

Design, Simulation, Fabrication and Determining the Equivalent Circuit Model of a Reconfigurable RFSS Unit Cell Filter for Electromagnetic Protection of Space Payload Systems

Hamed Babaei¹ , S. Amir Gohari^{2*} , Peiman Mohamadi³ 

1. Ph.D. Student, Department of Electrical Engineering, Bojnourd Branch, Islamic Azad University, Bojnourd, Iran
2. Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Bojnourd Branch, Islamic Azad University, Bojnourd, Iran
3. Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Bojnourd Branch, Islamic Azad University, Bojnourd, Iran

*Corresponding Author's E-mail: sa.gohari@bojnourdiau.ac.ir

Abstract

In this article, a new type of EBG structure known as frequency selective surface (FSS) with reconfigurable capability is investigated. The operating frequency of the FSS structure is in the C-band and in the frequency range of 4GHz to 8GHz, which at the central frequency of 4.75GHz, provides a bandwidth of about 1 GHz when the state of the diode is on. In fact, this structure is supposed to be used as a type of electromagnetic coating filter for space payload in the next-generation satellites.

Keywords: Space payload, Frequency selective surface (FSS), Electromagnetic band-gap (EBG), Radar cross section RCS, RFSS low pass filter, PIN diode

1. Introduction

In this paper, a new type of EBG structure known as reconfigurable frequency selective surface (RFSS) is investigated. The proposed design introduces a new adjustable band stop filter equipped with PIN diodes. [1] Operating frequency of the RFSS structure is in the C-band and in the frequency range of 4GHz to 8GHz, at the central frequency of 4.75GHz. The RFSS provides a bandwidth of about 1 GHz, when the diode is on. The center frequency of this filter is shifted to 5.23 GHz when the diode is off. For this filter a unit cell was designed and simulated. After the design and simulation of the unit cell, an equivalent circuit model is also presented to confirm the design and simulation process. [2] In fact, this structure is supposed to be used as a type of electromagnetic coating filter for satellite space payload in the next generation of satellites. [3] The RFSS filter protects electronic modules of satellite payload against electromagnetic radiation and electronic warfare. The RCS reduction is the other application of the RFSS structure.

2. Methodology

Using one of the references, the design of the FSS unit cell was started. [4] As it is shown in the proposed unit cell, creating a petal shape on the cell, increasing the bandwidth, and also compress the structure. By creating a gap in this cell and placing two PIN diodes, a reconfigurable FSS (RFSS) cell was designed. In order to reduce the adverse effects on the shape of the cell, the gap was designed in the form of Interdigital. When the diode is biased, the 2.5 Ω resistor is paralleled with the set of interdigital small capacitors and reduces their effect. In the state that the diode is off, the capacitive reactance is very high and it operates completely open circuit at C band frequency. The width of the air gap (G) affects the frequency response S₂₁. For the manufacturing considerations, the initial value of G=1mm is considered. After optimizing the unit cell dimension, we will focus on the equivalent circuit of the RFSS unit cell. [4] To determine the equivalent circuit



COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

How to cite this article:

H. Babaei, S. A. Gohari and P. Mohamadi, "Design, Simulation, Fabrication and Determining the Equivalent Circuit Model of a Reconfigurable RFSS Unit Cell Filter for Electromagnetic Protection of Space Payload Systems," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 71-82, 2023 (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jsst.2023.1448>.

of the unit cell, an RFSS structure is selected as the initial structure and the simulation tools such as ADS, MATLAB and CST are applied to achieve the desired goals. As stated before, this filter is used in satellite. After launch there is no access to satellite payload, so the reconfiguration capability is the reason for the development of this technology in this research.

In order to achieve a new RFSS structures with wide bandwidth and reconfiguration capability, it should be possible to derive mathematical relations and suitable equivalent circuit for these structures. In one of the references, equivalent circuit and formulas have been proposed for the simple circular ring geometric shape of the unit cell. [5] These formulas and equivalent circuit are the basis of extracting the equivalent circuit for the proposed RFSS structure. From the given reference, the relationships related to the inductance L and capacitance C are available for the circular ring, so using the circular ring, it is possible to determine the equivalent circuit parameters, and consequently frequency response and other characteristics of the proposed RFSS cell. Therefore, as it is shown in the figure 1, the unit cell is mapped with a circular ring. Using this technique, the unit cell will be analyzed with a simpler unit cell. Finally, from the matching of the dotted circle on the proposed unit cell, and using the relations of circular ring, it is possible to estimate the equivalent circuit of the proposed unit cell as illustrated in the figure 2

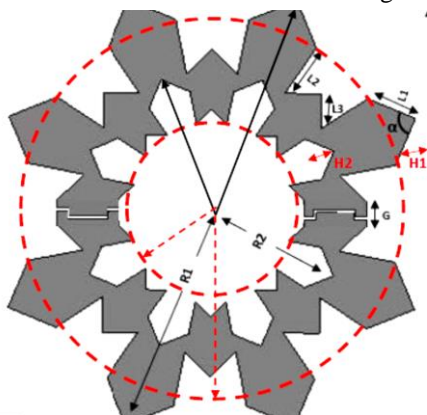


Figure 1. Designed passive FSS cell

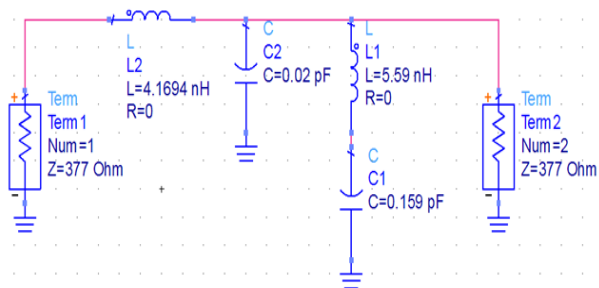


Figure 2. equivalent circuit of the proposed unit cell

After obtaining all the electric and geometric parameters of the RFSS unit cell, this cell can be used as an element for fabrication of proposed RFSS filter with reconfigurable capability to protect the satellite payload

against unwanted electromagnetic waves. As it is shown in the following figure, the final unit cell equipped with two BAR64 pin diodes, is fabricated on a FR4 substrate with a thickness of 1.6mm, $\epsilon_r=4.3$ and a loss tangent of 0.025. The thickness of the conductor used in the cell is 35 microns, as it is shown in the figure 3

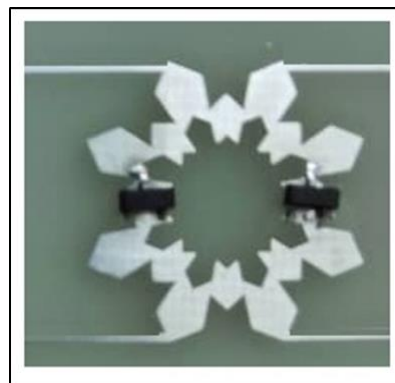


Figure 3. Active FSS cell

3. Results and conclusions

As a conclusion, in order to protect the satellite payload from the electromagnetic radiation, a reconfigurable band stop RFSS filter inspired by flower petal shape, in the frequency range from 4GHz to 8GHz was designed and its equivalent circuit was also presented. As demanded the central frequency of the filter is 4.75GHz and its bandwidth is about 1GHz. Because of the reconfigure capability, the central frequency can be changed electronically. In order to validate the design process, the designed filter was fabricated and then tested. The simulation and test results were also compared.

4. References

- [1] D. F. Mamedes, A. Gomes Neto, J. Costa e Silva and J. Bornemann, "Design of reconfigurable frequency-selective surfaces including the PIN diode threshold region," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 12, no. 9, pp. 1483-1486, 2018, doi: 10.1049/iet-map.2017.0761.
- [2] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1986, doi: 10.1049/PBEW021E.
- [3] P. Charoonsaeng and T. Theeradejvanichkul, "A Thin Wideband Radar Absorber Based on a Dual-Substrate FSS with Quadruple Hexagonal Split Rings for Stealth Aircraft Application," *2019 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, 2019, pp. 111-114, doi: 10.1109/IWAT.2019.8730610.
- [4] H. Babaei and S. A. Gohari, "Reconfigurable bandstop filter using active frequency selective surface, design and fabrication," *Frequenz*, vol. 76, no. 1-2, 2022, pp. 17-28, <https://doi.org/10.1515/freq-2021-0008>.
- [5] M. Basravi, Z. H. Firouzeh, M. Maddahali, "Design of a Single-Layer Circuit Analog Absorber Using Double-Circular-Loop Array via the Equivalent Circuit Model," *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations*, Vol. 5, No.2, 2017, doi:10.22061/jecei.2018.790.

طراحی، شبیه‌سازی، ساخت و تعیین مدار معادل یک سلول فیلتر RFSS با قابلیت پیکربندی الکترونیکی برای حفاظت الکترومغناطیس محموله‌ها در سامانه‌های فضایی

حامد بابائی^۱، سید امیر گوهری^{۲*} و پیمان محمدی^۳

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بجنورد، بجنورد، ایران

*ایمیل نویسنده مخاطب: sa.goohari@bojnourdiau.ac.ir

چکیده

در این مقاله نوع جدیدی از ساختارهای EBG موسوم به سطوح انتخابی فرکانس (FSS) با قابلیت پیکربندی مجدد بررسی شده است. طرح پیشنهادی، یک فیلتر میان‌گذر جدید با هدف کنترل فرکانس مرکزی با قابلیت پیکربندی مجدد مجهز به دیودهای پین (PIN) برای ساختار FSS را در باند فرکانسی C و در بازه فرکانسی 4GHz الی 8GHz با کاربرد فضایی معرفی می‌کند که در فرکانس مرکزی 4.75GHz، پهنای باند حدود 1GHz را در وضعیت روشن بودن دیود ارائه می‌دهد. فرکانس مرکزی این فیلتر در وضعیت خاموش بودن دیود به فرکانس 5.23GHz جابجا می‌شود. در واقع این ساختار قرار است به‌عنوان نوعی پوشش الکترومغناطیسی برای محموله فضایی در ماهواره‌های نسل آینده استفاده شود. پس از طراحی و شبیه‌سازی سلول حاصل، یک مدل مداری نیز برای تأیید طراحی و شبیه‌سازی ارائه شده است. از کاربردهای مهم این ساختارها، استفاده از آنها در محافظت ماژول‌های الکترونیکی، محموله ماهواره‌ها در برابر تشعشعات الکترومغناطیسی، جنگ الکترونیک و کاهش سطح مقطع راداری (RCS) است.

واژه‌های کلیدی: محموله فضایی، سطوح انتخابگر فرکانس FSS، ناحیه باند ممنوع الکترومغناطیسی EBG، سطح مقطع راداری RCS، فیلتر میان‌گذر RFSS، دیود PIN

مقدمه

فیلترها و جاذب‌های الکترومغناطیسی نقش اساسی در سیستم‌های الکترونیکی فضایی، نظامی و حتی غیرنظامی دارند. هرچه تعداد سیستم‌های بی‌سیم پهن‌بند با حجم داده‌های بیشتر افزایش یابد، ارتباطات مخابراتی مستعد تداخل بیشتری می‌شوند، بنابراین وجود یک سیستم پهن‌بند با قابلیت مسدود کردن تداخلات، یک ضرورت در طراحی سیستم‌های مخابراتی است [۱]. در کاربردهای فضایی می‌توان

علائم و اختصارات

EBG	باند ممنوع الکترومغناطیسی
FR4	زیرلایه راجرز
FSS	سطوح انتخابگر فرکانس
PIN	دیود پین
MEMS	سویچ‌های الکترومکانیکی
RCS	سطح مقطع راداری
RFSS	سطوح انتخابگر فرکانس با قابلیت پیکربندی مجدد

۱. دانشجوی دکتری

۲. استادیار

۳. استادیار



COPYRIGHTS

مهمی در عملکرد سطوح انتخابی فرکانس ایفا کنند. بدین ترتیب، سطوح انتخابی فرکانس برای طیف وسیعی از کاربردها استفاده می‌شوند. ساختار FSS به‌عنوان فیلتر برای بسیاری از کاربردها مانند پوشش حفاظت کننده آنتن [۶]، کاهنده سطح مقطع راداری، آنتن‌های آرایه‌ای [۷۸]، انتقال و بازتاب امواج الکترومغناطیسی، بازتاب‌دهنده‌ها [۹]، فراموادها که کاربردهای مناسب در اجزای ماهواره‌های آتی دارند [۱۰] و حفاظت الکترومغناطیسی محموله در سامانه‌های فضایی استفاده می‌شوند.

ساختارهای FSS متناوب و مسطح معمولاً از پیچ‌های هم‌اندازه یا پنجره‌هایی از جنس هادی که به‌صورت متناوب در یک یا دو بعد تکرار می‌شوند، تشکیل شده‌اند. قدیمی‌ترین مرجع در مورد سطوح متناوب به ثبت اختراع مارکونی و فرانکلین در سال ۱۹۱۹ برای ساخت انعکاس‌دهنده سهموی برمی‌گردد. بررسی ساختارهای متناوب تا سال ۱۹۶۰ مسکوت ماند؛ زیرا در آن زمان هنوز کاربردهای نظامی این ساختارها کشف نشده بود. از سال ۱۹۶۰ به بعد، سطوح انتخابی فرکانس به‌طور گسترده‌ای در زمینه طراحی آنتن‌ها، رادار، فیلترهای فضایی، قطبی‌کننده‌ها، پوشش‌های حفاظت کننده آنتن و غیره مورد استفاده قرار گرفت. در بیشتر کاربردها، مثل مخابرات ماهواره‌ای سطوح انتخابی فرکانس برای طراحی آنتن‌های بازتابنده استفاده می‌شوند. ساخت چنین ساختارهایی در طول موج‌های میکروویو و در طراحی آنتن‌ها ساده است [۱۱]. برای سیستم‌های آنتن فضایی نیز فعالیت‌های خوبی انجام پذیرفته است، از آن جمله ساختار FSS بر اساس یک پیکربندی دولایه است که در آن عناصر سلول واحد در هر لایه از دو جفت دوقطبی مستطیلی شکل و یک حلقه مربع تشکیل شده است. این سطح انتخابی فرکانس طوری طراحی شده است که در باند X انتقال‌دهنده باشد و در باندهای K و Ka کاملاً بازتابنده باشد. تلفات انعکاس در باندهای K و Ka کمتر از 0.1dB برای زوایای فرود از ۰ تا ۴۵ درجه است. همچنین تلفات انتقال در باند X برای زوایای برخورد تا ۳۰ درجه کمتر از 0.5dB است. یک نمونه اولیه ۳۰ سانتیمتری از FSS دولایه پیشنهادی ساخته و آزمایش شده است [۸]. هر دو نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری یک توافق خوب و عملکرد رضایت‌بخش را در سه باند عملیاتی نشان می‌دهند. سطوح انتخابی فرکانس FSS در واقع فیلترهایی با مشخصه فرکانسی معین در برابر امواج الکترومغناطیسی هستند. با قرار دادن این ساختارها در محیط انتشار موج، ویژگی‌های خاصی در موج ایجاد می‌شود. در واقع با این کار، FSS می‌تواند مانند یک حصار در مقابل انتشار موج در یک کانال رادیویی عمل کند که در ماهواره‌ها حفاظت کننده خوبی برای

به کمک فیلترهای مبتنی بر ساختارهای FSS، مانع ورود سیگنال‌های ناخواسته به محموله فضایی یک ماهواره شد. در کاربردهای، نظامی و غیرنظامی راداری نیز می‌توان از جاذب‌های FSS برای کاهش سطح مقطع راداری^۲ استفاده نمود [۲].

در مقاله مرجع [۲] نشان داده شده است، که از FSS می‌توان به‌عنوان جاذب الکترومغناطیس استفاده نمود. با قرار دادن یک جاذب روی سطح یک ماده، میزان زیادی از انرژی الکترومغناطیسی تابشی آن جذب شده و مقدار کمی از آن منعکس می‌شود؛ بنابراین پوششی از سلول‌های RFSS می‌تواند در برخی از فرکانس‌ها به‌عنوان یک جاذب الکترومغناطیس و در نتیجه سبب کاهش RCS می‌شود. از طرف دیگر خصوصیت کاهش دامنه S21 در برخی از فرکانس‌ها سبب شده است که پوشش RFSS کاربرد فیلتری نیز داشته باشد. در ماهواره‌های ماژول‌های مخابراتی متنوع در باندهای فرکانسی مختلف در مجاورت هم وجود دارد که به دلیل تداخل ناشی از الکترو مغناطیس تأثیر نامطلوب بر یکدیگر دارند. بنابراین می‌توان با ایجاد پوشش RFSS، از ورود سیگنال‌های ناخواسته از منابع مختلف، به محموله ماهواره جلوگیری کرد. به‌دلیل معایب جاذب‌های مخروطی قدیمی، مانند بزرگ بودن ابعاد یا قابل انتخاب نبودن پهنای باند فرکانسی، اخیراً از سطوح انتخابی فرکانس (RFSS) به‌صورت گسترده به‌عنوان جایگزین جاذب‌های معمول در کاربرد فضایی و راداری استفاده می‌شود [۳]. جذب‌کننده‌های FSS می‌توانند جذب بهتر در پهنای باند وسیع‌تری را در مقایسه با جاذب‌های سنتی ارائه دهند [۴]. برای طراحی جاذب‌های پهن باند معمولاً از ساختارهای چندلایه استفاده می‌شود.

ساختارهای FSS در حالت کلی برگرفته از ساختارهای EBG^۳ هستند. برخی از ساختارهای EBG، شامل چندین لایه بوده که در سطوح مختلف این لایه‌ها می‌توانند فلز و غیرفلز باشند. معمولاً سطح بالای EBG شامل آرایه‌ای از پیچ‌های کوچک است. ساختارهای EBG، همان ساختارهای فرامواد^۵ هستند که محدوده فرکانس کاری این ساختارها از طریق پارامترهای هندسی پیچ‌ها آن‌ها تعیین می‌شود. مهم‌ترین خاصیت EBG این است که با تغییر پارامترهای EBG می‌توان ثابت گذردهی مؤثر EBG را تحت کنترل قرار داد. یک آرایه متناوب دوبعدی با سلول‌های واحد متشکل از حلقه‌ی مربع شکل با مقاومت‌های سری نیز توسط شانگ و همکاران پیشنهاد شد [۵]. شکل هندسی عناصر FSS و نوع زیرلایه عایق که روی آن چاپ می‌شوند، می‌توانند سبب تغییر پاسخ فرکانسی شوند. پارامترهای اساسی در طراحی FSS شامل ساختار هندسی عنصر، زیرلایه، لایه فوقانی، رسانایی عنصر و فضای خالی بین عناصر هستند که می‌توانند نقش

4. Patch
5. Metamaterial

1. Frequency Selective Surface
2. Radar Cross Section
3. Electromagnetic Band Gap Structure

مطلوبی در شکل سلول نداشته باشد. وقتی که دیود بایاس می‌شود، مقاومت 2.5Ω با مجموعه خازن‌های کوچک موازی شده و اثر آن‌ها را خنثی می‌کند. در حالتی که دیود خاموش است، راکتانس خازنی بسیار بالاست و در فرکانس باند C کاملاً مدار باز عمل می‌کند. عرض شکاف فاصله هوایی G ، بر عمق نول پاسخ فرکانسی S_{21} مؤثر است. به‌منظور ملاحظات ساخت، مقدار اولیه $G=1\text{mm}$ در نظر گرفته می‌شود. حال برای ادامه کار، بر روی مدار معادل یک سلول فیلتر آرایه‌ای با ساختار RFSS متمرکز می‌شویم. بدین منظور ساختار RFSS موجود در مرجع [۱۲] به‌عنوان ساختار اولیه انتخاب می‌شود و شبیه‌سازی در جهت تعیین مدار معادل این سلول برای حصول به اهداف مورد نظر ادامه می‌یابد. با استفاده از نرم‌افزارهای CST، MATLAB، ADS مدل‌سازی، محاسبات و شبیه‌سازی با تنظیم دقیق مش‌ها برای سلول RFSS آغاز می‌شود. به دلایل محدودیت ابعاد ماهواره و عدم امکان دسترسی به محموله‌های فضایی بعد از پرتاب، ابعاد کوچک طرح و قابلیت پیکربندی مجدد آن از جمله دلایل توسعه این فناوری در این پژوهش می‌باشد.

مدل مداری ساختار RFSS

برای رسیدن به یک ساختار FSS جدید با پهنای باند وسیع و نیز قابلیت پیکربندی مجدد باید بتوان روابط ریاضی و مدار معادل مناسب این ساختارها را استخراج کرد. در مرجع [۲] برای شکل هندسی ساده دایروی مدار معادل و فرمول‌هایی پیشنهاد شده است، در ادامه این فرمول‌ها و مدارات معادل، مبنای کار برای استخراج روابط ساختار جدید پیشنهادی قرار گرفته‌اند. شکل هندسی سلول FSS مرجع [۲] در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. در هر سلول واحد، دو حلقه رسانای دایره‌ای وجود دارد. ضخامت فاصله بین زمین و لایه تلفات، h_1 در نظر گرفته شده است. گذردهی نسبی این لایه حدود ۱ است؛ بنابراین می‌توان آن را هوا یا فوم در نظر گرفت. توجه داشته باشید که برای چاپ از یک لایه بسیار نازک از FR4 با ضخامت h_1 استفاده شده است. برای لایه FR4 نازک ضریب گذردهی معادل $\epsilon_r=4.3$ و $h_2=0.25\text{mm}$ در نظر گرفته شده است. روش‌های تحلیل تمام موج برای مسائل FSS ممکن است محاسبات زمان‌بر را به همراه داشته باشد که در آن الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌راحتی قابل استفاده نباشند. در مرجع [۲]، یک مدل مدار معادل ساده برای ساختار FSS به‌جای تحلیل عملکرد جاذب با نرم‌افزار پیچیده تمام موج، استخراج و پیشنهاد شده است. این مدل که برای پیش‌بینی پاسخ فرکانسی و انجام مطالعات پارامتری ارزشمند است مبنای استخراج مدار معادل در این مقاله نیز قرار گرفته است. این مدل بر اساس تئوری پیشنهاد شده توسط Marcuvitz [۱۳]، پیشنهاد

محموله‌ها در مقابل اثرات امواج الکترومغناطیسی مخرب ناشی از زیرسیستم‌های مجاور و یا منابع خارجی می‌باشد. تابع تبدیل فیلتر FSS می‌تواند باند فرکانس عبوری و باند ممنوع را تغییر دهد و قسمتی از فرکانس‌های موج را از خود عبور داده و باقیمانده را مسدود کند. میزان انتقال یا انعکاس موج تابعی از فرکانس است. یعنی FSS در برابر امواج مانند فیلتر مداری در مقابل سیگنال عمل می‌کند و رفتار طیفی خاصی را (مانند پایین‌گذر، میان‌گذر و غیره) از خود نشان می‌دهد. اگر بخواهیم از این ساختار به عنوان بخش انعکاس دهنده آنتن استفاده کنیم، باید از قسمتی از باند عبور که کمترین تلفات عبور را دارد استفاده نماییم و ساختار FSS را در این محدوده فرکانسی بهینه کنیم.

هدف از این مقاله، طراحی، شبیه‌سازی و ارائه یک مدل مداری فیلتر با پیکربندی مجدد^۱ برای سیستم‌های پهن باند به‌منظور حفاظت الکترومغناطیسی محموله‌های فضایی می‌باشد. طرح‌های قبلی قابلیت تنظیم یا کنترل باند فرکانسی با پیکربندی مجدد ساختار را در باند وسیع فرکانسی نداشتند. نوآوری این مقاله در طرح سلول FSS مجهز به دیودهای پهن‌بند^۲ با قابلیت پیکربندی مجدد (RFSS) است. بدین منظور ساختارهای هندسی مختلفی از نظر کنترل پهنای باند فرکانسی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سپس به‌منظور عملکرد مطلوب این ساختارها در باندهای فرکانسی مختلف و همچنین کنترل فرکانسی، هرکدام از ساختارها تجزیه و تحلیل شدند و در نهایت یک سلول FSS پایدار نسبت به زاویه برخورد موج تابشی بهینه شد و مدل مداری نیز برای آن ارائه شد. از کاربردهای مهم ساختار FSS طراحی شده این است که به‌عنوان فیلتر باند ممنوع و قابلیت پیکربندی مجدد، نوعی پوشش الکترومغناطیسی برای محموله فضایی نسل آینده فراهم می‌کند [۱۱]. از سوی دیگر با به‌کارگیری عنصر فعال مانند دیود پهن‌بند، ساختار FSS پیشنهادی جایگزین مناسبی برای FSSهای ضخیم به‌منظور فیلتر کردن سیگنال‌های مورد نظر در باندهای وسیع فرکانسی خواهد شد.

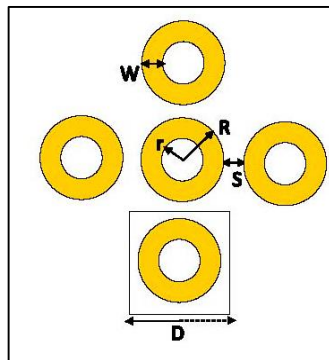
سلول واحد فیلتر RFSS

در مرجع [۱۲] چگونگی طراحی سلول FSS توضیح داده شده است. در سلول پیشنهادی، ایجاد شکاف گلبه‌گی روی سلول، ضمن اینکه سبب افزایش پهنای باند شده است، نوعی فشردگی در ابعاد ساختار را نیز ایجاد کرده است. با ایجاد شکاف در این سلول و قرار دادن یک دیود PIN، می‌توان یک سلول RFSS با قابلیت پیکربندی مجدد طراحی نمود. به‌منظور پیکربندی مجدد و اتصال دیودها در سلول جدید، محل قطع و وصل دیودها به‌صورت دندان‌های در هم رونده^۳ طراحی شد، تا تأثیر

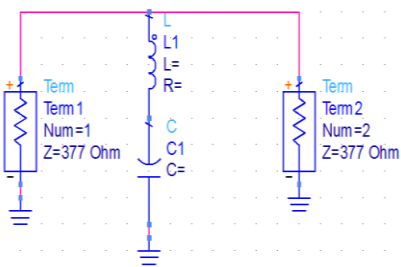
انطباق سلول FSS دایروی بر سلول پیشنهادی

چون روابط مربوط به مقادیر سلفی L و خازنی C، برای حلقه موجود و قابل محاسبه است، بنابراین پس از انطباق سلول حلقه بر سلول پیشنهادی، می‌توان با استفاده از پارامترها و مشخصات حلقه، ابعاد، پاسخ فرکانسی و سایر مشخصات سلول پیشنهادی را تعیین کرد. پس در ابتدا به منظور تحلیل دقیق تر سلول واحد و تعیین ابعاد آن، سلول پیشنهادی را با سلول مشابه ولی ساده تر مطابق شکل (۲-الف) تخمین می‌زنیم. با توجه به مطالب گفته شده، مدار معادل سلول تک حلقه شکل (۲-الف)، به صورت شکل (۲-ب)، است. C1 و L1، سلف و خازن ناشی از سلول حلقه می‌باشند. حال با انطباق سلول پیشنهادی با حلقه دایروی، پارامترهای این دو سلول مطابق شکل (۳) به یکدیگر مربوط می‌شوند. همان گونه که در شکل (۱) و در مرجع [۲] و سایر مراجع آمده است، مدار معادل اولیه یک حلقه، با یک سلف و خازن سری مدل می‌شود. در مورد سلول پیشنهادی نیز، همان گونه که در متن مقاله گفته شده است، ابتدا این سلول با یک حلقه در شکل (۲-الف) تخمین زده شده است، سپس از مدار معادل شکل (۱) استفاده می‌شود. زیرا دو طرف این فیلتر فضای آزاد است، امپدانس موج در فضای آزاد ۳۷۷ اهم در نظر گرفته شده است.

با توجه به شکل (۳)، از انطباق حلقه دایروی نقطه چین، روی سلول پیشنهادی، می‌توان این سلول را در شکل ساده با شکل (۲) تخمین زد. مدار معادل شکل (۲) نیز موجود است.



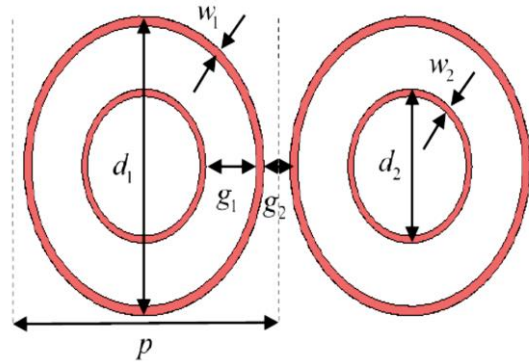
(الف)



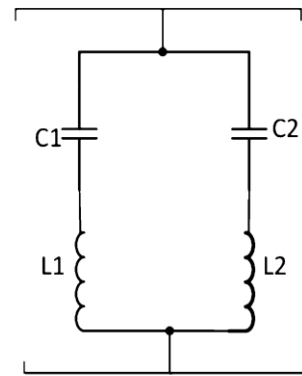
(ب)

شکل ۲- الف- سلول حلقوی مشابه با سلول پیشنهادی، ب- مدار معادل سلول حلقوی مشابه با سلول پیشنهادی

می‌شود. مدل مداری برای FSS فوق در شکل (۱-ب) نشان داده شده است. در هر سلول واحد، دو حلقه هادی دایره‌ای چاپ شده است که آرایه حلقه‌های دایره‌ای توسط مدار LC مدل شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- الف- شکل هندسی سلول حلقوی واحد FSS [۲].

ب- مدار معادل سلول حلقوی واحد FSS [۲]

به کمک این مدل می‌توان مقادیر معادل راکتانس (X) و سوسپتانس (B) سلف و خازن سلول FSS را با استفاده از معادلات زیر برای تابش‌های مایل TM و TE توصیف نمود [۱۴].

$$X_{TE} = \frac{P \cos \theta}{\lambda} \left[\text{Ln}(\cos ec \frac{\pi w}{2p}) + G(p, w, \lambda, \theta) \right] \quad (۱)$$

$$B_{TM} = \frac{4P \cos \varphi}{\lambda} \left[\text{Ln}(\cos ec \frac{\pi g}{2p}) + G(p, g, \lambda, \varphi) \right] \quad (۲)$$

$$X_{TM} = \frac{P \sec \varphi}{\lambda} \left[\text{Ln}(\cos ec \frac{\pi w}{2p}) + G(p, w, \lambda, \theta) \right] \quad (۳)$$

$$B_{TE} = \frac{4P \sec \theta}{\lambda} \left[\text{Ln}(\cos ec \frac{\pi g}{2p}) + G(p, g, \lambda, \varphi) \right] \quad (۴)$$

در روابط فوق w عرض هر نوار است، g فاصله بین دو نوار متوالی همچنین p فاصله تناوبی سلول و (φ, θ) زاویه تابش، λ طول موج و G عبارت ضریب تصحیح [۱۴] فرمول‌ها است.

$$L = (10^{-3}) \mu_r \mu_o \frac{D}{2\pi} \text{Ln}\left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi w}{2D}\right)}\right) \quad (6)$$

$$C = (10^{-3}) \epsilon_{eff} \epsilon_o \frac{2D}{\pi} \text{Ln}\left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi S}{2D}\right)}\right) \quad (7)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (8)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

در رابطه فوق f_0 ، فرکانس تشدید سلول واحد است. از ترکیب سه معادله (۶) تا (۸)، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{1}{4\pi^2 f_0^2} = (10^{-6}) \mu_r \mu_o \epsilon_r \epsilon_{eff} \left(\frac{D}{\pi}\right)^2 \text{Ln}\left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi w}{2D}\right)}\right) \text{Ln}\left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi S}{2D}\right)}\right) \quad (9)$$

معادله (۹)، معادله اصلی استخراج ابعاد سلول است، که باید به کمک نرم‌افزار MATLAB حل شود تا پارامترهای مجهول از آن استخراج شود. به دلیل وجود پارامترهای زیاد در تعیین ابعاد سلول، همچنین امکان تسهیل در ساخت سلول لازم است تا فرض زیر در محاسبه ابعاد سلول لحاظ شود.

$$S = 8\text{mm}, L_1 = 2\text{mm} \quad (10)$$

بنابراین با توجه به رابطه (۵) و رابطه (۱۰) می‌توان نوشت:

$$D = 2R + 8 \quad (11)$$

$$w = 0.4R + 1.16$$

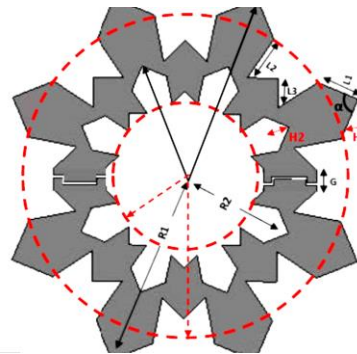
با تلفیق روابط (۶) تا (۱۱) داریم:

$$\frac{1}{4\pi^2 f_0^2} - (10^{-6}) \mu_r \mu_o \epsilon_r \epsilon_{eff} \left(\frac{2R+8}{\pi}\right)^2 \text{Ln}\left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi(0.4R+1.16)}{2(2R+8)}\right)}\right) \text{Ln}\left(\frac{1}{\sin\left(\frac{8\pi}{2(2R+8)}\right)}\right) = 0 \quad (12)$$

مجهول رابطه فوق R است که با حل این معادله می‌توان R و در نتیجه تمامی ابعاد سلول را به ازای فرکانس مرکزی دلخواه f_0 و ϵ_r مشخص محاسبه نمود. با فرض $f_0 = 4.75\text{GHz}$ و $\epsilon_r = 4.3$ و حل معادلات فوق، مقادیر زیر برای سلول حلقه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

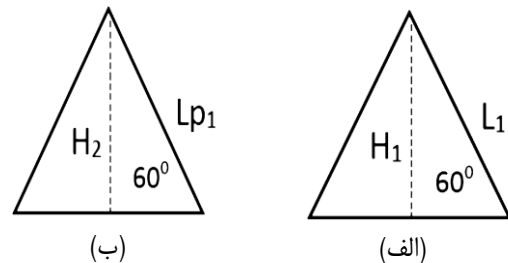
$$\begin{aligned} R &= 6.95\text{mm}, \\ r &= 3.01\text{mm}, \\ w &= 3.94\text{mm}, \\ L_1 &= 5.6\text{nH}, \\ C_1 &= 0.2\text{pF} \end{aligned} \quad (13)$$

در شکل فوق D، فاصله مرکز دو سلول یا همان فاصله تکرار سلول‌ها است و S فاصله هوایی دو لبه انتهایی دو سلول مجاور است، که در شکل (۳) نشان داده شده است. سایر ابعاد در رابطه (۵) نیز، در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل گلبندی خالی شده در وسط سلول به شعاع R2، همان شکل سلول اصلی به شعاع R1 که به نسبت 0.6 از آن کوچک‌تر در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- انطباق سلول پیشنهادی با حلقه دایروی

از طرف دیگر به منظور تسهیل در محاسبه ابعاد، مثلث تشکیل شده در بالای سلول مطابق شکل (۴-الف)، یک مثلث متساوی‌الاضلاع در نظر گرفته شده است که با مثلث کوچک‌تر شکل (۴-ب) (به شعاع R2) متشابه با نسبت تشابه 0.6 است.



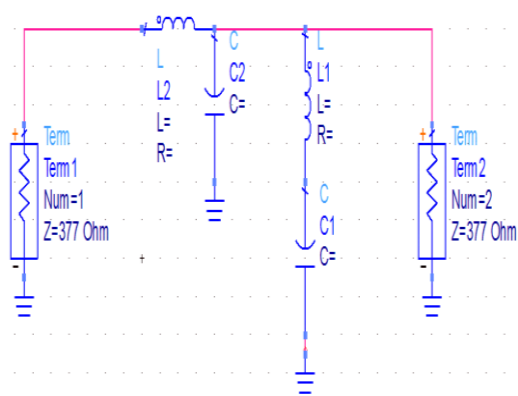
شکل ۴- رابطه بین مثلث‌های متشابه در سلول پیشنهادی

مثلث‌های متساوی‌الاضلاع شکل (۴)، که با ارتفاع‌های H2، H1 مشخص شده‌اند، همان مثلث‌ها در نوک سلول پیشنهادی در شکل (۳) هستند که با ارتفاع‌های H2، H1 و رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. بنابراین داریم:

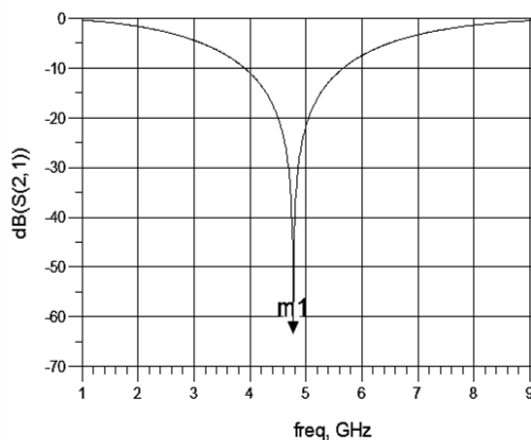
$$\begin{aligned} H_1 &= L_1 \cos(30^\circ) \\ H_2 &= 0.6H_1 \\ L_{p1} &= 0.6L_1 \end{aligned} \quad (5)$$

$$L_2 = L_1 \Rightarrow L_{p2} = L_{p1}$$

از طرف دیگر با توجه به مرجع [۱۵]، روابط مربوط به C، L به صورت رابطه (۶) نوشته می‌شود:



(الف)



(ب)

شکل ۶-الف- مدار معادل سلول پیشنهادی، ب- پاسخ فرکانسی مدار معادل سلول پیشنهادی

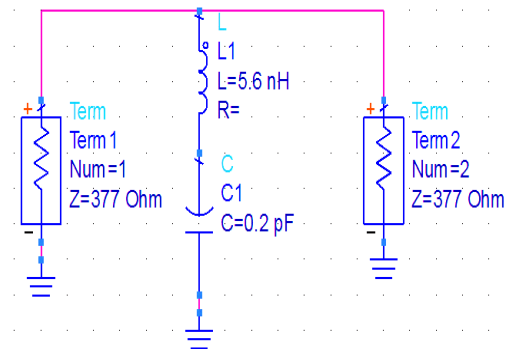
نمودار شکل (۶-ب)، پاسخ فرکانسی S_{21} یک فیلتر میان نگذر با فرکانس مرکزی 4.77GHz را نشان می‌دهد، که با فرضیات طراحی (فیلتر میان نگذر با فرکانس مرکزی 4.75GHz) با تقریب بسیار مناسبی مطابقت دارد.

پس از حل معادلات (۵) تا (۱۳)، به کمک نرم‌افزار MATLAB، مقادیر ابعاد سلول پیشنهادی مطابق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شوند.

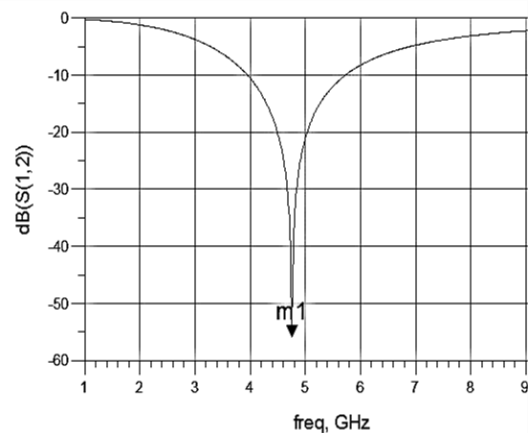
$$\begin{aligned} R_1 &= 8.68\text{mm}, \\ R_2 &= 5.21\text{mm}, \\ H_1 &= 1.73\text{mm}, \\ H_2 &= 1.04\text{mm}, \\ \alpha &= 60^\circ \end{aligned} \quad (14)$$

همچنین مقادیر سلف‌ها و خازن‌های مربوطه برای سلول پیشنهادی مطابق رابطه (۱۵) محاسبه می‌شوند.

با توجه به مقادیر به‌دست آمده، مدار معادل اولیه برای یک فیلتر میان نگذر حلقه تعیین می‌شود. مقادیر سلف و خازن محاسبه شده را در نرم‌افزار ADS قرار داده، مدار معادل آن را مطابق شکل (۵-الف) مدل کرده و پاسخ فرکانسی مدار معادل سلول حلقه برای مدار LC را در شکل (۵-ب) رسم می‌کنیم.



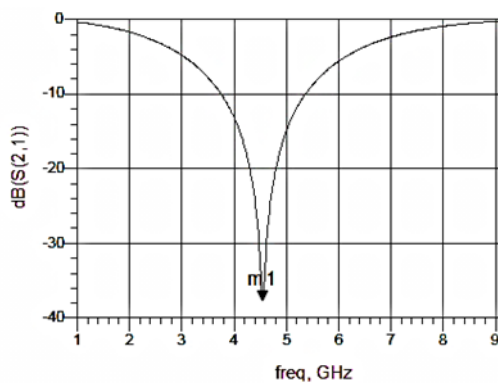
(الف)



(ب)

شکل ۵-الف- مدار معادل سلول حلقه، ب- پاسخ فرکانسی مدار معادل سلول حلقه

از نمودار شکل (۵) می‌توان دریافت که پاسخ فرکانسی مربوط به یک فیلتر میان‌نگذر با فرکانس مرکزی 4.76GHz است، که با فرضیات طراحی (فیلتر میان‌نگذر با فرکانس مرکزی 4.75GHz) مطابقت دارد. درواقع این نمودار، صحت محاسبات صورت گرفته را تأیید می‌کند و به‌نوعی مدار معادل و فرمول‌های مستخرج شده را راستی آزمایی می‌کند. پس از اطمینان از صحت روابط استخراج شده برای سلول حلقه، نوبت به تعیین مدار معادل سلول پیشنهادی می‌رسد. با استفاده از مرجع [۲]، مدار معادل سلول پیشنهادی در شکل (۶-الف)، پیشنهاد می‌شود. در این شکل، L_1 اثر سلفی سلول پیشنهادی C_1 اثر خازنی ناشی از همجواری سلول‌های مجاور و L_2 مقادیر مربوط به سلف و خازن قسمتی از خط انتقال به ضخامت زیرلایه 1.6mm می‌باشند.

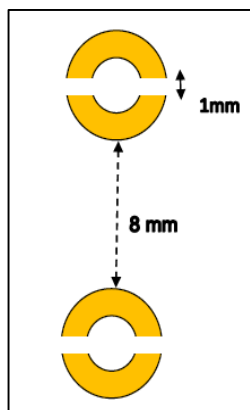


(ب)

ادامه شکل ۷-ب- پاسخ فرکانسی سلول پیشنهادی با دیود روشن

مدل مداری ساختار RFSS در حالت مدارباز (نیم حلقه)

حال می‌توان چنین تصور کرد که وقتی که دیود خاموش است، سلول به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود و وضعیت همان وضعیت سلول شکافدار است. وجود شکاف در سلول سبب تشکیل یک خازن جدیدی می‌شود که با خازن سلول مجاور مجموعاً یک خازن سری را تشکیل می‌دهند. به منظور روشن شدن مطلب، این موضوع برای یک سلول حلقه در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸- اثر خازنی ایجاد شکاف بر سلول واحد RFSS شکافدار

همان گونه که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود، علاوه بر خازن قبلی، خازن جدیدی تشکیل شده است که سطح رسانای خازن نیم حلقه نسبت به حالت قبل $1/2$ و فاصله بین آن‌ها $1/8$ حالت قبل شده است (1mm). پس می‌توان گفت که ظرفیت خازن جدید ۴ برابر شده است؛ بنابراین در حالت سلول شکافدار، ظرفیت خازن کل، حاصل اتصال سری دو خازن به ظرفیت‌های C و 4C خواهد بود که به صورت رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

طراحی، شبیه‌سازی، ساخت و تعیین مدار معادل یک سلول فیلتر RFSS با قابلیت پیکربندی ...

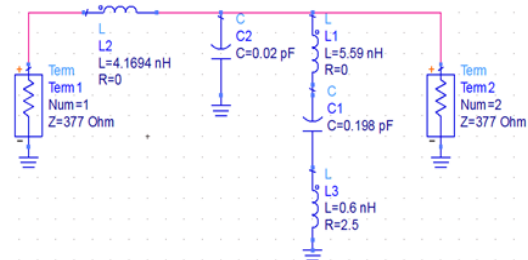
$$\begin{aligned} L_1 &= 5.5936nH, \\ C_1 &= 0.1998pF, \\ L_2 &= 4.1694nH, \\ C_2 &= 0.0293pF \end{aligned} \quad (۱۵)$$

مدار معادل در حالت اضافه نمودن دیود PIN به سلول FSS

به منظور ایجاد قابلیت پیکربندی مجدد، در ناحیه بین شکاف دو بازوی سلول پیشنهادی شکل (۳)، دو دیود پین قرار می‌گیرد. از دیود پین معمولاً در کاربردهای سویچینگ RF استفاده می‌شود؛ زیرا ضمن اینکه سرعت سویچینگ بالایی دارد (فرکانس بالا)، با ولتاژ ۵ ولت نیز، قابل راه‌اندازی است. هرچند سویچینگ MEMS، دارای تلفات کمتری است، اما برای راه‌اندازی آن نیاز به ولتاژ DC بالا است. همچنین سرعت سویچینگ آن پایین است. کاربرد دیود وارکتور نیز معمولاً در حالت آنالوگ است. از طرف دیگر، از نظر اقتصادی نیز دیود پین از دیود وارکتور و MEMS ارزان‌تر است. دیود پین، یک عنصر فعال کنترل شده با جریان است. در واقع این دیود یک سویچ RF است. وقتی که دیود پین روشن و جریان کنترلی آن ثابت باشد، دیود مانند یک مقاومت ثابت (کوچک) سری با یک سلف عمل می‌کند. وقتی که دیود خاموش است و جریان عبوری آن صفر می‌شود، دیود به صورت یک مقاومت بالا رفتار می‌کند [۱۶]. در این تحقیق از دیود پین مدل BAR64-05 استفاده شده است. مدار معادل این دیود به شکل یک مقاومت سری 2.5Ω با یک سلف $0.6nH$ است.

مدل مداری ساختار RFSS در حالت اتصال کوتاه (حلقه کامل)

وقتی که دیود روشن می‌شود، یک مقاومت 2.5Ω سری با یک سلف $0.6nH$ مطابق شکل (۷-الف)، در مدار قرار می‌گیرد. شکل (۷-الف)، مدار معادل سلول RFSS با دیود روشن را نشان می‌دهد. مدار معادل سلول پیشنهادی با دیود روشن به کمک نرم‌افزار ADS شبیه‌سازی شده و پاسخ فرکانسی آن نیز در شکل (۷-ب)، رسم شده است.

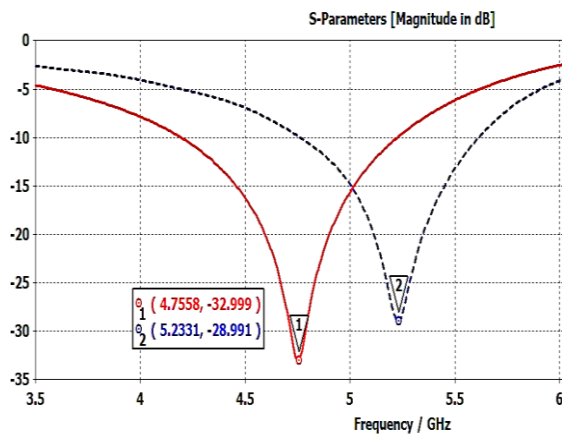


(الف)

شکل ۷-الف- مدار معادل سلول پیشنهادی با دیود روشن

آنالیز فلوکه سلول FSS

پس از طراحی سلول واحد و تعیین ابعاد نهایی سلول منطبق بر جدول (۱)، این سلول به کمک نرم افزار CST شبیه سازی و پاسخ فرکانسی آن تعیین می شود. به منظور در نظر گرفتن اثرات متقابل بین عناصر پچ در یک آرایه متناوب از عناصر FSS و پرهیز از آنالیز کل آرایه، این گونه ساختارها با روش فلوکه تحلیل می شوند [۱۷]. با استفاده از روش فلوکه، اثرات بین سلول های آرایه متناوب، با استفاده از تعریف شرایط مرزی متناوب روی مرزهای سلول واحد انجام می شود. پاسخ فرکانسی S_{21} ، در نمودار شکل (۱۰) آمده است. در حالت شبیه سازی به کمک CST و با ابعاد محاسبه شده سلول، فرکانس رزونانس در حالت روشن بودن دیود 4.75GHz و در حالت خاموش بودن دیود 5.23GHz است. این اعداد با دقت بسیار مناسبی با شبیه سازی در حالت مدار معادل مطابقت دارند.



شکل ۱۰- پاسخ فرکانسی سلول پیشنهادی با روش CST، در دو حالت خاموش و روشن بودن دیود

ساخت و اندازه گیری فیلتر با قابلیت پیکربندی فرکانسی

پس از دستیابی به یک سلول با ساختار FSS و با قابلیت پیکربندی مجدد، اکنون می توان این سلول را به عنوان پایه ای برای ساخت یک فیلتر FSS مورد نظر با قابلیت پیکربندی مجدد جهت حفاظت از محموله های فضایی در برابر امواج مزاحم استفاده نمود. شکل (۱۱)، سلول واحد ساخته شده، به همراه دو عدد دیود پین BAR64-05 را نشان می دهد. این سلول بر روی زیرلایه از نوع FR4 با ضخامت 1.6mm، $\epsilon_r = 4.3$ و تانژانت تلفات 0.025 ساخته شده است. ضخامت هادی به کار رفته در سلول نیز ۳۵ میکرون است.

$$\left. \begin{matrix} C_1 = C \\ C_2 = 4C \end{matrix} \right\} \Rightarrow C_t = 0.8C \quad (16)$$

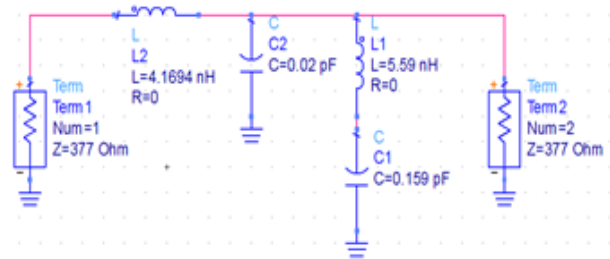
مدار معادل سلول واحد شکافدار و پاسخ فرکانسی آن در این حالت به ترتیب در شکل (۹) آمده است.

با مقایسه نمودارهای S_{21} شکل های (۷-ب و ۹-ب)، می توان دریافت که فرکانس تشدید از حالت دیود روشن به حالت دیود خاموش، به ترتیب از 4.55GHz به 5.34GHz جابجا می شود. اکنون که کار طراحی سلول به پایان رسیده و ابعاد سلول مشخص شده است و شبیه سازی ها نیز به کمک نرم افزار ADS انجام شده است، باید سلول را در نرم افزار CST شبیه سازی کرد. انجام مجدد شبیه سازی در نرم افزار CST، به منزله راستی آزمایی کلیه مراحل طراحی خواهد بود. در ساختار پیشنهادی زیرلایه FR4 با ضخامت 1.6mm و ضریب گذردهی الکتریکی $\epsilon_r = 4.3$ در نظر گرفته شده است. بر اساس توضیحات فوق، ابعاد این سلول FSS در جدول (۱)، آمده است.

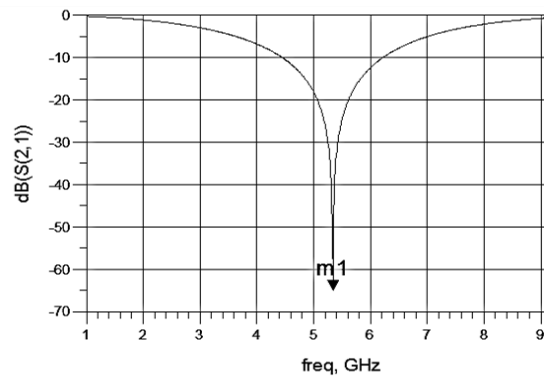
جدول ۱- ابعاد نهایی سلول FSS

پارامتر	α	L_1	L_2	L_3	G
مقدار	60°	2.0mm	2.2mm	1.4mm	1.0mm

پارامتر	R_1	R_2	h_{sub}	F	$W_x = W_y$
مقدار	8.7mm	5.3mm	1.6mm	0.4mm	22mm



(الف)

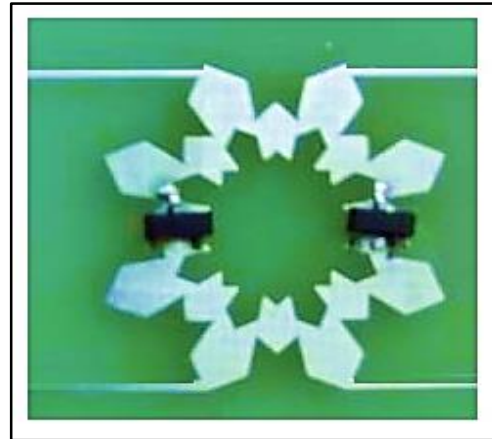


(ب)

شکل ۹-الف- مدار معادل سلول پیشنهادی با دیود خاموش، ب- پاسخ فرکانسی سلول پیشنهادی با دیود خاموش

نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور محافظت از تشعشعات الکترومغناطیسی از محموله یک ماهواره، با الهام از گلبرگ‌های گل، یک فیلتر میان‌گذر RFSS با قابلیت پیکربندی مجدد در محدوده باندهای C (-4GHz) طراحی و مدار معادل آن نیز ارائه شد. فرکانس مرکزی این فیلتر 4.75GHz و پهنای باند آن حدود 1GHz است که فرکانس مرکزی آن نیز به صورت الکترونیکی قابل تغییر می‌باشد. به منظور صحت‌سنجی از فرآیند طراحی، فیلتر مورد نظر ساخته شد و سپس تست گردید. نتایج شبیه‌سازی و تست نیز در قالب نمودارهای S_{21} با یکدیگر مقایسه شدند.



شکل ۱۱- سلول پیشنهادی RFSS ساخته شده

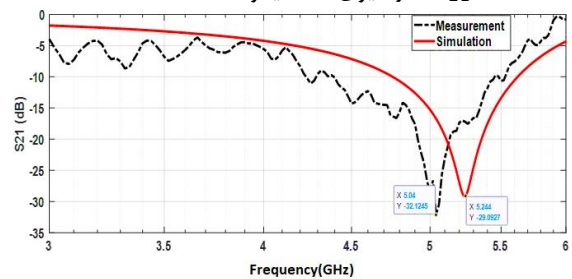
تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

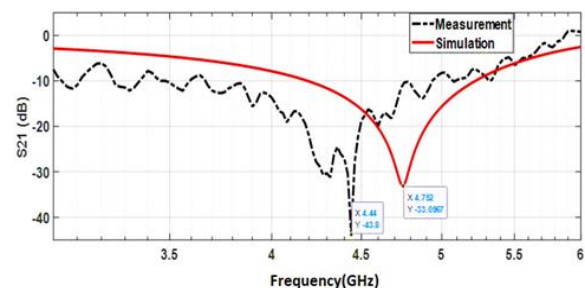
- [1] Kula, Jeffrey. "Reconfigurable Band Rejection Frequency Selective Structures." Doctoral dissertation, Ohio State University, 2019. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1545336272765337
- [2] M. Basravi, Z. H. Firouzeh, M. Maddahali, "Design of a Single-Layer Circuit Analog Absorber Using Double-Circular-Loop Array via the Equivalent Circuit Model," *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations*, vol. 5, no. 2, 2017, doi:10.22061/jecei.2018.790.
- [3] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces Theory and Design*, New York, John Wiley & Sons Inc., 2000.
- [4] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. T. Tuley, *Radar Cross Section*, 2nd ed. Raleigh, NC, USA, SciTech Publishing, 2004, doi: 10.1049/SBRA026E.
- [5] Y. Shang, Z. Shen, and S. Xiao, "On the design of single-layer circuit analog absorber using double-square-loop array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 12, pp. 6022-6029, 2013, doi: 10.1109/TAP.2013.2280836.
- [6] Z. Xing, F. Yang, P. Yang, J. Yang and C. Jiang, "A Novel High-Performance FSS-AMC Radome Unit," *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, 2020, pp. 777-778, doi: 10.1109/IEECONF35879.2020.9329852.
- [7] W. Tian, X. Hou and Y. Che, "The analysis and measurement of FSS radome for antenna RCS reduction," *2013 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference*, 2013, pp. 297-299, doi: 10.1109/CSQRWC.2013.6657413.
- [8] M. Abdollahvand, K. Forooghi, J. A. Encinar, Z. Atlasbaf, and E. Martinez-de-Rioja, "Design and demonstration of a tri-band frequency selective surface for space applications in X, K, and Ka bands,"

پس از ساخت، ساختار مورد نظر تست و نتایج تست و شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل (۱۲)، نمودار پاسخ S_{21} اندازه‌گیری شده را با دیودهای خاموش نشان می‌دهد. نشانگرها روی این نمودار نشان می‌دهند که فرکانس تشدید این آرایه 5.04GHz و پهنای باند $S_{21} \leq -10dB$ اندازه‌گیری شده فیلتر، 1.2GHz است.



شکل ۱۲- نمودارهای شبیه‌سازی و اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی فیلتر در حالت دیود خاموش

با توجه به نمودارهای شکل (۱۲) می‌توان گفت که، هرچند نمودارهای اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، اندکی در فرکانس تشدید جابه‌جا شده‌اند، اما در مجموع روند تغییرات آن‌ها مشابه است. در شرایطی که دیودها روشن می‌شوند، پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده فیلتر در شکل (۱۳) آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، فرکانس تشدید و پهنای باند فیلتر به ترتیب 4.44GHz و 1.1GHz هستند.



شکل ۱۳- نمودارهای شبیه‌سازی و اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی فیلتر در حالت دیود روشن

- [13] N. Marcuvitz., *Waveguide Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1986, doi: 10.1049/PBEW021E.
- [14] R. J. Langley and A. J. Drinkwater, "Improved empirical model for the Jerusalem cross," in *IEE Proceedings H (Microwaves, Optics and Antennas)*, vol. 129, no. 1, pp 1-6, 1982, doi: 10.1049/ip-h-1.1982.0001.
- [15] K. Sarbandi and N. Behdad, "A Frequency Selective Surface with Miniaturized Elements," *IEEE Trans. on antenna and propagation*, Vol. 55, No. 5, pp. 1239-1245, 2007, doi: 10.1109/TAP.2007.895567.
- [16] D. F. Mamedes, A. Gomes Neto, J. Costa e Silva, and J. Bornemann, "Design of reconfigurable frequency-selective surfaces including the PIN diode threshold region," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 12, no. 9, pp. 1483-1486, 2018, doi: 10.1049/iet-map.2017.0761.
- [17] M. Veysi, M. Kamyab, S. M. Mousavi and A. Jafargholi, "Wideband Miniaturized Polarization-Dependent HIS Incorporating Metamaterials," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 764-766, 2010, doi: 10.1109/LAWP.2010.2062170
- Microwave and Optical Technology Letters, vol. 62, no.4, pp.1742-1751,2020, doi:10.1002/mop.32225.
- [9] A. J. A. Al-Gburi, I. B. M. Ibrahim, M. Y. Zeain and Z. Zakaria, "Compact Size and High Gain of CPW-Fed UWB Strawberry Artistic Shaped Printed Monopole Antennas Using FSS Single Layer Reflector," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 92697-92707, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2995069.
- [10] B. Sangeetha, G. Gulati, R. U. Nair and S. Narayan, "Design of airborne radome using Swastika-shaped metamaterial-element based FSS," *2016 IEEE Annual India Conference (INDICON)*, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/INDICON.2016.7839049.
- [11] P. Charoonsaeng and T. Theeradejvanichkul, "A Thin Wideband Radar Absorber Based on a Dual-Substrate FSS with Quadruple Hexagonal Split Rings for Stealth Aircraft Application" *2019 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, 2019, pp. 111-114, doi: 10.1109/IWAT.2019.8730610.
- [12] H. Babaei and S. A. Gohari, "Reconfigurable bandstop filter using active frequency selective surface, design and fabrication," *Frequenz*, vol. 76, no. 1-2, 2022, pp. 17-28, <https://doi.org/10.1515/freq-2021-0008>.