مقاله پژوهشی

مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۹، شمارهٔ ۲، بهار ۱٤۰۰، صفحه ۵۳-۵٦

تاریخ دریافت مقاله: ۱٤۰۰/۰۱/۲۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱٤۰۰/۰۳/۲۸

طراحی و شبیه‌سازی فیلتر دوبانده میان‌گذر تنظیم‌پذیر برای آشکارسازی و سنجش میزان تابش امواج وای‌فای

طاهره بیکی[۱]، میرشهرام حسینی‌پناه[۲*] و فرخ حجت‌کاشانی[۳]

[۱]گروه مهندسی برق و مخابرات، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.

[۲]پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.

[۳]گروه مهندسی برق و مخابرات، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

[*]تهران، سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، کدپستی: ۱٤۳۹۹-۵٤۸۳۱

پست‌الکترونیکی: srhosseini@aeoi.org.ir

چکیده

در این مقاله، یک فیلتر جدید دوبانده میان‌گذر به‌منظور سنجش و بهینه‌سازی میزان تابش امواج وای‌فای در محدوده فرکانسی غیریونساز ۲٫٤ و ۵ گیگاهرتز طراحی و شبیه‌سازی شده است. در روش جدید ارائه شده برای آشکارسازی، امواج وای‌فای در ابتدا فیلتر و سپس در آشکارساز به سیگنال جریان مستقیم تبدیل شدند. این فیلتر از یک تشدیدگر فراماده‌ای مکمل حلقه شکاف‌دار تشدیدی و یک خازن اینتردیجیتال تشکیل شده است که روی یک موجبر هم‌سطح با دی‌الکتریک راجرز ۳۰۰۳ و امپدانس مشخصه ۵۰ اهم چاپ شده است. در مدل مدار معادل فیلتر میان‌گذر فراماده مکمل حلقه شکاف‌دار تشدیدی به‌صورت یک مدار تانک نشان داده شد که با خط انتقال موجبر هم‌سطح به‌طور موازی قرار گرفت. خازن کوپلینگ اینتردیجیتال نیز به شکل سری با موجبر بسته شد. با تغییر شعاع مکمل حلقه شکاف‌دار تشدیدی و طول خازن اینتردیجیتال فرکانس در قطب‌های انتقالی فیلتر تنظیم‌پذیر گردید. سازوکار کوپلینگ الکترومغناطیسی حاکم بر المان‌ها بیان شد. براساس نتایج حاصل از نمودار پارامترهای پراکندگی افت بازگشتی در قطب‌های انتقالی بیش‌تر از ٤۰ دسی‌بل و تلف انتقالی در باندهای میان‌گذر کم‌تر از ۰٫۳ دسی‌بل بود.

کلیدواژگان: فیلتر دوبانده میان‌گذر، امواج وای‌فای، سنجش و بهینه‌سازی، فراماده، غیریونساز، آشکارساز الکترومغناطیس، پروب، حفاظت در برابر اشعه.

۱. مقدمه

امروزه با استفاده از آشکارساز امواج الکترومغناطیس[۱] و الکترومغناطیس‌متر می‌توان شدت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و میزان تابش امواج را سنجید. در قسمت بالای آشکارساز الکترومغناطیس، محلی برای نصب و اتصال پروب هم‌فرکانس با فرکانس امواج مورد سنجش تعبیه می‌شود. این پروب به‌عنوان یک آنتن گیرنده عمل می‌کند. با قرارگیری فیلتر میان‌گذر مناسب برای فرکانس‌های مورد نظر در پروب آشکارساز الکترومغناطیس، سنجش و شناسایی میزان تابش میسر می‌شود. براساس مقررات و استاندارد IEEE 802.11، وای‌فای[۲] به‌طور معمول در محدوده فرکانسی ۲٫٤ و ۵

[1] Electromagnetic Waves Detector

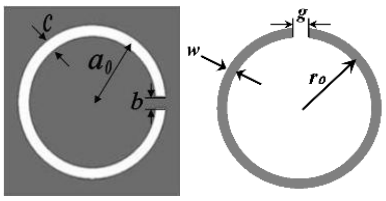
[2] Wireless Fidelity (Wi-Fi)

گیگاهرتز عمل می‌کند. به‌منظور سنجش میزان تابش امواج وای‌فای در یک محیط بسته می‌توان از آشکارسازی با پروب حاوی یک فیلتر دوبانده میان‌گذر استفاده نمود.

یکی از روش‌های طراحی فیلتر دوبانده میان‌گذر، ترکیب فیلتر پهن‌باند میان‌گذر با فیلتر میان‌نگذر است. در این روش باند واحد میان‌گذر توسط صفر انتقالی حاصل از فیلتر میان‌نگذر به زیرباندهای میان‌گذر تبدیل می‌شود [۱]. اولین‌بار در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰٤، تشدیدگرهای فراماده‌ای حلقه شکاف‌دار تشدیدی[1] (SRR) و مکمل حلقه شکاف‌دار تشدیدی[2] (CSRR) برای دست‌یابی به ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (μ) و ضریب گذردهی الکتریکی (ε) منفی در یک محدوده فرکانسی مشخص معرفی شده‌اند [۲]. با تحریک SRR و CSRR به‌ترتیب با میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی متغیر با زمان، در نزدیکی فرکانس تشدید μ و ε منفی ایجاد و امواج تا حد زیادی تضعیف می‌شوند. تاکنون فیلترهای متعددی با بهره‌گیری از این فراماده‌ها ارائه شده است [۳-۵]. در طراحی فیلترها موج‌بر هم‌سطح[3] (CPW) نسبت به خطوط انتقال مسطح دیگر مزیت‌هایی دارد. المان‌های فعال و غیرفعال را به‌راحتی می‌توان با CPW سری یا موازی کرد. به‌علاوه، به‌دلیل قرارگیری نوار رسانا و صفحات زمین در یک سطح سازگاری الکترومغناطیسی CPW بیش‌تر است و این ویژگی نه‌تنها موجب کاهش تشعشعات الکترومغناطیسی می‌شود، بلکه زمین کردن المان‌های مداری را به‌راحتی و بدون نیاز به پین اتصال‌دهنده (via) میسر می‌سازد [٦]. با توجه به مزایای بیان‌شده برای CPW، در این مقاله طراحی یک فیلتر جدید دوبانده پهن‌باند میان‌گذر با بهره‌گیری از فراماده‌های SRR، CSRR و هم‌چنین خازن اینتردیجیتال برای سنجش و بهینه‌سازی میزان تابش امواج وای‌فای ارائه می‌شود. به‌علاوه در روش جدید ارائه شده برای آشکارسازی، امواج وای‌فای در ابتدا فیلتر و سپس در آشکارساز به سیگنال جریان مستقیم تبدیل می‌شوند.

۲. طراحی فیلتر دوبانده میان‌گذر

یکی از روش‌های طراحی فیلتر پهن‌باند میان‌گذر، اتصال آبشاری فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر است. در این روش فرکانس‌های قطع پایین و بالای فیلتر پهن‌باند توسط فرکانس‌های قطع فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر مشخص می‌شوند. فیلتر روی لایه دی‌الکتریک راجرز ۳۰۰۳ (Rogers 3003) با ضریب نسبی دی‌الکتریک ۳، ارتفاع ۰٫۸۱۳ میلی‌متر و تانژانت تلفات ۰٫۰۰۱ در یک CPW توسط نرم‌افزار CST Microwave Studio طراحی و شبیه‌سازی شده است. جنس رسانا مس است و ساختار فیلتر داخل محفظه خلأ مدل شده است.

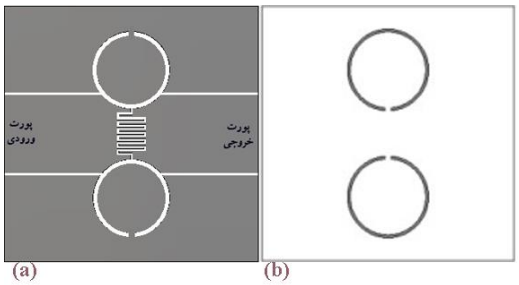


شکل (۱): ساختارهای سلولی SRR (راست) و CSRR (چپ).

شکل ۱ ساختارهای سلولی SRR و CSRR به‌کار رفته در طراحی فیلتر دوبانده را نشان می‌دهد. ابعاد درنظر گرفته شده برای شکل ۱ عبارت است از: a_0=۲٫۷۸، c=b=۰٫۲، r_0=۳ و w=g=۰٫۲ میلی‌متر. CSRR تصویری منفی از SRR است، به‌عبارتی دیگر قسمت‌های فلزی در SRR تبدیل به قسمت‌های حفره‌ای در CSRR می‌شود و بالعکس. بنابراین براساس قانون بابینت[4] این فراماده‌ها دوگان یکدیگر هستند. با این وجود به‌دلیل اثرات ناشی از ضخامت و اتلاف دی‌الکتریک رفتار این ساختارها تقریباً دوگان است و نه به‌طور کامل. با توجه به تحریک SRR و CSRR به‌ترتیب با میدان‌های

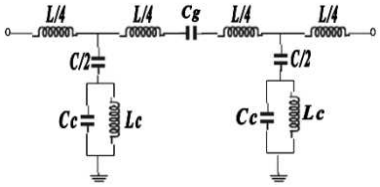
[1] Split Ring Resonator
[2] Complementary Split Ring Resonator
[3] Coplanar Waveguide
[4] Babinet

مغناطیسی و الکتریکی متغیر با زمان، سازوکار کوپلینگ غالب در SRR مغناطیسی و در CSRR الکتریکی است. اگرچه SRR و CSRR تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی به‌ترتیب با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هم، با شدتی کمتر تحریک می‌شوند.



شکل (۲): فیلتر دوبانده پهن‌باند میان‌گذر: (a) نمای رو و (b) نمای زیر.

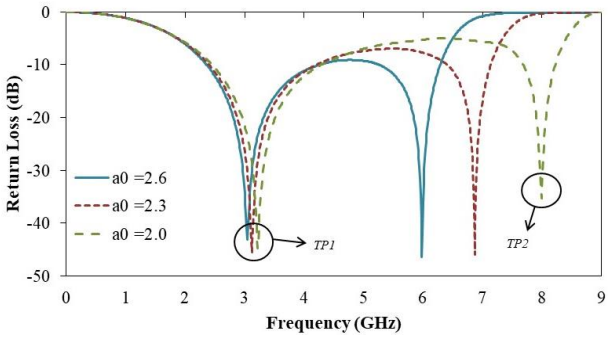
در شکل ۲، نمای روی فیلتر دوبانده به‌تنهایی نقش فیلتر پهن‌باند میان‌گذر را ایفا می‌کند. در این ساختار، خط انتقال CPW با پهنای نوار رسانای ۵٫۵ و شکاف ۰٫۱۲ میلی‌متر برای دست‌یابی به امپدانس مشخصه ۵۰ اهم طراحی شده است. خازن اینتردیجیتال در نوار رسانا از ۱۰ انگشت تشکیل شده است. طول و عرض هر انگشت به‌ترتیب برابر ۲٫۹ و ۰٫۱۵ میلی‌متر و فاصله انگشتان مجاور از یکدیگر ۰٫۱ میلی‌متر است. در شکاف‌های بین انگشتان که به رنگ سفید است، خازن کوپلینگ C_g ناشی از شدت میدان الکتریکی ایجاد می‌شود. C_g که به‌صورت سری با اندوکتانس CPW قرار می‌گیرد، رفتاری بالاگذر دارد. تشدیدگرهای فراماده‌ای CSRR که با مدار تانک LC مدل می‌شود، در ترکیب با CPW یک فیلتر میان‌نگذر فراپهن‌باند را شکل می‌دهد که در فرکانس‌های زیر ۱۰ گیگاهرتز پاسخ فرکانسی پایین‌گذر از خود نشان می‌دهد. با ترکیب این فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر، فیلتر پهن‌باند میان‌گذر ایجاد می‌شود.



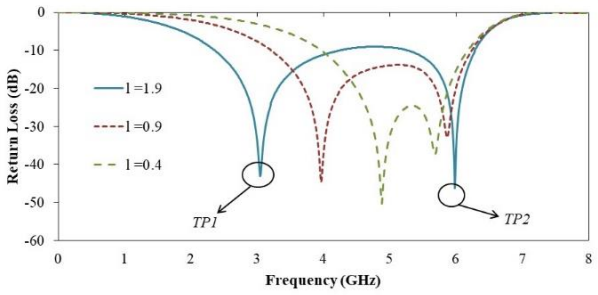
شکل (۳): مدل مدار معادل فیلتر میان‌گذر.

در شکل ۳ پارامترهای L و C بیانگر اندوکتانس خط CPW و ظرفیت خازنی شکاف‌های آن است. C_g خازن کوپلینگ اینتردیجیتال را نشان می‌دهد. L_c و C_c نیز به‌ترتیب اندوکتانس و ظرفیت خازنی CSRR هستند. با قرار دادن $s=j\omega$ امپدانس ورودی (Z_{in}) مدار معادل طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Z_{in}(s)=\left(\frac{LC_gS^2+1}{C_gS}\right)+\left(\frac{\frac{L_c}{2}(C+2C_c)S^2+1}{CS(1+L_cC_cS^2)}\right) \quad (۱)$$



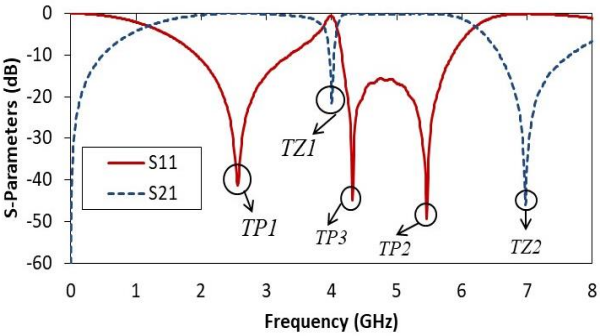
شکل (۴): ضریب برگشتی فیلتر میان‌گذر برای شعاع‌های مختلف CSRR.



شکل (۵): ضریب برگشتی فیلتر میان‌گذر برای طول‌های مختلف خازن اینتردیجیتال.

با توجه به شکل ٤، با تغییر شعاع CSRR و ثابت گذاشتن پارامترهای دیگر در فیلتر پهن‌باند میان‌گذر، فرکانس قطب انتقالی TP_2 تنظیم‌پذیر است؛ در حالی‌که TP_1 تقریباً ثابت می‌ماند. با کاهش a_0 فرکانس TP_2 افزایش می‌یابد و در ادامه این روند با دور شدن TP_1 و TP_2 از یکدیگر پاسخ تک‌بانده به دوبانده تبدیل می‌شود.

براساس شکل ۵ با کاهش طول خازن اینتردیجیتال، فرکانس TP_1 تا جایی افزایش می‌یابد که TP_1 و TP_2 روی هم قرار گیرند. شایان ذکر است که شکل‌های ۳، ٤ و ۵ مربوط به شکل ۲–a) یعنی نمای روی فیلتر دوبانده است که به‌تنهایی یک فیلتر پهن‌باند میان‌گذر را تشکیل می‌دهد.



شکل (۶): پارامترهای پراکندگی فیلتر دوبانده میان‌گذر.

در شکل ٦ با ایجاد صفر انتقالی TZ_1 در میان TP_1 و TP_2 توسط چاپ SRR در زیر فیلتر، باند واحد میان‌گذر به دو زیرباند میان‌گذر تبدیل می‌شود. TP_1 بر اثر کوپلینگ غالب الکتریکی خازن اینتردیجیتال تولید شده است. به‌علاوه TZ_1 و TZ_2 توسط کوپلینگ غالب مغناطیسی و الکتریکی SRR و CSRR ایجاد شده‌اند. TP_3 و TP_2 نیز تحت تأثیر کوپلینگ الکتریکی و مغناطیسی SRR و CSRR تولید شده‌اند. فرکانس میانی و پهنای باند نسبی نصف توان در باندهای اول و دوم به‌ترتیب برابر ۲٫۴۳ GHz، ۱۰٦٫۳٪، ۵٫۱۵ GHz و ٤۱٫۲٪ است. تلف انتقالی در باندهای اول و دوم به‌ترتیب برابر ۰٫۳ و ۰٫۲ دسی‌بل است. افت بازگشتی در قطب‌ها به‌ترتیب برابر ٤۱، ٤٤ و ٤۹ دسی‌بل مشاهده می‌شود. به‌علاوه TZ_1 در فرکانس ٤ گیگاهرتز قرار دارد و تلف عبور در آن ۲۱ dB است. ابعاد فیلتر برابر $0.06\ \lambda_g^2$ است به‌طوری که λ_g طول‌موج هدایت‌شده در فرکانس میانی باند اول است.

۳. نتیجه‌گیری

فیلتر جدید دوبانده میان‌گذر در محدوده فرکانسی امواج غیریونساز وای‌فای با استفاده از فرامادههای CSRR، SRR و هم‌چنین خازن اینتردیجیتال چاپ شده در موج‌برهم‌سطح طراحی و شبیه‌سازی شد. سازوکار کوپلینگ غالب در المان‌های فیلتر و قطب و صفر انتقالی ناشی از آن بررسی شد. این فیلتر دوبانده مزیت‌هایی چون افت بازگشتی بالا، تلف انتقالی کم، انتخابگری فرکانسی و ابعاد بسیار فشرده دارد. در روش ارائه شده برای آشکارسازی، امواج وای‌فای در ابتدا فیلتر و سپس در آشکارساز به سیگنال جریان مستقیم تبدیل می‌شوند. قرارگیری این فیلتر دوبانده در پروب آشکارساز امواج الکترومغناطیس در سنجش و اندازه‌گیری میزان تابش امواج وای‌فای کاربرد دارد و در بهینه‌سازی تابش و حفاظت در برابر اشعه مؤثر است.

۴. مراجع

[1] R.J. Cameron, C.M. Kudsia and R.R. Mansour. Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications, John Wiley and Sons, (2018).
[2] J.E. Martin. Physics for Radiation Protection, John Wiley and Sons, (2013).
[3] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Ribbins and W.J. Stewart. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 47 (1999) 2075-2084.
[4] F. Falcone, T. Lopetegi, J.D. Baena, R. Marques, F. Martin and M. Sorolla. Effective Negative-ε Stopband Microstrip Lines Based on Complementary Split Ring Resonators, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 14(6) (2004) 280-282.
[5] J. Bonache, F. Martin, J. Garcia-Garcia, I. Gil, R. Marques and M. Sorolla. Ultra Wide Band Pass Filters (UWBPF) Based On Complementary Split Ring Resonators, Microwave and Optical Technology Letters, 46(3) (2005) 283-286.
[6] L. Cerrito. Radiation and Detectors, Springer, (2017).
[7] I. Wolff. Coplanar Microwave Integrated Circuits, John Wiley and Sons, (2006).