

NESTED CIRCULAR ELLIPTICAL SHAPED MIXED LOOP RESONATOR BASED BANDPASS FILTER FOR MICROWAVE APPLICATIONS

PENAPIS JALUR BERASASKAN CAMPURAN GEGELUNG PENYALUN BERBENTUK SARANG BULAT UNTUK APLIKASI GELOMBANG MIKRO

Mohammad Rashed Iqbal Faruque^{a*}, Md. Jubaer Alam^b,
Muhamad Roszaini Roslan^a, Mohammad Tariqul Islam^c

^aPusat Sains Angkasa (ANGKASA), Institut Perubahan Iklim (IPI),
Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

^bDepartment of Electrical and Electronic Engineering, IUBAT,
Dhaka, Bangladesh

^cPusat Kejuruteraan Elektrik & Elektronik Termaju, Universiti
Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

Article history

Received

19 August 2019

Received in revised form

2 December 2019

Accepted

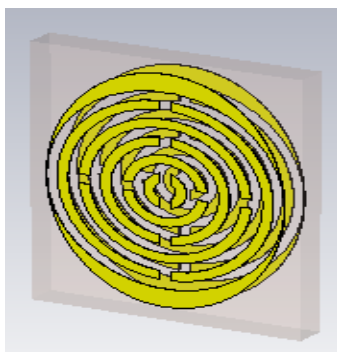
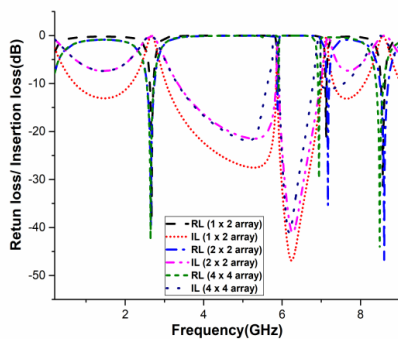
16 January 2020

Published online

27 February 2020

*Corresponding author
rashed@ukm.edu.my

Graphical abstract



Abstract

An elliptical thumb printed nested circular mixed loop resonator (MLR) is introduced in this article to design a multiple bandpass filter for microwave applications. The proposed structure is composed of a series of loop resonators on a Rogers RT-5880 dielectric substrate, where the overall system is developed into a 377 Ω framework. Similar structure is designed on both sides of the substrate and an investigation is made on scattering parameters, relative permittivity, permeability, refractive index and current distributions. The 12 \times 14 mm² structure is designed and evaluated by a simulation software CST microwave studio and the metamaterial characteristics have been classified by Nicolson-Ross-Weir method at the filtering frequencies. The proposed filter shows resonances at 2.65 GHz, 5.85 GHz, 7.12 GHz, and 8.59 GHz, and the measured results are compared with the simulated ones. With a favorable design and double-negative characteristics, this design is suitable for multiple bandpass filter particularly for S, C, and X-band applications.

Keywords: Bandpass filter, elliptical shape, metamaterial structure, mixed loop resonator

Abstrak

Satu jajar elips yang bercetak bersalut campuran gegelung penyalun berbentuk sarang bulat (MLR) diperkenalkan dalam artikel ini untuk reka bentuk penapis pelbagai jalur untuk aplikasi gelombang mikro dan THz. Struktur yang dicadangkan terdiri daripada siri penyalun gelung pada substrat dielektrik Rogers RT-5880, yang mana sistem keseluruhannya dikembangkan menjadi kerangka 377 Ω . Struktur serupa juga direka pada kedua-dua belah substrat dan kajian dibuat pada parameter penyebaran, ketelusan relatif, kebolehtelapan, indeks biasan dan pengagihan semasa. Struktur 12 \times 14 mm² direka dan dinilai oleh perisian simulasi studio gelombang mikro CST dan ciri-ciri bahan meta telah diklasifikasikan oleh kaedah Nicolson-Ross-Weir pada frekuensi penapisan. Penapis yang dicadangkan menunjukkan

resonansi pada 2.65 GHz, 5.85 GHz, 7.12 GHz, dan 8.59 GHz, dan hasil yang diperoleh dibandingkan dengan yang disimulasikan. Dengan reka bentuk yang bersesuaian dan ciri-ciri dua-negatif, reka bentuk ini sesuai untuk penapis jalur pelbagai terutamanya untuk aplikasi S, C, dan X-band.

Kata kunci: Bentuk ellipsis, penapis jalur, penyalun gelombang campuran, struktur bahan meta

© 2020 Penerbit UTM Press. All rights reserved

1.0 PENGENALAN

Komponen-komponen dan litar berprestasi tinggi secara meluas digunakan dalam sistem komunikasi frekuensi radio dan gelombang mikro moden. Komponen ini terutamanya meliputi litar aktif seperti penguat kuasa [1] dan litar pasif seperti pengganding [2], pembahagi kuasa [3] dan penapis jalur (BPF) [4]. Reka bentuk BPFs adalah sangat diperlukan untuk memenuhi permintaan spesifik pengguna elektronik dan aplikasi perindustrian. Baru-baru ini, banyak satah BPF dengan kehilangan kemasukan yang rendah di jalur lurus dan penolakan jalur tinggi telah dilaporkan menggunakan teknik-teknik gangguan isyarat [5] teknik-teknik yang dimuatkan rintisan, dan sebagainya. Selain itu, BPFs seimbang mempunyai banyak kelebihan kebal kebisingan dan gangguan elektromagnetik yang rendah dalam sistem komunikasi tanpa wayar berbanding yang lain [6]. Hari ini, ia telah menjadi cabaran untuk menghadkan parameter supaya operasi frekuensi berfungsi dalam jalur lebar tertentu [7]. Dalam hal ini, penapis jalur berasaskan bahan meta merupakan salah satu penyelesaian paling berharga untuk mengelakkan gangguan.

Bahan meta, bahan kompleks yang direka bentuk secara sintetik yang mempamerkan beberapa ciri elektromagnetik yang menarik dan mengatasi had biasa bahan-bahan yang terdapat secara semula jadi. Ciri-ciri luar biasa bahan meta ini mungkin termasuk ketelusan negatif, kebolehtelapan negatif, pembalikan peraturan Snell dan beberapa fenomena pembalikan elektromagnetik yang lain. Victor Veselago pada tahun 1968 telah menemui ciri-ciri luar biasa bahan meta. Tetapi ia tidak dikenali dengan baik sehingga Smith *et al.* pada tahun 2000 berjaya menunjukkan aplikasi elektromagnetisme muktamad. Mereka membina bahan tersebut menggunakan penyalun cincin berpecah (SRR) dan cip metalik. Bahan-bahan konvensional menyebabkan indeks pembiasan positif kerana mempunyai ketelusan dan kebolehtelapan positif. Kebolehtelusan dan kebolehtelapan negatif bahan DNG menghasilkan indeks biasan negatif (NRI) pada frekuensi tertentu kerana kedua-dua sifat negatif ini. Medium DNG juga dikenali sebagai bahan meta lengan kiri atau gelombang belakang 'medium Indeks Negatif (NIM). Dalam media DNG, fasa halaju kekal sebagai anti-selari dengan vektor penunjuk.

Apabila gelombang satah melalui medium negatif ini, E-field, H-field dan vektor gelombang (K) mengikut aturan kiri. Dengan fenomena elektromagnetik, bahan meta boleh digunakan untuk aplikasi termasuk pengurangan Kadar Penyerapan Spesifik [8], reka bentuk antena [9, 10], pembentukan penapis yang berbeza [11-13], jubah yang tidak terlihat [14], penyerap elektromagnetik, dan jurang jalur daripada permukaan-meta pada frekuensi THz yang merangkumi grafena boleh ubah, dua jalur tompok permukaan moiré untuk pelbagai aplikasi bioperubatan, dan meta-permukaan jalur pelbagai [15, 16]. Walaubagaimanapun, pelbagai jenis bahan meta yang bentuk alfabatik menjadi sangat popular dalam aplikasi yang berbeza [17, 19]. Dalam makalah ini, gabungan dibuat di antara satu penyalun gelombang campuran dua dwi dan satu penyalun cincin berpecah dua cincin (DS-SRR) untuk mendapatkan penapis jalur. Untuk menghasilkan penapis jalur menggunakan penyalun cincin berpecah, tunggal atau dwi-mod. Hari ini, dwi-mod telah menjadi sangat popular kerana litar resonansi berganda [20-24]. Penapis berasaskan bahan meta adalah menarik untuk kebanyakan aplikasi, walaupun menghadapi cabaran yang besar disebabkan julat jalur lebar yang luas. Ini menjadi satu tugas yang mencabar untuk membuat penapis sedemikian pada substrat seperti Rogers RT-5880 untuk mencapai frekuensi jalur lurus pelbagai, beroperasi pada 2.65 GHz, 5.85 GHz, 7.12 GHz, dan 8.59 GHz.

2.0 PEMBINAAN PENURAS

Untuk mendapatkan reka bentuk yang sempurna, struktur itu perlu melalui pelbagai ujian. Struktur ini terdiri daripada enam penyalun dengan cincin yang tersimpan di kedua-dua sisi substrat. Reka bentuk keseluruhan dibuat pada substrat Rogers RT-5880, yang mempunyai pemalar dielektrik sebanyak 2.2 dan kehilangan tangen 0.0009. Ketebalan setiap elemen adalah 35 μm . Struktur ini terdiri daripada pelbagai penyalun bulat di mana radius mereka berbeza dari 6.5 mm hingga 1 mm dan pembelahan masing-masing adalah 0.5 mm. Struktur yang dicadangkan adalah tebal 1.645 mm.

Geometri penapis jalur yang dicadangkan ditunjukkan dalam Rajah 1, dan Jadual 1 mewakili

parameter struktur. Ciri-ciri elektromagnet bagi penyalun cincin berpecah membantu struktur untuk bertindak lebih seperti penapis.

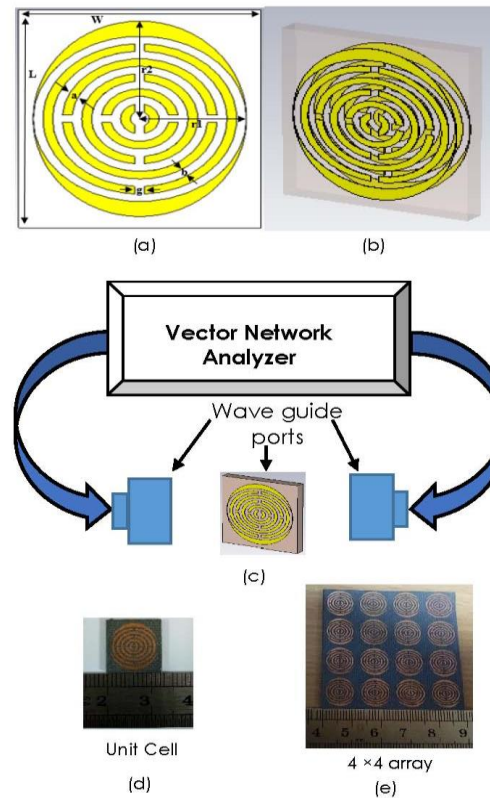
SRR ini bertindak seperti penyalun LC kerana pembelahan mewakili kapasitans dan garis penghantaran mewakili induktifnya. Penyalun ini boleh teruja dari fluks magnet luar yang boleh mewujudkan diamagnetisme di seluruh struktur yang dibangunkan kepada resonan asas. Tetapi terdapat juga kesan polarisasi silang yang terdapat dalam SRR. Walau bagaimanapun, penyalun cincin berpecah dua (DSRR) digunakan dalam proses evolusi untuk mengelakkan polarisasi silang ini [25].

Jadual 1 Parameter penapis jalur

Parameter	W	L	a	b	g	r1	r2
Dimensi (mm)	12	14	0.5	0.5	0.5	5.5	6.5

3.0 KAEDAH NUMERIK DAN PENGESAHAN STRUKTUR

Struktur ini direka sedemikian rupa sehingga gelombang satah seragam boleh menyebar sepanjang arah z (insiden normal) dan arah y (insiden selari). Kawasanya ialah $48 \times 56 \text{ mm}^2$. Dua port pandu gelombang digunakan untuk menyebar gelombang elektromagnetik untuk merangsang konfigurasi pada dua arah yang berlawanan dari paksi Z. Konduktor elektrik sempurna (PEC) dan konduktor magnet sempurna (PMC) digunakan sepanjang arah menegak bagi paksi x dan y. Dan bagi tujuan simulasi ruang bebas, penyelesaian frekuensi domain digunakan. Selain itu, untuk tujuan analisis konfigurasi ini, jaring tetrahedron digunakan dengan jaring fleksibel. Impedans yang normal ialah 50 ohms dan sistem itu dilakukan dari 0.2 ke 9 GHz. Rajah 1 (c) menunjukkan simulasi penubuhan struktur yang dicadangkan. Kawasan prototaip adalah $12 \times 14 \text{ mm}^2$ yang direka untuk tujuan pengukuran dan ditunjukkan dalam Rajah 1 (d) dengan struktur pelbagai. Dengan menetapkan sel unit perspektif di tengah, petunjuk gelombang mengikut Rajah 1 (c) untuk menentukan parameter penyebaran tepat dengan penyalun gelung. Untuk menentukan parameter, kami menggunakan Agilent N5227A penganalisis vektor. Untuk menentukan dengan sempurna, Agilent N4694-60001 digunakan.

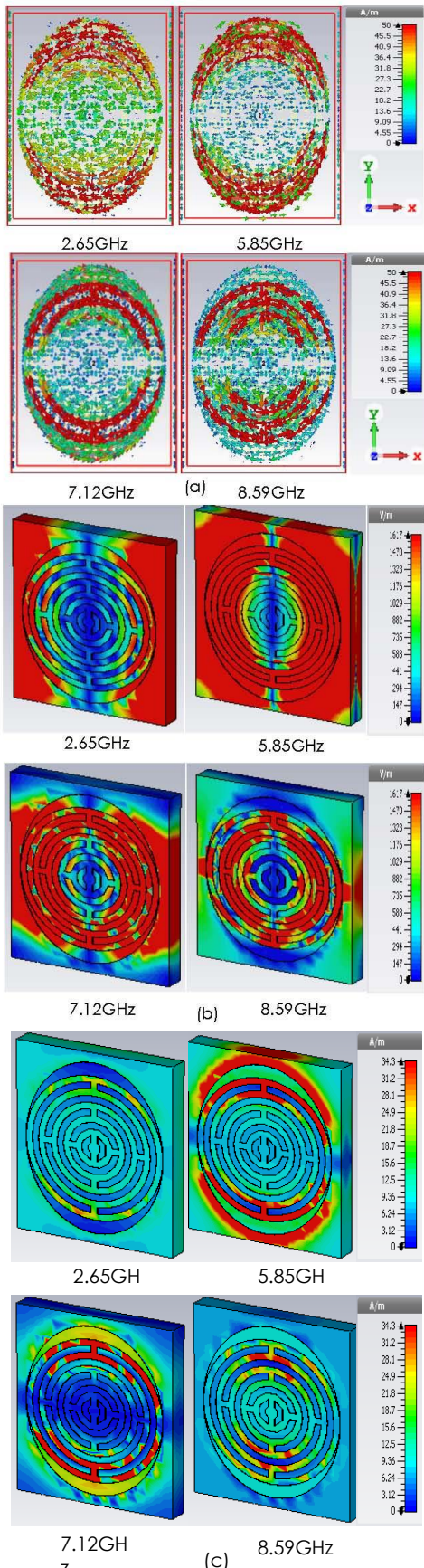


Rajah 1 Geometri struktur yang dicadangkan (a) bahagian hadapan, (b) perspektif dengan kedua-dua pihak, (c) persediaan eksperimen, prototaip reka bentuk (d) sel unit dan (e) susun atur 4×4

Rajah 2a menunjukkan taburan arus permukaan pada 2.65, 5.85, 7.12 dan 8.59GHz. Gelombang homogen dengan polarisasi adalah kejadian dalam sumbu-y dan penyebaran dalam paksi-x ke struktur. Di samping itu, akibat hamburan dimensi, medan elektrik di arah x menggerakkan dwikutub magnet dalam arah y (disebabkan oleh asimetri dalam cincin penyalun dalaman dan luaran), dan medan magnet di arah y menginduksi suatu dwikutub elektrik di dalam x arah [26].

Rajah 2b dan 2c menunjukkan pengagihan medan elektrik dan magnet pada frekuensi resonans. Peta warna menunjukkan kesan keseluruhan kedua-dua medan kepada penyalun.

Adalah jelas dari Rajah 2, arus permukaan di bulatan dalam mengikuti corak yang sama dengan yang luar yang membentuk jalur lurus pada frekuensi resonans.

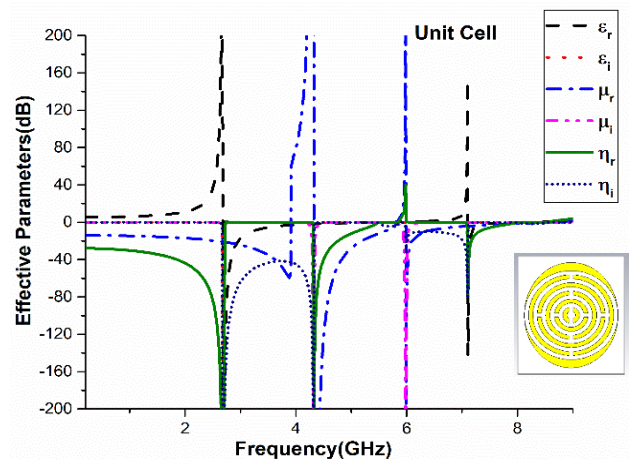


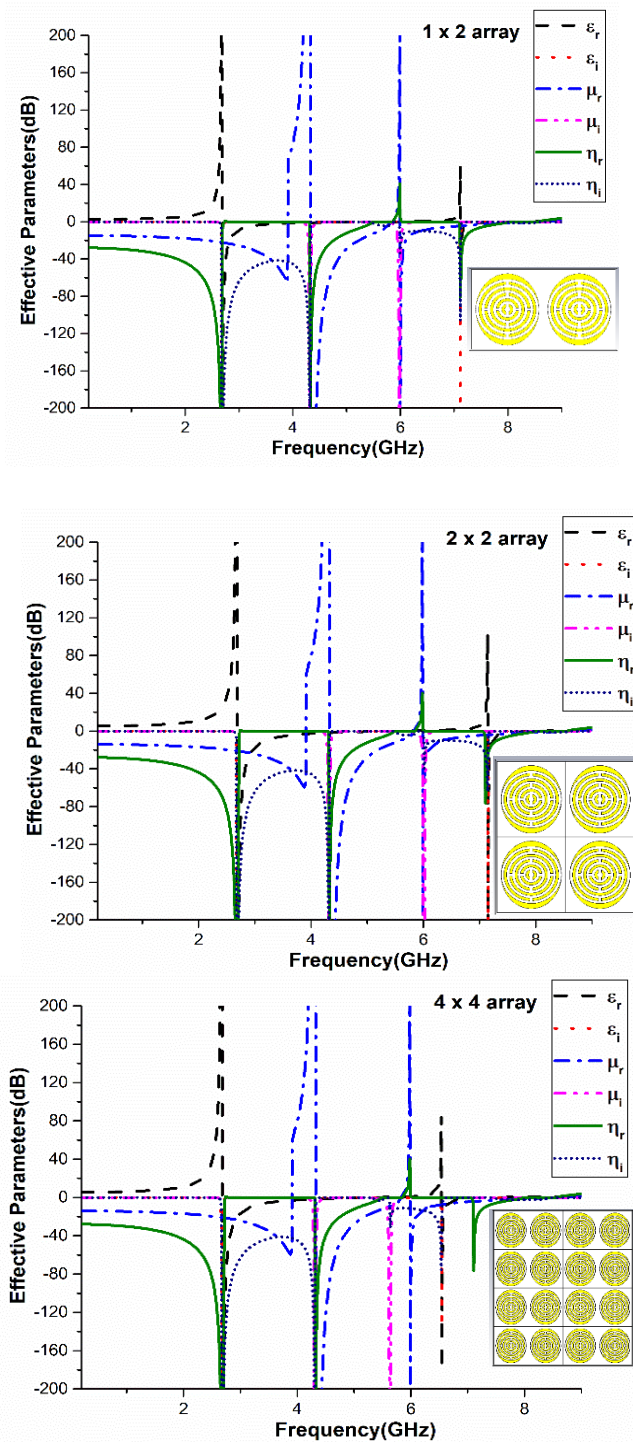
Rajah 2 Segera-merta (a) arus permukaan, (b) medan elektrik dan (c) taburan medan magnet pada frekuensi resonans

Rajah 3 menunjukkan parameter efektif sel unit dan pembentukan pelbagai bentuk. Penapis ini direka pada Rogers RT-5880 (substrat) dengan keluasan $48 \times 56 \text{ mm}^2$. Terdapat banyak cara untuk mengetahui parameter efektif penyalun seperti kaedah Nicolson-Ross-Weir (NRW), kaedah pengambilan semula langsung indeks biasan (DRI) dan sebagainya. Selain itu, kertas ini menumpukan sifat-sifat elektromagnet menggunakan nilai sebenar ϵ , μ , dan η menggunakan S11 dan S21. Dalam semua kes, keputusan menunjukkan nilai negatif dalam band frekuensi yang disebutkan. Daripada Rajah 3, diperhatikan bahawa nilai-nilai negatif bagi sel tunggal dan struktur susunan hampir sama. Perbezaan di antara mereka adalah amplitud atau magnitud.

Sel unit menunjukkan dua ciri negatif pada 2.62 - 2.73GHz, 4.24 - 5.97GHz, 7.10 - 7.97GHz. Semua pembentukan formasi susunan mengikut laluan yang sama sel unit. 1×2 menunjukkan ciri-ciri negatif berganda pada 2.61 - 2.72, 4.32 - 5.91GHz, 7.12 - 7.99GHz. Dalam kes formasi 2×2 and 4×4 , ciri negative berganda masing-masing pada 2.58 - 2.70 GHz, 4.30 - 5.77 GHz, 7.13 - 7.87 GHz dan 2.60 - 2.71 GHz, 4.28 - 5.96 GHz, 7.11 - 7.98 GHz.

Hasil pembentukan susun atur mengikut hasil struktur unit, kerana terdapat sedikit percanggahan dalam pembentukan susunan yang lebih tinggi. Dalam frekuensi yang lebih rendah, arusnya diedarkan hampir seluruh satah. Walau bagaimanapun, dengan peningkatan frekuensi, arus perlu meliputi laluan lengkungan daripada yang lurus dalam frekuensi yang lebih rendah. Fenomena ini adalah disebabkan oleh kesan permukaan. Disebabkan kesan ini, arus mengalir melalui permukaan konduktor dan bukannya bahagian asasnya pada frekuensi yang lebih tinggi [27]. Walau bagaimanapun, penyalun menunjukkan sifat negatif berganda pada frekuensi jalur lurus dengan semua parameter efektif yang lain.





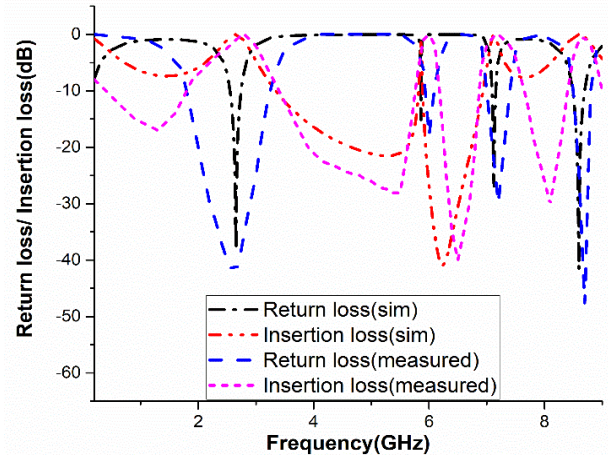
Rajah 3 Analisis parameter yang berkesan untuk sel unit, susunan 2 x 1, susunan 2 x 2 dan susunan 4 x 4

4.0 ANALISIS PARAMETER PENYEBARAN

Parameter penyebaran (S-parameter) adalah perkara yang paling penting dalam analisis penapis berdasarkan penyalun. Dalam seksyen ini, penerangan ringkas mengenai kehilangan kembali (S11) dan kehilangan kemasukan (S21)

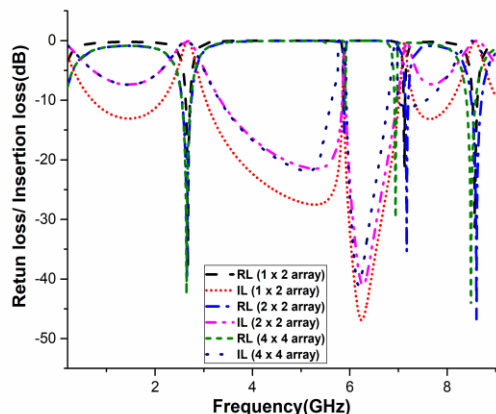
dibentangkan dengan pengujian pengesahan, di mana kedua-dua kehilangan tertentu akan mengesahkan aplikasi struktur meta tertentu ini untuk aplikasi penapis.

Rajah 4 menunjukkan perbezaan sifat kehilangan kembali dan kehilangan kemasukan untuk kedua-dua nilai simulasi dan nilai yang diukur. Perbezaan sedikit dalam pengukuran yang dihasilkan adalah akibat fabrikasi dan juga prosedur pengukuran ruang terbuka. Perbezaan antara kehilangan kemasukan yang diukur dan disimulasikan sebahagian besarnya disebabkan oleh jurang udara kecil antara plat atas dan bawah pandu gelombang dan tepi unit sel. Sel unit sangat kecil jadi ia tidak boleh diletakkan secara bebas di ruang bebas antara tanduk antenna. Walau bagaimanapun, pengukuran ruang bebas (untuk tatasusunan) menunjukkan hasil yang lebih baik daripada port pandu gelombang, walaupun penyalun menunjukkan resonan masing-masing pada 2.65 GHz, 5.85 GHz, 7.12 GHz, dan 8.59 GHz dengan pengecilan masing-masing sebanyak -0.016 dB, -1.36 dB, -0.159 dB dan -0.029 dB untuk kehilangan kemasukan. Dan bagi kehilangan kembali, pelemahan adalah -38.05, -15.43 dB, -27.12dB dan -41.60dB masing-masing.



Rajah 4 kehilangan kembali yang diukur dan simulasi dan kehilangan kemasukan penapis jalur lurus

Rajah 5 menunjukkan kehilangan kembali dan kehilangan kemasukan struktur susunan. 1 x 2 menimbulkan resonan pada 2.67, 5.86, 7.12 dan 8.57 GHz. Susunan 2 x 2 dan 4 x 4 juga mengikut cara dan struktur susunan 1 x 2. Mereka mempunyai resonan masing-masing pada 2.65, 5.88, 7.16, 8.60 GHz dan 2.64, 5.91, 7.01 dan 8.52 GHz.



Rajah 5 Kehilangan kembali dan kehilangan kemasukan bagi struktur susunan

Kehilangan kemasukan sebenarnya adalah pelemahan peranti pasif yang mempunyai isyarat ketika melewatinya. Ia bergantung pada pelbagai faktor seperti kehilangan dielektrik, kehilangan konduktor, kehilangan radiasi dan kehilangan kebocoran. Pendek kata, ia adalah nisbah dB kuasa output kepada kuasa kemasukan. Kehilangan kemasukan (IL): nisbah dB P_{out} kepada P_{in}

$$\text{Kehilangan kemasukan (IL)} = 10 \log (P_{out} / P_{in})$$

Pada titik resonansi pertama, IL adalah -0.016 dB

Oleh itu, $P_{out} = P_{in} - 0.016 \approx P_{in}$;

Tidak terdapat sebarang kehilangan kuasa dari sistem. Penyalun ini melepasi isyarat 99.99% pada kekerapan resonansi pertama. Begitu juga untuk resonansi ke-2, ke-3 dan ke-4, kehilangan kemasukan, -15.43 dB , -27.12 dB dan -41.60 dB . Itu ternyata lebih daripada 99% penyebaran di laluan.

Di samping itu, kehilangan kembali (RL) adalah jumlah isyarat yang dicerminkan kembali ke sumber isyarat disebabkan oleh ketidakpadanan impedansi. Dalam erti kata lain, nisbah dB mencerminkan kuasa kepada kuasa masukan.

Kehilangan kembali (RL): nisbah dB kuasa mencerminkan kepada kuasa input.

$$RL = 10 \log (P_r / P_{in})$$

Pada titik permulaan pertama, RL ialah -38.05 dB

$$P_r = P_{in} - 38.05 \approx (P_{in}/104) \approx 0.001 P_{in};$$

Terdapat kuasa yang dapat diabaikan pada frekuensi ini dan jumlahnya adalah 0.01% daripada kuasa masukan. Begitu juga resonansi ke-2, ke-3 dan ke-4, kerugian yang dicerminkan adalah -15.43 dB , -27.12 dB dan -41.60 dB . Itu ternyata kurang dari 2.2%, 0.0013% dan 0.001% halangan di jalur lurus.

5.0 KESIMPULAN

Rangka kerja penapis tiga jalur lurus dengan penyalun gelung telah dibentangkan. Struktur serupa pada satah asas pada substrat yang agak tebal telah dilaksanakan untuk menjadikan struktur itu lebih mantap beroperasi pada 2.65 GHz, 5.85 GHz, 7.12 GHz dan 8.59 GHz. Untuk mewajarkan prestasi penapis yang dicadangkan analogi diberikan kepada kehilangan kembali, kehilangan kemasukan, kebolehtelapan relatif, dan ketelusan. Pengambilalihan penapis yang dicadangkan dianalisis secara analitik dan integral. Parameter yang berkesan penapis bertindak balas dengan baik pada frekuensi resonansi. Malah prestasi rekabentuk telah diuji dalam frekuensi THz. Oleh itu, struktur ini sah untuk aplikasi itu kerana saiznya yang kompak, julat kerja frekuensi dan keberkesanan kos. Disebabkan oleh seni bina sesuai, ciri-ciri dua-negatif, struktur yang dicadangkan mempunyai potensi untuk digunakan sebagai penapis jalur lurus untuk aplikasi S, C, dan X-band.

PENGHARGAAN

Penyelidikan ini disokong oleh Geran Dana Pembangunan Penyelidikan (DPP), Universiti Kebangsaan Malaysia, Kod: DPP-2018-004.

Rujukan

- [1] Forouzanfar, M. and Joodaki, M. 2018. Systematic Design of Hybrid High Power Microwave Amplifiers Using Large Gate Periphery GaN HEMTs. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 84: 225-233.
- [2] Naderi, M. and Abbasi, H. 2018. Design of Compact Microstrip Branch Line Coupler Using Semi-circular and Rectangular Resonators with Wide Range Suppressed Harmonics. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 84: 171-176.
- [3] Zhuang, Z., Wu, Y. and Liu, Y. 2017. Dual-band Filtering Out-of-phase Balanced-to-single-ended Power Divider with Enhanced Bandwidth. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 82: 341-345.
- [4] Da Xu, K., Zhang, F., Liu, Y. and Nie, W. 2018. High Selectivity Seventh-order Wideband Bandpass Filter Using Coupled Lines and Open/Shorted Stubs. *Electronics Letters*. 54(4): 223-225.
- [5] Wu, Y., Cui, L., Zhang, W., Jiao, L., Zhuang, Z. and Liu, Y. 2017. High Performance Single-ended Wideband and Balanced Bandpass Filters Loaded with Stepped-impedance Stubs. *IEEE Access*. 5: 5972-5981.
- [6] Feng, W., Gao, X., Che, W., Yang, W. and Xue, Q. 2017. High Selectivity Wideband Balanced Filters with Multiple Transmission Zeros. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 64(10): 1182-1186.
- [7] Jiang, T., Wang, Y. and Li, Y. 2017. Design and Analysis of a Triple Stop-band Filter Using Ratioed Periodical Defected Microstrip Structure. *Frequenz*. 71(7-8): 341-347.
- [8] Faruque, M. R. I., Islam, M. T. and Misran, N. 2012. Design Analysis of New Metamaterial for EM Absorption Reduction. *Progress in Electromagnetics Research*. 124: 119-135.

- [9] Islam, M. M., Islam, M. T., Samsuzzaman, M. and Faruque, M. R. I. 2015. Compact Metamaterial Antenna for UWB Applications. *Electronics Letters*. 51(16): 1222-1224.
- [10] Hasan, M. M., Faruque, M. R. I. and Islam, M. T. 2018. Dual Band Metamaterial Antenna for LTE/bluetooth/WiMAX System. *Scientific Reports*. 8(1): 1240.
- [11] Alam, J., Faruque, M. R. I. and Islam, M. T. 2018. Labyrinth Double Split Open Loop Resonator Based Bandpass Filter Design for S, C and X-band Application. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 51(26): 265102.
- [12] Alam, M. J., Faruque, M. R. I. and Islam, M. T. 2018. Open loop Resonator-based Triple Passband Filter for 1.5 GHz, 2.45 GHz and 3.65 GHz Applications. *Journal of Electronic Materials*. 47(10): 6153-6162.
- [13] Alam, M. J., Faruque, M. R. I., Abdullah, S. and Islam, M. T. 2018. Double-split Labyrinth Resonator with Defective Ground System for Wide-band Band-stop Filter Application. *AIP Advances*. 8(8): 085127.
- [14] Islam, S. S., Faruque, M. R. I. and Islam, M. T. 2015. A Two-component NZRI Metamaterial based Rectangular Cloak. *AIP Advances*. 5(10): 107116.
- [15] Wu, Z., Li, W., Yogeesh, M. N., Jung, S., Lee, A. L., McNicholas, K., Briggs, A., Bank, S. R., Belkin, M. A., Akinwande, D. and Zheng, Y. 2016. Tunable Graphene Metasurfaces with Gradient Features by Self-Assembly-Based Moiré Nanosphere Lithography. *Advanced Optical Materials*. 4(12): 2035-2043.
- [16] Wu, Z., Chen, K., Menz, R., Nagao, T. and Zheng, Y. 2015. Tunable Multiband Metasurfaces by Moire Nanosphere Lithography. *Nanoscale*. 7(48): 20391-20396.
- [17] Hossain, M. I., Faruque, M. R. I., Islam, M. T. and Ullah, M. H., 2014. A New Wide-band Double-negative Metamaterial for C-and S-band Applications. *Materials*. 8(1): 57-71.
- [18] Alam, J. M., Faruque, M. R., Hossain, M. J. and Islam, M. T. 2018. Architecture of a Unified Split P-shaped Swarming Metamaterial for Thermal Mutation. *Microwave and Optical Technology Letters*. 60(6): 1388-1395.
- [19] Alam, M. J., Faruque, M. R. I., Azim, R. and Islam, M. T. 2018. Depiction and Analysis of a Modified H-shaped Double-negative Meta Atom for Satellite Communication. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 1-11.
- [20] Hua, C., Chen, C., Miao, C. and Wu, W. 2011. Microstrip Bandpass Filters Using Dual-mode Resonators with Internal Coupled Lines. *Progress in Electromagnetics Research*. 21: 99-111.
- [21] Athukorala, L. and Budimir, D. 2009. Compact Dual-mode Open Loop Microstrip Resonators and Filters. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 19(11): 698-700.
- [22] Lee, J. and Sarabandi, K. 2008. Design of Triple-passband Microwave Filters Using Frequency Transformations. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 56(1): 187-193.
- [23] Macchiarella, G. and Tamiazzo, S. 2005. Design Techniques for Dual-passband Filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 53(11): 3265-3271.
- [24] Lee, J. and Sarabandi, K. 2007. A Synthesis Method for Dual-passband Microwave Filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 55(6): 1163-1170.
- [25] Baena, J. D., Bonache, J., Martin, F., Sillero, R. M., Falcone, F., Lopetegui, T., Laso, M. A., Garcia-Garcia, J., Gil, I., Portillo, M. F. and Sorolla, M. 2005. Equivalent-circuit Models for Split-ring Resonators and Complementary Split-ring Resonators Coupled to Planar Transmission Lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 53(4): 1451-1461.
- [26] Hasar, U. C., Barroso, J. J., Sabah, C., Kaya, Y. and Ertugrul, M. 2013. Stepwise Technique for Accurate and Unique Retrieval of Electromagnetic Properties of Bianisotropic Metamaterials. *JOSA B*. 30(4): 1058-1068.
- [27] Alam, M. J., Faruque, M. R. I. and Islam, M. T. 2017. Split Quadrilateral Multiband Microstrip Patch Antenna Design for Modern Communication System. *Microwave and Optical Technology Letters*. 59(7): 1530-1538.