

آنتن آرایه بازتابی بهره‌بالای ارزان خودپوشا

بابک هنربخش^۱، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - b_honarbaksh@sbu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، آنتنی آرایه‌بازتابی معرفی می‌شود که علاوه بر تأمین بهره بالا، هزینه ساخت آن اندک است. این آنتن نیازی به رادوم ندارد. عایق استفاده شده در این آنتن، FR4 بوده که قیمت آن کم و مقاومت مکانیکی آن زیاد است. پیکربندی آنتن پیشنهادی چنان است که FR4 با فاصله‌ای هوایی از صفحه زمین قرار گرفته و عناصر بازتشنوع کننده بر سطح داخلی آن قرار دارند. برتری آنتن پیشنهادی بر طرح مشابهی که پیش تر معرفی شده، به اثبات رسیده است. برای طرح پیشنهادی، تحلیل حساسیت مشخصه تأخیر فاز، تعداد عناصر و بهره نسبت به ضخامت FR4 انجام شده است. همچنین، تأثیر خطای ساخت عایق و فاصله هوایی بر بهره آنتن بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: آنتن، آرایه‌بازتابی، بهره‌بالا، ارزان، رادوم.

High-Gain Low-Cost Self-Covered Reflectarray Antenna

Babak Honarbaksh, Assistant Professor¹

1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: b_honarbaksh@sbu.ac.ir

Abstract: In this paper, a high-gain low-cost reflectarray antenna is proposed. This antenna does not need radome. The exploited dielectric is the FR4 epoxy which is both low-cost and mechanically robust. Reflector of the proposed antenna consists of a layer of FR4, suspended above the ground plane by spacer, with its re-radiating elements on its interior side. Superiority of the suggested antenna over the similar previously reported design is shown. For the proposed design, sensitivity of the phase-delay characteristic, number of elements and gain to the FR4 thickness is studied. In addition, effect of design tolerance for the dielectric and the air gap on the antenna gain is investigated.

Keywords: Antenna, reflectarray, high-gain, low-cost, radome.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۲۹ و ۱۳۹۷/۰۴/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۰۲

نام نویسنده مسئول: بابک هنربخش

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - ولنجک - دانشگاه شهید بهشتی - دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

آن بر بهره پرداخته شده است. در مقاله یادشده، از دو ماده غیر از FR4 برای این منظور استفاده شده است. به علاوه، برخلاف طرح پیشنهادی، رادوم بخشی مجزا از بازتاب‌کننده است.

از ایجاد فاصله هوایی بین عایق و صفحه زمین در [۷-۱۱] استفاده شده است ولی در تمام این موارد، عناصر فلزی بر سطح خارجی عایق قرار گرفته‌اند. از این رو، روش پیشنهادی، رقیب روش یادشده محسوب و از جنبه‌های مختلف با آن مقایسه شده است. ترفندی که در این مقاله به کاررفته، پیش‌تر برای تحقق آنتن‌های میکرواستریپ بهره‌بالا پیشنهاد شده [۱۳، ۱۴] و اخیراً، کارایی آن در آنتن‌های آرایه‌ای میکرواستریپ به اثبات رسیده است [۱۵]. در این پژوهش، به بررسی کارایی همین ترفند در بهبود عملکرد آنتن‌های آرایه‌بازتابی پرداخته شده است. شایان‌ذکر است که اطلاق "بهره‌بالا" به طرح پیشنهادی، به علت بیش‌تر بودن بهره آن نسبت به وضعیتی است که زیرلایه بازتاب‌کننده خلأ باشد که در این صورت، تلفات حاصل از قطبش عایق و تحریک امواج سطحی صفر است. با توجه به تانژانت تلفات نسبتاً بزرگ FR4، پیش‌بینی چنین بهبودی دور از انتظار است.

ساختار مقاله حاضر بدین شرح است: در بخش دوم، چهار سلول واحد از لحاظ مشخصه تأخیر فاز بررسی می‌شوند که ساختار عایقی آن‌ها عبارت است از لایه‌ای از هوا، لایه‌ای از FR4، لایه‌ای از FR4 روی لایه‌ای از هوا با عناصر فلزی بر سطح داخلی FR4. برای سادگی و بدون ازدست‌دادن عمومیت طرح، عناصر فلزی سلول‌ها، مربعی در نظر گرفته شده‌اند. بخش سوم، به طراحی آنتن تغذیه و تعیین فاصله بهینه آن نسبت به بازتاب‌کننده اختصاص یافته است. در بخش چهارم، بهره بازتاب‌کننده‌های طراحی شده مبتنی بر سلول‌های بخش دوم محاسبه و مقایسه شده است. بخش پنجم به اعتبارسنجی نتایج عددی اختصاص داده شده است. در بخش ششم به تحلیل حساسیت مشخصه تأخیر فاز، تعداد عناصر و بهره نسبت به ضخامت FR4 پرداخته شده است. همچنین، تأثیر خطا در شاخص‌های ساخت‌مندی عایق و فاصله هوایی بر بهره بررسی شده‌اند.

تمام طراحی‌ها حول فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز، که یکی از مشهورترین فرکانس‌های سیستم‌های وایمکس^۵ است، انجام شده است. نتایج گزارش شده با استفاده از نرم‌افزار فکوه^۶ به دست آمده‌اند.

۲- سلول‌های واحد

همانند [۱۵]، از چهار ساختار عایقی برای طراحی سلول واحد بازتاب‌کننده و مقایسه عملکرد آن‌ها استفاده شده است. از این پس، s_i نماینده هریک از این ساختارها و سلول واحد نظیر آن و i شماره متناظرش است. در s_1 و s_2 فقط یک لایه عایق وجود دارد که، به ترتیب، عبارت‌اند از هوا و FR4. محیط عایقی s_3 و s_4 دو لایه است و در هر دوی آن‌ها هوا، لایه اول و FR4 لایه دوم است. در s_3 عناصر فلزی بر سطح خارجی FR4 قرار دارند و FR4 بخشی از زیرلایه است. در s_4 که ساختار پیشنهادی است، عناصر فلزی بر سطح داخلی FR4

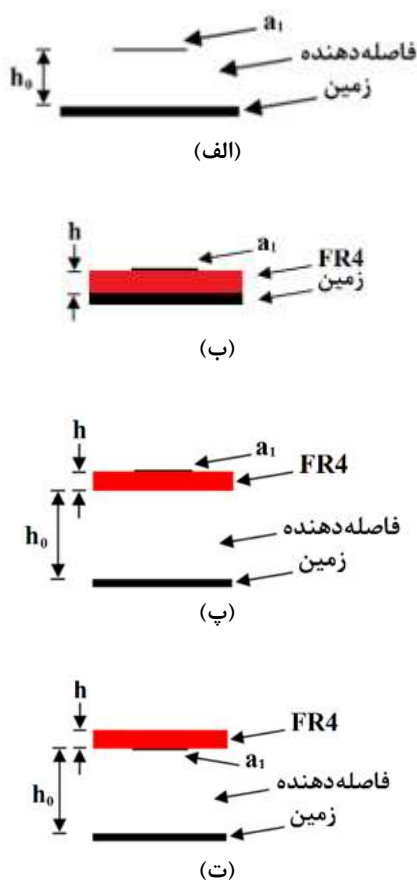
تأمین بهره بالا، سادگی فرآیند ساخت به همراه ساختار تخت و وزن کم، ویژگی‌هایی است که آنتن‌های آرایه‌بازتابی را در برخی کاربردها جایگزین آنتن‌های بشقابی کرده است. شایان‌ذکر است که بهره آنتن‌های آرایه‌بازتابی از انواعی نظیر یاگی-یودا و میکرواستریپ، به مراتب بیشتر است [۱، ۲]. علی‌رغم مزایای یادشده، کاستی‌هایی چون پهنه فرکانسی اندک و قیمت زیاد چنین آنتن‌هایی، مانع از منسوخ شدن آنتن‌های بشقابی شده است [۳]. منشأ قیمت زیاد آنتن‌های آرایه‌بازتابی، گران بودن عایق‌های کم‌تلف است. تاکنون، تلاش‌هایی برای کاهش هزینه تمام‌شده این آنتن‌ها انجام شده است [۴-۱۱]. از جمله راه کارهای پیشنهادشده، به کارگیری عایق ارزان FR4 است. به‌طور مشخص، در [۵]، بازتاب‌کننده از یک لایه FR4 تشکیل شده و در فرکانس ۱۲/۵ گیگاهرتز، بهره ۳۰ دسی‌بل را فراهم کرده است. در [۸]، از ساختاری دولایه برای تحقق بازتاب‌کننده استفاده شده که لایه اول ماده‌ای با گذردهی نسبی ۱/۰۶ و لایه دوم، FR4 است. همچنین، فرکانس طراحی، ۵ گیگاهرتز و بهره حاصل، ۲۲ دسی‌بل گزارش شده است. ساختار عایقی استفاده‌شده در [۹، ۱۰] مشابه [۸] است. فرکانس طراحی و بهره گزارش شده در [۹]، به ترتیب، ۵/۲ گیگاهرتز و ۲۱ دسی‌بل و برای [۱۰]، ۱۰ گیگاهرتز و ۲۴/۴ دسی‌بل است.

ثابت عایقی و تانژانت تلفات FR4 در فرکانس‌های میکروویو، به ترتیب، حدود ۴/۴ و ۰/۰۲ است. در نتیجه، استفاده از این عایق، به دو علت، موجب کاهش بهره می‌شود. اولاً، ثابت عایقی نسبتاً بزرگ آن باعث تحریک امواج سطحی می‌شود که حبس شدن سهمی از انرژی الکترومغناطیسی و عدم تشعشع آن را در پی دارد. ثانیاً، تلفات نسبتاً زیاد آن موجب تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به گرمایی شده که علاوه بر کاهش بهره، منجر به افزایش دمای نویز آنتن می‌شود [۱۲].

شایان‌ذکر است که هر دوی آنتن‌های بشقابی و آرایه‌بازتابی برای استفاده در فضای آزاد، به پوششی موسوم به رادوم^۱ نیازمندند تا سطح آن‌ها را در برابر عوامل مخرب محیطی محافظت کند. از آنجا که رادوم می‌بایست از لحاظ الکترومغناطیسی شفاف باشد، قیمت انواع مرغوب آن گران است.

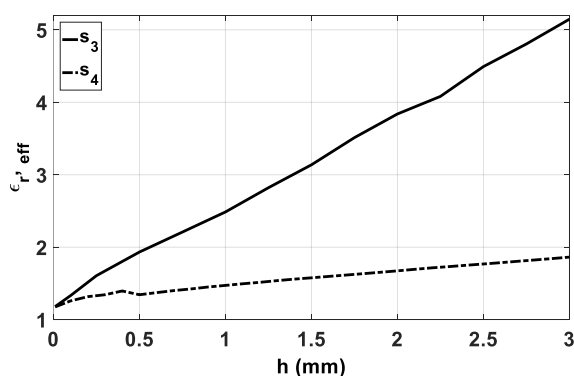
در این مقاله، آنتنی آرایه‌بازتابی پیشنهاد می‌شود که اولاً بهره آن بالا است، ثانیاً ارزان بوده و ثالثاً، به رادوم نیاز ندارد؛ از این رو، خودپوشا^۲ خوانده می‌شود. برای کاهش هزینه، مانند [۵، ۱۰-۸]، از عایق FR4 استفاده شده است. برای افزایش بهره، اولاً، عایق با فاصله هوایی از صفحه زمین قرار گرفته و ثانیاً، عناصر بازتشعشع‌کننده^۳ فلزی (که از این پس، برای اختصار از آن‌ها با عنوان عناصر فلزی یاد می‌شود) بر سطح داخلی آن قرار داده شده‌اند که نوآوری اصلی مقاله به‌شمار می‌آید. چنین طرحی تاکنون گزارش نشده است. در نتیجه، عایق مقاوم FR4 با حایل شدن بین عناصر فلزی و فضای آزاد، همچون رادوم عمل کرده و از آسیب‌دیدگی آن‌ها در برابر عوامل مخرب محیطی جلوگیری می‌کند. در [۵] به مسئله تأمین رادوم برای آنتن‌های آرایه‌بازتابی و بررسی تأثیر

متوسط عناصر مذکور در s_2 از بقیه کمتر است که علت آن، بزرگی نسبی ثابت عایقی مؤثر آن نسبت به دیگر حالت‌ها است. پس از تعیین موقعیت آنتن تغذیه و جهت بازتاب، اختلاف فازی که هر یک از سلول‌های بازتاب‌کننده می‌بایست تأمین کنند تعیین می‌شود. سپس، با استفاده از مشخصه تأخیر فاز، طول ضلع هر سلول تعیین می‌گردد [۳]. در این مقاله، موقعیت آنتن تغذیه و جهت بازتاب، عمود بر بازتاب‌کننده و در امتداد مرکز آن است. روند تعیین موقعیت تغذیه در بخش ۳ بیان شده است.



شکل ۱: نمای جانبی سلول‌های واحد با بازتشنعش‌کننده مربعی به

ضلع a_1 : (الف) s_1 (ب) s_2 (پ) s_3 (ت) s_4

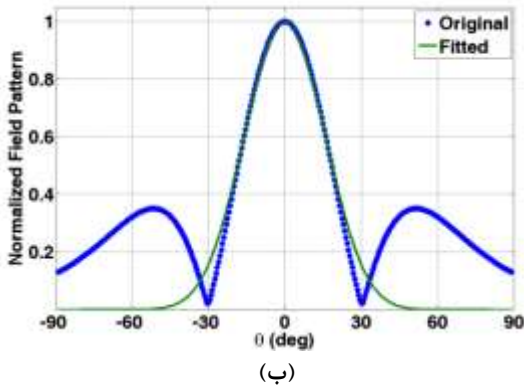
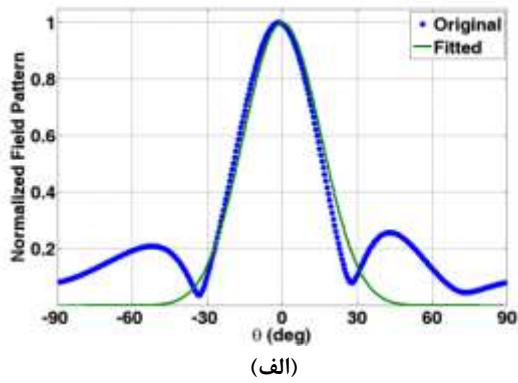


شکل ۲: تغییرات $\epsilon_{r, eff}$ بر حسب ضخامت FR4 برای s_3 و s_4

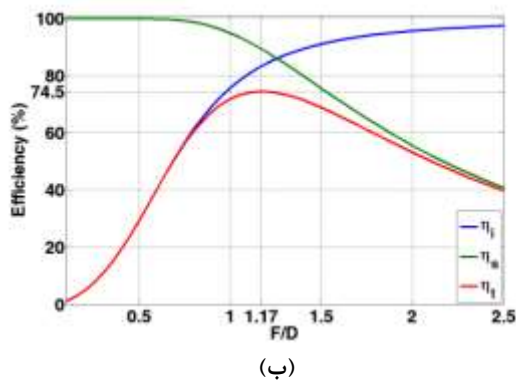
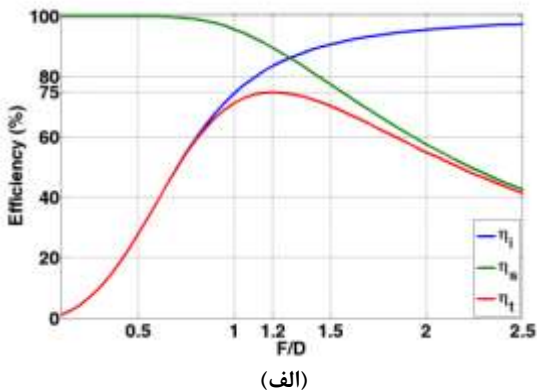
قرار دارند و FR4 بخشی از رولایه^۲ است. ساختار اول، ساختاری ایده‌آل است که در آن هر دوی تلفات ناشی از قطبش و تحریک امواج سطحی صفر است. چنین ساختاری، در قالب آنتن مایکرواستریپ تک‌لایه، بیشترین بهره ممکن را تأمین می‌کند و با توجه به این پیش‌زمینه فکری، تأمین‌کننده کران بالای بهره آنتن آرایه‌بازتابی مایکرواستریپ به نظر می‌رسد. ساختار دوم، ساده‌ترین نحوه استفاده از FR4 در آنتن‌های آرایه‌بازتابی است و ملاکی است برای توجیه استفاده از فاصله‌دهنده. ساختار سوم، ساده‌ترین تغییری است که در آن فقط از FR4 استفاده شده که البته، پیش‌تر در آنتن‌های آرایه‌بازتابی به کار گرفته شده است. در نهایت، ساختار چهارم ساده‌ترین تغییری است که می‌توان به ساختار سوم اعمال کرد و موجه بودن آن برای آنتن‌های مایکرواستریپ به اثبات رسیده است. سلول‌های واحد متناظر با ساختارهای یاد شده در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. برای ایجاد فاصله‌دهنده‌ای می‌توان از انواع فاصله‌دهنده^۸ استفاده کرد. ثابت عایقی و تنازات تلفات FR4، به ترتیب، $4/4$ و 0.02 فرض شده است. ضخامت لایه‌های هوا و FR4، به ترتیب، با h_0 و h نمایش داده می‌شوند. در طول مقاله همواره h_0 برابر یک میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شاخص‌های طول موج فضای آزاد، طول موج هدایتی و گذردهی الکتریکی مؤثر نسبی، به ترتیب با λ_0 ، λ_g و $\epsilon_{r, eff}$ نشان داده می‌شوند که $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{r, eff}}$

روش معمول برای تعیین مشخصه تأخیر فاز، قرار دادن سلول در ساختاری با تناوب دوبردی است [۳]. ضلع سلول واحد، P ، طبق پیشنهاد [۳]، نود و پنج درصد طول موج هدایتی فرض شده است. مقدار P می‌تواند کوچک‌تر نیز انتخاب شود. مقدار یادشده، امکان تغییر ضلع سلول واحد را در محدوده‌ای وسیع، بدون ایجاد همپوشانی میان عناصر فلزی، فراهم می‌کند. مقدار و چگونگی محاسبه $\epsilon_{r, eff}$ در [۱۵] آمده که در این جا، برای اختصار تغییرات آن نسبت به ضخامت FR4 در شکل ۲ نشان داده شده است. شایان‌ذکر است که این تغییرات برای s_3 به مراتب شدیدتر از s_4 است. در نتیجه، فقط با تغییر موقعیت عناصر فلزی از سطح خارجی به داخلی FR4، می‌توان به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای از تحریک امواج سطحی و به تبع آن، از کاهش بهره آنتن کاست.

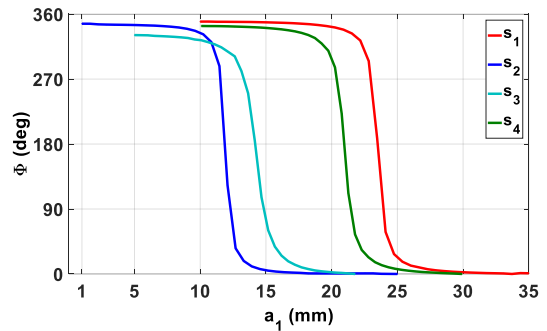
مشخصه تأخیر فاز سلول‌های واحد در فرکانس $5/8$ گیگاهرتز در شکل ۳ نشان داده شده که در آن ضخامت FR4 برابر $1/6$ میلی‌متر فرض شده است. برای تولید هر یک از مشخصه‌های فاز، سلول متناظر با موجی صفحه‌ای با فاز صفر درجه تحریک شده و فاز موج پراکنده شده به‌ازای محدوده‌ای از طول ضلع سلول محاسبه شده است. سپس، برای منطبق‌شدن مرجع فاز هر چهار مشخصه، ابتدا مقادیر فاز واپیچیده^۹ شده است و سپس در راستای محور عمودی، انتقال یافته تا مقدار حداقل همگی صفر درجه شود. این نتایج با آنچه در [۱۵] آمده در توافق است؛ اولاً، مشخصه s_1 و s_4 به هم نزدیک است که FR4 را در پیکربندی پیشنهادی، محیطی مناسب برای تحقق عناصر فلزی معرفی می‌کند. دلیل مطلوب‌بودن s_1 عدم تحریک امواج سطحی در آن است که در نهایت، افزایش بهره آنتن را در پی خواهد داشت [۱۶]. ثانیاً، ابعاد



شکل ۵: الگوی تشعشعی راه دور آنتن تغذیه و برازش شده آن با تابع $\cos^n \theta$ در صفحه: (الف) میدان الکتریکی (قوای n برابر ۱۳/۷)، (ب) میدان مغناطیسی (قوای n برابر ۱۲/۹).



شکل ۶: منحنی‌های بازدهی برای آنتن تغذیه در صفحه: (الف) میدان الکتریکی، (ب) میدان مغناطیسی.



شکل ۳: مشخصه تأخیر فاز سلول‌های واحد برای حالت‌های چهارگانه.

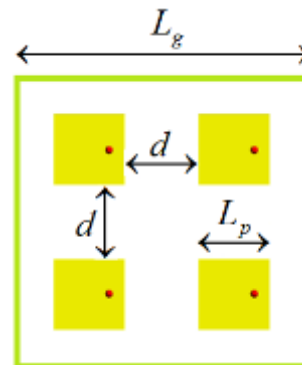
۳- آنتن تغذیه

آنتنی که برای تغذیه بازتاب‌کننده استفاده شده، آنتنی است مایکرواستریپ، با زیرلایه هوا و زمین محدود. دلیل چنین انتخابی، کاهش زمان تحلیل تمام‌موج مجموعه آنتن، شامل تغذیه و بازتاب‌کننده است. با توجه به این که هدف این مقاله، اثبات کارایی سلول واحد پیشنهادی، خصوصاً بر مبنای مقایسه بهره آن با دیگر حالت‌هاست، این انتخاب از اعتبار نتایج نمی‌کاهد. شمای آنتن مذکور در شکل ۴ نمایش داده شده که تشکیل شده است از آرایه‌ای از چهار تشعشع‌کننده مربعی با تغذیه مستقل و هم‌فاز که در فاصله یک میلی‌متری از صفحه زمین قرار گرفته‌اند.

مطابق با [۳]، برای تعیین فاصله بهینه آنتن تغذیه از بازتاب‌کننده، الگوی تشعشعی راه دور آن بر تابع $\cos^n \theta$ برازش شده است (شکل ۵). بازدهی‌های روشنی η_t ، سرریز η_s و کلی η_i که، به ترتیب، با η_s ، η_i و η_t نشان داده می‌شوند، بر اساس روابط زیر محاسبه و در شکل ۶ گزارش شده‌اند [۳]:

$$\begin{cases} \eta_i = \frac{[(1 - \cos^{n+1} \theta_e)/(n+1) + (1 - \cos^n \theta_e)/n]^2}{2 \tan^2 \theta_e [(1 - \cos^{2n+1} \theta_e)/(n+1)]} \\ \eta_s = 1 - \cos^{2n+1} \theta_e \\ \eta_t = \eta_i \eta_s \\ \theta_e = \tan^{-1}(D/2F) \end{cases} \quad (1)$$

که در آن D و F به ترتیب، عبارت‌اند از قطر مؤثر و فاصله کانونی بازتاب‌کننده. در نتیجه، مقدار بهینه F/D ، مقدار ۱/۲ است.



شکل ۴: دید از بالای آنتن تغذیه: L_g برابر ۷/۶ میلی‌متر، L_p و d برابر ۲/۶ میلی‌متر، نقاط قرمز رنگ: موقعیت تحریک با کابل هم‌محور.

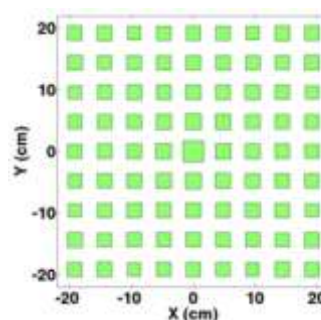
MRA_4 و MRA_3 خوانده می شوند. طرح بندی بازتاب کننده های یاد شده در شکل ۷ نمایش داده شده است. بازتاب کننده ها با آنتن طراحی شده در بخش سوم، در پیکربندی تغذیه میانی^{۱۳} از فاصله عمودی پنجاه سانتیمتری، تحریک و الگوی بهره آن ها در شکل ۸ گزارش شده است.

باتوجه به شکل ۸، بهره MRA_1 ، MRA_2 ، MRA_3 و MRA_4 ، به ترتیب، برابر است با $۲۴/۱$ ، ۲۰ ، $۲۴/۱$ و $۲۵/۱$ دسی بل. همچنین، سطح گل برگ کناری آنتن های یاد شده، به ترتیب، برابر است با $۱۱/۵$ ، $۱۱/۵$ ، $۸/۵$ و $۹/۳$ دسی بل. در نتیجه، اولاً، بیشترین بهره برابر با $۲۵/۱$ دسی بل بوده و به MRA_4 تعلق دارد. جالب توجه است که در $[۱۵]$ ، بهره حاصل از S_1 از بقیه حالت ها بیشتر است. ثانیاً، عملکرد MRA_3 و MRA_4 از لحاظ بهره و سطح گل برگ کناری^{۱۴} به هم نزدیک و از MRA_1 بهتر است. ثالثاً، عملکرد MRA_2 از بقیه حالت ها از جنبه های یاد شده بدتر است. شایان ذکر است که افت بهره در MRA_2 نسبت به دیگر حالت ها به مراتب کمتر از وضعیت متناظر آن در $[۱۵]$ است که علت آن، نبودن شبکه تغذیه در این آنتن ها در مقایسه با آنتن های مایکرواستریپ آرایه ای است. رابعاً، با افزایش مقدار ثابت عایقی مؤثر، بر تعداد عناصر افزوده می شود به طوری که MRA_1 و MRA_2 ، به ترتیب، دارای کمترین و بیشترین تعداد عنصر هستند.

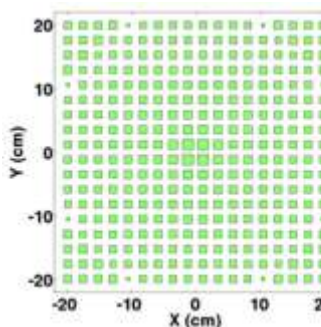
نتیجه اول نشان دهنده آن است که کران بالای بهره در آنتن های آرایه بازتابی را ثابت عایقی واحد تعیین نمی کند؛ رولایه غلیظ، حتی تلفاتی، عملکردی عدسی گونه داشته و می تواند بر بهره آنتن هایی از این دست بیفزاید. بر اساس دو نتیجه دیگر، S_3 و به خصوص S_4 ، گزینه های مناسبی برای تحقق آنتن های آرایه بازتابی ارزان هستند. همان طور که پیش تر ذکر شد، سابقاً از S_3 برای این منظور استفاده شده است. بررسی حاضر، برتری S_4 را از دو جنبه نسبت به S_3 نشان می دهد؛ اولاً، بهره حاصل از آن بیشتر است، ثانیاً، به علت قراردادن عناصر فلزی در سطح داخلی FR_4 ، بازتاب کننده نظیر آن نیازی به رادوم ندارد و به تعبیری، خود پوشا است.

در جدول ۱، شاخص های MRA_4 و برخی از طراحی های مشابه $[۵]$ ، $[۸-۱۰]$ گزارش شده است. منابع دیگر، از عایقی غیر از FR_4 استفاده کرده اند. آخرین شاخص این جدول، ملاکی است از مقدار متوسط بهره ای که بازتاب کننده در واحد سطح تأمین می کند. باتوجه به اختلاف موجود در فرکانس های طراحی، مقایسه منصفانه ایجاب می کند که طول ضلع بازتاب کننده نسبت به طول موج کاری بهنجار شود. شایان ذکر است که برای محاسبه شاخص یاد شده، ابتدا بهره به مقیاس خطی تبدیل شده و پس از محاسبه مقدار متوسط آن، برحسب دسی بل گزارش شده است.

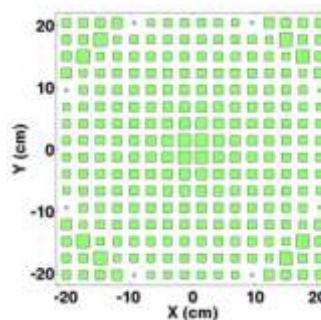
نتایج جدول در توافق با نتایج مقاله حاضر است. به خصوص، طراحی گزارش شده در $[۵]$ ، که در آن از یک لایه FR_4 استفاده شده است، نسبت به بقیه موارد، که همگی از فاصله هوایی میان عایق و صفحه زمین بهره جسته اند، دارای بهره متوسط کم تر و تعداد عناصر به مراتب بیشتر است.



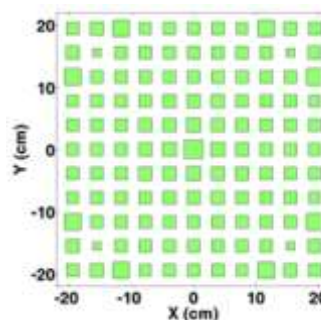
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۷: طرح بندی بازتاب کننده ها برای:

(الف) MRA_1 ، (ب) MRA_2 ، (پ) MRA_3 ، (ت) MRA_4 .

۴- مقایسه کارایی

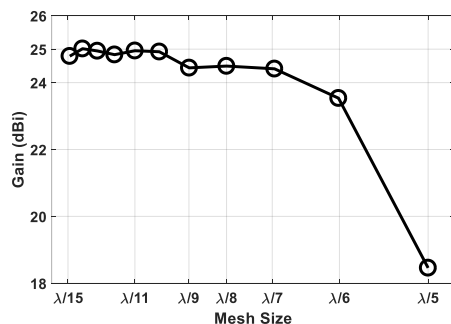
بر اساس سلول های واحد معرفی شده در بخش دوم، چهار بازتاب کننده تخت مربعی طراحی شده اند که ضلع همگی آن ها، L ، برابر ۴۰ سانتی متر و تعداد عناصر آن ها، N ، برای حالت های چهارگانه سلول واحد، به ترتیب، برابرند با ۹×۹ ، ۱۸×۱۸ ، ۱۶×۱۶ و ۱۱×۱۱ . از این پس، آنتن های متناظر با این منعکس کننده ها، به ترتیب، MRA_2 ، MRA_1 ،

جدول ۱: شاخص‌های طراحی‌های مشابه با طرح پیشنهادی

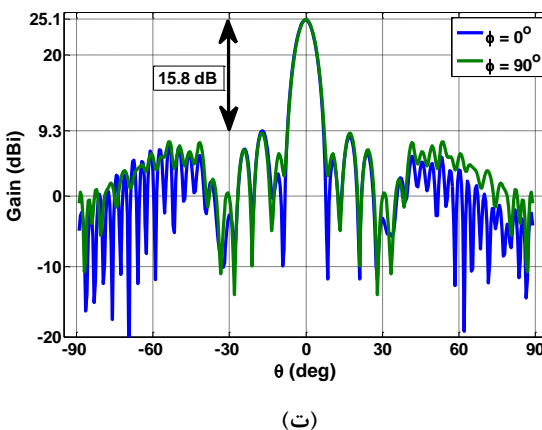
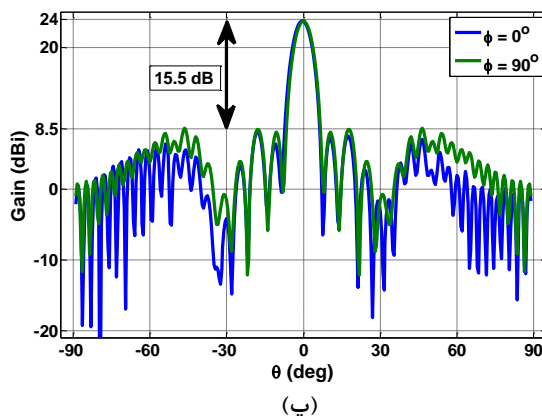
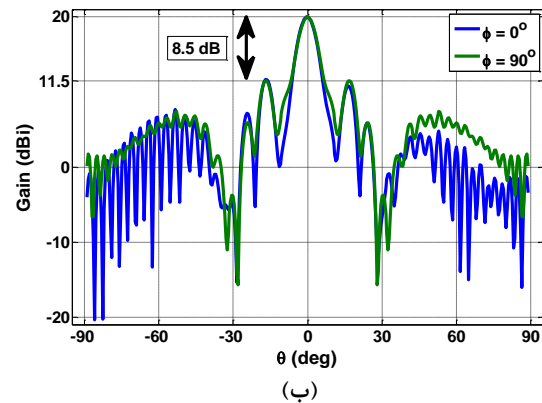
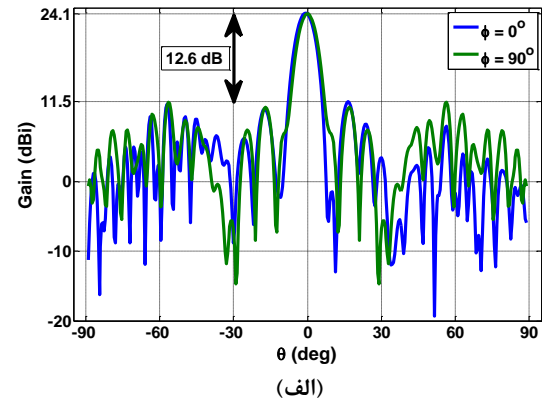
مرجع	[۵]	[۸]	[۹]	[۱۰]	این مقاله
f (GHz)	۱۲/۵	۵	۵/۲	۱۰	۵/۸
h_0 (mm)	۰	۱۸	۱۸	۳	۱
h (mm)	۱/۵۲۴	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶
ϵ_r	۴/۴۵	۴/۴	۴/۴	۴/۴	۴/۴
$tg \delta$	۰/۰۱۶	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
F/L	۱/۱	۰/۵	۰/۵	۱/۰	۱/۲
N	۹۸۰۱	۲۵۶	۲۵۶	۵۷۶	۱۲۱
L (mm)	۳۹۶	۳۲۰	۳۲۰	۱۹۲	۴۰۰
G (dBi)	۳۰	۲۲	۲۱	۲۴/۴	۲۵/۱
$G/(L/\lambda)^2$ (dBi)	۵/۶	۷/۵	۶/۱	۸/۷۵	۷/۳۷

۵- اعتبارسنجی

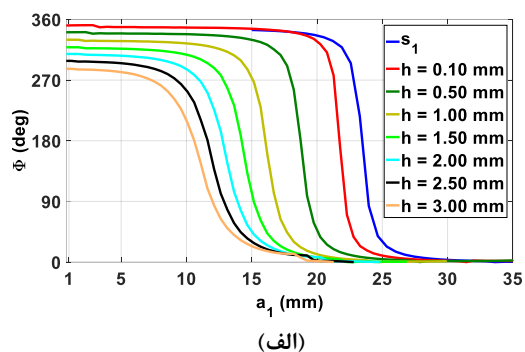
در این بخش به اعتبارسنجی نتایج گزارش شده پرداخته می‌شود. این نتایج با استفاده از نرم‌افزار فکو و برپایه روش ممان^{۱۵} به دست آمده‌اند که روشی است تمام‌موج و مبتنی بر مش‌بندی [۱۶]. بر اساس [۱۸]، با دو ملاک می‌توان بر نتیجه حاصل از چنین روش‌هایی صحت گذاشت؛ اول، تحلیل هم‌گرایی و دوم، توافق پاسخ هم‌گرا شده با پیش‌بینی‌های نظری. در شکل ۹، تغییرات بهره MRA_4 برحسب اندازه مش گزارش شده است که طبق آن، پاسخ برای مش‌های کوچک‌تر از یک‌دهم طول موج هم‌گراست. شایان‌ذکر است که در تنظیمات نرم‌افزار، اندازه مش در تمام شبیه‌سازی‌ها، بجز آن‌چه در شکل ۹ گزارش شده است، برابر یک‌دهم طول موج فضای آزاد است. همچنین، با توجه به این‌که طول ضلع بازتاب‌کننده تقریباً ۸ برابر طول موج فضای آزاد است، بین‌هایت فرض کردن گسترش عرضی زیرلایه تقریبی مجاز است. در نتیجه، در تنظیمات نرم‌افزار از زیرلایه چندلایه مسطح برای توصیف محیط عایقی منعکس‌کننده استفاده شده است. با توجه به شکل ۶، مقدار بهینه F ، طبق محاسبات تحلیلی، حدود پنجاه سانتیمتر است. در شکل ۱۰، تغییرات بهره آنتن یادشده نسبت به محل آنتن تغذیه رسم شده است که در توافق آشکار با پیش‌بینی نظری است. به‌طور مشخص، شکل (۶) از (۱) حاصل شده که نتیجه محاسبات تحلیلی است. از سوی دیگر، شکل (۱۰) از تحلیل عددی به دست آمده‌است. طبق شکل (۶)، مقدار بهینه F/D که منجر به حداکثر بهره می‌شود، برابر ۱/۲ است. طبق نتایج عددی شکل (۱۰) نیز، بهره حداکثر به‌ازای فاصله کانونی پنجاه و پنج سانتیمتر حاصل می‌شود که متناظر با F/D برابر ۱/۲۵ است.



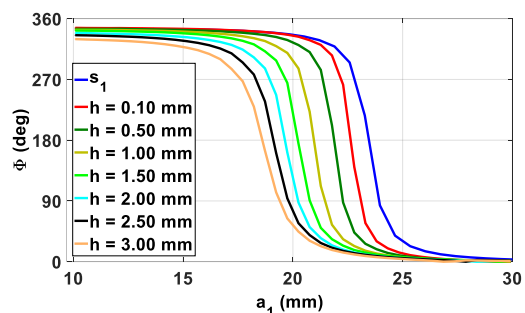
شکل ۹: تغییرات بهره MRA_4 نسبت به اندازه مش.



شکل ۱۰: الگوی بهره آنتن‌های آرایه‌بازتابی: (الف) MRA_1 ، (ب) MRA_2 ، (پ) MRA_3 ، (ت) MRA_4 .



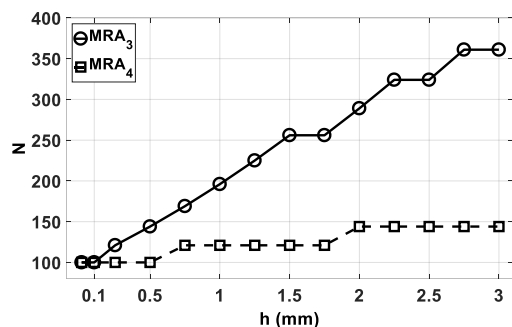
(الف)



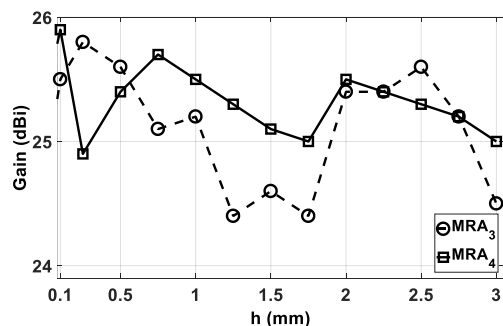
(ب)

شکل ۱۱: تغییرات مشخصه تأخیر فاز نسبت به ضخامت FR4 برای:

۳ (الف) و ۴ (ب) S4

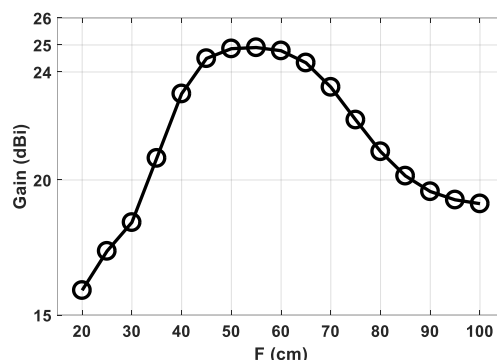


شکل ۱۲: تغییرات تعداد عناصر نسبت به ضخامت FR4.



شکل ۱۳: تغییرات بهره نسبت به ضخامت FR4.

پس از اثبات برتری MRA4 بر MRA3 در ادامه به تأثیر خطای ساخت بر بهره MRA4 پرداخته می‌شود. باتوجه به این که شاخص‌های ساخت مندی FR4 دقیقاً معلوم نیست، حساسیت بهره MRA4 نسبت به گذردهی نسبی و تازنانت تلفات FR4 بررسی و در شکل ۱۴ گزارش شده است. در نتیجه، اگر هر یک از مقادیر فرض شده برای عایق تا ده درصد



شکل ۱۰: تغییرات بهره MRA4 نسبت به محل آنتن تغذیه.

۶- تحلیل حساسیت

در این بخش، از جنبه‌های مختلف به تحلیل حساسیت MRA4 پرداخته می‌شود. تأثیر h بر مشخصه تأخیر فاز برای S_3 و S_4 در شکل ۱۱ گزارش شده که در آن، پاسخ فاز S_1 برای مقایسه گنجانده شده است. روند محاسبه این مشخصه‌ها در بخش ۲ بیان شده است. باتوجه به این شکل، کاهش گستره فاز با افزایش h در S_4 نسبت به S_3 کم‌تر است که برتری S_4 را، به‌خصوص در تحقق بازتاب‌کننده‌های بزرگ، نشان می‌دهد [۳]. در نتیجه، می‌توان بدون نگرانی از تخریب پاسخ فاز، بر ضخامت عایق در MRA4 افزود تا توأمأ رادوم مقاومی برای آن تأمین شود. این قابلیت، دغدغه تغییر حالت عایق در اثر تابش توان‌های زیاد را از بین می‌برد. البته در این صورت، می‌بایست بر ضخامت عناصر فلزی نیز افزوده شود. حائز اهمیت است که، حداقل برای بازتاب‌کننده‌های بزرگ میکرواستریپ با تعداد عناصر زیاد، توان فرودی بر هر سلول کم‌تر از میزانی است که بتواند عملکرد آن را مختل کند [۳]. این ویژگی، یکی دیگر از مزایای آنتن‌های آرایه‌بازتابی میکرواستریپ بر آنتن‌های آرایه‌ای میکرواستریپ است که در آن‌ها تحریک در اتصال الکتریکی مستقیم با ساختار تشعشع‌کننده است.

شکل ۱۲، نشان‌دهنده تأثیر h بر تعداد عناصر با فرض آرایش مربعی منظم است که از آن می‌توان نتیجه گرفت اولاً، با افزایش h ، به‌طور یکنوا N افزوده می‌شود. ثانیاً، رشد N با افزایش ضخامت FR4 در MRA3 نسبت به MRA4، به‌مراتب، سریع‌تر است. هر دوی این نتایج باتوجه به شکل ۲ قابل توجیه‌اند. شایان‌ذکر است که افزایش N در مساحت ثابت، هم‌ارز کاهش ابعاد آن‌ها و به‌تبع آن، افزایش حساسیت ساخت است. اثر h بر بهره آنتن در شکل ۱۳ گزارش شده است که باتوجه به آن، اولاً، با افزایش h ، به‌طور کلی، از بهره کاسته می‌شود. این نتیجه قابل پیش‌بینی است زیرا با افزایش ضخامت FR4، هم بر تلف حرارتی افزوده می‌شود و هم بر میزان تحریک امواج سطحی. ثانیاً، بهره MRA4، به‌طور متوسط، از بهره MRA3 بیش‌تر است. در نتیجه، MRA4 نسبت به MRA3 ارجح است. به‌خصوص، طرح‌بندی MRA4 چنان است که برخلاف MRA3، نیازی به رادوم ندارد. ویژگی‌های یادشده، S_4 را گزینه مناسبی برای تحقق آنتن‌های آرایه‌بازتابی بهره‌بالای ارزان معرفی می‌کند.

[18] J. C. Rautio, "The microwave point of view on software validation," *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol. 38, no. 2, pp. 68-71, 1996

[17] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, New York: Macmillan, 1968.

زیر نویس ها

⁹ unwrap
¹⁰ illumination
¹¹ spillover
¹² total
¹³ center-fed
¹⁴ sidelobe level
¹⁵ method of moments

¹ radome
² self-covered
³ re-radiating
⁴ constitutive parameters
⁵ WiMAX
⁶ FEKO
⁷ superstrate
⁸ spacer