Desain dan Simulasi *Unequal Amplitude Excitation* sebagai Upaya Optimasi *Gain* dan *Side Lobe Level* pada Antena *Automotive Radar*

1st Cathlin Vania Allun
Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi
Telkom University
Purwokerto, Indonesia
cathlinvaniaallun@
student.telkomuniversity.ac.id

2nd Latifatul Khumaeroh
Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi
Telkom University
Purwokerto, Indonesia
latifatulkhumaeroh@
student.telkomuniversity.ac.id

3rd Hadnanda Hafidz Nurabiza
Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi
Telkom University
Purwokerto, Indonesia
hadnanda@
student.telkomuniversity.ac.id

4th Melinda Br Ginting
Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi
Telkom University
Purwokerto, Indonesia
melindag@telkomuniversity.ac.id

5th Eka Setia Nugraha
Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi
Telkom University
Purwokerto, Indonesia
ekavon@telkomuniversity.ac.id

***Abstrak* — *Automotive radar* 24 GHz memerlukan antena dengan *gain* tinggi, *side lobe level* (SLL) rendah, dan dimensi *compact* untuk meningkatkan kemampuan deteksi objek. Namun, peningkatan *gain* pada antena *array* umumnya diikuti oleh kenaikan SLL akibat distribusi eksitasi yang kurang optimal. Penelitian ini bertujuan merancang antena *microstrip patch array* 24 GHz menggunakan metode *unequal amplitude excitation* dengan distribusi Taylor untuk meningkatkan *gain* sekaligus menekan SLL. Perancangan dilakukan melalui simulasi menggunakan CST Studio Suite dengan konfigurasi *array* 2×12 elemen, jaringan pencatu *corporate feed*, serta evaluasi integrasi *radome* dan model bodi kendaraan. Kinerja antena dianalisis berdasarkan parameter *return loss*, *gain*, SLL, dan dimensi antena. Hasil simulasi menunjukkan antena bekerja pada frekuensi resonansi 24,012 GHz dengan *return loss* sebesar −15,55 dB, VSWR 1,40, dan *gain* 15,55 dBi setelah integrasi *radome*. Dimensi antena sebesar 95,191 mm × 16,23 mm × 0,324 mm memenuhi target desain yang *compact*. Meskipun nilai SLL yang diperoleh masih sebesar −9,5 dB sehingga belum mencapai target −20 dB, hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu menghasilkan antena 24 GHz dengan performa yang memenuhi kebutuhan utama aplikasi *automotive radar*.**

Kata kunci— *automotive radar*, antena *array*, *microstrip patch*, *side lobe level*, Taylor, *unequal amplitude excitation*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi sensor modern saat ini semakin menuntut peningkatan kualitas sistem deteksi yang mampu bekerja secara cepat dan akurat. Hal ini sejalan dengan berkembangnya *automotive radar* untuk mendukung keselamatan kendaraan. Radar memanfaatkan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi keberadaan, posisi, dan kecepatan objek [1][2]. *Automotive radar* umumnya beroperasi pada frekuensi 24 GHz dan 77 GHz [3], dimana penggunaan frekuensi tersebut berpengaruh pada akurasi deteksi [4]. Frekuensi 24 GHz umumnya digunakan sebagai *short range radar* (SRR), sedangkan frekuensi 77 GHz digunakan sebagai *long range radar* (LRR) [4]. Di antara keduanya, radar 24 GHz memiliki keunggulan pada biaya produksi yang lebih rendah sehingga lebih mudah diterapkan pada berbagai jenis kendaraan khususnya pada segmen menengah Namun, radar 24 GHz memiliki keterbatasan resolusi sehingga memerlukan antena dengan *gain* tinggi, *side lobe level* (SLL) rendah, serta dimensi yang tetap *compact* agar mampu meningkatkan kemampuan deteksi tanpa mengurangi efisiensi ruang pemasangan pada kendaraan. Konfigurasi *microstrip patch array* menjadi salah satu solusi yang banyak digunakan karena mampu meningkatkan *gain* melalui penambahan *aperture* efektif antena, [5], meskipun peningkatan jumlah elemen umumnya diikuti oleh kenaikan SLL akibat *mutual coupling* dan distribusi eksitasi yang kurang optimal.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengusulkan berbagai pendekatan untuk mengoptimalkan performa antena *automotive radar*. Antena *series-fed microstrip patch array* 1×16 dengan metode *tapered array* menghasilkan SLL sebesar −18,1 dB, namun *gain* yang diperoleh masih terbatas pada 14,43 dB [5]. Sementara itu, konfigurasi 12×8 berbasis distribusi Chebyshev mampu mencapai *gain* di atas 24 dB, tetapi memiliki dimensi yang relatif besar sehingga kurang sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan antena *compact* [6]. Di sisi lain, antena *microstrip patch array* 12×12 dengan distribusi Taylor menghasilkan *gain* 25,05 dB dan dimensi yang lebih *compact*, namun nilai SLL masih berada pada −16,02 dB sehingga belum memenuhi kebutuhan penekanan *side lobe* yang lebih rendah [7]. Hasil-hasil tersebut menunjukkan masih terdapat *trade-off* antara *gain*, SLL, dan dimensi antena, sehingga diperlukan metode yang mampu mengoptimalkan ketiga parameter tersebut secara bersamaan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan perancangan antena *microstrip patch array* 24 GHz menggunakan metode *unequal amplitude excitation*

dengan distribusi Taylor pada jaringan pencatu *corporate feed*. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan *gain* sekaligus menekan SLL tanpa mengurangi efisiensi dimensi antena sehingga sesuai untuk aplikasi *automotive radar*. Selain itu, penelitian juga mengevaluasi pengaruh konfigurasi *array*, saluran transmisi, serta integrasi *radome* terhadap performa antena berdasarkan parameter *return loss*, *gain*, dan SLL.

II. KAJIAN TEORI

A. Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip merupakan antena yang terdiri atas *patch* konduktor, substrat dielektrik, dan *groundplane*. Antena ini banyak digunakan pada sistem komunikasi dan radar karena memiliki dimensi yang ringkas, bobot ringan, mudah difabrikasi, serta mudah diintegrasikan dengan rangkaian RF. Namun, antena mikrostrip elemen tunggal memiliki *gain* yang relatif rendah sehingga untuk aplikasi *automotive* radar umumnya dikembangkan menjadi konfigurasi *array* guna meningkatkan *directivity* dan *gain* tanpa menghilangkan keunggulan ukuran yang *compact* [8] [9][10].

B. Antena *Array*

Antena *array* merupakan susunan beberapa elemen antena yang bekerja secara bersamaan sehingga menghasilkan pola radiasi yang lebih terarah dibandingkan antena tunggal. Penambahan jumlah elemen mampu meningkatkan *aperture* efektif, *gain*, dan *directivity*. Namun, apabila jarak antar elemen tidak dirancang dengan tepat maka dapat memunculkan *grating lobe* maupun *mutual coupling*. Oleh karena itu, konfigurasi *array*, *spacing*, serta distribusi amplitudo dan fasa menjadi faktor utama dalam menentukan performa antena, khususnya pada aplikasi *automotive* radar berbasis *mmWave* [10][11][12].

C. Eksitasi Taylor

Eksitasi Taylor merupakan metode *amplitude tapering* yang menerapkan *unequal amplitude excitation* dengan memberikan amplitudo lebih besar pada elemen tengah dibandingkan elemen tepi. Distribusi amplitudo tersebut mampu menekan SLL dengan peningkatan *beamwidth* yang relatif kecil dibandingkan metode *tapering* lainnya. Oleh karena itu, distribusi Taylor banyak digunakan pada antena *array* untuk menghasilkan kompromi yang baik antara *gain*, *beamwidth*, dan SLL sehingga sesuai untuk aplikasi *automotive* radar [13][10][14][15].

D. *Radome*

Radome merupakan struktur pelindung antena yang bersifat transparan terhadap gelombang elektromagnetik. Selain melindungi antena dari pengaruh lingkungan seperti hujan, debu, dan paparan sinar matahari, *radome* juga harus memiliki rugi transmisi yang rendah agar tidak menurunkan performa elektromagnetik antena secara signifikan. Oleh karena itu, pemilihan material, ketebalan, dan jarak *radome* terhadap antena perlu diperhatikan untuk meminimalkan perubahan karakteristik radiasi [18][17][18].

E. *T-Junction*

T-Junction merupakan struktur pembagi daya yang digunakan pada jaringan pencatu antena *array* untuk mendistribusikan daya dari satu saluran menjadi beberapa cabang. Pada penelitian ini, *T-Junction* dikombinasikan dengan *quarter-wave transformer* untuk menghasilkan pembagian daya tidak seragam sesuai distribusi Taylor. Pengaturan impedansi pada setiap cabang memungkinkan penerapan *unequal amplitude excitation* sehingga distribusi daya antar elemen dapat dikendalikan guna mendukung peningkatan *gain* dan penekanan SLL [9][11][19].

III. METODE

A. Perancangan Sistem

Sistem yang dirancang merupakan antena *microstrip patch array* 12 × 2 yang terdiri atas 24 elemen untuk aplikasi *automotive* radar pada frekuensi kerja 24 GHz. Perancangan dilakukan menggunakan CST Studio Suite dengan menerapkan metode *unequal amplitude excitation* berbasis distribusi Taylor pada jaringan pencatu *corporate feed*. Tahapan perancangan meliputi desain *single element*, pengembangan menjadi konfigurasi *full array*, optimasi jaringan pencatu, penambahan *radome* berbahan PTFE, serta integrasi antena pada model bodi kendaraan. Setiap tahapan dievaluasi melalui simulasi elektromagnetik untuk memperoleh performa antena sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan.

B. Spesifikasi Antena

Perancangan antena diawali dengan penentuan spesifikasi sebagai acuan dalam pengembangan desain serta evaluasi performa antena. Spesifikasi tersebut disusun berdasarkan kebutuhan aplikasi *automotive radar* pada frekuensi kerja 24 GHz, yang meliputi frekuensi operasi, *gain*, SLL, serta dimensi antena. Antena yang dirancang merupakan antena *microstrip patch array* berkonfigurasi 12 × 2 dengan 24 elemen yang menerapkan metode *unequal amplitude excitation* berbasis distribusi Taylor. Adapun spesifikasi teknis diharapkan dapat tercapai adalah sebagai berikut.

TABEL 1
(Spesifikasi Sistem)

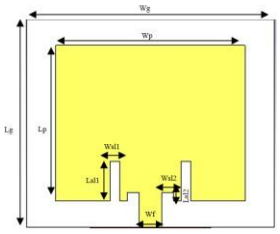
Parameter	Spesifikasi
Frekuensi	24 GHz
Gain	>15 dBi
SLL	≤ -20 dB
Dimensi *Compact*	100 x 100 x 1,6 mm

Tabel 1 menunjukkan spesifikasi teknis yang menjadi acuan dalam proses perancangan dan evaluasi performa antena pada setiap tahapan pengembangan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. *Single Element*

Perancangan *single element* dilakukan sebagai tahap awal untuk desain antena *microstrip*. Tahap ini diawali dengan perhitungan dimensi awal berdasarkan persamaan teoritis, kemudian dilakukan simulasi dan modifikasi untuk memperoleh karakteristik resonansi yang sesuai dengan frekuensi kerja yang ditargetkan.



GAMBAR 1
(Antena *Single Element)*

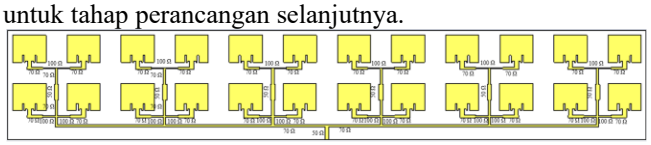
Gambar 1 menunjukkan geometri akhir antena *single element* setelah proses modifikasi. Penyesuaian dimensi *patch* dan penambahan *slit* diterapkan untuk memperoleh *impedance matching*. Berdasarkan hasil simulasi, modifikasi tersebut menggeser frekuensi resonansi hingga berada pada frekuensi target 24 GHz, yang ditunjukkan oleh nilai *return loss* -18,814dB dan VSWR 1,443 yang sesuai dengan spesifikasi desain. Walaupun karakteristik pencatuan telah memenuhi kebutuhan sistem, antena *single element* masih menghasilkan *gain* yang relatif rendah karena luas *aperture* radiasi yang terbatas. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa antena belum mampu menghasilkan pancaran yang cukup terarah untuk aplikasi *automotive* radar. Oleh karena itu, konfigurasi *array* diterapkan sebagai pendekatan untuk meningkatkan *directivity* sekaligus memperbesar *gain* antena.

B. Antena *Full Array*

TABEL 2
(Konfigurasi Elemen Antena *Array)*

Konfigurasi Antena *Array*	Frekuensi Efektif (GHz)	VSWR	*Return Loss* 24 GHz (dB)	SLL (dB)	*Gain* (dBi)	*Main lobe Direction* (°)
2 Elemen	23,644	1,532	-9,561	-16	9,385	0
4 Elemen	24,412	1,024	-8,371	-16	11,93	0
8 Elemen	23,118	1,019	-18,41	-12,6	14,89	0
12 elemen	24,91	1,052	-6,562	-15,6	13,07	12
16 elemen	23,542	1,884	-7,631	-3,2	15,51	0
20 elemen	23,974	1,368	-16,019	-7,3	14,54	11
24 Elemen	24,012	1,4	-15,518	-10,5	15,87	9

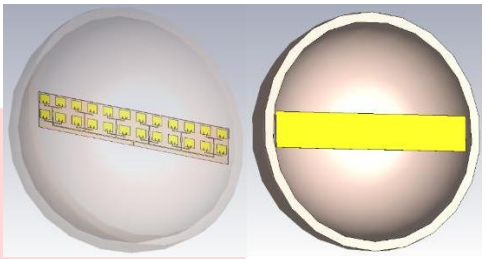
Tabel 2 menunjukkan hasil evaluasi konfigurasi antena *array* dari 2 hingga 24 elemen. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan jumlah elemen meningkatkan *gain*, namun juga memengaruhi nilai SLL, arah *main lobe*, dan ukuran antena. Konfigurasi 24 elemen dipilih sebagai konfigurasi akhir karena memberikan keseimbangan terbaik antara performa dan ukuran antena. Konfigurasi ini menghasilkan *return loss* −15,18 dB, VSWR 1,4, *gain* 15,87 dBi, SLL −10,5 dB, dan *main lobe direction* 9°. Meskipun konfigurasi 20 elemen memiliki SLL yang lebih rendah, *gain* yang dihasilkan lebih kecil. Selain itu, dimensi antena 24 elemen masih memenuhi batas ruang pemasangan pada bagian depan kendaraan, sehingga dipilih sebagai konfigurasi untuk tahap perancangan selanjutnya.



GAMBAR 2
(Antena *Full Array* 24 Elemen)

Gambar 2 menunjukkan geometri antena *array* akhir yang terdiri atas 24 elemen dengan distribusi amplitudo *unequal amplitude* menggunakan metode Taylor *tapering*. Jaringan pencatu dirancang menggunakan konfigurasi T-*junction* untuk mendistribusikan daya ke setiap elemen antena. Kombinasi metode Taylor *tapering* dan jaringan pencatu tersebut diterapkan untuk menghasilkan distribusi eksitasi yang sesuai sehingga mampu meningkatkan *gain* sekaligus menekan SLL tanpa mengubah konfigurasi dasar antena secara signifikan.

C. *Radome*



GAMBAR 3
(*Single Layer Radome)*

Gambar 3 menunjukkan model *single-layer radome* dengan bahan PTFE. *Radome* berbentuk *circular* yang digunakan sebagai lapisan pelindung antena sekaligus untuk mengevaluasi pengaruh material dielektrik terhadap performa antena.

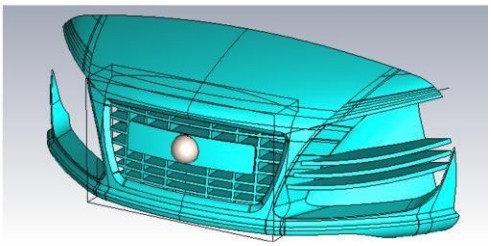
TABEL 3
(Hasil Evaluasi Konfigurasi Elemen Antena *Array* dengan *Single-Layer Radome)*

Konfigurasi Elemen Antena *Array*	Frekuensi (GHz)	*Return Loss* (dB) 24 GHz	SLL (dB)	*Gain* (dBi)	*Main lobe Direction* (◦)
2	24	-9,165	-13,3	9,340	0
4	24	-9,750	-16,4	11,92	0
8	24	-18,339	-12,7	14,88	0
12	24	-6,565	-14,7	13,21	0
16	24	-7,801	-3,8	15,73	0
20	24	-15,218	-6,6	14,42	-11
24	24	-15,892	-9,2	15,50	9

Tabel 3 menunjukkan pengujian yang dilakukan pada setiap konfigurasi jumlah elemen dengan menganalisis parameter *return loss*, *gain*, dan SLL. Hasil *gain* yang didapat 15,50 dBi dan nilai SLL -9,2 dB. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan *radome* menyebabkan perubahan pada karakteristik antena akibat interaksi gelombang elektromagnetik dengan lapisan dielektrik. Namun, perubahan tersebut relatif kecil sehingga antena tetap beroperasi pada frekuensi 24 GHz dan mempertahankan karakteristik yang sesuai untuk aplikasi *automotive radar*.

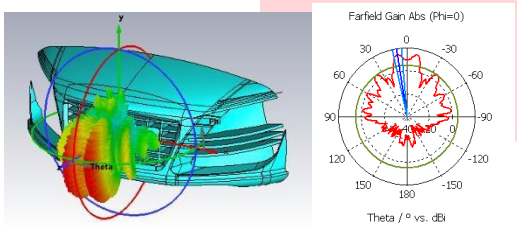
D. Integrasi *Full Array* pada Bodi Kendaraan

Setelah melalui proses optimasi dan penambahan *single-layer radome*, antena *array* selanjutnya diintegrasikan pada model bodi kendaraan untuk mengevaluasi performanya pada kondisi pemasangan yang mendekati aplikasi nyata.



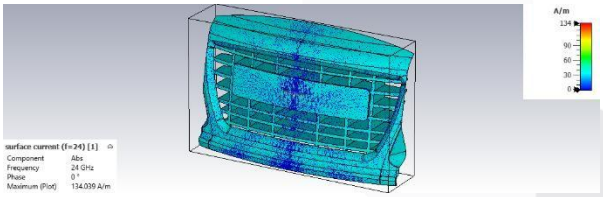
GAMBAR 4
(Pengintegrasian Antena pada *Grille)*

Gambar 4 menunjukkan pengintegrasian antena pada bodi kendaraan. Antena ditempatkan di bagian depan kendaraan, tepatnya di belakang *grille*. Posisi tersebut dipilih karena memberikan bidang pandang yang luas ke arah depan kendaraan serta memungkinkan radiasi gelombang elektromagnetik dipancarkan tanpa terhalang secara signifikan oleh struktur bodi kendaraan.



GAMBAR 5
(Hasil Simulasi Pola Radiasi Antena yang Terintegrasi dengan Bodi Kendaraan)

Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi pola radiasi antena setelah diintegrasikan pada bodi kendaraan. Berdasarkan hasil simulasi, antena menghasilkan nilai *gain* sebesar 15,55 dBi dengan nilai SLL sebesar −9,5 dB. Integrasi antena dengan struktur bodi kendaraan menyebabkan arah *main lobe* bergeser menjadi 9° dari 0°. Pergeseran ini dipengaruhi oleh interaksi medan elektromagnetik antara antena dan struktur logam di sekitarnya yang mengubah distribusi arus permukaan serta karakteristik radiasi antena.



GAMBAR 6
(Hasil *Surface Current)*

Gambar 6 menunjukkan distribusi *surface current* antena setelah proses integrasi pada bodi kendaraan dilakukan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konsentrasi arus permukaan paling dominan berada pada elemen antena dan area *grille* di sekitar lokasi pemasangan, sedangkan penyebaran arus pada bagian bodi kendaraan lainnya relatif kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa energi elektromagnetik yang dipancarkan antena tetap terlokalisasi pada area radiasi sehingga interaksi elektromagnetik dengan struktur kendaraan dapat diminimalkan.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang antena *microstrip full array* 24 elemen untuk aplikasi *automotive radar* 24 GHz menggunakan metode *unequal amplitude excitation* berbasis distribusi Taylor. Hasil simulasi menunjukkan bahwa antena mampu bekerja pada frekuensi resonansi 24 GHz dengan nilai *return loss* sebesar -15,54 dB, VSWR sebesar 1,40 dan *gain* sebesar 15,55 dBi sehingga memenuhi spesifikasi frekuensi kerja dan target *gain* yang ditetapkan. Selain itu, antena memiliki dimensi 95,191 mm × 16,23 mm × 0,324 mm sehingga memenuhi kebutuhan desain yang ringkas dan mendukung integrasi pada sistem radar kendaraan. Hasil integrasi *radome* juga menunjukkan bahwa antena tetap mempertahankan karakteristik radiasi yang relatif stabil dengan perubahan parameter yang masih dapat diterima. Meskipun demikian, nilai SLL yang diperoleh sebesar -9,5 dB belum mencapai target perancangan sebesar -20 dB, yang menunjukkan bahwa optimasi distribusi eksitasi, jaringan pencatu, dan konfigurasi *array* masih diperlukan untuk meningkatkan pengendalian pola radiasi. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *unequal amplitude excitation* berbasis distribusi Taylor mampu menghasilkan antena dengan performa yang memenuhi sebagian besar spesifikasi utama sehingga berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut pada aplikasi *automotive radar* 24 GHz.

REFERENSI

[1] Y. Jia, Y. Liu, and Y. Zhang, “A 24 GHz microstrip antenna array with large space and narrow beamwidth,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 62, no. 4, pp. 1615–1620, Apr. 2020, doi: 10.1002/mop.32190.

[2] “Automotive Radar Technology, Market, and Test Requirements White Paper”.

[3] J. Yeo and J. I. Lee, “Gain Enhancement of Microstrip Patch Array Antennas Using Two Metallic Plates for 24 GHz Radar Applications,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 12, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/electronics12071512.

[4] Z. Song, “Microstrip Array Antenna for 24GHz Short-Range Automotive Radar,” in *ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery, Oct. 2021, pp. 367–372. doi: 10.1145/3501409.3501477.

[5] F. Suliman and A. Yazgan, “24 GHz Patch Antenna Array Design with Reduced Side Lobe Level for Automotive Radar System,” in *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2020 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2020. doi: 10.1109/SIU49456.2020.9302104.

[6] Y. Zhang, Y. Chen, and Y. Liu, “Millimeter Wave Microstrip Antenna Array for Automotive Collision Avoidance Radar,” Oct. 2025.

[7] Y. Guan and J. Zhou, “A Low Sidelobe Microstrip Antenna Array for 24 GHz UAV Obstacle Avoidance Radar System,” in *2024 6th International Conference on Electronic Engineering and Informatics, EEI 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 1805–1809. doi: 10.1109/EEI63073.2024.10695985.

[8] M. Karahan, M. Inal, A. Dilmen, F. Lacinkaya, A. N. Akay, and C. Kasnakoglu, “Microstrip Patch Antenna Design at 10 GHz for X Band Applications,” *European Journal of Theoretical and Applied*

Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 384–393, Jan. 2024, doi: 10.59324/ejtas.2024.2(1).33.

[9] I. D. Ortega González, "DESIGN OF AN UNEQUAL WILKINSON POWER DIVIDER FOR VHF RADAR APPLICATIONS," *Revista Telemática*, vol. 20, no. 1, pp. 66–75, 2021, [Online]. Available: http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele

[10] C. A. Balanis, *ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN THIRD EDITION*. [Online]. Available: www.copyright.com.

[11] D. Pozar, "Microwave Engineering 2nd Ed David Pozar."

[12] E. Carpentieri *et al.*, "Millimeter-Wave Phased-Array Antennas."

[13] K.Nunvitha, M.Mounika, G.Saikumar, K.Neelima, and M.M.Dasu, "SIDE LOBE REDUCTION OF CIRCULAR ARRAY USING TAYLOR DISTRIBUTION FUNCTION IN RADAR APPLICATIONS," *International Journal of Electronics and Communication Engineering & Technology (IJECET)*, vol. 7, no. 2, 2020.

[14] N. S. Khasim, Y. Murali Krishna, J. Thati, and & M. V. Subbarao, "ANALYSIS OF DIFFERENT TAPERING TECHNIQUES FOR EFFICIENT RADIATION PATTERN." [Online]. Available: http://e-jst.teiath.gr

[15] A. H. Nguyen, J. H. Cho, and H. K. Sung, "Theoretical demonstration of security improvement of optical phased array based on optically injection-locked lasers," *Photonics*, vol. 8, no. 11, Nov. 2021, doi: 10.3390/photonics8110469.

[16] C. Kumar, H. Ur, R. Mohammed, and G. Peake, "mmWave Radar Radome Design Guide," 2021. [Online]. Available: www.ti.com

[17] J. Deng, G. Zhou, and Y. Qiao, "Multidisciplinary design optimization of sandwich-structured radomes," *Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 233, no. 1, pp. 179–189, Jan. 2019, doi: 10.1177/0954406218757268.

[18] T. Dahms, D. B. Hayman, B. Mohamadzade, and S. L. Smith, "Measurement of Dielectric Properties of Thin Materials for Radomes Using Waveguide Cavities," *Telecom*, vol. 5, no. 3, pp. 706–722, Sep. 2024, doi: 10.3390/telecom5030035.