

Inspirasi Antena Metabahan yang Boleh Dikonfigurasi untuk Komunikasi 5G (Metamaterial Antenna Inspiration That Can Be Configured for 5G Communication)

MOHAMMAD RASHED IQBAL FARUQUE, MD. MEHEDI HASAN, MUHAMAD ROSZAINI ROSLAN*,
MOHAMMAD TARIQUL ISLAM & SHARIFAH MASTURA SYED ABDULLAH

ABSTRAK

Perkembangan lalu lintas dalam sistem komunikasi tanpa wayar telah menarik banyak pihak menumpukan perhatian kepada spektrum jalur lebar luas dalam gelombang frekuensi millimeter yang merupakan keperluan komunikasi generasi kelima (5G). Inspirasi antena yang boleh dikonfigurasi frekuensinya berasaskan metabahan dicadangkan untuk komunikasi 5G. Ia terdiri daripada garisan suapan lurus ekakutub dengan dua resonator cincin yang berpecah dua (DSRR). DSRR dibangunkan oleh resonator cincin berpecah luar dan dalam dengan jalur logam tembaga E-bentuk terbalik yang dihubungkan dengan resonator cincin luar. Teknik Integrasi Terhadap berasaskan simulator elektromagnet CST Microwave Studio digunakan untuk reka bentuk dan kajian berangka. Pulangan Kerugian (S_{11}) menunjukkan resonan dalam 32.08 GHz, 35.07 GHz, dan 41.60 GHz. Prestasi antena yang boleh dikonfigurasi dicadangkan dianalisis dengan mengaktifkan atau menyahaktifkan DSRR. Walau bagaimanapun, metabahan yang direka menunjukkan ciri-ciri lengan kiri, padatan dalam ukuran dan lebih bersesuaian untuk aplikasi gelombang tanpa wayar 5G.

Kata kunci: Aplikasi 5G; konfigurasi antena; metabahan lengan kiri

ABSTRACT

Traffic development in the wireless communication system has attracted many parties concentrating on a broad bandwidth spectrum in the wave of frequency millimeters which is a fifth generation communication requirement (5G). Inspired antennae that can be configured by its own metamaterial is suggested for 5G communication. It consists of a straight feed line monopole with two resonator rings that split to two (DSRR). DSRR was developed by resonator the external split ring and in with the brass metal stripe of an overturned E-form linked to the resonator of the outer ring. Limited Integration techniques based on electromagnet CST Microwave Studio is used for numerical design and investigation. The Return of Loss (S_{11}) showed a resonant in 32.08 GHz, 35.07 GHz and 41.60 GHz. The antenna performance that can be configured is analyzed by activating or deactivating DSRR. However, metamaterial designed shows the characteristics of the left arm, a measure in measurements and is more appropriate for the 5G wireless wave application.

Keywords: Antenna configuration; left handed metamaterial; 5G applications

PENGENALAN

Rangkaian generasi kelima (5G) dijangka menggunakan jalur lebar frekuensi yang lebih tinggi disebabkan oleh peningkatan keperluan untuk jalur lebar yang lebih luas dan kadar data yang lebih tinggi. Berbanding dengan rangkaian selular yang digunakan hari ini, rangkaian mudah alih 5G akan dicadangkan di wilayah gelombang milimeter adalah, 37.0 hingga 40.50 GHz, 42.50 hingga 43.50 GHz, 45.50 hingga 47.0 GHz, 47.20 hingga 50.20 GHz, yang mempunyai ruang untuk perkhidmatan mudah alih pada asas utama. Selain itu, 31.80 hingga 33.40 GHz, 40.50 hingga 42.50 GHz, dan 47.0 hingga 47.20 GHz, yang mungkin memerlukan ruang tambahan kepada perkhidmatan mudah alih secara asas untuk komunikasi tanpa wayar 5G. Kemampuan konfigurasi semula antena menambah fleksibilitinya dalam aplikasi, seperti kekerapan operasi, arah rasuk utama, lebar rasuk antena tertentu. Metabahan adalah bahan buatan dengan saiz lebih kompak berbanding dengan struktur konvensional dan mempunyai

beberapa sifat yang jarang, yang tidak wujud dalam bahan-bahan semula jadi. Antena yang boleh dikonfigurasi berasaskan metabahan boleh mencapai prestasi yang tinggi dengan mengubah struktur fizikal secara dinamik. Ia bersamaan dengan mempunyai pelbagai antena dengan bukaan fizikal yang berbeza (Roh et al. 2014). Oleh itu, antena yang boleh dikonfigurasi berasaskan metabahan boleh mengurangkan kos keseluruhan, berat, dan saiz sistem. Selain itu, beberapa antena yang boleh dikonfigurasi berasaskan metabahan telah dikaji dalam penyelidikan ini. Veselago pertama kali pada tahun 1968 telah membincangkan mengenai konsep metabahan. Selepas tempoh yang lama pada tahun (2000), Smith et al. mencipta bahan yang menunjukkan ketelusan dan kebolehtelapan negatif pada masa yang sama dengan beberapa sifat yang tidak kerap. Penggunaan metabahan dalam struktur antena membuat struktur antena padat dan fleksibel untuk aplikasi frekuensi rendah atau tinggi. Hasilnya, penyelidikan besar-besaran telah dilakukan pada antena metabahan dari dulu

hingga kini. Seperti metabahan negatif ganda dua berbentuk z telah dicadangkan untuk operasi C- dan X-band pada tahun 2016. Struktur metabahan satu unit sel adalah $10 \times 10 \text{ mm}^2$ dan nisbah sederhana berkesan lebih daripada 4 (Hasan et al. 2016). Satu meta-atom indeks negatif, resonans pada C-, X- dan Ku-band dengan jalur lebar indeks bias negatif yang lebar dari 7.0 hingga 12.81 GHz telah diunjurkan (Hasan et al. 2016). Satu antenna gelung yang boleh disusun semula dengan dua jalur berasaskan *Inverted-L* untuk peranti pintar moden telah dibentangkan dengan logam tepi luar menghasilkan tiga mod gelung dan jalur parasit dalaman menyediakan dua mod monopole. Dengan menggabungkan kedua-dua jenis mod antenna, ia meliputi operasi GSM 850/900 dan LTE 2300/2500. Untuk band rendah (dari 824 hingga 960 MHz), keuntungan antenna dan kecekapan keseluruhannya adalah kira-kira 0.3 hingga 1.7 dBi, dan 45 hingga 60% dan juga bagi band operasi atas (daripada 1710 hingga 2690 MHz), keuntungan dan jumlah kecekapan masing-masing adalah 1.2 hingga 4.2 dBi dan 47% (Zhang et al. 2017). Dalam kertas ini, antenna yang boleh dikonfigurasi polarisasi planar dengan pengubahan topologi mudah dengan menggunakan sifat mod bergemaberganda pada rongga panduan gelombang bersepadu substrat (SIW) diperkenalkan oleh Hao et al. (2017). Dua input-port telah digunakan untuk melaraskan pengedaran fasa slot terpancar yang terukir pada permukaan atas rongga SIW. LHCP, RHCP dan polarisasi linear (LP) kemudiannya boleh direalisasikan dengan menggunakan port input yang betul. LHCP mempunyai jalur lebar nisbah paksi 3dB dari 5.87 hingga 5.89 GHz dan 5.86 hingga 5.89 GHz untuk keadaan RHCP. Jalur lebar bagi pulangan kehilangan dan keuntungan bagi keadaan LP masing-masing, dari 5.65 hingga 5.9 GHz dan 10.0 dBi. Antena gelombang milimeter (jalur operasi dari 46.0 hingga 70.0 GHz) terdiri daripada dua planar dwikutub dan tampalan pendek, dengan menyediakan lebih daripada 50% jalur lebar impedans dan hampir memperoleh keuntungan 8 dBi tetapi memancarkan satu arah dengan paras polarisasi rendah dan tahap radiasi belakang (Li et al. 2015). Teknik integrasi maju untuk gelombang milimeter dianalisis dengan operasi jalur lebar dan kelewatan masa sebenar teknik ini lebih tinggi daripada gelombang milimeter untuk rangkaian tanpa wayar 5G (Cao et al. 2016). Antena *bowtie* dimuatkan dengan metabahan untuk menghasilkan corak dual rasuk daripada 55.0 hingga 68.0 GHz. Struktur resonator berbilang cincin berpental dua sisi bersepadu dan condong 15° untuk menyesuaikan sinaran sinaran dan antenna menunjukkan keuntungan tinggi 11.4 dBi pada 62.0 GHz (Dadgarpour et al. 2016). Antena berasaskan metabahan indeks negatif dibentangkan dengan jalur sempit disalurkan melalui frekuensi yang luas (daripada 1.60 hingga 2.23 GHz), manakala band yang lebih tinggi tetap malar dengan menggunakan diod varaktor (kemuatan daripada sekitar 0.1 hingga 0.7 pF). Selain itu, jumlah dimensi antenna tembikar $0.056\lambda_0 \times 0.047\lambda_0$ diletakkan di atas $0.23\lambda_0 \times 0.111\lambda_0$ satah tanah CPW (Mirzaei et al. 2011). Pada tahun 2007 Liu et al. mencipta antenna tampalan fraktal boleh dikonfigurasi dua band dengan suis terukir pada slot antenna dan dengan

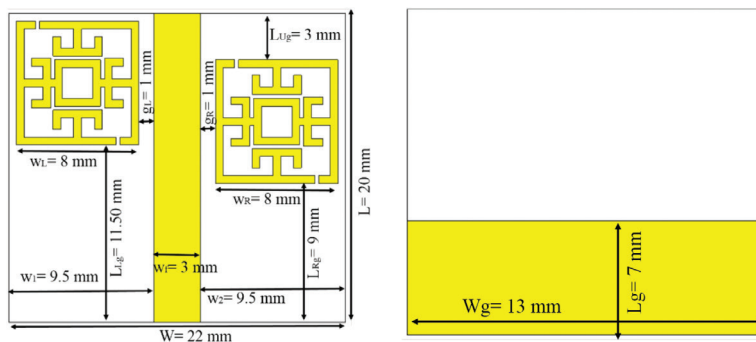
menukar keadaan suis, corak radiasi antenna berubah sekitar 60.0 dan 80.0 GHz, yang meliputi sudut ketinggian 130 hingga 450, -130 -450 sekitar 60 GHz dan 150 hingga 500, -150 hingga - 500 sekitar 80 GHz (Liu et al. 2011). Untuk aplikasi gelombang milimeter satu antenna tampalan fraktal boleh dikonfigurasi dua band dicadangkan untuk menunjukkan kekerapan operasi yang serupa tetapi corak radiasi yang berlainan antara urutan sifar dan mod resonan pesanan +1 (Yan et al. 2006). Struktur metabahan lengan kiri berdasarkan bentuk E songsang digabungkan dengan penyalun cincin luar yang dicetak pada bahan Rogers RT 5880 yang dicadangkan, yang menunjukkan resonan pada band C dan lebar jalur 5.14 GHz dari 4.0 hingga 9.14 GHz (Hasan et al. 2017). Antena dwikutub yang boleh dikonfigurasi dicadangkan untuk aplikasi 5G yang dikendalikan oleh suis dalam tampung persegi. Antena yang direka telah berjaya untuk menukar polarisasi antara satu polarisasi linear dan dua keadaan polarisasi berbentuk segi lapan. Antena menunjukkan jalur lebar daripada 5.07 ke 5.95 GHz 8.20 dBi keuntungan stabil (Ge et al. 2016). Dalam makalah ini, kami membentangkan antenna yang boleh dikonfigurasi secara frekuensi berasaskan metabahan yang terdiri daripada ekakutub garisan suapan lurus dengan dua penyalun cincin berpecah dua untuk aplikasi 5G. Setiap unit metabahan yang direka bentuk dengan antenna dibangunkan oleh penyalun cincin berasingan luar dan dalam dengan jalur logam E-bentuk terbalik tembaga dihubungkan dengan penyalun cincin luar. Keputusan menunjukkan resonan pulangan kerugian dengan DSRR atau tanpa DSRR atau DSRR sisi kanan atau DSRR sisi kiri adalah sekitar 32.08, 35.07, dan 41.60 GHz. Ketika ini, dalam menyokong kapasiti trafik yang semakin meningkat, 5G melanjutkan kadar penghantaran data yang tinggi untuk komunikasi. Ini termasuk spektrum baru daripada 30 GHz ke frekuensi yang lebih tinggi. Akibatnya, semua puncak resonan yang disebutkan boleh digunakan untuk aplikasi 5G.

REKA BENTUK STRUKTUR ANTENA YANG DICADANGKAN

Rajah 1(a)-1(c) menunjukkan konfigurasi terperinci bagi antenna yang boleh dikonfigurasi berasaskan metabahan ini. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1, antenna yang dicadangkan dicetak pada bahan Rogers RT 5880 (ketebalan 1.575 mm, pemalar dielektrik sebanyak 2.2 dan kehilangan tangen 0.0009). Saiz optimum antenna adalah $20 \times 22 \text{ mm}^2$ dan sel tunggal unit metabahan adalah $8 \times 8 \text{ mm}^2$ (Jadual 1). Selain itu, antenna terdiri daripada ekakutub garisan suapan lurus dengan dua penyalun cincin berpecah dua (DSRR). DSRR dibangunkan oleh penyalun cincin berasingan luar dan dalam dengan jalur logam tembaga E-bentuk terbalik yang dihubungkan dengan penyalun cincin luar. Satu penyambung dipasang pada hujung saluran antenna yang menyampaikan impedansi 50Ω . Walau bagaimanapun, paparan depan dan belakang yang direka dan antenna dengan dua DSRR, DSRR sisi kanan, DSRR sisi kiri, dan tanpa DSRR ditunjukkan masing-masing dalam Rajah 2(a)-2(b) dan Rajah 3(a)-3(d).

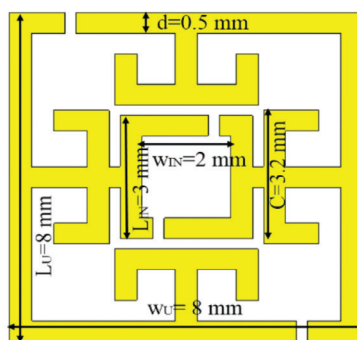
JADUAL 1. Dimensi optimum cadangan SWB bagi antenna yang boleh dikonfigurasi

| Parameter | L | W | W_L | W_R | W_f | W_1 | W_2 |
|-----------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| Saiz (mm) | 20.0 | 22.0 | 8.0 | 8.0 | 3.0 | 9.5 | 9.5 |
| Parameter | L_{Lg} | L_{Rg} | L_{Ug} | g_L | g_R | L_g | W_g |
| Saiz (mm) | 11.50 | 9.0 | 3.0 | 1.0 | 1.0 | 7.0 | 13.0 |



(a)

(b)

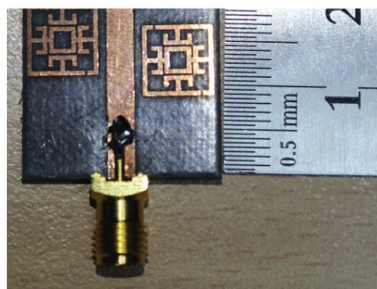


(c)

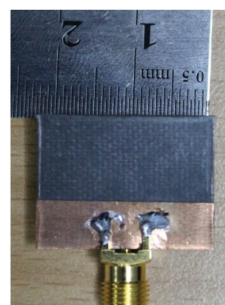
RAJAH 1. Pandangan skematis antenna yang boleh dikonfigurasi yang dicadangkan: (a) Pandangan hadapan, (b) Pandangan belakang, dan (c) Pandangan skematik sel unit tunggal metabahan yang direka

Dimensi struktur sel tunggal metabahan yang direka bentuk ialah: panjang penyalun luar (L_L) = 8.0 mm, lebar penyalun luar (W_L) = 8.0 mm, panjang penyalun dalaman

(L_{IN}) = 3.0 mm, lebar penyalun dalaman (W_{IN}) = 2.0 mm, $C = 3.2$ mm, dan logam penyalun (tembaga) lebar (d) = 0.5 mm.

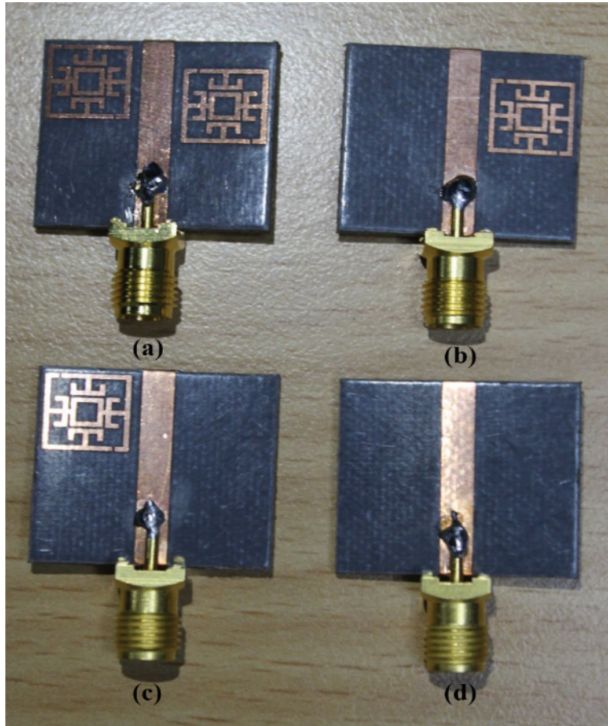


(a)



(b)

RAJAH 2. Pandangan antenna yang dicadangkan: (a) Pandangan hadapan, dan (b) Pandangan balik



RAJAH 3. (a) Antena dengan dua DSRR, (b) Antena dengan DSRR lengan kanan, (c) Antena dengan DSRR lengan kiri dan (d) Antena tanpa DSRR

Simulasi antena yang dicadangkan ini telah dijalankan dengan perisian *CST Microwave Studio* dan pengukuran telah dilakukan oleh Penganalisis Rangkaian Vektor Agilent N5227A yang telah dikalibrasi oleh Agilent N4694-60001 untuk mencapai kesempurnaan spektrum. Untuk memahami ciri-ciri sel unit metabahan yang diintegrasikan pada satah asas simulasi antena sel unit dilakukan di CST-MWS dengan sempadan magnetik dan elektrik sempurna digunakan bersama-sama dengan pesawat x dan y, supaya medan elektrik berorientasikan di sepanjang arah-x dan medan magnet berorientasikan sepanjang arah-y. Kaedah Nicolson-Ross-Wire telah digunakan untuk mendapatkan parameter yang berkesan, iaitu seperti berikut,

$$S_{11} \approx \left\{ \frac{R_1(1 - e^{-2j\theta})}{1 - R_1^2 e^{-2j\theta}} \right\} \quad 1$$

$$\text{Persamaan } S_{21} \approx \left\{ \frac{e^{-2j\theta}(1 - R_1^2)}{1 - R_1^2 e^{-2j\theta}} \right\} \quad 2$$

$$\text{Kebolehtelapan } \mu_r \approx \left[\frac{C}{j\pi fd} \left\{ \frac{1 - S_{21} + S_{11}}{1 + S_{21} - S_{11}} \right\} \right] \quad 3$$

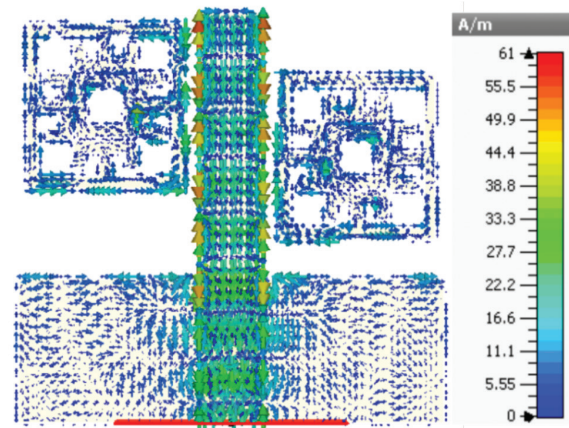
$$\text{Indeks Biasan } n_r \approx \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad 4$$

$$\text{Indeks Biasan } n_r \approx \left[\frac{C}{j\pi fd} \sqrt{\left\{ \frac{(S_{21} - 1)^2 - S_{11}^2}{(S_{21} + 1)^2 - S_{11}^2} \right\}} \right] \quad 5$$

dengan $\theta = \xi d$, $\langle d \rangle$ ialah ketebalan substrat; ' R_1 ' ialah impedans normal ' C ' adalah halaju cahaya; ' S_{11} ' adalah pekali refleksi; dan ' S_{21} ' ialah pekali penghantaran.

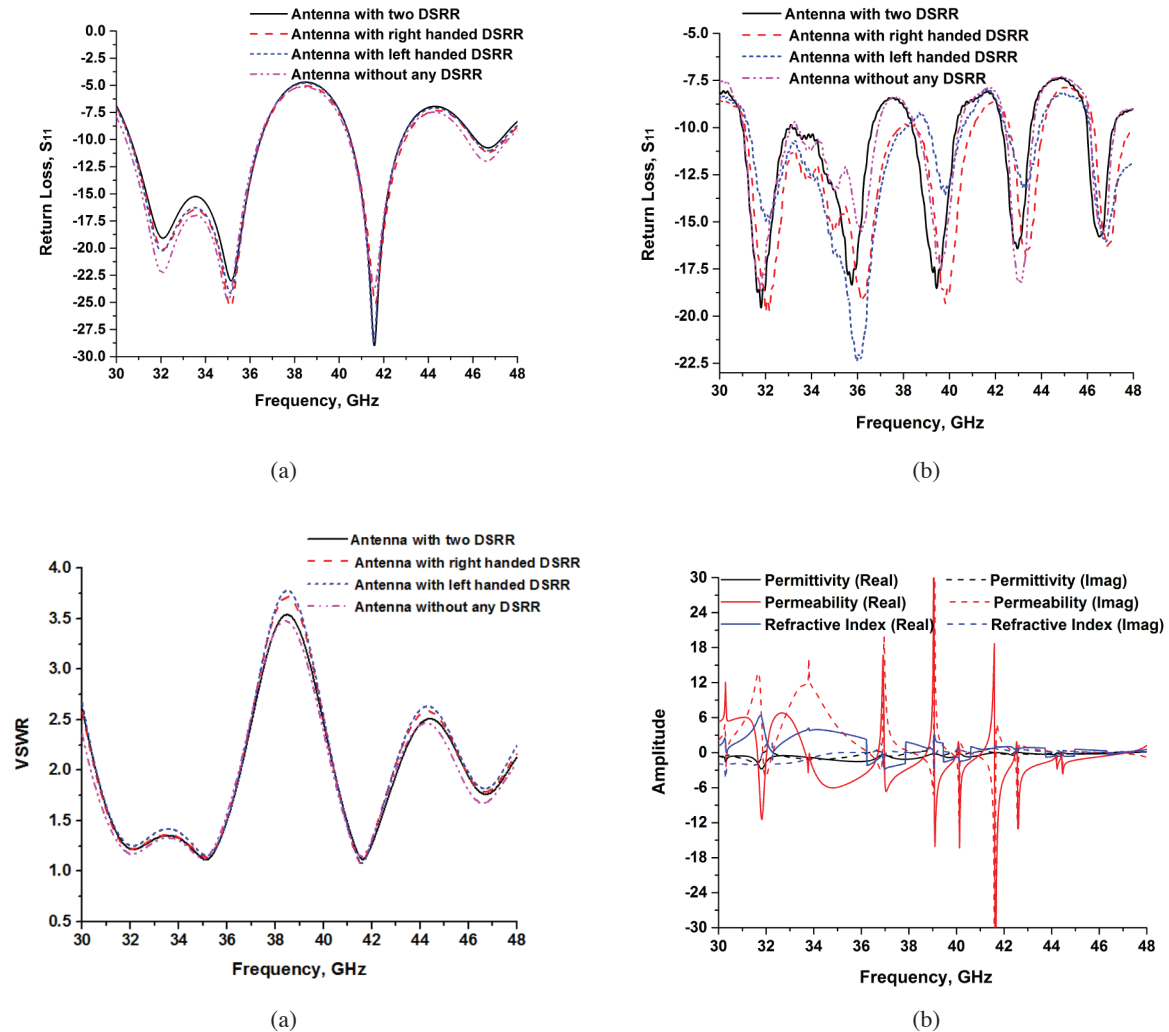
PRESTASI ANTENA

Untuk memahami prinsip operasi antena, pengagihan arus pada antena yang dicadangkan pada 32.08 GHz ditunjukkan pada angka 4. Arus ini diedarkan selari dan anti selari pada permukaan tampung metalik untuk frekuensi resonans. Pengedaran semasa permukaan selari mengawal resonan elektrik manakala arus permukaan anti-selari mengawal resonan magnetik. Sumber arus permukaan adalah gandingan magnetik dan elektrik yang kuat serta resonan magnetik dan elektrik yang berpasangan dengan medan yang digunakan secara luaran. Warna dalam rajah menunjukkan keamatan arus, selain arah arus yang ditunjukkan oleh anak panah (Rajah 4).



RAJAH 4. Pengedaran arus permukaan pada 32.08 GHz antena yang dicadangkan dengan dua DSRR

Prestasi antena dijelaskan oleh Pulangan Kehilangan (S_{11}), VSWR, keuntungan dan corak radiasi. Prestasi antena yang direka dianalisis dengan mengintegrasikan struktur metabahan pada kedudukan yang berbeza. Keputusan simulasi dan pengukuran antena yang dicadangkan ditunjukkan dalam Rajah 5(a)-5(b). Dalam Rajah 5(a), resonan hasil simulasi pada 32.08, 35.07, dan 41.60 GHz adalah sama dengan variasi konfigurasi antena yang dicadangkan, manakala keputusan diukur adalah dalam Rajah 5(b). Keputusan yang diukur sedikit berbeza daripada hasil simulasi disebabkan oleh penyambung *Sub Miniature Version A* (SMA) bersambung dengan garis suapan, ciri penentuan yang betul dan toleransi pengukuran. Rajah 5(c) memaparkan Nisbah Voltan Simulasi Gelombang Berdiri (VSWR) antena dengan dua DSRR, DSRR sisi kanan, DSRR sisi kiri, dan tanpa sebarang

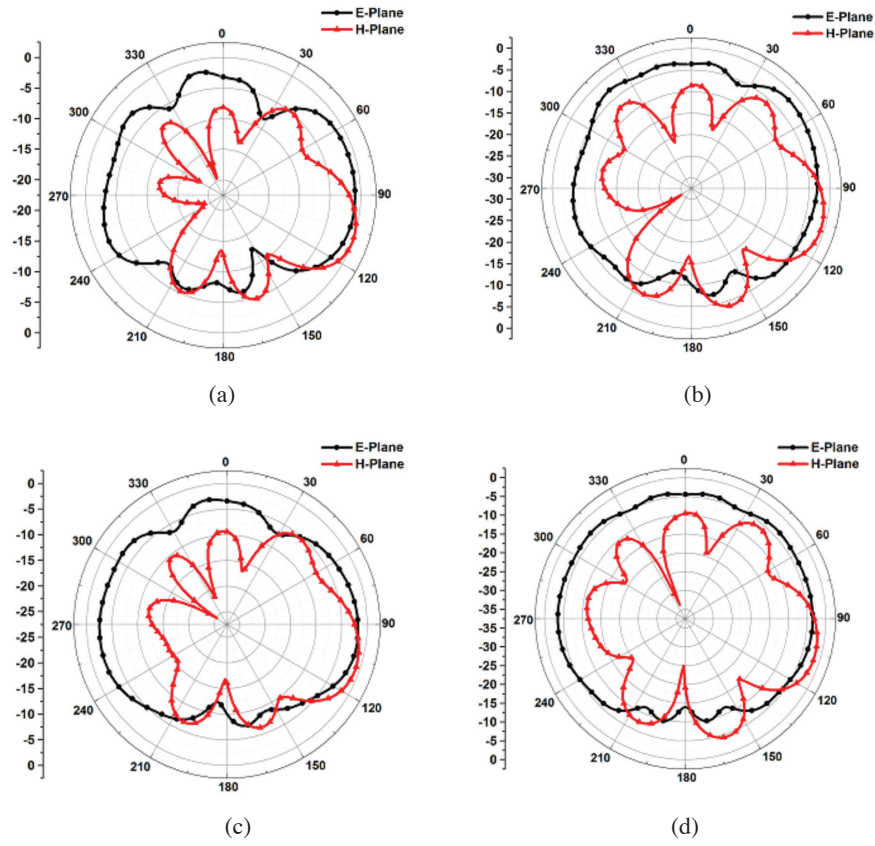


RAJAH 5. Cadangan antenna yang boleh dikonfigurasi: (a) Keputusan simulasi pulangan kerugian (S_{11}), (b) Keputusan pengukuran pulangan kerugian (S_{11}), (c) Simulasi VSWR dan (d) Amplitud parameter sederhana berkesan oleh metabahan bersepadu

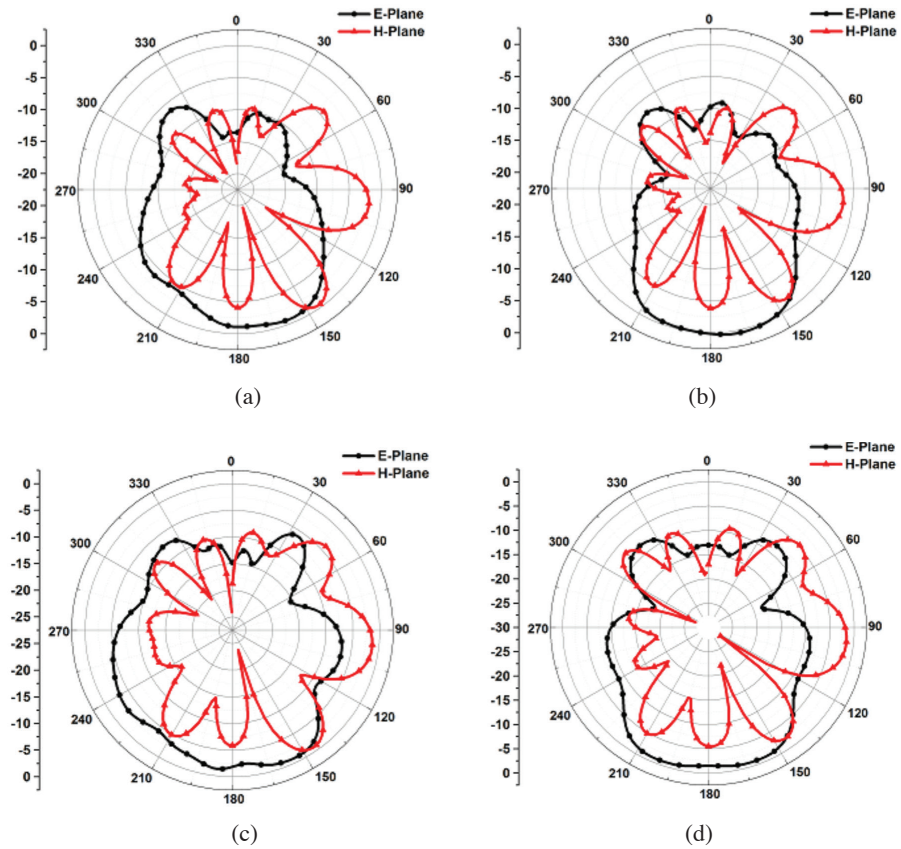
DSRR. Sifat metabahan adalah ciri-ciri oleh parameter sederhana yang berkesan (ketelusan, kebolehtelapan dan nisbah indeks bias). Rajah 5(d) memperlihatkan lengkung nisbah sederhana berkesan. Daripada lengkungan magnitud nyata keamatan negatif yang efektif daripada 30.0 ke 44.42 GHz, kebolehtelapan negatif mempunyai dua wilayah negatif dari 33.64 hingga 36.69 GHz dan 41.64 hingga 47.14 GHz. Tambahan pula, pada titik-titik pekali pantulan (pulangan kerugian), ketelusan, kebolehtelapan, dan amplitud indeks biasan masing-masing ialah $-1.41 + 0.40j$, $0.62 - 3.77j$, $1.81 + 0.57j$ pada 32.08 GHz, $-1.36 - 0.93j$, $-5.87 + 4.11j$, $3.43 - 0.024j$ pada 35.07 GHz, dan $-0.026 - 0.50j$, $-29.88 - 73.04j$, $1.12 + 0.93j$ pada 41.60 GHz. Terdapat variasi antara keputusan ketelusan, kebolehtelapan, indeks biasan untuk kesan polarisasi pada struktur dalaman bahan.

Bahan ini boleh dicirikan oleh pemaparan elektrik dan kadar resapan magnetik. Daripada Rajah 5(d) kehilangan struktur metabahan bersepadu ditakrifkan oleh nisbah amplitud nilai khayalan (ketelusan atau kebolehtelapan) dan nilai sebenar (ketelusan atau kebolehtelapan). Jika

nisbah lebih daripada 1 (<1) maka kerugian positif dan apabila ia kurang daripada 1 (>1) kerugian adalah negatif. Selain itu, corak radiasi dua dimensi (2D) pada 32.04 dan 42.60 GHz ditunjukkan dalam Rajah 6(a)-6(d) dan Rajah 7(a)-7(d) dengan kedua-dua $\Phi = 0^\circ$ dan $\Phi = 90^\circ$ telah dimasukkan sebagai E-satah dan H-satah, manakala satah y-z dianggap sebagai E-satah dan satah x-z dianggap sebagai H-satah. Ia dilihat daripada Rajah 6(a)-6(d) dan 7(a)-7(d) bahawa corak sinaran pada $\Phi = 0^\circ$ hampir di semua arah. Hasil satah y-z dalam corak radiasi pada frekuensi resonans yang sama nampak hampir sama untuk semua konfigurasi yang berbeza daripada antenna yang dicadangkan. Pada frekuensi yang lebih rendah bilangan lompong sampingan yang agak kurang tetapi dengan kekerapan yang semakin meningkat, corak mempunyai lobus sisi lebih dan sedikit arah. Terdapat beberapa lompong yang diperhatikan pada frekuensi yang lebih rendah disebabkan oleh urutan harmonik yang lebih rendah, antenna mempamerkan corak radiasi yang stabil di sepanjang jalur operasi. Gelombang kecil dalam corak radiasi mungkin disebabkan oleh pemulihan.



RAJAH 6. Corak radiasi simulasi antenna yang dicadangkan pada 32.08 GHz: (a) dengan dua DSRR, (b) dengan DSRR lengan kanan, (c) dengan DSRR lengan kiri dan (d) tanpa DSRR



RAJAH 7. Corak radiasi simulasi antenna yang dicadangkan pada 41.60 GHz: (a) dengan dua DSRR, (b) dengan DSRR lengan kanan, (c) dengan DSRR lengan kiri, dan (d) tanpa DSRR

Sejumlah besar lompong belakang diperhatikan, mungkin kerana penggunaan separa satah asas. Satah asas penuh dapat mengurangkan lompong belakang ini dengan jumlah keuntungan rendah, kecekapan rendah dan jalur lebar sempit.

KESIMPULAN

Bidang komunikasi tanpa wayar telah menyaksikan pertumbuhan yang luar biasa memandangkan kemudahan teknologi infrastruktur telekomunikasi meningkat dengan ketara dalam dekad yang lalu. Tanpa mengira aplikasi, kebanyakan antena yang boleh dikonfigurasi mempunyai keperluan yang sama seperti peningkatan fungsi, operasi yang lebih baik, saiz kecil dan yang paling penting kos yang rendah. Walau bagaimanapun, permintaan terhadap keperluan asas antena boleh dikonfigurasi berasaskan metabahan dicadangkan dengan menggunakan sel unit metabahan yang disepadukan dengan struktur antena dalam kertas ini. Prestasi antena yang pelbagai dan dikaji dengan mengubah kedudukan metabahan dengan saluran suapan antena. Seperti pada demonstrasi ini, antena direka dengan bahan ketebalan 1,575 mm bahan substrat Rogers RT 5880. Uji kaji dijalankan untuk mengesahkan reka bentuk, yang menunjukkan kesesuaian dengan reka bentuk. Antena yang dicadangkan menunjukkan resonans dalam frekuensi yang lebih tinggi di atas 30 GHz, yang bersesuaian untuk aplikasi komunikasi 5G. Oleh itu, antena yang boleh dikonfigurasi yang dicadangkan boleh digunakan untuk aplikasi pelbagai sistem tanpa wayar berkelajuan tinggi.

PENGHARGAAN

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

RUJUKAN

- Cao, Z., Ma, Q., Smolders, A.B., Jiao, Y., Wale, M.J., Oh, C.W., Wu, H. & Koonen, A.M.J. 2016. Advanced integration techniques on broadband millimeter-wave beam steering for 5G wireless networks and beyond. *IEEE Journal of Quantum Electronics* 52(1): 0600620.
- Dadgarpour, A., Sorkherizi, M.S., Kishk, A.A. & Denidni, T.A. 2016. Single-element antenna loaded with artificial Mu-near-zero structure for 60 GHz MIMO applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 64(12): 5012-5019.
- Ge, L., Yang, X., Zhang, D., Li, M. & Wong, H. 2016. Polarization reconfigurable magneto-electric dipole antenna for 5G WiFi. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 16: 1504-1507.
- Hao, Z.C., Fan, K. & Wang, H. 2017. A planar polarization-reconfigurable antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 65(4): 1624-1632.

- Hasan, M.M., Faruque, M.R.I. & Islam, M.T. 2017. Inverse E-shape chiral metamaterial for long distance telecommunication. *Microwave and Optical Technology Letters* 59: 1772-1776.
- Hasan, M.M., Faruque, M.R.I., Islam, S.S. & Islam, M.T. 2016. A new compact double-negative miniaturized metamaterial for wideband operation. *Materials* 9(10): 830.
- Li, M. & Luk, K.M. 2015. Wideband magneto-electric dipole antenna for 60-GHz millimetre-wave communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 63(7): 3276-3279.
- Liu, H., Wang, B.Z. & Shao, W. 2007. Dual band bi-directional pattern reconfigurable fractal patch antenna for millimetre wave application. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* 28: 25-31.
- Mirzaei, H. & Eleftheriades, G.V. 2011. A compact frequency-reconfigurable metamaterial inspired antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 10: 1154-1157.
- Roh, W., Seol, J.Y., Park, J., Lee, B., Lee, J., Kim, Y., Cho, J., Cheun, K. & Aryanfar, F. 2014. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results. *IEEE Communications Magazine* 52(2): 106-113.
- Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., Nemat-Nasser, S.C. & Schultz, S. 2000. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical Review Letters* 84: 4184-4187.
- Veselago, V.G. 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*. 10: 509-514.
- Yan, S. & Vandenbosch, G.A.E. 2016. Radiation pattern reconfigurable wearable antenna based on metamaterial structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 15: 1715-1718.
- Zhang, H.B., Ban, Y.L., Qiang, Y.F., Guo, J. & Yu, Z.F. 2017. Reconfigurable loop antenna with two parasitic grounded strips for WWAN/LTE unbroadband-metal-rimmed smartphones. *IEEE Access* 5: 4853-4858.

Mohammad Rashed Iqbal Faruque, Md. Mehedi Hasan, Muhamad Roszaini Roslan* & Sharifah Mastura Syed Abdullah
Space Science Centre (ANGKASA)
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

Mohammad Tariqul Islam
Centre of Advanced Electronics and Communication Engineering
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: mrr@ukm.edu.my

Diserahkan: 14 Februari 2019

Diterima: 9 Ogos 2019