

استفاده از ساختارهای EBG در کاربردهای آنتنی

امیر جعفرقلی^۱

منوچهر کامیاب^۲

چکیده

در این مقاله ساختارهای EBG مطالعه می شوند و کاربردهای مختلف آنها در زمینه آنتن بررسی می گردد. در ادامه با توجه به اهمیت ساختارهای Mushroom و UC-EBG³ به بررسی کاربردهای آنتنی آنها می پردازیم. برای این منظور با مقایسه دو روش: استفاده از ساختارهای فرامواد، و استفاده از ساختارهای Mushroom؛ از آنها به منظور یک طرفه کردن پترن تشعشی آنتن بهره می بریم. مقایسه عملکرد این دو روش نشان می دهد که اگرچه میزان بهبود در FBR، به مراتب در روش پوشش فرامواد بیشتر از EBG است؛ ولی کاهش شدید پهنای باند مانع از استفاده از این روش در خصوص آنتن های باند پهن می گردد. در ادامه با بررسی ساختار UC-EBG، به استخراج مدار معادل آن می پردازیم و در نهایت با استفاده از مدار معادل استخراج شده میزان تاثیر آن در کاهش کوپلینگ متقابل بین آرایه ای از آنتن های میکرواستریپی را بررسی می نماییم.

کلید واژه

فرامواد، ساختارهای EBG، افزایش گین، جهتی کردن پترن تشعشی

۱. دانشجوی دکتری برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرطوسی jafargholi@ee.kntu.ac.ir

۲. دانشیار دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرطوسی

3.Uniplanar Compact Band Gap

تاریخ دریافت: ۸۹/۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۸۹/۸/۱۲

مقدمه

فرامواد ساختارهایی مصنوعی هستند که به دلیل خواص و کاربردهای متنوع در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته اند. فرامواد اشاره به موادی دارد که به صورت طبیعی موجود نیستند و می بایست به صورت مصنوعی ساخته شوند. از جمله فرامواد شناخته شده ساختارهای پرپودیک EBG می باشد. در این مقاله به مطالعه ساختارهای EBG و کاربردهای مختلف آن در زمینه آنتن می پردازیم. در این مقاله با بررسی روش های افزایش گین توسط ساختارهای فرامواد، به بررسی ساختارهای Mushroom به منظور یک طرفه کردن پترن تشعشی آنتن می پردازیم. این روش در آنتن هایی کاربرد دارد که جهت یک طرفه کردن پترن آنتن نیاز به استفاده از ساختارهای محفظه رزنانسی و جاذب می باشد. مقایسه عملکرد این دو روش نشان می دهد، که اگرچه میزان بهبود در FBR، به مراتب در روش پوشش فرامواد بیشتر از EBG می باشد؛ کاهش شدید پهنای باند، مانع استفاده از این روش در خصوص آنتن های باند پهن می گردد. در ادامه با بررسی ساختارهای UC-EBG، به استخراج مدار معادل آنها پرداخته و به بررسی میزان تاثیر آنها در کاهش کوپلینگ متقابل بین آرایه ای از آنتن های مایکرواستریپی می پردازیم.

معرفی ساختارهای EBG و کاربردهای آنها

در اصطلاح EBG، ساختاری است با مشخصه باند ممنوعه فرکانسی که در این باند مانع عبور امواج تابشی صفحه ای به ازاء پلاریزاسیونها و زوایای تابش مختلف می شود. در عمل دستیابی به چنین ساختاری مشکل می باشد ولی با توجه به نوع استفاده از آن می توان بصورت جزئی به برخی از این ویژگیها دست یافت. بعنوان مثال فیلتر یک ساختار EBG می باشد که برای تابش موج در یک جهت خاص عمل می کند و یا ساختارهای FSS^۱ برای زوایای تابش محدود و پلاریزاسیونهای مشخص داری خواص ساختارهای EBG می باشد. ساختارهای EBG را می توان از دیدگاههای مختلف تقسیم بندی کرد که به چند مورد از آنها اشاره می شود. ساختارهای EBG از نظر ابعاد سه دسته اند. تک بعدی شامل خانواده خطوط انتقال است که از آنها برای ساخت فیلتر، تغییر دهنده های فاز، کوپلر، آنتن های موج نشستی، فیبرهای نوری با ظرفیت بسیار بالا و ... استفاده می شود. ساختارهای دو بعدی عمدتاً برای ساخت فیلترهای فضایی، سطوح با امپدانس بالا و یا سطوح الکترومغناطیسی مصنوعی، رزوناتورهای دو بعدی و... ساختارهای سه بعدی که عمدتاً در اپتیک استفاده می شوند و نیز ساختارهای فرامواد که برای ساخت مواد مصنوعی برای کنترل پارامترهای الکترومغناطیسی ماده استفاده می شود.

1.Frequency Selective Surface

ساختارهای EBG از نظر نحوه پیاده سازی به سه دسته تقسیم می شوند: ساختارهایی که کاملاً توسط دی الکتریک ساخته می شوند، ساختارهایی که کاملاً فلزی هستند و ساختارهایی شامل دی الکتریک و فلز. پیاده سازی ساختارهای EBG برای کارهای اپتیکی به دلیل ابعاد بسیار کوچک مشکل است. در عوض این مشکل برای کار در فرکانسهای مایکروویو وجود ندارد؛ که علت آن ابعاد ساختار در این فرکانسها است. پیاده سازی ساختارهای EBG بر اساس مواد دی الکتریک موجب بزرگ شدن ابعاد ساختار می شود [۱]. به منظور کاهش ابعاد ساختارهای فلزی پیشنهاد شده اند. اشکال این ساختارها افت بالای آنها در فرکانس های مایکروویو می باشد [۲]؛ لذا پیاده سازی با استفاده از هر دو نوع ماده دی الکتریک و فلز راهی میانی برای داشتن ساختاری با افت کم و ابعاد کوچک می باشد [۳]. مهمترین مزیت ساختارهای اخیر امکان کنترل باند ممنوعه توسط تغییر پارامترهای دی الکتریک می باشد [۴]. کاربرد ساختارهای EBG را می توان به دو دسته تقسیم کرد. مخابرات نوری و مخابرات رادیویی.

مهمترین کاربرد ساختارهای EBG ساخت سطوح مصنوعی است. سطح موجودی که در کاربردهای مختلف الکترومغناطیسی مورد استفاده قرار می گیرد سطح هادی کامل^۱ است. این سطح دارای خواصی است که در برخی مواقع اثرات نامطلوبی بر عملکرد سامانه مورد مطالعه می گذارد و باعث ایجاد محدودیت هایی می شود که عبارتند از:

(الف) این نوع سطح به عنوان بازتابنده منجر به انعکاس انرژی آنتنی می شود که در مقابل آن قرار گرفته است و با توجه به فاصله آنتن از آن می تواند باعث افزایش و یا کاهش بهره آنتن در جهت مورد نظر شود. اگر فاصله آنتن خیلی نزدیک سطح باشد با توجه به فاز ضریب موج بازتابش، تشعشع آنتن از بین می رود لذا معمولاً لازم است که آنتن در فاصله ای حدود ربع طول موج از صفحه زمین قرار گیرد تا این نوع اثر مخرب صفحه زمین به حداقل کاهش یابد.

(ب) مشکل بعدی در استفاده از صفحه هادی کامل الکتریکی جریان سطحی است که روی آنتن جریان می یابد. این جریانها بخودی خود بر روی الگو تشعشعی آنتن تاثیری ندارند ولی در اثر برخورد با لبه های صفحه زمین منجر به ایجاد پراکنش، ایجاد لوب پشتی و نیز تلف انرژی می شوند.

(ج) ایجاد امواج سطحی (رونده و نشتی) روی لایه دی الکتریک پوشاننده سطح هادی الکتریکی کامل. دلیل وجود ماده دی الکتریک که بعنوان زیر لایه در آنتنهای میکرو استریپ بکار می رود این امواج سطحی نیز به نوبه خود باعث کاهش کارایی آنتن و نیز افزایش تزویج آنتنهای مجاور در ساختار آرایه ها می شود.

1.PEC

راهکارهای متفاوتی تا کنون برای کاهش و یا از بین بردن امواج سطحی پیشنهاد شده است که می توان به سطوح شیار بندی شده و یا سطوح شامل موانع کوچک استفاده کرد. موانع کوچک بدلیل ایجاد اختلالهای کوچک پهنای باند کمی دارند در حالی که برای دستیابی به پهنای باند بیشتر باید که موانع بزرگتر شوند که روند تکامل آن منجر به ایجاد سطوح امیدانس بالا^۱ می شود [۵]. معمولا برای دستیابی به سطوح مصنوعی ساختارهای دو بعدی پیشنهاد می شوند.

با قرار دادن اجزاء خاص روی یک صفحه هادی به این امکان دست می یابیم که بتوان خواص الکترومغناطیسی آن را تغییر داد. در حالتی که پریود ساختار بسیار کوچکتر از طول موج است، ساختار را می توان با یک ماده معادل جایگزین کرد و مشخصات آنرا با مقادیر معادل و ساده نمایش داد. صفحه هادی معمولی دارای امیدانس سطحی بسیار کوچکی است که می توان با تعبیه کردن اجزاء مناسب روی آن بصورت متناوب به سطحی با امیدانس سطحی بالا دست یافت، می توان با استفاده از سطوح با امیدانس بالا به مرزهای هادی مغناطیسی کامل دست یافت. مزیت این مرزهای مجازی در آن است که می توان ساختار تشعشع کننده را تا حد بسیار زیادی به آن نزدیک کرد. این خصیصه باعث فشرده شدن کل ساختار به میزان بسیار زیادی شده که اصطلاحا به آن آنتن Low Profile می گویند. طبق قرار داد اگر ابعاد آنتن را بتوان به حد یک دهم طول موج تقلیل داد، آنرا Low Profile می گویند، [۶].

اگر سطح مغناطیسی کامل بعنوان صفحه زمین بکار برده شود می توان آنتن را تا حد زیادی به صفحه زمین نزدیک کرد ولی این امر باعث ایجاد تزویج زیاد آنتن و تصویرش می شود که این موضوع نیز باعث بازگشت در صد بالایی از توان ورودی به آنتن می شود. بنابراین در این حالت لازم است که از سطوح با امیدانس بالا استفاده کرد.

از دیگر کاربردهای EBG، استفاده از آنها برای رفع مشکلات آنتنهای آرایه ای و آرایه ای فازی است، [۷]. سه مشکل مهم در آنتنهای آرایه ای میکرواستریپی عبارتند از:

۱. تزویج بین المانها
۲. نقطه کور^۲ که در آنتنهای آرایه فازی در زوایای اسکن زیاد ایجاد می شود و دلیل اصلی آن ایجاد امواج سطحی و تزویج زیاد بین المانها است. در [۸] این موضوع با بکارگیری UC-PCB تحقق یافته است.

1.High Impedance Surface, (HIS)

2.Blindness Spot

۳. برای امکان اسکن زوایای بزرگ می بایست که المانهای آرایه به یکدیگر نزدیک باشند و این خود باعث ایجاد گلبرگهای فرعی بزرگ در پترن تشعشی آنتن می شود می توان این مشکل را با بکار گیری EBG تا حد زیادی کاهش داد.

ساخت آنتنهای رزونانسی از دیگر کاربردهای این ساختارهاست؛ بطور کلی این نوع آنتنها را می توان از سه منظر کلی مورد بررسی قرار داد، که عبارتند از:

۱. آنتن EBG رزونانسی و استفاده از خواص ایجاد اختلال در ساختارهای EBG، [۹].

۲. استفاده از مفهوم فابری- پروت، [۱۰].

۳. استفاده از فرامواد، [۱۱].

اگر چند لایه دی الکتریک با پریود مشخص و فواصل مناسب روی یکدیگر قرار داده شوند در فرکانسهای مشخص و باند فرکانسی مشخص تمام موج تابیده شده به آن انعکاس می یابد. در این حالت اگر یکی از لایه ها حذف شود در یک فرکانس درون باندهای که انعکاس کامل داریم موج بطور کامل گذر می کند. این خاصیت ناشی از ایجاد رزونانس در آن فرکانس می باشد. خاصیت رزونانسی در اثر کویتی ناشی از حذف یک لایه بوجود می آید. این ایده از خواص لیزر فابری پروت گرفته شده است. حال اگر یک منبع تشعشع کننده در فرکانس رزونانس و در محل کویتی ایجاد شده قرار داده شود، انرژی تشعشع شده از آن منبع در آن فرکانس و در جهت خاص متمرکز می شود. که این امر منجر به افزایش جهت دهی منبع تشعشع کننده و در نتیجه افزایش جهت دهی آنتن می شود.

ساختارهای مختلف EBG و کاربردهای آنها

در این بخش دو ساختار پرکاربرد EBG ارائه می شود و در هر مورد به بررسی کاربرد آنها خواهیم پرداخت.

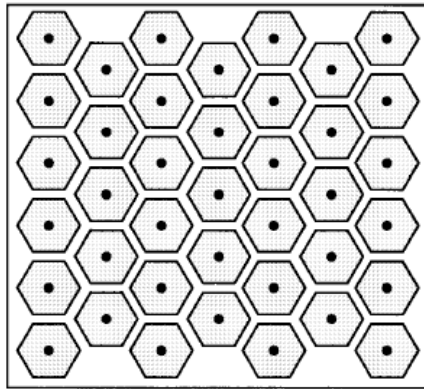
Sievenpiper ساختار

نمونه ای از اولین ساختارهایی را که به عنوان سطوح با امپدانس بالا پیشنهاد شده را می توان در شکل (۱) مشاهده کرد، این سطح در [۱۲] مورد بررسی و مشخصه های فرکانسی آن و نیز رفتار آن در مواجهه با امواج الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. المانهای بکار گرفته شده در آن می توانند شکلهای متفاوت داشته باشند و شکل شش ضلعی به این دلیل مورد توجه واقع شده است

که در جهات مختلف دارای تقارن بیشتری است. المانهای بکار گرفته شده در آن می توانند شکلهای متفاوت داشته باشند و شکل شش ضلعی به این دلیل مورد توجه واقع شده است که در جهات مختلف دارای تقارن بیشتری است. حالت ساده تر ساختار فوق که به Sievenpiper معروف است و در آن از المانهای مربع شکل استفاده می شود، توسط [۱۳] مورد بررسی دقیقتر قرار گرفته است.



(a)



(b)

شکل (۱): سطح با امیدانس بالا Sievenpiper. [12]

قبل از بررسی نحوه استفاده از ساختارهای Sievenpiper، در کاربردهای آنتنی، لازم است تا دو مسئله روشن شود. مسئله اول کاربرد مورد نظر از این ساختار و به عبارت بهتر روشن شدن بهتر مسئله است. و مسئله دوم بررسی کاربرد پوشش های فرامواد معرفی شده در این خصوص. با بررسی بهتر این دو مسئله می توان درک بهتری از لزوم استفاده از ساختار Sievenpiper، ارائه داد.

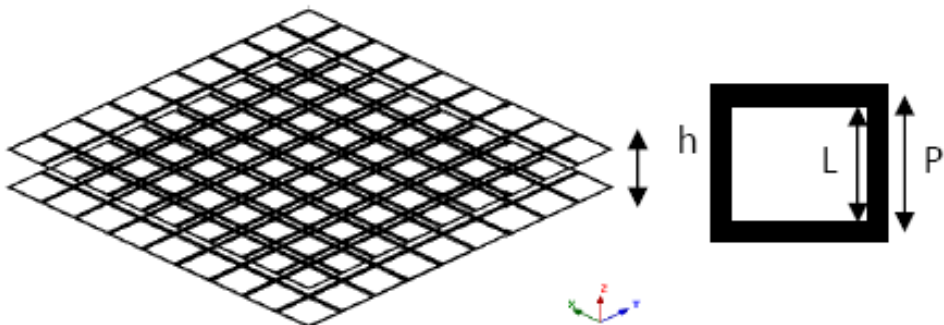
آنتن های سینوسی یکی از کاربردی ترین آنتن های پهن باند در سیستمهای جهت یاب، فید آنتن های رفلکتوری و آزمایشگاههای تحقیقاتی هستند. این آنتن ها برخلاف آنتن های حلزونی، به دلیل داشتن دو پلاریزاسیون دایروی راستگرد و چپگرد همزمان در سیستم های راداری و موشکی که نیاز به دریافت و ارسال همزمان دیتا توسط یک آنتن واحد وجود دارد نیز کاربرد دارند. این آنتن ها از لحاظ اندازه، شبیه آنتن حلزونی بوده و پهنای باند و بهره ای شبیه آن دارند.

تا قبل از معرفی شدن ساختارهای فرامواد و به طور خاص EBG ها، دو روش کلی برای حل این مشکل وجود داشت. در روش اول معمولاً آنتن روی یک محفظه رزنانسی که از ماده جاذب پر شده است قرار می گیرد تا لوب پشتی حذف شده و تنها در یک جهت تشعشع کند. محفظه رزنانسی اعوجاج پترن را که به دلیل انعکاسات ناحیه تغذیه ایجاد شده کاهش دهد. وقتی از جاذب در محفظه رزنانسی استفاده می شود، حداقل نیمی از توان جذب و تلف می شود. این مسئله در فرکانسهای پایین باند خود را بیشتر نشان می دهد. و در روش دوم با استفاده از تغییر ساختار آنتن به شکل مخروطی عملاً نیاز به محفظه رزنانسی وجود ندارد. مشکل این مسئله پیچیدگی ساخت آن می باشد. با معرفی ساختارهای فرامواد و EBG ها، دو روش کلی به روش های فوق اضافه گردید. در روش اول با استفاده از پوشش های فرامواد و با فن تیغه به عنوان هادی مغناطیس کامل امواج یکطرفه می شوند. و این در حالی است که در روش دوم، با استفاده از ساختارهای EBG، جریان های بازگشتی از سر بازوهای آنتن که موجب تشکیل لوب پشتی آنتن می شوند، کاهش خواهند یافت.

حال به بررسی تکنیک اول (استفاده از پوشش های فرامواد) می پردازیم. بر اساس مقاله [۱۴]، مقادیر اولیه اندازه پوشش فرامواد به شکل زیر انتخاب می شود:

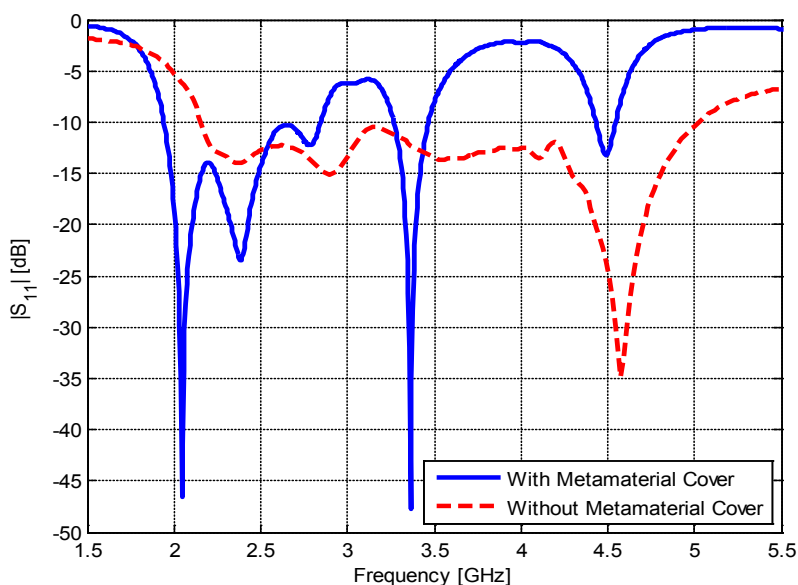
$$P = \lambda/3, L = \lambda/4, h = \lambda/3, P = 9.35\text{mm}$$

انجام بهینه سازی ها نشان می دهد که برای آنتن مورد نظر، مقادیر اشاره شده در شکل (۲) مقادیر بهینه اند.



شکل (۲): پوشش فرامواد و سلول آن، $h=L$ ، $25\text{mm} = 15.6\text{mm}$

همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، با توجه به اینکه مقادیر انتخاب شده بر اساس فرکانس کاری $f=3\text{GHz}$ ، طراحی شده اند، حدس باند باریک بودن این روش چندان مشکل نیست. می توان به راحتی در شکل، کاهش شدید پهنای باند را مشاهده نمود. در جدول (۱) گین، FBR و AR آنتن با استفاده از پوشش فرامواد نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، علاوه بر افزایش گین در این روش، بهبود تقریبی 30dB در FBR در کل پهنای باند آنتن مشاهده می شود. با وجود این، مقدار AR، در برخی فرکانس ها مناسب به نظر نمی رسد.



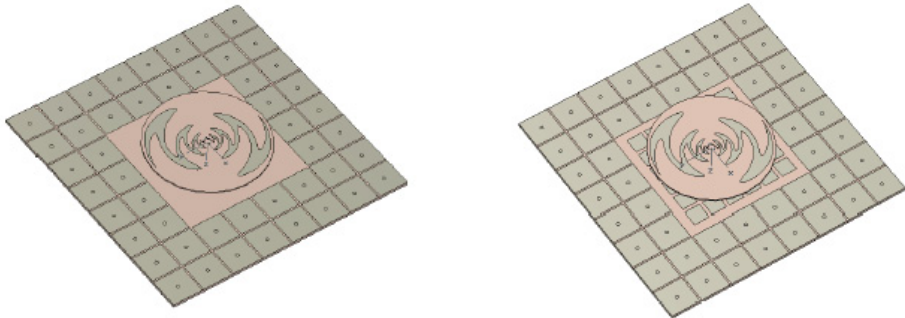
شکل(۳): افت بازگشتی آنتن سینوسی با وبدون پوشش فرامواد

Frequency GHz	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Gain (dBi)	8.4	9.4	10.0	8.7	8.2	7.5	6.9
FBR (dB)	33.6	31.2	37.5	39.5	35.8	31.8	29.3
AR (dB)	2.5	3.38	3.72	5.88	2.41	5.84	7.53

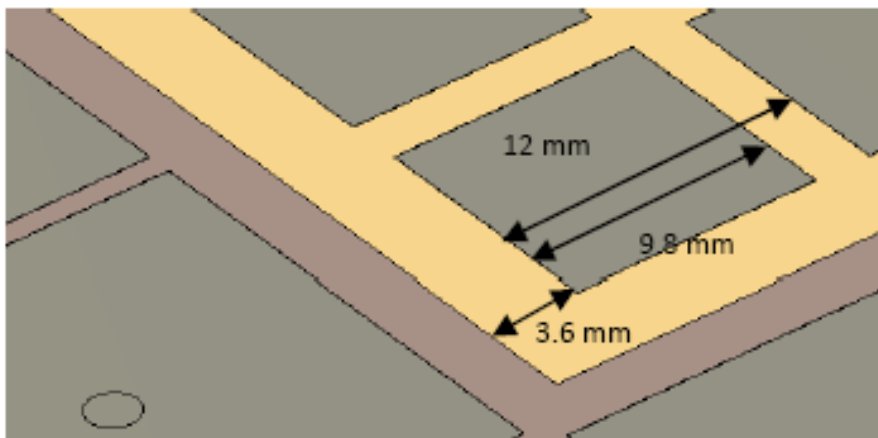
جدول (۱) گین، FBR و AR آنتن با استفاده از پوشش فرامواد

با روشن شدن محدودیت زیاد استفاده از پوشش فرامواد، به بررسی کاربرد ساختارهای Sievenpiper در یکطرفه سازی پترن تشعشی آنتن می پردازیم. در [۱۵]، استفاده از ساختار Sievenpiper مربعی جهت یکطرفه کردن پترن آنتن حلزونی و حذف محفظه رزناسی پیشنهاد شده است. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که بر اساس روش پیشنهادی، الگو آنتن به طور بی نقص یکطرفه نشده است.

در مقاله حاضر ابتدا روش پیشنهاد شده بر روی آنتن سینوسی پیاده شده و در ادامه با استفاده از فن RIS [۱۶]، پترن آنتن به طور بی نقص یکطرفه شده است، شکل (۴). برای این منظور از ۶ سلول ${}^4\text{RIS}$ روی زیرآیند استفاده شده است. ابعاد زیرآیند $38 \times 38 \text{mm}$ و ضخامت آن 2mm بوده است. نتایج شبیه سازی برای سه طرح مختلف در جدول (۲) ارائه شده است. در این طرح ها نفوذپذیری الکتریکی $\epsilon_r = 1,4,9,7$ انتخاب شده است. پارامترهای EBG همان پارامترهای ارائه شده در مقاله [۱۵] است. پارامترهای RIS در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، گین آنتن یکنواخت و FBR بالای 18dB است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که استفاده از RIS موجب بهبود 7.4dB گین در بدترین شرایط (فرکانس 4GHz) برای $\epsilon_r = 7$ شده است. در شکل (۶) نتایج شبیه سازی آنتن به همراه ساختار پیشنهادی مشاهده می شود. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، پترن آنتن در پهنای باند کاری آنتن به طور کامل و بی نقص یکطرفه شده است.



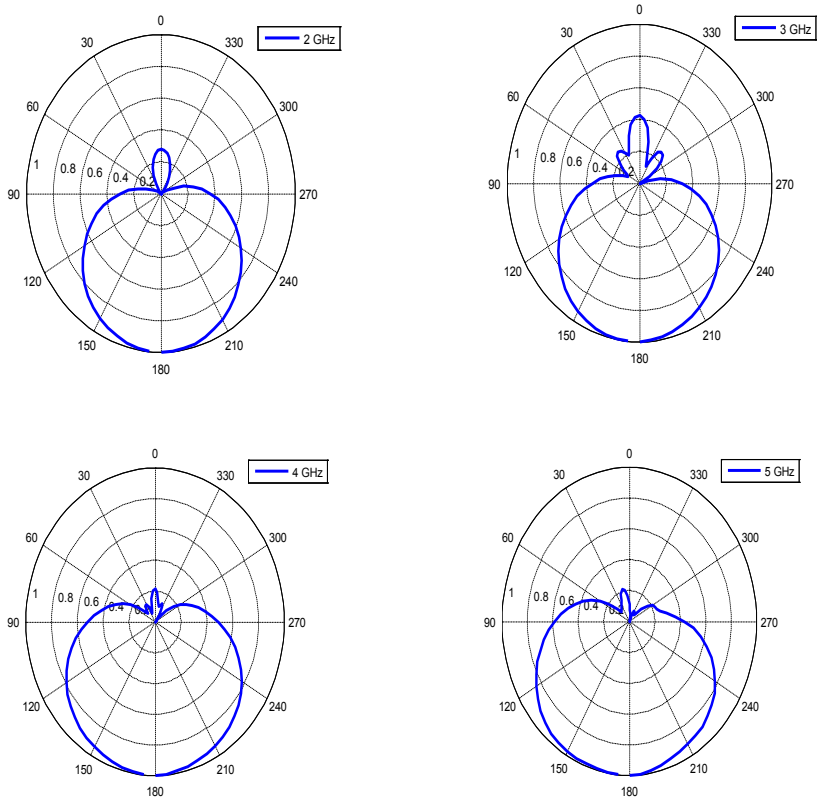
شکل (۴): استفاده از ساختار EBG (سمت چپ) و ساختار EBG به همراه RIS (سمت راست)



شکل(۵): پارامترهای RIS مشخص شده، زیرآیند مورد استفاده در ساختار RIS با رنگ روشن تر مشخص شده است.

Frequency GHz		2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Gain (dBi)	Sinuous	2.64	3.71	6.31	5.62	5.5	5.87	5.87
	Ref [15]	9.7	10.1	9.3	8.4	8.7	9.6	8.4
	Design I $\epsilon_r=4.9$	9.5	10.0	9.3	8.4	8.9	9.2	8.4
	Design II $\epsilon_r=7$	8.4	8.6	5.8	7.2	8.8	8.2	3.5
	Design III $\epsilon_r=1$	9.3	8.1	9.8	8.8	9.6	9.5	8.8
FBR (dB)	Ref [15]	21.8	25.9	18.0	26.3	27.8	21.6	30.7
	Design I $\epsilon_r=4.9$	21.7	27.0	18.2	26.4	28.0	21.1	34.4
	Design II $\epsilon_r=7$	23.0	21.7	16.3	24.4	27.1	18.2	-
	Design III $\epsilon_r=1$	21.1	21.9	17.7	27.7	25.8	25.7	22.9
AR (dB)	Sinuous	1.55	1.75	1.9	2.1	2.2	2.35	2.5
	Ref [15]	2.0	2.3	2.5	3.4	8.4	2.64	3.7
	Design I $\epsilon_r=4.9$	2.5	2.2	2.07	1.81	6.3	1.25	0.78
	Design II $\epsilon_r=7$	2.82	2.83	0.96	2.77	3.73	1.02	8.73
	Design III $\epsilon_r=1$	2.69	2.18	2.24	1.66	4.74	2.07	0.88

جدول (۲) نتایج شبیه سازی برای سه پارامتر اصلی آنتن بر حسب فرکانس و برای طراحی های مختلف

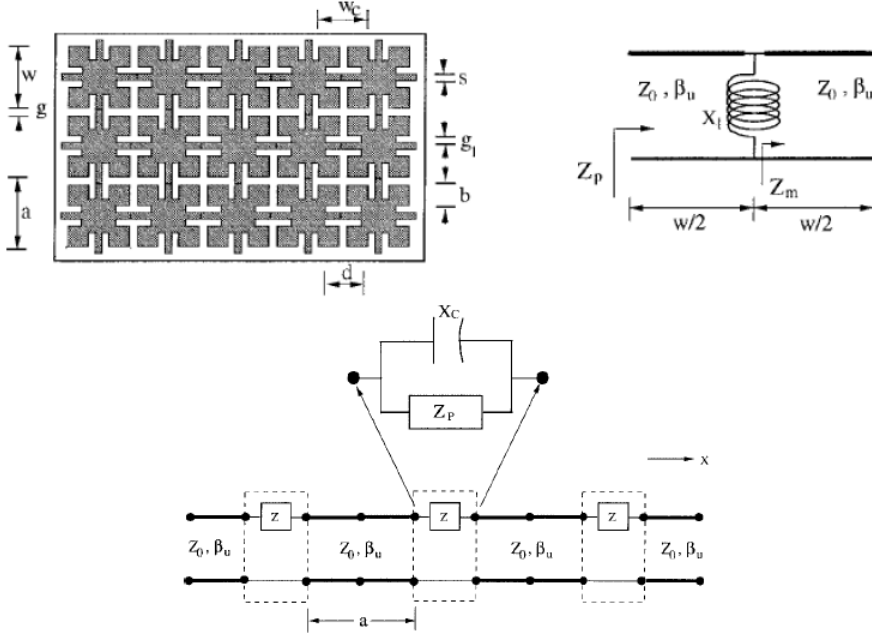


شکل (۶): پترن تشعشی آنتن برای ساختار پیشنهادی EBG به همراه RIS.

ساختار UC-PBG

ساختار دیگری که به عنوان سطوح با امپدانس بالا در نظر گرفته شده اند معروف به UC-PBG هستند [۱۷]. در شکل (۷)، نمونه سلول به همراه مدار معادل پیشنهادی آن ارائه شده است. مزیت این ساختارها عبارتند از: اندازه فشرده، صفحه ای و تخت بودن، وزن کم و باند فرکانسی وسیع در حالتی که بعنوان EBG استفاده می شود. با توجه به ویژگیهای نام برده شده این نوع ساختارها کاربردهای متفاوتی در آنتن و مایکروویو دارا هستند. در این ساختار می توان با اتصال المانها با یکدیگر با استفاده از خطوط میکرواستریپ نازک از بکار گیری میله های اتصال دهنده المانها با صفحه زمین جلوگیری کرد که این نیز خود منجر به ساخت بسیار ساده ساختار می شود. از کاربردهای مهم این ساختار

استفاده به عنوان کاهنده امواج سطحی در آرایه آنتن ها به منظور کاهش کوپلینگ متقابل است.



شکل (۷): مدار معادل ساختارهای [۱۷] UC-PBG

$$L = 0.25 \times 10^{-7} d \left[\ln \left(\frac{d}{s} \right) + 0.2235 \left(\frac{s}{d} \right) + 1.193 \right] k_g \quad (1)$$

$$k_g = 0.57 - 0.145 \ln \left(\frac{s}{t} \right)$$

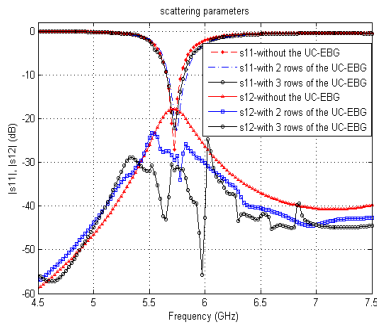
$$C = \frac{2b\epsilon_0(\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{w_c}{g} \right) \quad (2)$$

با در نظر گرفتن مدار معادل ارائه شده در [۱۷]، و با استفاده از محاسبه کوپلینگ متقابل [۶]، و با تصحیح این مقدار با استفاده از رابطه (۳) می توان به محاسبه مقدار کوپلینگ در یک آرایه دوتایی پرداخت. در [۱۸]، نتیجه شبیه سازی عددی برای دو طرح مختلف آرایه آنتن میکرواستریپی ارائه شده، که در شکل (۸-الف و ب) نتایج ارائه شده نشان داده شده است. در این مقاله پارامترهای آنتن و ساختار UC-EBG همان پارامترهای اشاره شده در [۱۸] در نظر گرفته شده است. در شکل

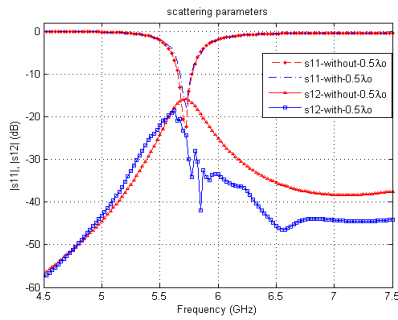
(۸- ج و د) نتایج حاصل از محاسبه کوپلینگ متقابل برای این دو طراحی ارائه شده است. همانطور که در شکل دیده می شود، تطابق مناسبی بین نتایج عددی محاسبه شده توسط آنالیز عددی و محاسبات آنالیتیک انجام شده در این روش وجود دارد.

$$C_{\max} = \frac{1}{L} \left[1 - (1 - L^2)^{1/2} \right] \quad (۳)$$

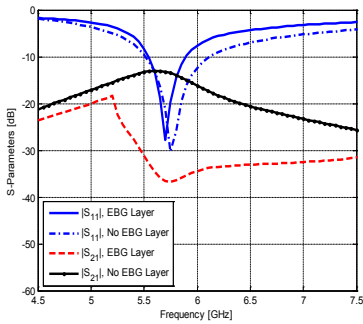
$$L = \frac{|Y_{12}Y_{21}|}{2 \operatorname{Re}(Y_{11})\operatorname{Re}(Y_{22}) - \operatorname{Re}(Y_{12}Y_{21})}$$



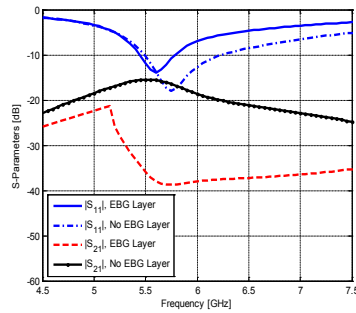
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۸): نتایج (الف) و (ب) شبیه سازی عددی، [۱۸]، و (ج) و (د) محاسبه کوپلینگ متقابل؛ فواصل المانها 0.63λ و 0.5λ .

نتیجه گیری

در این مقاله ساختارهای EBG و کاربردهای مختلف آن در زمینه آنتن مطالعه گردید. با استفاده از ساختارهای Mushroom پترن آنتن سینوسی یک طرفه شده و بدون ایجاد تلف در مسیر موج، مشخصه FBR تا حدود ۲۰dB بهبود داده شد. به منظور بهبود کیفیت پترن از RIS نیز استفاده گردید. در ادامه مدار معادل ساختارهای UC-EBG، استخراج شده و با استفاده از نشان داده شده که برای یک آرایه آنتن دو تایی میکرواستریپی، می توان با استفاده از این ساختار بیش از ۱۰dB کوپلینگ متقابل را کاهش داد.

مراجع

- 1.E., A. Abeyta, G. Tuttle, M. Tringides, R. Biswas, C. T. Chan, C. M. Soukoulis, and K. M. Ho. «Measurement of a three-dimensional photonic band gap in a crystal structure made of dielectric rods,» *Physical Review B* 50: 1945-1948 (15 July 1994).
- 2.Sigalas, M. M., C. T. Chan, K. M. Ho, and C. M. Soukoulis. «Metallic photonic band-gap materials,» *Physical Review B* 52: 11744-11751 (15 October 1995).
- 3.McCalmont, J. S., M. M. Sigalas, G. Tuttle, K.-M. Ho, and C. M. Soukoulis. «A layer-by-layer metallic photonic band-gap structure,» *Applied Physics Letters* 68: 2759-2761 (6 May 1996).
- 4.Sievenpiper, D. F., E. Yablonovitch, J. N. Winn, S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, «3D Metallo-Dielectric Photonic Crystals with Strong Capacitive Coupling between Metallic Islands,» *Physical Review Letters* 80: 2829-2832 (30 March 1998).
- 5.D. F. Sievenpiper, High-Impedance Electromagnetic Surfaces, A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, University of California, Los Angeles, 1999

- 6.C. A. Balanis, "Antenna theory, Analysis and design", John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- 7.F. Yang, and Y. Rahmat-Samii, "Microstrip Antennas Integrated With Electromagnetic Band-Gap (EBG) Structures: A Low Mutual Coupling Design for Array Applications," IEEE Trans Antennas Propagat, Vol. 51, No. 10, pp.2936-2946, Oct. 2003
- 8.J. M. Baracco, M. Paquay, and P. Maagt, "An Electromagnetic Bandgap Curl Antenna for Phased Array Applications," IEEE Trans Antennas Propagat, Vol. 53, No. 1, pp. 173-180, Jan. 2005.
- 9.Y.J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, and W. S. Park, "Application of Electromagnetic Bandgap (EBG) Superstrates With Controllable Defects for a Class of Patch Antennas as Spatial Angular Filters," IEEE Trans Antennas Propagat, Vol. 53, NO. 1, pp. 224-235, JAN. 2005.
- 10.A. R. Weily, L. Horvath, K. P. Esselle, B. C. Sanders, and T. S. Bird, "A Planar Resonator Antenna Based on a Woodpile EBG Material," IEEE Trans Antennas Propagat, Vol. 53, No. 1, pp.216-223, Jan. 2005.
- 11.M. Thevenot, C. Cheype, A. Reineix, and B. Jecko, "Directive Photonic-Bandgap Antennas," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 47, No. 11, pp. 2115-2122, Nov. 1999.
- 12.D. Sievenpiper, L. Zhang, F. Jimenez Broas, N. G. Alexopolous, and E.Yablonovitch, "High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999.
- 13.F. Yang, and Y. Rahmat-Samii, "Reflection Phase Characterizations of the EBG Ground Plane for Low Profile Wire Antenna Applications," IEEE Trans. Antennas Propagat, Vol. 51, No. 10, pp. 2691-2703, Oct. 2003.
- 14.H. Xu, Z. Zhao, Y. Lv, C. Du and X. Luo, "Metamaterial Superstrate

and Electromagnetic Band-Gap Substrate for High Directive Antenna, ”
Int J Infrared Milli Waves, (2008) 29:493–498.

15.H. Nakano, K. Kikkawa, N. Kondo, Y. Iitsuka, and J. Yamauchi, “Low-Profile Equiangular Spiral Antenna Backed by an EBG Reflector,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 57, no. 5, pp. 1309–1318, May 2009.

16.H. Mosallaei, and K. Sarabandi, “Antenna Miniaturization and Bandwidth Enhancement Using a Reactive Impedance Substrate,” IEEE Trans On Antennas Propagat, Vol. 52, No. 9, pp. 2403-2414, Sept 2004.

17.M. Rahman and M. A. Stuchly, “Transmission Line – Periodic Circuit Representation of Planar Microwave Photonic Bandgap Structures”, Microwave Opt. Technol. Lett. 30 (2001).

18.H. S. Farahani, M. Veysi, M. Kamyab, and A. Tadjalli, “Mutual Coupling Reduction in Patch Antenna Arrays Using a UC-EBG Superstrate”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 9, 57-59, 2010.