

Antena Tatasusun Pantulan Boleh Konfigurasi Semula: Latar Belakang, Klasifikasi dan Mekanisme Boleh Konfigurasi (Reconfigurable Reflectarray Antenna: Background, Classification and Configurable Mechanisms)

Siti Fatimah binti Harun^a, Mohd Fais bin Mansor^{a,b*} & Norbahiah binti Misran^{a,b}

^a*Jabatan Kejuruteraan Elektrik, Elektronik, & Sistem (JKEES),*

^b*Pusat Kejuruteraan Elektronik dan Komunikasi Terkehadapan (PAKET)*

Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Selangor, Malaysia

**Corresponding author: m.mansor@ukm.edu.my*

*Received 1 July 2023, Received in revised form 2 August 2023
 Accepted 1 September 2023, Available online 30 September 2023*

ABSTRAK

Antena tatasusun pantulan ialah antara calon antena terbaik untuk digunakan dalam stesen pangkalan rangkaian 5G kerana keupayaannya untuk menggabungkan kelebihan antena parabola dan antena tatasusunan sesfa. Antena ini bukan sahaja mempunyai struktur yang ringkas dan ringan, tetapi ia juga berkemampuan untuk mencapai gandaan yang tinggi dan kehilangan balikan yang rendah. Kriteria ini penting untuk menghasilkan isyarat yang mempunyai kependaman yang rendah dan kualiti yang baik, dimana ianya merupakan ciri penting untuk aplikasi 5G. Antena tatasusun pantulan ini juga boleh dikonfigurasi semula arah alurnya dengan menggunakan teknologi mekanikal, elektronik, bahan boleh ubah mahupun optik. Keupayaan antena untuk dikonfigurasi semula akan memudahkan sistem dan mengurangkan kos bagi sistem antena berbilang, sekaligus menjadikan aplikasi 5G lebih praktikal dan sistematik. Ianya juga menyumbang kepada aplikasi satelit sebagai keperluan membetulkan arah alur isyarat antena yang berubah jika terdapat pergerakan satelit berlaku di ruang angkasa. Kertas kajian ini dimulakan dengan perbincangan perkembangan sejarah inovasi antena tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula bagi setiap mekanisme boleh konfigurasi. Ianya kemudian diikuti dengan kajian klasifikasi konfigurasi yang digunakan oleh antena ini seperti konfigurasi frekuensi, corak radiasi, polarisasi dan hibrid (iaitu gabungan daripada beberapa klasifikasi konfigurasi yang ada) dan diakhiri dengan perbincangan penyelidikan dan inovasi terkini mekanisme boleh konfigurasi antena tatasusun pantulan.

Kata kunci: Antena tatasusun pantulan, boleh konfigurasi semula; rangkaian 5G; julat fasa

ABSTRACT

Reflectarray antennas have emerged as one of the most suitable choice for 5G network base station antennas due to their ability to combine the advantages of parabolic reflectors and phased array antennas. These antennas offer a lightweight structure, high gain, and low impedance mismatch losses. High gain and low loss are crucial factors in ensuring the antenna delivers low latency and high-quality 5G radio signals. The application of 5G technology becomes more practical and efficient with the capability to adjust the functionality of a single 5G antenna or enable reconfiguration. This reconfigurable technique simplifies the multi-antenna systems and significantly reduces costs, making it more practical and systematic. Furthermore, this reconfigurability is particularly beneficial for satellite applications, as it allows for the reconfiguration of the signal in the event of satellite movement on the space. This paper aims to discuss the historical development of reconfigurable reflectarray antennas, focusing on the innovations in each configurable mechanism. The paper further explores the classification of configurations employed by this antenna, encompassing frequency configuration, radiation pattern, polarization, and hybrid configurations that integrate multiple existing configuration classifications. Finally, the research paper provides a discussion of the most recent research and innovations in the configurable mechanisms of reflectarray antennas.

Keywords: Reflectarray antenna, reconfigurable, 5G network; phase range

PENGENALAN

Kemajuan teknologi rangkaian 5G telah merevolusikan sistem telekomunikasi, memberikan manfaat daripada segi kapasiti, kependaman, pemprosesan dan kebolehskalaan. Teknologi ini juga telah memangkin pembangunan bandar pintar, kilang pintar, dan perkhidmatan kesihatan elektronik, khususnya di kawasan bandar. Faktor penting dalam aplikasi mesin kritikal, seperti pembedahan jarak jauh, alat kawalan jauh peralatan pembinaan dan kereta autonomi, adalah kependaman yang rendah kurang dari 1 ms serta mempunyai operasi masa yang nyata. Selain manfaatnya untuk telekomunikasi dan peranti, teknologi 5G juga praktikal di kawasan yang mempunyai kepadatan penduduk yang tinggi, kerana ia boleh menyokong sehingga satu juta sambungan peranti bagi setiap kilometer persegi (Tiwari 2022). Selain itu, teknologi 5G juga boleh menyokong infrastruktur seperti pemeteran pintar, sistem tenaga, keselamatan dan sensor yang mengesan kegagalan infrastruktur. Pengoptimuman kemudahan ini boleh membawa kepada peningkatan yang ketara dalam kecekapan dan keberkesanan keseluruhan sistem infrastuktur. Kelebihan teknologi 5G mempunyai kapasiti data yang besar membolehkan penyimpanan selamat bagi sejumlah besar data, serta membuka peluang untuk menjana pendapatan, mengatur serta menganalisis ancaman data. (Shortsleeve et al. 2022).

Antena tatasusun pantulan dianggap sesuai untuk aplikasi 5G kerana mempunyai ciri-ciri gandaan yang tinggi dan kehilangan balikan yang rendah (Huang dan Encinar 2008). Selain itu, permukaannya yang ringan dan rata menjadikannya mudah untuk difabrikasi, terutamanya untuk aplikasi mikrogelombang (Bialkowski 2007). Konsep utama antena tatasusun pantulan adalah untuk memastikan setiap elemen mempunyai pampasan fasa tersendiri, yang akhirnya membentuk pantulan sefasa yang menghala ke arah yang dikehendaki.

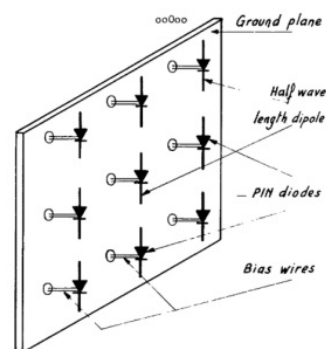
Antena ini juga boleh mempunyai kelebihan untuk dikonfigurasi semula arah alur lantasi dapat memenuhi

keperluan komunikasi yang pelbagai dengan lebih berkesan (Christodoulou et al. 2012). Walaupun teknologi tatasusunan sefasa direka untuk memenuhi keperluan ini, strukturnya yang kompleks kerana kehadiran penganjak fasa dan bas data pada setiap elemen, membawa kepada kos yang tinggi. Antena parabola pula hanya boleh dikonfigurasi semula melalui pergerakan mekanikal yang kemudiannya juga tidak praktikal dan ekonomik (Hum dan Perruisseau-Carrier 2014).

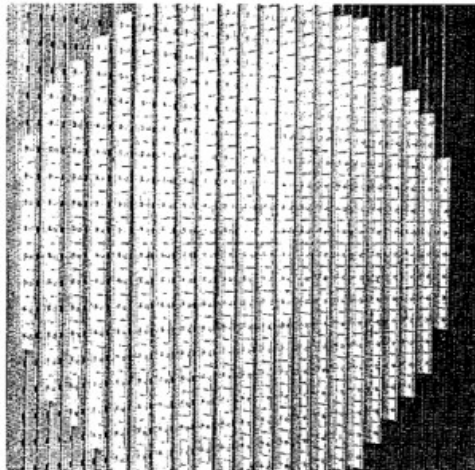
Oleh itu, teknologi yang boleh digunakan untuk mendapatkan perubahan arah alur pada antena tatasusun pantulan ini telah diterokai. Terdapat beberapa teknologi yang boleh digunakan untuk mendapatkan perubahan arah alur seperti pergerakan secara mekanikal, menggunakan komponen elektronik, bahan boleh ubah ataupun teknologi optik (Hum dan Perruisseau-Carrier 2014). Selain daripada mengubah arah alur, perubahan pada frekuensi dan polarisasi juga adalah antara jenis konfigurasi yang boleh digunakan oleh antena tatasusun pantulan ini (Costantine 2010). Kajian berkenaan antena tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula ini akan dimulakan dengan sejarah dan latar belakang, diikuti dengan jenis konfigurasi dan diakhiri dengan teknologi-teknologi yang membolehkan konfigurasi semula antena ini berlaku.

SEJARAH DAN LATAR BELAKANG

Idea antena tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula pada mulanya diperkenalkan oleh Salmon 1974 yang telah menginovasi konsep antena tatasusun pantulan asal dengan menambah keupayaan antena untuk mengubah arah alur (Huang dan Encinar 2008). Inovasi itu dilakukan dengan mencantum penganjak fasa pada rod antena untuk mencapai *multifunction air-borne* radar pada jalur-X. Elemen penganjak yang digunakan iaitu pin diod dimuatkan di dalam rod seperti Rajah 1. Kemudian, elemen-elemen ini diletakkan di atas satah bumi seperti Rajah 2. Peralihan fasa yang diperlukan dicapai dengan menghidupkan dan mematikan diod sekaligus mengawal penghantaran voltan di dalam elemen (Carrasco et al. 2012).



RAJAH 1. Rajah skematik Tatasusunan Elektronik Diod Bersepadu (IDEA)(Hum dan Perruisseau-Carrier 2014)



RAJAH 2. Susunan antenna tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula dengan 400 elemen.(Hum dan Perruisseau-Carrier 2014)

Evolusi itu diteruskan oleh Phelan, 1977 apabila beliau memperkenalkan konsep baru yang dipanggil *spiralphase*. Diod masih lagi digunakan sebagai teknik pensuisan dan

komponen ini telah menggunakan lingkaran empat lengan atau elemen rod bersilang untuk mendapatkan perubahan polarisasi elemen seperti dalam Rajah 3.



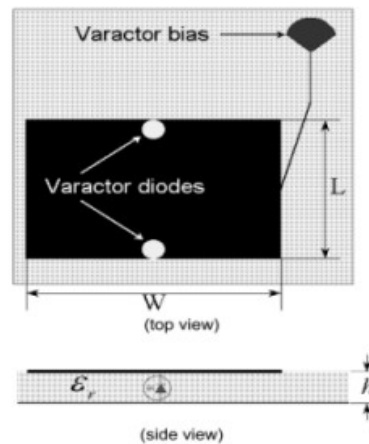
RAJAH 3. Spiralphase yang mempunyai rekabentuk lingkaran empat lengan atau elemen rod bersilang bersama diod (Bialkowski 2007)

Diod-diod ini akan dihidupkan dan dimatikan untuk memastikan polarisasi elektromagnet berputar mengikut paksi lingkaran yang dikehendaki. Konsep unik ini bagaimanapun membawa kepada saiz yang besar yang mengurangkan kecekapan antenna selain menghasilkan parutan lobus (Huang dan Encinar 2008).

Pada tahun 1977, elemen tatasusun pantulan pada jalur mikro diperkenalkan oleh Malagisi (1977) dengan aplikasi konsep boleh dikonfigurasi semula. Analisis dilakukan dengan memuatkan diod bersama cakera lilitan antara lapisan konduktor jalur mikro dan substrat dielektrik. Hasilnya menunjukkan fasa polarisasi gelombang boleh

dikawal dengan kehilangan yang tinggi dan lebar jalur yang sempit. Seiring kemajuan teknologi, terdapat banyak teknik yang telah dicipta bagi memperbaiki kelemahan ini seperti menambah lapisan elemen (Chen et al. 1990), meningkatkan ketebalan elektrik (Chang et al. 1986), teknik padanan impedans (Hugo F. Poes 1989), dan lain-lain.

Pada tahun 2001, Luigi Boccia pula menemui pendekatan baharu untuk mengaplikasi konsep boleh konfigurasi semula dengan menggunakan varaktor. Semudah memuatkan varaktor pada konduktor elemen seperti dalam Rajah 4 ianya dilihat dapat meringkaskan stuktur elemen dan menjadikannya lebih ekonomik.



RAJAH 4. Elemen dimuatkan dengan varaktor (Boccia et al. 2001)

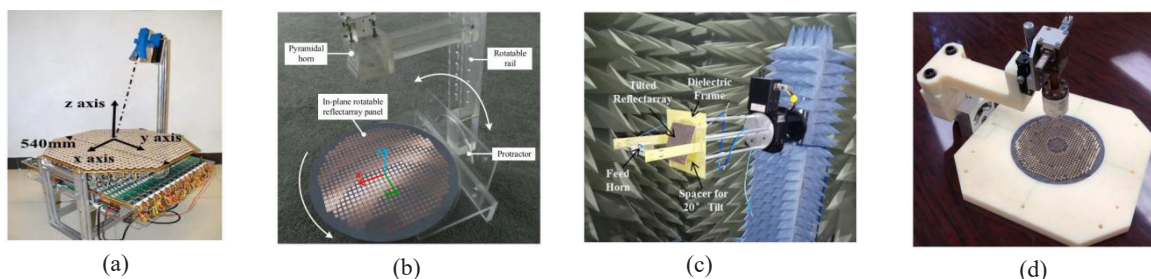
Dua tahun kemudian, Herve Legay (2003) memperkenalkan MEMS dalam bidang penyelidikan ini yang menyumbang kepada pengurangan kehilangan dan penggunaan kuasa yang rendah. Prototaip pertama yang dicadangkan ialah 2.5 bit elemen berbentuk elips yang didapati boleh menganjak fasa sehingga hampir 180° . Walaubagaimanapun, tempoh perubahan fasa menjadi kelemahan untuk teknik ini kerana ia lebih panjang daripada diod atau FET.

Malagisi sekali lagi pada tahun 1978 telah mengutarakan idea tetapi kali ini secara mekanikal pula iaitu putaran elemen untuk mendapatkan anjakan fasa (Huang dan Encinar 2008). Selepas inovasi ini, terdapat banyak idea pergerakan mekanikal lain muncul seperti memutar atau mencondongkan elemen (Yang et al. 2017; Phillion dan Okoniewski 2008), memutar satah antenna (Fusco 2005), menggerakkan antenna hon (Mohammadirad dan Komjani 2011) mahupun gabungan antara kaedah-kaedah ini. (Yang et al. 2018). Pada tahun 2005, rekabentuk antenna dengan satah yang boleh berputar telah diperkenalkan dengan

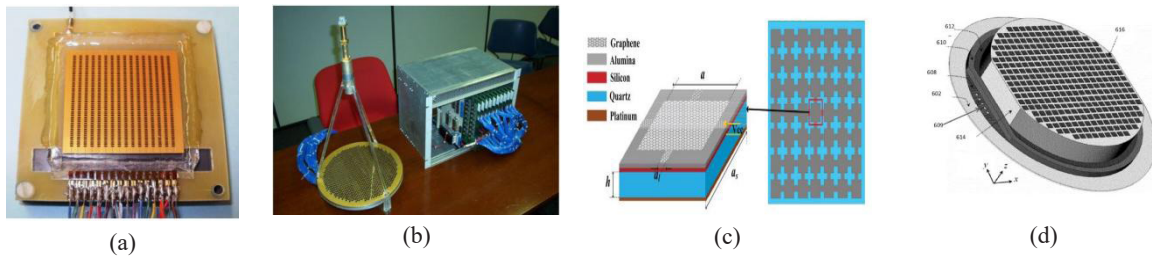
kemampuan mencapai julat fasa 360° (Fusco 2005). Kajian ini mengesahkan bahawa kaedah ini mampu mencapai perubahan fasa secara linear dengan orientasi pantulan isyarat polarisasi bulatan.

Idea memutar elemen menggunakan mikromotor sebagai pemacu sisi pula dibentangkan pada tahun 2008 oleh Phillion dan Okoniewski. Anjakan fasa sehingga 360° telah dicapai dengan rekod kehilangan yang rendah tetapi ia membuatkan struktur antenna menjadi besar dan rumit (Yang et al. 2017).

Menggerakkan antenna hon juga antara inovasi yang telah dicipta dan ia sebenarnya memudahkan konfigurasi antenna secara mekanikal. Kajian menggunakan kaedah ini diperkenalkan oleh M. Mohammadirad et al. (2011) dengan memvariasi jarak diantara antenna hon dengan antenna tatasusun pantulan lantas mendapatkan perubahan frekuensi dan lebar jalur. Rajah 5 menunjukkan contoh gambar-gambar antenna tatasusun boleh konfigurasi semula dengan menggunakan teknologi mekanikal.



RAJAH 5. Contoh antenna tatasusun pantulan antenna menggunakan teknologi mekanikal: (a) Mikromotor (Yang et al. 2017) (b) Putaran antenna (Wu et al. 2020)(c) Condongan antenna (Abbasi et al. 2019) (d) Pergerakan antenna hon (Nayeri et al. 2013)



RAJAH 6. Contoh antenna tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula integrasi bahan boleh ubah: (a) Hablur cecair (Bildik et al. 2011)(b) Feroelektrik (Romanofsky et al. 2009)(c) Graphene (Sun et al. 2019)(d) Elektrokromik (Senad 2020)

Pada abad ke-21, penyelidikan tentang keupayaan sifat anisotropik bahan boleh ubah sebagai penganjak fasa semakin menjadi perhatian. Lapisan filem nipis Ferroelectrics $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST) telah dipilih oleh Miranda et al. (2001) untuk menguji kebolehan bahan boleh ubah ini apabila berintegrasi dengan antenna tatasusun pantulan. Voltan yang diberikan adalah sehingga 400V dan anjakan fasa yang dicatatkan dalam lingkungan $57^\circ-158^\circ$ mengikut jenis komposisi filem nipis BST yang digunakan.

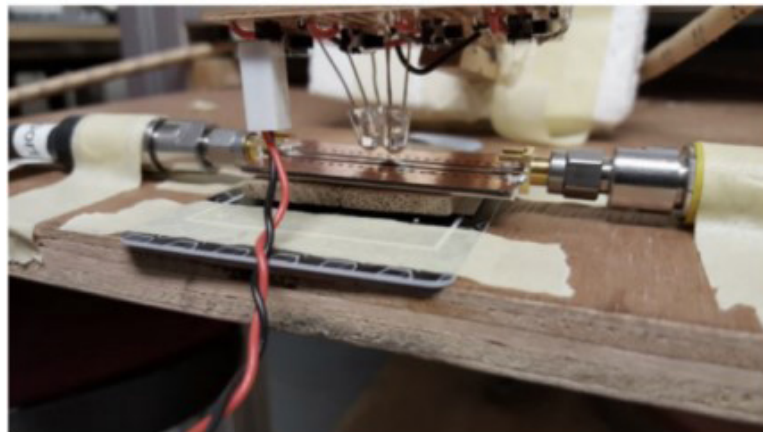
Integrasi bahan boleh ubah hablur cecair terhadap antenna juga telah divalidasikan kajiannya oleh Moessinger et al. (2005). Anjakan fasa sebanyak 300° direkodkan apabila voltan diberikan sebanyak 0-20V. Ismail dan Cahill (2005) mencadangkan kaedah mengurangkan ketebalan substrat dan nilai tangen untuk mengatasi masalah kehilangan balikan yang tinggi akibat daripada penggunaan bahan ini.

Pada tahun 2013, bahan Graphene pula diperkenalkan untuk diintegrasikan dengan antenna tatasusun pantulan oleh Eduardo Carrasso et al. Bahan ini mempunyai kekuatan jauh lebih baik dari keluli, bersifat ringan dan nipis, konduktor yang efektif dan hampir lutsinar. Sesuai untuk

aplikasi frekuensi tinggi, graphene membenarkan perambatan gelombang perlahan plasmonik pada aliran elektrik apabila diintegrasikan dengan antenna tatasusun pantulan. Peralihan fasa sebanyak 300° dilaporkan di dalam dengan kelebihan saiz yang kecil, kehilangan balikan rendah dan jalur yang lebar (Eduardo Carrasso 2013).

Bahan boleh ubah yang paling terbaru dikaji sebagai penganjak fasa antenna tatasusun pantulan ialah bahan elektrokromik. Senad Bulja et al. (2018) telah menyatakan bahawa bahan ini mempunyai ciri unik yang boleh mengubah warna dan kelegapan apabila dibekalkan voltan sekaligus mengubah nilai kebertelusan bahan. Rajah 6 menunjukkan beberapa contoh antenna tatasusun pantulan boleh ubah yang menggunakan bahan boleh ubah sebagai penganjak fasa.

Teknologi optik juga muncul sebagai alternatif penganjak fasa apabila Mohammad Reza Chahamir et al. (2006), telah memperkenalkan teknologi ini. Kaedah mengimbas arah alur dilakukan dengan menukar corak plasma di dalam silikon. Nilai gandaan dan lebar jalur diukur apabila sumber cahaya optik diberikan. Rajah 7 menunjukkan contoh antenna tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula dengan menggunakan teknologi optik.



RAJAH 7. Contoh prototaip antenna tatasusun pantulan dengan menggunakan teknologi optik (Peter Alizadeh et al. 2016)

Sehingga hari ini, terdapat banyak inovasi untuk membolehkan antena tatasusun pantulan boleh dikonfigurasi semula sama ada menggunakan komponen elektronik,

mekanikal, bahan boleh ubah dan juga teknologi optik. Jadual 1 menunjukkan ringkasan sejarah dan latar belakang penyelidikan teknologi antena tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula berdasarkan jenis teknologi yang ada.

JADUAL 1. Latar belakang penyelidikan antena tatasusun pantulan boleh konfigurasi

Teknologi	Komponen Penganjak Fasa	Tahun	Penulis
Komponen elektronik	Diod	1960	Berry et al.
	Varaktor	2001	Luigi Boccia et al.
	MEMS	2003	Hervey Legay et al.
Mekanikal	Elemen	1978	Malagisi et al.
	Satah Antena Tatasusun Pantulan	2005	Fusco et al.
	Antena suapan	2011	M. Mohammdirad et al.
Bahan boleh ubah	Feroelektrik	2001	A. Miranda et al.
	Hablur cecair	2005	A. Moessinger et al.
	Graphene	2013	Eduardo Carrasso et al.
	Elektrokromik	2018	Senad Bulja et al.
Optik	Suiz Konduksi Foto	2006	Mohammad Reza Chahamir et al.

KLASIFIKASI KONFIGURASI ANTENA TATASUSUN PANTULAN

Perubahan taburan arus permukaan elemen pemantul antena akan menghasilkan anjakan fasa sekaligus mengubah parameter kajian yang menjadi objektif antena tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula dicipta (Malagisi 1977). Terdapat beberapa jenis konfigurasi antena tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula ini iaitu frekuensi, corak radiasi, polarisasi mahupun hibrid (gabungan daripada mana-mana jenis konfigurasi). Ianya boleh terjadi pada nilai-nilai tertentu (diskrit) mahupun perubahan secara berterusan (linear). Bahagian ini akan membincangkan konsep parameter kajian antena ini diikuti dengan contoh aplikasinya.

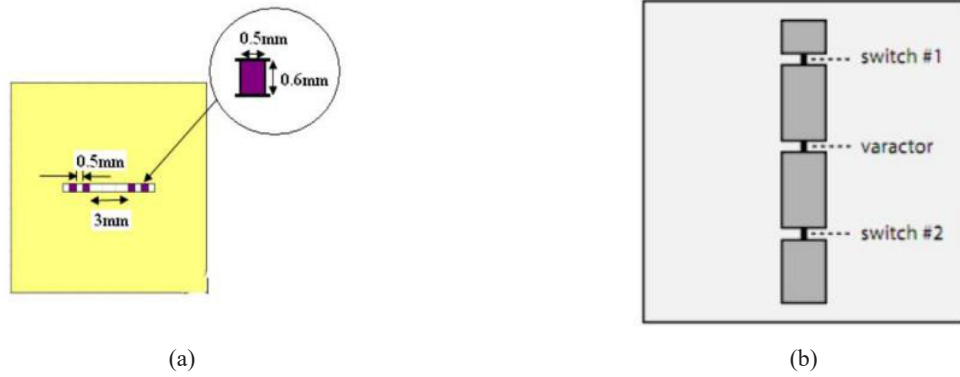
FREKUNSI

Frekuensi adalah parameter yang biasanya akan berubah jika perubahan radiasi pada elemen pemantul berlaku (Rahim et al. 2016; Farahwahida dan Aziz 2019). Ianya

boleh dicapai dengan menggunakan teknologi elektronik, mekanikal dan bahan boleh ubah kepada elemen pemantul pada antenna (Ismail dan Sopian 2009). Perubahan ke atas antena boleh diubah suai dengan memuatkan komponen penganjak fasa ke dalam tampalan atau slot antena. Pengubahsuaian ini membolehkan antena menukar talaan frekuensi operasinya.

Ismail dan Sopian (2009) telah menggunakan beberapa jalur kuprum untuk dimuatkan ke dalam slot dan bertindak sebagai suis. Dengan menukar bilangan jalur kuprum yang dimuatkan, panjang slot dapat divariasikan daripada 3mm kepada 7mm seperti Rajah 8(a). Oleh itu, taburan arus pada elemen pemantul sekaligus frekuensi operasi akan bertukar-tukar.

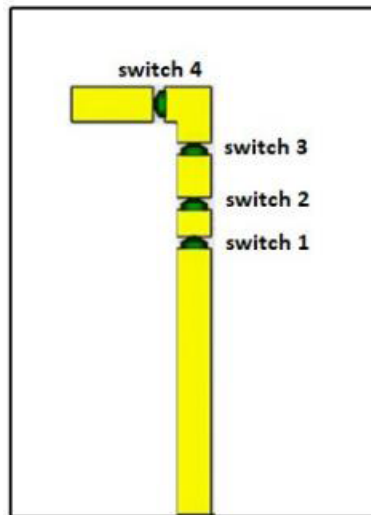
Rodrigo dan Jofre (2013) pula menggabungkan dua komponen diod dan varaktor di dalam satu slot untuk memaksimumkan kebolehan perubahan frekuensi seperti rajah 8(b). Apabila kedua-dua diod diaktifkan, empat frekuensi operasi berubah diantara 2.33Ghz hingga 3.54Ghz manakala integrasi varaktor di dalam slot itu membolehkan frekuensi diubah secara linear.



RAJAH 8. Contoh rekabentuk antenna tatasusun pantulan boleh ubah frekuensi dengan kaedah perubahan frekuensi: (a) secara diskrit (M Y Ismail dan Sopian 2009) (b) secara linear (Rodrigo dan Jofre 2013)

Inovasi terbaru untuk antenna boleh konfigurasi semula menggunakan parameter frekuensi adalah dengan menukar jumlah frekuensi operasi menggunakan integrasi komponen diod (Dildar et al. 2021). Terdapat 4 diod yang diletakkan

pada elemen pemantul seperti dalam Rajah 9. Diod tersebut kemudiannya dihidupkan dan dimatikan mengikut susunan yang menghasilkan perubahan jumlah frekuensi operasi.



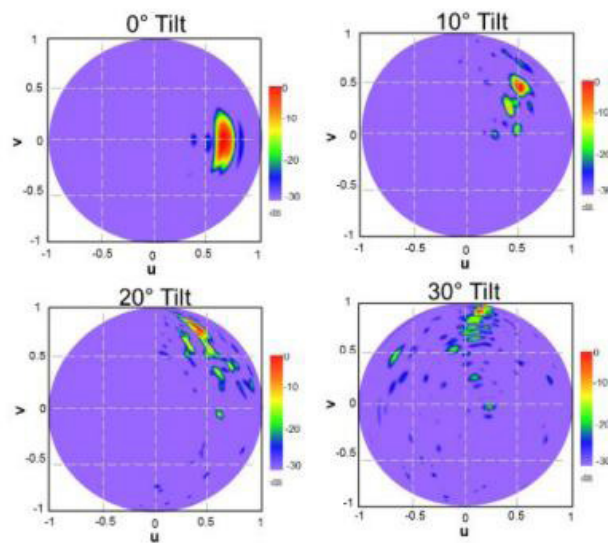
RAJAH 9. Reka bentuk antenna tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula dengan keupayaan menukar jumlah frekuensi operasi (Dildar et al. 2021).

CORAK RADIASI

Konfigurasi corak radiasi pada antenna tatasusun pantulan bermaksud konfigurasi sama ada bentuk corak radiasi, arah alur, atau gandaan (Salmon et al. 1974). Kaedah yang paling popular adalah dengan mengkonfigurasi arah alur utama. Sama seperti konfigurasi nilai frekuensi, konfigurasi arah alur boleh dicapai dengan mengubah nilai taburan arus pada elemen pemantul. Konfigurasi jenis ini boleh mengurangkan kehilangan pantulan, lantas fokus kepada arah yang dikehendaki dan akhirnya menjimatkan tenaga (Dubal dan Chaudhari 2020). Terdapat banyak kaedah yang boleh digunakan untuk konfigurasi corak radiasi antenna

tatasusun pantulan termasuk pergerakan secara mekanikal, mengubahsuai slot ataupun elemen pemantul menggunakan komponen elektronik mahupun bahan boleh ubah (Chang et al. 1986; Nayeri et al. 2015).

Setiap pergerakan termasuk mencondongkan antenna juga boleh menghasilkan konfigurasi arah alur walaupun terhad. Muhammad Inam Abbasi et al. (2019) menghasilkan antenna tatasusun pantulan mmwave yang condong. Elemen direkabentuk sebagai cincin bulatan untuk mendapatkan simetri yang bebas untuk dicondongkan. Condongan boleh dilakukan sehingga 30° dan menyediakan julat konfigurasi alur kira-kira ±60° seperti Rajah 10.

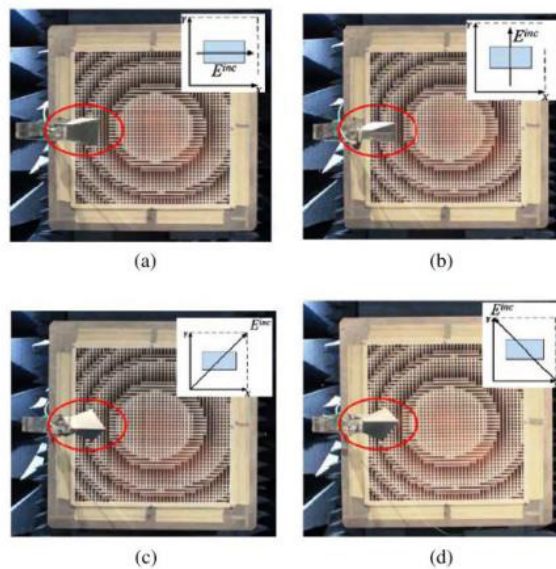


RAJAH 10. Contoh keputusan 3D pengukuran antenna attasusun pantulan yang dicondongkan (Abbasi et al. 2019)

POLARISASI

Antena yang menggunakan konfigurasi jenis polarisasi menunjukkan bahawa perubahan radiasi antenna ini boleh diubah arah polarisasinya sama ada dengan polarisasi linear (*linear polarization, LP*) ataupun polarisasi bulatan (*circular polarization, CP*). Polarisasi linear boleh dibahagikan kepada polarisasi mendatar (*horizontal polarization, HP*) dan polarisasi menegak (*vertical polarization, VP*) manakala polarisasi bulatan (*circular*

polarization, CP) pula terdiri daripada polarisasi bulatan tangan kiri (*left-hand circular polarization, LHCP*) dan polarisasi bulatan tangan kanan (*right-hand circular polarization, RHCP*) (Christodoulou et al. 2012). Perubahan polarisasi ini akan dapat mengurangkan kehilangan akibat perambatan berbilang laluan dan meningkatkan kualiti signal yang diterima (Farahwahida dan Aziz 2019). Mekanisme yang boleh digunakan untuk mencapainya adalah dengan mengubah suai struktur permukaan antenna (Malagisi 1977) atau memuatkan reaktans dalam rangkaian suapan (Zhang et al. 2019).



RAJAH 11. Posisi hon penyuap yang diputarkan dan boleh mengubah polarisasi antenna tatasusun pantulan (Dahri et al. 2018):
 (a) Polarisasi mendatar (b) Polarisasi menegak (c) Polarisasi bulatan tangan kanan (45° melawan arah jam daripada polarisasi mendatar)
 (d) Polarisasi bulatan tangan kiri (45° melawan arah jam daripada polarisasi menegak)

Sebuah antena tatasusun pantulan dengan menggunakan kaedah memutar antena hon pada pelbagai sudut telah dicipta (Dahri et al. 2018). Antena hon yang telah ditetapkan pada 0° asalnya, telah diputar kepada sudut 45° , 90° dan 135° lalu polarisasi yang asalnya RHCP bertukar kepada VP, HP dan LHCP. Polarisasi linear diperoleh dengan memutar kedudukan antena hon sebanyak 90° manakala polarisasi bulatan diperoleh dengan memutar antena hon sebanyak 45° melawan arah jam daripada polarisasi linear. Rajah 11 menunjukkan orientasi putaran antena hon yang telah dilakukan.

HIBRID

Antena boleh konfigurasi semula hibrid bermaksud radiasi antena antena ini boleh mengubah lebih daripada satu jenis konfigurasi sama ada frekuensi, corak radiasi atau polarisasi (Zhang et al. 2019). Konfigurasi hibrid ini biasanya menggunakan komponen elektronik atau teknologi optik dalam mencapai konfigurasi semula (You 2017).

Reka bentuk dwi-frekuensi dan dwi-polarisasi menggunakan dua cincin segi empat sepusat dengan ruang sela dengan kehadiran dua diod varaktor telah diperkenalkan (Tian et al. 2018). Hasilnya menunjukkan pada frekuensi 4.2GHz, arah polarisasi adalah mendatar manakala apabila ia ditukar kepada 6.5GHz, arah polarisasi bertukar kepada menegak. Kedua-dua keadaan juga menyediakan julat peralihan fasa yang hampir serupa iaitu 300° .

MEKANISME BOLEH KONFIGURASI SEMULA ANTENA TATASUSUN PANTULAN

Terdapat beberapa mekanisme dan teknologi yang boleh digunakan untuk membolehkan fungsi konfigurasi antena tatasusun pantulan. Kesemua mekanisme dan teknologi ini boleh dikelompokkan kepada empat iaitu mekanikal, komponen elektronik, bahan boleh ubah dan optik.

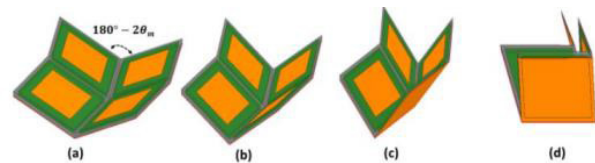
MEKANIKAL

Antena tatasusun boleh konfigurasi mekanikal boleh dicapai melalui pergerakan antena, elemen ataupun antena hon. Isu utama untuk teknologi ini adalah masa perubahan sudut imbas alur yang agak lambat dan rangkaian suapan yang rumit, tetapi keupayaannya untuk meliputi julat peralihan fasa yang besar dan mengurangkan kehilangan tidak dapat dinafikan (Mirmozafari et al. 2021).

Memutar dan mencondongkan satah antena adalah teknik yang paling biasa digunakan untuk mendapatkan peralihan fasa antena tatasusun pantulan secara mekanikal.

Ianya hanya memerlukan satu mesin penggerak sekaligus dilihat sebagai tidak rumit tetapi kelajuan imbasan alur masih perlu dikompromi (Mirmozafari et al. 2021). Kaedah ini bukan sahaja boleh mengurangkan kehilangan tetapi juga boleh meliputi julat fasa yang besar. Memandangkan putaran sebanyak ϕ akan menghasilkan 2ϕ , putaran 180° sudah cukup untuk mendapatkan satu kitaran lengkap anjakan fasa 360° (Yang et al. 2017). Konsep putaran biasanya menyediakan liputan julat fasa sehingga 360° , manakala teknik mencondongkan akan menghadkan liputan julat fasa (Asgharian et al. 2020).

Satu kajian menarik mengenai kaedah pergerakan fizikal ini telah dilakukan oleh Abdul-Sattar Kaddour iaitu antena tatasusunan yang dicipta boleh dilipat mengikut teknik origami Miura-Ori (Kaddour et al. 2020). Tujuan antena ini dicipta boleh dilipat adalah kerana untuk menyediakan antena bersaiz kecil sekali gus memudahkan proses membawa antena ke angkasa. Antena tatasusunan dengan ketebalan 1.615mm ini boleh dilipat lebih kurang sehingga 6 kali lebih kecil dengan pelbagai sudut condong seperti Rajah 12. Saiz fizikal antena akan berkurangan apabila antena dilipat, sekaligus menukar frekuensi operasi antena.



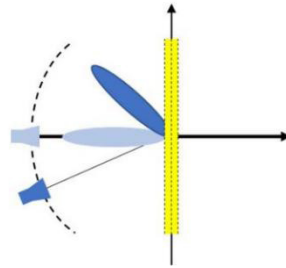
RAJAH 12. Darjah kecondongan lipatan antena dengan kaedah Miura-Ori Origami (Kaddour et al. 2020): (a) $\theta_m = 30^\circ$, (b) $\theta_m = 40^\circ$, (c) $\theta_m = 60^\circ$, (d) $\theta_m = 85^\circ$

Proses menggerakkan elemen secara mekanikal pula boleh dilakukan dengan menggunakan mikromotor (Yang et al. 2017) atau dengan melaraskan ketinggian elemen pemantul (Yang et al. 2018). Dengan reka bentuk elemen pemantul dua cincin sepusat dengan ruang sela, ianya boleh menyediakan mekanisme fasa yang unik apabila ia digunakan di dalam teknik putaran elemen lalu mendapat peralihan fasa 360° dengan imbasan secara linear serta polarisasi silang dan kehilangan balikan yang rendah. Penulis yang sama juga menggunakan teknik yang berbeza dalam menggerakkan elemen dengan melaraskan ketinggian satah yang berslot secara mekanikal menggunakan *pedestal* dan *shaft*. Keputusan menunjukkan liputan julat fasa yang dicapai ialah 324° . Menggunakan mikromotor pada setiap elemen walaupun akhirnya akan membuatkan struktur menjadi kompleks dan meningkatkan kos.

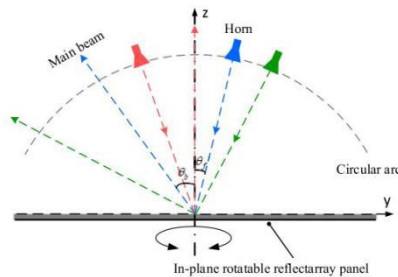
Satu lagi cara untuk mencapai konfigurasi antena tatasusun pantulan secara mekanikal ialah dengan

menggerakkan antena hon. Kaedah ini bukan sahaja memudahkan konfigurasi, bahkan mengurangkan kos dan mengurangkan penggunaan tenaga elektrik. Antena hon biasanya digerakkan secara melengkung seperti Rajah 13 kerana ia mempunyai prestasi yang lebih baik berbanding pergerakan secara lurus (Mirmozafari et al. 2021). Menambah jumlah antena hon di laluan melengkung juga membantu untuk mendapatkan julat fasa yang lebih baik (Nayeri et al. 2013) dan mengurangkan kehilangan gandaan (Gao et al. 2015).

Terdapat juga ciptaan yang menggabungkan pergerakan mekanikal secara serentak. Menzel dan Kessler (2009) sebagai contoh, telah mencadangkan untuk menggunakan dua antena hon (bifokal) dengan pemantul satah boleh condong. Gabungan ini menghasilkan prestasi peralihan fasa pada satah E dan satah H. Idea gabungan lain yang telah dicadangkan ialah gabungan pergerakan antena hon bersama putaran satah antena seperti Rajah 14 dan ia menghasilkan liputan imbasan alur $\pm 70^\circ$ (Wu et al. 2020).



RAJAH 13. Pergerakan antena hon menggunakan gerakan melengkung (Mirmozafari et al. 2021)



RAJAH 14. Kombinasi putaran antena hon dan satah antena (Wu et al. 2020)

Penciptaan baru bagi pergerakan antena hon telah dicadangkan Li et al. (2021), dengan mengoptimalkan algoritma genetik antena tatasusun pantulan untuk meningkatkan prestasi. Pengoptimuman ini menunjukkan ia boleh meningkatkan prestasi pengimbasan alur dan menghasilkan gandaan yang lebih tinggi.

KOMPONEN ELEKTRONIK

Antena tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula menggunakan komponen elektronik semakin menjadi perhatian kerana ia memberikan kelajuan imbasan yang tinggi, pembungkusan yang baik dan mengurangkan saiz. Ianya mempunyai dua jenis mod peralihan fasa iaitu secara diskrit atau linear. Diod PIN dan FET boleh menyediakan imbasan secara diskrit sahaja (Iqbal et al. 2020) manakala

diod varaktor dan MEMS boleh menyediakan keduanya (Trampler dan Lovato 2020).

Perubahan secara diskrit mempunyai kelebihan kehilangan balikan yang lebih rendah, keadaan fasa yang stabil dan struktur yang lebih ringkas. Walau bagaimanapun, teknik ini menyebabkan ralat pengkuantitan fasa yang meningkatkan cuping sisi (SLL). Tidak seperti fasa diskrit, teknik fasa perubahan secara linear dapat mengelakkan ralat pengkuantitan fasa tetapi cabarannya adalah untuk mengawal nilai bekalan voltan (Trampler dan Lovato 2020).

Han et al. (2019) hanya menggunakan satu PIN diod sebagai penganjak fasa tetapi mencapai imbasan alur yang tinggi sehingga $\pm 50^\circ$. Permukaan selektif frekuensi (FSS) pula mula diaplikasikan dalam antena tatasusun pantulan oleh Tahseen et al. (2019) dengan lapisan atas terdiri daripada elemen pemantul segi empat tepat dan satu lagi

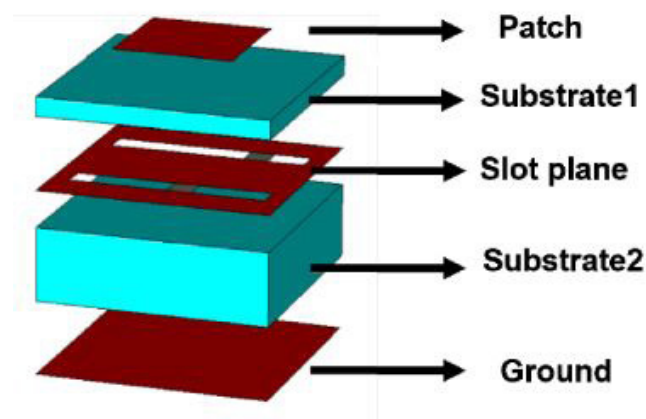
lapisan terdiri daripada elemen berslot bulatan yang berfungsi sebagai FSS. Varaktor telah dimuatkan pada lapisan atas dan mencapai anjakan fasa sehingga 250° .

FET ialah satu lagi teknologi komponen elektronik yang boleh menyediakan pensuisan dalam fasa diskrit sahaja. Berbanding dengan diod PIN, peranti semikonduktor ini menawarkan penggunaan kuasa voltan yang lebih rendah tetapi kehilangan suapan yang lebih tinggi (Nayeri et al. 2015). Antena tatasusun pantulan dengan gallium arsenid (GaAs) FET di bahagian belakang elemen telah diperkenalkan oleh Schmid et al. (2020). Ia membenarkan penukaran fasa sama ada kepada 0° atau 180° . Antena jenis ini juga mampu meringkaskan struktur, mengecilkan saiz elemen dan mengurangkan jarak antara elemen.

Varaktor berbeza berbanding dengan PIN diod kerana ia boleh menawarkan imbasan secara diskrit atau linear. Ia berfungsi dengan penggunaan kuasa yang sederhana (Nayeri et al. 2015; Dahri et al. 2018). Peranti ini akan mengawal bekalan voltan untuk mengubah nilai muatan

kapasitan elemen sekaligus mengubah julat fasa (Nayeri et al. 2015). Sebuah elemen yang dimuatkan varaktor pada antena satu lapis telah direka bentuk secara optimum dari segi dimensi, kedudukan diod, kedudukan vias sehingga dapat mencapai julat fasa sehingga 360° dengan kehilangan balikan yang rendah (Kausar et al. 2020).

MEMS adalah satu lagi jenis komponen elektronik yang menggunakan pergerakan mekanikal untuk menggerakkan sistem elektronik atau optiknya (Farahwahida dan Aziz 2019). Sama seperti varaktor, ia boleh menyediakan imbasan secara diskrit atau linear. Kehilangan suapan dan penggunaan bekalan kuasa yang rendah adalah kelebihan komponen ini (Farahwahida dan Aziz 2019; Hum dan Perruisseau-Carrier 2014). Yang et al. (2015) meletakkan dua suis MEMS di tengah-tengah satah slot seperti dalam Rajah 15 dan vias digunakan untuk menggerakkan dua suis MEMS secara bebas. Tujuan reka bentuk ini adalah untuk mencapai empat keadaan fasa yang boleh menghasilkan anjakan fasa sehingga 360° .



RAJAH 15. Contoh struktur antena tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula MEMS (Yang et al. 2015)

BAHAN BOLEH UBAH

Bahan boleh ubah adalah satu lagi teknologi yang boleh menghasilkan konfigurasi antena tatasusun pantulan. Ianya terdiri daripada bahan yang mempunyai keupayaan untuk menukar potensi kimianya apabila voltan dibekalkan (Farahwahida dan Aziz 2019) seperti hablur cecair, ferroelektrik, graphene dan elektrokromik (Dahri et al. 2018; Senad et al. 2020).

Hablur cecair (*liquid crystal*) adalah bahan boleh ubah yang paling selalu digunakan dan bahannya adalah perantaraan antara pepejal dan kristal (Dahri et al. 2018). Orientasi hablur cecair akan berubah daripada seranjang kepada selari apabila bekalan voltan diberikan. Nilai kebertelusan bahan hablur cecair yang berubah akan

memberi perubahan kepada peralihan fasa (Farahwahida dan Aziz 2019). Antena tatasusun pantulan integrasi bahan hablur cecair dengan julat fasa 305° dan kehilangan dielektrik yang rendah pada 19GHz telah dibentangkan oleh Cai et. al (2019).

Bahan ferroelektrik pula mempunyai sifat molekul yang berkebolehan untuk mempunyai polarisasi elektrik secara spontan. Polarisasi elektrik ini pula boleh bertukar kepada arah bertentangan apabila mendapat bekalan voltan daripada luar (Yusof et al. 2013). Perubahan polarisasi ini seterusnya akan mengubah nilai kebertelusan bahan ini (Velu et al. 2007) sekaligus bertindak sebagai penganjak fasa (Xu 2018; Ismail et al. 2013). Barium Strontium Titanate (BST) biasanya adalah jenis bahan ferroelektrik yang dipilih kerana potensinya yang besar sebagai

peralihan fasa gelombang mikro memandangkan ianya mempunyai nilai kebertelusan yang tinggi, tindak balas imbasan yang pantas dan keupayaan pengendalian kuasa yang baik (Ketkar 2013). Karnati et al. (2017) mencadangkan untuk memuatkan bahan BST secara kapasitif dalam slot di bahagian tengah elemen pemantul. Sifat dielektrik BST berubah apabila mendapat variasi voltan dan seterusnya mengubah taburan arus yang bertindak sebagai kapasitor dan menghasilkan imbasan alur sebnayak $\pm 25^\circ$.

Antena tatasusun boleh konfigurasi semula Graphene adalah masih lagi baru dalam dunia penyelidikan (Dahri et al. 2018). Graphene ialah bahan yang dibina oleh atom karbon yang berbentuk kekisi sarang lebah (Sun et al. 2019) dan merupakan bahan nano yang sangat nipis dan keras (Shi et al. 2021). Ia juga menunjukkan sifat konduktor elektrik dan haba yang baik dan sesuai digunakan untuk antena tatasusun pantulan aplikasi THz (Dahri et al. 2018; Sun et al. 2019). Dengan membekalkan voltan yang minimum, potensi kimia pada graphene akan diubah dan mengubah taburan arus dan memberikan anjakan fasa (Shi et al. 2021; Schmid et al. 2020).

Bahan boleh ubah yang paling terbaru ialah bahan elektrokromik yang boleh menukar warna, kelegapan atau sifat apabila menerima bekalan voltan (Mortimer et al. 2011). Peranti eletrokromik pada asasnya terdiri daripada sekurang-kurangnya 5 lapisan; elektrod, elektrolit, bahan elektrokromik dan dua lapisan elektrod pengalir. Dengan membekalkan voltan kepada peranti ini melalui elektrod pengalir, ion kemudiannya mengalir daripada elektrod melalui elektrolit dan ke dalam lapisan elektrokromik dengan menggunakan konsep redoks (Chua et al. 2019). Perubahan pada sifat bahan ini kemudian menyumbang kepada anjakan fasa (Bulja et al. 2018; Noroozariab et al. 2018).

OPTIK

Teknologi optik juga boleh menyumbang kepada kebolehpayaan konfigurasi semula antena tatasusun pantulan. Peter Alizadeh et al. (2016) membentangkan bahawa keamatan kuasa optik diod pemancar cahaya infra merah (IR-LED) boleh menyediakan mekanisme untuk menukar gandaan radiasi dalam substrat yang mengandungi silikon. Keputusan menunjukkan bahawa variasi gandaan sehingga 2.6 dBi dicapai pada frekuensi operasi 38GHz. Variasi gandaan boleh digunakan untuk memanipulasi alur sisi dan imbasan alur utama. Bahan yang diaktifkan secara optik seperti silikon telah digunakan pada substrat untuk menyediakan konfigurasi semula. Apabila terdapat sumber cahaya optik yang dibekalkan, lubang elektron dicipta melalui penyerapan foton seterusnya mencipta plasma dalam bahan. Plasma ini sangat penting untuk membolehkan

isyarat elektrik berubah (Peter Alizadeh et al. 2016; Tawk et al. 2010; P. Alizadeh, et al. 2017). Teknik ini memerlukan sumber kuasa optik yang tinggi (Su et al. 2012), namun penggunaan silikon sebagai substrat mampu mengurangkan penggunaan kuasa optik ini (Peter Alizadeh et al. 2016).

KESIMPULAN

Latar belakang, klasifikasi konfigurasi dan teknologi-teknologi yang digunakan antena tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula telah dibentangkan. Penghasilan antena tatasusun pantulan boleh konfigurasi boleh dimulakan dengan pemilihan jenis konfigurasi serta teknologinya sebelum proses mereka bentuk elemen dan antena. Proses pengubahsuaian dan pengoptimuman juga agak mencabar kerana julat fasa mudah terkesan dengan perubahan reka bentuk elemen. Walaubagaimanapun, antena tatasusun pantulan boleh konfigurasi semula sudah menjadi satu bidang penyelidikan yang menarik di mana terdapat banyak peluang yang boleh diterokai dan seterusnya akan memberi manfaat kepada komunikasi tanpa wayar, pengimejan, penderiaan terutamanya untuk aplikasi 5G.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia atas penajaan projek ini di bawah program Fundamental Research Grant Scheme dengan nombor geran FRGS/1/2020/TK0/UKM/02/1.

RUJUKAN

- Abbasi, Muhammad Inam, Muhammad Hashim Dahri, Mohd Haizal Jamaluddin, Norhudah Seman, Muhammad Ramlee Kamarudin, and Noor Hafizah Sulaiman. 2019. Millimeter wave beam steering reflectarray antenna based on mechanical rotation of array. *IEEE Access* 7:145685–91. .
- Alizadeh, P., C. G. Parini, and K. Z. Rajab. 2017. Optically reconfigurable unit cell for ka-band reflectarray antennas. *Electronics Letters* 53(23):1526–28.
- Alizadeh, Peter, Andre Sarker Andy, Clive Parini, and Khalid Z. Rajab. 2016. A reconfigurable reflectarray antenna in ka-band using optically excited silicon. *10th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2016*.
- Asgharian, Reza, Bijan Zakeri, and Mohammad Yazdi. 2020. A narrow beam, beam steerable and low side-lobe reflectarray based on macro electro-mechanical technique. *Progress In Electromagnetics Research C* 100:73–82.
- Awan, Fahim Gohar, Tariq Mehmood, and M Latif.

2020. Reconfigurable antenna for 4G LTE and 5G applications. *Procedia Manufacturing*, 793–99.
- Berry, D. G., R. G. Malech, and W. A. Kennedy. 1963. The reflectarray antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 11(6):645–651
- Bialkowski, M. E. 2007. Reflectarrays: Potentials and challenges. *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 1050-1053*.
- Bildik, Saygin, Sabine Dieter, Carsten Fritzsich, Michael Frei, Christoph Fischer, Wolfgang Menzel, and Rolf Jakoby. 2011. Reconfigurable liquid crystal reflectarray with extended tunable phase range. *European Microwave Conference, EuMC 1292–95*.
- Boccia, L., F. Venneri, and G. D. Massa. 2001. A varactor loaded reflectarray antenna. *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, 1–3.
- Bulja, S., R. Kopf, K. Nolan, R. Lundy, A. Tate, T. C. Hu, M. Noroozariab, R. Cahill, and W. Templ. 2017. Tuneable dielectric and optical characteristics of tailor-made inorganic electro-chromic materials. *Scientific Reports* 7(1):3–10.
- Bulja, S., R. Kopf, A. Tate, and T. Hu. 2016. High frequency dielectric characteristics of electrochromic, WO₃ and NiO films with LiNbO₃ electrolyte. *Scientific Reports*. 6:28839
- Cai, Longzhu, Zhi Hao Jiang, and Wei Hong. 2019. Evaluation of reconfigurable reflectarray antenna element at 19 GHz based on highly anisotropic liquid crystal material. *2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, ICCEM 2019 - Proceedings*.
- Carrasco, Eduardo, Mariano Barba, and José A Encinar. 2012. X-band reflectarray antenna with switching-beam using PIN diodes and gathered elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 60(12).
- Carrasco, Eduardo, Michele Tamagnone, and Julien Perruisseau-Carrier. 2013. Tunable graphene-based reflectarray element for reconfigurable beams. *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2013*, no.133583:1779–82.
- Chaharmir, Mohammad Reza, Jafar Shaker, and Michel Cuhaci. 2006. Novel photonically-controlled reflectarray antenna. *IEEE Transactions on Antennas And Propagation* 54(4):1134–41.
- Chang, Esin, Stuart A. Long, and William F. Richards. 1986. An experimental investigation of electrically thick rectangular microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 34(6):767–72.
- Christodoulou, Christos G., Youssef Tawk, Steven A. Lane, and Scott R. Erwin. 2012. Reconfigurable antennas for wireless and space applications. *Proceedings of the IEEE*, 100:2250–61.
- Chua, Ming Hui, Tao Tang, Kok Haw Ong, Wei Teng Neo, and Jian Wei Xu. 2019. Chapter 1: Introduction to electrochromism. *RSC Smart Materials* (33):1–21.
- Costantine, Joseph. 2010. Design , optimization and analysis of reconfigurable antennas. Thesis PhD, University New Mexico
- .Dahiya, Menal. 2017. Need and advantages of 5G wireless communication systems. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies* 7782 (December):48–51.
- Dahri, Muhammad Hashim, Mohd Haizal Jamaluddin, Mohsen Khalily, Muhammad Inam Abbasi, Raghuraman Selvaraju, and Muhammad Ramlee Kamarudin. 2018. Polarization diversity and adaptive beamsteering for 5G reflectarrays: A review. *IEEE Access* 6:19451–64.
- Dangi, Ramraj, Praveen Lalwani, Gaurav Choudhary, Ilsun You, and Giovanni Pau. 2022. Study and investigation on 5G technology: A systematic review. *Sensors* 22(1):1–32.
- Dildar, Haris, Faisal Althobiani, Ikhlas Ahmad, Wasi Ur Rehman Khan, Sadiq Ullah, Naveed Mufti, Shakir Ullah, Fazal Muhammad, Muhammad Irfan, and Adam Glowacz. 2021. Design and experimental analysis of multiband frequency reconfigurable antenna for 5G and Sub-6 Ghz wireless communication. *Micromachines* 2021, 12,32
- Dubal, Sonal, and Anjali Chaudhari. 2020. Mechanisms of reconfigurable antenna: A review. *Proceedings of the Confluence 2020 - 10th International Conference on Cloud Computing, Data Science and Engineering*, 576–80.
- Farahwahida, Nur, and Ab Aziz. 2019. Design and construction of pattern reconfigurable antenna with fine direction resolution. Thesis PhD, Brunel University London.
- Fusco, V F. 2005. Mechanical beam scanning reflectarray. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 53(11):3842–44.
- Gao, Lin, Fan Yang, Shenheng Xu, Maokun Li, and Xiaolong Liu. 2015. Design of a beam-scanning reflectarray antenna with an offset mechanically rotational horn. *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)* 2015: 2281–82.
- Guo, Lu, Peng Khiang Tan, and Tan Huat Chio. 2015. A simple method to realize polarization diversity in broadband reflectarrays using single-layered rectangular patch elements. *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*: 2161–62.
- Han, Jiaqi, Long Li, Guangyao Liu, Zhao Wu, and Yan Shi. 2019. A wideband 1 bit 12 × 12 reconfigurable beam-scanning reflectarray: design, fabrication, and measurement. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 18(6):1268–72.
- Huang, John, and José A Encinar. 2008. *Reflectarray Antennas*. Edited by Mohamed E. El-Hawary, R. Abari S. Basu, A. Chatterjee T. Chen, T. G. Croda S. Farshchi, B. M. Hammerli R. J. Herrick, and S. V.

- Kartalopoulos M. S. Newman. A John Wiley & Sons Inc., Publication.
- Hugo F. Pues, Antoine R. Van De Capelle. 1989. An impedance-matching technique for increasing the bandwidth of microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 37(11):1345–54.
- Hum, Sean Victor, and Julien Perruisseau-Carrier. 2014. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 62(1):183–98.
- Iqbal, Shahid, and Muhammad Kamran Shereen. 2020. Radiation pattern reconfigurable antenna for 5G applications. *Journal of Information Communication Technologies and Robotic Applications*, 46–52.
- Ismail, M Y, and R Cahill. 2005. Beam steering reflectarrays using liquid crystal substrate. *Tenth IEEE High Frequency Postgr-Aduiate Student Colloquium*: 62–65.
- Ismail, M Y, M Hashim Dahri, and W N Zaihasra. 2013. Characterization of material properties for tunable reflectarray antenna design. *AIP Conference Proceeding* 1528, 237
- Ismail, M. Y., and M. H. M. Sopian. 2009. Analysis of reconfigurable reflectarray antenna using frequency tuning method within x-band frequency range. *IEEE International Conference on Communications*:19–23.
- Kaddour, Abdul Sattar, Constantinos L. Zekios, and Stavros V. Georgakopoulos. 2020. A reconfigurable origami reflectarray. *14th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2020*,23–26.
- Karnati, Kalyan K., Michael E. Trampler, and Xun Gong. 2017. A monolithically BST-Integrated K-{a} -band beamsteerable reflectarray antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 65(1):159–66.
- Karnati, Kalyan K, Student Member, Ya Shen, Michael E Trampler, Siamak Ebadi, Parveen F Wahid, Senior Member, Xun Gong, and Senior Member. 2015. “A BST-integrated capacitively loaded patch for K a - and X -band beamsteerable reflectarray antennas in satellite communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 63(4):1324–33.
- Karnati, Kalyan. 2019. Beam-steerable and reconfigurable reflectarray antennas for high gain space applications. Thesis PHD. University of Central Florida.
- Kausar, Shafaq, Ahmed Kausar, Saeideh Shad, and Hani Mehrpouyan. 2020. Electronically controlled unit cell for single layer reconfigurable reflect-array antenna. *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, IEEECONF 2020-Proceedings*.
- Ketkar, Supriya Ashok. 2013. Synthesis, characterization and applications of barium strontium titanate thin film structures. Thesis PhD University of South Florida.
- Legay, Hew, Batrice Pinte, Michel Charrier, Afshin Ziaep, Etienne Girard, and Raphael Gillard. 2003. A steerable reflectarray antenna with mems control. *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, 494–99.
- Li, Mengjiao, Yu Xiao, Bin Xi, and Houjun Sun. 2021. Aperture phase GA optimization for reflectarray antennas with feed lateral displacement. *2021 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*: 1–3.
- Malagisi. 1977. Microstrip Reflectarray Antenna Program. New York Rome air development center. Rome Air Development Center, GRIFFISS AIR FORCE BASE, NEW YORK 13441.
- Marin, Radu, Alexander Mössinger, Jens Freese, Stefan Müller, and Rolf Jakoby. 2005. Basic investigations of 35 GHz reflectarrays and tunable unit-cells for beamsteering applications. *2005 European Microwave Conference*.
- Menzel, Wolfgang, and Dominik Kessler. 2009. A folded reflectarray antenna for 2D scanning. *German Microwave Conference, GeMIC 2009*, 6–9.
- Mirmozafari, Mirhamed, Zongtang Zhang, Meng Gao, Jiahao Zhao, Mohammad Mahdi Honari, John H. Booske, and Nader Behdad. 2021. Mechanically reconfigurable, beam-scanning reflectarray and transmitarray antennas: A review. *Applied Sciences (Switzerland)* 11,6890.
- Moessinger, A, R Marin, S Mueller, J Freese, and R Jakoby. 2005. Basic investigations of 35 GHz reflectarrays and tunable unit-cells for beamsteering applications. *35th European Microwave Conference 2005 - Conference Proceedings 3:2015-2018*
- Mohammadirad, M, and N Komjani. 2011. The effect of feed position on the performance of a broadband reflectarray. *2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)* 101–4.
- Mortimer, Roger J. 2011. Electrochromic materials. *Annual Review of Materials Research* 41:241–68.
- Muellert, F A Miranda C H, F W Van Keuls, and R R Romanofskyl. 2001. Evaluation of ferroelectric BaxSrl- x Ti03 thin films driven by phase shifters for reflectarray applications. *Material Research Society Symposium Proceedings Vol.656E* 656:1–12.
- Nayeri, Payam, Fan Yang, and Atef Z. Elsherbeni. 2013. Bifocal design and aperture phase optimizations of reflectarray antennas for wide-angle beam scanning performance. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 61(9):4588–97.
- Nayeri, Payam, Fan Yang, and Atef Z Elsherbeni. 2015. Beam-scanning reflectarray antennas: a technical overview and state of the art. *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 57.
- Norooziarab, Majid, Senad Bulja, Robert Cahill, Rose Kopf, Ting Chen Hu, and Alaric Tate. 2018. Variable Temperature broadband microwave and millimeter-wave characterization of electrochromic (WO3/

- LiNbO₃/NiO) thin films. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 66(2):1070–80.
- Operation, High Speed, Cmos Vertical, and Cavity Surface. 1990. Broadband two-layer microstrip antenna. *IEE Electronics Letters*, 13:1189–91.
- Phillion, Rudi H., and Michal Okoniewski. 2008. Improving the phase resolution of a micromotor-actuated phased reflectarray. *1st Microsystems and Nanoelectronics Research Conference, MNRC 2008*:169–72.
- Rahim, M. K.A., M. R. Hamid, N. A. Samsuri, N. A. Murad, M. F.M. Yusoff, and H. A. Majid. 2016. Frequency reconfigurable antenna for future wireless communication system. *European Microwave Week 2016: "Microwaves Everywhere", EuMW 2016 - Conference Proceedings; 46th European Microwave Conference, EuMC 2016*,965–70.
- Daniel Rodrigo, and Luis Jofre. 2013. A Frequency Reconfigurable Cell for beam scanning reflectarray. *2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)* 1666–67.
- Romanofsky, Robert, Carl Mueller, and Chandra V. Chandrasekar. 2009. Concept for a low cost, high efficiency precipitation radar system based on ferroelectric reflectarray antenna. *IEEE National Radar Conference-Proceedings, NASA/TM—2009-215663*
- Salmon, J. A., R. Pierrot, and Y. Commault. 1974. X band reflect-array with integrated pin diodes. *Avionic and Space Division*, 376–78.
- Saravanan, M., and M.J.S. Rangachar. 2018. Polarization reconfigurable square patch antenna for wireless communications. *Advanced Electromagnetics* 7(4):103–8.
- Schmid, R. L., D. B. Shrekenhamer, O. F. Somerlock, A. C. Malone, T. A. Sleasman, and R. S. Awadallah. 2020. S-Band GaAs FET reconfigurable reflectarray for passive communications. *IEEE Radio and Wireless Symposium, RWS 2020*:91–93.
- Senad, Bulja. 2020. Electrochromic reflectarray antenna application, european patent, issued 2020.
- Shi, Li Ping, Qing He Zhang, Shi Hui Zhang, Chao Yi, and Guang Xu Liu. 2021. Efficient graphene reconfigurable reflectarray antenna electromagnetic response prediction using deep learning. *IEEE Access* 9:22671–78.
- Shi, Liping, Qinghe Zhang, Shihui Zhang, Guangxu Liu, and Chao Yi. 2021. Accurate characterization of graphene reconfigurable reflectarray antenna element by SVR. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques* 6:50–55.
- Shortsleeve, Cassie, and Capetta Amy. 2022. What is big data, and what are its benefits? *Prevention.Com*, 1–17.
- Sun, Shunlai, Wentao Li, and Xiaowei Shi. 2019. A Reconfigurable graphene reflectarray for generation of vortex THz waves. *2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT 2019 - Proceedings* 15:1537–40.
- Tahseen, Muhammad M., Ahmed A. Kishk, and Tayeb A. Denidni. 2019. X-band reconfigurable reflectarray element using frequency selective surface. *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, APSURSI 2019-Proceedings* 2(1): 1961–62.
- Tawk, Y, Alex R Albrecht, S Hemmady, Gunny Balakrishnan, and Christos G Christodoulou. 2010. Optically pumped frequency reconfigurable antenna design. *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters* 9: 280–83.
- Tian, Shun Cheng, Yu Ying Zhao, and Long Li. 2018. A novel dual-band and dual-polarized reconfigurable reflectarray antenna element. *2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference, CSQRWC 2018*,0–1.
- Trampller, Michael E, and Ricardo E Lovato. 2020. Dual-resonance continuously beam scanning X-band reflectarray antenna. *IEEE Transactions On Antennas And Propagation* 68(8):6080–87.
- Us, P M, Patent Application, Electrochromic Reflectarray, and Antenna Patent. 2018. Electrochromic reflectarray antenna. *US Patent Application*, issued 2018.
- Vélu, Gabriel, Karine Blary, Ludovic Burgnies, Aurélien Marteau, Grégory Houzet, Didier Lippens, and Jean-claude Carru. 2007. A 360 BST phase shifter with moderate bias voltage at 30 GHz. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 55(2): 438–44.
- Wu, Geng Bo, Shi Wei Qu, and Chi Hou Chan. 2017. Wide-angle beam scanning reflectarray antenna design using phase matching method. *10th Global Symposium on Millimeter-Waves, GSMM 2017*,132–33.
- Wu, Geng Bo, Shi Wei Qu, Shiwen Yang, and Chi Hou Chan. 2020. Low-cost -D beam-steering reflectarray with $\pm 70^\circ$ scan coverage. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 68(6):5009–14.
- Xu, Xiaoshan. 2018. A brief review of ferroelectric control of magnetoresistance in organic spin valves. *J Materiomics* 4(1): 1–12.
- Yang, Xue, Shenheng Xu, Fan Yang, and Maokun Li. 2015. Design of a 2-bit reconfigurable reflectarray element using two MEMS switches. *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest) 2015-October*:2167–68.
- Yang, Xue, Shenheng Xu, Fan Yang, Maokun Li, Houfei Fang, and Yangqing Hou. 2015. Design of a circularly polarized reconfigurable reflectarray using micromotors. *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest) 2015-October*:2155–56.
- Yang, Xue, Shenheng Xu, Fan Yang, Maokun Li, Houfei Fang, Yangqing Hou, Shuidong Jiang, and Lei Liu.

2018. A mechanically reconfigurable reflectarray with slotted patches of tunable height. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 17(4):555–58.
- Yang, Xue, Shenheng Xu, Fan Yang, Maokun Li, Yangqing Hou, Shuidong Jiang, and Lei Liu. 2017. A broadband high-efficiency reconfigurable reflectarray antenna using mechanically rotational elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 65(8):3959–66.
- You, Yingjie. 2017. The design of novel pattern reconfigurable antennas for mobile networks. Thesis PhD, The University Of Sheffield.
- Zhang, Shuting, Qingsheng Zeng, Yuqiu Shang, and Yong Wu. 2019. An overview of antenna reconfiguration technologies: Overview of reconfigurable antenna. *Proceedings 2019 International Conference on Information Technology and Computer Application, ITCA 2019*, 25–28.