

طراحی و شبیه‌سازی شبکه تغذیه آرایه آنتنی باند Ku با استفاده از فناوری نوین موجبر فاصله هوایی

عباس کریمی نوبندگانی^۱، سید اسماعیل حسینی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه شیراز

(دریافت: ۹۷/۱۱/۰۹؛ پذیرش: ۹۸/۰۲/۱۷)

چکیده

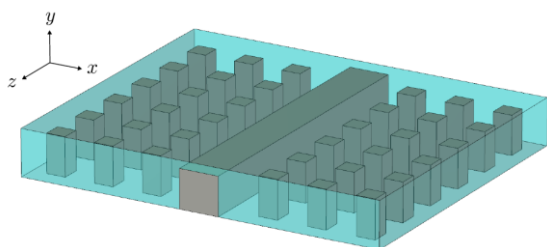
آنتن‌های آرایه‌ای کاربردهای بسیار زیادی در سامانه‌های تجاری و نظامی دارند. از جمله در رادار، سامانه‌های مراقبتی، جنگ الکترونیک، جهت‌یاب‌ها و ... کاربرد دارند. شبکه تغذیه آنتن‌های آرایه‌ای یکی از قسمت‌های مهم آرایه‌ها است. در این مقاله یک شبکه تغذیه ۱:۸ با استفاده از فناوری جدید موجبر فاصله هوایی (RGW) در باند Ku طراحی و شبیه‌سازی شده است که قابل تعمیم به شبکه تغذیه 1:N دلخواه است. فناوری RGW دارای مزایای زیادی از جمله تلفات کم، پهنای باند زیاد، حساسیت کم به خطای ساخت، قابل استفاده در فرکانس‌های بالا مانند موج میلی‌متری، قابلیت اتصال آسان به ادوات فعال و ... است. شبکه تغذیه شبیه‌سازی شده دارای افت بازگشتی بهتر از ۱۵ dB- در پهنای باند فرکانسی ۱۵-۱۸ GHz است. همچنین تلف عبوری از دهانه ورودی به هرکدام از دهانه‌های خروجی حدود ۹ dB- است که مورد انتظار بود. همچنین تغییر اختلاف‌فاز از دهانه ورودی به هرکدام از دهانه‌های خروجی کم‌تر از یک درجه است.

واژگان کلیدی

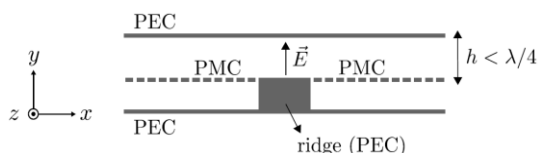
رادار موجبر فاصله هوایی (RGW)، شبکه تغذیه آنتن آرایه‌ای، باند Ku، افت بازگشتی، تلف عبوری

۱- مقدمه

صفحه PEC و یک صفحه PMC اگر با فاصله کمتر از یک‌چهارم طول موج روبه‌روی هم قرار گیرند موج نمی‌تواند عبور کند (شکل ۳) [۱] و [۳]. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود در موجبر RGW نیز از همین ویژگی استفاده شده است. قسمت متناوب موجبر در حکم یک صفحه با امپدانس بالا یا یک PMC عمل می‌کند و تیغه وسط نیز یک PEC است در نتیجه، موج بر روی تیغه مرکزی محبوس می‌ماند و حرکت می‌کند. مد غالب در این موجبر مود شبه TEM (یا Q-TEM) است.



شکل (۱): نمای کلی ساختار موجبر RGW [۳]



شکل (۲): نمای از روبه‌روی موجبر RGW [۳]

موجبر فاصله هوایی (RGW) موجبر جدیدی است که به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن مورد توجه قرار گرفته است. این ساختار در سال ۲۰۰۹ معرفی شد [۱] و اساس آن بر مبنای تعریف صفحه سخت و نرم که در سال ۱۹۸۸ معرفی گردید، است [۲]. یک صفحه در یک راستا سخت (نرم) نامیده می‌شود اگر بتواند موج را در آن راستا انتشار ندهد (بدهد). نمای کلی ساختار موجبر RGW در شکل (۱) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود کل موجبر از جنس PEC و از چند بخش کلی ساخته شده است: ۱- ساختاری متناوب، ۲- تیغه‌ای که در وسط قرار گرفته است، ۳- یک صفحه PEC در پایین و چسبیده به ساختار متناوب و ۴- یک صفحه PEC که در بالا و به فاصله کمتر از ربع طول موج از آن‌ها قرار گرفته است.

نمای از روبه‌روی ساختار شکل (۱) در شکل (۲) نشان داده شده است. می‌توان نشان داد بین دو صفحه PEC که روبه‌روی هم قرار گرفته‌اند موج می‌تواند منتشر شود در حالی که بین یک

* نویسنده مسئول: se.hosseini.r@gmail.com

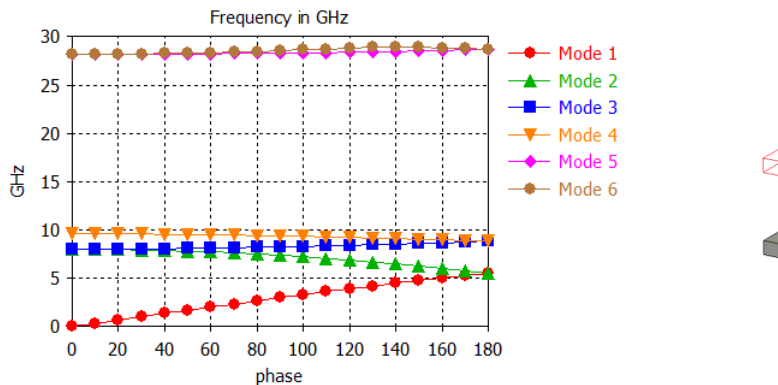
با نرم افزار CST برای کار به صورت تک مود و نیز رسیدن به بهترین ضریب انتقال و افت بازگشتی در پهنای باند مورد نظر، به دست آمده است. با استفاده از ابعاد جدول (۱) در شکل (۴- الف) یک سلول واحد RGW طراحی شده است که به صورت متناوب در دو راستای x و z تعریف شده اند.

جدول (۱): ابعاد RGW شبیه سازی شده

پهنای ridge	۵/۳ mm
ارتفاع فاصله هوایی	۰/۴ mm
دوره تکرار ساختار متناوب	۶/۵ mm
ارتفاع ridge	۴/۴ mm
طول و عرض ساختار متناوب	۳ mm
فاصله ساختار متناوب از ridge	۴/۲ mm

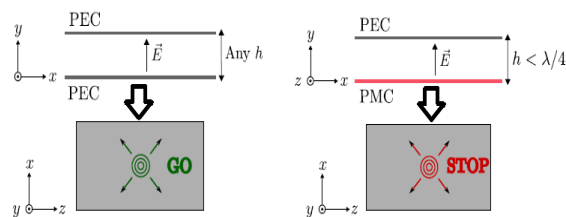
همان طور که در نمودار پاشندگی آن در شکل (۴- ب) مشاهده می شود در بازه فرکانسی ۹-۲۸ GHz ساختار دارای هیچ مد انتشاری نیست یعنی همان طور که مورد انتظار ما بود در این بازه فرکانسی ساختار متناوب همانند یک PMC عمل می کند و با وجود صفحه PEC در بالای آن هیچ مودی در این بازه فرکانسی انتشار نمی یابد.

در ادامه در شکل (۵- الف) مشاهده می شود که ساختار در حضور Ridge و در راستای z محدود و در راستای x متناوب تعریف شده است. نمودار مدهای انتشاری موجبر شکل (۵- الف)، در شکل (۵- ب) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در بازه فرکانسی ۹-۲۲ GHz یک تک مود انتشاری وجود دارد که بسیار نزدیک به مود انتشاری TEM است و به همین دلیل می توان به آن شبه TEM (یا Q-TEM) گفت و در بقیه بازه فرکانسی مدهای دیگر موجبر صفحه موازی انتشار می یابند و موجبر از حالت مطلوب فاصله می گیرد.



(ب)

شکل (۴): الف) سلول واحد موجبر RGW، ب) منحنی پاشندگی آن



شکل (۳): تحریک موجبر در حالت PEC مقابل PEC و حالت PEC مقابل PMC [۳]

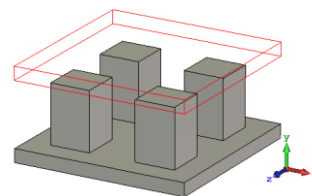
موجبر RGW در مقایسه با خطوط انتقال دیگر دارای مزایایی زیادی از جمله تلفات کم، پهنای باند زیاد، قابل استفاده در فرکانس های میلی متری، قابلیت اتصال آسان به ادوات فعال، حساسیت کم به تلورانس ساخت و ... است [۴]. تاکنون از این فناوری در کاربردهای زیادی مانند کوپلر [۵]، اتصال T-شکل [۶]، فیلتر [۷] و ... استفاده شده است. در اینجا با استفاده از فناوری RGW شبکه تغذیه ای برای آنتن آرایه ای در باند Ku (در محدوده فرکانس ۱۸-۱۵ GHz) طراحی و شبیه سازی می شود.

۲- بررسی رفتار RGW

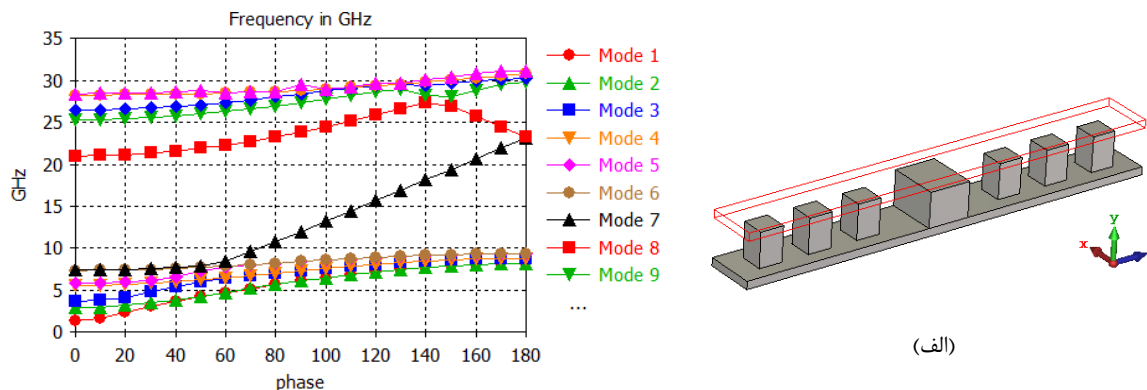
در این قسمت ابتدا به بررسی سلول واحد یک RGW خواهیم پرداخت و در ادامه آن به تحلیل یک موجبر RGW ساده می پردازیم.

۱-۲- بررسی سلول واحد RGW در حضور و عدم حضور Ridge

سلول مورد استفاده برای ساختار متناوب، ساختار متداول با سطح مقطع مربعی است که در شکل (۱) نشان داده شده است. ابعاد ساختار در جدول (۱) آورده شده است. قابل ذکر است که این ابعاد با استفاده از مطالب مطرح شده در [۱] و نیز بهینه سازی



(الف)

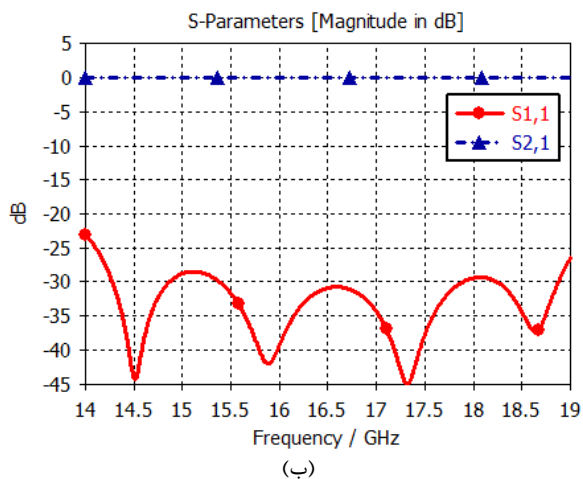


(ب)

شکل (۵): الف) سلول واحد موجبر RGW در حضور Ridge، ب) منحنی پاشندگی آن

ساختار متناوب به‌جای شکل مکعب می‌توان از ساختاری متناوب به شکل استوانه استفاده کرد و نتایج قابل قبولی داشت.

موجبر شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار CST با ابعاد جدول (۱) در شکل (۶-الف) نشان داده شده است. نتایج افت بازگشتی $(|S_{11}|)$ و تلف عبوری $(|S_{21}|)$ موجبر RGW شبیه‌سازی‌شده، در شکل (۶-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این ساختار دارای افت بازگشتی بهتر از -25 dB و تلف عبوری بهتر از -0.5 dB در پهنای باند موردنظر (۱۵-۱۸ GHz) است.



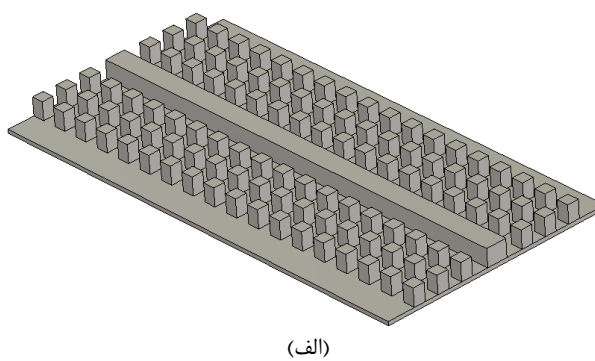
(ب)

شکل (۶): الف) ساختار موجبر RGW، ب) افت بازگشتی $(|S_{11}|)$ و تلف عبوری $(|S_{21}|)$ شبیه‌سازی‌شده موجبر RGW

ردیف‌های سوم و ردیف‌های بیشتر تأثیر زیادی در عملکرد موجبر نخواهد داشت. این نکته قابل تعمیم به تمام بازه فرکانسی بین ۹-۲۲ GHz است. اما همان‌طور که قبل‌تر ذکر شد در خارج از این بازه فرکانسی مودهای موجبر صفحه موازی در تمام موجبر انتشار می‌یابند و این موجبر عملکرد مطلوبی را از خود نشان نمی‌دهند. حرکت موج در موجبر در فرکانس ۳۰ GHz

۲-۲- تحلیل یک RGW ساده

در این مرحله یک موجبر ساده با استفاده از RGW طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. ابعاد این موجبر نیز همان ابعاد جدول (۱) است. در یک موجبر RGW مهم‌ترین ابعاد مربوط به ارتفاع فاصله هوایی و همچنین پهنای Ridge است. به‌دلیل این‌که این دو پارامتر بر روی امپدانس موجبر تأثیرگذار هستند و در نتیجه برای تطبیق امپدانس مهم هستند باید در طراحی با دقت خاصی آن‌ها را انتخاب کرد. بقیه پارامترها حساسیت کم‌تری دارند و در صورت تغییرات کوچک، تفاوت آن‌ها در نتایج چشم‌گیر نیست. حتی در

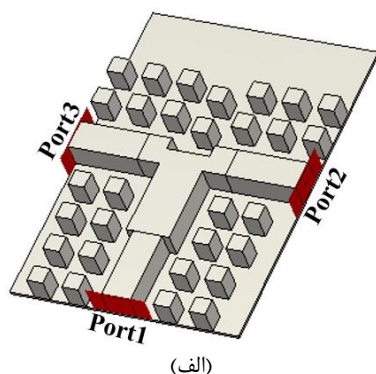


(الف)

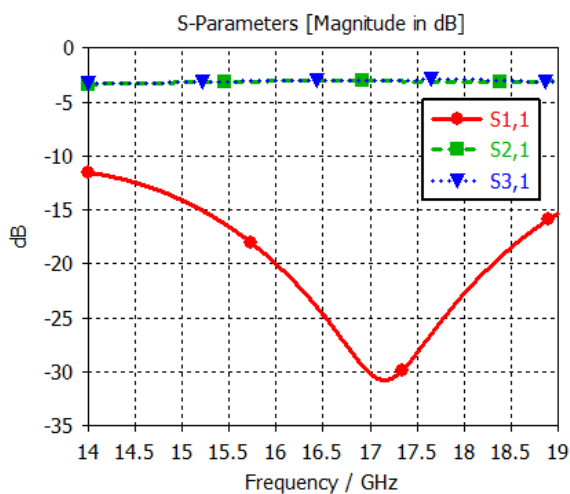
شکل حرکت موج در فرکانس ۱۶/۵ GHz در شکل (۷-الف) نشان داده شده است و می‌توان با توجه به این شکل گفت در این فرکانس موج روی تیغه مرکزی محدود می‌ماند و در راستای طولی حرکت می‌کند و در راستای عرضی موج سریعاً افت می‌کند به‌طوری‌که در راستای عرضی بعد از تناوب دوم موجی منتشر نمی‌شود و تقریباً مقدار آن صفر و عملاً گذاشتن

و خط استریپ دقیقاً یکسان نیست نمی‌توان آن را یک رابطه دقیق دانست. به‌جز این روش، روش‌های عددی نیز در [۸] معرفی شده است که با محاسبات نرم‌افزارهای مختلف می‌توان به امپدانس موج‌بر رسید.

اگر بخواهیم امپدانس موج‌برهای خروجی برابر با Z_0 باشد بنابراین، امپدانس ورودی نقطه اتصال موج‌برهای خروجی می‌شود در صورتی که بخواهیم امپدانس دهانه ورودی نیز Z_0 باشد نیاز به تطبیق امپدانس داریم. روش‌های مختلفی برای تطبیق امپدانس وجود دارند که در اینجا از روش میدل ربع ورودی نیاز به موج‌بری با امپدانس $Z_0/\sqrt{2}$ و به طول ضریب فردی از ربع طول موج است. پهنای قسمت تطبیق برابر با $7/9$ mm است. ساختار مقسم ۱:۲ با استفاده از RGW در شکل (۸-الف) نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی ساختار مقسم ۱:۲ با استفاده از نرم‌افزار CST در شکل (۸-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود این مقسم دارای افت بازگشتی ($|S_{11}|$) بهتر از -۱۵ dB در پهنای باند ۱۵-۱۸ GHz است. همچنین تلف عبوری به هر دو دهانه خروجی ($|S_{21}|$ و $|S_{31}|$) تقریباً ۳- dB است که مطابق انتظار است.



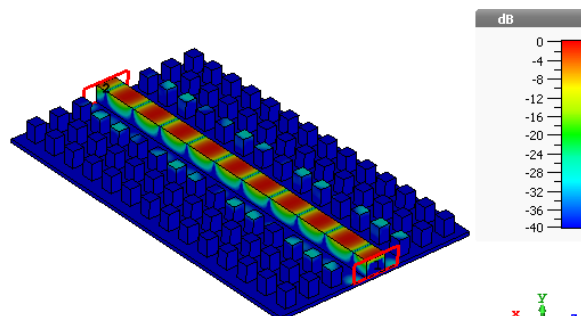
(الف)



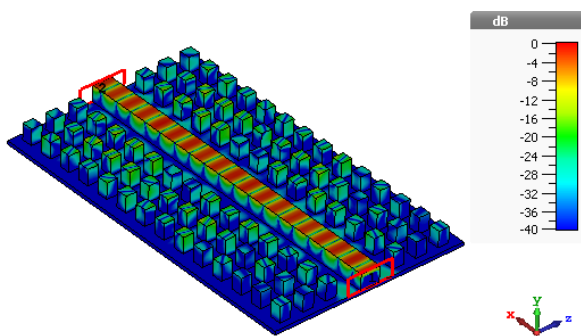
(ب)

شکل (۸): (الف) ساختار مقسم ۱:۲ با استفاده از RGW، (ب) افت بازگشتی ($|S_{11}|$) و تلف عبوری ($|S_{21}|$) شبیه‌سازی شده آن

شکل (۷-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود موج‌بر در این فرکانس عملکرد مطلوبی ندارد و موج بر روی Ridge محبوس نیست و در امتداد عرضی نیز انتشار می‌یابد.



(الف)



(ب)

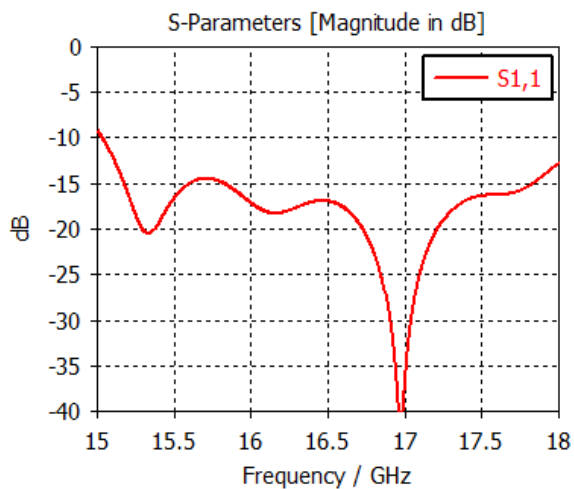
شکل (۷): حرکت موج در موج‌بر RGW (الف) در فرکانس ۱۶/۵ GHz (در خارج باند گذر ساختار پریودیک)، (ب) در فرکانس ۳۰ GHz (در داخل باند گذر ساختار پریودیک)

۳- طراحی یک تقسیم‌کننده توان ۱:۲ با استفاده از RGW

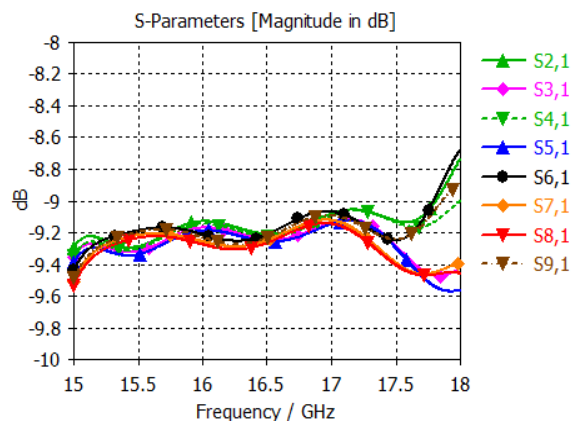
برای طراحی یک شبکه تغذیه ۱:N (یک ورودی و N خروجی) با استفاده از ساختار دودویی ابتدا نیاز به طراحی یک مقسم ۱:۲ (با یک ورودی و دو خروجی) است. برای طراحی در این مرحله نیاز به دانستن امپدانس موج‌بر است که این امپدانس قبلاً معرفی شده است [۸].

$$Z = \frac{h}{W/h + 0.882} \quad (1)$$

که در این رابطه η امپدانس موج فضای آزاد و W و h عرض Ridge و فاصله هوایی بین دو صفحه PEC است. ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که امپدانس معرفی شده با استفاده از مشابهت بین خط استریپ و RGW به دست آمده است و روشی تقریبی برای محاسبات اولیه است. به دلیل این که ساختار متناوب را نمی‌توان یک PMC کامل دانست و شکل میدان‌ها بین RGW



(الف)



(ب)

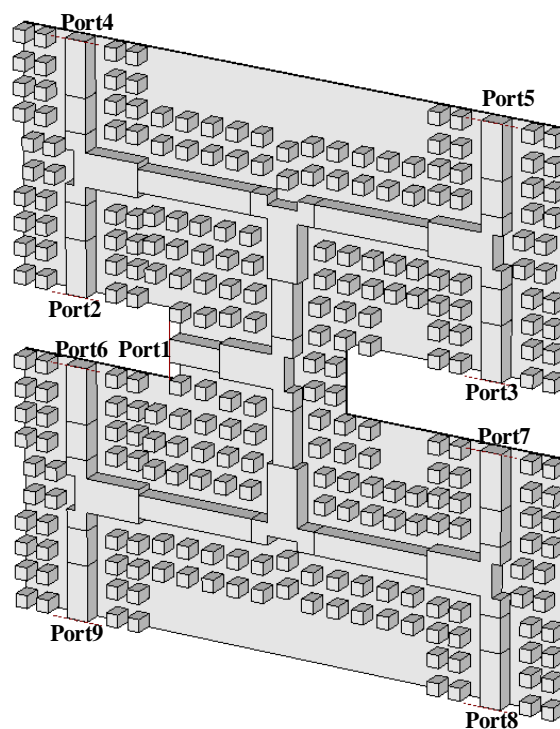
شکل (۱۰): الف) افت بازگشتی ($|S_{11}|$)، ب) تلف عبوری از دهانه ورودی به دهانه‌های مختلف خروجی ($|S_{n1}|$) شبیه‌سازی شده شبکه تغذیه ۱:۸ با استفاده از ساختار دودویی RGW

با توجه به آن که اختلاف‌فاز عبوری از دهانه یک به دهانه‌های مختلف نیز در شبکه تغذیه آرایه‌ها اهمیت دارد نتایج شبیه‌سازی CST اختلاف‌فاز عبوری از دهانه ورودی به دهانه‌های مختلف خروجی شبکه تغذیه ۱:۸ در شکل (۱۱- الف) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل و بزرگ‌شده آن حول فرکانس مرکزی (شکل (۱۱- ب)) مشاهده می‌شود تغییرات اختلاف‌فاز از دهانه ورودی به دهانه‌های مختلف خروجی کمتر از حدود یک درجه در پهنای باند ۱۵-۱۸ GHz است که مطلوب است. همچنین نحوه حرکت موج در شبکه تغذیه ۱:۸ در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود موج از طریق ridge بین دهانه‌های خروجی تقسیم می‌شود ولی در ناحیه‌ای که میخ‌ها قرار دارند موج منتشر نمی‌شود.

۴- طراحی شبکه تغذیه آنتن آرایه‌ای با فناوری RGW

در این بخش شبکه تغذیه آرایه آنتنی با ۸ المان با استفاده مقسم ۱:۲ طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. در حالت کلی این شبکه قابل تعمیم به یک شبکه ۱:N با زوج دلخواه است. در اینجا از ۷ مقسم توان ۱:۲ RGW برای تحقق شبکه تغذیه ۱:۸ با ساختار دودویی استفاده شده است. نمای این شبکه تغذیه در شکل (۹) نشان داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی در CST افت بازگشتی شبکه تغذیه ۱:۸ در شکل (۱۰- الف) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود این شبکه تغذیه دارای افت بازگشتی بهتر از حدود ۱۵ dB- در پهنای باند ۱۵-۱۸ GHz است. البته قابل ذکر است که ابتدا و انتهای باند کم‌تر از ۱۰ dB- است. نتایج شبیه‌سازی در CST تلف عبوری از دهانه ورودی به دهانه‌های مختلف خروجی شبکه تغذیه ۱:۸ در شکل (۱۰- ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود این شبکه تغذیه دارای تلف عبوری حدود ۹ dB- در پهنای باند ۱۵-۱۸ GHz است که مطابق انتظار است.



شکل (۹): شبکه تغذیه ۱:۸ آرایه آنتنی با استفاده از ساختار دودویی RGW

۵- نتیجه گیری

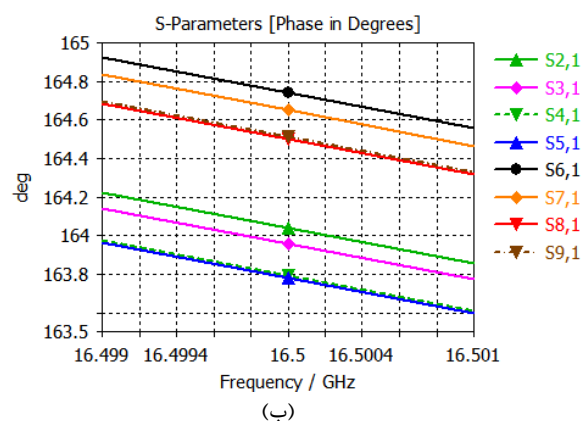
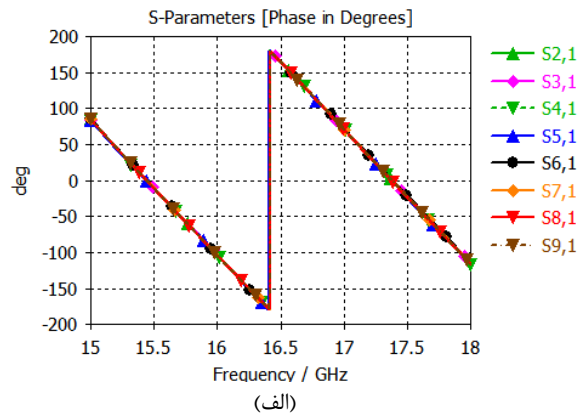
در این مقاله با استفاده از فناوری RGW یک شبکه تغذیه برای آرایه آنتنی ۸ المانی در باند فرکانسی ۱۵-۱۸ GHz طراحی و شبیه سازی شده است. همان طور که دیده شد در اینجا ۸ خروجی مدنظر قرار گرفته بود که با کمی ملاحظه می توان تعداد خروجی ها به راحتی افزایش داد. شبکه تغذیه طراحی و شبیه سازی شده دارای افت بازگشتی بهتر از -۱۵ dB در پهنای باند فرکانسی ۱۵-۱۸ GHz است. همچنین تلف عبوری از دهانه ورودی به هر کدام از دهانه های خروجی حدود ۹ dB است که مورد انتظار بود. همچنین تغییر اختلاف فاز از دهانه ورودی به هر کدام از دهانه های خروجی کمتر از یک درجه است. اگرچه این طراحی برای بازه فرکانسی ۱۵-۱۸ GHz بوده است اما از این موجر در بازه های فرکانسی بالاتر با پهنای باند وسیع تر نیز می توان استفاده کرد.

۶- سپاس گذاری

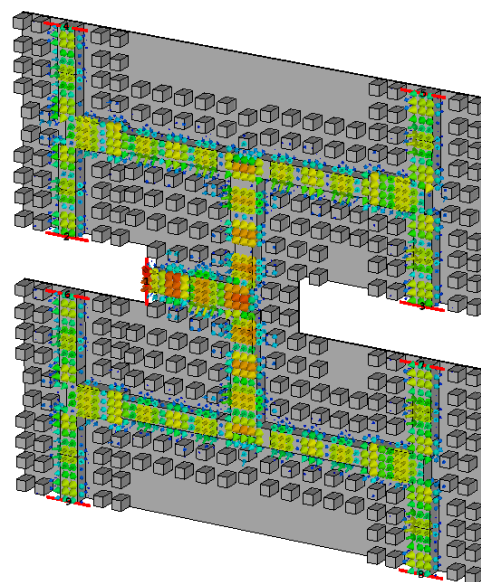
از مؤسسه آموزشی و تحقیقاتی صنایع دفاعی، صنایع الکترونیک ایران و معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری برای حمایت از این پژوهش قدردانی می شود

۷- مراجع

- [1] P. S. Kildal, E. Alfonso, A. Valero-Nogueira, and E. Rajo-Iglesias, "Local metamaterial-based waveguides in gaps between parallel metal plates," IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., vol. 8, pp. 84-87, 2009.
- [2] P.-S. Kildal, "Erratum: Definition of artificially soft and hard surfaces for electromagnetic waves," Electron. Lett., vol. 24, no. 6, p. 366, 1988.
- [3] E. Alfonso, et al., "New waveguide technology for antennas and circuits," Waves, year 3, pp. 65-75, 2011.
- [4] B. Ahmadi and A. Banai, "Substrateless Amplifier Module Realized by Ridge Gap Waveguide Technology for Millimeter-Wave Applications," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 64, no. 11, pp. 3623-3630, 2016.
- [5] B. Ahmadi and A. Banai, "A power divider/combiner realized by ridge gap waveguide technology for millimeter wave applications," Conf. Millimeter-Wave Terahertz Technol. MMWaTT, pp. 5-8, 2017.
- [6] S. I. Shams and A. A. Kishk, "Wide band power divider based on Ridge gap waveguide," 2016 17th Int. Symp. Antenna Technol. Appl. Electromagn. ANTEM 2016, pp. 3-4, 2016.
- [7] B. Ahmadi and A. Banai, "Direct Coupled Resonator Filters Realized by Gap Waveguide Technology," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 63, no. 10, pp. 3445-3452, 2015.
- [8] P.-S. Kildal, A. U. Zaman, E. Rajo-Iglesias, E. Alfonso, and A. Valero-Nogueira, "Design and experimental verification of ridge gap waveguide in bed of nails for parallel-plate mode suppression," IET Microwaves, Antennas Propag., vol. 5, no. 3, p. 262, 2011.



شکل (۱۱): الف) فاز عبوری از دهانه ورودی به دهانه های مختلف خروجی (S_{ni}) شبیه سازی شده شبکه تغذیه ۱:۸ با استفاده از ساختار دودویی RGW. ب) بزرگ شده الف) حول فرکانس مرکزی ۱۶/۵ GHz



شکل (۱۲): نمایش حرکت موج در شبکه تغذیه ۱:۸ آرایه آنتنی با استفاده از ساختار دودویی RGW

Design and Simulation of a Ku-Band Array Antenna Feed Network Based on Novel Ridge-Gap Waveguide Technology

A. Karimi Nobandegani, S. E. Hosseini*

*Shiraz University

(Received: 29/01/2019, Accepted: 07/05/2019)

Abstract

Array antennas have many applications in civil and military systems such as: radar, surveillance systems, direction finders, electronic warfare (EW), etc. Feed network is one of the main parts of array antennas. In this paper a 1:8 corporate feed network based on the new waveguide technology referred to as ridge gap waveguide (RGW) at Ku band is designed and simulated which can be extended to any arbitrary 1:N feed network. The main advantages of RGW technology are: low loss, broad bandwidth, low sensitivity to manufacturing errors, usability at high frequencies like millimeter waves, easy integration of active components, etc. Return loss of the simulated feed network is better than -15 dB at 15-18 GHz frequency band. Furthermore, the insertion loss from the input to each output is almost -9dB which is as expected, and also the change of phase difference from input to each output is less than 1 degree.

Keywords: Ridge Gap Waveguide (RGW), Array Antenna Feed Network, Ku-Band, Return Loss, Insertion Loss

* Corresponding author E-mail: se.hosseini.r@gmail.com