3\text{mm}$.

در گام نخست، پاسخهای فاز و دامنه سلول واحد با زیرلایه همگن ($r=0$) برای تابش عمودی موج صفحه‌ای برحسب تغییرات طول بازوی آن (l) در بازه‌ای از باند فرکانسی X بدست آمده است که به ترتیب در شکل ۲ (الف) و شکل ۲ (ب) مشاهده می‌شود.

شده است. از طرف دیگر، در استفاده از این زیرلایه برای طراحی آنتن آرایه بازتابی پهن‌بند، لازم است که تناوب آرایه کمتر از نصف طول موج کاری (λ) باشد [۱۴].



شکل ۳ - (الف) دیاگرام فازی، (ب) دیاگرام دامنه و (پ) منحنی تغییرات اندازه قطبش متعامد سلول واحد پیشنهادی برحسب تغییرات طول بازوی (l). در این حالت $\alpha=30^\circ$ و $r=3\text{mm}$.

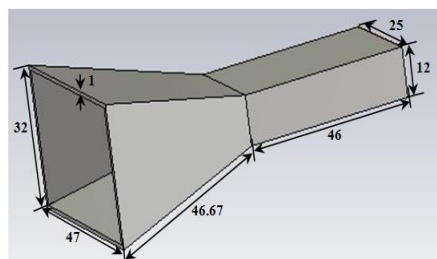
البته باید نسبت طول بازو در عنصر پاپیونی (l) به دوره تناوب آرایه ($L_x=L_y$) باید بگونه‌ای انتخاب شود که محدوده فازی خطی کافی برای طراحی آنتن آرایه بازتابی حاصل شود. با در نظر گرفتن موارد مذکور، طول تناوب ($L_x=L_y=0/\lambda_{350}$) در فرکانس مرکزی 10.5 گیگاهرتز و $0.5 < l/L_x < 0.7$ بصورت بهینه تعیین شده است که به معنای زیرطول موج^۱ بودن ابعاد سلول واحد برای بدست آوردن بیشینه محدوده فازی خطی است [۱۷-۱۹]. سایر ابعاد عنصر بصورت $L_x=L_y=10\text{mm}$ ، $W_1=0.9\text{mm}$ و $W_2=0.3\text{mm}$ نیز بهینه انتخاب شده است. برای تحلیل سلول واحد پیشنهادی فرض می‌شود که عنصر با شرایط مرزی متناوب بینهایت احاطه شده است [۳]. تحلیل سلول واحد با شرایط مرزی متناوب، با نرم افزار HFSS انجام شده است که مبتنی بر روش اجزای محدود

^۱ Sub-wavelength

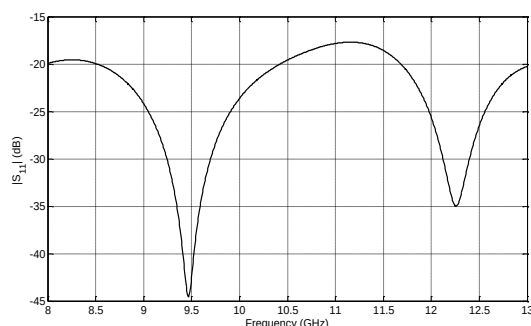
این پایگاه داده در طراحی بهینه آنتن آرایه بازتابی در بخش بعد استفاده می-شود. جدول ۱، تغییرات ساختاری مختلف در سلول واحد برای بدست آوردن پایگاه داده‌ای از پاسخ فاز را نشان می‌دهد.

۷- طراحی بهینه آنتن آرایه بازتابی

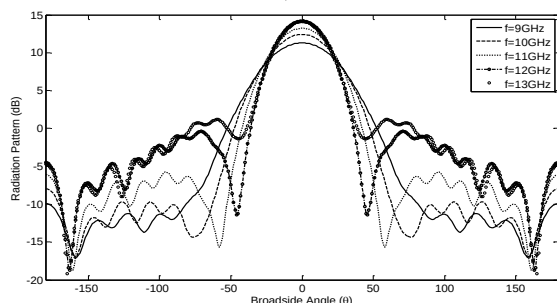
در این بخش، به کمک روش سنتر فازی [۱۵، ۱۶] و دیاگرام‌های فازی در شکل ۲ و شکل ۳، آرایش بهینه‌ای از پچ‌ها روی زیرلایه غیرهمگن انتخاب می‌شود بطوری که به بهبود مشخصات تشعشعی آنتن آرایه بازتابی منجر شود.



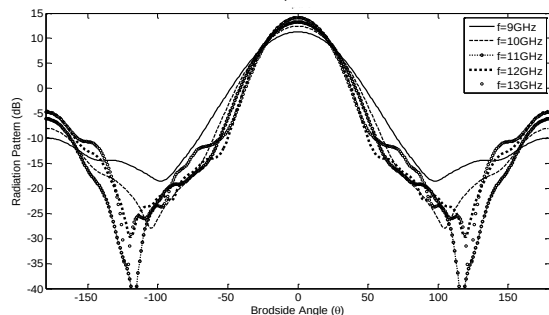
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۶- (الف) نمایی از آنتن شیبوری طراحی شده به همراه

پارامترهای طراحی آن برحسب میلی‌متر، (ب) نمودار تطبیق امپدانس

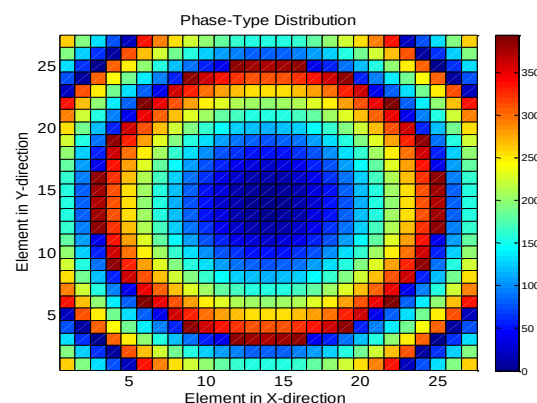
آن، (پ) الگوهای تشعشعی آن در صفحه E و (ت) الگوهای تشعشعی

آن در صفحه H.

جدول ۱- پارامترهای مختلف سلول واحد برای حالت‌های مختلف آن و

تشکیل پایگاه داده

W_1	W_2	r	α	l
(mm)	(mm)	(mm)	(deg.)	(mm)
0.1~0.5	0.1~0.9	0~2	30°~80°	2.4~9.6
Step: 0.05	Step: 0.05	Step: 0.5	Step: 1°	Step: 0.2

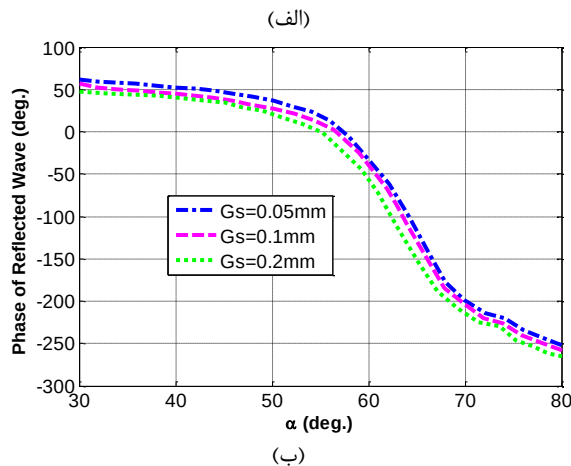
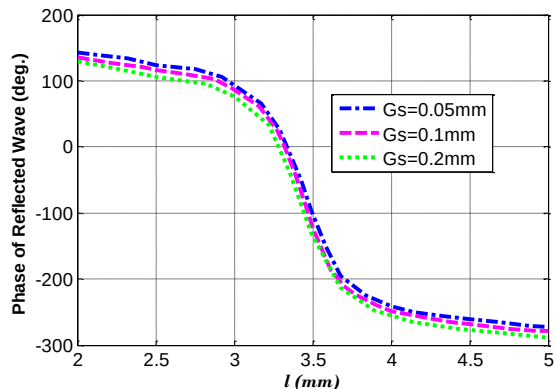


شکل ۵- مقادیر جابجایی‌های فاز لازم برای تحقق آنتن آرایه بازتابی

۲۷×۲۷ تایی با تغذیه از وسط برای تولید پرتوی مدادی

در شکل ۲ (پ) هم منحنی تغییرات اندازه قطبش متعامد گزارش شده است. همان‌طور که در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است، محدوده فازی ۳۰۰ درجه در فرکانس مرکزی ۱۰/۵ گیگاهرتز حاصل شده است. شایان ذکر است که در این حالت زاویه α برابر با ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است. در گام بعدی، زیرلایه بصورت غیرهمگن در آمده است و شعاع حفره‌های هوایی سوراخ شده داخل زیرلایه FR4 مقدار بهینه $r=3\text{mm}$ را دارد. این حفره‌ها با پچ‌ها نقطه مشترکی ندارند. چنین زیرلایه غیرهمگنی، اولین بار در [۱۸] برای کاهش تلفات در FR4 در پیاده‌سازی آنتن آرایه بازتابی برای باند X استفاده شده بود. سلول واحد با زیرلایه غیرهمگن نیز تحلیل شده و دیاگرام‌های فاز و دامنه آن برای تابش عمودی موج صفحه‌ای برحسب تغییرات طول بازوی آن (l)، به ترتیب در شکل ۳ (الف) و شکل ۳ (ب) آورده شده است. در شکل ۳ (پ) هم منحنی تغییرات اندازه قطبش متعامد گزارش شده است. همان‌طور که در شکل ۳ (الف)، مشاهده می‌شود محدوده فازی تقریباً ۴۰۰ درجه بدست آمده است و تلفات سلول واحد به کمتر ۱dB رسیده است. بطور کلی مقایسه نتایج شکل ۲ و شکل ۳، نشان می‌دهد که استفاده از زیرلایه غیرهمگن، سبب بهبود مشخصات بازتابی سلول واحد شده است. روشن است که زیرلایه غیرهمگن علاوه بر کاهش تلفات، وزن آرایه را هم کاهش می‌دهد. با توجه به محدودیت در افزایش طول بازوی عنصر پچ، دیاگرام فازی بعدی بر حسب تغییرات زاویه بین دو بازو (α) محاسبه می‌شود که در این حالت، طول بازو در بیشینه مقدارش ($l=5\text{mm}$) ثابت نگه داشته شده است و زیرلایه هم غیرهمگن ($r=3\text{mm}$) است. نتایج حاصل از چنین تحلیلی در شکل ۴ قابل مشاهده است. با توجه به دیاگرام فازی شکل ۴ (الف)، محدوده فازی در حدود ۳۰۰ درجه است. بنابراین، مجموع محدوده‌های فازی حاصل از تغییرات دو پارامتر طول بازو (l) و اندازه زاویه (α)، نزدیک به ۷۰۰ درجه است. این محدوده فازی زیاد می‌تواند گزینه خوبی برای طراحی آنتن آرایه بازتابی پهن‌بند باشد [۱۹-۲۳]. پارامترهای مختلف سلول واحد پیشنهادی W_1 ، W_2 و α و l و r که در شکل ۱ نشان داده شده است، سبب می‌شود که پایگاه داده‌ای از حالت‌های مختلف سلول واحد پیشنهادی و پاسخ‌های فاز آنها حاصل شود.

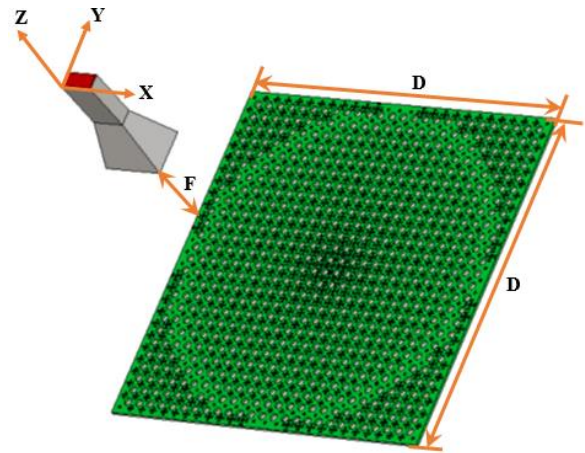
با توجه به اینکه در طراحی آنتن آرایه بازتابی با تغذیه از وسط، تلف ناشی از انسداد آنتن تغذیه، یکی از عوامل مهم کاهش بازده است، بنابراین آنتن شیپوری جدیدی با ابعاد روزنه کوچک برای تغذیه آنتن آرایه بازتابی طراحی شده است. نمایی از آنتن شیپوری طراحی شده در شکل ۶ (الف) مشاهده می‌شود. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود مساحت روزنه آن 47×32 میلی‌متر مربع است. نمودار تطبیق امپدانس آن در شکل ۶ (ب) نشان داده است که باند فرکانسی X را پوشش می‌دهد. با توجه به الگوهای تشعشی آنتن شیپوری که در صفحات E و H به ترتیب در شکل ۶ (پ) و شکل ۶ (ت) نشان داده شده است، بهره بیشینه آن در فرکانس مرکزی $10/5$ گیگاهرتز 13.3dB است.



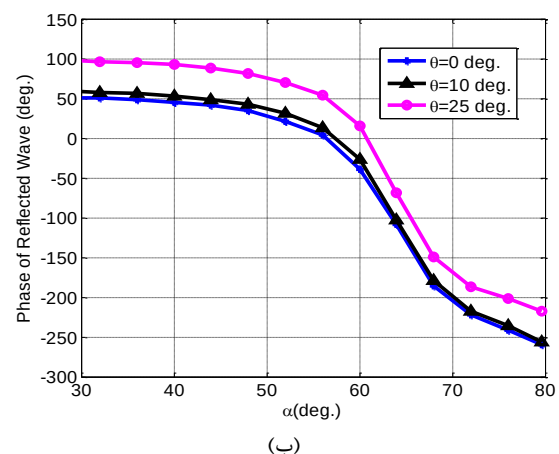
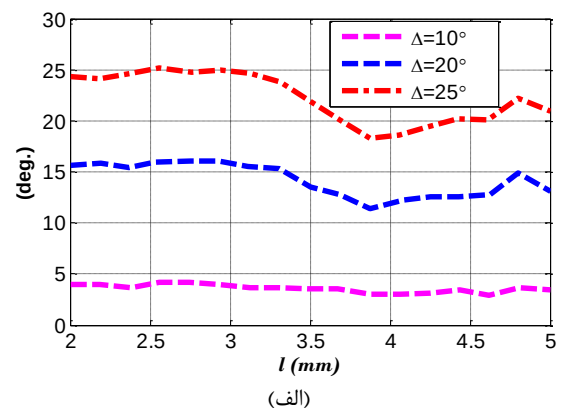
شکل ۹- دایاگرام فازی سلول واحد پیشنهادی برای مقادیر مختلف G_s در فرکانس مرکزی $10/5$ گیگاهرتز برای زوایای تابش $\theta_i = 20^\circ$ بر حسب (الف) l ($\alpha = 30^\circ$) و (ب) α ($l = 9\text{mm}$).

مقدار پهنای پرتو نصف قدرت (HPBW°) در صفحه E و صفحه H به ترتیب برابر با $46/5^\circ$ و 41° است. اگر الگوهای تشعشی را با $\cos^4\theta$ مقایسه کنیم، مقدار $q = 4/72$ بدست می‌آید که در طراحی تحلیلی آنتن آرایه بازتابی استفاده می‌شود. با توجه به ابعاد آرایه 27×27 سانتیمتر مربع و تغذیه از وسط آن، اندازه فاصله کانونی $26/9$ سانتیمتر بدست می‌آید به شرطی که بازده کل ساختار بیشینه شود [۳]. کل ساختار به همراه آنتن تغذیه به کمک نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده است که در شکل ۷ مشاهده می‌شود. مشخصات رایانه‌ای که همه شبیه‌سازی با آن انجام شده است، عبارت است از: Intel Core i7-7700 RAM: ۱۶ گیگابایت. لازم است ذکر شود که برای آرایه بازتابی مذکور، بیشینه زاویه تابش (θ_i) برابر با 27° است، بنابراین وابستگی دیاگرام‌های فازی به زاویه تابش (θ_i) باید بررسی شود. برای این منظور،

همانطور که در [۳] اشاره شده است، تک‌تک عناصر روی سطح آرایه برای جبران فاز موج برخوردی به آن‌ها باید جابجایی و جبران فازی را انجام دهند. مقادیر این جابجایی‌های فاز برای یک آرایه 27×27 تایی برای تحقق آنتن آرایه بازتابی با تغذیه از وسط، محاسبه شده است و در شکل ۵ نشان داده شده است.

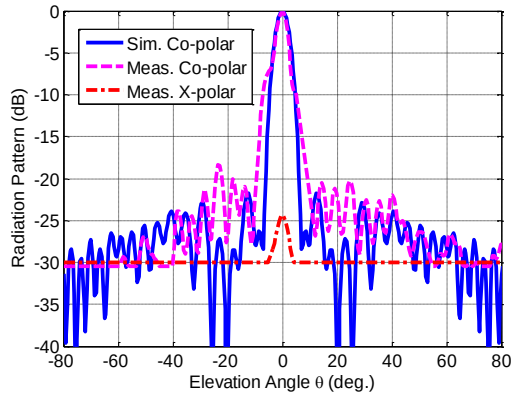


شکل ۷- آنتن آرایه بازتابی شبیه‌سازی شده به همراه آنتن شیپوری طراحی شده، $D = 27\text{cm}$ و $F = 26.9\text{cm}$.

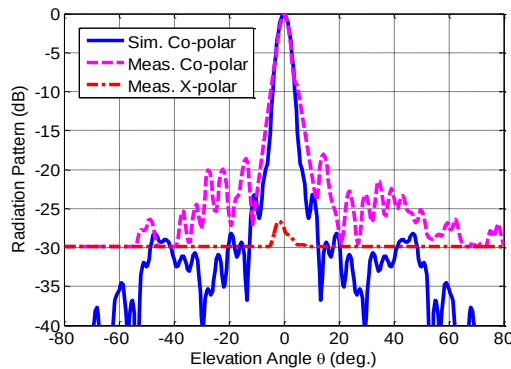


شکل ۸- تغییرات فازی سلول واحد پیشنهادی در فرکانس مرکزی $10/5$ گیگاهرتز برای زوایای تابش مختلف $(\theta_i < \theta_e)$ بر حسب تغییرات (الف) l ($\alpha = 30^\circ$) و $\Delta =$ تفاضل فاز تابش مایل (θ_i) با فاز تابش عمودی و (ب) α ($l = 9\text{mm}$).

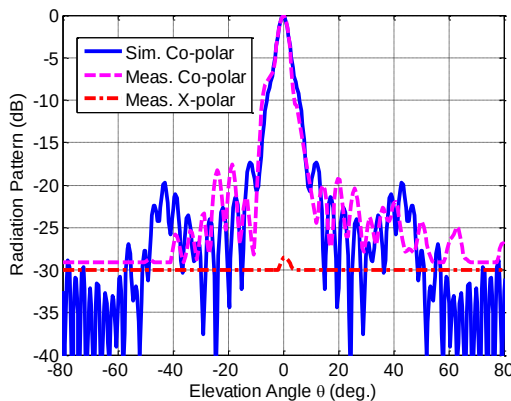
الگوهای تشعشعی اندازه‌گیری شده آرایه بازتابی با زیرلایه غیرهمگن در شکل ۱۱ در سه فرکانس مختلف داخل پهنای باند کاری آن و در صفحه E نشان داده شده است که با الگوهای شبیه‌سازی شده مقایسه شده است. با توجه به این الگوهای تشعشعی، روشن است که اندازه $|SLL|$ کمتر از -18dB است. همچنین بیشینه مقدار قطبش متعامد کمتر از -25dB است که با خطوط قرمز رنگ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

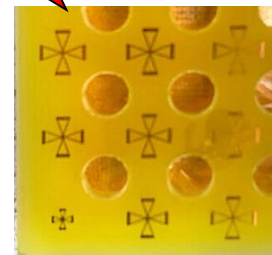
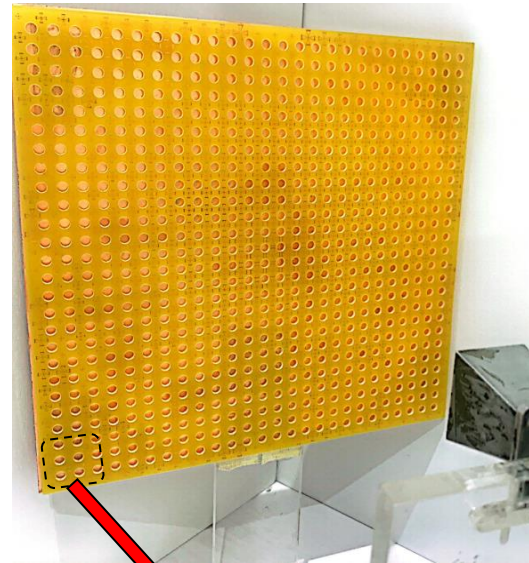


(پ)

شکل ۱۱- الگوهای تشعشعی در صفحه E آنتن آرایه بازتابی پیاده-سازي شده با زیرلایه غیرهمگن: (الف) 8.8GHz، (ب) 10.5GHz و (پ) 12.2GHz

علت اینکه در برخی زوایا، منحنی‌ها بصورت خط صاف نشان داده شده

دیگرام‌های فازی شکل ۳ (الف) و شکل ۴ (الف) بطور جداگانه، برای زوایای تابش مایل مختلف در فرکانس مرکزی ۱۰/۵ گیگاهرتز دوباره محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود دیگرام‌های فازی بدست آمده، وابستگی کمی به زاویه تابش (θ_i) دارند تا زمانی که $\theta_i < \theta_e$ باشد.



شکل ۱۰- تصویری از آنتن آرایه بازتابی ساخته شده با زیرلایه

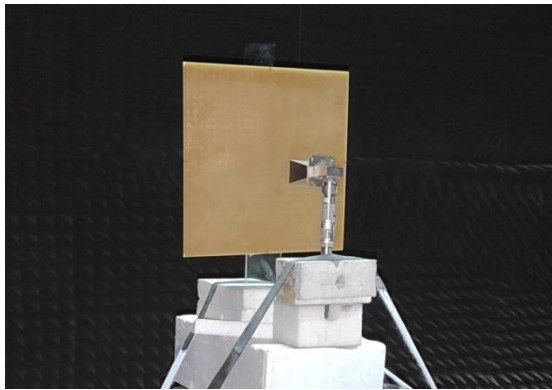
غیرهمگن

توجه شود که برای اجتناب از گلبرگ ناخواسته در الگوی تشعشعی آنتن نهایی، تناوب عناصر آرایه باید از معادله (۱) تبعیت کند [۳]:

$$L_x, L_y \leq \frac{\lambda_0}{(1 + \sin \theta_i)} \quad (1)$$

که در آن، λ_0 طول موج فضای آزاد در فرکانس مرکزی است و θ_i مقدار زاویه تابش است که باید از θ_e کمتر باشد. ابعاد سلول واحد ($L_x=L_y=\lambda_0/3.5$) است که محدودیت فوق را ارضا می‌کند.

برای راستی‌آزمایی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نمونه‌ای از آنتن آرایه بازتابی طراحی شده با زیرلایه غیرهمگن باید ساخته شده و اندازه‌گیری شود. در پیاده‌سازی این ساختار، لایه مسی پشت آرایه باید خورده شود و ورق فلزی پشت آرایه قرار گیرد که بطور کامل آرایه را بپوشاند و هیچ فاصله‌هوایی (Gs^2) بین زیرلایه و صفحه زمین نباشد. با توجه به فرآیند پیاده‌سازی و بررسی ملاحظات نصب، شبیه‌سازی‌های دیگری روی سلول واحد انجام شده است که در آن دیگرام‌های فازی برای مقادیر مختلف Gs در فرکانس مرکزی محاسبه شده‌اند. در شکل ۹، نتایج این شبیه‌سازی‌ها آورده شده است که تاثیرات و حساسیت اندک دیگرام‌های فازی نسبت به فاصله‌های هوایی کم احتمالی را نشان می‌دهد. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها، آنتن آرایه بازتابی با زیرلایه غیرهمگن ساخته شده است و برای صفحه زمین آن، ورق مسطح فلزی بدون انعطاف پشت آرایه قرار گرفته است که تصویری از آن در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.



(ب)

شکل ۱۲- (الف) تصویری از آنتن آرایه بازتابی ساخته شده با زیرلایه همگن و (ب) چیدمان لازم برای اندازه‌گیری آن داخل آزمایشگاه آنتن ضدپژواک.

بنابراین، بیشینه بازده آنتن در حدود ۵۷/۵ درصد است که این مقدار برای آنتن‌های آرایه بازتابی با چنین ابعادی و بصورت تغذیه از وسط بازده بالایی است. پر واضح است که استفاده از تغذیه آفست^۴، تلف ناشی از انسداد آنتن تغذیه را حذف کرده و بازده کل ساختار را افزایش می‌دهد.

جدول ۳- مقایسه کارهای مشابه شامل زیرلایه سوراخ شده

(غیرهمگن) با ساختار پیشنهادی

بیشینه بازده (%)	میزان پیچیدگی ساختاری	پهنای باند 1.5dB (%)	بیشینه بهره (dB)	فرکانس مرکزی (گیگاهرتز)	روش کنترل فاز	مرجع
۵۴/۵ (آفست)	ساخت پیچیده (شبیه‌سازی گزارش شده)	۱۰/۳	۲۴/۲	۳۰	گذردهی الکتریکی موثر	[۲۷]
۳۸/۶۵	تک لایه با ماده کم تلف و گران	۹/۲	۳۴/۷	۳۰	گذردهی الکتریکی موثر	[۲۸]
۴۹	دولایه و گران (شبیه‌سازی گزارش شده)	۴/۱۵	۲۷/۴	۱۴/۴۵	گذردهی الکتریکی موثر	[۲۹]
۵۲/۲	چندلایه و پیچیده برای ساخت	۲۴	۲۵/۴	۱۲/۵	گذردهی الکتریکی موثر	[۳۰]
۴۵/۶	دو لایه متشکل از دو زیرلایه مختلف گران	۲۹/۶	۳۰/۳	۱۳/۵	گذردهی الکتریکی موثر	[۳۱]
۴۱	تک لایه و با سطح انتخابگر فرکانس	۳۰	۲۶/۷	۱۰/۵	پچ	[۳۲]
۵۷/۵	تک لایه و با ماده FR4 ارزان	۳۴	۲۸/۱	۱۰/۵	پچ	این مقاله

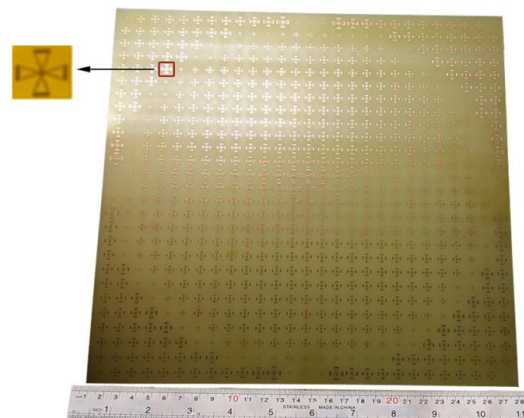
است، به عدم توانایی دستگاه‌های آزمایشگاه آنتن در اندازه‌گیری مولفه‌های میدان برای مقادیر کمتر از 30dB- است. برای بررسی عملی تاثیر زیرلایه غیرهمگن بر روی بهره، نمونه‌ای از آنتن آرایه بازتابی طراحی شده با زیرلایه همگن با همان ابعاد هم ساخته شده است که تصویری از آن نیز در شکل ۱۲ (الف) دیده می‌شود. در شکل ۱۲ (ب) هم تصویری از این ساختار در اتاق آنتن مشاهده می‌شود که تحت آزمایش قرار گرفته است. تغییرات بهره اندازه‌گیری شده هر دو آنتن آرایه بازتابی در شکل ۱۳ مقایسه شده است. در این شکل دیده می‌شود که غیرهمگن کردن زیرلایه، هم بهره بیشینه و هم پهنای باند آنتن آرایه بازتابی را افزایش داده است بطوری که بیشینه بهره آنتن با زیرلایه غیرهمگن 28.1dB و پهنای باند 1.5dB آن ۳۴ درصد (۸/۷ گیگاهرتز تا ۱۲/۳ گیگاهرتز) است. بیشینه بازده برای آنتن آرایه بازتابی با زیرلایه غیرهمگن را می‌توان از رابطه (۲) بدست آورد [۲۴]:

$$\eta_{total} = \lambda_0^2 \frac{G_{max}}{4\pi A} \times 100, \quad (2)$$

که در آن G_{max} بیشینه بهره اندازه‌گیری شده (28.1dB) در فرکانس ۱۰/۵ گیگاهرتز و A مساحت روزنه آرایه (۲۷×۲۷ سانتیمترمربع) است.

جدول ۲- مقایسه مشخصات آنتن‌های آرایه بازتابی تک‌لایه با ساختار پیشنهادی

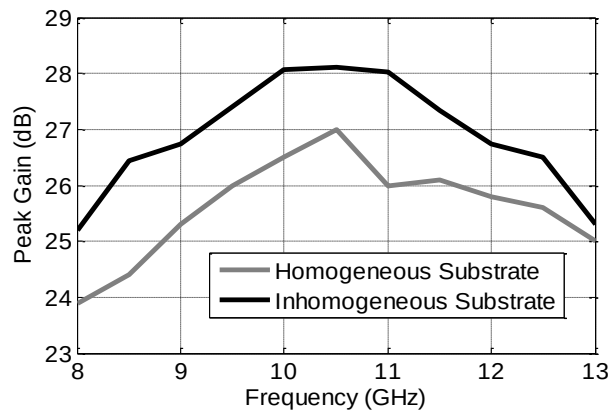
مرجع	ابعاد آرایه (cm)	تعداد سلولها	بازه فرکانس ی (GHz)	بیشین بهره (dB)	پهن ای باند (%)	بازه فازی (درجه)	بیشینه بازده (%)
[۲۵]	۴۰×۴۰	۱۲۲۵	۱۲/۵ تا ۱۴/۵	۳۲/۷۶	۱۶/۷	۳۶۰	۴۱/۷
[۲۶]	۱۹×۲۷	۶۵۰	۱۰/۷ تا ۱۲/۵	۲۵/۳	۹/۷	۴۸۰	۳۷
[۲۲]	۲۰×۲۰	۱۹×۱۹	۸ تا ۱۱	۲۳/۶	۲۰	۴۰۰	۴۱
[۹]	۱۲×۱۲۰	۱۰۰۰	۱۱/۴ تا ۱۲/۸	۴۰/۶	۱۱/۶	۴۰۰	۳۹
[۲۳]	۱۸×۱۸۰	۳۶×۳۶	۲۲/۵ تا ۲۶/۵	۳۲/۲	۱۷/۶	۴۸۰	۶۰/۶ (آفست)
این مقاله	۲۷×۲۷	۷۲۹	۸/۷ تا ۱۲/۳	۲۸/۱	۳۴	۷۰۰	۵۷/۵



(الف)

^۴ Offset

- [5] J. A. Encinar, J. A. Zornoza, "Three-layer printed reflectarrays for contoured beam space applications", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, no. 5, pp. 1138-1148, 2004.
- [6] E. Carrasco, M. Barba, J. A. Encinar, "Reflectarray element based on aperture-coupled patches with slots and lines of variable length", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, no. 3, pp. 820-825, 2007.
- [7] E. Carrasco, J. A. Encinar, M. Barba, "Bandwidth improvement in large reflectarrays by using true-time delay", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 56, no. 8, pp. 2496-2503, 2008.
- [8] E. Ozturk, B. Saka, "Multilayer Minkowski reflectarray antenna with improved phase performance", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 69, no. 12, pp. 8961-8966, 2021.
- [9] M. R. Chaharmir, J. Shaker, N. Gagnon, D. Lee, "Design of broadband, single layer dual band large reflectarray using multi open loop elements", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, no. 9, pp. 2875-2883, 2010.
- [10] Q. Wang, Z. H. Shao, Y. J. Cheng, P. K. Li, "Broadband Low-Cost Reflectarray Using Modified Double-Square Loop Loaded by Spiral Stubs", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 9, pp. 4224-4229, 2015.
- [11] D. R. Prado, A. Campa, M. R. Pino, J. Encinar, F. Las-Heras, "Design, manufacture and measurement of a low-cost reflectarray for global earth coverage", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 15, pp. 1418-1421, 2015.
- [12] H. Rajagopalan, Y. Rahmat-Samii, "On the reflection characteristics of a reflectarray element with low-loss and high-loss substrates", IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 52, no. 4, pp. 73-85, 2010.
- [13] F. Costa, A. Monorchio, "Closed-form analysis of reflection losses in microstrip reflectarray antennas", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 10, pp. 4650-4660, 2012.
- [14] J. Ethier, M. R. Chaharmir, and J. Shaker, "Loss reduction in reflectarray designs using sub-wavelength coupled-resonant elements", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 11, pp. 5456-5459, 2012.
- [15] M. Rafaei-Booket, S. M. Mousavi, "Efficient Analysis method and design approach for broadband reflectarrays with isotropic/artificial anisotropic substrates", IET Microwaves, Antennas & Propag., vol. 14, no. 10, pp. 1108-1116, 2020.
- [16] M. Rafaei-Booket, S. M. Mousavi, "New phase realization approach for implementation of broadband reflectarrays", International Journal of Information and Communication Technology & Research, vol. 13, no. 1, pp. 1-7, 2021.
- [17] P. Nayeri, F. Yang, A. Z. Elsherbani, "A broadband microstrip reflectarray using sub-wavelength patch elements", IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium, 2009.
- [18] M. Rafaei-Booket, Z. Atlasbaf, M. Shahabadi, "Broadband reflectarray antenna on a periodically perforated substrate", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 64, no. 8, pp. 3711-3717, 2016.
- [19] D. M. Pozar, "Wideband reflectarrays using artificial impedance surfaces", Electronics Letters, vol. 43, no. 3, pp. 148-149, 2007.
- [20] M. R. Chaharmir, J. Shaker, H. Legay, "Broadband design of single-layer large reflectarray using multi cross loop elements", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. 57, no. 10, pp. 3363 - 3366, 2009.
- [21] A. Vosoogh, K. Keyghobad, A. Khaleghi, S. Mansouri, "A high-efficiency Ku-band reflectarray antenna using single-layer multi-resonance elements", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 13, pp. 891-894, 2014.
- [22] P.-Y. Qin, Y. J. Guo, A. R. Weily, "Broadband reflectarray antenna using subwavelength elements based on double square meander-line rings", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 64, no. 1, pp. 378-383, 2016.
- [23] X. Li, X. Li, L. Yang, "Single-layer wide band-ratio reflectarray with orthogonal linear polarization", IEEE Access, vol. 8, pp. 93586 - 93593, 2020.
- [24] D. Kundu, D. bhattacharya, R. Ruchi, "A single-layer broadband reflectarray in K-band using cross-loop slotted patch elements", IEEE Access, vol. 10, pp. 13490-13495, 2022.



شکل ۱۳- بهره اندازه گیری شده آنتن آرایه بازتابی پیاده سازی شده با زیرلایه غیرهمگن. منحنی مربوط به بهره اندازه گیری شده آنتن آرایه بازتابی با زیرلایه همگن برای مقایسه گزارش شده است.

برای اینکه نوآوری ارائه شده بصورت درست ارزیابی شود، ساختار پیشنهادی ما با برخی از آنتن های آرایه بازتابی تک لایه قبلی در جدول ۲ مقایسه شده است. همچنین برای نشان دادن سادگی و کم هزینه بودن ساختار پیشنهادی، این کار با برخی از کارهایی گزارش شده که بر روی زیرلایه های سوراخ شده طراحی شده اند، در جدول ۳ مقایسه شده است. آنچه که از این مقایسه ها بدست می آید، ساده و کم هزینه بودن ساختار پیشنهادی است که در عین حال، دارای بازده و پهنای باند بیشتری است.

۸- نتیجه گیری

آرایه ای از عناصر چاپی پاپیونی شکل روی زیرلایه ارزان FR4 برای پیاده سازی آنتن آرایه بازتابی پهن باند با بهره بالا بررسی شد. نشان داده شد که این عنصر پیشنهادی می تواند دو نوع دیگرام فازی بدست دهد که محدوده فازی مجموع آن ها بیش از ۳۶۰ درجه است. همچنین، نشان داده شد که با سوراخ کاری و ایجاد حفره های هوایی متناوب داخل زیرلایه (عایق غیرهمگن)، پهنای باند و بهره آنتن آرایه بازتابی نسبت به حالتی که زیرلایه همگن است، افزایش می یابد. علاوه بر این، در مرحله طراحی آنتن آرایه بازتابی از روش سنتز فاز توصیف شده در [۱۵، ۱۶] استفاده شد که منتج به بهینه ترین توزیع عناصر پاپیونی شکل در سطح آرایه شد. در نتیجه، از آنتن آرایه بازتابی ساخته شده با زیرلایه غیرهمگن بهره 28.1dB، پهنای باند ۳۴ درصد و $SLL < -18dB$ بدست آمد. همچنین بازده آن ۵۷/۵ درصد محاسبه شد که برای آنتن های آرایه بازتابی تک لایه با عایق FR4 بازده بالایی است.

مراجع

- [۱] مهدی ابی اوغلی، محمدناصر مقدسی، اصغر کشتکار، بهید قلمکاری، «آنتن مجتمع فرایه باند و باند باریک برای کاربردهای رادیوشناختی و تنظیم پذیری با استفاده از طراحی مدارهای تطبیق امپدانس»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۵۰، شماره ۴، صفحات ۱۴۵۵-۱۴۶۱، ۱۳۹۹.
- [۲] بابک هنربخش، «آنتن آرایه بازتابی بهره بالای ارزان خودپوشا»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۵۰، شماره ۴، صفحات ۱۸۹۹-۱۹۰۷، ۱۳۹۹.
- [3] J. Huang, J. A. Encinar, "Reflectarray Antennas", Hoboken. NJ: John Wiley & Sons, 2008.
- [4] D. M. Pozar, "Bandwidth of reflectarrays", Electronics Letters, vol. 39, no. 21, pp. 1490-1490, 2003.

- [30] M. Rafaei-Booket, Z. Atlasbaf, "New Ku-band reflectarray antenna by using anisotropic superstrate on an artificial magnetic conductor", *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 9, pp. 831-841, 2016.
- [31] B. Xi, Q. Xue, Y. Cai, Y. Wang, S. Yang, R. Zhang, "A novel wideband perforated dielectric reflectarray", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 61, no. 12, pp. 2739-2745, Jul. 2019.
- [32] Y. He, Z. Gao, D. Jia, W. Zhang, B. Du, Z. N. Chen, "Dielectric Metamaterial-Based Impedance-Matched Elements for Broadband Reflectarray", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 7019-7028, 2017.
- [33] M. Rafaei-Booket, M. Bozorgi, "Low-cost inhomogeneous material for low RCS reflectarray antenna implementation", *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 149, pp. 154182, 2022.
- [25] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd edition", John Wiley & Sons, 2005.
- [26] Y. Mao, Sh. Xu, F. Yang, A. Z. Elsherbani, "A novel phase synthesis approach for wideband reflectarray design", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 9, pp. 4189-4193, 2015.
- [27] H. Hasani, M. Kamyab, A. Mirkamali, "Low cross-polarization reflectarray antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 5, pp. 1752-1756, 2011.
- [28] M. Moeini-Fard, M. Khalaj-Amirhosseini, "Inhomogeneous perforated reflect-array antennas", *Wireless Engineering Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 80-86, 2011.
- [29] M. Abed-Elhady, W. Hong, Y. Zhang, "A Ka-band reflectarray implemented with a single-layer perforated dielectric substrate", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, 2012.