

رویکردی جدید در طراحی سطوح انتخابگر فرکانس چند لایه بر پایه تنظیم قطب- صفرهای تک تک صفحات

محمود فلاح^(۱) - علی عبدالعالی^(۲)

(۱) دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۵/۲

خلاصه: در این مقاله یک رویکرد جدید برای طراحی سطوح انتخابگر فرکانس معرفی شده است. ما سعی می‌کنیم تا پاسخ فرکانسی مطلوب خود را با استفاده از تنظیم پاسخ فرکانسی هر سطح تشکیل‌دهنده، بسازیم. همچنین در این مقاله یک سطح انتخابگر فرکانس مینیاتوری دو بانده پیشنهاد شده است. در مقایسه با تکنیک‌های طراحی سنتی ساختار ارائه شده دارای مزیت غیر رزونانسی بودن عناصر سلول واحد، با ابعاد مینیاتوری می‌باشد. سلول‌های FSS پیشنهادی از دو سطح خازنی و سلفی تشکیل شده است که مانند یک فیلتر دو بانده در مقابل عبور امواج الکترومغناطیسی عمل می‌کند. عملکرد این ساختار برای زوایای مختلف تابش و پلاریزاسیون پایدار می‌باشد.

کلمات کلیدی: سطوح انتخابگر فرکانس (FSS)، مینیاتوری سازی، ساختار متناوب، فیلتر فضایی، رادوم.

A New Approach in Designing Multi-Layer Frequency Selective Surfaces based on Tuning Pole-Zeros of Individual Layers

Mahmoud Fallah⁽¹⁾ – Ali Abdolali⁽²⁾

(1) Ph.D. Candidate - Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

m_fallah@elec.iust.ac.ir

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

abdolali@iust.ac.ir

In this paper, a new approach (not new technique) is introduced for designing frequency selective surfaces (FSSs). We try to compose the desired frequency response using the frequency response of each constituent FSS. Also, a new dual-band miniaturized frequency selective surface is proposed. In contrast to the conventional FSS design technique, the presented structure takes advantage of non-resonance elements and has unit cells with a miniaturized dimension. The proposed FSS cells are composed of two complex and inductive planes that act as a dual-band filter through the pass of electromagnetic wave propagation. The performance of this structure toward various angles of incident waves and different polarizations is stable.

Index Terms: Frequency selective surface, miniaturization, periodic structure, radome.

۱- مقدمه

تحلیل فیزیکی عملکرد آن‌ها با رویکرد مداری است که کار تحلیل را بسیار ساده می‌کند. در حالی که در FSSهای رزونانسی تحلیل شبه ایستا^۱ همواره کارساز نیست.

بعضی پژوهش‌هایی که در سال‌های اخیر برای مینیاتوری کردن FSSها انجام شده، منجر به طراحی پاسخ فرکانسی‌های پایدار نسبت به تغییر زاویه تابش شده است. همچنین ابعاد سلول واحد تا 0.8λ نیز کاهش داده شده است. اما شکل پاسخ فرکانسی به دلیل نداشتن ضریب کیفیت مناسب Q_L ، دارای باند گذر یا حذف مشخص و کاربردی نمی‌باشد [۱۱-۱۴].

در فیلترها و یا جاذب‌هایی که طراح مجبور به استفاده از چند لایه FSS در کار خود می‌باشد [۱۵-۲۳]، معمولاً کار طراحی به صورت تنظیم پاسخ فرکانسی با تغییر تک‌تک پارامترهای هندسی ساختار انجام می‌پذیرد. چند لایه بودن این ساختارها و این که هر لایه نیز دارای پارامترهای هندسی مختلف است با عت می‌شود که تعدد پارامترهای دخیل در فرآیند به دست آوردن پاسخ فرکانسی مطلوب، آن را بسیار زمان بر و پیچیده کند. چرا که فرآیند بهینه سازی توسط نرم‌افزارهای تمام موج صورت می‌پذیرد.

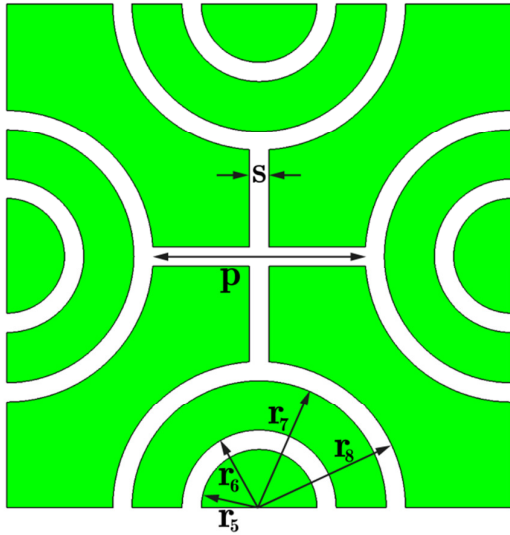
در این مقاله یک پاسخ فرکانسی مطلوب در نظر گرفته می‌شود. سپس یک ساختار دو سطحی انتخاب می‌شود. با تنظیم پاسخ فرکانسی تک- تک سطوح بطور جداگانه از یکدیگر (با فرض عدم تزیوج بین صفحات که شرایط آن در مرجع [۲۴-۲۵] برقرار است) صفرها و قطب‌های پاسخ فرکانسی مطلوب ساخته می‌شود. روند اجرایی این ایده بدین ترتیب است که ما ابتدا دو سلول واحد جدید را معرفی می‌کنیم که در مقابل امواج الکترومغناطیسی در فرکانس‌های پایین، یکی اثر سلفی و دیگری اثر خازنی دارد. سپس با استفاده از این دو سلول به طراحی FSS مرتبه اول میان‌گذر مبادرت ورزیده شده است. در ادامه تاثیر تغییر ضریب گذردهی الکتریکی زیرلایه بر روی پاسخ فرکانسی مورد ارزیابی قرار گرفته است. از خصوصیات مثبت یک FSS، تنظیم^۲ فرکانس رزونانس به وسیله تغییرات پارامترهای هندسی آن می‌باشد. ما با انجام شبیه‌سازی‌هایی میزان توانایی این ساختار را در تنظیم باند فرکانسی با تغییر برخی از پارامترهای هندسی بررسی کرده‌ایم. در نهایت میزان حساسیت پاسخ فرکانسی چند مورد از نمونه‌های طراحی شده به تغییر زاویه تابش مورد کنکاش قرار گرفته است. نا گفته آشکار است که ساختار ارائه شده در اینجا تنها یک مثال برای پیاده‌سازی این ایده می‌باشد و این روش پتانسیل استفاده برای به دست آوردن پاسخ فرکانسی‌های مرتبه بالا و حتی چند باندی نیز دارد. از کاربردهای این نوع از FSS می‌توان به کنترل امواج داخل ساختمان‌های اداری و استفاده به عنوان را دوم برای آنتن‌ها را نام برد. همچنین می‌توان سطح دسترسی قسمت‌های مختلف یک ساختمان را بخش‌هایی از طیف مخابراتی مطابق شکل (۱) محدود کرد.

سطوح انتخابگر فرکانس یا به اختصار FSS^۱ معمولاً آرایه‌ای متناوب از عناصر مشابه هستند که درون یک سطح نازک فلزی ایجاد شده و پاسخ فرکانسی معینی را در برابر امواج الکترومغناطیسی حاصل می‌کنند. این ساختارها با توجه به کاربرد گسترده‌ای که در مهندسی میدان دارند، موضوع تحقیق بسیاری از پژوهشگران این حوزه بوده‌اند. از کاربردهای FSS می‌توان طراحی جاذب امواج مایکروویو^۲ [۱]، لنز [۲]، رادومها [۳]، جهت جلوگیری از تداخل ارتباطات شبکه‌های محلی سیستم‌های مخابرات بی‌سیم و همچنین در حفظ امنیت ساختمان‌ها، شرکت‌ها و اداره‌ها [۴]، ساخت سطوح امیدانس بالا (یا هادی مغناطیسی مصنوعی)^۳ [۵]، پلارایزر [۶]، آنتن‌های آرایه بازتابی [۷] و سوپر استریت به عنوان رولایه جهت کنترل پهنای باند و بهره آنتن [۸-۹] را نام برد.

با توجه به اینکه معمولاً جهت تابش موج به FSS مشخص نیست، سعی می‌شود که در یک طراحی مطلوب، پاسخ فرکانسی تابع تغییرات زاویه تابش موج نباشد. یکی از خصوصیات مشترک بین تمامی FSSهای سنتی ابعاد عناصر رزونانسی و فاصله‌ی بین آن‌ها می‌باشد که برای داشتن رفتار فرکانسی مطلوب باید از مرتبه نصف طول موج عملکرد ساختار باشد. در عمل FSSها ابعاد محدودی دارند. به منظور مشاهده پاسخ فرکانسی مطلوب، یک سطح محدود، باید شامل تعداد زیادی عناصر تشکیل دهنده باشد (معمولاً بیشتر از ۴۰۰ عدد که متناسب با یک ناحیه به صورت $10\lambda \times 10\lambda$ است) و بدین ترتیب ابعاد ساختار بزرگ خواهد شد و در ضمن ساختار باید توسط یک جبهه همفاز صفحه‌ای یکنواخت تحریک گردد. همچنین برای بعضی از کاربردها مانند رادوم^۴ آنتن‌هایی که در فرکانس پایین کار می‌کنند به FSSهایی احتیاج است که ابعادشان از نظر الکتریکی کوچک باشد و نسبت به تغییرات زاویه تابش حساسیت کمی داشته باشند و همچنین بتوانند به جبهه فاز غیر صفحه‌ای نیز پاسخی مناسب دهند [۱۰].

در سال‌های اخیر طراحی FSS با سلول‌هایی با ابعادی بسیار کوچکتر از طول موج مورد توجه قرار گرفته است. به همین منظور دسته‌ای دیگر از FSSها ابداع شدند که در آن‌ها بجای ساختارهای رزونانسی به عنوان بلوک‌های سازنده، از سلول‌هایی با ابعاد کوچکتر که مانند عناصر فشرده مداری عمل می‌کنند، استفاده شده است. از این نوع FSSها اصطلاحاً با نام مینیاتوری نیز یاد می‌شود [۱۰-۱۴].

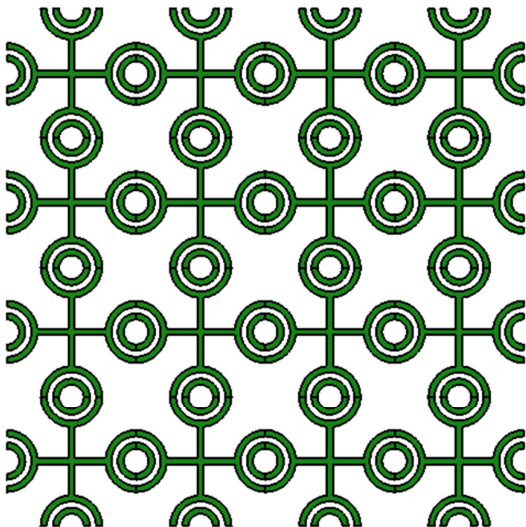
اساس کار طراحی این ساختارها ایجاد رزونانسی با تزیوج^۵ در دو بعد بر روی زیرلایه می‌باشد. به عبارت دیگر موج در هنگام برخورد با ساختار FSS حین پیشروی به داخل آن با عناصری روبرو می‌شود که در فرکانس موج تابشی عناصر فشرده محسوب می‌شوند. با توجه به اینکه زیر لایه و فضای آزاد را در فرکانس تابش موج می‌توان با خطوط انتقال مدل کرد، عناصر FSS به عنوان عناصر غیرفعال^۶ در بین این خطوط انتقال قرار می‌گیرند و در واقع مزیت دیگر این ساختارها



شکل (۳): نمای سلول واحد دارای خاصیت خازنی.
Fig. (3): Unit cell of the capacitive plan.

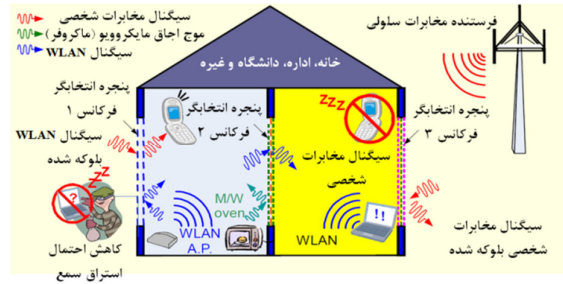
۳- تشکیل FSS مینیاتوری مرتبه اول

هدف ما ایجاد تشدید مرتبه اول می‌باشد. با قرار دادن این دو آرایه‌ی متناوب متشکل از سلول واحد‌های خازنی و سلفی به صورت موازی در فاصله کمی از یکدیگر، می‌توان به پاسخ فیلتری میان‌گذر مرتبه ۱ رسید. اگر جبهه موجی با طول موجی بسیار بزرگتر از مرتبه ابعاد سلول واحد به این ساختار بتابانیم، موج، ساختاری رزونانسی در مقابل خود می‌بیند که سلف آن را آرایه شکل (۴) و خازن آن را آرایه شکل (۵) تشکیل می‌دهد.



شکل (۴): آرایه متناوب سلفی که از کنار هم قرار دادن سلول واحد شکل ۳ تشکیل شده است.

Fig. (4): Periodic inductive array composed of alongside connected unit cells of the first Fig.

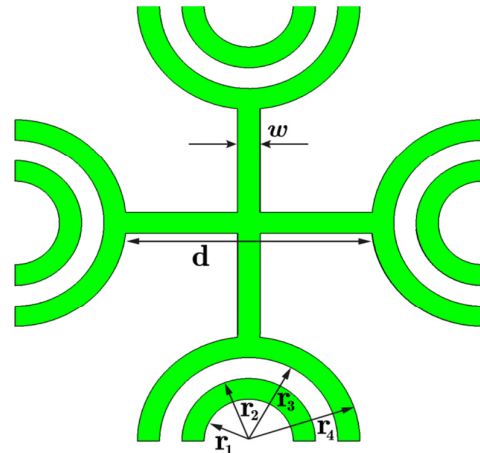


شکل (۱): پتانسیل کاربردی FSS به عنوان فیلتر فضایی در پنجره‌ها یا دیواره‌های یک ساختمان [۲۷].

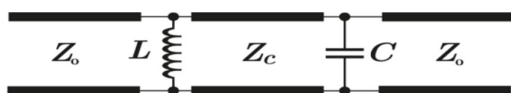
Fig. (1): Potential application of FSS as a spatial filter in windows or walls of a building [27].

۲- صفحات FSS مینیاتوری پایه برای طراحی

در شکل ۲ و ۳ سلول واحد دو سطح پایه برای طراحی فیلتر مرتبه اول میان‌گذر نشان داده شده است. منظور از یک سلول واحد یک دوره تناوب از ساختار می‌باشد. در این دو شکل قسمت‌هایی که با رنگ تیره (سبز) نشان داده شده است، فلز می‌باشد. سطح شکل (۲) و (۳) در طول موج‌هایی که خیلی بزرگتر از ابعاد آن‌ها است به ترتیب دارای اثر سلفی و خازنی می‌باشند. سلول واحد شکل (۲) و (۳) مکمل یکدیگر طراحی نشده‌اند، گرچه با دیدن شکل‌ها به ظاهر این گونه برداشت می‌شود. دلیل این امر این است که ما برای اینکه بتوانیم میزان اثر خازنی و سلفی هرکدام از صفحات را به وسیله پارامترهای هندسی آن‌ها به طور مجزا از یکدیگر کنترل کنیم، نباید پارامترهای هندسی دو سطح را وابسته به یکدیگر در نظر می‌گرفتیم.



شکل (۲): نمای سلول واحد دارای خاصیت سلفی.
Fig. (2): Unit cell of the inductive plan.



شکل (۷): مدار معادل FSS میان‌گذر مرتبه ۱.

Fig. (7): Equivalent circuit of first-order band-pass filter

این FSS را می‌توان به راحتی با پرینت عناصر هر کدام از صفحات سلفی و خازنی در دو طرف یک زیر لایه دی‌الکتریک ایجاد کرد. استفاده از زیر لایه بین دو آرایه باعث افزایش استحکام کل ساختار نیز خواهد شد [۷].

در شکل (۷) مدار معادل FSS مینیاتوری تک قطبی نشان داده شده است. در این مدل مداری سه خط انتقال وجود دارد.

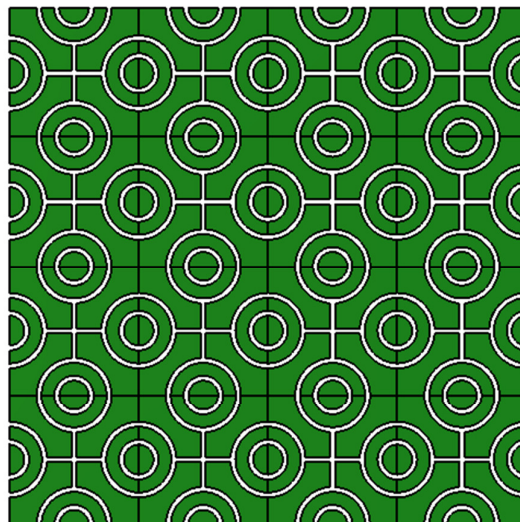
استفاده از مدل مداری باعث تسریع در تحلیل و طراحی ساختار FSS خواهد شد و دید بهتری به طراحی در فرآیند طراحی خواهد داد [۲۴] و [۲۵]. خط انتقال وسط زیر لایه دی‌الکتریک را مدل می‌کند و طول آن برابر h ضخامت دی‌الکتریک زیر لایه و امپدانس آن برابر $Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$ می‌باشد.

دو خط انتقال ابتدایی و انتهایی نمایانگر دو نیم‌فضای قبل و بعد FSS می‌باشند و امپدانس آن‌ها برابر امپدانس فضای آزاد یعنی $Z_0 = 377 \Omega$ است. همانطور که دیده می‌شود رزونانس مورد نیاز از توافقی سلف و خازن فشرده‌ی معادل و خط انتقالی که آن‌ها را از هم جدا کرده، بوجود آمده است. این FSS می‌تواند یک تک قطب ایجاد کند که نتیجه آن پاسخ فیلتری میان‌گذر است.

صفحات نسبت به جهات پلاریزاسیون افقی و عمودی متقارن می‌باشند و مدار معادل یکسانی را در برابر این دو پلاریزاسیون از خود نشان می‌دهند. بنابراین ساختار FSS نسبت به تغییر پلاریزاسیون حساس نمی‌باشد.

۴- روش شبیه‌سازی در نرم‌افزار CST

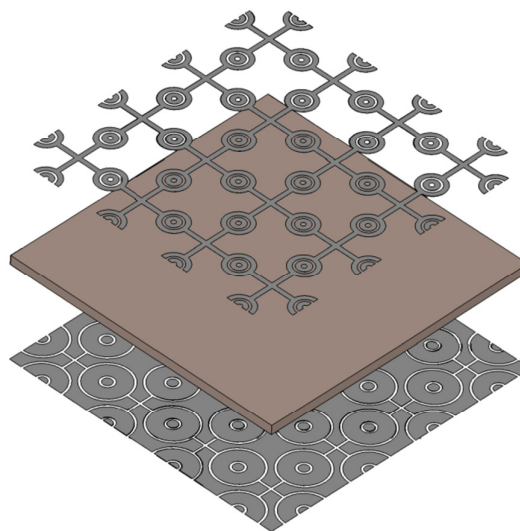
برای شبیه‌سازی ساختار از نرم‌افزار CST که یک شبیه‌ساز تمام موج^{۱۱} است، استفاده شده است. در نرم‌افزار CST ما یک سلول واحد ساختار FSS را مطابق شکل (۸) رسم می‌کنیم. نرم‌افزار به صورت پیش فرض، مرزهای اطراف سلول واحد را به صورت یک مکعب مستطیل در نظر می‌گیرد که وجه‌های مماس بر سلول واحد را که در شکل (۸) با رنگ صورتی نشان داده شده است باید به صورت شرط مرزی unit cell مطابق شکل (۹) انتخاب کنیم. در این صورت نرم‌افزار متوجه خواهد شد که باید شرایط مرزی متناوب^{۱۲} باشد. باید شرط مرزی روبرو و پشت سلول واحد می‌باشد که همان صفحات فرضی نارنجی رنگ ۱ و ۲ می‌باشند (در شکل ۸) را باید مطابق شکل (۹) به صورت open (add space) قرار دهیم. صفحات نارنجی ۱ و ۲ به عنوان منبع فرستنده و گیرنده موج صفحه‌ای فلوک‌ه عمل می‌کنند. فضای خارجی این صفحات هم لایه جاذب الکترومغناطیسی قرار داده خواهد شد تا امواج صفحه‌ای تنها به سمت FSS حرکت کند و در راستای خلاف جهت FSS درون لایه جاذب تضعیف گردد.



شکل (۵): آرایه متناوب خازنی که از کنار هم قرار دادن سلول واحد شکل ۳ تشکیل شده است.

Fig. (5): Periodic capacitive array composed of alongside connected unit cells of the second Fig.

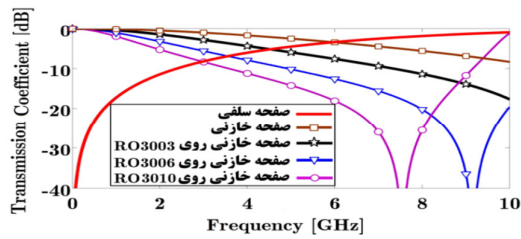
بنابراین اگر فاصله دو سطح از یکدیگر کوچک باشد، با پشت سرهم قرار دادن^{۱۱} سطوح خازنی و سلفی به فرم فشرده می‌توان یک LC موازی در مقابل موج بوجود آورد که به عنوان یک FSS مرتبه اول عمل می‌کند و نکته مهم این است که ما این سلف و خازن را در طول موجی بسیار بزرگتر از ابعاد سلول واحدشان ایجاد کرده‌ایم. رزونانس در این FSS ها در راستای عمق (یا ضخامت) آن‌ها رخ می‌دهد. هندسه سه بعدی ساختار FSS تشکیل شده از سطح خازنی، سطح سلفی و زیر لایه بین آن‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): نمایش سه بعدی ساختار پیشنهادی.

Fig. (6): 3D presentation of the proposed structure.

شده است. پاسخ فرکانسی سطح سلفی که به صورت منفرد در فضای آزاد قرار دارد نیز با خط ممتد قرمز رنگ نشان داده شده است. پارامترهای هندسی ساختار در جدول (۱) آورده شده است.



شکل (۱۱): مقایسه پاسخ فرکانسی سطح خازنی حک شده روی زیرلایه‌های مختلف راجرز و پاسخ فرکانسی سطح سلفی.

Fig. (11): Comparison of frequency response of capacitive plane on different rogers substrate and inductance plane.

Table (1): Geometric parameter of capacitive and inductive arrays (unit of millimeter).

جدول (۱): پارامترهای هندسی آرایه خازنی منفرد و سلفی منفرد (بر حسب میلیمتر)

r_1	r_2	r_3	r_4	d	w
0.5	1	2.3	8.2	5.5	0.5
r_5	r_6	r_7	r_8	p	s
0.5	1	2.3	2.8	5.5	0.5

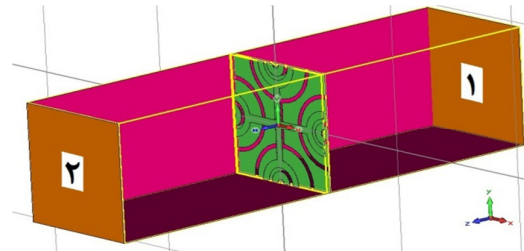
حال اگر این دو سطح را به صورت موازی در کنار یکدیگر قرار دهیم، به طوری که در فرکانس کار طول الکتریکی فاصله دو سطح کوچک باشد، در این صورت می‌توان فرکانس مرکزی را از رابطه:

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

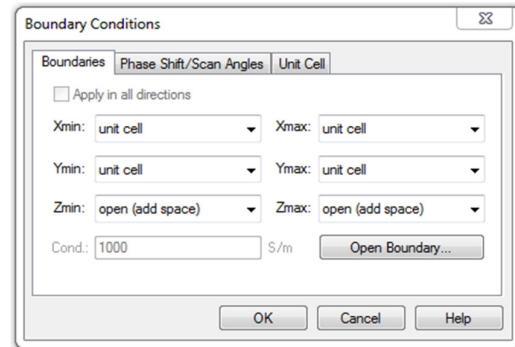
و ضریب کیفیت رزوناتور LC موازی را از رابطه:

$$Q_L \approx Z_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2)$$

به دست آورد. Q_L هر چقدر بیشتر باشد، فیلتر تیزتر خواهد بود. اگر بخواهیم فیلتر تیزی^{۱۳} داشته باشیم باید Q_L تا حد امکان بزرگ باشد. بنابراین در بازه مجاز باید C را تا حد امکان بزرگ انتخاب کنیم. بدین ترتیب باید به دنبال راه‌هایی برای افزایش مقدار خازن ساختار باشیم. فرض می‌کنیم که سطح خازنی شکل (۲) را روی یک زیرلایه دی-الکتریک حکاکی کرده‌ایم. در شکل (۱۲) میدان‌های الکتریکی در لبه‌های فلز دو طرف یکی از شکاف‌های خازنی (دید از کنار) سطح شکل (۲) در لحظه‌ای که بیشترین مقدار خود را دارا هستند، نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود می‌توان با تقریب فرض کرد که نیمی از خطوط میدان از داخل دی‌الکتریک عبور کرده و بسته می‌شوند. حال اگر ضریب دی‌الکتریک بزرگتر باشد، ظرفیت خازنی به وجود آمده در این شکاف هوایی افزایش خواهد یافت.

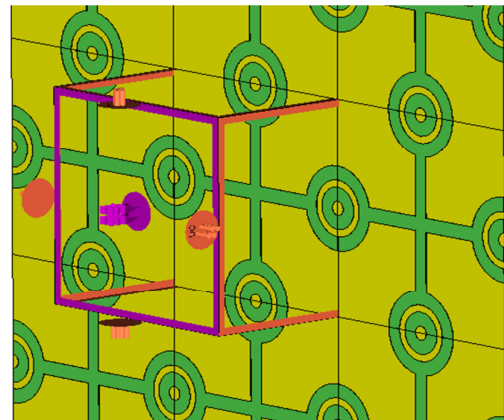


شکل (۸): هندسه سلول واحد (با رنگ سبز) مکعب مستطیل شبیه‌سازی. Fig. (8): The unit cell geometry inside the simulation air box.



شکل (۹): تعریف شرایط مرزی در پنجره پیکربندی شرایط مرزی.

Fig. (9): Defining the boundary in the boundary condition setup.



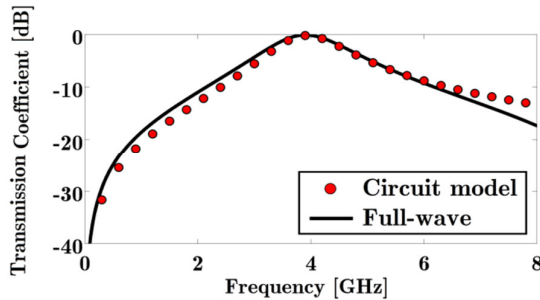
شکل (۱۰): تعریف یک سلول واحد می‌تواند یک آرایه متناوب نامحدود را شبیه‌سازی کند. همچنین با تعیین ابعاد زیرلایه به عنوان دوره تناوب مطلوب، دوره تناوب ساختار متناوب می‌تواند مشخص گردد.

Fig. (10): Defining a unit cell can simulate the infinite periodic array. The periodicity can also be specified, by setting the size of the substrate to the desired periodicity.

با اعمال شرایط مرزی متناوب به چهار وجه کناری سلول واحد و همچنین اعمال مرز لایه‌های جاذب به انتهای صفحات نارنجی رنگ ۱ و ۲، برخورد موج صفحه‌ای یکنواخت به یک سطح نامحدود تشکیل شده از سلول رسم شده (مطابق شکل ۱۰) شبیه‌سازی خواهد شد.

۵- پاسخ فرکانسی هر کدام از صفحات پایه

در شکل (۱۱) منحنی پاسخ فرکانسی سطح خازنی که به صورت منفرد در فضای آزاد قرار دارد با علائم مربعی و با رنگ قهوه‌ای نشان داده



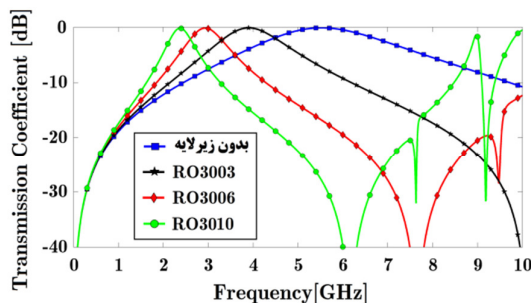
شکل (۱۳): مقایسه شبیه‌سازی تمام موج FSS تک قطب برای تابش عمود با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل مدار آن.

Fig. (13): Full-wave numerical simulations for the single-pole FSS at normal incidence compared to the results achieved by simulating the circuit model of the FSS.

پارامترهای مدل خط انتقالی (شکل ۶) ساختار شبیه‌سازی شده برابر می‌باشد که در شکل (۱۳) پاسخ فرکانسی این مدل مداری با پاسخ فرکانسی حاصل از شبیه‌سازی تمام موج (توسط نرم‌افزار CST) مقایسه شده است. پاسخ فرکانسی مدل خط انتقالی توسط نرم‌افزار ADS به دست آمده است. با توجه به توان پیش‌بینی مناسب منحنی تمام موج توسط منحنی مدل مداری، صحت این مدل‌سازی در ساده-سازی عملکرد FSS به اثبات می‌رسد.

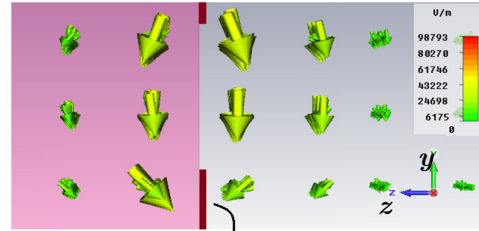
۶- تنظیم پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه اول با استفاده از تغییر زیرلایه

در مرحله بعد دو سطح خازنی و سلفی (با همان مشخصات جدول ۱) را در کنار یکدیگر قرار داده و FSS مرتبه اول خود را تشکیل می‌دهیم. بین دو سطح، زیرلایه دی‌الکتریک قرار دارد که ضخامت آن $h = 0.5 \text{ mm}$ و با فاصله بین دو سطح برابر است (آرایه‌های سلفی و خازنی در دو طرف زیرلایه حک شده‌اند). پاسخ فرکانسی این فیلتر در شکل (۱۴) به ازای زیرلایه‌هایی با ضریب گذردهی مختلف آورده شده است. با توجه به رابطه ۱ و ۲ با افزایش مقدار خازن مؤثر رزوناتور، فرکانس رزونانس کاهش و ضریب کیفیت رزونانس افزایش می‌یابد.



شکل (۱۴): پاسخ فرکانسی FSS مرتبه اول به ازای زیرلایه‌های مختلف.

Fig. (14): Frequency response of FSS for different substrates.



لیه‌های فلز دو طرف گپ‌های خازنی

شکل (۱۲): شکل میدان‌های الکتریکی در لیه‌های فلز دو طرف شکاف‌های خازنی (دید از کنار). فضای آزاد سمت راست شکل و دی‌الکتریک سمت چپ شکل قرار دارد [۲۵].

Fig. (12): Shape of electrical field on the metal edge of each side of capacitive gaps. Free space is on the right and dielectric in on the left [25].

بدین ترتیب یکی از راه‌های افزایش مقدار خازن رزوناتوری که می‌خواهیم ایجاد کنیم، استفاده از زیر لایه دی‌الکتریک با ضریب گذردهی بزرگتر از ۱ برای سطح خازنی می‌باشد. در شکل (۱۱) پاسخ فرکانسی سطح خازنی بر روی زیرلایه‌های دی‌الکتریک ساخت شرکت راجرز^{۱۴} شبیه‌سازی شده است. مشخصات سه زیرلایه مورد استفاده در جدول (۲) آورده شده است [۲۶]. ضخامت زیرلایه برابر ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

Table (2): Substrate of the properties of the second FSS used in the simulation of Fig. 11 [26].

جدول (۲): مشخصات زیرلایه‌های صفحات خازنی به کار رفته در شبیه‌سازی پاسخ فرکانسی شکل ۱۱ [۲۶].

شماره شکل	نام زیرلایه	ضریب گذردهی الکتریکی	مقدار تنازات تلفات
9	RO3003	3	0.0013
10	RO3006	6.15	0.002
11	RO3010	10.2	0.0022

همان طور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود با افزایش مقدار ضریب دی‌الکتریک زیرلایه، مقدار خازن مؤثر سطح افزایش یافته است. افزایش شیب منحنی‌های پاسخ فرکانسی ضریب انتقال سطح خازنی با افزایش ضریب گذردهی الکتریکی، به وضوح مؤید چنین مطلبی می‌باشد.

در شکل (۱۳) پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه اول حاصل از قرار دادن یک سطح خازنی و یک سطح سلفی در دو طرف زیرلایه با پارامترهای هندسی جدول (۱)، نشان داده شده است. نوع دی‌الکتریک بین دو سطح RO3003 و ضخامت دی‌الکتریک برابر ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد.

آورده شده است. ضخامت تمامی زیرلایه‌ها نیز برابر $h = 0.5 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است.

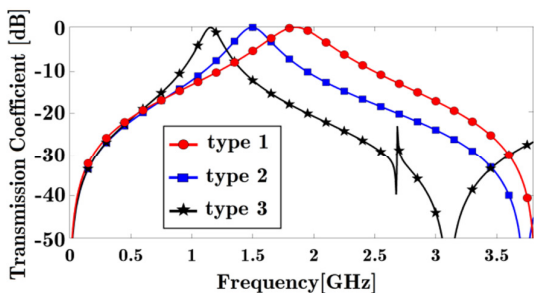
پاسخ فرکانسی سه فیلتر نوع ۱ تا ۳ در شکل (۱۶) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. فرکانس‌های رزونانس این سه نمونه به ترتیب برابر $f_{r1} = 1/8 \text{ GHz}$ ، $f_{r2} = 1/5 \text{ GHz}$ و $f_{r3} = 1/2 \text{ GHz}$ می‌باشد. ابعاد سلول واحد هر سه نمونه برابر $D = 16 \text{ mm}$ می‌باشد.

از میان نمونه‌های ۱ تا ۳ به عنوان مثالی برای بررسی حساسیت پاسخ فرکانسی به تغییر زاویه تابش، نمونه ۲ را انتخاب می‌کنیم. در شکل ۱۷ دیده می‌شود که به ازای تغییر زاویه تابش از صفر تا ۴۵ درجه پاسخ فرکانسی پایدار باقی می‌ماند.

Table (3): Geometric parameters of the inductive and capacitive plane related to first order filter for three designed types 1 to 3 and (unit of millimeter).

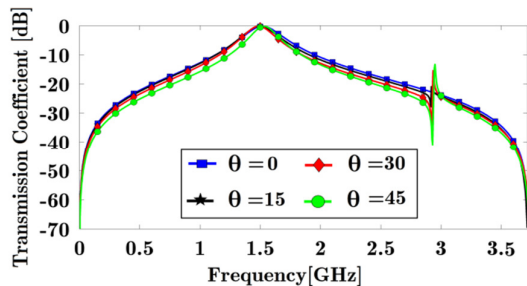
جدول (۳): پارمترهای هندسی سطح سلفی و خازنی فیلتر مرتبه اول سه نمونه طراحی شده ۱ تا ۳ (بر حسب میلیمتر)

w	d	r_4	r_3	r_2	r_1	صفحه سلفی
1	10	3	2	1.5	0.5	نمونه ۱ تا ۳
s	p	r_8	r_7	r_6	r_5	صفحه خازنی
0.9	6.2	4.9	4	2.4	1.5	نمونه ۱
0.3	7.4	4.3	4	2.8	2.5	نمونه ۲
0.1	6.8	4.6	4.5	3.6	3.5	نمونه ۳



شکل (۱۶): پاسخ فرکانسی FSS نمونه‌های ۱ تا ۳ به ازای پارمترهای هندسی مختلف به ازای زیرلایه RO3010.

Fig. (16): Frequency response of type 1 to 3 FSSs versus different geometric parameters with RO3010 substrate.

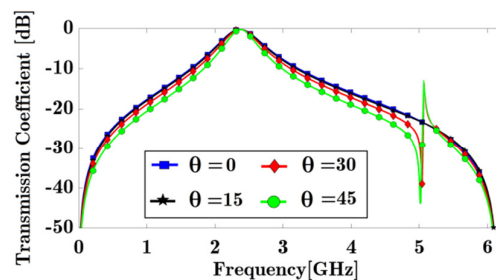


شکل (۱۷): بررسی حساسیت پاسخ فرکانسی FSS مرتبه اول نوع ۲ به تغییر زاویه تابش موج.

Fig. (17): Transmission coefficients of the first-order FSS type 2 for different angles of incidence.

فرکانس‌های رزونانس این چهار ساختار به ترتیب برابر $f_{r1} = 5/5 \text{ GHz}$ ، $f_{r2} = 4 \text{ GHz}$ ، $f_{r3} = 3 \text{ GHz}$ و $f_{r4} = 2/4 \text{ GHz}$ می‌باشد. با توجه به ابعاد سلول واحد ساختار، یعنی $D = 11/1 \text{ mm}$ کوچک سازی ابعاد سلول واحد به ترتیب برابر $D/\lambda_1 = 0/2$ ، $D/\lambda_2 = 0/15$ ، $D/\lambda_3 = 0/1$ و $D/\lambda_4 = 0/0.9$ می‌باشد.

از میان ساختارهای طراحی شده ساختاری را که دارای زیرلایه RO3010 است به عنوان نمونه بر می‌گزینیم تا حساسیت پاسخ فرکانسی آن را نسبت به تغییر زاویه تابش، بررسی کنیم. بنابراین پاسخ فرکانسی این ساختار را به ازای زوایای مختلف موج تابشی به دست آورده و در شکل (۱۵) نشان می‌دهیم. همانطور که دیده می‌شود به ازای تغییر زاویه تابش از صفر تا ۴۵ درجه پاسخ فرکانسی از پایداری خوبی برخوردار می‌باشد.



شکل (۱۵): بررسی حساسیت پاسخ فرکانسی FSS مرتبه اول نمونه ۲ به تغییر زاویه تابش موج.

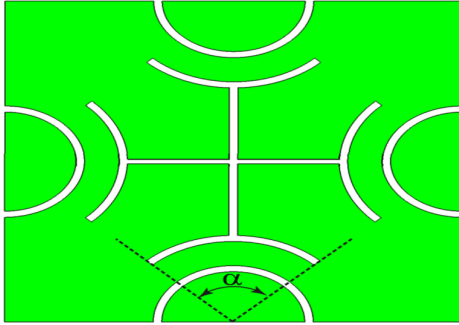
Fig. (15): Investigating frequency response sensitivity of one order FSS (type 2) versus the variation of wave incident angle.

با توجه به اینکه ساختار با چرخش ۹۰ درجه حول محور عمود بر آن از لحاظ هندسی تغییر نمی‌کند، می‌توان بدون انجام شبیه‌سازی اطمینان داشت که پاسخ فرکانسی نسبت به تغییر پلاریزاسیون حساس نمی‌باشد.

۷- تنظیم پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه اول با استفاده از تغییر پارامترهای هندسی سطوح

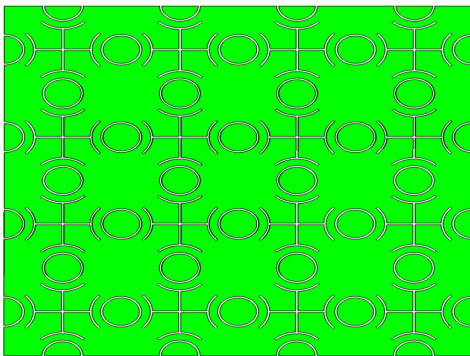
راه دیگری که برای تغییر خازن فیلتر می‌توان متصور بود تغییر پارامترهای هندسی سطح خازنی است. هرچقدر که پهنای شکاف‌های خازنی سلول واحد کاهش یابد مقدار ظرفیت خازنی آن افزایش می‌یابد. همچنین اگر پارامترهای هندسی سلول خازنی طوری تغییر کند که در مجموع طول (مسیر) شکاف‌های موجود در آن افزایش یابد، ظرفیت خازنی سلول نیز افزایش می‌یابد. در مورد سلول واحد سلفی نیز می‌توان بیان داشت که با کاهش پهنای استریپ‌های آن و همچنین افزایش طول استریپ‌ها مقدار ضریب خود القایی سلول واحد افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن این موارد می‌توان از روی روابط ۱ و ۲ در مورد چگونگی تغییر پاسخ فرکانسی تصمیم گرفت.

با در نظر گرفتن زیرلایه RO3010 سه نمونه فیلتر طراحی می‌کنیم که پارامترهای هندسی سطح سلفی آن‌ها یکسان است. پارامترهای هندسی سطح سلفی و خازنی این سه نمونه به ترتیب در جدول (۳)



شکل (۱۹): نمای سلول واحد دارای خاصیت خازنی که دایره بزرگتر آن تبدیل به کمانی از دایره با زاویه α شده است.

Fig. (19): Unit cell of the capacitive plan, larger circle slot transforms to sector of circle with foreside angel α .



شکل (۲۰): آرایه متناوب خازنی که از کنار هم قرار دادن سلول واحد شکل ۱۹ حاصل شده است.

Fig. (20): Periodic capacitive array composed of alongside connected unit cells of figure 19.

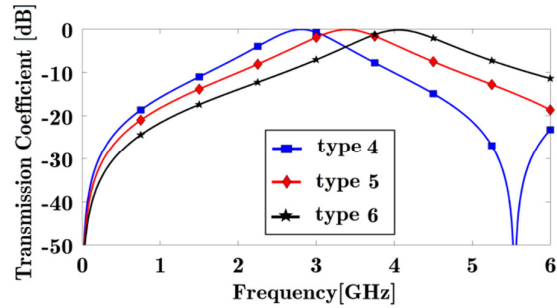
ابعاد سلول واحد نمونه‌های ۴، ۵ و ۶ به ترتیب برابر $D_1 = 15/5 \text{ mm}$ می‌باشند. $D_p = 13/5 \text{ mm}$ ، $D_p = 11/5 \text{ mm}$

در نهایت یک درجه آزادی دیگر به ساختار افزوده شده است. مطابق شکل (۱۹) در سلول واحد سطح خازنی، دایره بیرونی را تبدیل به یک کمان با زاویه مشخص شده α می‌کنیم. شکل (۲۰) نیز آرایه متناوب حاصل از این سلول واحد را نشان می‌دهد.

اگر در نمونه طراحی شده شماره ۲ (پارامترهای هندسی جدول (۳)) این زاویه را از $\alpha = \pi$ درجه کاهش دهیم، و پاسخ فرکانسی را به ازای چند α مختلف رسم کنیم، به شکل (۲۱) می‌رسیم. زوایای α و فرکانس تشدید نمونه‌های ۷ تا ۹ در جدول (۷) آورده شده است.

در این حالت با تغییر α می‌توان فرکانس عبور فیلتر را افزایش داد، اما در عین حال ضریب کیفیت فیلتر نیز افزایش یابد. در حالی که در شبیه‌سازی شکل (۱۴) و (۱۶) با افزایش فرکانس عبور فیلتر ضریب کیفیت فیلتر کاهش می‌یابد. این دو روش به کارر اجازه می‌دهد که در صورت نیاز به کاهش یا افزایش فرکانس عبور، هر دو گزینه تغییرات افزایشی یا کاهش ضریب کیفیت را داشته باشد.

نمونه‌های بعدی ۴، ۵ و ۶ با در نظر گرفتن زیرلایه RO3003 طراحی شده‌اند که در آن پارامترهای هندسی فیلتر در جداول ۴ تا ۶ آورده شده است. پاسخ فرکانسی سه فیلتر نوع ۴ تا ۶ در شکل ۱۸ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانطور که دیده می‌شود ضریب کیفیت سه فیلتر نوع ۴ تا ۶ در کل کوچکتر از فیلترهای نوع ۱ تا ۳ می‌باشد.



شکل (۱۸): پاسخ فرکانسی FSS نمونه‌های ۴ تا ۶ به ازای پارامترهای هندسی مختلف به ازای زیرلایه RO3003.

Fig. (18): Frequency response of type 4 to 6 FSSs versus different geometric parameters with RO3003 substrate.

فرکانس‌های رزونانس این سه نمونه به ترتیب برابر $f_{r1} = 2/8 \text{ GHz}$ ، $f_{r3} = 3/3 \text{ GHz}$ و $f_{r4} = 4/1 \text{ GHz}$ می‌باشد.

Table (4): Geometric parameters of first order filter for types 4 (unit of millimeter).

جدول (۴): پارامترهای هندسی فیلتر مرتبه اول نمونه ۴ (بر حسب میلی‌متر)

r_1	r_2	r_3	r_4	d	w
0.5	1.5	2	3	9.5	1
r_5	r_6	r_7	r_8	p	s
1	1.5	4.5	5	5.5	0.5

Table (5): Geometric parameters of first order filter for types 5 (unit of millimeter).

جدول (۵): پارامترهای هندسی فیلتر مرتبه اول نمونه ۵ (بر حسب میلی‌متر)

r_1	r_2	r_3	r_4	d	w
0.5	1.5	2	3	7.5	1
r_5	r_6	r_7	r_8	p	s
1	1.5	3.5	4	5.5	0.5

Table (6): Geometric parameters of first order filter for types 6 (unit of millimeter).

جدول (۶): پارامترهای هندسی فیلتر مرتبه اول نمونه ۶ (بر حسب میلی‌متر)

r_1	r_2	r_3	r_4	d	w
0.5	1.5	2	3	5.5	1
r_5	r_6	r_7	r_8	p	s
1	1.5	2.5	3	5.5	0.5

بیش از حد شعاع دایره بیرونی در سلول واحد باعث می‌شود تا دایره مجاور درون یکدیگر رفته و کلیت شکل سلول واحد عوض شده و فرآیند طراحی با چالش مواجه شود. طراح همواره باید یک مصالحه بین چگونگی استفاده از تغییر جنس زیرلایه و مقادیر هندسی صفحات به عنوان پارامترهای طراحی برقرار کند.

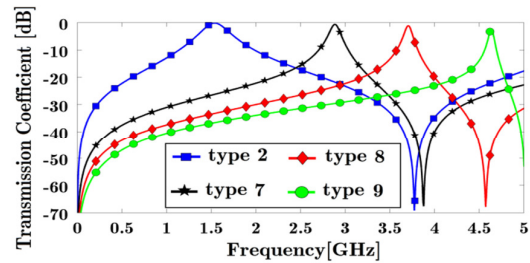
برای مثال با توجه به ثابت بودن ضریب گذردی زیرلایه‌های تولیدی شرکت‌ها، طراح باید با توجه به فرکانس مرکزی و ضریب کیفیت مورد علاقه خود زیرلایه‌ای را برگزیند که فرکانس رزونانسی نزدیک به فرکانس مرکزی فیلتر مطلوب طراح داشته باشد. سپس برای تغییرات جزئی فرکانس رزونانس و یا ضریب کیفیت، مقادیر هندسی صفحات تنظیم گردند.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله با معرفی دو سلول واحد غیر رزونانسی با هندسه ابتکاری، ۹ نمونه فیلتر میان‌گذر مرتبه اول طراحی شد. نمونه‌های ۱ تا ۳ بر روی زیرلایه RO3010 طراحی شد که فرکانس رزونانس آن‌ها بین ۱/۲ تا ۱/۸ گیگاهرتز تنظیم شد. نمونه‌های ۴ تا ۶ بر روی زیرلایه RO3003 طراحی شده که پهنای باند ناحیه گذر آن‌ها بیشتر از سه نمونه قبلی (و Q_L آن‌ها کمتر از سه نمونه قبلی) بوده است. فرکانس رزونانس نمونه‌های ۴ تا ۶ بین ۲/۸ تا ۴/۱ گیگاهرتز تنظیم شد. نمونه‌های طراحی شده ۷ تا ۹ بر روی زیرلایه RO3010 طراحی شد و فرکانس رزونانس آن‌ها بین ۲/۹ تا ۴/۶ گیگاهرتز تنظیم شد که نسبت به سه نمونه قبلی دارای Q_L بالاتری بوده‌اند. در نهایت پایداری فرکانسی برخی از نمونه‌ها نسبت به تغییر زاویه تابش با انجام شبیه‌سازی‌هایی به اثبات رسید.

پی‌نوشت:

- 1- Frequency-Selective Surfaces
- 2- Scatterer
- 3- Artificial Magnetic Conductor; AMC
- 4- Radom
- 5- Coupling
- 6- Passive
- 7- Quasi-static
- 8- Tune
- 9- Complementary
- 10- Cascading
- 11- Fullwave
- 12- Periodic Boundary Condition
- 13- Sharp
- 14- Rogers



شکل (۲۱): مقایسه پاسخ فرکانسی FSS مرتبه اول نوع ۷ تا ۹ با FSS نوع ۲ به ازای زوایای مختلف α برای زیرلایه RO3010.

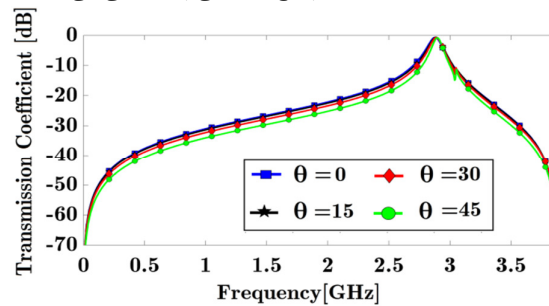
Fig. (21): Transmission response of first order FSS type 7 to 9 and type 2 with varying angle α for RO3010 substrate.

Table (7): Angel α in capacitive unit cell of filters type 7 to 9.

جدول (۷): زاویه کمان α در سلول خازنی فیلترهای نمونه ۷ تا ۹

type	7	8	9
α	$\frac{9}{10}\pi$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{5}$
f_r	2.9	3.7	4.6

نمونه ۷ را برای بررسی حساسیت پاسخ فرکانسی نسبت به تغییر زاویه تابش، انتخاب می‌کنیم. در شکل (۲۲) دیده می‌شود که به ازای تغییر زاویه تابش از صفر تا ۴۵ درجه پاسخ فرکانسی پایدار باقی می‌ماند.



شکل (۲۲): بررسی حساسیت پاسخ فرکانسی FSS مرتبه اول نوع ۷ به تغییر زاویه تابش موج.

Fig. (22): Transmission coefficients of the first-order FSS type 7 for different angles of incidence.

در کلی‌ترین حالت برای تنظیم فرکانس رزونانس و ضریب کیفیت فیلتری، می‌توان هم جنس زیرلایه و هم مشخصات هندسی ساختار را تغییر داد. آشکار است زیرلایه‌های شرکت‌های مختلف با ضرایب گذردی الکتریکی معینی تولید می‌شوند. همچنین بازه تغییر پارامترهای هندسی نیز نامحدود نیست. مثلاً پهنای گپ هوایی در سطح خازنی را نمی‌توان بیش از یک مقدار معینی که از فرآیند ساخت به طراحی تحمیل می‌شود کاهش داد. به عنوان مثالی دیگر افزایش

References

- [1] C.M. Watts, X. Liu, W.J. Padilla, "Metamaterial electromagnetic wave absorbers", *Advanced Materials*, Vol. 24, No. 23, pp. 98–120, May 2012.
- [2] M. Li, M.A. Al Joumayly, N. Behdad, "Broadband true-time-delay microwave lenses based on miniaturized element frequency selective surfaces", *IEEE, on Antennas and Propagation*, Vol. 61, No. 3, Mar. 2013.

- [3] X. Ma, G.-B. Wan, "Efficient multi-objective optimization of frequency selective radome with nonuniform wall thickness", *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 35, 2014.
- [4] K.L. Ford, J. Roberts, S. Zhou, G. Fong, J. Rigelsford, "Reconfigurable frequency selective surface for use in secure electromagnetic buildings", *Electronics Letters* 4th, Vol. 49, No.14, Jul. 2013.
- [5] S.M. Hashemi, S.I. Tretyakov, M. Soleimani, C.R. Simovski, "Dual-polarized angularly stable high-impedance surface", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 61, No. 8, Aug. 2013.
- [6] L.M. ZLopez, J.R. Cuevas, J.I.M. Lopez, A.E. Martynyuk, "A multilayer circular polarizer based on bisected splitting frequency selective surfaces", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 13, 2014.
- [7] S.M.A. Momeni-Hasanabadi, K. Ghaemi, N. Behdad, "Ultra-wideband, true-time-delay reflectarray antennas using ground-plane-backed, miniaturized-element frequency selective surfaces", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 63, No. 2, Feb. 2015.
- [8] M. Wang, C. Huang, P. Chen, Y. Wang, Z. Zhao, X. Luo, "Controlling beamwidth of antenna using frequency selective surface superstrate", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 13, Jan. 2014.
- [9] A. Pirhadi, H. Bahrami, J. Nasri, "Wideband high directive aperture coupled microstrip antenna design by using a FSS superstrate layer", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 60, No. 4, Apr. 2012.
- [10] K. arabandi, N. Behdad, "A frequency selective surface with miniaturized elements", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 55, No. 5, May 2007.
- [11] A.L.P.S. Campos, E.E.C.D. Oliveira, P.H.D. F.Silva, "Design of miniaturized frequency selective surfaces using minkowski island Fractal", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 9, No. 1, Jun. 2010.
- [12] T. Zhng, G. Yang, W. Li, "A novel triangle spiral miniaturized frequency selective surface with stable performances", *The International Conference on Information, Electronic and Computer Science*, 2010.
- [13] T. Zhang, G. Yang, W. Li, Q. Jiang, Q. Wu, "Research on novel miniaturized frequency selective surfaces consist of rectangle spiral-based elements", *Global Mobile Congress (GMC)*, Shanghai, Oct. 2010.
- [14] T. Zhang, G. Yang, W. Li, Q. Wu, "A novel miniaturized frequency selective surface with stable performances", *IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 12th., Nanjing, 2010.
- [15] H. Zhou, S.B. Qu, B.Q. Lin, J.Q. Zhang, C. Gu, H. Ma, Z. Xu, P. Bai, W.D. Peng, "Dual band frequency selective surface based on circular aperture-coupled patches", *Microwave And Optical Technology Letters*, Vol. 53, No. 8, 2011.
- [16] R.W. Davies, I.L. Morrow, J.F. Cooper, I. Youngs, "Frequency-selective surface composed of aperture-coupled high-impedance surfaces", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 48, No. 6, 2006.
- [17] S. Zheng, Y. Yin, J. Fan, X. Yang, B. Li, W. Liu, "Analysis of miniature frequency selective surfaces based on fractal antenna-filter-antenna arrays", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 11, 2012.
- [18] Z. Bayraktar, M.D. Gregory, X. Wang, D.H. Werner, "A versatile design strategy for thin composite planar double-sided High-impedance surfaces", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 60, No. 6, 2012.
- [19] D.S. Weile, E. Michielssen, "The use of domain decomposition genetic algorithms exploiting model reduction for the design of frequency selective surfaces", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* Vol. 186, 2000.
- [20] S. Chakravarty, R. Mittra, "Application of the micro-genetic algorithm to the design of spatial filters with frequency-selective surfaces embedded in dielectric media", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 44, No. 2, 2002.
- [21] A. Ray, M. Kahar, S. Biswas, D. Sarkar, P.P. Sarkar, "A dual tuned complementary structure frequency selective surface for wlan applications", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 11, No. 1, 2012.
- [22] G.I. Kiani, K.H.L. Ford, K.P. Esselle, A.R. Weily, C.J. Panagamuwa, "Oblique incidence performance of a novel frequency selective surface absorber", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 55, No. 10, 2007.
- [23] Z. Hang, Q. Shao-Bo, P. Wei-Dong, L. Bao-Qin, W. Jia-Fu, M. Hua, Z. Jie-Qiu, B. Peng, W. Xu-Hua, X. Zhuo, "Dual-band frequency selective surface with large band separation and stable performance", *Chin. Phys. B*, Vol. 21, No. 5, 2012.
- [24] M. Fallah, M.H. Vadjed-Samiei, "Designing aband-pass Fss based on an analytical approach using hexagonal patch-strip unit cell", *Uemg, Electromagnetics*, Vol. 35, No. 1, 2015.
- [25] M. Fallah, M.H. Vadjed-Samiei, "Design of square patch-strip bandpass FSS using equivalent circuit model", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 13, No. 40, 2015.
- [26] "High Frequency Materials", *Product Selector Guide*, www.Rogerscorp.Com/Acm, 2010.
- [27] D. Kim, J. Yeo, J. Choi, "Compact spatial triple-band-stop filter for cellular/PCS/IMT-2000 systems", *ETRI Journal*, Vol. 30, No. 5, Oct. 2008.