

Desain Antena Radar Otomotif untuk Deteksi Target Jarak Jauh

AULIA SAHARANI, GAMANTYO HENDRANTORO, DEVI KUSWIDIASTUTI

Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia
Email : 6022231050@student.its.ac.id

Received 5 September 2024 | *Revised* 12 Oktober 2024 | *Accepted* 17 Oktober 2024

ABSTRAK

Seiring meningkatnya kebutuhan keselamatan berkendara, teknologi radar otomotif harus terus berkembang untuk memberikan kinerja yang lebih akurat dalam mendeteksi potensi bahaya di jalan. Salah satu aspek penting dalam meningkatkan keakuratan radar adalah resolusi sudut yang lebih tinggi, sehingga memungkinkan radar mendeteksi objek lebih jelas dan presisi. Dalam makalah ini, kami mengusulkan desain antena array linier menggunakan 128 elemen antena Franklin yang dioptimalkan melalui teknik pemangkasan elemen. Teknik ini efektif mengurangi jumlah elemen sebesar 35.7% dari jumlah awal tanpa mengorbankan performa antena. Hasil simulasi menunjukkan desain antena ini menghasilkan lebar beam sempit hingga 1°, tingkat sidelobe di bawah -20 dB, dan direktivitas tinggi di atas 10 dB. Selain itu, desain ini mampu mendeteksi objek dalam jangkauan hingga 300 meter dengan akurasi tinggi, menjadikannya efektif untuk aplikasi radar otomotif. Pendekatan ini efisien dari segi biaya dan material, serta meningkatkan deteksi radar dalam kondisi visibilitas rendah.

Kata kunci: antena array, radar kendaraan, antena Franklin, lebar beam sempit, tingkat sidelobe rendah

ABSTRACT

With the increasing demand for safety driving, automotive radar technology must continuously evolve to provide more accurate performance in detecting potential road hazards. One crucial aspect of improving radar accuracy is higher angular resolution, enabling the radar to detect objects more clearly and precisely. In this paper, we propose a linear array antenna design using 128 Franklin antenna elements optimized through thinning techniques. This technique effectively reduces the number of elements by 35.7% from the initial number without sacrificing antenna performance. Simulation results demonstrate that this antenna design produces a narrow beamwidth of up to 1°, sidelobe levels below -20 dB, and high directivity above 10 dB. Additionally, this design is capable of detecting objects within a range of up to 300 meters with high accuracy, making it effective for automotive radar applications. This approach is cost-effective and material-efficient, enhancing radar detection in low-visibility conditions.

Keywords: array antenna, automotive radar, Franklin antenna, narrow beamwidth, low sidelobe level

1. PENDAHULUAN

Keselamatan berkendara merupakan aspek krusial, terutama dalam kondisi cuaca buruk ataupun pencahayaan yang rendah sehingga dapat mengurangi jarak pandang pengemudi. Dalam situasi seperti ini, radar otomotif berperan penting dalam mendeteksi objek untuk memberikan informasi akurat terkait posisi, jarak, dan kecepatan dari objek sekitar seperti pejalan kaki, motor, mobil maupun lingkungan sekitar. Radar bertindak sebagai 'mata' bagi pengemudi yang dapat membantu mengurangi risiko kecelakaan saat visibilitas terbatas **(Hakobyan, dkk, 2019)**. Selain itu, radar juga merupakan komponen vital dalam pengembangan kendaraan otonom, karena mendukung sistem deteksi otomatis dan pengambilan keputusan. Dengan demikian, akurasi dan keandalan radar memainkan peran penting dalam meningkatkan performa dan keselamatan kendaraan secara keseluruhan **(Pandharipande, dkk, 2023)**.

Seiring berkembangnya teknologi radar otomotif, banyak penelitian yang sudah dilakukan berfokus pada peningkatan resolusi deteksi untuk menghasilkan performa yang lebih baik. Salah satu aspek yang menjadi peran penting dalam peningkatan resolusi radar otomotif yaitu desain antena radar yang digunakan **(Waldschmidt, dkk, 2021)**. Kemampuan antena untuk menghasilkan lebar beam yang sempit merupakan salah satu parameter utama dalam desain antena radar otomotif dengan resolusi sudut tinggi. Selain itu, antena juga harus memiliki gain yang tinggi agar mampu mendeteksi target pada jarak jauh. Sementara itu, tingkat sidelobe yang rendah diperlukan untuk meningkatkan tingkat presisi deteksi radar dengan meminimalkan potensi interferensi. Dengan menekan tingkat sidelobe, interferensi selama proses deteksi dapat dikurangi, sehingga akurasi radar menjadi lebih optimal **(Xiang, dkk, 2024)**.

Namun beberapa penelitian sebelumnya masih menunjukkan keterbatasan dalam desain antena radar otomotif. Misalnya, pada penelitian **(Cao, dkk, 2022)** **(Ji, dkk, 2022)** dengan menggunakan teknik antena *leaky-wave*, kemudian **(Aziz, dkk, 2020)** **(Foyosal, dkk, 2021)** **(Sun, dkk, 2023)** dengan teknik array dan **(Yoo, dkk, 2020)** dengan teknik struktur pencatuan *dual coupled*. Penelitian-penelitian di atas masih belum menghasilkan gain yang optimal, tingkat sidelobe yang cukup rendah, atau lebar beam yang cukup sempit. Selain itu, konfigurasi antena dengan jumlah elemen besar sering kali meningkatkan biaya produksi dan risiko interferensi antar elemen saat antena bekerja secara simultan. Oleh karena itu, diperlukan solusi desain antena yang tidak hanya memenuhi spesifikasi teknis radar otomotif tetapi juga efisien secara material dan biaya.

Antena Franklin dipilih dalam penelitian ini karena memiliki keunggulan dalam menghasilkan lebar beam sempit, gain tinggi, dan tingkat sidelobe rendah melalui pencatuan seri. Dibandingkan dengan antena *leaky-wave* atau struktur pencatuan *dual coupled*, antena Franklin menawarkan konfigurasi yang lebih sederhana dan efisien dari segi material, dengan kemampuan menghasilkan pola radiasi yang lebih terarah. Keunggulan ini dapat dicapai dengan memanfaatkan resonator yang dirancang untuk menghasilkan penjumlahan sefase, sehingga dapat meningkatkan gain antena. Teknik ini juga memungkinkan integrasi yang lebih fleksibel dalam sistem radar otomotif. Oleh karena itu, desain antena Franklin menjadi solusi yang potensial untuk mengatasi keterbatasan dalam desain antena radar otomotif.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang antena radar otomotif berbasis array linier menggunakan antena Franklin sebagai elemen dasar, yang dioptimalkan melalui teknik pemangkas elemen berbasis algoritma FFT. Adapun parameter utama yang menjadi target desain adalah lebar beam azimut $\leq 1^\circ$, lebar beam elevasi $\leq 10^\circ$, gain minimum ≥ 10 dBi, tingkat sidelobe ≤ -20 dB dan bekerja pada frekuensi 76–77 GHz

Salah satu pendekatan yang digunakan adalah dengan menggunakan sejumlah besar elemen antena dalam konfigurasi array untuk mendapatkan lebar beam yang lebih sempit (**Balanis, 2016**). Namun, metode ini menimbulkan beberapa tantangan, seperti meningkatnya biaya produksi serta risiko interferensi antar elemen ketika antena bekerja secara simultan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, beberapa teknik optimasi juga diterapkan, seperti pemangkasan elemen berbasis algoritma FFT. Teknik ini digunakan untuk menentukan konfigurasi optimal dengan mengurangi jumlah elemen tanpa mengorbankan kinerja antena (**Zhou, dkk, 2022**) dan eksitasi tidak seragam untuk mengatur eksitasi berbeda pada setiap elemen guna menekan tingkat sidelobe sehingga meminimalkan terjadinya interferensi. Dengan teknik pemangkasan elemen, jumlah elemen dapat dikurangi hingga 35,7% tanpa mengorbankan performa utama antena. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan antena radar yang mampu mendeteksi target dengan akurasi tinggi hingga jarak 300 meter, sesuai kebutuhan radar otomotif.

Struktur makalah ini dirancang secara sistematis, pada bagian pertama berisi pendahuluan yang menjelaskan latar belakang dan tujuan penelitian. Bagian kedua membahas desain antena Franklin tunggal beserta persyaratan teknis yang harus dipenuhi. Selanjutnya, bagian ketiga menguraikan konfigurasi array linier dan teknik optimasi yang diterapkan untuk meningkatkan kinerja antena. Bagian keempat menyajikan hasil simulasi serta analisis performa antena secara rinci. Terakhir, bagian kelima memuat kesimpulan yang merangkum temuan utama dalam penelitian ini.

2. DESAIN ANTENA

2.1 Alur Penelitian

Pada penelitian ini terdapat beberapa tahapan yang dilakukan untuk mendesain antena untuk radar otomotif jarak jauh, seperti tahapan pada Gambar 1. Pada tahap pertama adalah menentukan persyaratan teknis, yang menjadi dasar desain antena. Pada tahap ini, parameter spesifik seperti frekuensi operasi, lebar beam, gain antena, dan tingkat sidelobe ditentukan sesuai kebutuhan radar otomotif pada Tabel 1.

Tahap selanjutnya adalah desain antena Franklin tunggal. Antena ini dipilih karena memiliki gain yang tinggi dan struktur yang sederhana sehingga ideal untuk dikombinasikan dalam antena array. Desain antena Franklin ini dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak CST Microwave Studio. Pada tahap ini, kinerja elemen tunggal divalidasi dengan menganalisis pola radiasi, impedansi, lebar beam, tingkat sidelobe dan gain untuk memastikan elemen memenuhi spesifikasi teknis.

Setelah elemen dasar selesai dirancang, dilakukan desain antena array yang menggabungkan tiga elemen antena Franklin menjadi satu kesatuan array. Desain ini mencakup penentuan jarak antar elemen. Penempatan elemen dilakukan dengan mempertimbangkan kriteria untuk menghindari *grating lobes* serta memastikan bahwa pola radiasi yang dihasilkan dapat memenuhi spesifikasi lebar beam dan gain yang ditargetkan.

Pada tahap desain konfigurasi array linier, elemen-elemen antena disusun dalam konfigurasi horizontal. Teknik optimasi digunakan untuk menekan tingkat sidelobe dan mempertahankan lebar beam sempit dicapai dengan menerapkan metode pencatutan Taylor atau pemangkasan elemen berbasis algoritma FFT.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Selain itu, konfigurasi ini dirancang untuk mendukung pembentukan beam untuk pemindaian pada sudut 0° dan $\pm 15^\circ$, yang merupakan sudut terluar dalam radar otomotif jarak jauh. Penyesuaian distribusi amplitudo dan fase pada elemen array dilakukan untuk menghasilkan pola radiasi yang optimal sesuai dengan kebutuhan.

Tahap terakhir adalah perkalian pola, dimana pola radiasi dari elemen Franklin dikalikan dengan faktor array untuk menghasilkan pola radiasi total dari antena. Perhitungan ini memungkinkan analisis terhadap karakteristik pola radiasi secara keseluruhan, seperti lebar beam, tingkat sidelobe, dan gain maksimum. Perkalian pola dilakukan dengan perangkat lunak MATLAB untuk dilakukan perhitungan komputasi numerik. Hasil ini kemudian dibandingkan dengan spesifikasi persyaratan teknis untuk mengevaluasi keberhasilan desain.

2.2 Persyaratan Teknis

Persyaratan teknis untuk desain antena untuk radar otomotif pada penelitian ini, dibuat dengan mentaati regulasi yang ada berdasarkan pada **(ITU-R, 2018)** dan **(Kemenkominfo, 2020)**. Tentunya hal ini penting dipertimbangkan karena nantinya desain antena ini akan diimplementasikan pada radar otomotif untuk deteksi jarak jauh. Selain itu persyaratan teknis dari radar yang saat ini sudah ada seperti yang disebutkan pada **(Hasch, dkk, 2012)** juga turut menjadi pertimbangan dalam menentukan persyaratan teknis selain dari regulasi yang berlaku.

Tabel 1. Persyaratan Teknis

Parameter	Volume	Satuan
Frekuensi kerja	76 – 77	GHz
Frekuensi tengah	76.5	GHz
Rentang azimut	30	Derajat
Rentang elevasi	30	Derajat
Jarak Deteksi Maksimum	300	Meter
Lebar beam 3 dB azimut	1	Derajat
Lebar beam 3 dB elevasi	10	Derajat
Direktivitas dan Gain	10	dBi
Sidelobe puncak	20	dB

2.3 Antena Franklin Tunggal

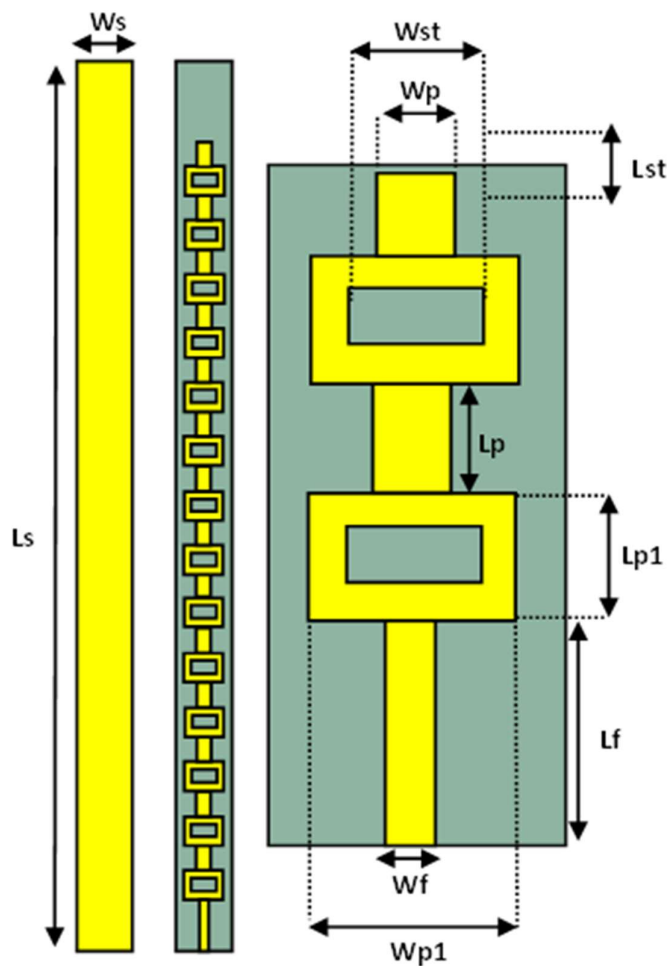
Desain antena Franklin tunggal digunakan sebagai elemen dalam array linier. Nantinya pola elemen yang dihasilkan akan dikalikan dengan faktor array dari konfigurasi array linier sehingga didapatkan pola radiasi array yang diinginkan. Antena Franklin dipilih untuk desain ini karena keunggulannya dalam meningkatkan bandwidth dan gain antena (**Firdausi, dkk, 2023**), serta juga dapat mempersempit lebar beam pada bidang elevasi dengan menambahkan jumlah resonatornya. Semakin banyak jumlahnya maka semakin sempit lebar beam yang dihasilkan. Antena Franklin merupakan susunan beberapa elemen yang berfungsi sebagai resonator, dirancang dengan belokan untuk mengatur fase. Belokan-belokan ini diatur agar memenuhi aturan panjang gelombang (λ), sehingga dengan menggunakan sejumlah resonator tersebut, dapat dihasilkan penjumlahan sefase yang dapat meningkatkan gain dan direktivitas antena (**Mirzaee, dkk, 2020**).

Pada Gambar 2, terlihat desain antena Franklin yang menggunakan 14 elemen resonator. Jumlah elemen ini ditentukan untuk mencapai lebar beam elevasi pola radiasi antena sebesar 10° . Jika jumlahnya kurang dari 14, maka lebar beam yang dihasilkan akan lebih lebar atau besar dari 10° . Setiap elemen resonator dirancang memiliki beda fase yang sama, pembelokan di setiap resonator disesuaikan dengan panjang gelombang. Kemudian setelah dilakukan optimasi pada desain antena Franklin tersebut, didapatkan desain antena yang paling optimal dan juga sudah memenuhi persyaratan teknis seperti pada Tabel 1.

Selain itu juga, penggunaan antena Franklin dapat mengurangi jumlah saluran di sepanjang sumbu vertikal, berkat ini penggunaan elemen-elemen yang terhubung secara seri pada setiap antena Franklin melalui teknik pencatutan seri. Desain antena ini memanfaatkan antena mikrostrip karena antena jenis ini menawarkan keuntungan seperti efektivitas biaya, bobot yang ringan, dan kemudahan dalam fabrikasi. Substrat yang digunakan adalah Rogers RT5880 dengan konstanta dielektrik sebesar 2.2, loss tangent sebesar 0,0009 dan ketebalan sebesar 0.127 mm. Untuk ketebalan tembaga yang digunakan sebesar 0.035 mm. Hasil dari pola radiasi elemen antena Franklin ini nantinya akan digunakan sebagai pola elemen pada tahap perkalian pola pada Persamaan (3).

Tabel 2. Dimensi Antena Elemen Franklin

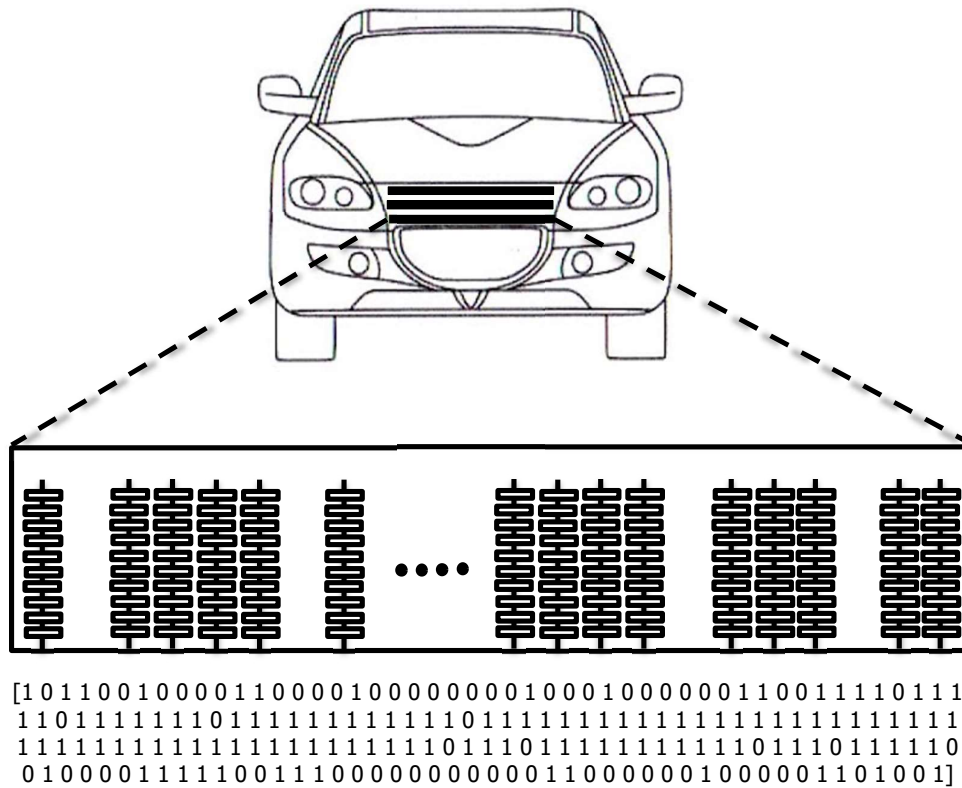
	Parameter	(mm)
Substrat	$L_s \times W_s \times H_s$	35 x 2 x 0.127
Feedline	$L_f \times W_f$	2 x 0.339
Patch	$L_p \times W_p$	0.99 x 0.5
	$L_{p1} \times W_{p1}$	1.12 x 1.46
Stub	$L_{st} \times W_{st}$	0.4 x 0.9



Gambar 2. Desain antena elemen Franklin

2.4 Antena Array

Dalam proses desain antena ini menggunakan CST Studio untuk merancang dan mengevaluasi kinerja antena Franklin sebagai elemen dasar, sementara itu MATLAB digunakan untuk melakukan simulasi konfigurasi array linier pada sumbu bidang azimut dan menganalisis pola radiasi keseluruhan. Pada bidang horizontal, setiap elemen Franklin diatur dalam array dengan menerapkan variasi eksitasi Taylor guna menekan tingkat sidelobe dan mengurangi jumlah elemen demi efisiensi biaya.



Gambar 3. Desain Antena Franklin Array Linier

Pada desain antena untuk aplikasi radar jarak jauh, yang menjadi fokus utama kami adalah mencapai gain yang tinggi dan lebar yang sempit, karena pada jarak hingga 300 meter, radar harus mampu mendeteksi objek dengan akurat. Kemampuan untuk mendeteksi objek yang berdekatan sangat krusial bagi radar pencegah tabrakan agar dapat mengambil langkah pencegahan sebelum insiden terjadi.

Berdasarkan persyaratan teknis yang ditetapkan, antena harus memiliki lebar beam kurang dari 1° pada bidang azimut dan 10° pada bidang elevasi. Konfigurasi yang diusulkan berupa antenna array planar, terdiri dari beberapa array linier horizontal dengan antena Franklin sebagai elemen dasar, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Konfigurasi antena ditunjukkan dengan angka 1 untuk elemen yang dipertahankan dan 0 untuk elemen yang dihilangkan.

2.5 Faktor Array Linier

Dalam array linier, nilai pola radiasi gabungan dari susunan beberapa elemen dapat ditentukan dengan menggunakan nilai faktor array. Faktor array merepresentasikan bagaimana amplitudo dan fase dari sinyal setiap elemen antena berinteraksi sehingga membentuk pola radiasi total. Secara khusus, faktor array memperhitungkan posisi relatif dan fase eksitasi pada setiap elemen antena, tanpa mempertimbangkan karakteristik pola radiasi dari elemen individualnya, sehingga faktor array berperan penting dalam memahami efek geometri dan konfigurasi fase elemen - elemen dalam sebuah array. Nilai faktor array dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^M I_m e^{j(k(m-1)d(\sin \theta \cos \varphi + b_x))} \quad (1)$$

dengan M adalah jumlah elemen yang digunakan, I_m adalah amplitudo eksitasi elemen ke- m , k adalah bilangan gelombang dengan $k = 2\pi/\lambda$, d adalah spasi atau jarak antar elemen serta b_x adalah fase sudut pemindaian yang dituju dengan mempertimbangkan nilai θ_0 dan φ_0 . berdasarkan θ_0 adalah sudut azimuth pemindaian dan φ_0 adalah sudut elevasi pemindaian. Penentuan fase sudut pemindaian ini dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2) sebagai berikut :

$$b_x = -kd \sin \theta_0 \cos \varphi_0 \quad (2)$$

Untuk menyusun array linier horizontal menggunakan teknik pemangkasan elemen dilakukan dengan menghilangkan sebagian elemen untuk mengurangi biaya dan meningkatkan efisiensi sembari tetap mempertahankan kinerja dari antena array. Teknik pemangkasan elemen linier yang digunakan mengadopsi dari **(Zhou, dkk, 2022)** dengan menggunakan pencatutan Taylor pada algoritma FFT. Proses dimulai dengan menginisialisasi parameter, kemudian menghasilkan eksitasi awal sesuai dengan pencatutan Taylor, dilanjutkan dengan melakukan transformasi Fourier terbalik atau IFFT untuk mendapatkan faktor array, menyesuaikan titik-titik yang tidak memenuhi batasan sidelobe, dan kemudian menerapkan transformasi Fourier kembali. Proses ini diulang hingga konfigurasi optimal tercapai, menghasilkan array dengan sidelobe rendah dan lebar beam yang sempit.

2.6 Perkalian Pola

Dalam simulasi ini hasil pola radiasi dari desain elemen antena Franklin yang didapatkan melalui evaluasi kinerja antena dengan menggunakan software CST Studio. Kemudian hasil tersebut di ekstrak untuk kemudian dilakukan proses perkalian dengan faktor array dari susunan array linier yang sudah didapatkan sebelumnya dengan hasil paling optimal. Kedua hasil ini kemudian dilakukan perhitungan komputasi mumerik pada software MATLAB untuk mendapatkan hasil akhir pola radiasi dari desain elemen antena Franklin yang disusun secara linier untuk mendapatkan tingkat sidelobe rendah dan lebar beam yang sempit.

Proses ini merupakan rumus perkalian pola yang dimana pola radiasi dari suatu elemen array seragam dapat dinyatakan dalam perkalian antara nilai faktor array dari array tersebut dikalikan dengan pola radiasi dari elemen yang digunakan. Sesuai dengan Persamaan (3) berikut :

$$AP(\theta, \varphi) = AF(\theta, \varphi) \times EP(\theta, \varphi) \quad (3)$$

dengan AP adalah pola radiasi array , AF adalah faktor array dan EP adalah pola radiasi elemen. Pada perkalian ini nilai kopling antar elemen sudah diperhitungkan dengan menggunakan pola elemen dari susunan 3 elemen antena Franklin dengan memperhatikan jarak antar elemen sejauh 2.667 mm. Angka ini tentunya sudah memenuhi ketentuan dalam penetapan jarak spasi antear elemen array bahwa nilai maksimal dari jarak antar elemen pada array agar tidak terjadi *grating lobes* adalah 2/3 dari panjang gelombang seperti yang sudah dibahas pada **(Akbar, dkk, 2021)**.

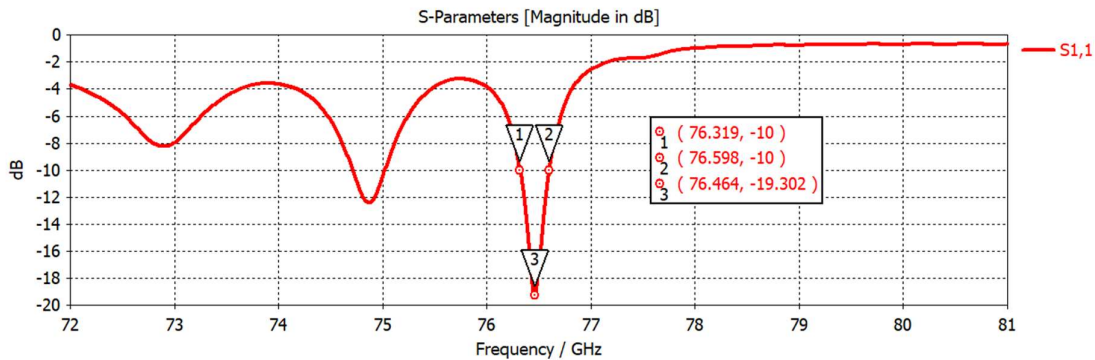
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Antena Franklin

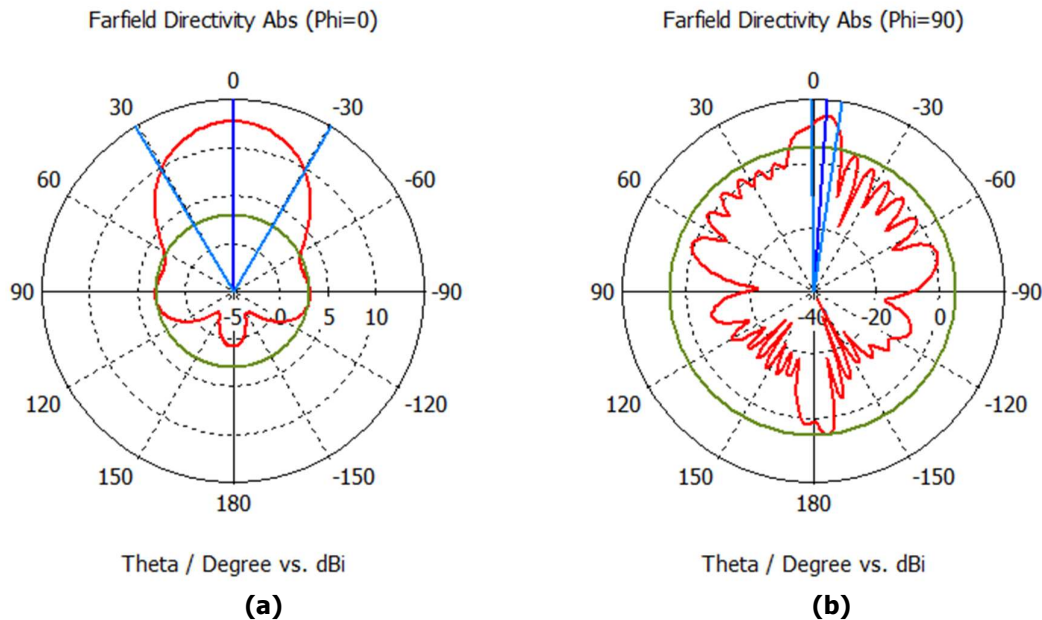
Bagian ini memaparkan hasil desain elemen antena Franklin yang telah dikembangkan. Antena ini menunjukkan performa optimal dalam parameter return loss pada rentang frekuensi 76–77 GHz, yang merupakan spektrum ideal untuk radar otomotif jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa impedansi telah memenuhi matching dengan baik, menghasilkan

bandwidth sebesar 279 MHz dari 76.319 GHz hingga 76.598 GHz. Return loss terbaik tercapai pada frekuensi 76.464 GHz dengan nilai -19.302 dB, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4. Dengan return loss di bawah -10 dB, desain antenna ini telah memenuhi standar kinerja yang diperlukan untuk aplikasi radar otomotif.

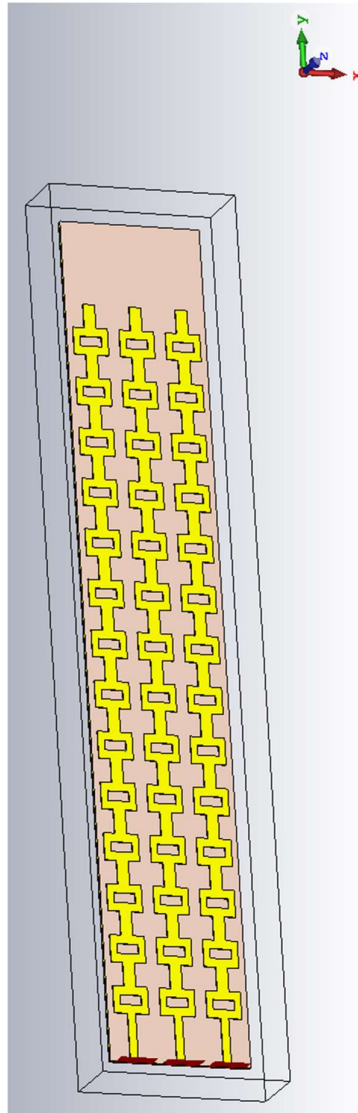
Pola radiasi yang dihasilkan dari antenna elemen Franklin memiliki nilai direktivitas dan gain yang cukup tinggi yaitu 14.99 dBi dan 11.86 dBi. Pada Gambar 5a dimana lebar beam 3dB dan tingkat sidelobe untuk bidang azimut sebesar 61° dan -9.6 dB. Lebar beam antenna sudah sesuai dengan titik puncak berada di 0° atau bisa disebut *broadside*, dengan lebar beam $\pm 30^\circ$. Pada Gambar 5b ditampilkan pola radiasi bidang elevasi dengan lebar beam 3 dB dan tingkat sidelobe yang dihasilkan sebesar 9.6° dan -9.9 dB. Angka tersebut sudah memenuhi persyaratan teknis yang telah ditentukan pada Tabel 1.



Gambar 4. Kerugian Pantulan Antena Franklin Tunggal



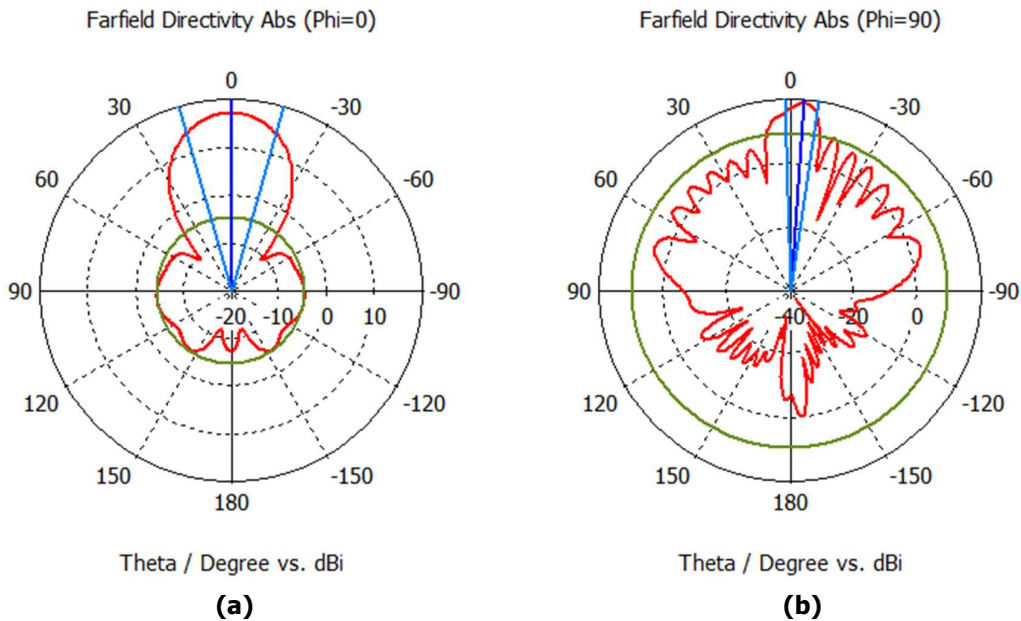
Gambar 5. Pola radiasi Elemen antenna Franklin (a) Azimut dan (b) Elevasi



Gambar 6. Antena Array 3 dengan Elemen Antena Franklin

Untuk mengevaluasi karakteristik antena Franklin dalam konfigurasi array, dilakukan penyusunan array linier dengan 3 elemen seperti pada Gambar 6. Konfigurasi ini digunakan untuk menganalisis kopling antar dalam array. Selain itu, pola radiasi yang dihasilkan dari susunan array ini akan digunakan untuk meninjau perubahan pola radiasi dibandingkan dengan antena tunggal. Pola radiasi tersebut juga akan menjadi acuan dalam proses perkalian pola dengan mempertimbangkan pengaruh kopling pada setiap elemen.

Dari hasil yang didapatkan dari penyusunan array linier ini didapatkan hasil terbaik dengan jarak spasi antar elemen antena Franklin sebesar $2/3$ panjang gelombang. Hasil ini sudah mempertimbangkan juga nilai perbandingan pola radiasi depan ke belakang dari desain array dengan nilai direktivitas dan gain sebesar 19.46 dBi dan 16.42 dBi. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7a merupakan pola radiasi array linier dengan elemen antena Franklin pada bidang azimut dengan lebar beam 3 dB dan tingkat sidelobe sebesar 32.1° dan -21.6 dB. Pada bidang elevasi nilai lebar beam 3 dB dan tingkat sidelobe sebesar 10° dan -9.4 dB seperti yang dipaparkan pada Gambar 7b.

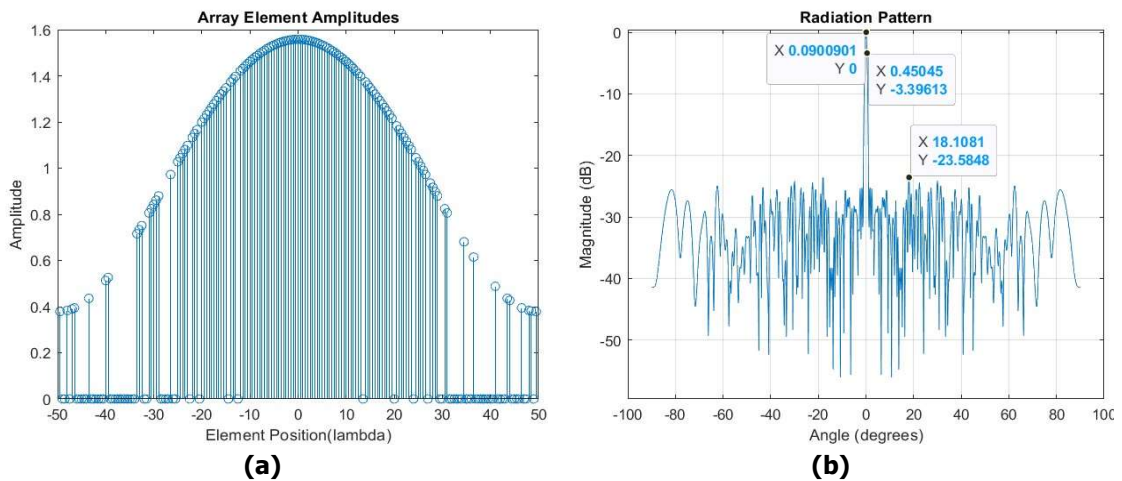


Gambar 7. Pola radiasi array elemen antenna Franklin (a) Azimut dan (b) Elevasi

3.2 Faktor Array

Dari hasil faktor array susunan array linier dengan total elemen 128 setelah pemangkasan elemen 35.7% didapatkan nilai yang sangat baik seperti pada Gambar 8b. Lebar beam 3 dB yang diperoleh mencapai 0.9° , hasil ini sudah memenuhi persyaratan teknis yang sudah ditentukan yaitu lebar beam maksimal sebesar 1° . Kemudian untuk tingkat sidelobe yang didapatkan sebesar -23.6 dB, angka ini juga sudah memenuhi persyaratan teknis dari antenna untuk radar kendaraan yang target tingkat sidelobe kurang dari 20 dB.

Nilai ini didapatkan dengan mengatur eksitasi dari masing masing elemen sesuai dengan distribusi Taylor yang mana nilai tertinggi berada dibagian tengah kemudian semakin keluar nilai eksitasinya semakin kecil. Hal ini dilakukan untuk menekan tingkat sidelobe dari array linier sesuai dengan Gambar 8a.

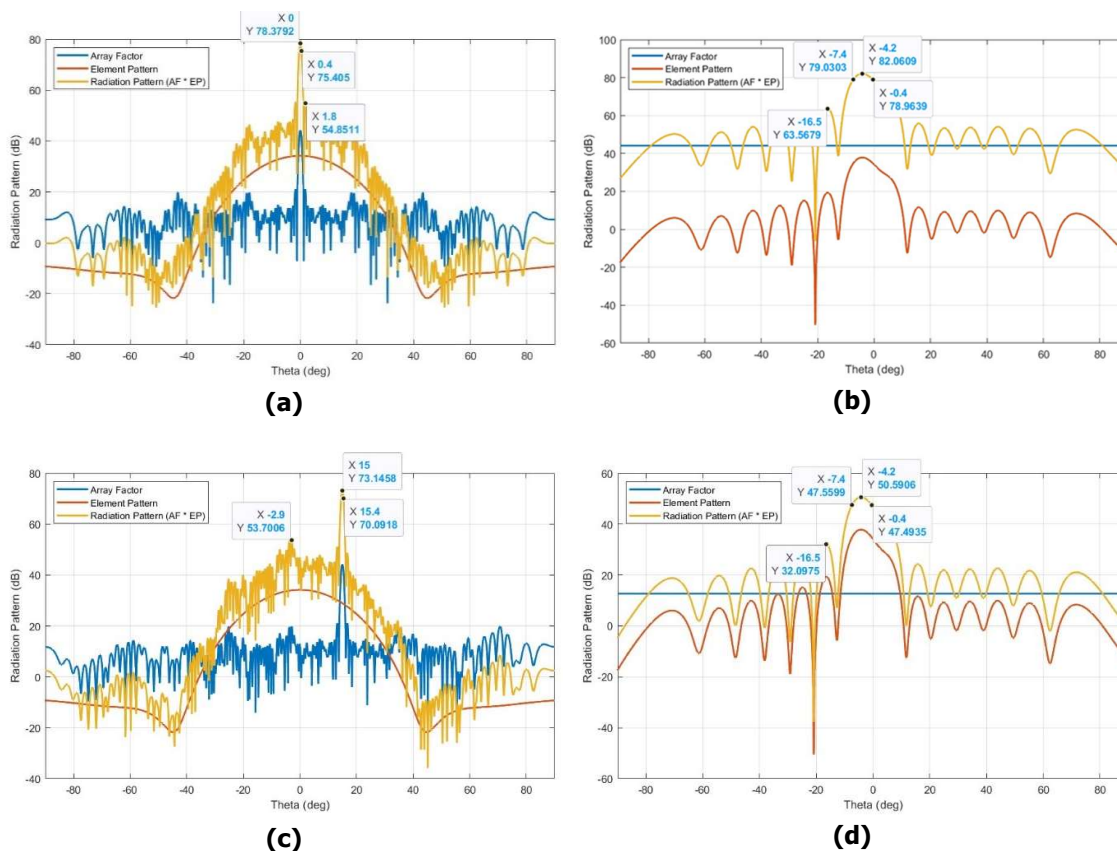


Gambar 8. Faktor array dari konfigurasi array linier 199 elemen dengan pemangkasan elemen 35.7% (a) Amplitudo dan (b) Pola radiasi

Konfigurasi array linier yang sudah disusun dengan teknik pemangkasan elemen berbasis algoritma FFT seperti pada Gambar 3 menunjukkan hasil yang sangat baik, dimana dengan dilakukannya pengurangan jumlah elemen yang semula 199 menjadi 128, sehingga efisiensi elemen yang dicapai sebesar 35.7%. Angka ini jauh lebih besar jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang melakukan pengurangan sebesar 30.5%**(Saharani, dkk, 2024)**.

3.3 Perkalian Pola Radiasi

Hasil dari perkalian pola antara faktor array linier dengan pola elemen antenna Franklin menghasilkan pola radiasi dari linier array elemen antenna Franklin seperti pada Gambar 9. Pada bidang azimut lebar beam 3 dB dari antenna sebesar 0.8° dengan tingkat sidelobe -23.5 dB sesuai dengan Gambar 9a, kurva berwarna kuning yang menunjukkan hasil perkalian pola radiasi.



Gambar 9. Pola radiasi array linier elemen antenna Franklin (a) Azimut dan (b) Elevasi (c) Azimut dengan pemindaian 15° (d) Elevasi dengan pemindaian 15°

Pada bidang elevasi yang ditampilkan pada Gambar 9b mendapatkan hasil pola radiasi dengan lebar beam 3 dB sebesar 7.4° dengan tingkat sidelobe -18.5 dB. Untuk Gambar 9c menampilkan hasil pola radiasi antenna apabila dilakukan pemindaian ke arah 15° pada bidang horizontal/azimut, pola radiasi total yang dihasilkan mendapatkan tingkat sidelobe sebesar -19.45 dB dengan lebar beam 3 dB sebesar 0.8°. Kemudian pada Gambar 9d mendapatkan hasil pola radiasi dengan lebar beam 3 dB sebesar 7.8° dengan tingkat sidelobe -18.5 dB pada saat pemindaian sudut 15° sama seperti pada saat *broadside*. Angka-angka ini sudah

memenuhi persyaratan teknis yang sudah ditetapkan pada Tabel 1, sehingga desain ini dapat diaplikasikan pada radar kendaraan untuk deteksi jarak jauh.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang antena array linier dengan elemen Franklin yang dioptimalkan dengan menggunakan kombinasi metode pencatuan Taylor dan pemangkasan elemen array. Metode ini efektif mengurangi jumlah elemen hingga 35,7% tanpa mengorbankan performa utama antena. Desain ini memenuhi spesifikasi teknis radar otomotif untuk jarak jauh, seperti lebar beam sempit $\leq 1^\circ$ pada bidang azimut, tingkat sidelobe rendah ≤ -20 dB, dan direktivitas tinggi ≥ 10 dBi. Struktur antena Franklin, dengan konfigurasi pencatuan seri, memberikan keuntungan dalam meningkatkan lebar pita dan gain, sementara resonator yang dirancang sefase membantu menghasilkan pola radiasi yang terarah dan sempit. Penggabungan teknik pemangkasan elemen berbasis algoritma FFT memungkinkan efisiensi material tanpa menurunkan resolusi sudut atau akurasi deteksi. Kinerja ini menunjukkan bahwa kombinasi metode pemangkasan elemen array dan struktur antena Franklin secara signifikan meningkatkan kemampuan radar otomotif untuk mendeteksi objek dengan presisi tinggi hingga jarak 300 meter, bahkan dalam kondisi visibilitas rendah. Dengan demikian, desain ini tidak hanya mendukung pengembangan teknologi radar otomotif berikutnya, tetapi juga berkontribusi pada peningkatan keselamatan jalan raya melalui deteksi bahaya yang lebih akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia Hibah Penelitian PMDSU No. 1793/PKS/ITS/2024.

DAFTAR RUJUKAN

- Akbar, F. S., Ligthart, L. P., & Hendranto, G. (2021). A Toolbox of Subarrays for Optimizing Wide-Angular Scanning Arrays Using Trade-Offs Between Scan Loss and Side Lobe Level. *IEEE Access*, *9*, 16337–16359. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3052049
- Aziz, I., Liao, W.-C., Aliakbari, H., & Simon, W. (2020). Compact and Low Cost Linear Antenna Array for Millimeter Wave Automotive Radar Applications. *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, (pp. 1–4). doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135772
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory Analysis And Design* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Cao, Y., Yan, S., Li, J., & Chen, J. (2022). A Pillbox Based Dual Circularly-Polarized Millimeter-Wave Multi-Beam Antenna for Future Vehicular Radar Applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *71* (7), 7095–7103. doi: 10.1109/TVT.2022.3162299
- Firdausi, A., Hendranto, G., Setijadi, E., & Alaydrus, M. (2023). Analysis and Improvement of Bandwidth and Gain of Millimeter-Wave Microstrip Franklin Antenna With Proximity-Coupled Feed. *IEEE Access*, *11*, 104723–104734. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3317999

- Foysal, Md. F., Mahmud, S., & Baki, A. K. M. (2021). A Novel High Gain Array Antenna Design for Autonomous Vehicles of 6G Wireless Systems. *2021 International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST)*, (pp. 1–5). doi: 10.1109/GECOST52368.2021.9538677
- Hakobyan, G., & Yang, B. (2019). High-Performance Automotive Radar: A Review of Signal Processing Algorithms and Modulation Schemes. *IEEE Signal Processing Magazine*, *36*(5), 32–44. doi: 10.1109/MSP.2019.2911722
- Hasch, J., Topak, E., Schnabel, R., Zwick, T., Weigel, R., & Waldschmidt, C. (2012). Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *60*(3), 845–860. doi: 10.1109/TMTT.2011.2178427
- ITU-R. (2018). *Systems characteristics of automotive radars operating in the frequency band 76-81 GHz for intelligent transport systems applications* (ITU-R M.2057-1).
- Ji, Q., Zhang, L., Zhang, J., Chen, Y., Mao, C., & He, Y. (2022). A 77 GHz Series-fed Leaky-Wave Antenna for Automotive Radar System. *2022 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, (pp. 1–3). doi: 10.1109/IWS55252.2022.9977702
- Kemenkominfo. (2020). *Peraturan Direktur Jendral Sumber Daya dan Perangkat Pos dan Informatika Nomor 03 Tahun 2020* (No. 03).
- Mirzaee, M., & Tavassolian, N. (2020). Low-Profile Wearable Wideband Antenna with High Gain Based on Franklin Array for Future 5G Wireless Body Area Networks. *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, (pp. 449–450). doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329727
- Pandharipande, A., Cheng, C.-H., Dauwels, J., Gurbuz, S. Z., Ibanez-Guzman, J., Li, G., Piazzoni, A., Wang, P., & Santra, A. (2023). Sensing and Machine Learning for Automotive Perception: A Review. *IEEE Sensors Journal*, *23*(11), 11097–11115. doi: 10.1109/JSEN.2023.3262134
- Saharani, A., Hendratoro, G., Kuswidiastuti, D., Akbar, F. S., & Firdausi, A. (2024). Design of Planar Arrays with Cross-line Franklin Arrays as Elements for Vehicular Radars. Telah dipresentasikan pada *Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2024)*.
- Sun, J., Huang, L., Zhang, Y., & Zhang, X. (2023). A High Angular Resolution Transceivers Cascaded Automotive Front Radar with Novel Antennas. *2023 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (IWEM)*, (pp.72–74). doi: 10.1109/iWEM58222.2023.10234871

- Waldschmidt, C., Hasch, J., & Menzel, W. (2021). Automotive Radar — From First Efforts to Future Systems. *IEEE Journal of Microwaves*, *1*(1), 135–148. doi: 10.1109/JMW.2020.3033616
- Xiang, D., Li, W., Sun, X., Wang, H., & Su, Y. (2024). Sidelobe Suppression for High-Resolution SAR Imagery Based on Spectral Reshaping and Feature Statistical Difference. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *62*, 1–14. doi: 10.1109/TGRS.2024.3394405
- Yoo, S., Milyakh, Y., Kim, H., Hong, C., & Choo, H. (2020). Patch Array Antenna Using a Dual Coupled Feeding Structure for 79 GHz Automotive Radar Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *19*(4), 676–679. doi: 10.1109/LAWP.2020.2976545
- Zhou, L.-J., Ban, Y.-L., Lian, J.-W., & Sun, Q. (2022). An Optimum Method of Linear Thinned Array Based on Iterative FFT Algorithm. *2022 IEEE 10th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, (pp. 1–2). doi: 10.1109/APCAP56600.2022.10068888