

## Sorotan Perkembangan Rekabentuk Antena Jalur Mikro Ekadenyut

(An Overview on Monopulse Microstrip Antenna Design Evolution)

Kamarulzaman Mat, Norbahiah Misran, Mohammad Tariqul Islam & Mohd Fais Mansor

*Dept. of Electrical, Electronic and System Engineering,  
Faculty of Engineering & Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia*

*\*Corresponding authors: kamarulzaman@ukm.edu.my; bahiah@ukm.edu.my*

*Received 16 May 2021, Received in revised form 19 May 2021  
Accepted 25 May 2021, Available online 30 August 2021*

### ABSTRAK

*Sistem radar ekadenyut berfungsi untuk mengesan objek sasaran dengan menggunakan isyarat Jumlah dan Perbezaan daripada isyarat pantulan. Penggunaan antena jenis parabola dalam sistem radar konvensional mempunyai kelemahan dari segi ruang, jisim dan kos pembuatan. Oleh itu, antena jalur mikro telah dicadangkan kerana ia berprofil rata, ringan dan lebih murah untuk difabrikasi. Pelbagai peranti diguna untuk menghasilkan isyarat jumlah dan perbezaan yang penting seperti persimpangan hibrid, pengganding berarah, pembanding dan lain-lain kaedah berkaitan dikaji dalam kertas ini. Ini kerana setiap peranti mempunyai kelebihan dan kekangan tersendiri. Antena jalur mikro ekadenyut juga boleh direkabentuk pada lapisan tunggal dan berbilang. Struktur antena berlapisan tunggal bersaiz lebih kecil dan berkos rendah. Walaupun begitu, kekurangannya adalah ia mempunyai lebar jalur yang rendah. Sebaliknya, struktur berbilang lapisan pula mempunyai lebar jalur yang tinggi berbanding lapisan tunggal. Namun, pada masa yang sama ia bersaiz lebih tebal, sukar untuk diintegrasikan serta memerlukan kos pembuatan yang lebih mahal. Didapati gabungan antara rekabentuk antena berstruktur berlapisan tunggal dengan pengganding hibrid berpotensi memberi kelebihan dari segi keringkasan, ruang dan kos.*

*Kata kunci: Antena ekadenyut; jalur mikro; isyarat jumlah; rangkaian pembanding*

### ABSTRACT

*A monopulse radar system functions to detect targeted objects by using Sum and Difference signals from the reflected signals. The use of parabolic type antennas in conventional radar systems has disadvantages in terms of space, mass, and manufacturing costs. Therefore, microstrip antennas have been proposed because they are flat, lightweight, and cheaper to fabricate. Multiple devices used to produce the important sum and difference signals i.e., hybrid junctions, directional coupler, comparator, and other related methods are studied in this paper. This is due to each of them has their own advantages and limitations. Monopulse microstrip antenna also can be designed in single and multiple layers. Single layer antenna structure is smaller in size and low cost. However, the downside of this structure is having low bandwidth. On the other hand, the multi-layer structure has a higher bandwidth compared to single layer. Nevertheless, at the same time it is thicker in size, difficult to integrate as well as requires more expensive manufacturing costs. It is found that the combination of a single layered antenna structure design and hybrid coupler has the potential to provide better advantages in terms of simplicity, space and cost.*

*Keywords: Monopulse antenna; microstrip; sum signal; comparator network*

## PENGENALAN

Dalam sistem radar, antena berfungsi untuk mengumpulkan maklumat koordinat yang diperlukan untuk mencari atau menjejaki sasaran. Terdapat pelbagai teknik yang tersedia untuk tujuan ini seperti pensuisan cuping atau pensuisan berjujukan, pensuisan kon dan pengesanan ekadenyut. Di antara teknik-teknik ini, teknik ekadenyut mempunyai beberapa kelebihan berbanding kaedah lain (Sherman & Barton 2011). Teknik pengesanan ekadenyut adalah berkelajuan tinggi, mempunyai ketepatan yang tinggi dan boleh menganggar sasaran dengan hanya menggunakan denyut tunggal (eka). Selain itu, ia tidak mudah terjejas disebabkan oleh perubahan amplitud gema sasaran, jika ada.

Sistem radar ekadenyut tradisional menggunakan antena yang berstruktur parabola Cassegrain (Connor 1983) atau antena lensa (Raman et al. 1998), bersama dengan pembanding ekadenyut jenis pandu gelombang logam. Struktur antena jenis ini adalah berat dan rangkaian suapan yang digunakan juga rumit (Skolnik 2001).

Walau bagaimanapun, antena ekadenyut boleh direka menggunakan teknologi jalur mikro (Wang et al. 2003; Wang et al. 2006; Yu et al. 2009; Jahagirdar & Borkar 2010; Yu et al. 2011; Colak & Sahinkaya 2014; Fartookzadeh & Mohseni 2014; Kumar & Kumar 2018) yang mempunyai banyak kelebihan berbanding sistem radar tradisional. Antara kelebihannya adalah bersaiz kecil (padat), ringan dan kos pembuatan yang rendah.

Sebahagian daripada antena jalur mikro ekadenyut ini direka pada lapisan tunggal, di mana rangkaian radiasi dan pembanding berada pada lapisan yang sama (Wang et al. 2003; Wang et al. 2006; Jahagirdar & Borkar 2010; Colak & Sahinkaya 2014). Walau bagaimanapun, isu-isu utama berkaitan dengan struktur satu lapisan adalah gangguan radiasi palsu dan kesan penyumbatan disebabkan oleh pembanding, yang seterusnya mengubah aras cuping sisi (sidelobe level, SLL) antena. Pozar & Kaufman (1990) telah menyatakan bahawa “apabila rangkaian suapan dan elemen antena dicetak pada substrat yang sama, SLL akan dihadkan kepada julat 15-25 dB sahaja”. Oleh itu, untuk mencapai rekabentuk yang baik, kesan radiasi palsu perlu diberi perhatian yang khusus.

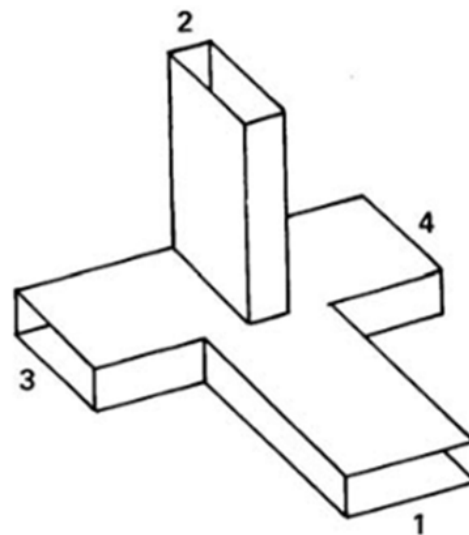
Teknik ekadenyut memerlukan suatu set dua (atau empat) antena yang sama untuk mendapatkan semua maklumat bagi menentukan kedudukan sudut dan jarak sasaran dengan menggunakan denyut tunggal satu atau dua satah (Skolnik 2001). Dalam antena radar ekadenyut yang mempunyai banyak suapan, isyarat jumlah  $\Sigma$  (sum) dan perbezaan  $\Delta$  (difference), atau lebih tepatnya kombinasi linear dari output suapan, dibentuk menggunakan peranti gelombang mikro pasif tertentu. Kebiasaannya, ia adalah

peranti empat pangkalan dengan dua pangkalan input dan dua pangkalan output, masing-masing voltan output adalah kombinasi linear yang berbeza dari dua voltan input. Peranti ini terdapat dalam beberapa kategori. Dua kategori utama adalah persimpangan hibrid dan pengganding berarah. Kategori yang lain adalah pembanding dan lain-lain cara untuk memperoleh mod jumlah dan perbezaan (Sherman & Barton 2011).

## PERSIMPANGAN HIBRID

Dalam persimpangan hibrid dengan penamatan yang sepadan, isyarat yang memasuki salah satu daripada dua pangkalan input akan dibahagikan sama kuasanya (tetapi tidak semestinya dalam fasa yang sama) antara dua pangkalan output dan sama sekali tidak muncul di pangkalan input yang lain. Selanjutnya, apabila dua isyarat yang mempunyai fasa relatif yang sesuai dikenakan secara serentak ke pangkalan input masing-masing, kedua-dua output tersebut adalah berkadar dengan jumlah dan perbezaan input yang dimasukkan.

### PERSIMPANGAN MAGIK-T



RAJAH 1. Persimpangan hibrid magik-T (Sherman & Barton 2011)

Rajah 1 menggambarkan satu jenis persimpangan hibrid yang dikenali sebagai magik-T (atau magik-Tee). Input isyarat di pangkalan 1 membahagi secara sama antara pangkalan 3 dan 4, tetapi tidak muncul di pangkalan 2. Ini kerana pandu gelombang 2 tidak dapat menyokong mod penyebaran itu. Input isyarat di pangkalan 2 pula membahagi secara sama antara pangkalan output 3 dan 4, tetapi tidak akan muncul di pangkalan 1. Oleh itu, jika

bahagian pandu gelombang yang merangkumi persimpangan hibrid mempunyai panjang yang betul dan jika input dikenakan secara serentak ke pangkalan 1 dan 2, jumlahnya akan muncul di salah satu pangkalan output dan perbezaannya pada yang lain. Secara timbal balik, pangkalan input dan output boleh bertukar tempat.

Dalam kajian Yu et al. (2009), lebar jalur impedans sebanyak 28.2% untuk  $VSWR \leq 2$  telah dicapai dengan gandaan puncak sebanyak 18.4 dB. Untuk meningkatkan lebar jalur struktur radiasi, geometri yang disusun dengan teknik suapan korporat telah digunakan. Satah magik-T yang kompleks digunakan sebagai peranti jumlah-perbezaan ekadenyut, yang menjadikan keseluruhan geometri sangat sukar untuk diintegrasikan dengan struktur radiasi antenna ekadenyut. Rajah 2 menunjukkan konfigurasi magik-T bersama-sama dengan elemen tampalan.

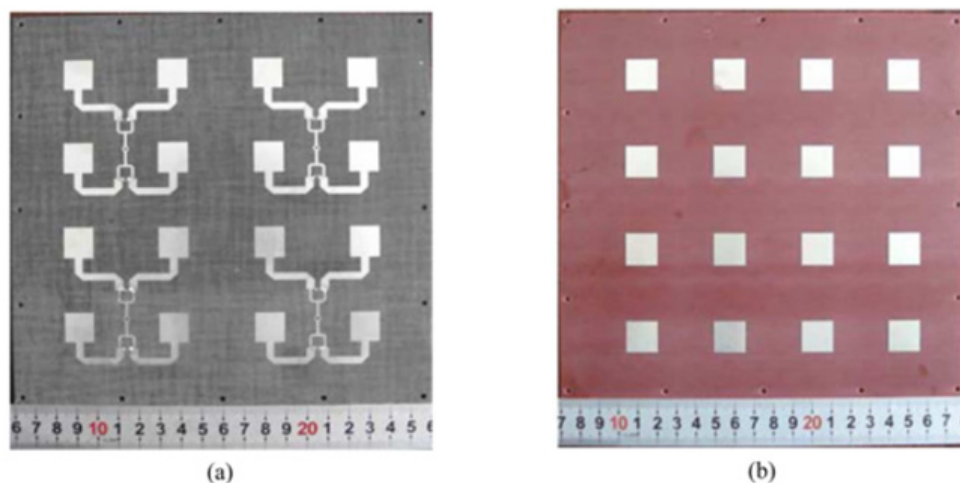
Yu et al. (2011) pula telah mereka suatu antenna ekadenyut satu-dimensi yang berjalur lebar pada jalur-S. Seperti yang dipaparkan pada Rajah 3, satah magik-T yang berjalur lebar diguna sebagai peranti jumlah-perbezaan yang kemudian disepadukan dengan bahagian radiasi, yang terdiri daripada tatasusun jalur mikro  $2 \times 1$  berbilang lapisan. Hasil simulasi menunjukkan lebar jalur 13.6% di

sekitar frekuensi pusat 3.3 GHz untuk  $VSWR \leq 2$ . Perbezaan corak radiasi menunjukkan kedalaman nol  $< -28$  dB. Gandaan maksimum 11 dB telah dilaporkan untuk antenna ekadenyut yang bersaiz  $70 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$  ini.

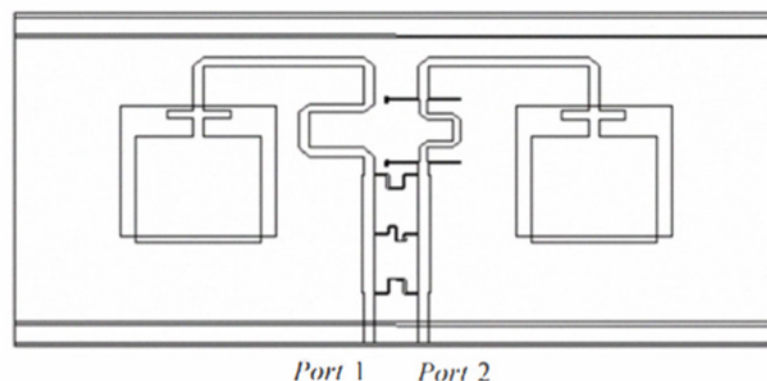
#### PERSIMPANGAN CINCIN HIBRID (RATRACE)

Persimpangan cincin hibrid (atau hibrid bulat atau ratrace) digambarkan dalam Rajah 4. Input isyarat di pangkalan 1 tiba di pangkalan output 4 melalui dua laluan yang berasingan (mengikut arah jam dan lawan jam), yang mempunyai panjang laluan yang sama,  $3\lambda_g/4$ , di mana  $\lambda_g$  adalah panjang gelombang dalam pandu gelombang. Oleh itu, isyarat dua cabang menguat di pangkalan 4. Isyarat input yang sama tiba di pangkalan 3 melalui laluan yang mempunyai panjang  $\lambda_g/4$  dan  $5\lambda_g/4$ , berbeza sebanyak satu panjang gelombang. Oleh itu, penguatan juga berlaku di pangkalan 3. Sebaliknya, panjang dua laluan dari 1 ke 2 berbeza sebanyak separuh panjang gelombang; oleh itu pembatalan berlaku dan tidak ada output di pangkalan 2.

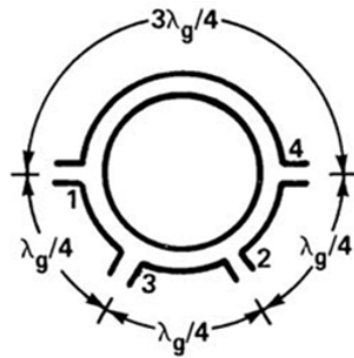
Begitu juga input di pangkalan 2 akan menghasilkan output yang sama pada 3 dan 4 tetapi tidak ada di pangkalan



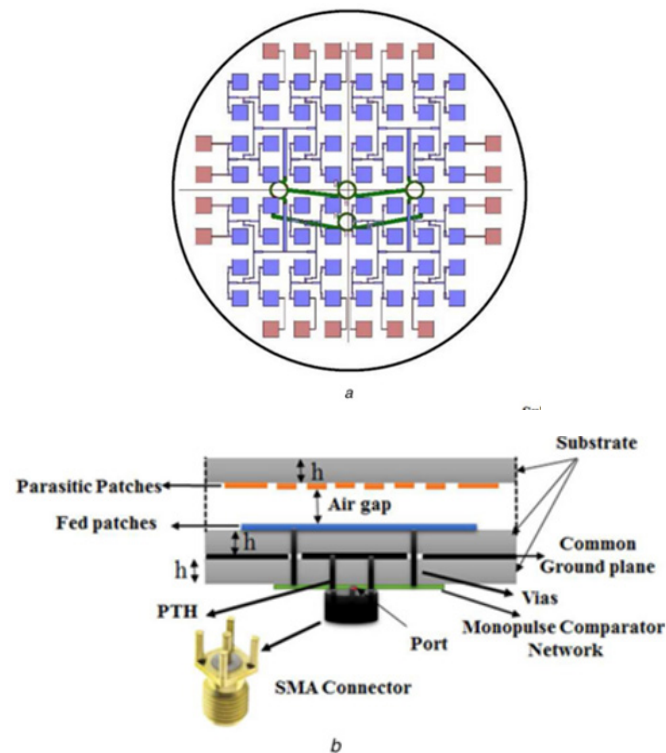
RAJAH 2. Gambar foto tatasusun antenna ekadenyut (a) tampalan radiasi (b) tampalan parasit (Yu et al. 2009)



RAJAH 3. Konfigurasi antenna ekadenyut (Yu et al. 2011)



RAJAH 4. Persimpangan cincin hibrid (ratrace) (Sherman & Barton 2011)



RAJAH 5. Antena ekadenyut dan mekanisme suapan (Kumar & Kumar 2018)

1. Sekiranya isyarat sefasa masuk secara serentak pada 1 dan 2, ia akan tiba di output 3 secara sefasa dan tiba di 4 pada fasa yang bertentangan. Oleh itu, output pada 3 dan 4 adalah jumlah dan perbezaan kedua input tersebut. Output jumlah dan perbezaan adalah sefasa antara satu sama lain. Secara timbal balik, pangkalan input dan output boleh ditukar tempat.

Kim & Chang (2003) telah memperkenalkan tatasusunan antena ekadenyut yang ringkas, berkost rendah dan disuap dari kedua arah (kiri dan kanan). Antena yang beroperasi pada jalur-Ka ini disambungkan ke peranti ratrace bagi mendapatkan isyarat jumlah dan perbezaan dengan kehilangan balikan sebanyak 10 dB. Gandaan puncak 13 dB bagi corak jumlah dan kedalaman nol 30 dB bagi corak perbezaan juga diperolehi. Namun, prestasi ekadenyutnya

hanya satu dimensi dan nilai SLL sekitar 10 dB sahaja.

Pada tahun 2018, Kumar & Kumar (2018) telah merekabentuk dan memfabrikasi antena ekadenyut berbilang lapisan, berjalur lebar dan bergandaan tinggi pada jalur-X. Struktur radiasi direka dengan menggunakan tatasusunan jalur mikro pelbagai lapisan yang digandingkan secara elektromagnetik (electromagnetically coupled, EMCP) untuk meningkatkan lebar jalur dan gandaan antena. Antena ekadenyut dan mekanisme suapan bagi rekabentuk ini ditunjukkan pada Rajah 5. Daripada menggunakan pembanding (Wang et al. 2003; Wang et al. 2006; Jahagirdar & Borkar 2010; Colak & Sahinkaya 2014; Fartookzadeh & Armaki 2014) atau satah magik-T (Yu et al. 2009; Yu et al. 2011), yang mempunyai lebar jalur sempit atau sukar diintegrasikan dengan struktur radiasi,

peranti jumlah-perbezaan ekadenyut yang terdiri daripada rangkaian empat ratrace telah direka. Rekabentuk rangkaian ratrace ini menyumbang kepada lebar jalur yang lebih besar jika dibandingkan dengan pembanding (Kumar & Kumar 2016). Lebar jalur impedans simulasi sebanyak 21% telah dicapai untuk  $|S_{11}| \leq -10$  dB dan gandaan tertinggi sebanyak 24.4 dBi telah diukur. Antena ekadenyut yang direka memberikan jumlah kecekapan keseluruhan sebanyak 68.9%. Corak sinaran yang diukur menunjukkan kedalaman nol  $< -35$  dB pada kedua-dua port perbezaan azimut dan ketinggian.

#### . PENGANDING BERARAH

Secara umum, pengganding adalah peranti yang melepaskan sebahagian daripada kuasa yang mengalir melalui pandu gelombang primer (atau talian penghantaran) ke pandu gelombang (atau talian) sekunder. Suatu pengganding berarah adalah pengganding yang menghasilkan output pada pangkalan sekunder tertentu apabila kuasa mengalir melalui pangkalan primer dalam satu arah dan bukan pada arah yang lain. Pengganding berarah empat-pangkalan menghasilkan output pada salah satu daripada dua pangkalan sekunder, bergantung pada arah aliran kuasa di laluan primer.

Jenis pengganding yang sangat penting dalam ekadenyut (dan juga dalam aplikasi radar lain) adalah pengganding berarah 3-dB. Merujuk lagi pada Rajah 6, input di pangkalan 1 berpisah kuasa secara sama, separuh muncul di pangkalan 3 dan separuh di pangkalan 4, tanpa output di pangkalan 2. Secara simetri, pandu gelombang primer dan sekunder boleh ditukar tempat, begitu juga dengan pangkalan input dan output. Oleh itu, pengganding berarah 3-dB mempunyai ciri-ciri fungsi yang sama dengan persimpangan hibrid, dan biasanya dianggap sebagai subset kepadanya.

Ang et al. (2003) telah membentangkan rekabentuk antena ekadenyut yang beroperasi pada jalur-S. Dalam rekabentuk ini, peranti pengganding berarah berjalur lebar

1800 telah digunakan untuk mendapatkan isyarat jumlah-perbezaan. Kedalaman nol bagi corak perbezaan adalah sangat baik, iaitu melebihi -30 dB. Rekabentuk peranti ini juga boleh diskala-naik ke jalur frekuensi lebih tinggi seperti 2-6 GHz dan 6-18 GHz.

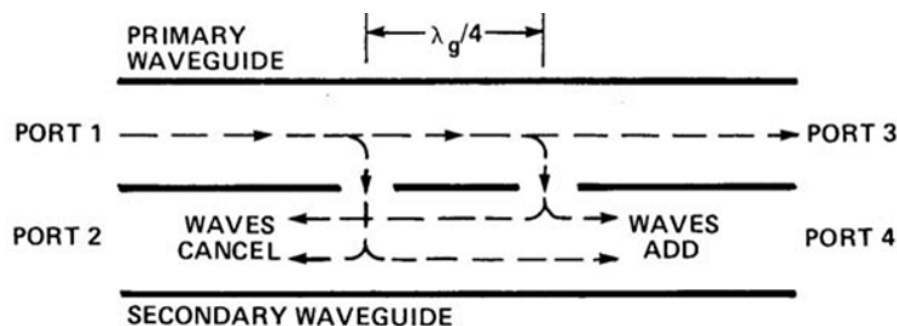
#### PEMBANDING

Peranti yang dijelaskan sebelum ini dapat digunakan untuk memperoleh jumlah dan perbezaan dua input. Dalam antena lensa atau pemantul yang direka untuk ekadenyut pada kedua-dua koordinat sudut, terdapat sekurang-kurangnya empat antena hon suapan. Satu jumlah dan dua perbezaan (satu untuk setiap koordinat) mesti diperoleh, dan ini tidak dapat dilakukan oleh satu hibrid. Beberapa hibrid yang berhubungkait secara selari diperlukan. Himpunan keseluruhan hibrid, penganjak fasa (jika diperlukan), dan bahagian pandu gelombang yang menukar isyarat dari hon suapan individu menjadi jumlah dan dua perbezaan dikenali sebagai pembanding. Pembanding tidak benar-benar membandingkan apa-apa, tetapi ia hanya menyediakan kaedah untuk membandingkan isyarat secara tidak langsung dari hon suapan individu.

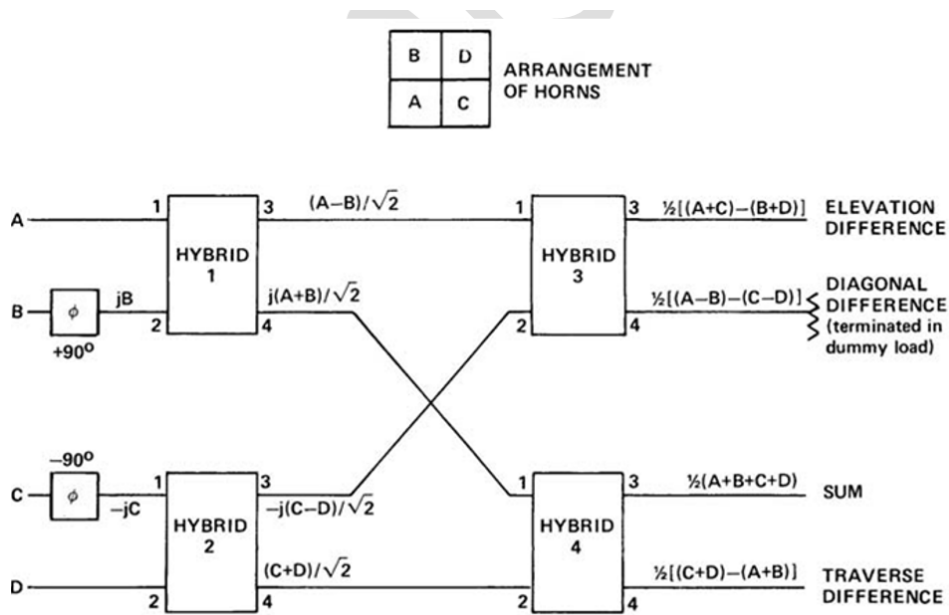
Rajah 7 adalah gambarajah skematik pembanding bagi radar penjejakan ekadenyut dengan suapan empat-hon. Hon berlabel A hingga D, disusun seperti yang ditunjukkan pada bahagian tengah atas rajah. Empat garis input berlabel A hingga D di sebelah kiri adalah isyarat yang diperoleh daripada hon berkaitan. Empat hibrid digunakan dalam kes ini. Pangkalan setiap hibrid pada Rajah 7 dilabel 1 hingga 4 yang sepadan dengan yang terdapat pada Rajah 4.14. Hibrid dalam contoh ini adalah pengganding arah 3-dB (hibrid kuadratur).

Keluaran pembanding ditunjukkan di sebelah kanan. Ia adalah jumlah, perbezaan melintang, perbezaan ketinggian, dan output keempat berkadar dengan  $[(A - B) - (C - D)]$ , dikenali sebagai perbezaan kedua.

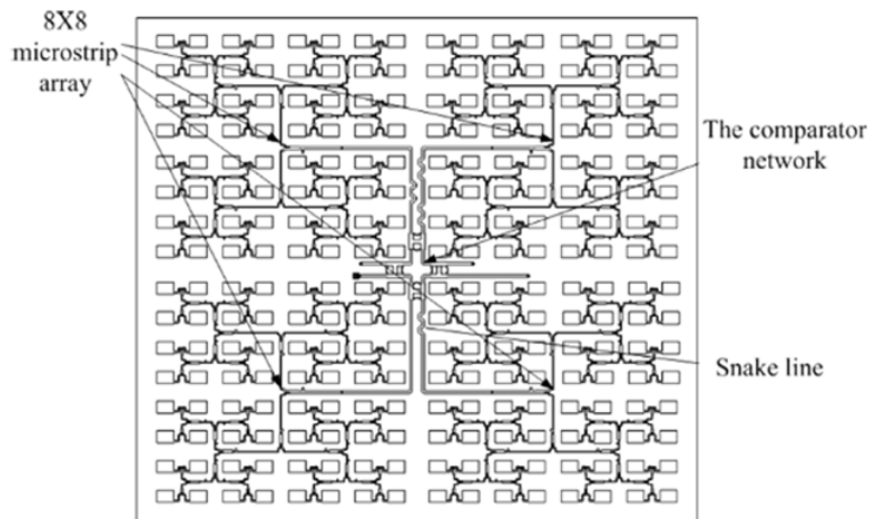
Dalam kajian Wang et al. (2006), tatasusun antena jalur mikro ekadenyut berlapisan tunggal telah direka dan difabrikasi pada jalur-Ku dengan lebar jalur (bandwidth,



RAJAH 6. Pengganding berarah dua lubang (Sherman & Barton 2011)



RAJAH 7. Pembanding untuk suapan ekadenyut empat hon menggunakan pengganding berarah 3-dB. (Sherman & Barton 2011)



RAJAH 8. Struktur tatasusun antenna berlapis tunggal (Wang et al. 2006)

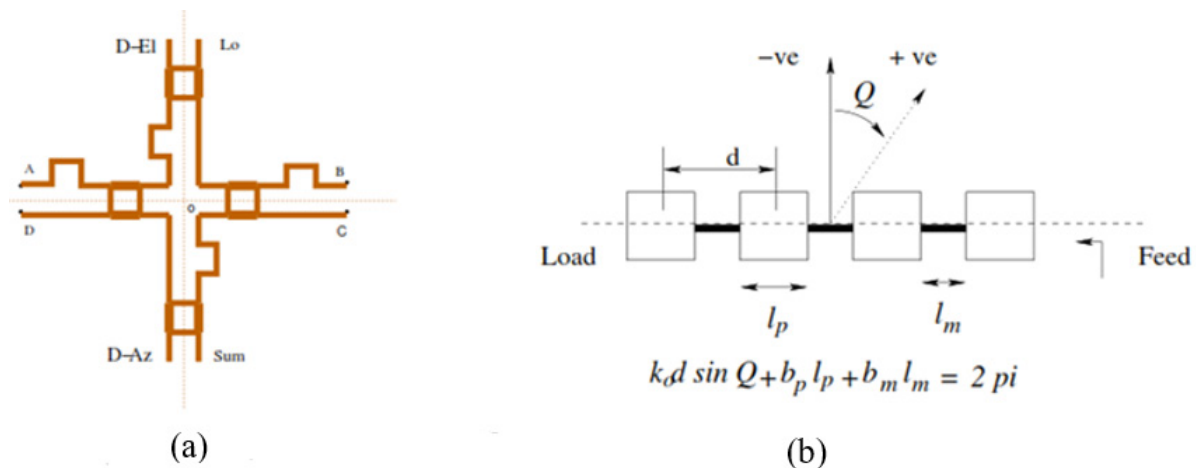
BW) hanya 5.6% untuk nisbah gelombang berdiri voltan (VSWR) ≤ 2. Untuk meningkatkan SLL, suapan yang tidak seragam telah digunakan. Rajah 8 menunjukkan struktur tatasusun antenna beserta rangkaian pembandingnya. Suapan secara selari ke bucu elemen tampalan segiempat telah mengurangkan kehilangan yang disebabkan oleh rangkaian suapan.

Pada tahun 2010, antenna ekadenyut satah pada lapisan tunggal dengan teknik suapan sesiri telah dibentangkan (Jahagirdar & Borkar 2010). Rajah 9 menunjukkan pembanding ekadenyut yang diguna bersama dengan tatasusun suapan sesiri. Lebar jalurnya hanya 0.5% pada jalur-Ku dengan kecekapan sekitar 32%. Dalam reka bentuk antenna ekadenyut lapisan tunggal sebegini, batasan

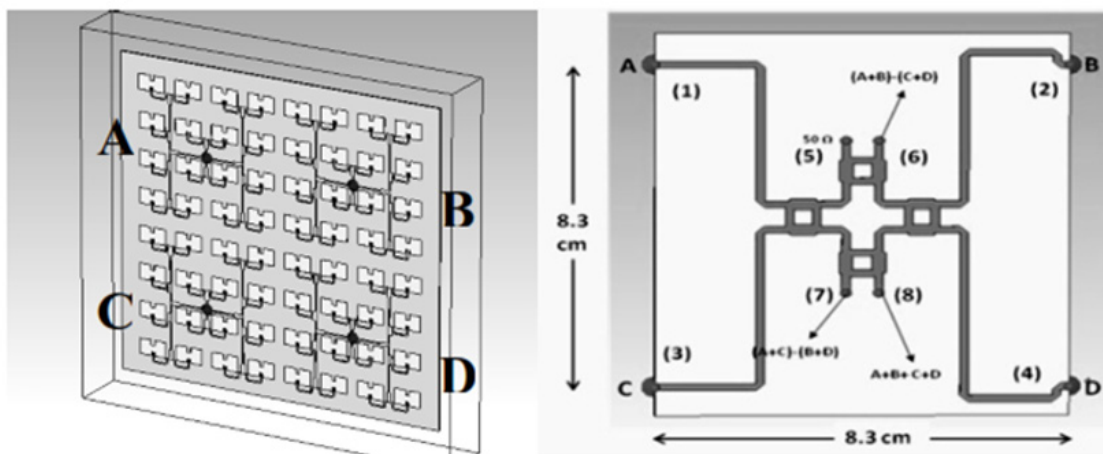
utama ialah lebar jalur yang sempit.

Dalam rekabentuk oleh Colak & Sahinkaya (2014), antenna ekadenyut lapisan tunggal pada jalur-X telah direka dan difabrikasi. Suatu tatasusun antenna jalur mikro 8 × 8 dengan suapan pusat bukan linear untuk meningkatkan SLL telah direka bentuk dengan pembanding ekadenyut satah berada pada lapisan yang sama. Tatasusun antenna 8x8 dan pembanding jalur mikro untuk rekabentuk ini ditunjukkan pada Rajah 10. Gandaan puncak bagi jumlah adalah 23 dB, manakala nilai SLL serendah -18 dB adalah sangat baik berbanding suapan linear (-13.6 dB).

Fartookzadeh & Mohseni (2014) pula merekabentuk antenna ekadenyut berpolarisasi membulat dwi-jalur pada jalur-S dan X. Elemen tampalan, rangkaian pembanding



RAJAH 9. Pemanding ekadenyut (a) dan tatasusun suapan sesiri (b) (Jahagirdar & Borkar 2010)



RAJAH 10. Tatasusun 8x8 dan pemanding jalur mikro (Colak & Sahinkaya 2014)

dan suapan berada pada lapisan yang berlainan. Lebar jalur impedans lebih daripada 10% telah dicapai pada setiap jalur frekuensi untuk rekabentuk ini.

#### KAEDAH LAIN UNTUK MEMPEROLEHI JUMLAH-PERBEZAAN EKADENYUT

Pemanding yang dijelaskan sebelum ini adalah untuk suapan empat hon. Beberapa radar ekadenyut mempunyai suapan lima hon, dan beberapa susunan suapan lain telah dirancang sehingga dua belas hon. Dengan penggunaan empat hon, adalah berkemungkinan untuk mengoptimumkan corak jumlah atau corak perbezaan tetapi tidak keduanya, kerana ia saling bergantung. Dengan penggunaan lebih banyak hon, kemungkinan untuk mencapai jumlah dan perbezaan yang hampir optimum secara serentak adalah lebih besar. Corak optimum adalah corak yang mewakili kompromi terbaik (untuk sistem tertentu) antara

gandaan corak-jumlah dan lebar jalur, kepekaan ekadenyut, dan tahap cuping tepi.

Ujikaji dengan suapan dua belas hon, yang direka oleh MIT Lincoln Laboratory, memberikan gambaran lebih dekat mengenai jumlah dan perbezaan yang ideal tetapi memerlukan pemanding yang rumit dengan banyak hibrid (Skolnik 2001).

Pada kaedah yang lain, corak ekadenyut dapat diperoleh dari suapan berbilang mod (multimode) oleh hon tunggal dengan menggunakan mod pandu gelombang simetri (genap) untuk menghasilkan isyarat "jumlah" dan mod antisimetri (ganjil) untuk menghasilkan isyarat "perbezaan" (Cheng et al. 2008; Narbudowicz & Ammann 2018). Jumlah dan perbezaannya dalam kes ini tidak memerlukan proses penambahan atau pengurangan, dan oleh itu tidak ada penggunaan hibrid dari jenis yang dijelaskan sebelumnya. Namun, isyarat yang dibawa oleh mod berbeza dalam pandu gelombang yang sama memerlukan litar gelombang mikro khas untuk

JADUAL 1. Perbandingan antara kajian-kajian

Rujukan	Jalur frekuensi	Lebar jalur 10 dB hilangan balikan (%)	Gandaan puncak (dBi)	SLL (dB)	Kedalaman nol (dB)	Geometri	Rekabentuk Peranti untuk Mod $\Sigma$ dan $\Delta$	Nota
Wang et al. (2006)	Ku	5.6	24.5	-17	-30	Lapisan tunggal	Pembandingan	Padat, murah, kecekapan 20%
Jahagirdar & Borkar (2010)	Ku	0.5	33	-18	-28	Lapisan tunggal	Pembandingan	SLL baik kecil, kecekapan 32%
Colak & Sahinkaya (2014)	X	-	23	-18	-18	Lapisan tunggal	Pembandingan	SLL baik
Yu et al. (2009)	C	28.2	18.4	-13	-28	Lapisan berbilang	Magik-T	Kompleks
Yu et al. (2011)	S	13.6	11	-	-28	Lapisan berbilang	Magik-T	Gandaan rendah
Kumar & Kumar (2018)	X	21	24.4	-15	-35	Lapisan berbilang	Ratrace	BW baik nol baik kompleks, kecekapan 69%
Kim & Chang (2003)	Ka	9.5	13	10	-30	Lapisan berbilang	Ratrace	SLL baik
Ang et al. (2003)	S	100	-	-	-45	Lapisan berbilang	Pengganding berarah 1800 berjalur lebar	Nol amat baik Jalur lebar
Chaffarian et al. (2017)	S	67	3	-17	-25	Lapisan berbilang	Penganjak fasa 900 baru + Pengganding komersial	Ringkas, Jalur lebar, SLL baik, Gandaan rendah



mengekstraknya sebagai input berasingan ke saluran penerima masing-masing.

Ghaffarian et al. (2017) telah membentangkan rekabentuk antena ekadenyut yang beroperasi pada jalur-S yang menggabungkan antena berpusar dan pengganding hibrid komersial. Beliau juga telah merekabentuk penganjak fasa 900 baru yang diintegrasikan dengan pengganding untuk memperbaiki lebar jalur dan kedalaman nol. Sistem yang murah untuk dibangunkan ini mampu menghasilkan SSL sebanyak 17 dB dan -25 dB kedalaman nol. Namun begitu, gandaan puncak corak jumlah adalah rendah iaitu 3 dB.

Sejak akhir-akhir ini, terdapat kecenderungan penyelidikan untuk menggabungkan teknologi pandu gelombang bersepadukan substrat (substrate integrated waveguide, SIW) (Liu et al. 2021) dan tatasusunan get boleh aturcara medan (field-programmable gate array, FPGA) (Pan et al. 2021) sebagai satu alat kawalan bagi mendapatkan isyarat jumlah-perbezaan. Pendekatan ini adalah agak mahal dan kompleks untuk dilaksanakan, tetapi mempunyai kecekapan antena yang tinggi.

#### ULASAN

Berdasarkan kajian-kajian di atas, untuk memperoleh nilai-nilai impedans yang lebih rendah pada pembanding, lebar talian (garisan) yang lebih besar berbanding dengan ratriace telah digunakan. Namun, talian atau garisan yang lebar akan meningkatkan radiasi palsu dan seterusnya menyumbang kepada kehilangan yang lebih besar. Penggunaan ratriace juga mampu menghasilkan kedalaman nol yang lebih baik berbanding dengan pembanding beserta talian lengah fasa 90°. Kedalaman nol yang lebih baik akan memastikan ketepatan resolusi sudut objek sasaran yang baik pada satah masing-masing. Walau bagaimanapun, ada batasan bagi penggunaan pembanding ekadenyut yang menggunakan empat pengganding ratriace. Disebabkan oleh masalah pemerangkapan pengkalan (port trapping), adalah mustahil untuk mengintegrasikan unsur radiasi antena ekadenyut bersama dengan pembanding satah ekadenyut jenis ini pada satah yang sama. Oleh itu, ia memerlukan struktur berbilang lapisan untuk proses integrasi bahagian radiasi dengan bahagian pembanding ekadenyut. Akibatnya, struktur berbilang lapisan pula akan menjadi tebal dan meningkatkan kos pembuatan.

Jadual 1 merumuskan dapatan hasil dari kajian-kajian berkaitan dengan tatasusunan antena beserta dengan litar pembanding yang digunakan. Secara keseluruhan, rekabentuk antena ekadenyut boleh dikategorikan mengikut rekabentuk peranti untuk memperoleh isyarat jumlah-perbezaan dan bilangan lapisan yang digunakan. Walaupun rekabentuknya berbeza, objektif utama kajian-

kajian ini adalah untuk memperoleh isyarat penjumlahan dan perbezaan dalam radar ekadenyut dengan mengambilkira nilai gandaan puncak jumlah, SLL dan kedalaman nol.

#### KESIMPULAN

Struktur berlapisan tunggal diperhatikan lebih mudah dan murah untuk difabrikasi. Namun, ia mempunyai lebar jalur rendah disebabkan halangan bukaan radiasi oleh struktur peranti jumlah-perbezaan yang berada pada lapisan yang sama. Struktur berlapisan berbilang pula lebih tebal dan berkos tinggi untuk dihasilkan. Selain itu, ia lebih sukar diintegrasikan kerana tatasusunan tampalan dan rangkaian peranti jumlah-perbezaan berada pada lapisan berlainan. Namun, ia mempunyai lebar jalur lebih baik berbanding struktur berlapisan tunggal.

Penggunaan peranti berlainan iaitu magik-T, ratriace, pengganding berarah, pembanding dan lain-lain kaedah juga dikaji dalam kertas ini. Dari pemerhatian, pengganding berarah yang diguna telah menghasilkan lebar jalur lebih besar. Maka, boleh disimpulkan bahawa kombinasi antara struktur berlapisan tunggal dan pengganding berarah mampu memberi kelebihan dari segi ruang, kos dan lebar jalur yang lebih baik. Pendekatan dalam kaedah ini berpotensi untuk diterokai lebih lanjut dalam pembangunan antena ekadenyut.

#### PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia atas bantuan kewangan di bawah geran penyelidikan GUP-2019-011.

#### PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada

#### RUJUKAN

- Ang, K., Leong, Y. & Lee, C. 2003. A wideband monopulse comparator with complete nulling in all data channels throughout sum channel bandwidth. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 51: 371–373.
- Cheng, Y.J., Hong, W. & Wu, K. 2008. Design of a monopulse antenna using a dual V-type linearly tapered slot antenna (DVL TSA). *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 56(9): 2903-2909.
- Colak, O. & Sahinkaya, D.S.A. 2014. SLL suppressed monopulse microstrip antenna design. 2014 *IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp. (APSURSI)*,

- 1855–1856.
- Connor, F.R. 1983. New monopulse tracking radar. *Electron. Lett.* 19(9): 438 - 440.
- Fartookzadeh, M. & Mohseni Armaki, S.H. 2014. Dual-band circularly-polarized monopulse antenna system with single layer patches and separated feed networks, *Prog. Electromagn. Res. C* 55: 43–52.
- Ghaffarian, M.S., Honari, M.M., Khajepour, S., Moradi, G. & Shamaiee, M. 2017. Wideband low cost planar mono-pulse comparator circuit. *IET Microw. Antennas Propag.* 11(12): 1726-1733.
- Jahagirdar, D.R. & Borkar, V.G. 2010. A high efficiency Ku-band printed monopulse array. 2010 *IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp.*, 1–4.
- Kim, S. & Chang, K. 2003. Low-cost monopulse antenna using bi-directionally fed microstrip patch array. *Electron. Lett.* 39(20): 1428–1429.
- Kumar, H. & Kumar, G. 2016. Microstrip antenna array with ratrace comparator at X-band for monopulse tracking radar. *IEEE APS/URSI Int. Symp. Antenna & Propagation*, 513–514.
- Kumar, H. & Kumar, G. 2018. Broadband monopulse microstrip antenna array for X-band monopulse tracking. *IET Microw. Antennas Propag.* 12(13): 2109-2114.
- Li, W., Liu, S., Deng, J., Hu, Z. & Zhou, Z. 2021. A compact SIW monopulse antenna array based on microstrip feed. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 20(1): 93-97.
- Narbudowicz, A. & Ammann, M.J. 2018. Low-cost multimode patch antenna for dual MIMO and enhanced localization use. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 66(1): 405-408.
- Pan, X., Yang, F., Xu, S. & Li, M. 2021. A 10 240-element reconfigurable reflectarray with fast steerable monopulse patterns. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 69(1): 173-181.
- Pozar, D.M. & Kaufman, B. 1990. Design considerations for low sidelobe microstrip arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 38(8): 1176–1185.
- Raman, S., Barker, N.S. & Rebeiz, G.M. 1998. A W-band dielectric-lens based integrated monopulse radar receiver. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* 46(12): 2308–2316.
- Sherman, S.M. & Barton, D.K. 2011. *Monopulse Principles and Techniques*, Second edition. Artech House.
- Skolnik, M. 2001. *Introduction to Radar Systems*. Third edition. McGraw-Hill.
- Wang, H., Fang, D.-G. & Chen, X.G. 2006. A compact single layer monopulse microstrip antenna array, *IEEE Trans. Antennas Propagation* 54(2): 503–509.
- Wang, H., Fang, D.-G. & Chen, X.G. 2003. Investigation on the performance of a compact microstrip monopulse antenna array. *Sixth Int. Symp. Antennas, Propagation and EM Theory 2003 Proc.*, 100–103.
- Yu, Z., Wang, G., & Lei, T. 2011. Design of a broadband planar monopulse antenna of S band. Proc. 2011 *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conf.*, 510–513.
- Yu, Z.W., Wang, G.M. & Zhang, C.X. 2009. A broadband planar monopulse antenna array of C-band, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 8: 1325–1328.