

Penyerap Bahan Meta Berbilang Lapisan Padat untuk Aplikasi Frekuensi Satelit Jalur Ka

Tayaallen Ramachandran & Mohammad Rashed Iqbal Faruque*

Space Science Centre (ANGKASA), Institute of Climate Change (IPI), Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia.

*Corresponding author: rashed@ukm.edu.my

Received 16 June 2023, Received in revised form 4 April 2024

Accepted 4 May 2024, Available online 30 July 2024

ABSTRACT

This work investigates the effects of multi-layered metamaterial design for absorption application at satellite frequency. This is because, the adopted Ka-band frequency is very useful for current technology which can be used in high-resolution, close-range targeting radars, military aircraft, space telescopes, commercial, and wireless point-point microwave communication systems. Hence, this work focused on producing a compact design by adopting the optimisation method. Four square-shaped and two circular-shaped metamaterial rings were designed on 0.25 mm substrate material. Furthermore, the properties of the proposed metamaterial were discovered by adopting Computer Simulation Technology. This analytical simulation was performed for a frequency range between 27 and 40 GHz. On the other hand, several design analyses were investigated to gain an optimal metamaterial design structure for the proposed applications. For instance, unit cell selection analysis, reflection coefficient and absorbance analysis of the multi-layer metamaterial. Moreover, the proposed unit cell metamaterial manifests double resonance frequencies for reflection and transmission coefficients approximately at 27.31 GHz, 33.40 GHz and 30.56 GHz, 38.23GHz, respectively. The increment of layers on the proposed unit cell structure revealed unique responses. For example, the double multi-layer metamaterial manifests similar dual resonance frequencies as the unit cell design but gains excellent magnitude values of more than -10. Moreover, the absorbance of the three distinct layer metamaterials, likely double, triple and quadruple layers were analysed as well in this work. Overall, the proposed compact metamaterial absorber exhibits unique behaviours for Ka-band satellite frequency applications.

Keywords: Ka-ban; metamaterial absorber; multi-layer; satellite frequency

ABSTRAK

Jurnal ini bertujuan untuk menyiasat kesan reka bentuk bahan meta berbilang lapisan untuk aplikasi penyerapan pada frekuensi satelit. Ini kerana, frekuensi jalur Ka sangat berguna untuk teknologi semasa yang boleh digunakan dalam resolusi tinggi, radar sasaran jarak dekat, pesawat tentera, teleskop angkasa, komersial, dan sistem komunikasi gelombang mikro titik-titik tanpa wayar. Justeru, kerja ini tertumpu kepada penghasilan reka bentuk padat dengan menggunakan kaedah percubaan dan ralat. Empat cincin persegi dan dua cincin bulat telah direka pada bahan substrat 0.25 mm. Tambahan pula, sifat-sifat bahan meta yang dicadangkan telah ditemui dengan menggunakan perisian Computer Simulation Technology. Simulasi analisis ini dilakukan untuk julat frekuensi antara 27 dan 40 GHz. Sebaliknya, beberapa analisis reka bentuk telah dikaji untuk mendapatkan struktur bahan meta yang optimum untuk aplikasi yang dicadangkan, seperti analisis pemilihan sel unit, pekali pantulan dan analisis penyerapan bagi bahan meta berbilang lapisan. Selain itu, bahan meta sel unit yang dicadangkan menunjukkan frekuensi resonans berganda untuk kedua-dua pantulan dan pekali penghantaran pada 27.31, 33.40 GHz dan 30.56, 38.23 GHz, masing-masing. Kenaikan lapisan pada struktur sel unit yang dicadangkan menunjukkan tindak balas yang unik, seperti bahan meta berbilang lapisan berganda menunjukkan frekuensi resonans dwi yang serupa sebagai reka bentuk sel unit tetapi memperoleh nilai magnitud yang sangat baik

melebihi -10. Selain itu, penyerapan tiga lapisan tersendiri bahan meta, kemungkinan dua lapisan, tiga kali ganda dan empat kali ganda telah dianalisis juga dalam jurnal ini. Secara keseluruhannya, penyerap bahan meta padat yang dicadangkan mempamerkan gelagat sifat unik untuk aplikasi frekuensi satelit jalur Ka.

Kata kunci: Jalur Ka; penyerap bahan meta; berbilang lapisan; frekuensi satelit

PENDAHULUAN

Dalam tahun-tahun kebelakangan ini, kerja penyelidikan bahan meta dalam pelbagai aplikasi telah dijalankan kerana tingkah laku luar biasa yang tidak terdapat secara semula jadi. Aplikasi berpotensi bahan meta adalah pelbagai dan termasuk pengurangan penyerapan elektromagnet, pengesan, aplikasi dalam frekuensi terahertz, penapis bahan meta, dan lain-lain, telah berjaya menyesuaikan struktur reka bentuk bahan meta untuk mendapatkan hasil yang unik (Nasiri, Ahmed & ZBITOU 2022; Pang et al. 2021; Ramachandran et al. 2019, 2021, 2022, 2023; Ramachandran, Faruque & Islam 2022; Wang et al. 2020). Secara amnya, struktur reka bentuk bahan meta mempunyai cara yang unik untuk berinteraksi dengan cahaya jika dibandingkan dengan bahan konvensional. Sementara itu, bahan meta juga telah digunakan dalam aplikasi jalur Ka dalam beberapa tahun kebelakangan ini. Sebagai contoh, penyelidik di seluruh dunia menggunakan bahan meta untuk pelbagai aplikasi dalam jalur Ka, seperti, resonator Bragg, pengalih fasa, *reflectarray* bersandarkan permukaan terpilih, antena berbilang keluaran dan ramalan pengecilan hujan (Al-Gburi 2024; Gülseren, Alparslan & Tokan 2024; Iltchenko et al. 2024; P.O et al. 2024).

Reka bentuk dan analisis prestasi bagi antena berasaskan bahan meta Negatif Tunggal digunakan untuk aplikasi *LTE 4G/WLAN* dan jalur Ka (seperti dalam komunikasi satelit untuk bahagian penerima) telah dibuat oleh (Asif et al. 2021) pada tahun 2021. Sementara itu, (Kar et al. 2011) telah melakukan reka bentuk bahan meta plasmonik dengan wayar terpotong dan resonator Labyrinth yang masing-masing mempamerkan kebolehtelapan negatif yang berkesan dan keberkesanan kebolehtelapan negatif ini di bawah frekuensi plasma pada jalur Ka. Sebaliknya, (Bai et al. 2020) mencadangkan tiub gelombang perjalanan pandu jalur Ka dengan penyerap bahan meta rintangan bergumpal. Selain itu, beberapa kertas persidangan juga telah diterbitkan dengan menggunakan bahan meta untuk pelbagai aplikasi. Sebagai contoh, Musa et al. cadangan penyerap bahan meta dwi jalur untuk aplikasi satelit jalur Ka (Musa et al. 2021). Sementara itu, (Ma et al. 2018) memperkenalkan tatasusunan penghantaran dengan reka bentuk bahan meta untuk pembentukan pancaran dalam jalur Ka. Selain itu, terdapat beberapa kajian berkaitan juga telah dijalankan untuk aplikasi jalur Ka seperti (Akarsu et al. 2022; Behtouei et al. 2022;

Gataullin 2008; Hajnsek et al. 2022; Li et al. 2021; Mancini et al. 2023; Prokscha et al. 2023; Shavit, Joffe & Falek 2013)

Banyak kerja penyelidikan gelombang mikro juga telah menyiasat penggabungan struktur bahan meta untuk menghasilkan prestasi yang lebih baik. Reka bentuk bahan bukan konvensional yang telah diilhamkan dari negatif berganda jalur lebar untuk aplikasi jalur C dan S telah dicadangkan oleh (Hossain et al. 2015). Sementara itu, (Faruque et al. 2019) telah membangunkan reka bentuk bahan bukan konvensional yang dibina menggunakan bahan substrat fleksibel yang dikenali sebagai alumina nikel yang memberikan lebih daripada satu frekuensi resonans. Dalam kajian lain, perubahan dalam hasil reka bentuk bahan meta dianalisis menggunakan dua bahan asas yang berbeza, iaitu *Rogers RT6010* dan *FR-4* (Islam, Faruque & Islam 2014). Reka bentuk bahan meta sel unit yang dicadangkan dalam kajian mempamerkan sama ada tingkah laku permissiviti negatif atau negatif berganda. Pada tahun 2020, (Sunbeam Islam, Khan & Faruque 2019) telah merekabentuk dan menyiasat sifat negatif berganda dengan mengubah struktur berbentuk H berpecah. Kajian itu menggunakan bahan substrat *Rogers RO3010* dan perambatan gelombang pada paksi-z untuk mencadangkan bahan meta yang memfokuskan pada aplikasi jalur-C.

Sebaliknya, keutamaan untuk menggunakan penyerapan bahan meta juga telah meningkat sejak kebelakangan ini. Penyerap bahan meta merujuk kepada struktur bahan meta digunakan untuk menyerap sinaran elektromagnet dengan berkesan. Kajian (Cuong et al. 2020) telah merekabentuk dan menyiasat penyerap bahan meta pengekodan gelombang jalur lebar di mana mereka memfokuskan pada struktur sel unit asas dan empat jenis blok bahan meta pengekodan untuk aplikasi penyerapan. Sementara itu, (Mehta et al. 2017) telah mencadangkan penyerap bahan meta tiga jalur novel dengan ciri jalur lebar. Dalam kajian ini, penyerap bahan meta jalur lebar telah direka bentuk, dianalisis dan disimulasikan menggunakan perisian komputer *Ansoft HFSS*. Penyelidikan ini berjaya mencadangkan dua reka bentuk bahan meta berbentuk C menggunakan bahan substrat *FR-4* dalam kedudukan bertentangan menyerong. (Zhang et al. 2019) telah membangunkan penyerap berbilang lapisan untuk aplikasi jalur-S dengan frekuensi terpilih antara 2 GHz hingga 4 GHz untuk penyerapan jalur lebar. Penyerap terdiri daripada salutan magnet dan reka bentuk bahan bukan

konvensional yang dibina dalam lapisan. Struktur bahan meta mudah sahaja digunakan secara meluas dalam bidang aplikasi satelit. (Subhash, Ali & Biradar 2018) mencadangkan reka bentuk antenna bahan meta planar bersaiz kecil untuk kajian satelit. Penulis memperkenalkan struktur bahan meta dengan antenna $17 \times 17 \text{ mm}^2$ padat yang terdiri daripada resonator cincin berpecah berbentuk dekagon biasa sebagai garis suapan dan bahagian memancar. Kajian ini menunjukkan corak sinaran yang stabil dan padanan impedans yang baik, menunjukkan bahawa bahan meta yang dicadangkan adalah paling sesuai untuk penyelidikan satelit. Sementara itu, (Islam et al. 2017) telah menyiasat kajian penyelidikan dwikomponen untuk aplikasi dwijalur pada jalur C dan X yang mempunyai ciri indeks negatif. Dalam kajian ini, penulis dapat menghasilkan reka bentuk bahan meta berdasarkan bahan gubahan resin epoksi dan gentian kaca tenunan. Walaupun kerja penyelidikan terdahulu memperoleh ciri unik dalam frekuensi satelit dengan mengguna pakai reka bentuk bahan meta, kerja ini memfokuskan untuk membina bahan meta padat dan berbilang lapisan untuk frekuensi satelit jalur Ka.

METODOLOGI

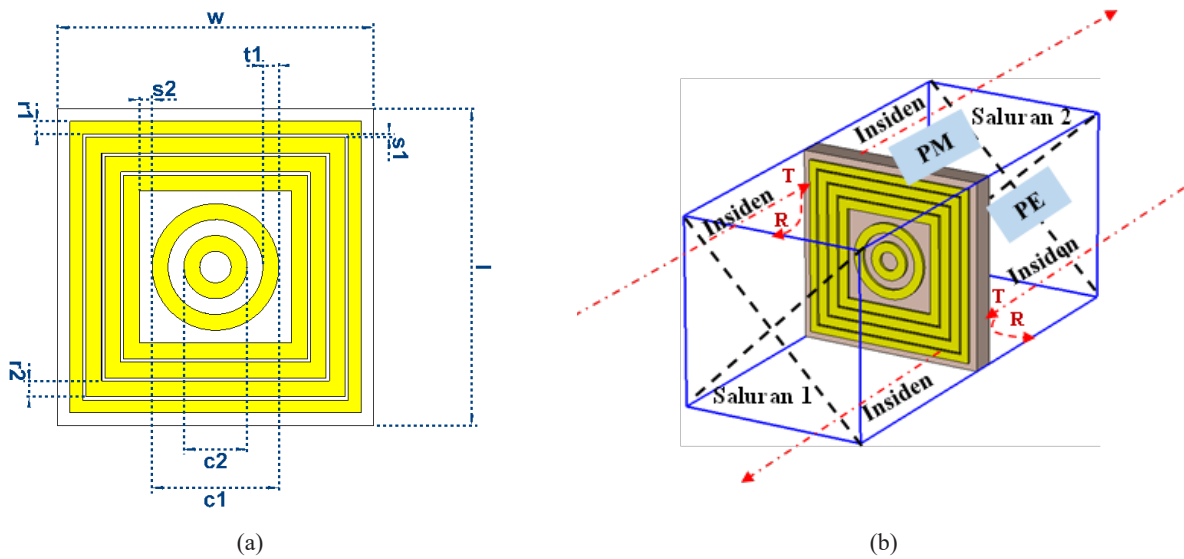
BAHAN META SEL UNIT

Gabungan dua jenis bentuk seperti, segi empat sama dan bulat telah diguna pakai untuk membina reka bentuk yang dicadangkan. Reka bentuk bahan meta terdiri daripada bahan kuprum dengan ketebalan 0.035 mm pada bahan substrat *Rogers RO3006* bersaiz $2 \times 2 \text{ mm}^2$. Bahan substrat mempunyai pemalar dielektrik (ϵ) dan kehilangan tangen (δ) masing-masing 6.5 dan 0.002. Cincin persegi pertama direka dengan ketebalan 0.08 mm dan mempunyai jurang 0.02 sebelum cincin kedua. Sementara itu, cincin kedua hingga keempat mempunyai ketebalan yang sama, contohnya, masing-masing 0.10 mm. Selain itu, selepas jurang 0.08 mm, cincin bulat itu dibina dengan jejari dalam dan luar 0.8 dan 0.6 mm. Sementara itu, cincin bulat kedua dibina dengan ketebalan yang sama dengan cincin sebelumnya selepas jurang 0.1 mm. Oleh itu, paparan atas dan dimensi keseluruhan bahan meta yang dicadangkan ditunjukkan dalam Jadual 1 dan Rajah 1 (a).

KAEDAH SIMULASI BERANGKA

Simulasi berangka telah dilakukan dengan bantuan perisian biasa yang dikenali sebagai *Computer Simulation Technology* ("Computer Simulation Technology (CST) Studio Suite 2019.00" 2018). Biasanya, CST digunakan dalam penyelesaian masalah elektromagnet yang mempunyai respons yang tepat dan pantas. Selain itu, perisian CST menyediakan kelebihan produk ke pasaran yang ketara seperti kitaran pembangunan yang lebih pendek atau prototaip maya sebelum ujian fizikal. Kaedah ini cuba menyelesaikan masalah mengikut proses tiga peringkat, iaitu analisis sel unit, penyiasatan bahan meta berbilang lapisan, dan analisis taburan medan elektrik struktur lapisan. Semua peringkat telah dilakukan secara berangka dengan menggunakan penyelesaian domain frekuensi dan jaringan tetrahedral dalam perisian CST. Penyelesai domain frekuensi dikenali sebagai penyelesaian gelombang penuh 3D serba guna yang berkuasa yang menawarkan prestasi simulasi yang cemerlang. Penyelesai ini boleh mengira semua saluran pada masa yang sama dan, oleh itu, sesuai untuk melakukan simulasi sistem berbilang saluran, contohnya, struktur tatasusunan. Reka bentuk sel unit dan berbilang lapisan diletakkan di antara dua saluran pandu gelombang seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 (b).

Sementara itu, saluran diletakkan pada paksi z positif dan negatif dengan menggunakan gelombang elektromagnet melintang. Mod gelombang ini tidak mempunyai medan elektrik mahupun magnet pada arah perambatan. Seterusnya, keadaan sempadan konduktor elektrik yang sempurna telah ditetapkan untuk paksi-x, manakala paksi-y ditetapkan sebagai konduktor magnet yang sempurna. Oleh kerana kajian ini bertujuan untuk mendapatkan frekuensi satelit yang lebih tinggi, julat frekuensi ditetapkan dari 27 hingga 40 GHz. Objektif utama simulasi ini adalah untuk mengira parameter serakkan seperti pekali pantulan (S_{11}) dan penghantaran (S_{21}) bagi sel unit yang dicadangkan dan bahan meta berbilang lapisan. Kemudian, nilai sebenar dan khayalan terkumpul pada S_{11} telah diterima pakai untuk mengira pemantulan dan penyerapan struktur berbilang lapisan. Akhir sekali, pengagihan medan elektrik bahan meta berbilang lapisan juga diperiksa dalam kerja ini.



RAJAH 1. Cadangan bahan meta padat: (a) Pandangan atas, (b) Persediaan simulasi

JADUAL 1. Spesifikasi reka bentuk bahan meta sel unit yang dicadangkan

Penerangan	Dimensi (mm)
Lebar, w	2
Panjang, l	2
Cincin Persegi Pertama, $r1$	0.08
Cincin Persegi Kedua, $r2$	0.10
Celah Jurang Antara Cincin Persegi, $s1$	0.02
Celah Jurang Antara Cincin Segi Empat dan Bulat, $s2$	0.08
Diameter Cincin Bulat Pertama, $c1$	0.8
Diameter Cincin Bulat Kedua, $c2$	0.4
Ketebalan Cincin Bulat, $t1$	0.1

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

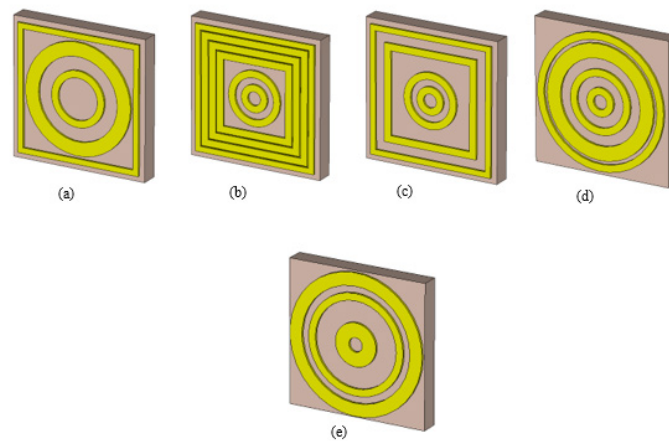
Bahagian ini terdiri daripada beberapa analisis parametrik seperti proses pemilihan sel unit, analisis pekali pantulan bahan meta berbilang lapisan dan juga taburan medan elektrik bagi struktur lapisan. Tiga lapisan berbeza seperti lapisan dua kali ganda, tiga kali ganda dan empat kali ganda telah diterima pakai untuk analisis ini.

PROSES PEMILIHAN SEL UNIT

Dalam kerja ini, lima reka bentuk bahan meta yang berbeza dengan menggunakan bentuk segi empat sama dan bulat telah dicadangkan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2 (a) hingga 2 (e). Tiga struktur bahan meta pertama seperti Reka Bentuk 1, 2 dan 3 terdiri daripada kedua-dua cincin berbentuk segi empat sama dan bulat. Walau bagaimanapun,

semua reka bentuk ini menggunakan saiz dan jenis bahan substrat yang serupa. Sementara itu, Reka Bentuk 4 dan 5 hanya dibina dengan menggunakan cincin berbentuk bulat. Kebanyakan reka bentuk mempamerkan frekuensi resonans tunggal untuk kedua-dua $S11$ dan $S21$ kecuali Reka Bentuk 2 seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3 (a) dan 3 (b).

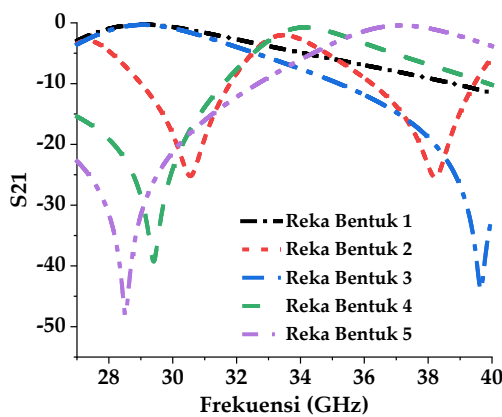
Walaupun bagaimanapun, reka bentuk sel unit pada Reka Bentuk 2 hanya mampu mempamerkan magnitud $S11$ yang lebih rendah berkemungkinan -9.66 dan -11.15 pada 27.31 GHz dan 33.40 GHz, masing-masing. Sebaliknya, Reka Bentuk 1 dan 3 mempamerkan tindak balas yang hampir serupa untuk kedua-dua nilai pekali. Reka bentuk ini mendapat respons $S11$ tunggal pada 29.01 GHz dan 29.05 GHz dengan nilai magnitud yang boleh diterima masing-masing -20.36 dan -19.81 . Walau bagaimanapun, Reka Bentuk 4 dan 5 mempamerkan tindak balas pada jalur yang lebih tinggi pada 34.09 GHz dan 37.14 GHz masing-masing.



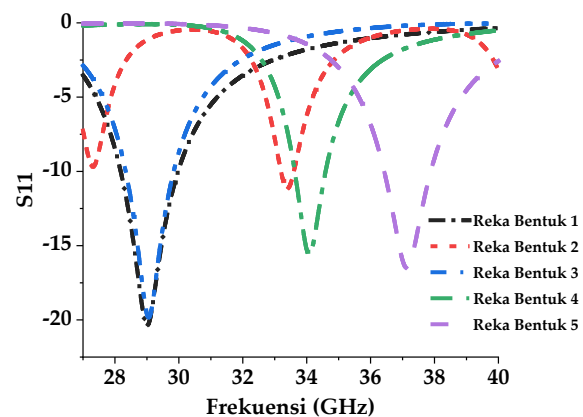
RAJAH 2. Lima bahan meta segi empat sama dan berbentuk bulat yang berbeza: (a) Reka Bentuk 1, (b) Reka Bentuk 2, (c) Reka Bentuk 3, (d) Reka Bentuk 4, (e) Reka Bentuk 5

Sebaliknya, reka bentuk ini menunjukkan tindak balas S_{21} yang sangat baik dengan nilai magnitud yang boleh diterima melebihi -15 seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3 (b). Reka Bentuk 2 memperoleh dua frekuensi resonans pada 30.56 GHz dan 38.23 GHz dengan nilai magnitud -25.14 dan -25.44. Sementara itu, Reka Bentuk 3, 4 dan 5 mempamerkan respons tunggal pada 39.65 GHz, 29.41 GHz dan 28.52 GHz, masing-masing. Walau

bagaimanapun, Reka Bentuk 1 tidak menunjukkan sebarang respons S_{21} pada julat frekuensi yang dikehendaki. Pada akhir analisis ini, Reka Bentuk 2 telah dipilih untuk mengkaji lagi prestasi dalam kajian parametrik yang akan datang. Ini kerana, reka bentuk 2 mempunyai tindak balas berbilang jalur jika dibandingkan dengan reka bentuk yang lain dengan mempunyai nilai magnitud yang boleh diterima.



(a)



(b)

RAJAH 3. Parameter taburan bahan meta yang dicadangkan: (a) S_{11} , (b) S_{21}

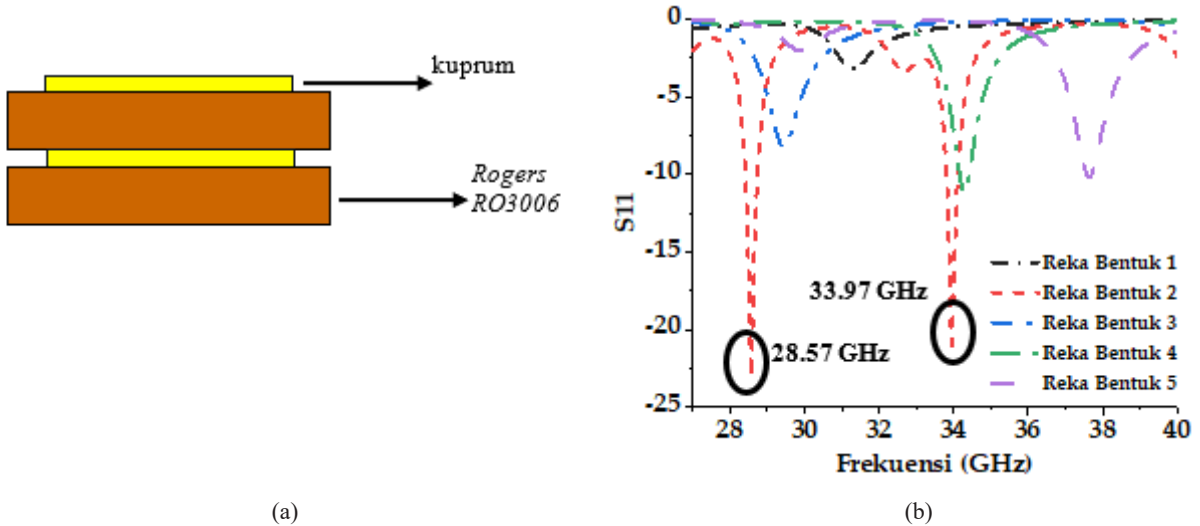
BAHAN META BERBILANG LAPISAN

Oleh kerana bahan meta sel unit mempamerkan nilai magnitud yang lebih rendah untuk pekali pantulan, tindak balas tidak sesuai untuk aplikasi praktikal. Oleh itu struktur reka bentuk yang dipertingkatkan diperlukan, untuk mendapatkan prestasi yang diinginkan. Salah satu penyelesaian biasa untuk masalah ini ialah meningkatkan saiz struktur

reka bentuk. Walau bagaimanapun, pengarang berhasrat untuk mereka bentuk bahan meta bersaiz padat, oleh itu kaedah struktur berbilang lapisan telah diterima pakai dalam kerja ini. Rajah 4 (a) menggambarkan struktur bahan meta dua lapisan dari pandangan sisi. Sebaliknya, pihak lima reka bentuk bahan meta yang berbeza daripada Rajah 2 telah diterima pakai untuk menganalisis nilai S_{11} apabila ditambah satu lapisan diletakkan di belakang sel unit.

Prestasi S11 bagi bahan meta dua lapis yang dicadangkan menunjukkan perubahan luar biasa dari segi nilai magnitud jika dibandingkan dengan reka bentuk sel unit. Rajah 4 (b) menunjukkan bahawa hanya Reka Bentuk 2 menunjukkan

hasil yang optimum berbanding dengan struktur reka bentuk yang lain. Sementara itu, percanggahan yang jelas ditunjukkan dalam rajah di mana reka bentuk lain mendapat tindak balas magnitud yang beralih dan lebih rendah.

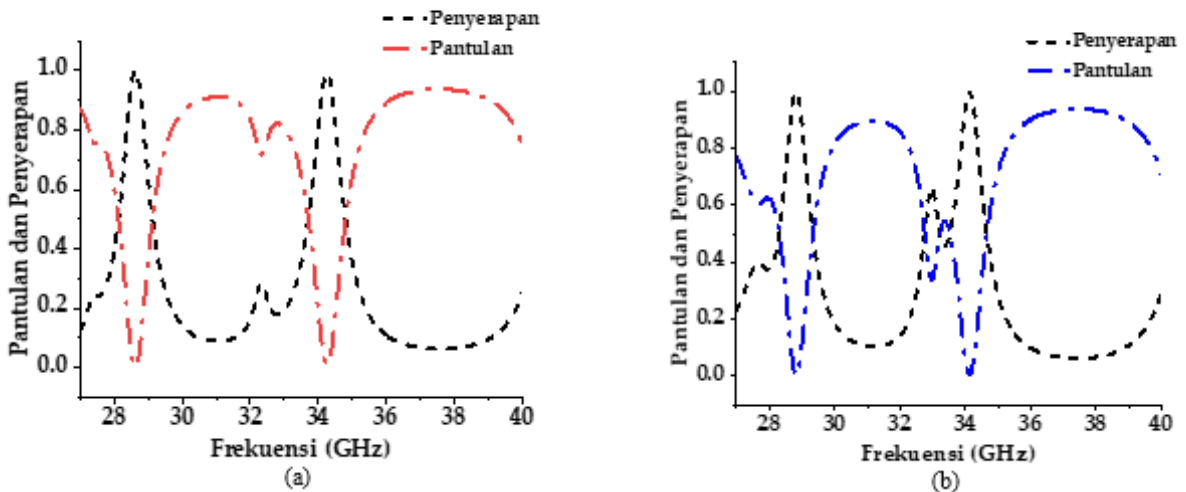


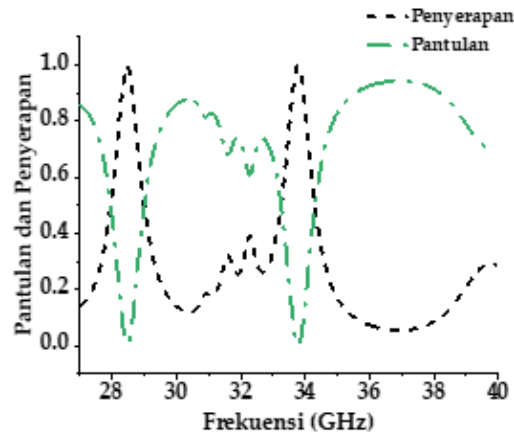
RAJAH 4. (a) Pandangan sisi struktur berbilang lapisan berganda, (b) S11 bahan meta berbilang lapisan berganda yang dicadangkan dengan mengguna semua reka bentuk

PENYERAPAN

Dalam analisis ini, Reka Bentuk 2 telah dipilih untuk menganalisis sifat serapan. Analisis kenaikan lapisan sebelumnya hanya menunjukkan nilai magnitud yang sangat baik dan mempunyai sedikit percanggahan dalam frekuensi resonans untuk tiga lapisan yang berbeza. Oleh

itu, kira-kira kurang daripada 2% perbezaan berlaku antara mereka dan nilai penyerapan dan pemantulan seperti ditunjukkan dalam Rajah 5 (a) hingga 5 (c). Secara keseluruhannya, struktur berbilang lapisan menunjukkan hasil yang lebih baik dan dioptimumkan berbanding reka bentuk sel unit konvensional.





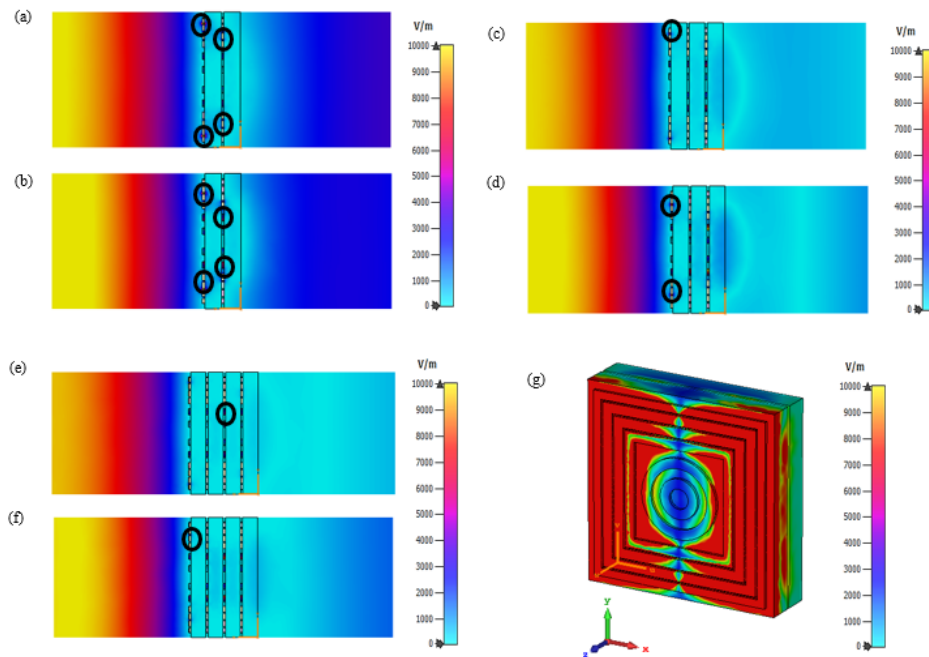
RAJAH 5. Pantulan dan penyerapan bahan meta berbilang lapisan: (a) Lapisan berganda, (b) Lapisan tiga kali ganda, (c) Lapisan empat kali ganda

PENGAGIHAN MEDAN ELEKTRIK

Taburan medan elektrik bagi tiga bahan tersendiri bahan meta berbilang lapisan yang berbeza dengan menggunakan Reka Bentuk 2 pada setiap frekuensi resonans telah diterokai dalam bahagian ini seperti yang digambarkan dalam Rajah 6 (a) hingga 6 (f). Angka tersebut menunjukkan perambatan gelombang melalui reka bentuk dalam bentuk mutlak kontur dengan menggunakan satah pemotongan yz di tengah-tengah struktur reka bentuk. Pemerhatian menunjukkan bahawa reka bentuk berbilang lapisan menghasilkan pengedaran medan yang sengit pada jurang

antara cincin. Sementara itu, keamatan taburan elektrik disetempat

pada kedua-dua belah reka bentuk seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6 (g). Fenomena serupa berlaku untuk semua lapisan berbilang dan keamatan beransur-ansur berkurangan apabila bilangan lapisan bertambah. Secara ringkasnya, bahan meta dua lapisan yang dicadangkan mempunyai resonans elektromagnet yang kuat di bawah tindakan gelombang kejadian. Oleh sebab itu, resonans elektromagnet yang dihasilkan menghasilkan penyerapan gelombang kejadian yang kuat.



RAJAH 6. Pengagihan medan elektrik bagi bahan meta berbilang lapisan yang dicadangkan: Lapisan berganda; (a) 28.57 GHz, (b) 33.96 GHz, Tiga lapisan; (c) 27.31 GHz, (d) 33.40 GHz; Lapisan empat kali ganda; (e) 28.83 GHz, (f) 34.12 GHz; (g) Pengagihan medan lapisan dua pada 28.57 GHz

KESIMPULAN

Kerja ini diringkaskan dengan menghujahkan reka bentuk bahan meta padat memenuhi objektif kerja ini dengan menggunakan kaedah berbilang lapisan yang mudah dan bukannya meningkatkan dimensi struktur yang dicadangkan. Konsep pengecilan digunakan secara meluas dalam banyak aplikasi kerana permintaan yang tinggi. Oleh itu, kerja kompak dan novel yang dicadangkan ini berkesan untuk aplikasi frekuensi satelit. Tambahan pula, reka bentuk bahan meta sel unit memperoleh S11 dan S21 masing-masing pada 27.31 GHz, 33.40 GHz dan 30.56 GHz, 38.23GHz. Walau bagaimanapun, S11 mempamerkan tindak balas dengan nilai magnitud yang lebih rendah tetapi ia meningkat apabila bilangan lapisan ditambahkan pada reka bentuk sel unit. Secara ringkasnya, reka bentuk bahan meta yang dicadangkan menghasilkan prestasi yang lebih baik dengan menggunakan bahan substrat yang lebih nipis jika dibandingkan dengan bahan substrat yang digunakan secara komersil seperti FR-4 dan Rogers RT6010 dan memenuhi kerja-kerja penyelidikan.

PENGHARGAAN

Kajian ini telah mendapat sumbangan dari Kementerian Pendidikan Malaysia di bawah geran (FRGS/1/2022/TK07/UKM/02/22)

PENGISYTIRAN MINAT BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Akarsu, G., Nakmouche, M.F., Fawzy, D. & Allam, A. 2022. A Novel Ultra-wideband metamaterial-based perfect absorber for 5G millimeter-wave applications. *2022 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE 2022*, hlm. 129–132.
- Al-Gburi, A. 2024. 5G MIMO antenna: Compact design at 28/38 GHz with metamaterial and SAR analysis for mobile phones. *Przeglad Elektrotechniczny* 2024(4): 171–174.
- Asif, E.D.M., Sehrai, D., Kiani, S., Khan, J., Abdullah, M., Ibrar, M., Alibakhshikenari, M., Falcone, F. & Limiti, E. 2021. Design of a dual band SNG metamaterial based antenna for LTE 46/WLAN and Ka-Band applications. *IEEE Access* 9: 71553–71562.
- Bai, N., Xiang, W., Shen, J., Shen, C. & Sun, X. 2020. A Ka-band folded waveguide traveling wave tube with lumped resistance metamaterial absorber. *IEEE Transactions on Electron Devices* 67(3): 1248–1253.
- Behtouei, M., Bruno, S., Carillo, M., Bosco, F., Mostacci, A., Palumbo, L., Migliorati, M., Faillace, L., Leggieri, A., Di Paolo, F., Marrese, F., Valletti, L., Fantauzzi, S. & Torrisi, G. 2022. Studies of a ka-band high power klystron amplifier at INFN-LNF. *Journal of Physics: Conference Series (2023)*, hlm. .
- Computer Simulation Technology (CST) Studio Suite 2019.00. 2018. <https://www.cst.com>.
- Cuong, M., Pham, V., Ho, T., Nguyen, T., Do, H., Bui, X.K., Tung, B., Tuyen, D., Phạm, L. & Vu, D. 2020. Broadband microwave coding metamaterial absorbers. *Scientific Reports* 10(1): 1–11.
- Faruque, M.R.I., Ahamed, E., Rahman, M.A. & Islam, M.T. 2019. Flexible nickel aluminate (NiAl₂O₄) based dual-band double negative metamaterial for microwave applications. *Results in Physics* 14: 1–12.
- Gataullin, Y. 2008. Ka-band link analysis and Design of a Ka-band antenna for the DLR weilheim ground station complex. *Master Thesis, TU München*, hlm. .
- Gülseren, A., Alparslan, A. & Tokan, N. 2024. Dual-band frequency selective surface-backed reflectarray for high-speed Ka-band satellites. *Applied Sciences* 14(7): 2928.
- Hajnssek, I., Aðalgeirsdóttir, G., Bartsch, A., Cassola, M., Fischer, G., Jesswein, K., Grosse, G., Haas, C., Huber, S., Kääh, A., Junsu, K., Krieger, G., Mössinger, A., Montpetit, B., Münzenmayer, R., Otto, T., Papathanassiou, K., Almeida, F., Rott, H. & Zonno, M. 2022. The Ka-band interferometric radar mission proposal for cold environments - SKADI. *Proceedings of Advanced RF Sensors and Remote Sensing Instruments (ARSI)*, hlm. .
- Hossain, M., Faruque, M.R., Islam, M. & Ullah, M.H. 2015. A New Wide-band double-negative metamaterial for C- and S band applications. *Materials* 8(1): 57–71.
- Iltchenko, V., Wang, R., Toennies, M. & Matsko, A. 2024. Compact high-Q Ka-band sapphire distributed Bragg resonator. *Journal of Applied Physics* 135(14).
- Islam, S., Faruque, M.R. & Islam, M.T. 2014. Design of a new ENG metamaterial for s-band microwave applications. *Journal of Electrical and Electronics Engineering* 7(2): 13–16.
- Islam, S., Hasan, M.M., Faruque, M.R. & Islam, M. 2017. Two components NRI metamaterial for dual band applications. *Microwave and Optical Technology Letters* 59(5): 1092–1096.
- Kar, S., Roy, T., Pal, S. & Gangooly, P. 2011. Plasmonic metamaterial: With cut-wire and Labyrinth resonators at Ka-band. *2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC-2011*, hlm. 205–206.

- Li, X., Wang, J., Wan, Y., Liu, G., He, M. & Luo, Y. 2021. A design of high-power and wide-band metamaterial output window at Ka-band. *2021 22nd International Vacuum Electronics Conference, IVEC 2021*, hlm. 1–2.
- Ma, S., Li, J., Zhang, K. & Zhai, H. 2018. A Transmitarray with metamaterial for beamforming in Ka-band. *2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT 2018 - Proceedings*, hlm. 1–3.
- Mancini, A., Chahat, N., Tanelli, S. & Focardi, P. 2023. A multi-beam Ka-band deployable mesh reflector antenna for the INCUS mission. *Conference: 17th European Conference on Antennas and Propagation, Florence, Italy*, hlm. .
- Mehta, P., Alad, R., Mittal, S. & Laiwala, F. 2017. A novel wideband metamaterial absorber for S , C & X bandwith good absorbtion. *Proceedings of the 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, WiSPNET 2017*, hlm. 557–562.
- Musa, A., Hakim, M., Alam, T., Baharuddin, M.H. & Singh, M. 2021. Dual-band metamaterial absorber for Ka-band satellite application. *International Conference on Space Science and Communication, IconSpace*, hlm. 151–155.
- Nasiri, B., Ahmed, E. & ZBITOU, J. 2022. Microstrip band-stop filter based on double negative metamaterial. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 12(2): 1579–1584.
- P.O, O., Dominic, O., Chiemeka, I.U., Okoro, E., Iyida, E., Ugonabo, O. & Ugwu, C. 2024. Rain attenuation prediction at different time percentages for Ku, K, and Ka bands satellite communication systems over Nigeria. *Journal of Astronomy and Space Science* 41(1): 25–33.
- Pang, H.-Z., Wang, X., Wang, J.-L., Wang, Z.-L., Liu, S.-Y. & Tian, H.-Q. 2021. Sensing characteristics of dual band terahertz metamaterial absorber sensor. *Wuli Xuebao/Acta Physica Sinica* 70(16).
- Prokscha, A., Sheikh, F., Jalali, M., Zantah, Y., Sievert, B., Al-Hasan, M., Erni, D. & Kaiser, T. 2023. A look through artificial human tissues at Ka-band and D-band. *2023 6th International Workshop on Mobile Terahertz Systems, IWMTS 2023*, hlm. 1–5.
- Ramachandran, T., Faruque, M., Siddiky, A.M. & Islam, M. 2021. Reduction of 5G cellular network radiation in wireless mobile phone using an asymmetric square shaped passive metamaterial design. *Scientific Reports* 11(1).
- Ramachandran, T., Faruque, M.R. & Islam, M. 2022. Specific absorption rate reduction for sub-6 frequency range using polarization dependent metamaterial with high effective medium ratio. *Scientific Reports* 12(1).
- Ramachandran, T., Faruque, M.R., Islam, M., Khandaker, M., Alqahtani, A. & Bradley, D. 2022. Development and analysis of coding and tailored metamaterial for terahertz frequency applications. *Materials* 15(8).
- Ramachandran, T., Faruque, M.R., Singh, M., Khandaker, M., Salman, M. & Youssef, A. 2023. Reduction of radar cross section by adopting symmetrical coding metamaterial design for terahertz frequency applications. *Materials* 16(3): 1030.
- Ramachandran, T., Faruque, M.R.I., Ahamed, E. & Abdullah, S. 2019. Specific absorption rate reduction of multi split square ring metamaterial for L- and S-band application. *Results in Physics* 15.
- Shavit, R., Joffe, R. & Falek, E. 2013. Planar Ka band antenna for satellite communication based on metamaterial technology. *2013 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, COMCAS 2013*, hlm. 1–3.
- Subhash, B., Ali, T. & Biradar, R. 2018. A compact planar metamaterial inspired antenna for satellite applications. *2018 Second International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAECC)*, hlm. 1–4.
- Sunbeam Islam, S., Khan, M. & Faruque, M.R. 2019. Design and analysis of modified-split-H-shaped DNG metamaterial for microwave application. *Materials Research Express* 6(12).
- Wang, W., Yan, F., Tan, S., Li, H., Mei, D., Zhang, L., Bai, Z., Cheng, D., Hong, Z. & Hou, Y. 2020. Enhancing sensing capacity of terahertz metamaterial absorbers with a surface-relief design. *Photonics Research* 8(4): 519.
- Zhang, Z., Zhang, L., Chen, X., Wu, Z., He, Y., Lv, Y. & Zou, Y. 2019. Broadband metamaterial absorber for low-frequency microwave absorption in the S-band and C-band. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 497: 1–21.