

صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش مخابرات میدان

ساختار کاهنده سطح مقطع راداری با کارایی بیشتر

نگارنده: مرضیه قلی پور باریکی

استاد راهنما:

دکتر نیما آزادی طینت

استاد مشاور:

دکتر جواد قالیبافان

اسفند ۱۳۹۶

دانشگاه صنعتی شاهرود

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات گرایش میدان

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم مرضیه قلی پور باریکی

تحت عنوان: ساختار کاهنده سطح مقطع راداری با کارایی بیشتر

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	استاد مشاور	امضاء	استاد راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی:

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:
			نام و نام خانوادگی:
			نام و نام خانوادگی:
			نام و نام خانوادگی:

تقدیم به:

به خدایی که آفرید جهان را، انسان را، عقل را، علم را و معرفت را

به پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را

تجربه نمایم

و به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و

وجودش برایم همه مهر

و به همسرم، پناه خستگی و امید بودنم.

تشکر:

سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید

وظیفه خود می دانم از استاد راهنمای گران قدر جناب آقای دکتر نیما آزادی طینت که با راهنمایی های خود راهگشای اینجانب بوده اند کمال تشکر و سپاسگزاری را بنمایم.

هم چنین از جناب آقای دکتر جواد قالیبافان به منظور قبول مسئولیت استاد مشاور و ارائه راهنمایی های ارزشمند ایشان سپاسگزارم.

از جناب آقای خنجریان دانشجوی دکتری دانشگاه علم و صنعت که در طول انجام پایان نامه به اینجانب کمک نمودند، تشکر می نمایم.

در نهایت لازم می دانم از اساتید بزرگوار به منظور تقبل مسئولیت داوری این پایان نامه صمیمانه سپاسگزاری نمایم.

مرضیه قلی پور

اسفند ۱۳۹۶

تعهدنامه

اینجانب مرضیه قلی پور باریکی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق / مخابرات دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی و شبیه سازی ساختار کاهنده سطح مقطع راداری با کارایی بیشتر تحت راهنمایی دکتر نیما آزادی طینت متعهد می شوم.

- ♦ تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- ♦ در استفاده از نتایج پژوهش محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- ♦ مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- ♦ حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه رایانه ای،
- ♦ نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.
- ♦ این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- ♦ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

در این پایان نامه از یک نوع ساختار EBG برای کاهش سطح مقطع راداری استفاده می شود به صورت کلی این ساختارها، ویژگی های منحصر به فردی دارند که این هدف را تحقق می دهند. در سال های اخیر به دلیل حجم و وزن مناسب، پهنای باند بالا و حساسیت پایین نسبت به نوع موج برخوردی، بیشتر از راه حل های دیگر، مورد استفاده قرار گرفته است. EBG ارائه شده در این پایان نامه از زیرلایه ی FR-4 با ضخامت 3.2 mm تشکیل شده است. این ساختار شامل دو سلول متفاوت می باشد که یکی از آن دو از پنج بخش مربعی فلزی و دیگری نیز خالی از فلز می باشند که هر کدام از این سلول ها به صورت 4×4 کنار هم چیده شدند و این دو مجموعه به صورت شطرنجی کنار هم قرار گرفتند.

بررسی ساختار از نظر پهنای باند فرکانسی نشان می دهد این دو سلول در بازه ی فرکانسی 6.2 GHz تا 12.2 GHz اختلاف فاز $37^\circ \pm 180^\circ$ ایجاد می کنند این یعنی ساختار دارای 64 درصد پهنای باند فرکانسی می باشد. همچنین برای بررسی پهنای زاویه ای از برخورد دو نوع موج TEz و TMz استفاده شد که بیان می کند تقریباً در همه ی زوایای موج ورودی پهنای باند خوبی داریم که بهترین نتیجه در برخورد موج TEz با زاویه 60° می باشد که پهنای باند حدود 91.14% بدست آمده است.

ساختار ارائه شده در این پایان نامه، ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است و سطح مقطع راداری ساختار در دو فرکانس 7.5 GHz و 11.2 GHz اندازه گیری شد که به ترتیب به مقدار 11.59 dB و 8.41 dB کاهش سطح مقطع راداری حاصل شد.

برای طراحی و شبیه سازی از نرم افزار CST و ADS استفاده شد. مدار معادل ساختار با ADS شبیه سازی شد که تطبیق بسیار خوبی با شبیه سازی CST داشت.

کلمات کلیدی: کاهش سطح مقطع راداری، ساختارهای EBG، قطبش TMz، قطبش TEz، فاز

بازگشتی، فرکانس تشدید

فهرست مطالب

فصل ۱: فصل اول..... ۱

۱-۱ مقدمه..... ۲

۲-۱ روشهای محاسبه و شبیه سازی سطح مقطع راداری..... ۲

۳-۱ بررسی اهداف تغییرات سطح مقطع راداری..... ۶

۱-۳-۱ افزایش سطح مقطع راداری..... ۶

۲-۳-۱ کاهش سطح مقطع راداری..... ۶

۱-۲-۳-۱ بررسی روش های کاهش سطح مقطع راداری..... ۷

۴-۱ مروری بر تحقیقات گذشته..... ۱۳

فصل ۲: فصل دوم..... ۱۵

۱-۲ مقدمه..... ۱۶

۲-۲ ویژگی ساختارهای EBG..... ۱۶

۱-۲-۲ انتشار امواج..... ۱۶

۲-۲-۲ فاز بازگشتی از سطح ساختار..... ۱۸

۱-۲-۲-۲ بدست آوردن امپدانس و فاز بازگشتی و پهنای باند..... ۲۰

۳-۲-۲ عملکرد نرم یا سخت..... ۲۳

۱-۳-۲-۲ نمونه های از ساختار EBG..... ۲۴

۴-۲-۲ پارامترهای موثر در طراحی EBG و بررسی آن ها..... ۳۴

۱-۴-۲-۲ تاثیر پهنای پچ..... ۳۵

۲-۴-۲-۲ تاثیر پهنای شکاف..... ۳۶

۳-۴-۲-۲ تاثیر ضخامت زیرلایه..... ۳۶

۴-۴-۲-۲ تاثیر گذردهی الکتریکی زیرلایه..... ۳۷

EBG۳-۲ و فرامواد..... ۳۸

فصل ۳: فصل سوم..... ۴۱

۱-۳ مقدمه..... ۴۲

۴۲	.....	۲-۳ ساختار جدید طراحی شده ی EBG
۴۳	.....	۱-۲-۳ بررسی سلول های ساختار
۴۳	.....	۱-۱-۲-۳ بررسی ضریب بازتاب
۴۶	.....	۲-۱-۲-۳ مدار معادل یک سلول از ساختار
۴۹	.....	۳-۱-۲-۳ بررسی اختلاف فاز دو سلول از ساختار
۵۲	.....	۲-۲-۳ ارائه ی ساختار پیشنهادی
۵۲	.....	۳-۲-۳ بررسی ساختار پیشنهادی
۵۳	.....	۱-۳-۲-۳ برخورد موج به صورت عمودی
۵۸	.....	۲-۳-۲-۳ برخورد موج به صورت مایل
		۳-۳-۲-۳ بررسی پهنای باند کاهش سطح مقطع راداری ساختار در اثر برخورد موج ورودی با قطبش TEz و
۶۴	.....	TMz
۶۵	.....	۳-۳ ساخت ساختار مورد نظر و آزمایش آن
۷۰	.....	۴-۳ جمع بندی و مقایسه با ساختارهای دیگر
۷۱	.....	۵-۳ راهکار های پیشنهادی
۷۱	.....	مراجع

فهرست جداول

- جدول (۱-۲) پارامترهای موج در ناحیه‌های موج تخت و موج سطحی..... ۲۲
- جدول (۲-۲) ضریب بازتاب و امپدانس سطحی برای سطوح نرم، سخت، PEC و PMC..... ۲۴
- جدول (۱-۳) مقادیر خازن‌های معادل در شبیه‌سازی ADS..... ۴۸
- جدول (۲-۳) پهنای باند حاصل از برخورد موج با قطبش TEz و TMz با زاویه θ ورودی..... ۶۵
- جدول (۳-۳) مقایسه پهنای زاویه ساختار ارائه شده و مرجع [۱۷]..... ۷۱

فهرست تصاویر

- شکل (۱-۱) سطح مورد نظر برای بدست آوردن میزان سطح مقطع راداری..... ۴
- شکل (۲-۱) تابش موج با (الف) قطبش افقی (ب) قطبش عمودی..... ۵
- شکل (۳-۱) عوامل موثر بر سطح مقطع راداری..... ۶
- شکل (۴-۱) پراکننده های ثانویه. (الف) بارهای لامپ (مقاومتی) (ب) خط اخلاگر..... ۸
- شکل (۵-۱) تاثیر گوشه ی قائم بر کاهش سطح مقطع راداری..... ۹
- شکل (۶-۱) مثالی از تغییر شکل مورد استفاده در ناو DD-X، هیچگونه زاویه قائم استفاده نشده است..... ۹
- شکل (۷-۱) (الف) تاثیر نقاط نوک تیز در پراکندگی (ب) هواپیمای F-117..... ۱۰
- شکل (۸-۱) هواپیمای B-2..... ۱۰
- شکل (۹-۱) جاذبها (الف) رنگ های پوششی (ب) ساختارهای پوششی..... ۱۱
- شکل (۱۰-۱) مدار معادل صفحات سالیسبری..... ۱۱
- شکل (۱-۲) باند ممنوعه در برخورد موج سطحی..... ۱۷
- شکل (۲-۲) ضریب فاز بازگشتی برای موج برخوردی تخت..... ۱۷
- شکل (۳-۲) آنتن قرار گرفته شده در برابر یک صفحه ی فلزی با فاصله ی کمتر $\lambda/4$ ۱۸
- شکل (۴-۲) آنتن قرار گرفته شده در برابر یک صفحه ی فلزی با فاصله ی $\lambda/4$ ۱۹
- شکل (۵-۲) موج ورودی الکترومغناطیسی به سطح متناوب. θ_i زاویه موج ورودی و l جهت طولی و t جهت عرضی..... ۲۰
- شکل (۶-۲) صفحه مختلط R و دایره های پهنای باند برای عملکرد نرم و سخت. در ناحیه موج تخت، R در دایره واحد و در ناحیه موج سطحی R در امتداد محور حقیقی متغیر است..... ۲۳
- شکل (۷-۲) نمایش صفحه ی امپدانس بالای قارچی EBG. (الف) نما از کنار (ب) نما از بالا..... ۲۵

- شکل (۸-۲) مدل LC ساختار قارچی شکل EBG (الف) پارامتر های EBG (ب) مدل LC ۲۶
- شکل (۹-۲) رابطه‌ی بین امپدانس و فاز بازگشتی در EBG ۲۷
- شکل (۱۰-۲) (الف) انتشار موج TE (ب) انتشار موج TM در اطراف سطحی با امپدانس بالا ۲۹
- شکل (۱۱-۲) مدل تحلیل عددی ساختار EBG برای بدست آوردن فاز بازگشتی ۳۰
- شکل (۱۲-۲) شبیه سازی فاز بازگشتی موج TE از سطح EBG قارچی شکل در زاویه 0° و 30° ۳۰
- و 60° ۳۲
- شکل (۱۳-۲) شبیه سازی فاز بازگشتی موج TM از سطح EBG قارچی شکل در زاویه 0° و 30° ۳۰
- و 60° ۳۲
- شکل (۱۴-۲) شبیه سازی فاز بازگشتی EBG در صفحه kx (الف) قطبش TE (ب) قطبش TM ۳۴
- شکل (۱۵-۲) تاثیر پهنای پیچ W بر فاز بازگشتی ساختار EBG ۳۵
- شکل (۱۶-۲) تاثیر پهنای شکاف g بر فاز بازگشتی ساختار EBG ۳۶
- شکل (۱۷-۲) تاثیر ضخامت زیرلایه h بر فاز بازگشتی ساختار EBG ۳۷
- شکل (۱۸-۲) تاثیر گذردهی زیرلایه ϵ_r بر فاز بازگشتی ساختار EBG ۳۸
- شکل (۱-۳) (الف) EBG1 (ب) EBG2 ۴۲
- شکل (۲-۳) دامنه‌ی ضریب بازگشتی (الف) EBG1 (ب) EBG2 ۴۳
- شکل (۳-۳) فاز ضریب بازگشتی (الف) EBG1 (ب) EBG2 ۴۴
- شکل (۴-۳) بررسی تاثیر اندازه‌ی پیچ بر فاز بازگشتی. a اندازه‌ی طول پیچ اصلی می باشد. ۴۴
- شکل (۵-۳) بررسی تاثیر اندازه‌ی ضخامت زیرلایه بر فاز بازگشتی. h اندازه‌ی ضخامت زیرلایه می باشد ۴۵
- شکل (۶-۳) تاثیر گذردهی زیرلایه بر فاز بازگشتی. ep گذردهی زیرلایه می باشد ۴۵

- شکل (۷-۳) مدار الکتریکی تک سلول EBG2 ۴۶
- شکل (۸-۳) مدار معادل الکتریکی تک سلول EBG2 ۴۷
- شکل (۹-۳) فاز بازگشتی حاصل از شبیه سازی CST و ADS ۴۹
- شکل (۱۰-۳) نمودار کاهش سطح مقطع دارای به مقدار -10 dB در زاویه حدود $37^\circ \pm 180^\circ$ ۵۱
- شکل (۱۱-۳) نمودار اختلاف فاز بازگشتی دو سلول EBG1 و EBG2 ۵۱
- شکل (۱۲-۳) ساختار پیشنهادی EBG ۵۲
- شکل (۱۳-۳) شکل شبیه سازی شده برای پیشبینی میزان پهنای باند ساختار. پهنای باند بدست آمده 67.5% می باشد ۵۳
- شکل (۱۴-۳) کاهش سطح مقطع راداری در برخورد موج به صورت عمودی. پهنای باند 64% ۵۴
- شکل (۱۵-۳) شبیه سازی الگوی تابشی سه بعدی در اثر برخورد موج به صورت عمودی به سطح ساختار (الف) در فرکانس 7.5 GHz (ب) در فرکانس 11.2 GHz ۵۵
- شکل (۱۶-۳) شبیه سازی الگوی تابشی سه بعدی در اثر برخورد موج به صورت عمودی به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس 7.5 GHz (ب) در فرکانس 11.2 GHz ۵۵
- شکل (۱۷-۳) شبیه سازی بایاستاتیک با موج ورودی عمودی و زاویه مشاهده 90° و $0^\circ = \varphi$ در فرکانس (الف) 7.5 GHz و (ب) 11.2 GHz ۵۶
- شکل (۱۸-۳) شبیه سازی بایاستاتیک با موج ورودی عمودی و زاویه مشاهده 135° و $45^\circ = \varphi$ در فرکانس (الف) 7.5 GHz و (ب) 11.2 GHz ۵۷
- شکل (۱۹-۳) شبیه سازی الگوی تابشی بایاستاتیک سه بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل و با قطبش TMz به سطح ساختار (الف) در فرکانس 7.5 GHz (ب) در فرکانس 11.2 GHz ۵۸
- شکل (۲۰-۳) شبیه سازی الگوی تابشی بایاستاتیک سه بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل و با قطبش TMz به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس 7.5 GHz (ب) در فرکانس 11.2 GHz ۵۹

- شکل (۳-۲۱) شبیه سازی الگوی تابشی مونواستاتیک دو بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل 90° و $\phi = 0^{\circ}$ با قطبش TMz به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس ۷.۵ GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲GHz ۶۰
- شکل (۳-۲۲) شبیه سازی الگوی تابشی مونواستاتیک دو بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل 135° و $\phi = 45^{\circ}$ با قطبش TMz به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس ۷.۵GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲GHz ۶۱
- شکل (۳-۲۳) شبیه سازی الگوی تابشی بایاستاتیک سه بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل و با قطبش TEz به سطح ساختار اصلی (الف) در فرکانس ۷.۵ GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲ GHz ۶۱
- شکل (۳-۲۴) شبیه سازی الگوی تابشی بایاستاتیک سه بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل و با قطبش TEz به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس ۷.۵ GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲ GHz ۶۲
- شکل (۳-۲۵) شبیه سازی الگوی تابشی مونواستاتیک دو بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل 90° و $\phi = 0^{\circ}$ با قطبش TEz به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس ۷.۵ GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲GHz ۶۳
- شکل (۳-۲۶) شبیه سازی الگوی تابشی مونواستاتیک دو بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل 135° و $\phi = 45^{\circ}$ با قطبش TEz به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس ۷.۵GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲GHz ۶۴
- شکل (۳-۲۷) پهنای باند حاصل از برخورد موج با قطبش TEz و زاویه θ ورودی متفاوت ۶۴
- شکل (۳-۲۸) پهنای باند حاصل از برخورد موج با قطبش TMz و زاویه θ ورودی متفاوت ۶۵
- شکل (۳-۲۹) (الف) روبروی ساختار (ب) پشت ساختار ۶۶
- شکل (۳-۳۰) (الف) آنتن فرستنده و گیرنده (ب) ساختار مورد آزمایش ۶۷
- شکل (۳-۳۱) الگوی تابشی 360° از ساختار در فرکانس ۷.۵ GHz ۶۸

- شکل (۳-۳۲) الگوی تابشی 360° از ساختار در فرکانس ۱۱.۲ GHz ۶۸
- شکل (۳-۳۳) الگوی تابشی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده ی ساختار و هادی کامل به صورت دو بعدی در فرکانس ۷.۵ GHz ۶۹
- شکل (۳-۳۴) الگوی تابشی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده ی ساختار و هادی کامل به صورت دو بعدی در فرکانس ۱۱.۲ GHz ۶۹

فهرست اختصارات

Radar Cross Section (RCS).....	سطح مقطع راداری
Radar Cross Section Reduction (RCSR).....	کاهش سطح مقطع راداری
Perfect Electric Conductor (PEC)	هادی الکتریکی کامل
Perfect Magnetic Conductor (PMC).....	هادی مغناطیسی کامل
Electromagnetic Band Gap (EBG).....	باند شکاف الکترومغناطیسی
Artificial Magnetic Conductor (AMC).....	هادی مغناطیسی مصنوعی
Radar Absorbent Material (RAM).....	مواد جاذب راداری

فصل اول:

معرفی سطح مقطع راداری
و بررسی روش های بهبود

۱-۱ مقدمه

از دیرباز، به دنبال راهی برای کاهش امواج الکترومغناطیس پراکنده شده از سطح اجسام بودند به خصوص این موضوع در زمینه‌ی نظامی بسیار مورد توجه قرار داشت. پراکندگی امواج از سطح اجسام^۱ را با سطح مقطع راداری^۲ (RCS) می‌سنجند. در مفهوم سطح مقطع راداری، میزان قابل شناسایی بودن یک شی توسط رادار می‌باشد. هرچه این مقدار بیشتر باشد شکل برای رادار قابل رویت‌تر است.

امواج الکترومغناطیس بعد از برخورد به سطح یک جسم در جهت‌های مختلف پراکنده می‌شوند. تعدادی از این امواج، بعد از پراکنده شدن به آنتن گیرنده می‌رسند. می‌توان این امواج را به دو دسته-ی:

الف) امواجی با قطبشی مشابه با قطبش^۳ آنتن گیرنده

ب) امواجی با قطبشی متفاوت با قطبش آنتن گیرنده

تقسیم کرد. در شرایط همسان بودن قطبش، موج دریافت خواهد شد و در میزان سطح مقطع راداری تاثیر خواهد گذاشت. بدست آوردن سطح مقطع راداری از نظر تئوری بسیار مشکل است ولی برای اجسام ساده ای مانند صفحه، استوانه، کره و اشکال مشابه قابل محاسبه است [۱].

از دلایل سختی بدست آوردن مقدار سطح مقطع راداری می‌توان به تغییر دائمی زاویه‌ی جسم، پیچیده بودن شکل و سطح جسم که موج را پراکنده می‌کند، اشاره کرد.

۱-۲ روش‌های محاسبه و شبیه سازی سطح مقطع راداری

برای محاسبه‌ی سطح مقطع راداری از روش‌های عددی و برای اعتبار بخشی به نتایج محاسبه از

¹ Scattering property

² Radar Cross Section

³ Polarization

نرم افزار می توان بهره گرفت.

از جمله روش های عددی می توان از تغییرات محدود در محدوده ی دامنه (FDTD)^۱، تغییرات محدود در محدوده ی فرکانس (FDFD)^۲، روش ممان (MOM)^۳ نام برد که از روابط ماکسول در این روش ها بهره گرفته می شود و همچنین در فرکانس های بالا و برای ساختارهای محدود از روش هایی مانند اپتیک هندسی (GO)^۴، اپتیک فیزیکی (PO)^۵، نظریه های فیزیکی پراش (PTD)^۶ استفاده می شود. از نرم افزارهای تمام موج مانند CST، HFSS و FEKO جهت شبیه سازی و اعتبار بخشی محاسبات دستی استفاده می شود [۲].

روش کلی بدست آوردن سطح مقطع راداری به این صورت می باشد که ابتدا باید یک موج با توان مشخص به سطح ساختار تابیده شود تا روی سطح یک جریان القا می کند و این جریان، میدان تولید می کند و این میدان، پراکنده می شود. میدان ورودی که مشخص است و کافی است میدان پراکنده شده را بدست آورد. در روابط زیر، راه حل آورد شده است [۳] و [۲]:

$$\sigma = \frac{\frac{\text{power reflected to receiver}}{\text{solid angle}}}{\frac{\text{incident power density}}{4\pi}} \quad (1-1)$$

$$\frac{1}{r^2} = \frac{\text{stradian}}{\text{area}} \quad (1-2)$$

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_i|^2} \quad (1-3)$$

¹ Finite-Difference Time-Domain

² Finite-Difference Frequency-Domain

³ Method Of Moment

⁴ Geometric Optics

⁵ Physical Optics

⁶ Physical Theory Of Diffraction

فرمول ماکسول در فضای آزاد (خالی از بار و منبع جریان) به شرح زیر است:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (۴-۱)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (۵-۱)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = 0 \quad (۶-۱)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad (۷-۱)$$

و همچنین داریم:

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) \quad (۸-۱)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) \quad (۹-۱)$$

معادلات ماکسول در حوزه‌ی فازور به صورت زیر می باشد:

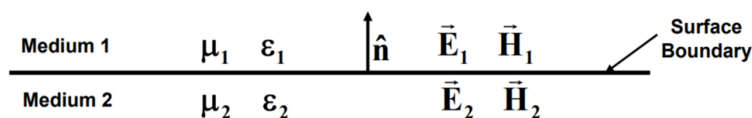
$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) = -i\omega \vec{B}(\vec{r}) \quad (۱۰-۱)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) = i\omega \vec{D}(\vec{r}) \quad (۱۱-۱)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}(\vec{r}) = 0 \quad (۱۲-۱)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}) = 0 \quad (۱۳-۱)$$

همان‌طور که در شکل (۱-۱) آمده است برای میدان‌های مماسی داریم:



شکل (۱-۱) سطح مورد نظر برای بدست آوردن میزان سطح مقطع راداری

$$\hat{n} \times \vec{E}_1 = \hat{n} \times \vec{E}_2 \quad (۱۴-۱)$$

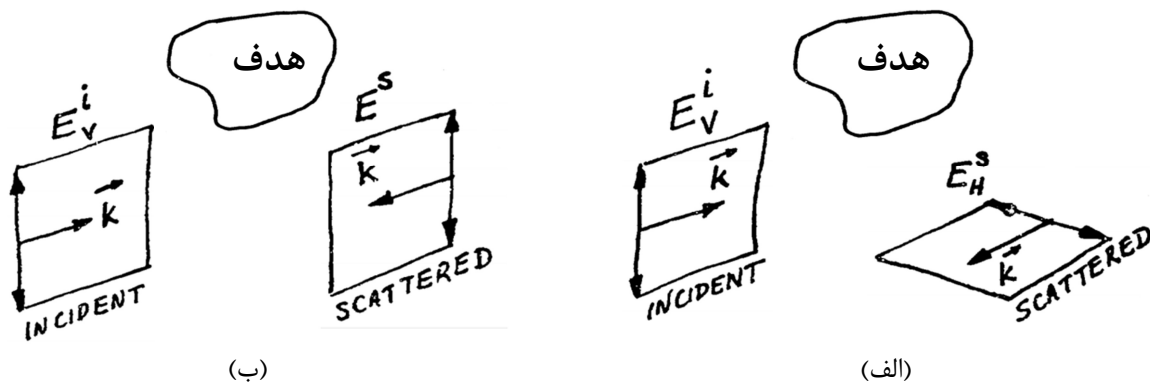
روی سطح هادی کامل میدان الکتریکی مماسی برابر با صفر می باشد:

$$\hat{n} \times \vec{H}_1 = \hat{n} \times \vec{H}_2 \quad (۱۵-۱)$$

$$\hat{n} \times \vec{E} = 0 \quad (۱۶-۱)$$

با توجه به قطبش موج برخوردی که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است می توان سطح مقطع

راداری را به صورت زیر نوشت:



شکل (۲-۱) تابش موج با (الف) قطبش افقی (ب) قطبش عمودی [۳]

$$\vec{E}_V^s = S_{VV} \vec{E}_V^i \quad (۱۸-۱)$$

$$\vec{E}_H^s = S_{HV} \vec{E}_V^i \quad (۱۹-۱)$$

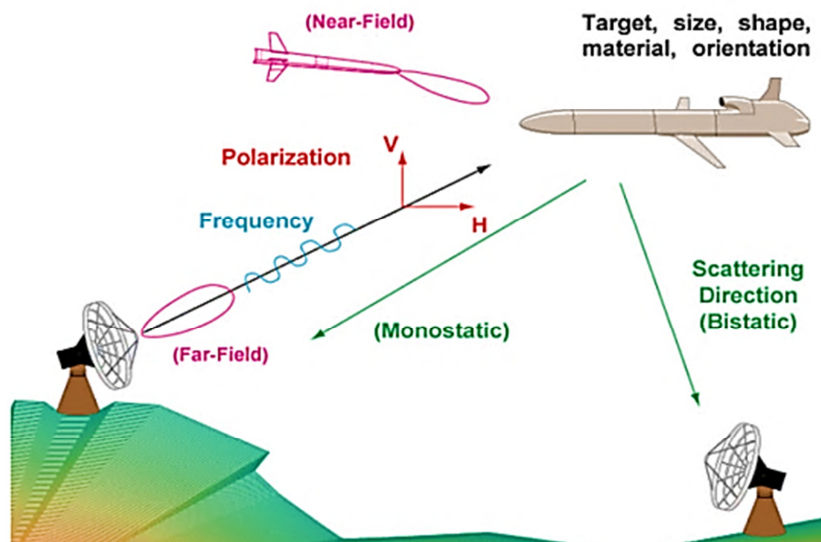
$$\begin{bmatrix} \vec{E}_H^s \\ \vec{E}_V^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{VV} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{HH} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_H^i \\ \vec{E}_V^i \end{bmatrix} \quad (۲۰-۱)$$

$$\sigma_{HH} = 4\pi r^2 |S_{HH}|^2 \quad (۲۱-۱)$$

که در روابط بالا $\vec{E}_H^s$ و $\vec{E}_H^i$ ، $\vec{E}_V^s$ ، $\vec{E}_V^i$ به ترتیب میدان تابشی عمودی، میدان بازتابشی عمودی، میدان تابشی افقی و میدان بازتابشی افقی را نشان می دهند و همچنین ماتریس S، ماتریس پراکندگی را مشخص می کند.

عوامل مختلفی از جمله جایگاه فرستنده و گیرنده، شکل هندسی جسم، جهت گیری زاویه ای جسم،

فرکانس یا طول موج امواج ورودی، قطبش فرستنده، قطبش گیرنده بر سطح مقطع راداری تاثیر می- گذارند که در شکل (۳-۱) ترسیم شده است [۲].



شکل (۳-۱) عوامل موثر بر سطح مقطع راداری [۲]

۳-۱ بررسی اهداف تغییرات سطح مقطع راداری

۱-۳-۱ افزایش سطح مقطع راداری

در بعضی کاربردها به این دلیل که هدف، دیده شدن جسم می-باشد سطح مقطع راداری را افزایش می-دهند. برای مثال در آزمایش برخی از رادارها، موشک‌هایی با سطح مقطع راداری زیاد مورد استفاده قرار می-گیرند تا رادار قادر به شناسایی آن باشد.

۲-۳-۱ کاهش سطح مقطع راداری

کاربردهایی که نیاز به کاهش سطح مقطع راداری دارد بسیار مهم‌تر بوده و بیشتر در زمینه‌ی نظامی مد نظر است در این موارد هدف کاهش سطح مقطع راداری و دیده نشدن جسم و یا کوچک‌تر از اندازه‌ی واقعی دیده شدن جسم، می-باشد. برای مثال می-توان به سامانه‌های پرتاب شونده مانند

موشک ها، هواپیما، دستگاه‌های جاسوسی، سکوها‌ی پرتاب کننده‌ی موشک اشاره کرد [۴].

۱-۲-۳-۱ بررسی روش های کاهش سطح مقطع راداری

برای کاهش سطح مقطع راداری چهار راه حذف فعال^۱، حذف غیر فعال^۲، تغییر شکل^۳ و جاذب-های راداری^۴ وجود دارد. در روش حذف فعال سطح هدف که موج به آن برخورد می‌کند در همان لحظه موجی با همان ویژگی و با فازی مخالف از سطح خود بازتاب می‌سازد که باعث حذف شدن موج ورودی می‌شود. باید مشخصات دو موج تابیده شده و بازتاب شده از جمله دامنه و طول موج کاملاً شبیه هم و در فاز مخالف یعنی دارای اختلاف فاز 180° باشند. برای انجام این کار از یک مدار فعال استفاده می‌شود تا محدوده‌ی فرکانسی و محدوده‌ی زاویه را تنظیم سازد. یکی از مشکلات این روش همزمانی این دو موج است یعنی دقیقاً در همان لحظه که موج به سطح برخورد می‌کند باید موجی از سطح ساطع شود و همچنین به دلیل وابستگی به طول موج محدودیت پهنای باند هم وجود دارد و دیگر اینکه در فرکانس های بالا تغییر بسیار کوچک در شکل جسم، تاثیر زیادی بر موج بازگشتی می‌گذارد و این روش برای فرکانس‌های پایین مناسب است دقیقاً در فرکانس‌هایی که روش جاذب ها و روش تغییر شکل سطوح ناتوانند.

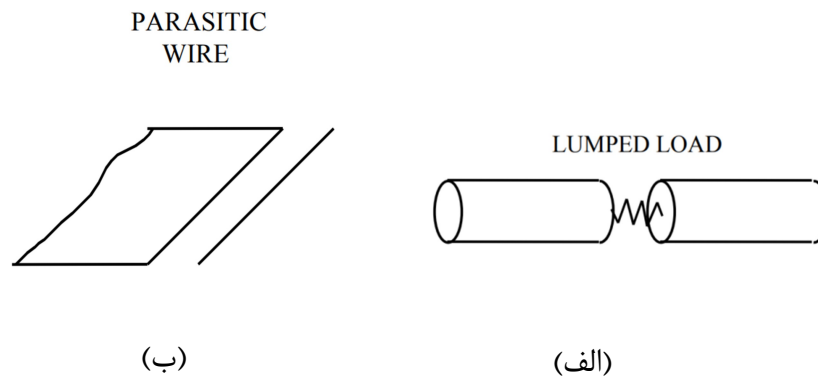
در روش حذف غیرفعال، از یک پراکنده کننده ثانویه استفاده می‌شود که در موج‌های بازتاب شده از سطح اختلال ایجاد کند. این روش در پهنای باند فرکانسی و پهنای زاویه ای بسیار محدود، پاسخ می‌دهد. برای مثال می‌توان از عناصر اخلا لگر و بارهای فشرده استفاده کرد (شکل (۱-۴)).

¹ Active cancellation

² Passive cancellation

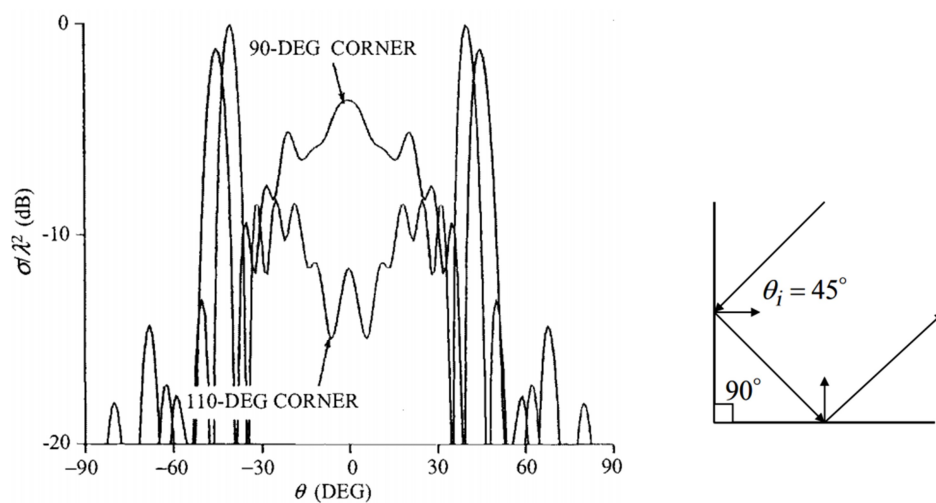
³ Shapping

⁴ Radar Absorbent Material



شکل (۴-۱) پراکنده های ثانویه. (الف) بارهای فشرده (مقاومتی) (ب) خط اخلاگر [۵]

روش تغییر شکل یک روش بهینه است ولی بر ویژگی‌های تشعشعی دیگر آن تاثیر می‌گذارد. این روش برای فرکانس‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش تغییر شکل، موج بازتابیده شده از سطح، در زاویه ای متفاوت با زاویه تابشی بازتاب می‌شود که باعث می‌شود از دید فرستنده پنهان بماند [۵]. باید توجه داشت که روی شکل مورد نظر محدودیت‌های ساختاری وجود دارد برای مثال در هواپیماها و جت، نباید روی دم این اجسام صفحات عمودی و یا افقی وجود داشته باشد و همچنین روی دیواره‌های عرشی کشتی‌ها نباید زاویه قائم بوجود آید (شکل (۵-۱)) مانند ناو DD-X که در شکل (۶-۱) آمده است [۶]. همچنین در هواپیمای F-117 (شکل ۷-۱ الف) و (ب) می‌بینیم لبه‌های کناره‌ی هواپیما به صورت قرینه و گوشه‌ها را به صورت دندان‌های ساخته می‌شود و سعی می‌گردد که در یک ناحیه مشخص و محدود، بازتاب اتفاق افتد باعث می‌شود تا موج بازگشتی کاهش یابد. در هواپیمای B-2 نیز از ساختارهای مسطح استفاده کرده است مخصوصاً در بال‌های پشتی (شکل (۱-۸)). در ساختارهایی که بیشتر شبیه به جعبه باشند مانند خودرو و کشتی بیشتر از گوشه‌های دو وجهی و سه وجهی و استوانه‌ای استفاده می‌گردد [۷].

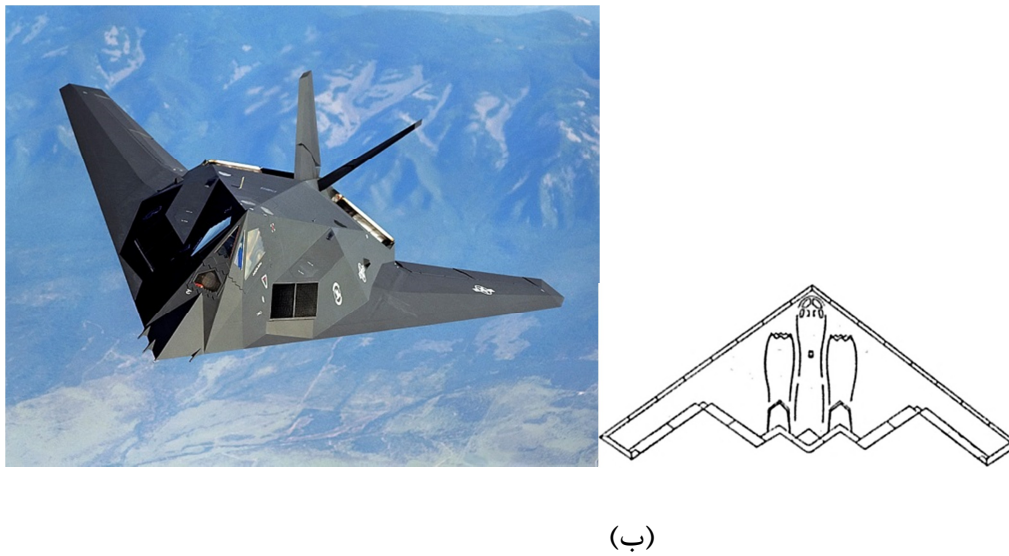
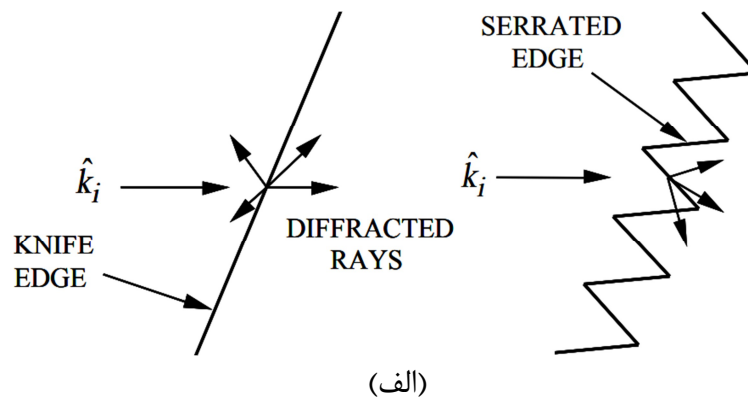


شکل (۵-۱) تاثیر گوشه‌ی قائم بر کاهش سطح مقطع راداری [۶]



شکل (۶-۱) مثالی از تغییر شکل مورد استفاده در ناو DD-X، هیچگونه زاویه قائم استفاده نشده است.

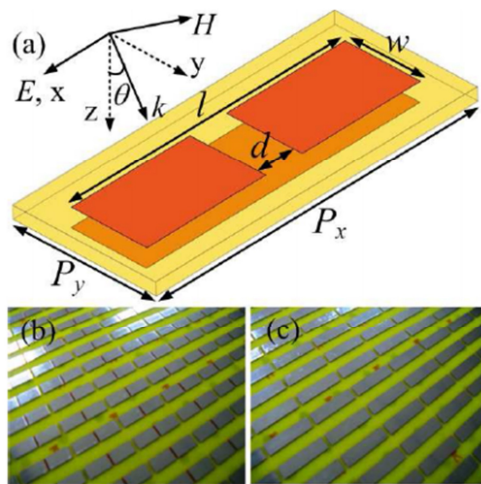
در روش استفاده از مواد جاذب راداری، مواد جاذب راداری با جذب موج و تلف کردن آن باعث کاهش امواج برگشتی به سمت رادار شده و باعث کاهش سطح مقطع راداری می‌شود. اما این روش باعث افزایش وزن و حجم جسم می‌شود. مواد جاذب می‌توانند به دو صورت رنگ پوششی و ساختارهای پوششی باشند (شکل (۹-۱)).



شکل (۷-۱) (الف) تاثیر نقاط نوک تیز در پراکندگی. (ب) هواپیمای F-117 [۷]



شکل (۸-۱) هواپیمای B-2 [۷]



(ب)

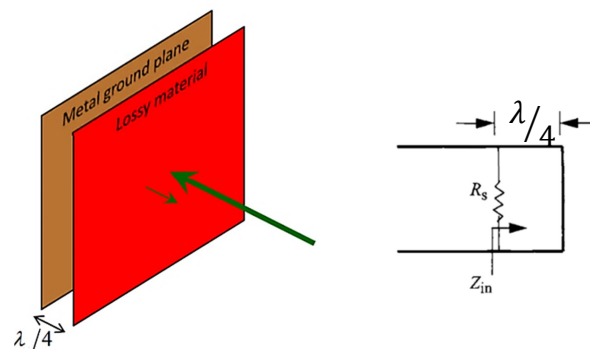


(الف)

شکل (۹-۱) جاذب‌ها (الف) رنگ‌های پوششی (ب) ساختارهای پوششی [۸]

روش غیرفعال و مواد جاذب راداری^۱ (RAM) و استفاده از ساختارهای هادی مغناطیسی مصنوعی^۲ (AMC) خیلی شبیه به هم می‌باشند.

یکی از ساختارهای جاذب استفاده از صفحات سالیسبری^۳ است سالیسبری صفحه‌ای است که با فاصله $\lambda/4$ از صفحه‌ی زمین قرار دارد. با توجه به این فاصله و اتصال کوتاه بودن، زمین به مدار باز تبدیل شده و امپدانس بی‌نهایت ایجاد می‌شود و در کنار امپدانس ذاتی فضای آزاد، مقدار امپدانس ورودی، همان امپدانس آزاد بدست می‌آید که در رابطه‌ی (۱-۲۲) آمده است [۸].



شکل (۱۰-۱) مدار معادل صفحات سالیسبری [۸]

¹ Radar Absorbent Material

² Artificial magnetic conductor

³ Salisbury screen

$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{\infty} = \frac{1}{R_s} \quad (۱-۲۲)$$

به دلیل معلق بودن صفحه‌ی مقاومتی در هوا، این روش کاربرد زیادی ندارد و به خاطر تک لایه بودن آن و وابسته بودن به طول موج موج تابشی، پهنای باند باریکی دارد و زاویه تابش نیز محدود به زاویه های نزدیک به زاویه عمود است. برای رفع مشکل صفحات سالیسبری استفاده از صفحات جاذب جوامن^۱ مطرح شد. جاذب جوامن به جای یک صفحه‌ی مقاومتی از چند صفحه مقاومتی تشکیل شده است و با فاصله‌ی $\lambda/4$ از هم قرار گرفتند و که باعث افزایش پهنای باند شدند اما وزن و حجم آن افزایش یافت [۵]. می‌توان صفحات سالیسبری و جوامن را با صفحات با سطوح انتخابگر فرکانس^۲ که صفحاتی با ادمیتانس‌های مختلط جایگذاری کرد. این صفحات در حالت میان-گذری^۳ استفاده می‌شوند که می‌توان به صورت مدار RLC مدل کرد. به این جاذب‌ها، جاذب مدارهای آنالوگ (CA)^۴ می‌گویند. این نوع از جاذب‌ها پهنای باند بیشتری دارند اما همچنان مشکل حجم و وزن وجود دارد. تکنولوژی مورد نیاز برای ساخت این صفحات، که تنها در اختیار برخی از کشورهاست و همچنین هزینه‌ی زیادی دارند به همین دلیل زیاد به صرفه نیست.

یکی از بهترین جاذب‌های راداری، به کارگیری ساختارهای AMC می‌باشد. از انواع ساختار AMC می‌توان ساختار EBG^۵ را نام برد. این ساختار ویژگی‌های متنوعی دارد یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن داشتن باند فرکانسی ممنوعه می‌باشد یعنی در این باند فرکانسی اجازه عبور به هیچ موجی با هیچ قطبشی داده نمی‌شود.

ویژگی دیگر آن داشتن امپدانس سطحی بالا در یک گستره‌ی فرکانسی است که از این ویژگی

¹ Jaumann absorber

² Frequency selective surface (FSS)

³ Band pass filter

⁴ Circuit analog absorber (CA absorber)

⁵ Electromagnetic band-gap

برای کاهش سطح مقطع راداری استفاده می‌شود. این یعنی دامنه‌ی میدان الکتریکی روی سطح بزرگ و دامنه‌ی میدان مغناطیسی کوچک است. به همین دلیل فاز موج بازتاب شده تقریباً برابر با صفر است و ضریب بازتاب^۱ برابر با یک می‌باشد. فاز بازتاب بین 180° تا $180^\circ +$ متغیر است و در یک فرکانس از صفر می‌گذرد. به این فرکانس فرکانس تشدید^۲ می‌گویند و پهنای باند ساختار معمولاً از 90° تا $90^\circ +$ محاسبه می‌شود. فاز بازتاب شده از سطح زمین برابر با 180° است اگر ساختار EBG و زمین به صورت مناسب در کنار هم چیده شوند باعث کاهش سطح مقطع راداری می‌شوند. این روش به دلیل سبک بودن و نازک بودن ساختار بسیار مورد توجه است. در سطح ساختار موج تابیده شده با زاویه‌های مختلف بازتاب می‌شوند که باعث کاهش سطح مقطع راداری می‌شود. اما به دلیل اینکه پهنای باند، محدود به فاز بین 90° تا $90^\circ +$ می‌شود پهنای باند باریکی دارد [۹].

۴-۱ مروری بر تحقیقات گذشته

اولین سطح EBG که ویژگی امپدانس سطحی زیاد آن مورد توجه قرار گرفت در سال ۱۹۹۹ مطرح شد [۱۰]. تاثیر ساختار امپدانس بالای ارائه شده را بر آنتن مورد بررسی قرار دادند و مشاهده شد با توجه به اینکه جریان سطحی روی این سطوح منتشر نمی‌شوند اثر لبه‌های آنتن کاهش یافت. در این مقاله از مدل مداری برای توجیه شکل استفاده شده است. این سطح در یک باند فرکانسی خاص هیچ موجی را عبور نداد. در [۱۱] یک سطح EBG قارچی شکل ارائه شد که از نظر فاز برگشتی مورد بررسی قرار گرفت و این نکته که برای اینکه تلفات بازگشتی بهتری حاصل شود فاز بازگشتی باید $90^\circ \pm 45^\circ$ باشد، مورد توجه قرار گرفت. در [۱۲] در سال ۲۰۰۷ موفق شدند با قرار دادن دو نوع سلول EBG در کنار هم به پهنای باند ۵٪ دست پیدا کنند. هدف در این مقاله کاهش ضخامت ساختار

¹ Reflection coefficient

² Resonance frequency

بوده است که تا حدود $\lambda/16$ کاهش یافت اما به دلیل وابستگی به طول موج پهنای باند باریکی حاصل شد. در [۱۳] طرح ساده‌تری ارائه شد که شامل یک سلول زمین و عایق دی الکتریک بود که توان بازگشتی نسبت به توان تابشی مورد مقایسه قرار گرفت و پهنای باند این ساختار نیز محدود و ۱۲٪ بدست آمد. به دلیل محدودیت پهنای باند تصمیم گرفتند دو نوع از EBG مختلف را کنار هم قرار دهند در سال ۲۰۱۳ توانسته با قرار دادن دو سلول شامل دو اندازه‌ی مختلف صلیب اورشلیمی با کنار هم به پهنای باند ۴۰٪ دست یابند [۱۴]. که در [۱۵] هم از همین روش استفاده شد و دو سلول با پیچ فلزی مربعی و دایره ای در کنار هم قرار داده شدند و پهنای باند ۲۶.۷٪ حاصل شد یعنی حدودا از ۱۱.۵ GHz تا ۱۳.۲ GHz پوشش داد. در سال ۲۰۱۵ با در نظر گرفتن دو سلول با پیچ های متفاوت و بررسی کردن ضخامت های مختلف زیرلایه به پهنای باند ۸۵٪ دست یافتند [۱۶]. در [۱۷] دو EBG در کنار هم قرار گرفت که باعث ایجاد ساختار دو بانده، پهنای باند ۶۱٪ و ۲۴٪ حاصل گشت.

فصل دوم :

بررسی ویژگی های سطوح EBG

۲-۱ مقدمه

در این فصل به توضیح ساختارهای EBG پرداخته و از نظر پارامترهای هندسی موثر و زاویه بازتابش این ساختارها مورد بررسی قرار می‌گیرد و همچنین چگونگی استفاده از این ساختار در کاهش سطح مقطع راداری مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲-۲ ویژگی ساختارهای EBG

در بسیاری از موارد، حضور یک هادی الکتریکی می‌تواند بر عملکرد دستگاه‌های الکترومغناطیسی تاثیر منفی بگذارد به خصوص در ارتباطات رادیویی. سطوح هادی الکتریکی به عنوان یک بازتابنده بسیار مفید هستند اما فاز موج منعکس شده را معکوس می‌کنند. همچنین این سطوح امواج سطحی را منتشر می‌کنند که بر عملکرد آنتن‌ها تاثیر منفی دارد. اما این ویژگی‌ها را می‌توان با تغییر دادن شکل هندسی سطح، جبران کرد یعنی می‌توان با استفاده از یک ساختار خاص از یک سطح هادی، ویژگی آن را تغییر داد و در یک باند فرکانسی فقط جریان DC را عبور دهد و جریان AC را عبور ندهد. این ساختار جدید امپدانس سطحی الکترومغناطیسی بالایی دارد و فاز موج برگشتی را معکوس نمی‌کند [۱۰].

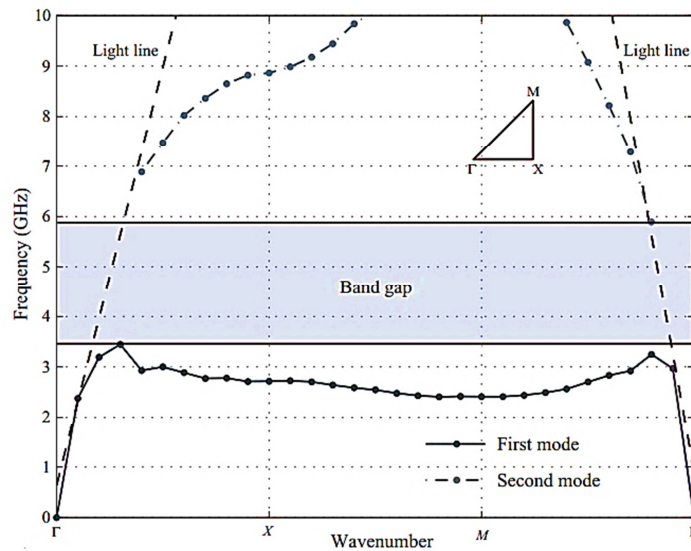
۲-۲-۱ انتشار امواج

بر اساس موج ورودی به سطح ساختار EBG می‌توان دو رفتار متفاوت مشاهده کرد:

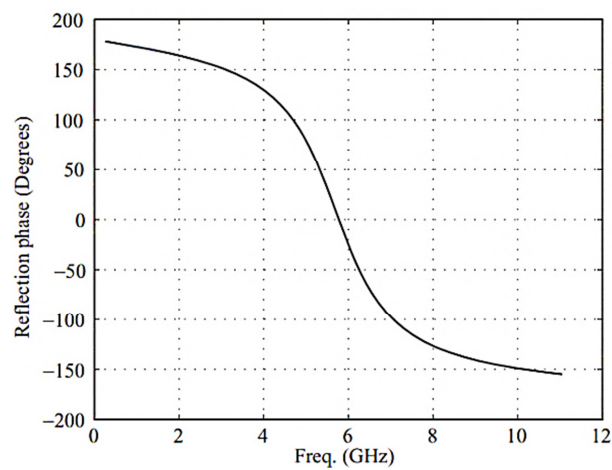
الف) اگر موج برخوردی، موج سطحی (شامل شروط k_z خالص موهومی و $k_x^2 + k_y^2 > k_0^2$) باشد در باند فرکانسی ساختار، یک باند قطع^۱ دیده می‌شود که هیچ موجی را با هیچ قطبشی منتشر نمی‌کند (شکل (۲-۱)).

^۱ Stop band

ب) اگر موج برخوردی موج تخت (شامل شروط k_z خالص حقیقی و $k_x^2 + k_y^2 \leq k_0^2$) باشد در این صورت فاز بازگشتی وابسته به فرکانس می‌باشد و در فرکانس مرکزی فاز برگشتی برابر با صفر است که مانندیک هادی مغناطیسی کامل^۱ عمل می‌کند (شکل (۲-۲)).



شکل (۲-۱) باند ممنوعه در برخورد موج سطحی [۹]



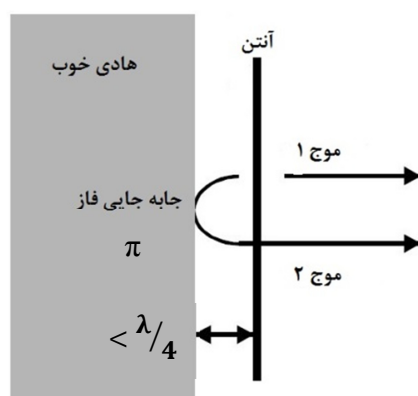
شکل (۲-۲) ضریب فاز بازگشتی برای موج برخوردی تخت [۹]

¹ Perfect magnetic conductor

۲-۲-۲ فاز بازگشتی از سطح ساختار

در کنار ویژگی موج سطحی، برگشت فاز ساختار EBG رفتار جالبی دارد. ضریب بازتاب برای توضیح بازتابش یک جسم مورد استفاده قرار می‌گیرد که با نسبت میدان بازتابش به میدان برخوردی محاسبه می‌شود. معمولاً این نسبت یک مقدار مختلط است و شامل یک بخش دامنه و یک فاز می‌باشد در ساختارهای کم تلف مقدار دامنه معمولاً یک در نظر گرفته می‌شود و همه‌ی انرژی‌های برخوردی به سطح، به عقب بازگردانده می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۳-۲) آمده است اگر این ورقه فلزی در فاصله‌ی کم از آنتن قرار گیرد فاز موج عقب برگشت داده شده و فاز موج برخوردی یک تداخل را ایجاد کرده و در همان مسیر منتشر می‌شوند [۱۰].

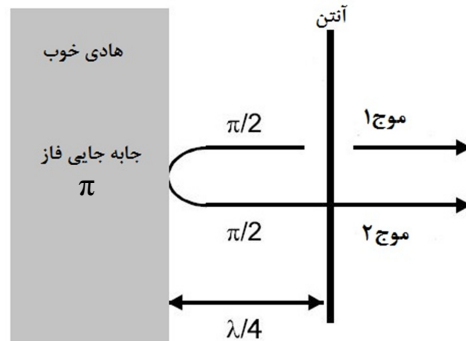


شکل (۳-۲) آنتن قرار گرفته شده در برابر یک صفحه‌ی فلزی با فاصله‌ی کمتر $\lambda/4$ [۱۰]

این تداخل معادل این است که جریان تصویر در ورق رسانا، جریان‌های آنتن را تغییر می‌دهد و باعث می‌شود توان تشعشعی تغییر کند. با درج فاصله‌ی $\lambda/4$ بین آنتن و هادی کامل، همان‌طور که در شکل (۴-۲) آمده است، جابه‌جایی فاز از آنتن به سطح هادی و برگشت مجدد به آنتن به اندازه‌ی یک چرخه‌ی کامل می‌شود و امواج به صورت سازنده با هم ترکیب شده و بازدهی زیاد می‌شود.

این ویژگی جالب یعنی فاز بازگشتی از سطح EBG، در طراحی بسیاری از آنتن‌ها و دستگاه‌های

مایکرووی می مانند عناصر بازتابنده^۱ و قطبیده^۲ ها مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل (۴-۲) آنتن قرار گرفته شده در برابر یک صفحه ی فلزی با فاصله $\lambda/4$ [۱۰]

برای بررسی ویژگی ها ابتدا از یک هادی الکتریکی کامل شروع می کنیم. اگر یک موج تخت به صورت عمودی بر روی سطح هادی کامل تابیده شود میدان الکتریکی مماسی کلی (E) طبق شرایط مرزی صفر می شود بنابراین میدان الکتریکی بازتابی و میدان الکتریکی برخوردی باید علامت مخالف با هم داشته باشند در نتیجه ضریب بازتاب برابر با -۱ می شود. فاز بازگشتی یک هادی الکتریکی کامل برابر با ۱۸۰° است. برای یک هادی مغناطیسی کامل میدان مغناطیسی مماسی کلی (H) باید صفر شود. بنابراین باید میدان مغناطیسی بازتابی و میدان مغناطیسی تابشی علامت مخالف با هم داشته باشند در حالیکه میدان الکتریکی برخوردی و تابشی هم علامت باشند بنابراین ضریب بازگشت هادی مغناطیسی کامل برابر با +۱ می باشد. فاز بازگشتی برای هادی مغناطیسی کامل صفر درجه می باشد. ساختارهای EBG در فرکانس مرکزی خودشان می توانند مانند PMC عمل کنند. در این شرایط EBG مانند ساختار AMC عمل می کند و فاز برگشتی به فرکانس وابسته می باشد و با افزایش فرکانس، فاز از -۱۸۰° تا $+۱۸۰^{\circ}$ متغیر است. با این ویژگی، EBG یک ساختار منحصر به فرد محسوب می شود.

¹ Reflector

² Polarizer

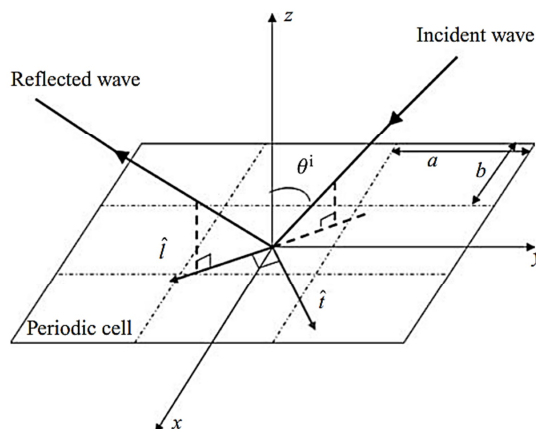
۱-۲-۲-۲ بدست آوردن امپدانس و فاز بازگشتی و پهنای باند

فرض می‌شود موج برخوردی به یک صفحه زمین متناوب (EBG) دارای عدهای موج (k_x, k_y, k_z) و k_0 عدد موج در فضای آزاد می‌باشد و میدان‌های ورودی در حوزه‌ی زمانی $(e^{j\omega t})$ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\vec{E}^i = (E_{TM}^i \hat{l} + E_{TE}^i \hat{t} + E_z^i \hat{z}) e^{jk_x x + jk_y y + jk_z z} \quad (1-2)$$

$$\vec{H}^i = (H_{TE}^i \hat{l} + H_{TM}^i \hat{t} + H_z^i \hat{z}) e^{jk_x x + jk_y y + jk_z z} \quad (2-2)$$

در موج TMz، میدان الکتریکی دارای مولفه‌های طولی و z، میدان مغناطیسی دارای مولفه‌ی عرضی است و در موج TEz این شرایط برعکس می‌باشد یعنی میدان مغناطیسی دارای مولفه‌های طولی و z، میدان الکتریکی دارای مولفه‌ی عرضی می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۵-۲) آورده شده است طول تناوب سلول‌های شکل در جهت x برابر با a و در جهت y برابر با b فرض می‌شود و θ_i زاویه موج ورودی و $\hat{A}$ جهت طولی و $\hat{t}$ جهت عرضی را نشان می‌دهند.



شکل (۵-۲) موج ورودی الکترومغناطیسی به سطح متناوب. θ_i زاویه موج ورودی و $\hat{A}$ جهت طولی و $\hat{t}$ جهت عرضی [۹]

میدان مماسی در فضای آزاد بالای سطح یک زمین متناوب (EBG) را می‌توان با مجموع موج

برخوردی و بازتابی معادل دانست که در رابطه‌ی (۳-۲) و (۴-۲) آمده است.

$$\vec{E}_{tan} = \vec{E}_{tan}^i + \vec{E}_{tan}^r =$$

$$\vec{E}_{tan}^{00} + \sum_m \sum_n (E_{TM}^{mn} \hat{l} + E_{TE}^{mn} \hat{t}) \times e^{j(m\frac{2\pi}{a}x + n\frac{2\pi}{b}y)} e^{-jk_z^{mn}z} \quad (۳-۲)$$

$$\vec{H}_{tan} = \vec{H}_{tan}^i + \vec{H}_{tan}^r =$$

$$\vec{H}_{tan}^{00} + \sum_m \sum_n (H_{TE}^{mn} \hat{l} + H_{TM}^{mn} \hat{t}) \times e^{j(n\frac{2\pi}{a}x + m\frac{2\pi}{b}y)} e^{-jk_z^{mn}z} \quad (۴-۲)$$

$$\left(k_x + m\frac{2\pi}{a}\right)^2 + \left(k_y + n\frac{2\pi}{b}\right)^2 + (k_z^{mn})^2 = k_0^2 \quad (۵-۲)$$

در رابطه‌های بالا هامونیک‌های زیادی دیده می‌شود برای هارمونیک صفر رابطه‌های زیر برقرار می‌باشند:

$$\vec{E}_{tan}^{00} = (\vec{E}_{TM}^i e^{jk_z z} + \vec{E}_{TM}^{00} e^{-jk_z z}) \hat{l} + (\vec{E}_{TE}^i e^{jk_z z} + \vec{E}_{TE}^{00} e^{-jk_z z}) \hat{t} \quad (۶-۲)$$

$$\vec{H}_{tan}^{00} = (\vec{H}_{TE}^i e^{jk_z z} + \vec{H}_{TE}^{00} e^{-jk_z z}) \hat{l} + (\vec{H}_{TM}^i e^{jk_z z} + \vec{H}_{TM}^{00} e^{-jk_z z}) \hat{t} \quad (۷-۲)$$

با استفاده از این رابطه می‌توان امپدانس و ضریب بازتاب ساختار زمین متناوب را بدست آورد. امپدانس TM یا TE یک سطح برابر است با نسبت میدان الکتریکی مماسی بر میدان مغناطیسی مماسی روی سطح.

$$E_{TE}^i = H_{TE}^i = 0 \rightarrow Z_{TM} = \frac{E_{TM}^i + E_{TM}^{00}}{H_{TM}^i + H_{TM}^{0,0}} \quad (۸-۲)$$

$$E_{TM}^i = H_{TM}^i = 0 \rightarrow Z_{TE} = \frac{E_{TE}^i + E_{TE}^{00}}{H_{TE}^i + H_{TE}^{00}} \quad (۹-۲)$$

و ضریب بازتاب TE و TM سطح با استفاده از هامونیک صفر به صورت زیر بدست می آید:

$$E_{TE}^i = H_{TE}^i = 0 \rightarrow R_{TM} = \frac{H_{TM}^{00}}{H_{TM}^i} = -\frac{E_{TM}^{00}}{E_{TM}^i} \quad (۱۰-۲)$$

$$E_{TM}^i = H_{TM}^i = 0 \rightarrow R_{TE} = \frac{E_{TE}^{00}}{E_{TE}^i} = -\frac{H_{TE}^{00}}{H_{TE}^i} \quad (۱۱-۲)$$

می توان ضریب بازگشت را از روی امپدانس سطح و امپدانس موج نیز بدست آورد:

$$R_{TM} = -\frac{Z_{TM} - Z_{TM}^{wave}}{Z_{TM} + Z_{TM}^{wave}} \quad (۱۲-۲)$$

$$R_{TE} = -\frac{Z_{TE} - Z_{TE}^{wave}}{Z_{TE} + Z_{TE}^{wave}} \quad (۱۳-۲)$$

و همچنین :

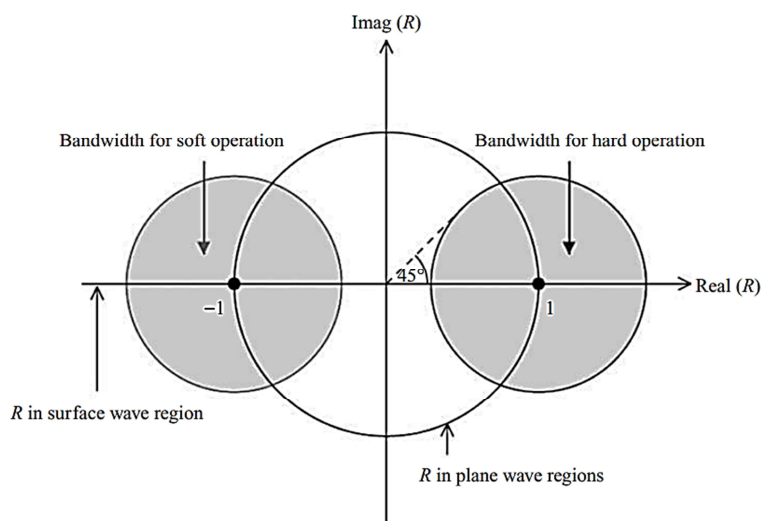
$$Z_{TM}^{wave} = \frac{E_{TM}^i}{H_{TM}^i} = -\frac{E_{TM}^{0,0}}{H_{TM}^{0,0}} = \frac{k_z}{k_0} \eta_0 \quad (۱۴-۲)$$

$$Z_{TE}^{wave} = \frac{E_{TE}^i}{H_{TE}^i} = -\frac{E_{TE}^{0,0}}{H_{TE}^{0,0}} = \frac{k_0}{k_z} \eta_0 \quad (۱۵-۲)$$

جدول (۱-۲) مقایسه ی بین امپدانس های موج و امپدانس های سطحی و ضریب های بازگشت موج تخت و موج سطحی را بیان می کند. وقتی موج ورودی موج تخت باشد امپدانس موج، حقیقی است و برای یک زمین تلفاتی امپدانس سطحی موهومی خالص است و دامنه ضریب بازگشت برابر با یک و فاز ضریب بازتاب متغیر با فرکانس می باشد. وقتی موج ورودی موج سطحی باشد امپدانس موج همیشه موهومی است و (مطابق با شکل (۲-۶)) دامنه ی ضریب بازگشت با فرکانس عوض می شود و فاز بین 0° تا 180° تغییر می کند.

جدول (۱-۲) پارامترهای موج در ناحیه‌های موج تخت و موج سطحی [۹]

	Identification	Wave impedance	Surface impedance	Reflection coefficient
Plane wave region	$k_x^2 + k_y^2 < k_0^2$, k_z Real	Real	Imaginary	Complex, $|R| = 1$
Surface wave region	$k_x^2 + k_y^2 > k_0^2$, k_z Imaginary	Imaginary	Imaginary	Real



شکل (۲-۶) صفحه مختلط R و دایره‌های پهنای باند برای عملکرد نرم و سخت. در ناحیه موج تخت، R در دایره واحد و در ناحیه موج سطحی R در امتداد محور حقیقی متغیر است [۹]

۳-۲-۲ عملکرد نرم یا سخت

عملکرد نرم برای قطبش TM (یا TE) به این معنی است که میدان کلی مغناطیسی (یا الکتریکی) در جهت عرضی صفر و عملکرد سخت نیز برای قطبش TM (یا TE) به این معنی است که میدان کلی مغناطیسی (یا الکتریکی) در جهت طولی صفر باشد. عملکرد نرم و سخت ایده آل در شرایط زیر به ترتیب در رابطه‌ی (۱۶-۲) و (۱۷-۲) تعریف می‌شود:

$$R = -1 \quad (۱۶-۲)$$

$$R = +1 \quad (۱۷-۲)$$

و پهنای باند به صورت رابطه‌ی (۱۸-۲) و (۱۹-۲) آورده شده است:

$$BW_s = \left\{ (k_x, k_y, k_0) \mid F^s = \left| R(k_x, k_y, k_0) - (-1) \right| < \frac{1}{\sqrt{2}} \right\} \quad (18-2)$$

$$BW_h = \left\{ (k_x, k_y, k_0) \mid F^h = \left| R(k_x, k_y, k_0) - 1 \right| < \frac{1}{\sqrt{2}} \right\} \quad (19-2)$$

طبق رابطه‌های (۱۲-۲) و (۱۳-۲) اگر امپدانس سطحی TM بالا باشد و امپدانس سطحی TE پایین باشد ضریب بازتاب برابر با ۱- می‌شود که یعنی سطح نرم است و اگر امپدانس TM پایین و امپدانس TE بالا باشد ضریب بازتاب برابر با ۱+ می‌شود و برای امواج TM و TE مانند یک سطح سخت عمل می‌کند.

PEC برای امواج TM و TE امپدانس سطحی صفر دارد و برای امواج TM رفتار سخت و برای امواج TE رفتار نرم از خود نشان می‌دهد و PMC عکس این رفتار را دارد یعنی برای امواج TM و TE امپدانس سطحی بی‌نهایت دارد و برای امواج TM رفتار نرم و برای امواج TE رفتار سخت از خود نشان می‌دهد.

۱-۳-۲-۲ نمونه‌ای از ساختار EBG

با در نظر گرفتن یک نمونه از EBG ویژگی‌های آن را بررسی می‌کنیم. با ترکیب یک بافت خاص بر روی سطح هادی، می‌توان خواص سطوح در فرکانس رادیویی را تغییر داد. معمولاً ساختارهای EBG شامل ۴ بخش هستند. صفحه‌ی زمین فلزی، زیرلایه‌ی دی الکتریک، پیچ^۱ فلزی پریودیک که روی زیرلایه قرار گرفته است و تعدادی سوراخ (via) که صفحه‌ی زمین را به پیچ وصل می‌کند (سوراخ via می‌تواند وجود نداشته باشد) [۹].

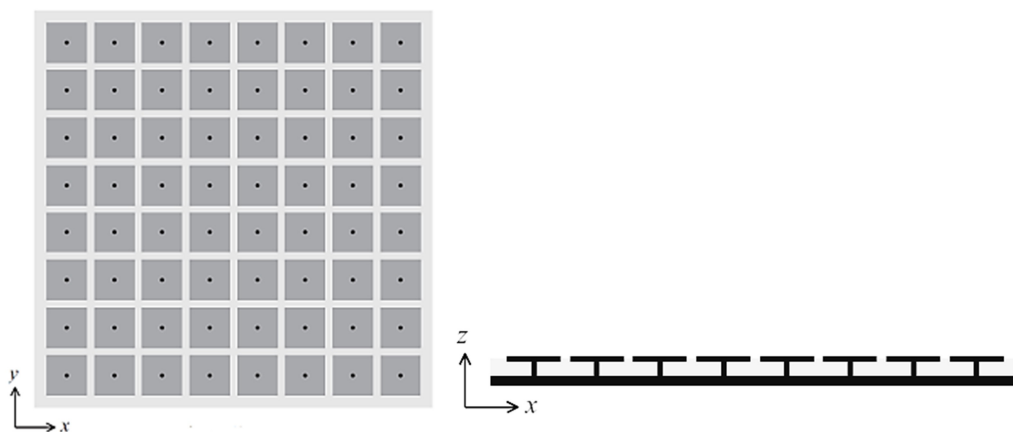
¹ Patch

جدول (۲-۲). ضریب بازتاب و امپدانس سطحی برای سطوح نرم، سخت، PEC و PMC [۹]

	TM	TE
Soft surface	$R_{TM} = -1, Z_{TM} = \infty$ (Soft)	$R_{TE} = -1, Z_{TE} = 0$ (Soft)
Hard surface	$R_{TM} = 1, Z_{TM} = 0$ (Hard)	$R_{TE} = 1, Z_{TE} = \infty$ (Hard)
PEC	$R_{TM} = 1, Z_{TM} = 0$ (Hard)	$R_{TE} = -1, Z_{TE} = 0$ (Soft)
PMC	$R_{TM} = -1, Z_{TM} = \infty$ (Soft)	$R_{TE} = 1, Z_{TE} = \infty$ (Hard)

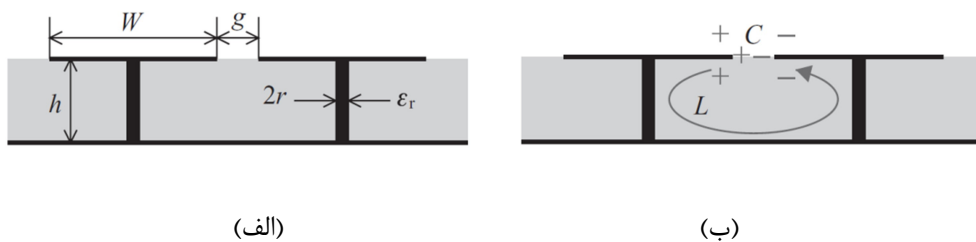
■ تحلیل مداری ساختار EBG

یکی از اولین شکل‌های مطرح شده، EBG قارچی^۱ شکلی است که در شکل (۷-۲) آورده شده است. پارامترهای w پهنای پیچ، h ضخامت زیرلایه، ϵ_r ثابت دی‌الکتریک، g شکاف و r شعاع سوراخ (via) را نشان می‌دهند. از آنجاییکه دوره تناوب ساختار $(w+g)$ در مقایسه با طول موج کاری، کوچک می‌باشد، عملکرد ساختار EBG مورد نظر را می‌توان با استفاده از یک مدار معادل، شامل عناصر LC توضیح داد (شکل (۸-۲)). خازن C از فاصله‌ی بین پیچ‌ها و سلف L از جریان جاری شده در طول پیچ‌های کنار هم ایجاد می‌شوند (شکل (۸-۲)). امپدانس LC موازی از رابطه‌ی (۲۰-۲) و (۲۱-۲) بدست می‌آید.



شکل (۷-۲) نمایش صفحه‌ی امپدانس بالای قارچی EBG (الف) نما از کنار (ب) نما از بالا [۹]

^۱Mushroom-like electromagnetic band gap



شکل (۸-۲) مدل LC ساختار قارچی شکل EBG (الف) پارامترهای EBG (ب) مدل LC [۹]

اگر اندازه‌ی هر سلول نسبت به طول موج کوچک باشد، ویژگی‌های مغناطیسی آن‌ها را می‌توان با استفاده از عناصر مداری خازن‌ها و سلف‌ها توصیف کرد. مجاورت عناصر فلزی باعث ایجاد ظرفیت خازنی و وجود جریان در مسیر اتصال بخش‌های مختلف فلزی باعث به وجود آمدن سلف می‌شود که به صورت مدارهای تشدیدکننده‌ی LC موازی معادل می‌شوند و فیلتر الکتریکی^۱ محسوب شده و جریان الکتریکی را مسدود می‌کند (شکل (۸-۲)).

به صورت ساده‌تر در این قسمت، مدار معادل را تحلیل می‌کنیم:

فرض می‌شود که موج تخت بر سطح ساختار تابیده شده است و ساختار با استفاده از تئوری خط انتقال، تحلیل می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم ضریب بازگشت PEC برابر با -۱ و ضریب بازگشت PMC برابر با +۱ می‌باشد. برای تحلیل دقیق‌تر بهتر است مقدار دامنه با هم برابر ولی در فاز متفاوت باشند پس باید به دنبال فاز متغیر با فرکانس و دامنه‌ی ثابت نسبت به تغییرات فرکانس بگردیم بنابراین باید این دو کمیت، دو عدد مزدوج با هم باشند. Z_0 امپدانس فضای آزاد و حقیقی خالص و Z_s امپدانس خط ساختار می‌باشد [۱۸].

$$\Gamma = \frac{Z_s - \eta_0}{Z_s + \eta_0} \quad (۲۰-۲)$$

$$Z_s = jX \quad (۲۱-۲)$$

^۱ Electric filter

می‌دانیم برای پیدا کردن پهنای باند، فاز باید -90° تا $+90^\circ$ باشد بنابراین داریم:

$$|\Gamma| = 1 \quad (22-2)$$

$$\angle \Gamma = \pi - 2 \tan^{-1} \left(\frac{X}{\eta_0} \right) \quad (23-2)$$

$$-90^\circ \leq \Gamma \leq +90^\circ \quad (24-2)$$

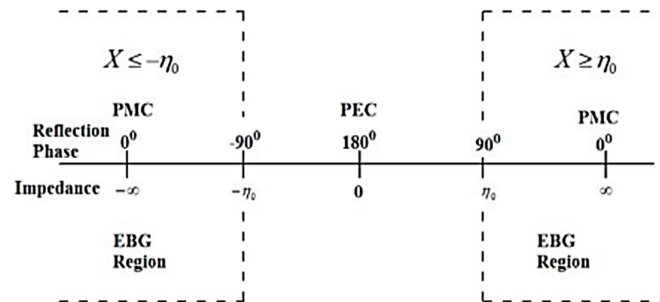
$$-90^\circ \leq \pi - 2 \tan^{-1} \left(\frac{X}{\eta_0} \right) \leq +90^\circ \quad (25-2)$$

$$-270^\circ \leq -2 \tan^{-1} \left(\frac{X}{\eta_0} \right) \leq -90^\circ \quad (26-2)$$

$$135^\circ \leq -2 \tan^{-1} \left(\frac{X}{\eta_0} \right) \leq 45^\circ \quad (27-2)$$

$$-1 \leq \frac{X}{\eta_0} \leq 1 \quad (28-2)$$

$$-\eta_0 \leq X \leq \eta_0 \quad (29-2)$$



شکل (۹-۲) رابطه‌ی بین امپدانس و فاز بازگشتی در EBG [۱۸]

همان‌طور که روی شکل (۹-۲) می‌بینیم وقتی فاز -90° باشد امپدانس $-\eta_0$ و وقتی $+90^\circ$ باشد

امپدانس $+\eta_0$ می‌باشد. فرض می‌کنیم فرکانس ω_1 در $X = +\eta_0$ باشد بنابراین داریم:

$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} \quad (30-2)$$

$$\eta_0 = \frac{\omega_1 L}{1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2} \quad (۳۱-۲)$$

$$1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2 = \frac{\omega_1 L}{\eta_0} \quad (۳۲-۲)$$

$$\omega_0^2 - \omega_1^2 = \frac{\omega_0^2 L \omega_1}{\eta_0} \quad (۳۳-۲)$$

فرض می‌کنیم فرکانس ω_2 در $X = -\eta_0$ باشد بنابراین داریم:

$$-\eta_0 = \frac{\omega_2 L}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_0}\right)^2} \quad (۳۴-۲)$$

$$1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_0}\right)^2 = -\frac{\omega_2 L}{\eta_0} \quad (۳۵-۲)$$

$$\omega_0^2 - \omega_2^2 = -\frac{\omega_0^2 L \omega_2}{\eta_0} \quad (۳۶-۲)$$

اگر دو طرف معادله‌ی (۳۵-۲) و (۳۶-۲) را از هم کم کنیم :

$$\omega_2^2 - \omega_1^2 = \frac{\omega_0^2 L}{\eta_0} (\omega_1 + \omega_2) \quad (۳۷-۲)$$

$$(\omega_1 + \omega_2)(\omega_2 - \omega_1) - \frac{\omega_0^2 L}{\eta_0} (\omega_1 + \omega_2) = 0 \quad (۳۸-۲)$$

$$(\omega_1 + \omega_2)\left(\omega_2 - \omega_1 - \frac{\omega_0^2 L}{\eta_0}\right) = 0 \quad (۳۹-۲)$$

$$\omega_2 - \omega_1 = \frac{\omega_0^2 L}{\eta_0} \quad (۴۰-۲)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (۴۱-۲)$$

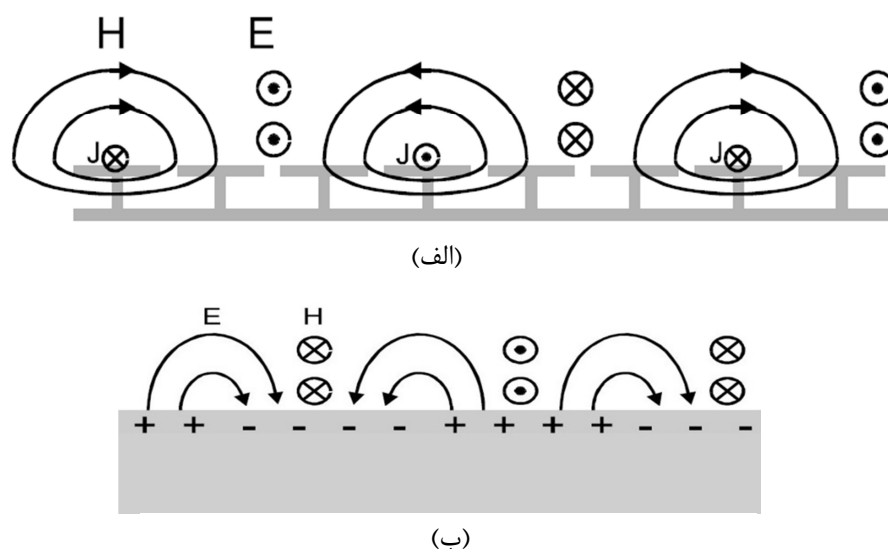
$$Bandwidth = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = \frac{\omega_0 L}{\eta_0} = \frac{1}{\eta_0} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (۴۲-۲)$$

$$Z_s = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (۴۳-۲)$$

به دلیل امپدانس غیرمعمول این ساختار، موج‌های روی سطح این ساختار و موج‌های روی هادی

کامل بسیار متفاوت هستند و در فرکانس‌های پایین، امپدانس خاصیت سلفی پیدا می‌کند و به موج سطحی TM اجازه‌ی منتشر شدن می‌دهد و همچنین در فرکانس‌های بالا امپدانس، خازنی می‌شود و TE را عبور می‌دهد. در نزدیک به فرکانس ω_0 که فرکانس تشدید ساختار است امپدانس بیشترین مقدار خود را دارد و اجازه‌ی انتشار به هیچ نوع موجی را نمی‌دهد. امپدانس سطحی بالا باعث می‌شود که موج تخت بدون برگشت فاز منتشر شود مانند یک سطح هادی الکتریکی کامل (PEC). در این شکل خازن با استفاده از خازن انگشتی^۱ بین صفحه‌های مشابه فلزی کنار هم بدست می‌آید و همچنین مقدار سلف از جریان حلقه‌ای شامل صفحات فلزی و سوراخ (via) بدست می‌آید.

در امواج سطحی TE، میدان الکتریکی بر روی سطح مماس می‌باشد و به جهت انتشار وابسته است، در حالیکه میدان مغناطیسی در حلقه بیرون از سطح گسترش می‌یابد. (شکل (۲-۱۰))



شکل (۲-۱۰) (الف) انتشار موج TE (ب) انتشار موج TM در اطراف سطحی با امپدانس بالا [۱۰]

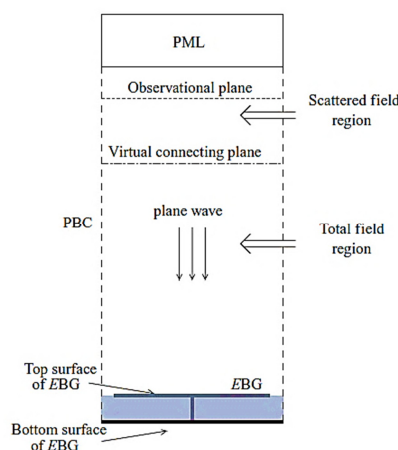
در محدوده‌ی فرکانسی که امپدانس سطح بسیار بالا است و میدان مغناطیسی مماسی کوچک است و میدان الکتریکی بزرگ می‌باشد. چنین ساختاری رابه عنوان یک "هادی مغناطیسی کامل" توصیف می‌کنند. این یک ایده ریاضی است که در برخی از مشکلات الکترومغناطیس مورد استفاده

¹ Interdigital capacitor

قرار می‌گیرد، اما در واقعیت وجود ندارد. داشتن امپدانس بالا باعث شد تا در یک محدوده فرکانسی خاص این سطح جدید، یک نوع هادی مغناطیسی در نظر گرفته شود. به همین دلیل این سطح را می‌توان به عنوان صفحه‌ی زمین استفاده کرد. سطوح امپدانس بالا، تمام توان را درست مثل یک ورق فلزی بازتاب می‌کنند اما به جای فاز غیر مستقیم در همان فاز این کار را انجام می‌دهند یعنی اجازه می‌دهد عناصر سطح به صورت مستقیم تشعشع کند به عبارتی تصویر ایجاد شده‌ی جریان یک تداخل سازنده را موجب می‌شود و اگر این سطوح به عنوان زمین و بازتابنده‌ی آنتن‌ها استفاده شوند باعث افزایش بهره تشعشعی آن‌ها می‌شود. علاوه بر این، در یک باند فرکانسی خاص، این سطوح اجازه‌ی عبور موج را نمی‌دهند و به عبارتی باند ممنوعه دارند و پترن تشعشعی را بهبود می‌دهند.

۲-۳-۱-۱- بررسی برخورد موج تخت به صورت عمودی بر سطح EBG

برای این کار یک سلول از ساختار را در نظر گرفته می‌شود و شرایط مرزی تناوبی^۱ در هر چهار طرف آن قرار می‌گیرد تا در شبیه سازی این ساختار صفحه‌ی متناوب محسوب شود. همان طور که در شکل (۲-۱۱)، نشان داده می‌شود لایه‌ی تطبیق دهنده‌ی کامل^۲ در فاصله‌ی 0.55λ در بالای سطح EBG قرار می‌گیرد تا انرژی بازگشتی را بسنجد.



شکل (۲-۱۱) مدل تحلیل عددی ساختار EBG برای بدست آوردن فاز بازگشتی [۹]

^۱ Periodic boundary condition(PBC)

^۲ Perfectly matched layers(PML)

موج تخت ورودی به صورت عمودی از یک صفحه‌ی مجازی که در فاصله ی $\lambda 0.4$ از سطح EBG قرار دارد به سطح ساختار تابیده می‌شود و صفحه‌ی مشاهده در فاصله ی $\lambda 0.5$ و یا بیشتر در ناحیه میدان بازتاب شده قرار می‌گیرد تا میدان بازتابی را اندازه گیری کند اگر در فاصله‌ی کمتر قرار بگیرد. حالت‌های انتشاری زیادی وجود دارند و هنوز موج تخت ایجاد نشده است و نتایج تحت تاثیر حالت‌های بالاتر قرار می‌گیرد. به دلیل امکان انتخاب مکان‌های مختلفی که برای صفحه‌ی مشاهده وجود دارد و برای اینکه فاز بازتابش دقیق تر محاسبه شود یک مرجع فاز در نظر گرفته می‌شود و فاز نسبت با آن سنجیده می‌شود. برای بدست آوردن فاز بازگشتی، فاز بازگشتی از سطح ساختار مورد نظر را با یک صفحه‌ی PEC که دقیقاً اندازه‌ای برابر با همان ساختار دارد مورد مقایسه می‌گردد و از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$\phi = \phi^{EBG} - \phi^{PEC} + \pi \quad (2-44)$$

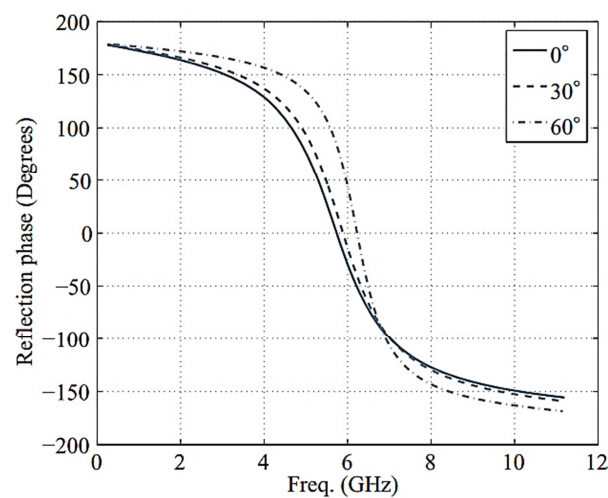
با این کار فاز انتشاری که ناشی از فاصله‌ی بین سطح بازتابش و صفحه‌ی مشاهده است از بین می‌رود و به دلیل وجود PEC و از آنجا که فاز بازگشتی آن π است از ثابت $+\pi$ استفاده شده است.

۲-۲-۳-۱-۲- بررسی برخورد موج تخت به صورت مایل بر سطح EBG

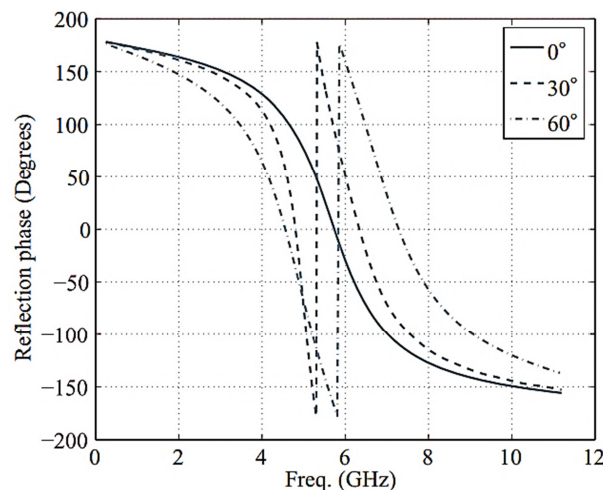
فاز بازگشتی ساختار EBG به زاویه موج برخوردی و قطبش آن وابسته است. در این قسمت نتایج فاز بازگشتی برای امواج ورودی با قطبش های TE و TM بررسی می‌شود. برای امواج برخوردی TE، میدان الکتریکی در راستای Y و موج تخت ورودی به صفحه ی XZ برخورد داده می‌شود. زاویه ورودی همان زاویه بین جهت انتشار و محور Z می‌باشد که از 0° تا 90° متغیر است. در شکل (۲-۱۲) فاز بازگشتی حاصل از برخورد موج TE در سه زاویه متفاوت آورده شده است. زمانی که زاویه موج

برخوردی افزایش پیدا می‌کند فرکانس تشدید (یعنی فرکانسی که فاز بازگشتی برابر صفر می باشد) کمی افزایش پیدا می‌کند.

روی شکل قابل مشاهده است زمانی که زاویه موج برخوردی زیاد شود در نزدیکی فرکانس تشدید شیب نمودار تند می‌شود. برای برخورد موج TM میدان مغناطیسی در جهت y و موج ورودی بر صفحه xz برخورد کرده و در شکل (۲-۱۳) برای سه زاویه 0° ، 30° و 60° و قطبش TM فاز بازگشتی، نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۲) شبیه سازی فاز بازگشتی موج TE از سطح EBG قارچی شکل در زاویه 0° و 30° و 60° [۹]

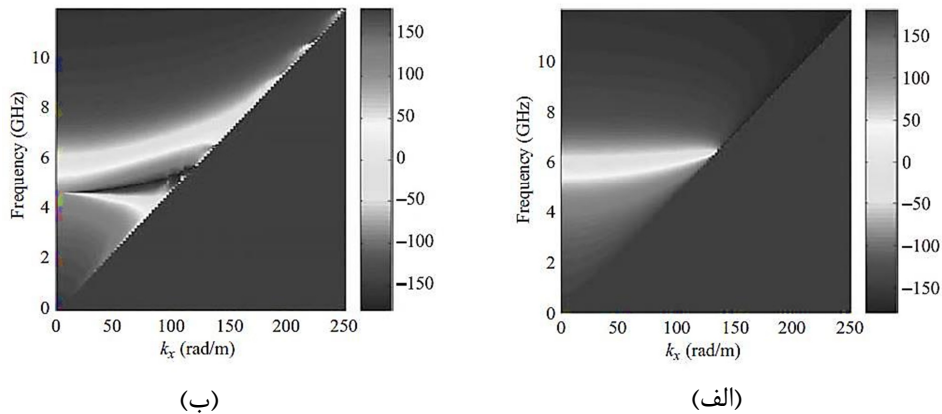


شکل (۲-۱۳) شبیه سازی فاز بازگشتی موج TM از سطح EBG قارچی شکل در زاویه 0° و 30° و 60° [۹]

برای موج با قطبش TM دو فرکانس تشدید بیشتر دیده می‌شود یک فرکانس پایین‌تر از فرکانس اصلی و فرکانس دیگر بالاتر از آن رخ می‌دهد. وقتی زاویه موج برخوردی افزایش می‌یابد فاصله‌ی این دو فرکانس افزایش پیدا می‌کند. دلیل اصلی تفاوت بین نتایج در دو قطبش TM و TE، وجود سوراخ (via) عمودی در مرکز پچ EBG می‌باشد. برای موج TE میدان الکتریکی عمود بر سوراخ (via) می‌باشد بنابراین شرایط مرزی تغییر نمی‌کند و بر موج با قطبش TE تاثیر ندارد و فاز بازگشتی فقط با استفاده از جریان سلف روی پچ فلزی بدست می‌آید. اما موج با قطبش TM یک مولفه‌ی موازی با سوراخ (via) دارد بنابراین شرایط مرزی روی سوراخ اعمال می‌شود و جریان روی سوراخ عمودی، تحریک می‌شود و دامنه‌ی جریان با تغییر زاویه ورودی تغییر می‌کند و فاز بازگشتی با در نظر گرفتن جریان روی پچ و جریان روی سوراخ تعیین می‌شود. رفتارهای فاز برگشتی برخورد مایل را می‌توان در صفحه‌ی فرکانس- k_x کاملاً مشاهده کرد. از ثابت k_x برای شرایط مرزی متناوب استفاده شده و در شبیه سازی FDTD برای ۱۰۱، k_x متفاوت از ۰ تا ۲۵۱.۳ رادیان/متر تکرار می‌شود. فازهای بازگشتی در هر فرکانس و k_x بدست آورده می‌شود. نتایج موج ورودی TE در شکل (۲-۱۴) (الف) و نتایج موج TM در شکل (۲-۱۴) (ب) آمده است. توجه داشته باشید که فقط به بخش موج تخت مورد نظر قرار گرفت یعنی:

$$k_0 = 2\pi f / c \geq k_x \quad (۲-۴۵)$$

برای موج ورودی TE زمانی که k_x افزایش پیدا می‌کند فرکانس تشدید کمی زیاد می‌شود. به عبارتی ناحیه اطراف صفر درجه باریک می‌شود. برای موج ورودی TM مشخص است دو فرکانس تشدید دارد.



شکل (۲-۱۴) شبیه سازی فاز بازگشتی EBG در صفحه ی k_x (الف) قطبش TE (ب) قطبش TM [۹]

۲-۴ پارامترهای موثر در طراحی EBG و بررسی آن ها

ویژگی‌های الکترومغناطیسی ساختارهای EBG به ابعاد فیزیکی آن وابسته است. برای مثال همان ساختار EBG قارچی شکل که در ابتدای فصل مطرح شد را در نظر می‌گیریم. چهار پارامتر موثر آن عبارتند از w ، g ، h و ϵ_r که به ترتیب بیان‌کننده‌ی پهنای پچ^۱، پهنای شکاف^۲، ضخامت زیرلایه^۳، گذردهی زیرلایه^۴. در این قسمت تاثیر هر یک از این مشخصات بر روی طراحی EBG بررسی خواهد شد. باید توجه شود که مقدار r یعنی شعاع سوراخ via در مقایسه با طول موج کاری بسیار کوچک است و تاثیر بسیار ناچیزی دارد. ابعاد EBG مرجع در ادامه آمده است:

$$w = 0.12 \lambda \text{ GHz} , g = 0.02 \lambda \text{ GHz}$$

$$h = 0.04 \lambda \text{ GHz} , \quad (۲-۴۶)$$

$$\epsilon_r = 2.20 \quad r = 0.005 \lambda \text{ GHz}$$

¹ Patch width

² Gap width

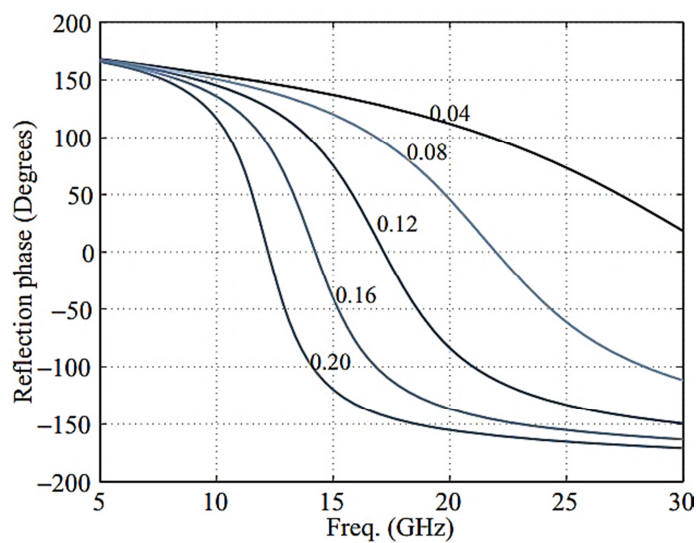
³ Substrate thickness

⁴ Substrate permittivity

۱-۴-۲-۲ تاثیر پهنای پچ

پهنای پچ نقش بسیار مهمی در تعیین فرکانس تشدید بازی می‌کند. حال که تاثیر پهنای پچ، مورد بررسی قرار می‌گیرد بقیه پارامترها که در اندازه‌هایی که در (۲-۴۵) ارائه شد ثابت می‌ماند. پهنای پچ از 0.04λ GHz به 0.2λ GHz تغییر داده شده است.

شکل (۲-۱۵) نشان می‌دهد که فازهای بازگشتی از سطوح EBG با پهنای پچ، تغییر می‌کند.

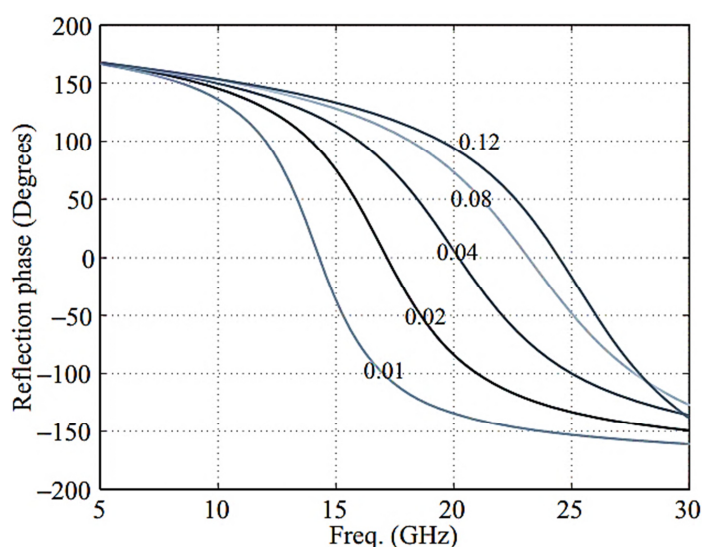


شکل (۲-۱۵) تاثیر پهنای پچ w بر فاز بازگشتی ساختار EBG [۹]

از شکل بالا قابل مشاهده است زمانی که پهنای پچ افزایش پیدا می‌کند فرکانس تشدید برای فاز بازگشتی 0° ، کاهش پیدا می‌کند. بنابراین شیب منحنی نزدیک به فرکانس تشدید تند می‌شود و نشان دهنده‌ی پهنای باند باریک می‌باشد. این ویژگی را می‌توان با استفاده از مدل مداری LC توضیح داد و پچ پهن تر نشان دهنده‌ی خازن بزرگ‌تر است بنابراین فرکانس کاهش پیدا می‌کند و پهنای باند باریک می‌شود.

۲-۴-۲-۲ تاثیر پهنای شکاف

پهنای شکاف تزویج بین پچ های کنار هم را کنترل می کند. تغییر پهنای شکاف بر باند فرکانسی سطوح EBG تاثیر دارد. برای بررسی این ویژگی باید بقیه پارامتر ها براساس (۲-۴۵) ثابت بماند. پهنای شکاف را از $0.01 \lambda \text{ GHz}$ تا $0.12 \lambda \text{ GHz}$ تغییر داده و بررسی می شود. در شکل (۲-۱۶) فاز های برگشتی سطوح EBG با پهنای شکاف متفاوت ارائه شده است. زمانی که پهنای شکاف زیاد می شود فرکانس تشدید افزایش پیدا می کند. شیب منحنی در نزدیکی فرکانس تشدید صاف شده که نشان دهنده ی پهنای باند پهن می باشد. می توان با استفاده از مدار معادل LC این موضوع را توضیح داد با افزایش پهنای شکاف، مقدار خازن کاهش پیدا می کند یعنی فرکانس تشدید و پهنای باند افزایش پیدا می کنند.

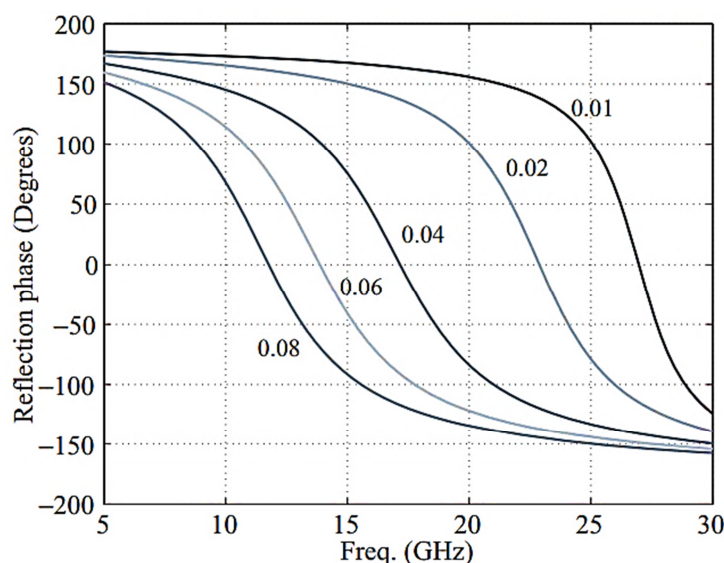


شکل (۲-۱۶) تاثیر پهنای شکاف g بر فاز بازگشتی ساختار EBG [۹]

۳-۴-۲-۲ تاثیر ضخامت زیرلایه

در قسمت های قبل دیدیم پهنای باند با فرکانس تشدید تغییر می کند. زمانی که فرکانس کاهش پیدا می کند پهنای باند باریک می شود. آیا می توان فرکانس تشدید را کاهش داد درحالی که پهنای باند

افزایش پیدا می‌کند؟ این هدف با تنظیم کردن میزان ضخامت زیرلایه قابل دسترسی است. برای شبیه‌سازی این بخش نیز بقیه پارامترها ثابت نگه‌داشته شد و ضخامت زیرلایه از 0.01λ GHz تا 0.09λ GHz تغییر کرده است. درضمن باید توجه‌داشت که در هر صورت ضخامت زیر لایه در مقایسه با طول موج کوچک باشد به این دلیل که هدف، داشتن یک EBG باریک می‌باشد. نمودار فاز بازگشتی تحت تاثیر تغییرات ضخامت زیرلایه در شکل (۲-۱۷) آورده شده است. قابل مشاهده است که وقتی ضخامت زیرلایه افزایش پیدا می‌کند فرکانس کاهش می‌یابد که مانند تاثیر پهنای پچ می‌باشد. با افزایش ضخامت زیرلایه شیب منحنی صاف شده و پهنای باند افزایش می‌یابد. میتوان با مدار LC این موضوع را توجیه کرد به این صورت که با افزایش ضخامت زیرلایه سلف معادل L افزایش می‌یابد بنابراین فرکانس کاهش و پهنای باند بیشتر می‌شود.

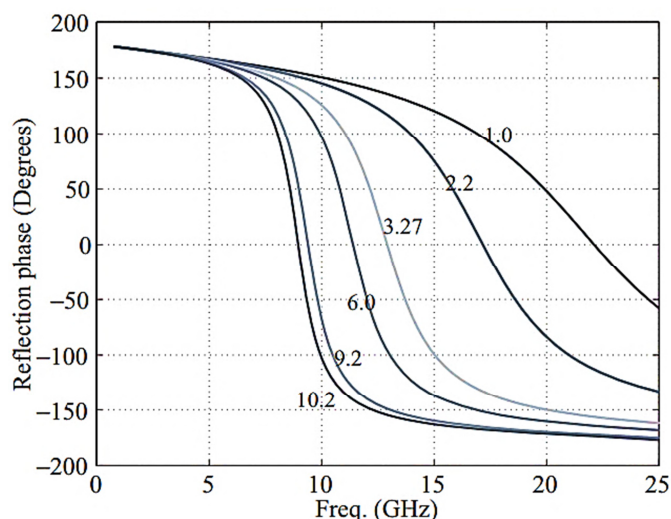


شکل (۲-۱۷) تاثیر ضخامت زیرلایه h بر فاز بازگشتی ساختار EBG [۹]

۴-۴-۲-۲ تاثیر گذردهی الکتریکی زیرلایه

گذردهی الکتریکی زیرلایه که به ثابت دی الکتریک معروف است یکی دیگر از پارامترهایی است که می‌توان با استفاده از آن رفتار فرکانس را کنترل کرد. زیرلایه‌های RT/duroid و TMM و هوا از جمله

زیرلایه های معروفی هستند که بسیار مورد استفاده می باشند. در این بخش نیز بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شده و گذردهی زیرلایه متغیر است. شکل (۲-۱۸) با تغییر گذردهی زیر لایه ترسیم شده است. زمانی که زیرلایه، هوا باشد ساختار EBG بیشترین فرکانس تشدید و بیشترین پهنای باند را دارد. زمانی که گذردهی افزایش پیدا می کند فرکانس تشدید کاهش می یابد و به تبع آن پهنای باند نیز کم می شود. بنابراین می توانیم برای کاهش اندازه ی سلول های EBG از یک زیرلایه با ثابت دی الکتریک بالا استفاده کنیم اما هزینه ی این کاهش اندازه، از دست دادن پهنای باند است دقیقاً شبیه به طراحی آنتن های میکرواستریپ می باشد.



شکل (۲-۱۸) تاثیر گذردهی زیرلایه ϵ_r بر فاز بازگشتی ساختار EBG [۹]

۲-۳ EBG و فرامواد^۱

در سال های اخیر ساختار های فرامواد بسیار گسترش پیدا کرده است. در یونان "Meta" به معنی ماوراء می باشد به این دلیل به این مواد، فراماده گفته شده است. فراماده در اصل به ساختارهایی گفته می شود که ویژگی های منحصر به فردی دارند. فراماده بسته به ویژگی های منحصر به فرد به دسته های زیر تقسیم می شوند:

¹ Metamaterial

۱. (Double negative materials) DNG: ساختاری که گذردهی الکتریکی و مغناطیسی

منفی داشته باشند.

۲. (Left hand materials) LH: ساختاری که در آن جهت میدان الکتریکی، جهت میدان

مغناطیسی و جهت انتشار موج با هم در قانون دست چپ صدق کنند.

۳. (Negative refractive index) NRI: موادی که شاخص انکسار منفی داشته باشند.

۴. Magneto material: مواد مغناطیسی با گذردهی بالای کنترل شده مصنوعی.

۵. Soft and hard surfaces: ساختاری است که می تواند موج های وارد شده به سطحش را

عبور دهد یا از عبور آن ها جلوگیری کند.

۶. High impedance surfaces: ساختاری با امپدانس سطحی نسبتا زیاد برای موج هایی با

قطبش TE و TM.

۷. (Artificial Magnetic Conductors) AMC: ساختاری که از خود ویژگی های یک هادی

مغناطیسی کامل را نشان می دهد.

یک ساختار می تواند چند مورد از ویژگی هایی که گفته شد را با هم داشته باشد برای مثال مواد

DNG معمولا هر دو خاصیت LH و NRI را از خود نشان می دهند. همچنین یک ساختار خط انتقال

فشرده ممکن است در یک فرکانس خاصیت LH از خود نشان دهد و در فرکانسی دیگر یک باند

شکاف فرکانسی محسوب شود.

داشتن ویژگی منحصر به فرد باند شکاف در ساختار EBG، این ساختار را به یک فراماده ویژه

تبدیل کرده است. در کنار این ویژگی، ویژگی های دیگر این ساختار هم بسیار مهم و پرکاربرد است.

از جمله داشتن امپدانس سطحی بالا می باشد که با این ویژگی شبیه به ساختارهای AMC عمل می -

کند. ساختار قارچی شکل که در ابتدای فصل مطرح شد برای موج هایی با هر دو قطبش TE و TM

امپدانس سطحی بالایی از خود نشان می دهد. زمانی که موج تختی به سطح EBG برخورد می کند

ضریب فاز برگشتی در بازه $\pm 90^\circ$ بدست می‌آید که مانند ساختار AMC رفتار کرده است. علاوه بر این عملکرد سخت و نرم ساختار EBG را نیز می‌توان در صفحه‌ی فرکانس - عدد موج مشاهده کرد. این ویژگی‌های جالب، در مهندسی آنتن، از آنتن‌های سیمی گرفته تا آنتن‌های میکرواستریپ و از آنتن‌هایی با قطبش خطی گرفته تا آنتن‌هایی با قطبش دایروی، از آنتن‌های معمولی و رایج گرفته تا آنتن‌هایی با طراحی جدید و خاص بسیار مورد توجه قرار گرفته است و کاربرد است.

فصل سوم:

ارائه ساختار جدید

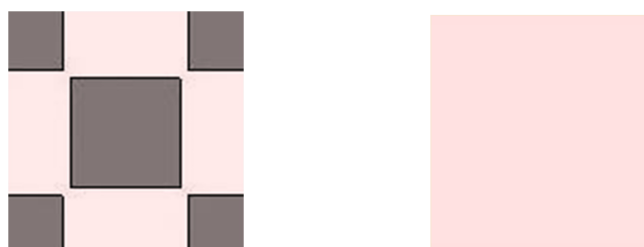
و بررسی ویژگی های آن

۱-۳ مقدمه

در این فصل به ارائه‌ی یک ساختار جدید برای کاهش سطح مقطع راداری پرداخته می‌شود و ویژگی‌های مختلف و منحصر به فرد این ساختار مورد بررسی و شبیه سازی قرار خواهد گرفت. این شبیه سازی ها با استفاده کردن از نرم افزارهای CST، ADS^۱ و Matlab انجام شده است.

۲-۳ ساختار جدید طراحی شده ی EBG

با توجه به مقالات و ساختارهایی که در گذشته ارائه شدند در این قسمت ساختاری ارائه می‌شود تا سطح مقطع راداری را کاهش دهد. این ساختار از دو سلول ساده که در شکل (۱-۳) آمده است تشکیل شده است که هر یک از این سلول ها به صورت 4×4 کنار هم قرار گرفته و این خانه‌های 4×4 نیز در کنار هم به صورت شطرنجی چیده شده اند.



(الف) (ب)

شکل (۱-۳) (الف) EBG1 (ب) EBG2

همان‌طور که در شکل مشخص شده است سلول EBG1 یک زیرلایه خالی از پیچ می‌باشد و هیچ بخش فلزی بر روی زیرلایه وجود ندارد و سلول EBG2 از ۵ پیچ مربعی تشکیل شده است که اندازه پیچ میانی $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ و پیچ های کناری $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ و شکاف بین آنها 0.5 mm

¹ Advanced design system

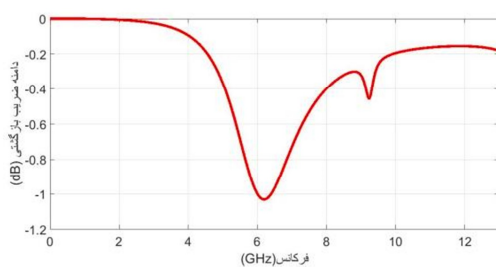
می‌باشد. زیرلایه استفاده شده در ساختار FR-4 با ضخامت ۳.۲ mm و گذردهی الکتریکی ۴.۳ می‌باشد.

۱-۲-۳ بررسی سلول های ساختار

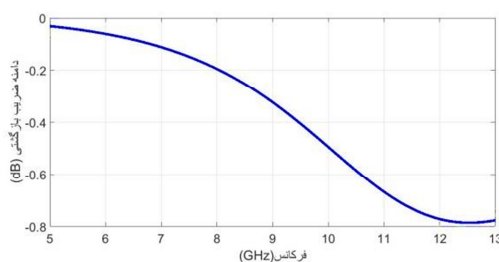
همان‌طور که در فصل‌های قبل گفته شد برای اینکه سطح مقطع راداری کاهش پیدا کند باید انرژی بازگشتی به گیرنده نرسد یا بسیار کم بازگردد در این نوع ساختار ها با پراکنده کردن موج بازگشتی می‌توان این کار را انجام داد و باید موج بازگشتی و موج برخوردی در فاز مخالف هم باشند یعنی اختلاف فاز 180° با هم داشته باشند تا با تداخل مخرب، موجی با دامنه نزدیک به صفر ایجاد کنند و هیچ انرژی برنگردد. در ادامه به بررسی ضریب بازگشت ساختار می‌پردازیم.

۱-۱-۲-۳ بررسی ضریب بازتاب

برای اینکه ضریب بازتاب هر کدام از سلول ها را بدست آورده شود در نرم افزار CST یک سلول از ساختار را کشیده و شرایط مرزی متناوب را تنظیم می‌کنیم و موج را از یک فاصله که به عنوان مرجع فاز در نظر گرفتیم به سطح ساختار می‌تابانیم و در همان نقطه‌ی مرجع فاز، فاز بازگشتی را می‌بینیم و این فاز، همان فاز S11 می‌باشد. دامنه‌ی S11 هم مهم است زیرا اختلاف دامنه نیز باید تقریباً مقدار ناچیزی باشد تا موج بازگشتی انرژی کمی داشته باشد. در شکل (۲-۳) و (۳-۳) به ترتیب دامنه و فاز هر کدام از سلول ها آورده شده است.

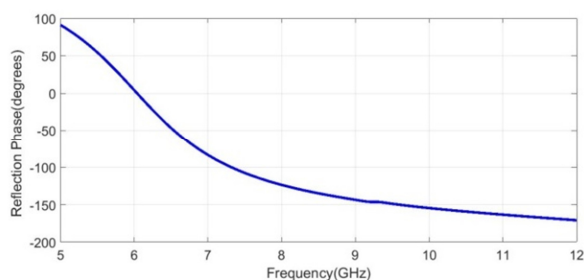


(ب)

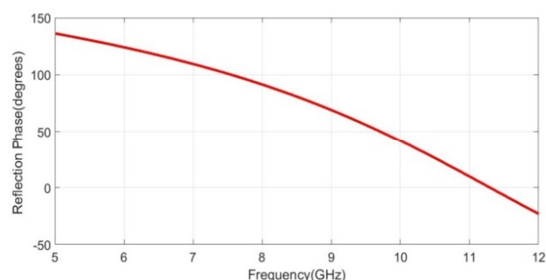


(الف)

شکل (۲-۳) دامنه ی ضریب بازگشتی (الف) EBG1 (ب) EBG2



(ب)



(الف)

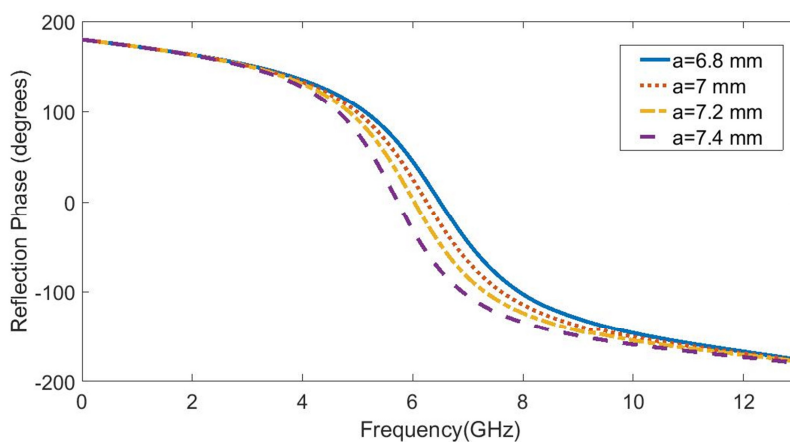
شکل (۳-۳) فاز ضریب بازگشتی (الف) EBG1 (ب) EBG2

همان‌طور که در شکل (۳-۳) قابل مشاهده است فاز بازگشتی بین -180° و $+180^\circ$ تغییر می‌کند و در فرکانسی از فاز صفر می‌گذرد که به این فرکانس، فرکانس تشدید می‌گویند. فرکانس تشدید EBG1 برابر با 11.2 GHz و فرکانس تشدید EBG2 برابر با 6.19 GHz می‌باشد.

۳-۲-۱-۱-۱- بررسی عوامل موثر بر فاز بازگشتی

□ بررسی تاثیر طول پچ:

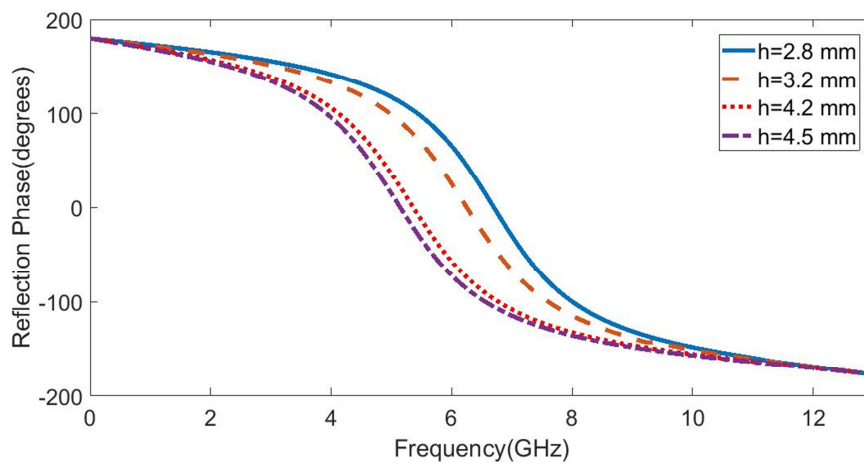
همان‌طور که در شکل (۴-۳) آورده شده است در صورتی که همه‌ی عوامل ثابت بمانند و فقط طول پچ افزایش پیدا کند فرکانس تشدید کاهش پیدا می‌کند.



شکل (۴-۳) بررسی تاثیر اندازه‌ی پچ بر فاز بازگشتی. a اندازه‌ی طول پچ اصلی می‌باشد.

□ بررسی تاثیر ضخامت زیرلایه

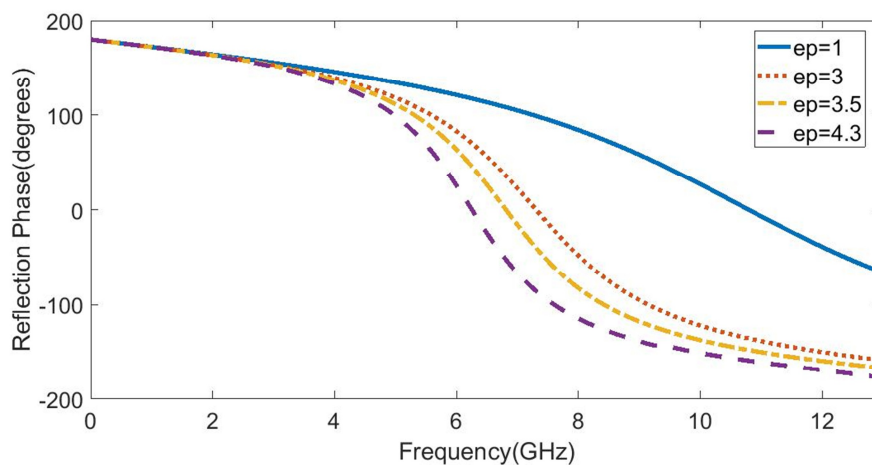
در شکل (۳-۵) تاثیر ضخامت زیرلایه بر ضریب بازتاب آورده شده است. وقتی ضخامت زیرلایه با ثابت نگه داشتن گذردهی آن، افزایش یابد فرکانس تشدید، کاهش می یابد.



شکل (۳-۵) بررسی تاثیر اندازهی ضخامت زیرلایه بر فاز بازگشتی. h اندازهی ضخامت زیرلایه می باشد

□ بررسی تاثیر گذردهی الکتریکی زیرلایه

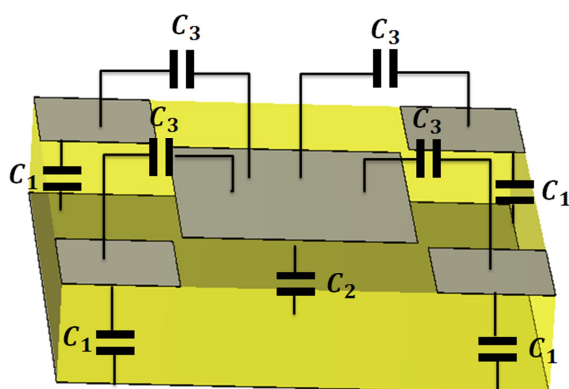
شکل (۳-۶) تاثیر گذردهی زیرلایه را نشان می دهد که با افزایش گذردهی الکتریکی فرکانس تشدید کم می شود.



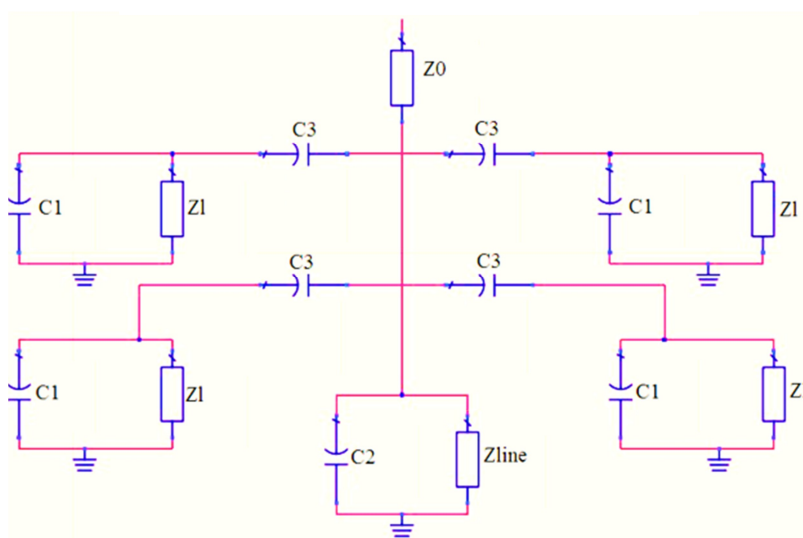
شکل (۳-۶) تاثیر گذردهی زیرلایه بر فاز بازگشتی. ep گذردهی زیرلایه می باشد.

۲-۱-۲-۳ مدار معادل یک سلول از ساختار

راه دیگری برای بدست آوردن فاز بازگشتی از سلول، استفاده کرده از مدار معادل سلول می‌باشد. در این بخش این کار برای سلول EBG2 انجام می‌شود و فاز را از رابطه‌های ریاضی بدست می‌آوریم. مدار معادل تک سلول به صورت شکل (۷-۳) (الف) و (ب) می‌باشد.



(الف)

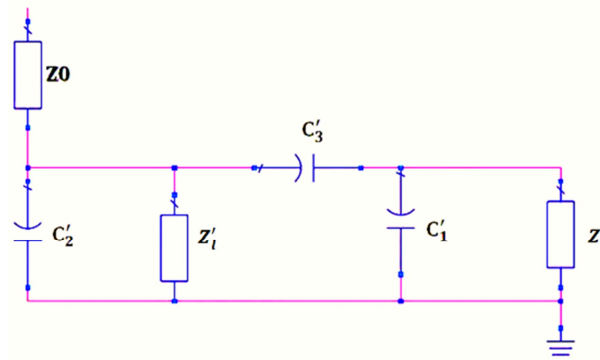


(ب)

شکل (۷-۳) (الف) شکل سه بعدی و (ب) مدار الکتریکی تک سلول EBG2

خازن $C1$ خازنی است که بین هر یک از چهار ضلعی‌های چهارگوشه‌ی EBG2 با زمین تشکیل می‌دهند و $C2$ خازن بین چهارضلعی میانی و زمین، $C3$ خازن تزویج بین چهارضلعی میانی و

چهارضلعی‌های چهار گوشه می‌باشند. Zline امپدانس خط انتقال تشکیل شده توسط چهارضلعی میانی و Zl1 نیز امپدانس خط انتقال چهارضلعی‌های چهار گوشه می‌باشند. برا ساده‌تر شدن شکل آن را به صورت معادل با مدار شکل (۸-۳) در نظر می‌گیریم. خازن‌های این مدار از رابطه‌های ۱ تا ۱۴ بدست می‌آیند.



شکل (۸-۳) مدار معادل الکتریکی تک سلول EBG2

$$C_1, C_2 = \frac{\epsilon A}{d} \quad (۱-۳)$$

$$C_3 = \alpha \cdot 4\epsilon_0\epsilon_{eff} \frac{D \cos\theta}{2\pi} H(D, s, \lambda, \theta) \quad (۲-۳)$$

$$\alpha = \left(\frac{a}{D}\right) \cos(\theta) \quad (۳-۳)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/w}} \quad (۴-۳)$$

$$H = \ln\left[\left(\sin\left(\frac{\pi s}{2D}\right)\right)^{-1}\right] + G(D, s, \lambda, \theta) \quad (۵-۳)$$

$$G = \frac{0.5(1 - \beta^2)^2 \left[\left(1 - \frac{\beta^2}{4}\right) (A_+ + A_-) + 4\beta^2 A_+ A_- \right]}{\left(1 - \frac{\beta^2}{4}\right) + \left(1 + \frac{\beta^2}{4} - \frac{\beta^2}{8}\right) (A_+ + A_-) + 2\beta^6 A_+ A_-} \quad (۶-۳)$$

$$A_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{2D}{\lambda} \sin \theta - \left(\frac{D}{\lambda} \cos \theta\right)^2}} \quad (۷-۳)$$

$$Zl = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (۸-۳)$$

$$Y_1 = jC_1\omega \quad (۹-۳)$$

$$Y_2 = jC_2\omega \quad (۱۰-۳)$$

$$Y_3 = jC_3\omega \quad (۱۱-۳)$$

$$Y_{13} = \frac{Y_1 \times Y_3}{Y_1 + Y_3} \quad (۱۲-۳)$$

$$Z_{in} = \frac{1}{Y_{13} + Y_2} \quad (۱۳-۳)$$

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (۱۴-۳)$$

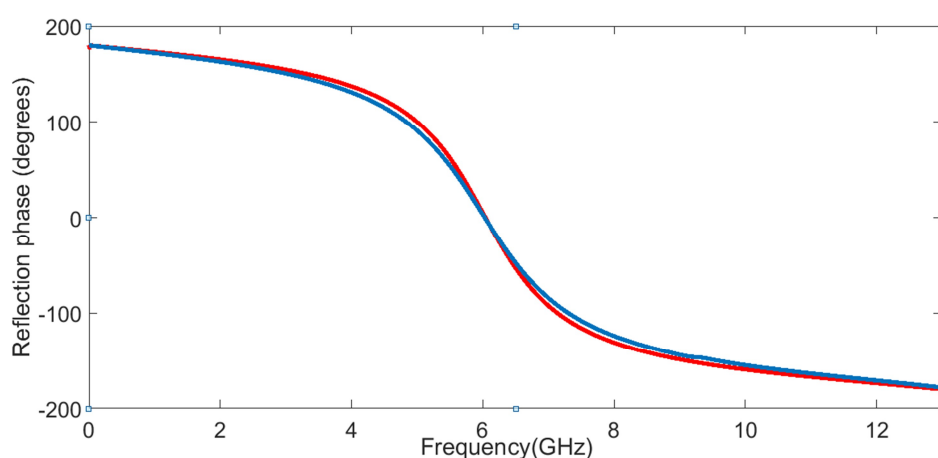
این مدارمعادل در نرم افزار ADS شبیه سازی شده و خازن ها به صورت زیر بدست آمده اند:

جدول (۱-۳) . مقادیر خازن های معادل در شبیه سازی ADS

مقدار	خازن ها
0.0264 pF	$C1$
0.006 pF	$C2$
17.68 pF	$C3$

به دلیل تزویج بین سلول‌ها، نمی‌توان به صورت حل تحلیلی فرمول‌ها مقدارخازن‌ها را محاسبه کرد به همین دلیل از ADS استفاده شد.

و برای مقایسه فاز حاصل از شبیه سازی CST و ADS در یک نمودار رسم شد که در شکل (۳-۹) آمده است. منحنی قرمز، فاز حاصل از شبیه سازی ADS و خط آبی خط چین، فاز حاصل از CST را نشان می‌دهد که خیلی به هم نزدیک می‌باشند و مدارمعادل درست تشخیص داده شده است.



شکل (۳-۹) فاز بازگشتی حاصل از شبیه سازی CST و ADS

۳-۱-۲-۳ بررسی اختلاف فاز دو سلول از ساختار

اختلاف فاز بازگشتی دو ساختار برای اینکه سطح مقطع راداری را کاهش دهند باید در حدود $370 \pm 180^\circ$ باشد برای اثبات این که چرا اختلاف فاز باید این مقدار باشد می‌توان از آرایه فازی استفاده نمود. هنگامی که تعدادی سلول درکنار هم به صورت آرایه قرار می‌گیرند ویژگی‌های تشعشعی مجموعه‌ای تشکیل شده را می‌توان با بدست آوردن ضریب آرایه^۱ توجیه کرد. به دلیل اینکه ساختار مورد نظر ساختاری مسطح است از رابطه‌ی (۳-۱۵) استفاده شد [۱۹].

¹ Array factor

$$AF = I_{n1} \cdot \left(\sum_{m=1}^M e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \varphi + \beta_x)} \right) \quad (۱۵-۳)$$

$$\cdot \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \sin \varphi + \beta_y)}$$

از این رابطه قابل درک است که برای هر سلول یک دامنه و فاز در نظر گرفته شده است.

$$AF_n(\theta, \varphi) = \left\{ \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2} \Psi_x\right)}{\left(\frac{\Psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \Psi_y\right)}{\left(\frac{\Psi_y}{2}\right)} \right\} \quad (۱۶-۳)$$

$$\Psi_x = kd_x \sin \theta \cos \varphi + \beta_x \quad (۱۷-۳)$$

$$\Psi_y = kd_y \sin \theta \sin \varphi + \beta_y \quad (۱۸-۳)$$

$$\tan \varphi_0 = \frac{\beta_y d_x}{\beta_x d_y} \quad (۱۹-۳)$$

$$\sin^2 \theta_0 = \left(\frac{\beta_x}{kd_x}\right)^2 + \left(\frac{\beta_y}{kd_y}\right)^2 \quad (۲۰-۳)$$

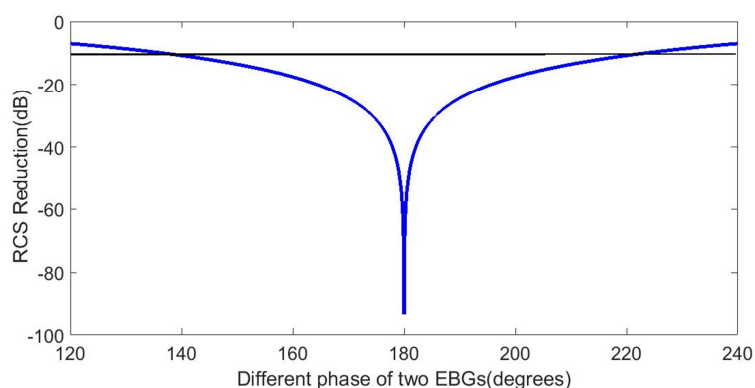
رابطه‌های ۱۵ تا ۲۰ رابطه‌های حاکم بر آرایه فازی می‌باشند با استفاده از این روابط به رابطه‌ی

۲۱ و ۲۲ می‌رسیم.

$$\begin{aligned} RCS \text{ Reduction} &= 10 \log \left[\frac{\lim_{r \rightarrow \infty} [4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}]}{\lim_{r \rightarrow \infty} [4\pi r^2 (1)^2]} \right] \\ &= 10 \log \left[\frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \right] \end{aligned} \quad (۲۱-۳)$$

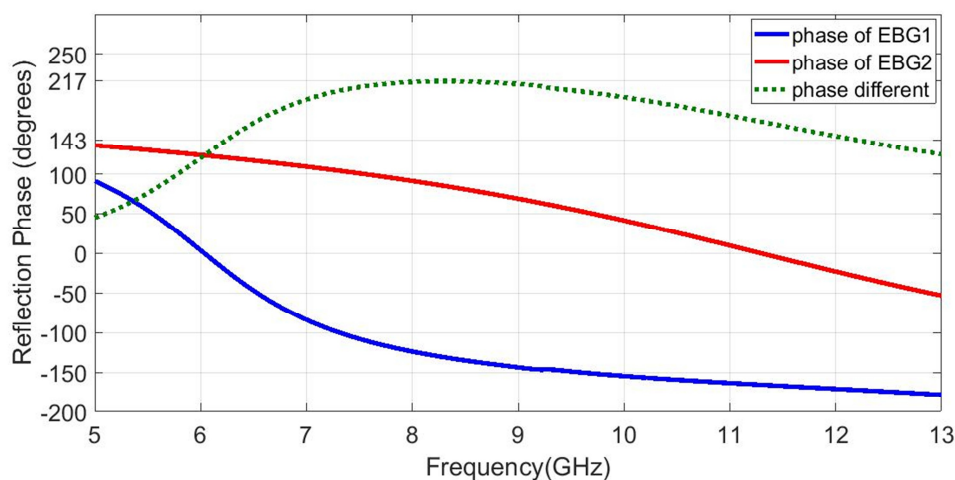
$$RCS \text{ Reduction} = 10 \log \left[\frac{A_1 e^{jP_1} + A_2 e^{jP_2}}{2} \right]^2 \quad (۲۲-۳)$$

در رابطه‌ی (۳-۲۲) دلیل تقسیم بر ۲ این می‌باشد که نیمی از شکل با EBG1 پر شده است و نیمی دیگر از EBG2. این رابطه را در Matlab رسم کرده که به صورت شکل (۳-۱۰) بدست آمده است.



شکل (۳-۱۰) نمودار کاهش سطح مقطع راداری به مقدار -10 dB در زاویه حدود $180^\circ \pm 37^\circ$

معمولا کاهش سطح مقطع را با 10 dB کاهش، می‌سنجند و از شکل مشخص است که در بازه‌ی زاویه‌ای 143° تا 217° کاهش سطح مقطع راداری زیر 10 dB می‌باشد. از همین رو طبق مطالبی که گفته شد هدف پیدا کردن اختلاف فاز این دو ساختار است برای همین دو نمودار فازبازگشتی دو ساختار را در متلب از هم کم کرده و نمودار اختلاف فاز مطابق شکل (۳-۱۱) آورده شده است.

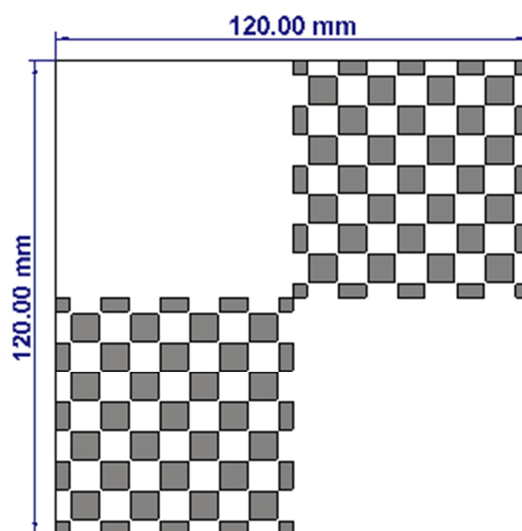


شکل (۳-۱۱) نمودار اختلاف فازبازگشتی دو سلول EBG1 و EBG2

نمودار اختلاف فاز بالا نشان می‌دهد که در محدوده‌ی زاویه ای $^{\circ}143$ تا $^{\circ}217$ فرکانس بین 6.2 GHz تا 11.2 GHz تغییر می‌کند و در این پهنای باند نمودار زیر -10 dB می‌باشد یعنی در این پهنای فرکانسی سطح مقطع راداری کاهش پیدا می‌کند.

۲-۲-۳ ارائه‌ی ساختار پیشنهادی

ساختار پیشنهادی به صورت شکل (۱۲-۳) می‌باشد. این ساختار با در نظر گرفتن آرایه فازی و تشکیل اختلاف فاز بازگشتی 180° پیشنهاد داده شد که به صورت شطرنجی تشکیل شده است. اندازه-ی کل ساختار $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ می‌باشد.



شکل (۱۲-۳) ساختار پیشنهادی EBG

۳-۲-۳ بررسی ساختار پیشنهادی

حال ساختار اصلی پیشنهادی را بررسی می‌کنیم و موج‌های با قطبش متفاوت و زاویه تابش مختلف به ساختار تابانده و سطح مقطع راداری را مورد تحقیق قرار می‌دهیم.

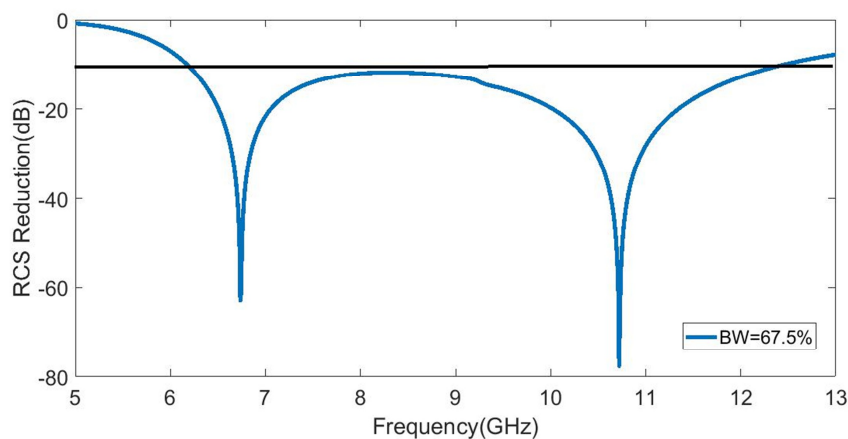
۳-۲-۱ برخورد موج به صورت عمودی

در این بخش یک موج به صورت عمودی به سطح ساختار اصلی تابانده شده و به صورت مونواستاتیک^۱ و بایاستاتیک^۲ بررسی می‌شود.

مونواستاتیک: هنگامی که فرستنده و گیرنده در یک مکان قرار گرفته باشند.

بایاستاتیک: هنگامی که فرستنده و گیرنده در دو مکان مختلف قرار گرفته باشند.

برای بدست آوردن سطح مقطع راداری، ساختار با یک سطح هادی کامل با اندازه ای برابر با ساختار مقایسه می‌شود. در این قسمت ابتدا رابطه‌ی آرایه فاز یعنی رابطه‌ی (۳-۲۲) با استفاده از متلب کشیده می‌شود و زیرا با این کار می‌توان شکل مورد نظر را پیش بینی کرد.

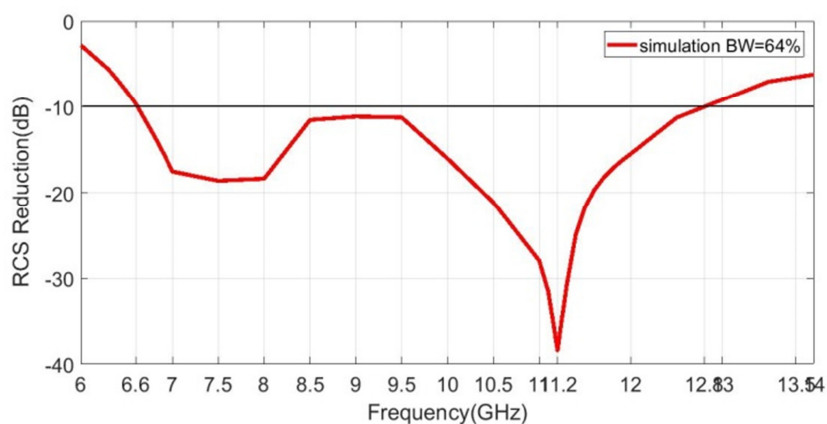


شکل (۳-۱۳) شکل شبیه سازی شده برای پیش‌بینی میزان پهنای باند ساختار پهنای باند بدست آمده ۶۷.۵٪ می‌باشد

مطابق با شکل (۳-۱۳) پیش بینی می‌شود ساختار پهنای باند ۶۷.۵٪ داشته باشد حال با استفاده از CST پهنای باند شبیه سازی شده و در شکل (۳-۱۴) آورده شده است.

¹ Monostatic

² Bistatic

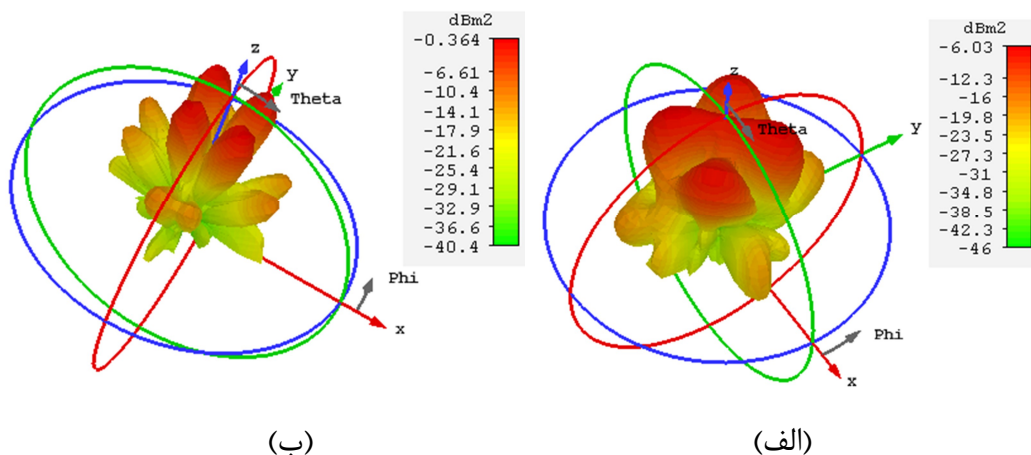


شکل (۳-۱۴) کاهش سطح مقطع راداری در برخورد موج به صورت عمودی پهنای باند ۶۴٪

در شبیه سازی با CST بازه‌ی فرکانسی حدود ۶.۶۵ GHz تا ۱۲.۹۲ GHz یعنی پهنای باند ۶۴٪ بدست آمده است و مقدار کمینه سطح مقطع راداری در فرکانس ۷.۵ GHz و ۱۱.۲GHz ترتیب به میزان ۹ dB و ۲۸ dB اتفاق افتاده است و مشخص شد که پیش بینی میزان پهنای باند تقریباً درست بود و پهنای باند بدست آمده به پیش بینی بسیار نزدیک هم بوده است. در ادامه شبیه سازی‌ها در فرکانس ۷.۵ GHz و ۱۱.۲ GHz انجام شدند.

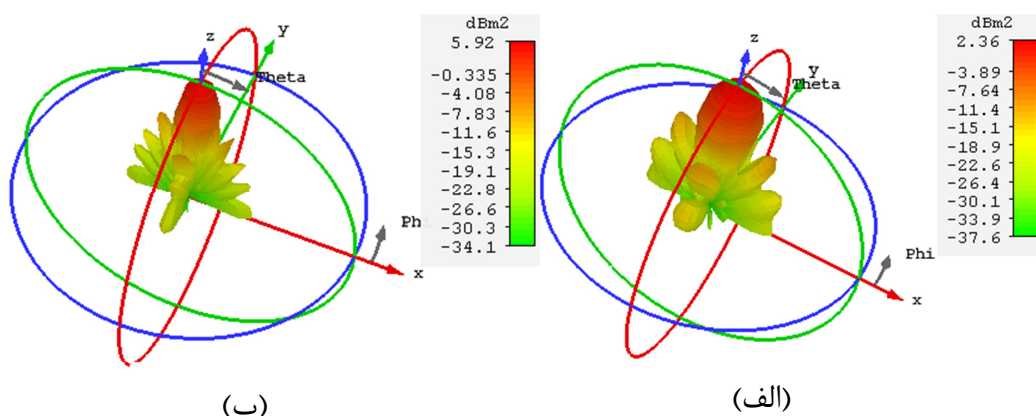
۳-۲-۳-۱-۲- بررسی بازتاب موج به صورت مونو استاتیک

برای داشتن دید بهتر از بازتاب موج از سطح ساختار در شکل (۳-۱۵)، شکل سه بعدی الگوی تابشی آورده شده است که موج به صورت عمودی بر ساختار تابیده شد.



شکل (۳-۱۵) شبیه سازی الگوی تابشی سه بعدی در اثر برخورد موج به صورت عمودی به سطح ساختار (الف) در فرکانس ۷.۵GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲ GHz

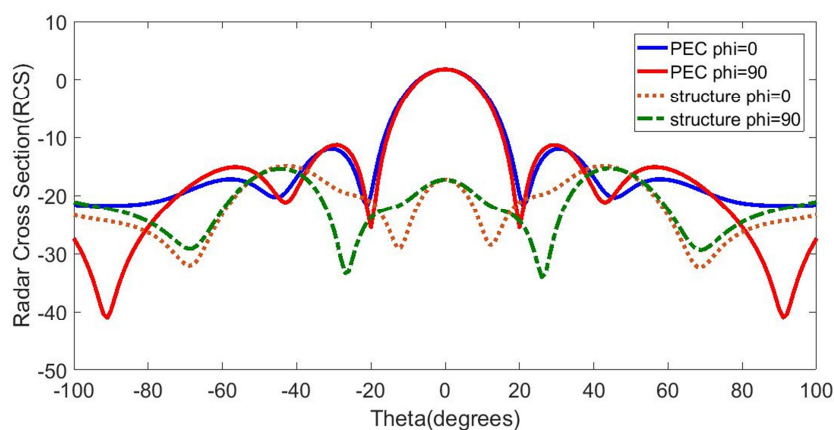
وقتی موج به صورت عمودی بر ساختار تابیده شود انتظار می رود که بازتاب آن در همان زاویه باشد مانند یک هادی کامل یا مانند یک آینه، اما در این ساختار، موج به چهار سمت دیگر پراکنده شد و در چهار زاویه 22.5° ، 31.5° ، 13.5° ، 45° چهار گلبرگ دیده می شود که بیشینه ی شکل سه بعدی ساختار نسبت به مقدار بیشینه ی شکل سه بعدی یک هادی کامل (شکل (۳-۱۶)) به ترتیب برای فرکانس های ۷.۵ GHz و ۱۱.۲ GHz به مقدار ۸.۳۹ dB و ۶.۲۸۴dB کاهش پیدا کرده است. مقدار بیشینه ی این گلبرگ ها در $\theta = 21^\circ$ اتفاق افتاده است. در این شبیه سازی به صورت مونواستاتیک بررسی شد یعنی بازتاب موج به سمت محل فرستادن موج کاهش پیدا کرده است.



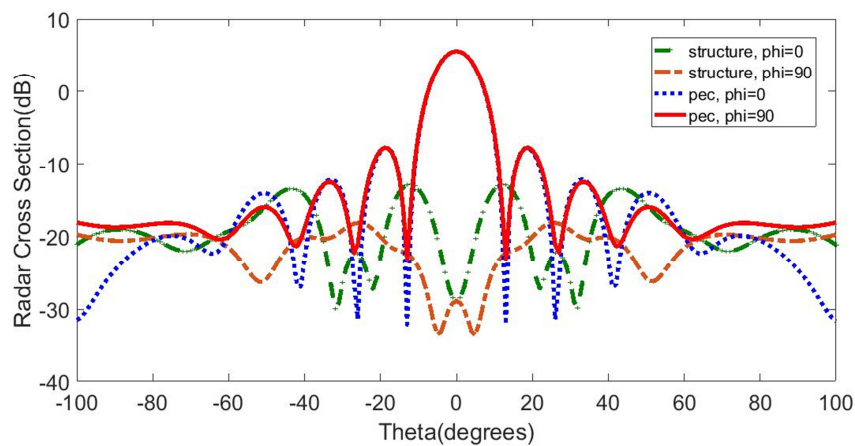
شکل (۳-۱۶) شبیه سازی الگوی تابشی سه بعدی در اثر برخورد موج به صورت عمودی به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس ۷.۵GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲ GHz

۳-۲-۳-۱-۳- بررسی بازتاب موج به صورت بایاستاتیک

در این بخش به صورت بایاستاتیک بررسی می‌شود یعنی موج به صورت عمودی بر ساختار تابیده می‌شود و در زوایای 0° ، 45° ، 90° و 135° مشاهده می‌شود. دقیقاً همین روال برای یک هادی کامل با اندازه‌ای برابر با همین ساختار انجام شده و مورد مقایسه قرار گرفتند. در شکل (۳-۱۷) و (۳-۱۸) به ترتیب زاویه مشاهده‌ی 0° و 90° و 45° و 135° رسم شده است.



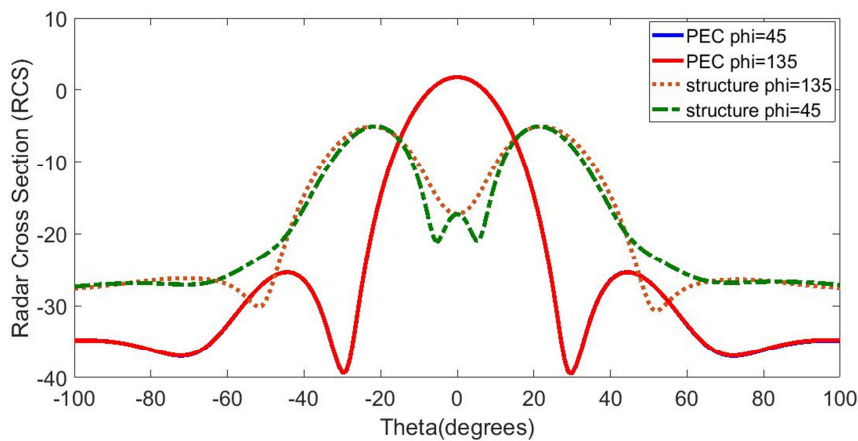
(الف)



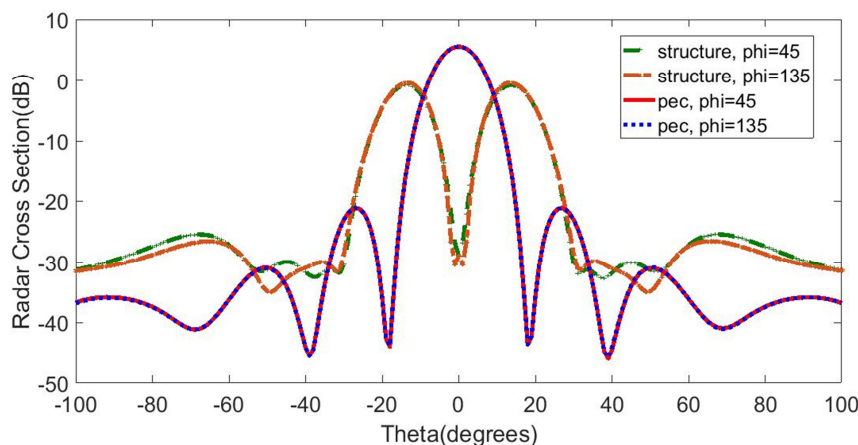
(ب)

شکل (۳-۱۷) شبیه سازی بایاستاتیک با موج ورودی عمودی و زاویه مشاهده 0° و 90° در فرکانس (الف) ۷.۵ GHz و (ب) ۱۱.۲ GHz

با توجه به شکل (۳-۱۷) مقدار بیشینه‌ی نمودار ساختار اصلی نسبت به بیشینه‌ی هادی کامل در زاویه ورودی $\varphi = 0^\circ$ به ترتیب برای فرکانس‌های ۷.۵ GHz و ۱۱.۲ GHz برابر با ۱۶.۷ dB و ۱۸.۴۳ و در $\varphi = 90^\circ$ ، به ترتیب برابر با ۱۷.۱۵ dB و ۲۳.۶۸ dB کاهش پیدا کرده است. در شکل (۳-۱۸) نیز می‌توان دید که مقدار بیشینه در $\varphi = 45^\circ$ به ترتیب برای فرکانس‌های ۷.۵ GHz و ۱۱.۲ GHz به مقدار ۶.۸۱ dB و ۵.۸۹ dB در $\varphi = 135^\circ$ به ترتیب به مقدار ۶.۸۹ dB و ۵.۸۹ dB کاهش یافته است.



(الف)



(ب)

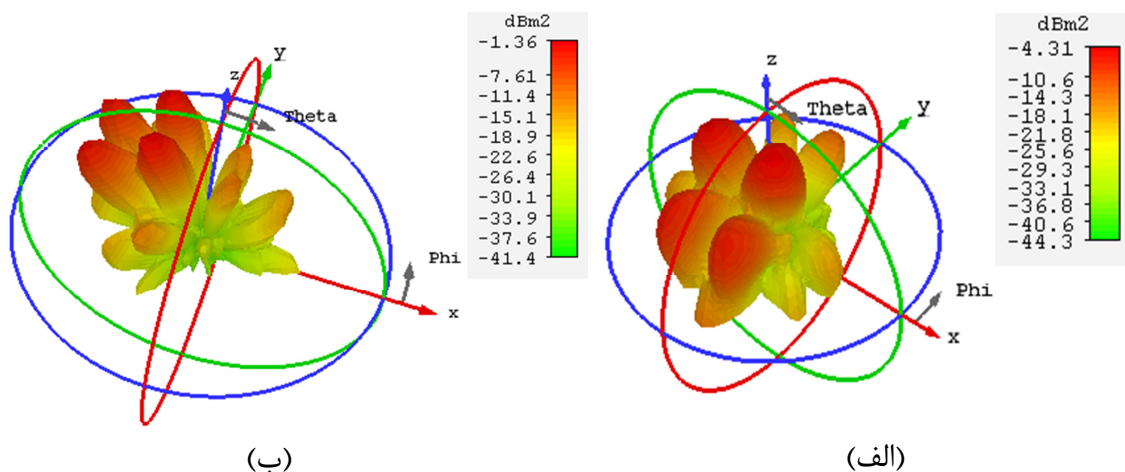
شکل (۳-۱۸) شبیه سازی بایاستاتیک با موج ورودی عمودی و زاویه مشاهده 45° و 135° در فرکانس (الف) ۷.۵ GHz و (ب) ۱۱.۲ GHz

۲-۳-۲-۳ برخورد موج به صورت مایل

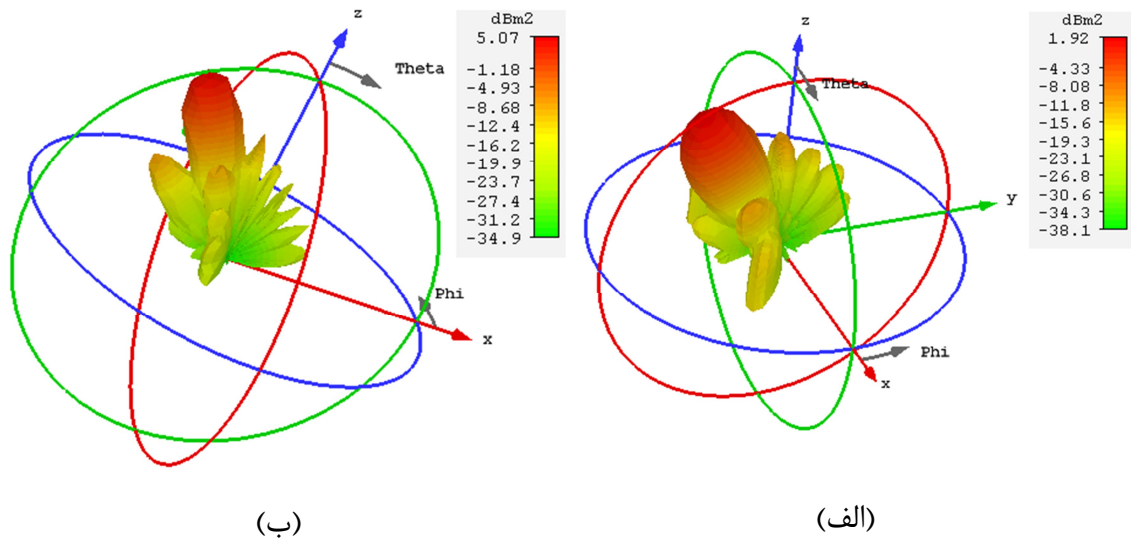
در این قسمت موج را به صورت مایل و با دو قطبش مختلف TM_z و TE_z تابانده می‌شود و بازتاب موج را مورد بررسی قرار می‌گیرد. زاویه تابش مایل به دلخواه $\varphi = 90^\circ$ و $\theta = 30^\circ$ انتخاب شد.

۲-۳-۲-۳-۴ برخورد موج مایل با قطبش TM_z

در شکل (۳-۱۹) و (۳-۲۰) شبیه سازی بایاستاتیک سه بعدی برای موج ورودی مایل با قطبش TM_z به سطح ساختار مورد نظر و هادی کامل آورده شده است. انتظار می‌رود موج بازگشتی با زاویه $\theta = 30^\circ$ و $\varphi = 180^\circ$ ، مانند یک آینه یا یک هادی کامل بازتاب شود اما همان‌طور که در شکل دیده می‌شود چهار گلبرگ در چهار θ و φ متفاوت ایجاد شده است که نشان می‌دهد به صورت بایاستاتیک میزان سطح مقطع راداری را کم کرده است. مقدار بیشینه‌ی شبیه سازی سه بعدی ساختار نسبت به بیشینه‌ی شبیه سازی هادی کامل به ترتیب برای فرکانس‌های ۷.۵ GHz و ۱۱.۲ GHz به مقدار dB ۶.۲۳ و ۶.۴۳ کاهش یافته است.



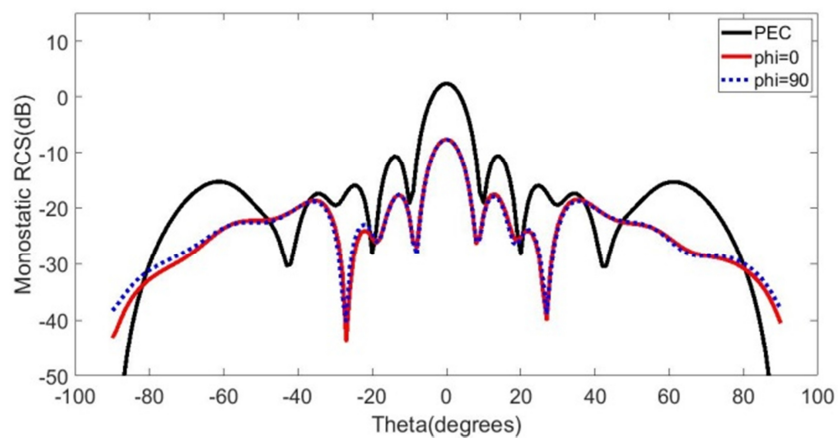
شکل (۳-۱۹) شبیه سازی الگوی تابشی بایاستاتیک سه بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل و با قطبش TM_z به سطح ساختار (الف) در فرکانس ۷.۵GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲GHz



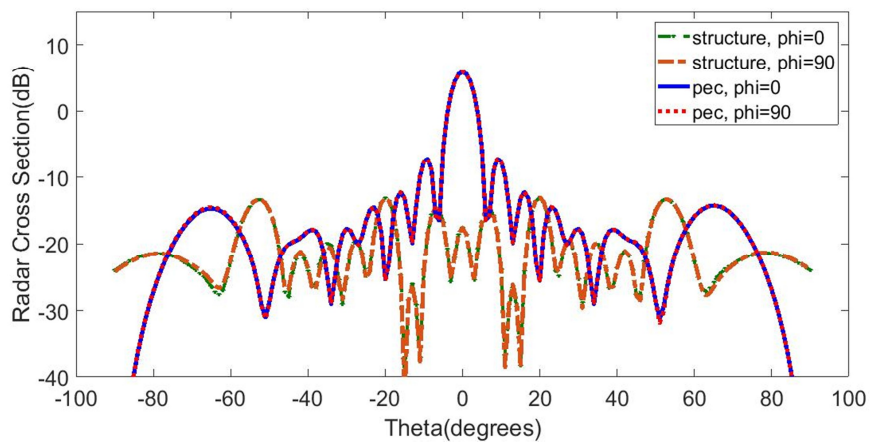
شکل (۳-۲۰) شبیه سازی الگوی تابشی بایاستاتیک سه بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل و با قطبش TMz به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس ۷.۵GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲GHz

برای بررسی مونواستاتیک نمودار دو بعدی حاصل از برخورد مایل 135° ، 90° ، 45° و $\varphi = 0^\circ$ به ساختار اصلی و هادی کامل رسم و با هادی کامل مقایسه می شود. در شکل (۳-۲۱) نمودار شکل دو بعدی برای $\varphi = 0^\circ$ ، 90° رسم شده است.

این شکل نشان می دهد میزان بیشینه ی ساختار اصلی نسبت به هادی کامل در 0° برای فرکانس های ۷.۵ GHz و ۱۱.۲ GHz به ترتیب به اندازه ۱۰.۰۵ dB و ۱۹.۰۲ dB، در $\varphi = 90^\circ$ به اندازه ی ۱۰.۰۱ dB و ۱۸.۹۶ dB کاهش پیدا کرده است. همچنین شکل (۳-۲۲) با زاویه ورودی مایل 135° و 45° ، نشان می دهد که بیشینه ی سطح مقطع راداری ساختار اصلی نسبت به هادی کامل در $\varphi = 45^\circ$ به مقدار ۱۰.۱۸ dB و ۶.۳۱۱ dB و در $\varphi = 135^\circ$ به مقدار ۹.۸۹ dB و ۶.۱۲۱ dB کاهش یافته است.

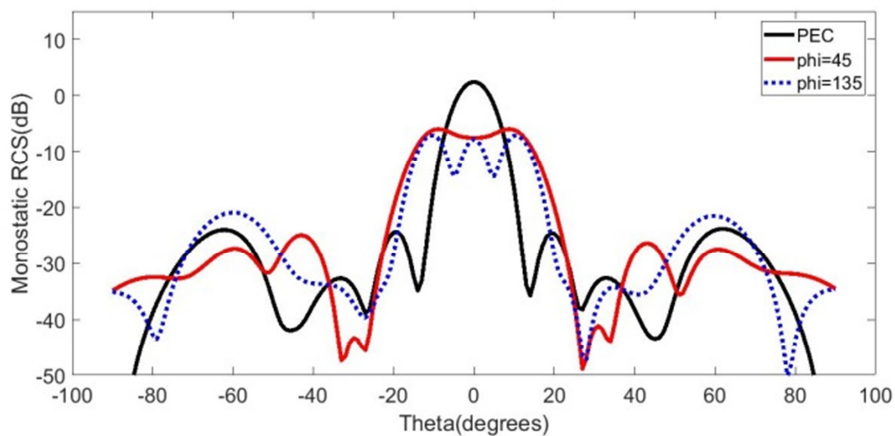


(الف)

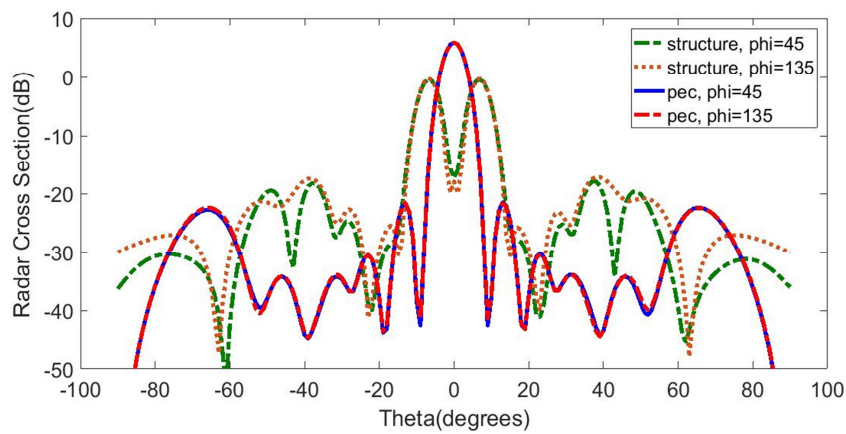


(ب)

شکل (۳-۲۱) شبیه سازی الگوی تابشی مونواستاتیک دو بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل 90° و 0° با قطبش TMz به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس ۷.۵GHz (ب) در



(الف)

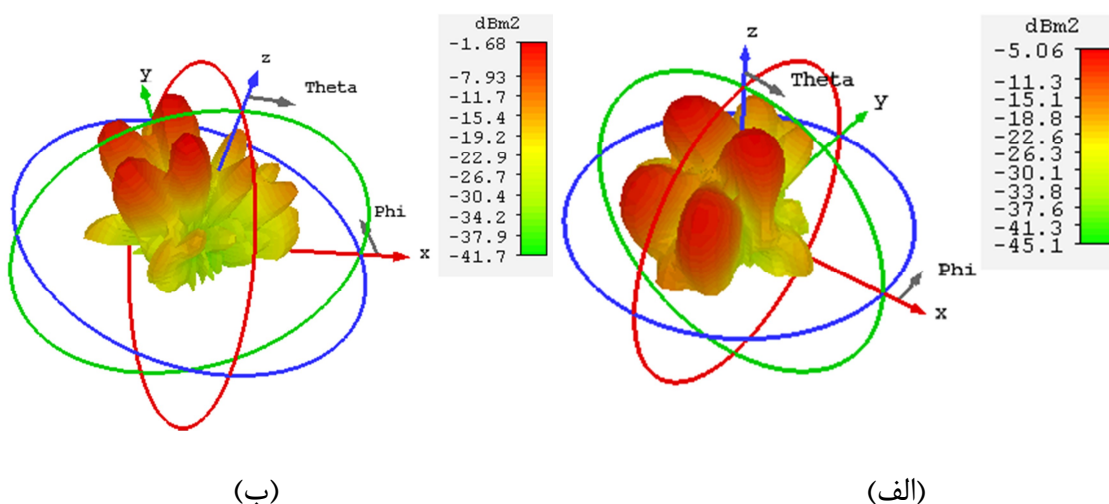


(ب)

شکل (۲۲-۳) شبیه سازی الگوی تابشی مونواستاتیک دو بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل 135° و 45° ϕ و با قطبش TMz به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس ۷.۵GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲GHz

۳-۲-۳-۲-۵- برخورد موج مایل با قطبش TEz

مانند قسمت قبل ابتدا موج مایل با قطبش TEz به صورت مایل با زاویه 90° ϕ و 30° θ به سطح ساختار تابیده شده و موج بازتابش ترسیم می‌شود که در شکل (۲۳-۳) آورده شده است.

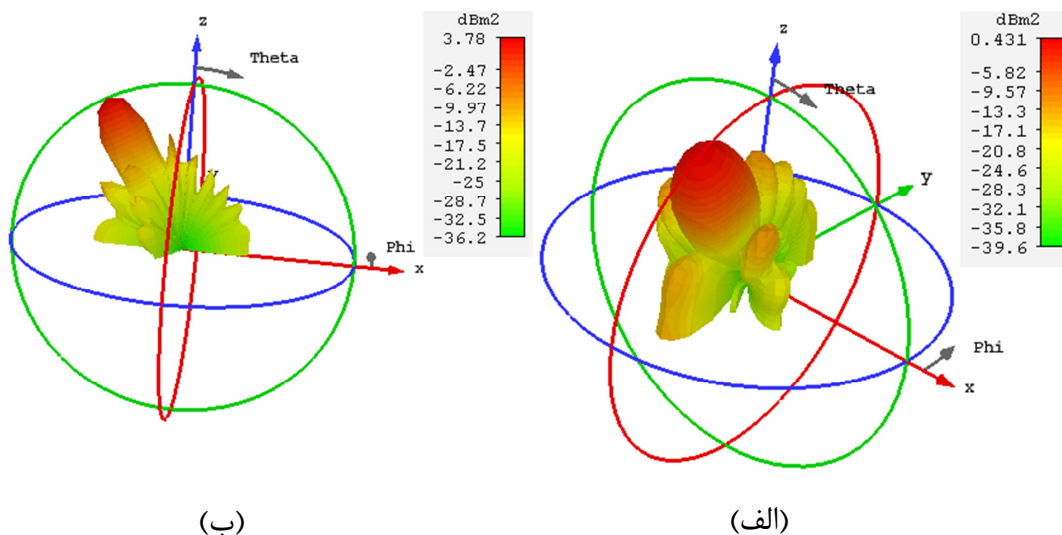


(ب)

(الف)

شکل (۲۳-۳) شبیه سازی الگوی تابشی بایاستاتیک سه بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل و با قطبش TEz به ساختار اصلی (الف) در فرکانس ۷.۵GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲GHz

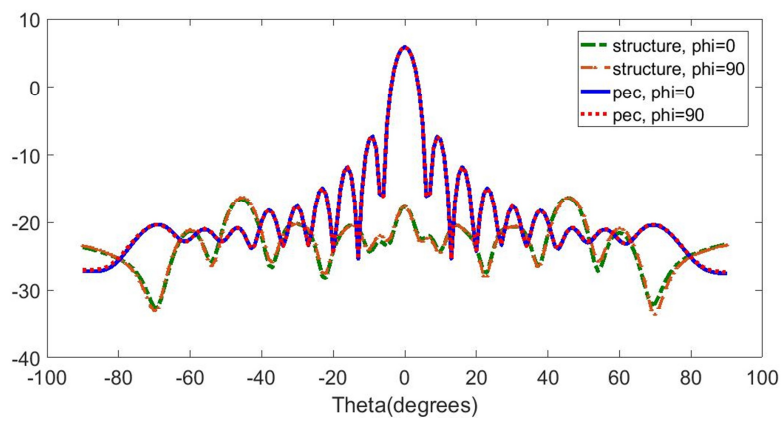
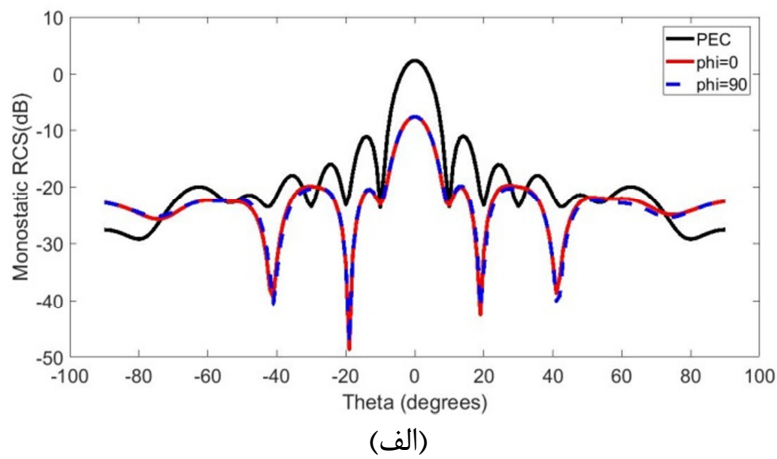
موج به صورت مایل تابیده شده است و باید به صورت مایل و مانند یک آینه عمل کند اما این ساختار با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد خود، موج را به صورت چهار گلبرگ بازتاب کرده و توان گلبرگ-ها نسبت به تک گلبرگ مورد انتظار پایین‌تر می‌باشد. در شکل (۳-۲۴) الگوی تابشی حاصل موج برخوردی به سطح یک هادی کامل آورده شده است.



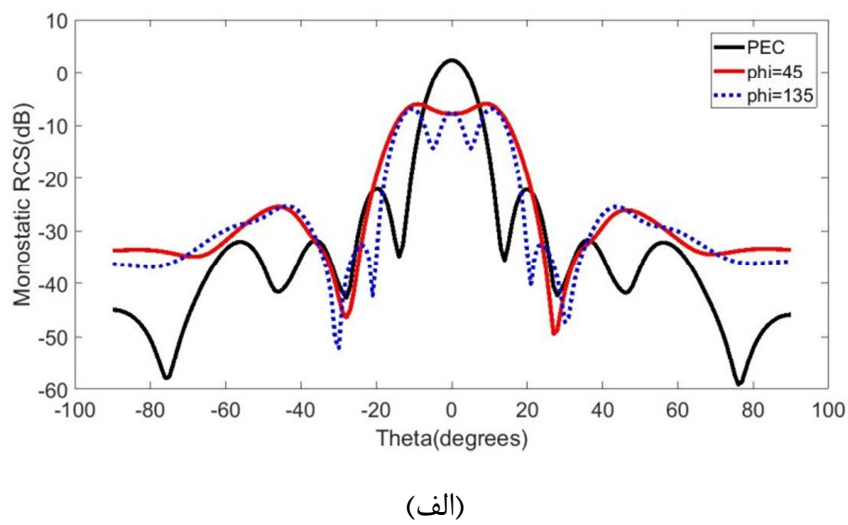
شکل (۳-۲۴) شبیه سازی الگوی تابشی بایاستاتیک سه بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل و با قطبش TEz به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس ۷.۵GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲GHz

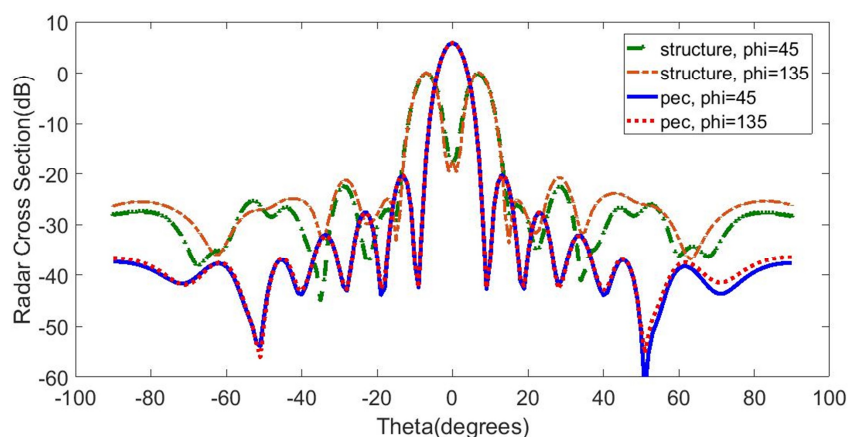
بیشینه مقدار سطح الگوی تابشی حاصل از ساختار اصلی نسبت به بیشینه مقدار سطح الگوی تابشی هادی کامل ۵.۴۹ dB کمتر است.

در ادامه تابش موج مایل با قطبش TEz و به صورت مونواستاتیک بررسی شد. مانند بخش قبل موج در چهار زاویه 135° و 45° ، 90° و $\varphi = 0^\circ$ به ساختار تابیده و در همان زاویه مشاهده می‌شود. در شکل (۳-۲۵) و (۳-۲۶) به ترتیب نمودار حاصل از برخورد 90° ، 0° و 135° ، 45° آورده شده است. میزان بیشینه‌ی ساختار اصلی نسبت به هادی کامل در 0° برای فرکانس‌های ۷.۵ GHz و ۱۱.۲GHz به ترتیب به اندازه ۱۰.۰۵ dB و ۲۲.۲۲ dB در $\varphi = 90^\circ$ به اندازه ۱۰.۰۱ dB و ۲۲.۲۲dB و در $\varphi = 45^\circ$ به مقدار ۱۰.۱۸ dB و ۶.۰۴۵ dB در $\varphi = 135^\circ$ به مقدار ۹.۸۹ dB و ۶.۰۳۳ کاهش یافته است.



شکل (۳-۲۵) شبیه سازی الگوی تابشی مونواستاتیک دو بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل 0° و 90° و با قطبش TEz به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس ۷.۵GHz (ب) در فرکانس ۱۱.۲GHz



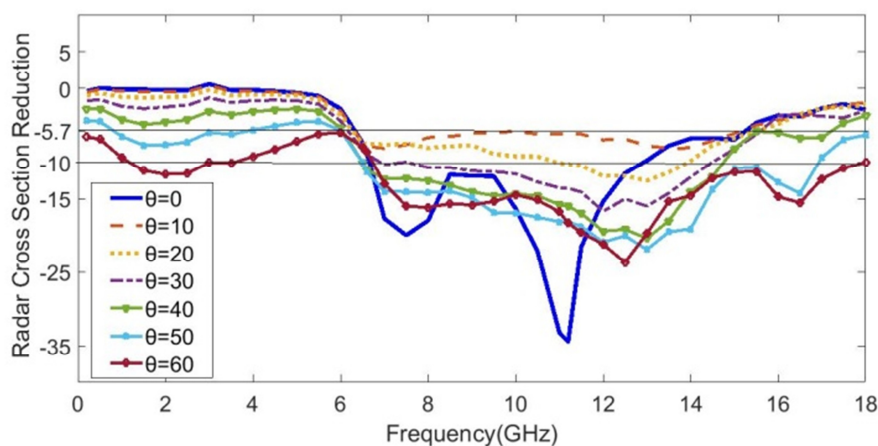


(ب)

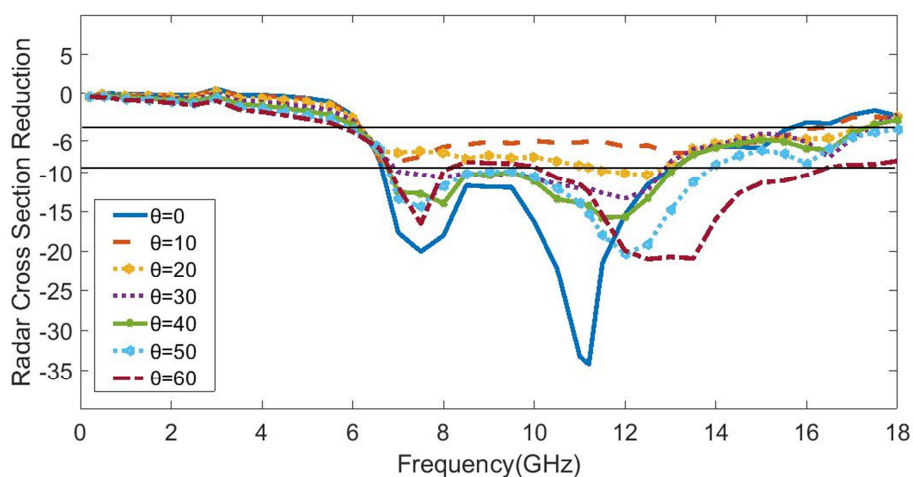
شکل (۳-۲۶) شبیه سازی الگوی تابشی مونواستاتیک دو بعدی در اثر برخورد موج به صورت مایل و $\phi = 45^\circ$ و 135° و با قطبش TEz به سطح هادی کامل (الف) در فرکانس 11.2GHz (ب) در فرکانس 7.5GHz

۳-۳-۲-۳ بررسی پهنای باند کاهش سطح مقطع راداری ساختار در اثر برخورد موج ورودی با قطبش TEz و TMz

در این بخش موج با زاویه θ ورودی متفاوت به سطح ساختار اصلی برخورد کرده و در همان زاویه مشاهده شده است. پهنای باند هر کدام از زوایای تابشی در شکل (۳-۲۸) و (۳-۲۷) و در جدول (۳-۲) آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود بیشترین پهنای باند زیر -10 dB در برخورد موج با قطبش TEz با زاویه $\theta = 60^\circ$ و 91.14% می باشد و در قطبش TMz در زاویه $\theta = 50^\circ$ به مقدار 68% بیشینه پهنای باند را ایجاد می کند.



شکل (۳-۲۷) پهنای باند حاصل از برخورد موج با قطبش TEz و زاویه θ ورودی متفاوت



شکل (۳-۲۸) پهنای باند حاصل از برخورد موج با قطبش TMz و زاویه θ ورودی متفاوت

به صورت خلاصه، این دو نمودار در جدول (۳-۲) آورده شده است.

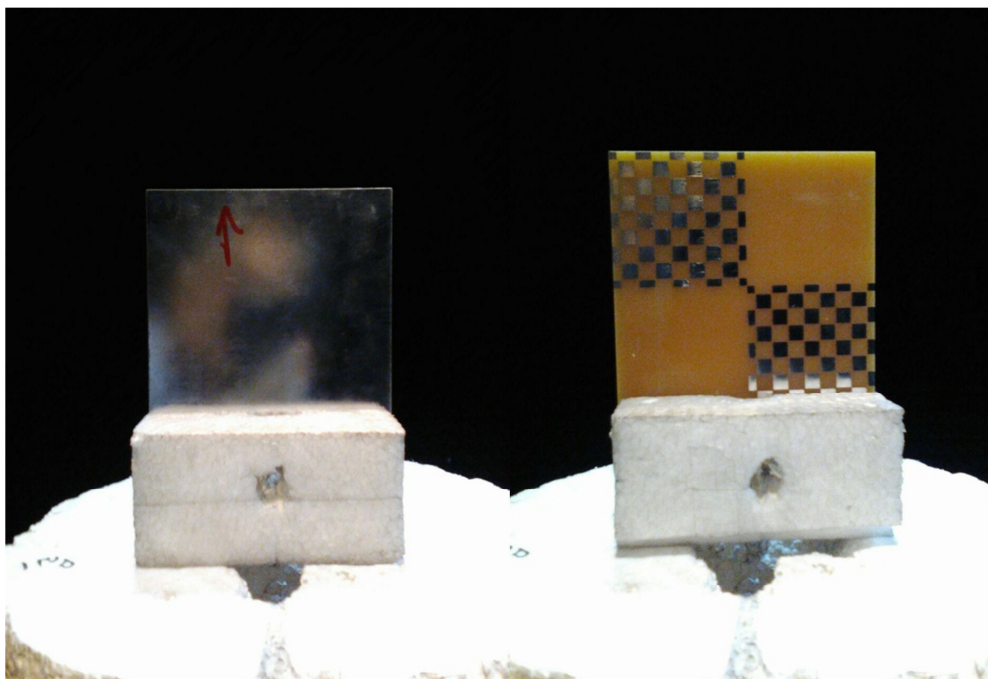
جدول (۳-۲) پهنای باند حاصل از برخورد موج با قطبش TEz و TMz با زاویه θ ورودی متفاوت

زاویه موج برخوردی ($^{\circ}$)	پهنای باند موج ورودی با قطبش	پهنای باند موج ورودی با قطبش
	TEz (%)	TMz (%)
0°	64%	64%
10°	84% (< -5.7 dB)	81% (< -6 dB)
20°	24% (85% < -5.7 dB)	6.37(75% < -6 dB)
30°	70.7%	57.1%
40°	77.6%	62.3%
50°	89%	68%
60°	91.14%	15.31% & 44.7%

۳-۳ ساخت ساختار مورد نظر و آزمایش آن

این ساختار دارای زیرلایه‌ی FR-4 با ضخامت ۳.۲ mm می‌باشد که یک سمت آن هادی کامل و سمت دیگر آن، پچ طراحی شده، چاپ شده است (شکل (۳-۲۹)). بعد از ساخت، در آزمایشگاه آنتن

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی مورد آزمایش قرار گرفت. در شبیه سازی ساختار دیدیم که در دو فرکانس ۷.۵ GHz و ۱۱.۲GHz کمترین مقدار سطح مقطع راداری اتفاق افتاده است و به دلیل کمبود امکانات آزمایشگاهی، در دو فرکانس ۷.۵ GHz و ۱۱.۲GHz، الگوی تابشی ساختار به صورت 0° تا 180° مقابل ساختار و از 180° تا 360° پشت ساختار بوده است که الگوی تابشی روبروی شکل، نشان دهنده ی الگوی تابشی ساختار طراحی شده و الگوی تابشی پشت شکل، الگوی تابشی هادی کامل را اندازه می گیرد . در شکل (۳-۳۰) عکس های در حال آزمایش آن، آورده شده است.



(ب)

(الف)

شکل (۳-۲۹) (الف) روبروی ساختار (ب) پشت ساختار

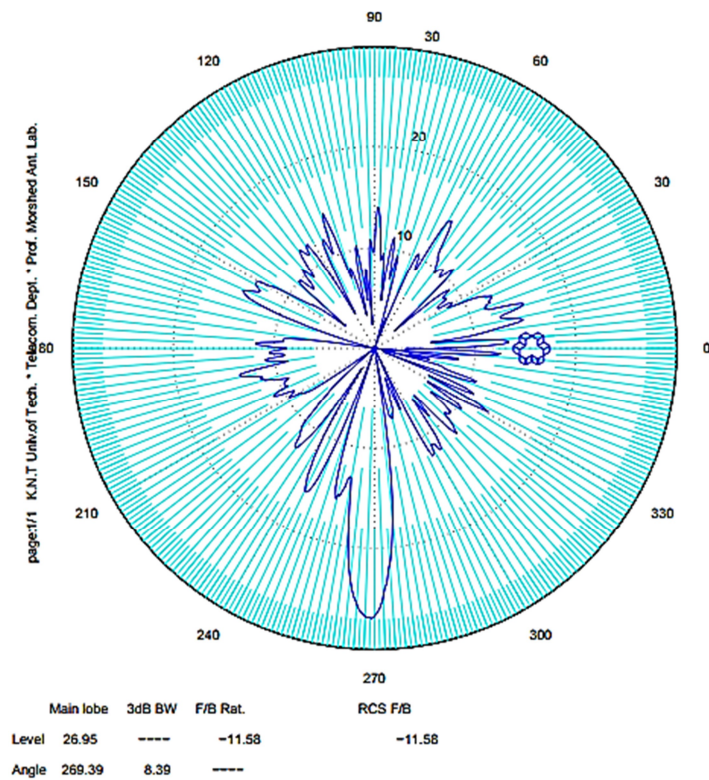


(ب)

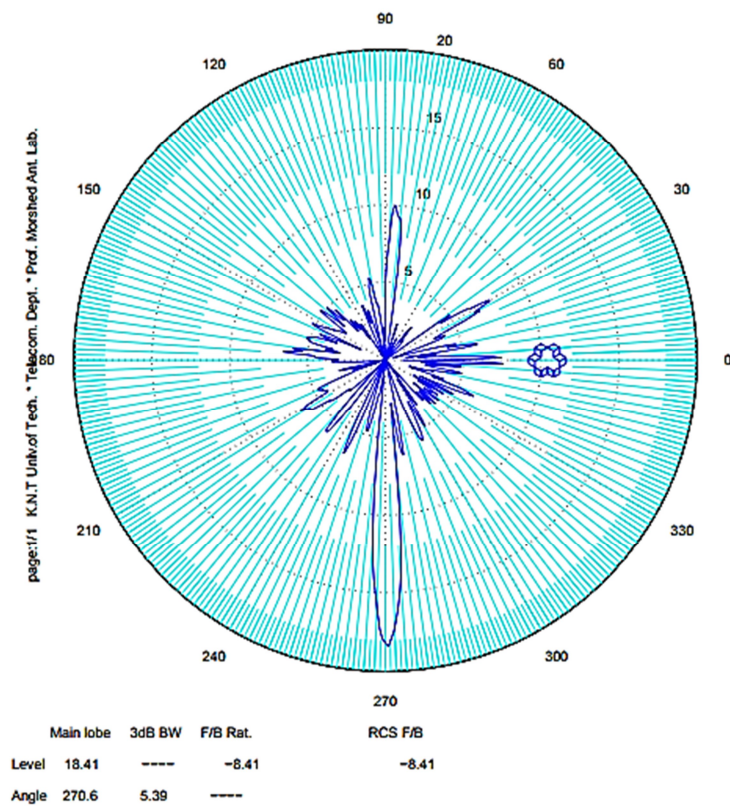
(الف)

شکل (۳-۳۰) (الف) آنتن فرستنده و گیرنده (ب) ساختار مورد آزمایش

در قسمت‌های قبل و در شکل (۳-۱۴) آورده شده است که طبق شبیه سازی در فرکانس 7.5GHz ، تقریباً به اندازه 9 dB و 11.2GHz به مقدار 28 dB ، سطح مقطع راداری کاهش یافته است. به دلیل اینکه امکان اندازه گیری سطح مقطع راداری در یک بازه‌ی فرکانسی وجود نداشته است در دو تک فرکانس 7.5 GHz و 11.2GHz ، سطح مقطع راداری اندازه گیری شد طبق شکل قطبی ارائه شده از آزمایشگاه مورد نظر که در شکل (۳-۳۱) و (۳-۳۲) آورده شده است در فرکانس GHz 7.5 ، به اندازه 11.59 dB و در فرکانس 11.2GHz به مقدار 8.41 dB کاهش را نشان می دهد.

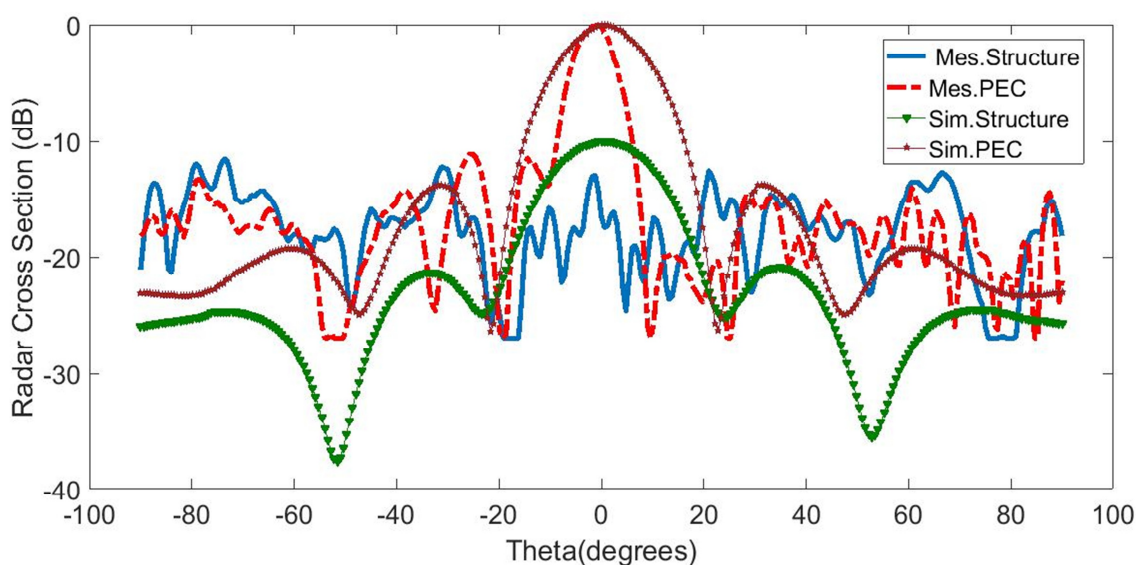


شکل (۳-۳۱) الگوی تابشی 360° از ساختار در فرکانس ۷.۵ GHz

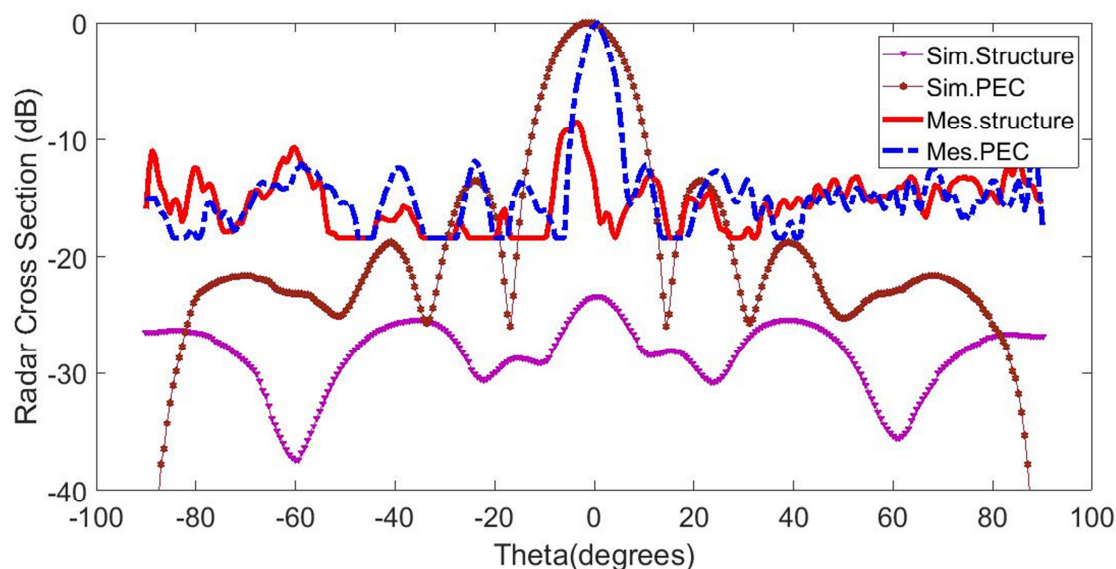


شکل (۳-۳۲) الگوی تابشی 360° از ساختار در فرکانس ۱۱.۲ GHz

این نمودارها به صورت دو بعدی و در حالت مقایسه در ادامه آورده شده است. در شکل (۳-۳۳) الگوی تابشی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده ساختار و هادی کامل به صورت دو بعدی در فرکانس ۷.۵ GHz آورده شده است. همانطور که می بینیم تفاوت بیشینه ی سطح مقطع راداری ساختار و هادی کامل در شبیه سازی شده، ۱۰.۰۵ dB بوده است و تفاوت بیشینه ی سطح مقطع راداری ساختار و هادی کامل ساخته شده، ۱۱.۵۹ dB اندازه گیری شده است. که مقدار اندازه گیری شده از مقدار شبیه سازی شده، بهتر می باشد. همچنین در شکل (۳-۳۴) نیز الگوی تابشی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده ساختار و هادی کامل به صورت دو بعدی در فرکانس ۱۱.۲ GHz آورده شده است که می بینیم تفاوت بیشینه ی سطح مقطع راداری ساختار و هادی کامل در شبیه سازی شده، ۲۳.۴۸ dB بوده است و تفاوت بیشینه ی سطح مقطع راداری ساختار و هادی کامل ساخته شده، ۸.۴۱ dB اندازه گیری شده است. که اندکی با مقدار اندازه گیری شده متفاوت است اما مسئله ی مهم کاهش سطح مقطع راداری است.



شکل (۳-۳۳) الگوی تابشی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده ساختار و هادی کامل به صورت دو بعدی در فرکانس ۷.۵ GHz



شکل (۳-۳۴) الگوی تابشی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده ساختار و هادی کامل به صورت دو بعدی در فرکانس ۱۱.۲ GHz

یکی از دلایل نامتقارن بودن شکل های اندازه گیری شده، نقطه‌ای آغاز چرخش ساختار که روی رتور قرار دارد می باشد اما در واقع باید ماکزیمم، روی صفر درجه اتفاق افتد و شکل متقارن باشد.

۳-۴ جمع بندی و مقایسه با ساختارهای دیگر

این ساختار نسبت به ساختارهای ارائه شده دیگر، پیچیدگی کمتری دارد و از نظر ساخت بسیار آسان تر می باشد. در این ساختار از زیرلایه‌ی FR-4 استفاده شد و که هزینه‌ی ساخت بسیار کمتری نسبت به ساختارهای ارائه شده در مقاله‌های دیگر دارد زیرا عموماً از زیرلایه‌ی Rg5880 استفاده می-شود که هزینه‌ی بالایی دارد و همچنین ابعاد ساختار مورد نظر نیز کوچک تر است و ضخامت کمتری یعنی ۳.۲ mm دارد که بسیار مهم است زیرا هدف کاهش پهنای باند با کمترین حجم و وزن می باشد.

همان طور که در جدول (۳-۲) آمده است دارای پهنای باند بیشتر در زاویه های مختلف تابشی

می باشد می توان برای مقایسه مرجع [۱۷] که بیشتر مد نظر قرار داشت را بررسی کرد که در جدول (۳-۳) آورده شده است مشخص است که در زوایای مختلف پهنای باند بیشتری دارد یعنی پهنای زاویه ای پهن تری دارد و همچنین طبق شکل (۳-۱۴) پهنای فرکانسی بالایی نیز دارد یعنی حدود ۶۴٪ که پهنای فرکانسی برابر با ساختار ارائه شده در مرجع [۱۷] دارد.

جدول (۳-۳) مقایسه پهنای زاویه ساختار ارائه شده و [۱۷]

پهنای باند موج ورودی با قطبش	پهنای باند موج ورودی با قطبش	زاویه موج برخوردی (°)
TEz (%) [17]	ساختار ارائه شده (%) TEz	
63%	64%	0°
64%	84% (< -5.7 dB)	10°
55%	24% (85% < -5.7 dB)	20°
45%	70.7%	30°
34%	77.6%	40°

۳-۵ راهکار های پیشنهادی

✓ پیشنهاد می شود که سعی شود سلول هایی ارائه شود که فاصله ی فرکانسی دو فاز 90° -

و 90° + افزایش یابد.

✓ پیشنهاد می شود دو سلول ارائه شده در دو فرکانس مختلف با فاصله ی هرچه بیشتر

(در صورت امکان) تشدید کنند تا در محدوده ی فرکانسی بیشتری اختلاف فاز

$30^{\circ} \pm 180^{\circ}$ ایجاد کند و پهنای باند افزایش یابد.

مراجع

1. Mahafza, B.R.(**2002**), “ **Radar systems analysis and design using MATLAB** ”: CRC press.
2. O'Donnell, R.M.,(**2010**) “Radar Systems Engineering Lecture 7–Part 1 Radar Cross Section”. IEEE New Hampshire Section,.
3. Fuhs, A.E. and A.E. Fuhs,(**1984**) “Radar cross section lectures”.American Institute of Aeronautics and Astronautics.
4. Borkar, V., et al.(**2010**), “Radar cross-section measurement techniques”. Defence Science Journal,. **60(2)**: p. **204**.
5. Eugene F. Knott , J.P., Inc. F. Shaeffer ,Michael T. Tuley,(**2004**) “ **Radar Cross Section**”. SciTech Publishing, Inc.
6. Jenn, D.C.,(**1995**) “**Radar and laser cross section engineering**”. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, **1995**.
7. Singh, H. and R.M. Jha, (**2015**) “**Active Radar Cross Section Reduction**”. Cambridge University Press.
8. Munk, B.A.,(**2000**) “Frequency selective surfaces: theory and design”. Vol. **29**.Wiley Online Library.
9. Yang, F. and Y. Rahmat-Samii,(**2009**) “**Electromagnetic band gap structures in antenna engineering**”. Cambridge university press Cambridge, UK.
10. Sievenpiper, D., et al.,(**1999**) “High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band”. IEEE Transactions on Microwave Theory and techniques,. **47(11)**: p. **2059-2074**.
11. Yang, F. and Y. Rahmat-Samii,(**2003**) “Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications”. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. **51(10)**: p. **2691-2703**.
12. Paquay, M., et al.,(**2007**) “Thin AMC structure for radar cross-section reduction”. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. **55(12)**: p. **3630-3638**.

13. Simms, S. and V. Fusco,(**2008**) “Chessboard reflector for RCS reduction”. Electronics Letters. **44**(4): p. **316-318**.
14. Galarregui, J.C.I., et al.,(**2013**) “Broadband radar cross-section reduction using AMC technology”. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,. **61**(12): p. **6136-6143**.
15. Chen, W. and C.A. Balanis.(**2014**) “Bandwidth enhancement for RCS reduction using checkerboard EBG surfaces”. in Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), **2014** 16th International Symposium on. IEEE.
16. Esmaeli, S. and S. Sedighy,(**2015**) “Wideband radar cross-section reduction by AMC”. Electronics Letters. **52**(1): p. **70-71**.
17. Chen, W., C.A. Balanis, and C.R. Birtcher,(**2016**) “Dual Wide-Band Checkerboard Surfaces for Radar Cross Section Reduction”. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,. **64**(9): p. **4133-4138**.
18. Palreddy, S. and A. Zaghloul.(**2013**) “Circuit analysis of electromagnetic band gap (EBG) structure”s. in Electromagnetic Theory (EMTS), Proceedings of **2013** URSI International Symposium on. IEEE.
19. Constantine, A.B.,(**2005**) “**Antenna theory: analysis and design**”. MICROSTRIP ANTENNAS, third edition, John wiley & sons.

Abstract

In this thesis, an EBG structure is used to reduce radar cross-section. In general, these structures have unique features that realize this goal. The high bandwidth and low sensitivity are the main challenges in design of an EBG structure. The EBG provided in this thesis is manufactured on a typical FR-4 substrate with thickness of 3.2 mm. In fact, this structure consists of two different cells, the first cell is five square metal, and the second one is a metal-free plane. The structure is arranged in 4×4 chessboard plane.

Based on simulations, the phase difference ($180^\circ \pm 37^\circ$) is occurred in frequency range of 6.2 GHz to 12.6 GHz this means that the structure has 64% of the frequency bandwidth. The two type of polarization TE_z and TM_z is also investigated. The results show a good bandwidth.

The structure presented in this thesis was constructed and the radar cross section of structure was measured at two frequencies of 7.5 GHz and 11.2 GHz, which resulted in a decrease of radar cross-section of 11.59 dB and dB 8.41, respectively.

The equivalent circuit of the structure was simulated with ADS, which had a very good fit with the CST simulation.

Keywords: Reduced radar cross section, EBG structures, TM_z polarization, TE_z polarization, recoating phase, resonant frequency



Shahrood University of
Technology

Faculty of Electrical of Technology

M.Sc Thesis in Electromagnetic Wave and Field Engineering

A Reduced Radar Cross Section Structure with Enhancement Efficiency

By: Marzie Gholipour Bariki

Supervisor:

Dr. Nima Azadi Tinat

Advisor:

Dr. Javad Ghalibafan

March.2018

