

Perkembangan Radar Modern: Integrasi Antena Adaptif, Pemrosesan Sinyal Cerdas, dan Aplikasi SAR serta RCS

Salsabila Husniah Putri^{1*}, Sovian Aritonang²

^{1,2} Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer

Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Email: slsblhnptr@gmail.com

ABSTRACT

This research aims to structuredly examine the latest developments in radar technology, combining adaptive antenna design, intelligent signal processing, and the use of Synthetic Aperture Radar (SAR) and Radar Cross Section (RCS). This study aims to address the research gap on how radar hardware innovations can be fully integrated with artificial intelligence-based algorithms, a topic that remains largely unexplored in the current literature. The method used is a Systematic Literature Review (SLR), with data from leading Q1 international journals indexed in Scopus, such as IEEE Transactions on Antennas and Propagation, IEEE Transactions on Signal Processing, IET Radar, Sonar & Navigation, and Remote Sensing of Environment. The analysis process includes article searches, application of entry-exit rules, retrieval of key information, topic clustering, and comparison of methods and results to identify key trends and remaining research gaps. The results of the study indicate that the main direction of modern radar research emphasizes the integration of adaptive antennas using metamaterials and phased-array systems, plus the application of machine learning and deep learning to detect and classify targets. However, significant challenges remain in optimizing the capabilities of learning models for general use across diverse environmental conditions, as well as effectively integrating hardware and intelligent algorithms. The key contribution of this research is the creation of a conceptual framework for modern radar that connects adaptive antenna components, artificial intelligence-based signal processing, and cross-disciplinary applications such as defense, autonomous vehicles, and earth monitoring. This study is expected to serve as a foundation for further research on the development of adaptive radar systems utilizing artificial intelligence and advanced materials, while also supporting strategic policy directions in the fields of defense and environmental surveillance.

Keywords: Modern radar, adaptive antenna, intelligent signal processing, Synthetic Aperture Radar (SAR), Radar Cross Section (RCS), machine learning, remote sensing

PENDAHULUAN

Radar merupakan teknologi utama di bidang penginderaan jarak jauh, navigasi, serta sistem pertahanan, yang unggul karena dapat beroperasi aktif dalam berbagai kondisi cuaca dan tingkat pencahayaan. Dengan kemajuan teknologi, timbul kebutuhan akan sistem radar yang lebih akurat, efisien, dan dapat menyesuaikan diri. Hal ini memicu penelitian dalam pengembangan antena adaptif, algoritma pemrosesan sinyal yang cerdas, serta pendekatan inovatif berdasarkan *Synthetic Aperture Radar (SAR)* dan *Radar Cross Section (RCS)*. Salah satu area yang mengalami pertumbuhan cepat dalam dekade belakangan adalah *Automatic Target Recognition (ATR)* melalui citra SAR yang menggunakan *deep learning*. Teknologi ini dapat meningkatkan ketepatan dan ketangguhan sistem dalam mengidentifikasi objek di situasi yang rumit. Penelitian oleh Li et al. (2023) di jurnal *Remote Sensing* menunjukkan bahwa model *Convolutional Neural Network (CNN)* serta pendekatan *end-to-end* mampu mengekstraksi fitur citra dengan kinerja yang melebihi metode konvensional [1]. Selain itu, ulasan berjudul "*Deep Learning Meets SAR: Concepts, Models, Pitfalls, and Perspectives*" menekankan bahwa meskipun potensi metode ini besar, tantangan utama tetap ada, seperti speckle noise, geometri pencitraan yang kompleks, serta keterbatasan data pelatihan yang representatif [2].

Penelitian lainnya, seperti "*Synthetic Aperture Radar Image Analysis Based on Deep Learning: A Review of a Decade of Research*", menunjukkan bahwa penerapan *deep learning* pada citra SAR

tidak terbatas pada pengenalan target, melainkan juga mencakup segmentasi, pengurangan derau (despeckling), analisis temporal, serta integrasi multisumber dengan data optik [3]. Penggunaan teknologi SAR di sektor pertanian khususnya klasifikasi tanaman, pemantauan pertumbuhan, dan estimasi hasil panen juga mengalami perkembangan yang signifikan. Ulasan berjudul “*Review of Synthetic Aperture Radar with Deep Learning in Agricultural Applications*” menjelaskan bahwa teknik augmentasi data serta metode pelatihan berdasarkan *deep learning* dapat meningkatkan akurasi klasifikasi meskipun kondisi lingkungan berubah-ubah [4]. Dari aspek perangkat keras, pengembangan antena adaptif dan phased array menjadi komponen penting untuk mendukung performa sistem radar modern. Desain antena gelombang milimeter serta beamforming adaptif pada antena patch menjadi fokus penelitian intensif karena potensinya dalam memenuhi kebutuhan bandwidth tinggi, pengaturan arah sinar, dan fleksibilitas pola radiasi, termasuk dalam sistem komunikasi 5G/6G yang terintegrasi dengan radar [5].

Meskipun berbagai penelitian tersebut telah menghasilkan kemajuan yang berarti, masih ada kesenjangan penelitian terkait generalisasi model deep learning terhadap variasi data radar yang beragam, serta integrasi antara desain perangkat keras dan algoritma pemrosesan cerdas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengembangan sistem radar berbasis pembelajaran mendalam yang dapat beradaptasi dengan kondisi kompleks, sambil meningkatkan efisiensi dan ketepatan pengenalan target melalui pendekatan integratif antara aspek perangkat keras dan perangkat lunak. Secara singkat, penelitian ini akan menerapkan pendekatan berbasis deep learning dengan optimasi parameter arsitektur model untuk mencapai kinerja optimal pada data SAR yang sebenarnya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review (SLR)* untuk menggabungkan dan merangkum temuan penelitian terkini dalam teknologi radar modern. Tujuan utama dari metode ini adalah mengenali pola metodologis dan teknis yang muncul dari penelitian selama lima tahun terakhir, meliputi desain antena adaptif, pengelolaan *Radar Cross Section (RCS)*, pemrosesan sinyal dengan kecerdasan buatan, serta pengembangan *Synthetic Aperture Radar (SAR)* berketepatan tinggi.

Langkah awal metodologi ini melibatkan pemetaan area penelitian sesuai dengan domain utama. Pada kelompok desain antena adaptif, sebagian besar penelitian memanfaatkan material cerdas seperti *metasurface* dan *reconfigurable intelligent surface (RIS)* untuk meningkatkan efisiensi radiasi serta kemampuan mengarahkan pancaran (beam steering) [6]; [7]. Model numerik seperti *Finite Element Method (FEM)* dan *Method of Moments (MoM)* diterapkan untuk memperkirakan distribusi medan elektromagnetik dan pola radiasi antena [8].

Di kelompok pengurangan dan pengoptimalan RCS, penelitian menitikberatkan pada desain struktur metamaterial dan *phase-gradient metasurface* untuk mengatur hamburan gelombang elektromagnetik. Teknik optimasi menggunakan algoritma evolusioner, seperti *genetic algorithm* dan *particle swarm optimization (PSO)*, diterapkan untuk mendapatkan desain metasurface yang menghasilkan reduksi RCS pada pita lebar dan multi-band [9]; [10]. Beberapa kajian menunjukkan bahwa pengendalian fase dan amplitudo dalam unit sel metasurface dapat menurunkan pantulan radar hingga lebih dari 10 dB pada rentang frekuensi yang luas [11].

Pada kelompok pemrosesan sinyal radar berbasis kecerdasan buatan, penelitian mutakhir beralih dari teknik klasik seperti *matched filtering* ke arsitektur *deep learning* untuk mendeteksi dan mengklasifikasi target. Pendekatan menggunakan *Convolutional Neural Networks (CNN)* dan *transformer architectures* diterapkan dalam *Automatic Target Recognition (ATR)* untuk meningkatkan ketepatan klasifikasi citra radar di lingkungan yang kompleks [12]; [13]. Model *unsupervised learning* juga dimanfaatkan untuk mengatasi keterbatasan data pelatihan pada radar tanpa label, sehingga meningkatkan kemampuan generalisasi terhadap berbagai kondisi cuaca dan clutter [14].

Pada kelompok *Synthetic Aperture Radar (SAR)*, metodologi penelitian berfokus pada peningkatan resolusi spasial dan pengurangan *speckle noise* menggunakan pendekatan *deep super-resolution networks* serta *sparse signal reconstruction*. Integrasi SAR dengan pembelajaran mendalam telah memungkinkan peningkatan signifikan dalam *change detection*, pemetaan

topografi, dan klasifikasi lahan [15]; [16]. Selain itu, metode *data fusion* antara sensor SAR dan optik digunakan untuk mengoptimalkan interpretasi citra multi temporal [17].

Langkah terakhir metodologi adalah sintesis tematik dan konseptual, di mana hasil dari keempat kelompok penelitian digabungkan untuk membentuk kerangka konseptual sistem radar cerdas (*intelligent radar framework*). Sintesis ini menegaskan bahwa integrasi antara desain antenna berbasis metamaterial, optimasi RCS, dan algoritma pemrosesan sinyal berbasis AI merupakan langkah strategis menuju sistem radar adaptif generasi mendatang [13].

Dengan demikian, metodologi studi ini tidak hanya membandingkan hasil penelitian dari berbagai bidang, tetapi juga menekankan sinergi antara aspek fisika gelombang, desain perangkat keras, dan algoritma cerdas sebagai dasar pengembangan radar di masa depan.

1. Pertanyaan Studi

- Bagaimana material inovatif seperti *metasurface* dan *reconfigurable intelligent surface (RIS)* dapat diterapkan untuk meningkatkan kemampuan antenna radar adaptif, khususnya dalam memperluas bandwidth, mengoptimalkan arah pancaran (*beam steering*), dan menjaga efisiensi radiasi pada frekuensi tinggi?
- Bagaimana strategi desain *coding metasurface* dan penerapan algoritma optimasi berbasis evolusioner dapat digunakan untuk menurunkan nilai RCS secara signifikan tanpa menurunkan efisiensi transmisi dan sensitivitas sistem radar?
- Bagaimana penerapan model pembelajaran mendalam seperti *Convolutional Neural Network (CNN)*, *Recurrent Neural Network (RNN)*, dan *transformer architecture* dapat meningkatkan kemampuan deteksi, pelacakan, serta pengenalan target otomatis (*Automatic Target Recognition / ATR*) dalam lingkungan dengan clutter dan interferensi tinggi?

2. Strategi Pencarian

Pencarian literatur dilakukan melalui pendekatan sistematis yang menekankan penelitian radar terkini yang menggabungkan elemen desain fisik, pengolahan sinyal, serta kecerdasan buatan. Perhatian utama pencarian ditujukan pada artikel yang membahas sistem radar menggunakan *metasurface*, *synthetic aperture radar (SAR)*, dan aplikasi AI untuk memperbaiki deteksi serta klasifikasi target. Proses pencarian dilakukan di basis data akademik terkemuka seperti Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, dan SpringerLink, dengan pembatasan publikasi dari tahun 2020 hingga 2025 untuk mencerminkan kemajuan terkini dalam radar generasi baru.

Langkah pencarian dimulai dengan penentuan kata kunci yang sesuai, seperti “adaptive radar”, “*metasurface antenna*”, “RCS reduction”, “*synthetic aperture radar*”, dan “AI-based radar signal processing”. Kata kunci tersebut dikombinasikan menggunakan operator logika untuk menyempitkan hasil pada kajian yang memiliki nilai eksperimen dan kontribusi teknis yang berarti. Selanjutnya, dilakukan penyaringan berdasarkan judul dan abstrak untuk memastikan relevansi konteks, kemudian diikuti dengan pembacaan menyeluruh terhadap artikel yang memenuhi kriteria awal.

Strategi ini menghasilkan koleksi literatur yang beragam, meliputi penelitian simulasi elektromagnetik, desain antenna adaptif, serta penerapan pembelajaran mendalam untuk pengolahan sinyal radar. Dari proses tersebut, diperoleh sumber data yang menunjukkan tren umum bahwa perkembangan radar modern mengarah pada sistem yang dapat menyesuaikan diri, hemat energi, dan didasarkan pada kecerdasan buatan, di mana desain fisik antenna dan algoritma pengolahan sinyal tidak lagi terpisah, melainkan dikembangkan secara bersinergi.

3. Kriteria Inklusi / Pengecualian

- Termasuk: Studi berfokus pada aspek teknis radar, seperti perancangan antenna adaptif, pengembangan *metasurface* untuk pengendalian hamburan elektromagnetik, pengurangan *Radar Cross Section (RCS)*, peningkatan resolusi citra *Synthetic Aperture Radar (SAR)*, atau integrasi kecerdasan buatan dalam pemrosesan sinyal radar.
- Dikecualikan: Penelitian yang hanya bersifat konseptual atau teoritis tanpa dukungan data eksperimental, simulasi numerik, atau validasi algoritmik dieliminasi karena tidak

memberikan bukti empiris yang cukup untuk dibandingkan. Studi yang berfokus pada aspek non-teknis radar, seperti kebijakan pertahanan, manajemen industri, atau aspek ekonomi sistem radar, juga dikecualikan karena tidak mendukung fokus penelitian ini yang berorientasi pada inovasi teknis.

4. Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui metode tematik dan sintesis perbandingan, di mana setiap artikel dievaluasi berdasarkan elemen metodologi, hasil eksperimen, serta sumbangan ilmiahnya pada perkembangan radar cerdas. Langkah awal analisis melibatkan pengelompokan kajian ke dalam kategori utama, yakni: (1) inovasi dalam desain antenna dan struktur metasurface, (2) pendekatan pengurangan RCS melalui optimasi elektromagnetik, (3) penerapan kecerdasan buatan pada pengolahan sinyal radar, dan (4) perbaikan resolusi citra SAR dengan teknik rekonstruksi super-resolution serta fusi data.

Berdasarkan kategori tersebut, dilakukan proses pengkodean untuk menemukan tema-tema utama dan keterkaitan antarvariabel, seperti hubungan antara bahan penyusun antenna dengan efisiensi radiasi, atau kaitan antara arsitektur CNN dengan ketepatan deteksi target. Setiap temuan dinilai menggunakan hasil kuantitatif, seperti peningkatan gain, penurunan RCS, dan rasio sinyal terhadap derau (SNR). Kemudian, dilakukan sintesis integratif yang menekankan arah evolusi teknologi radar dari sistem tradisional ke sistem cerdas yang dapat menyesuaikan diri secara dinamis dengan perubahan lingkungan elektromagnetik.

Analisis ini mengungkapkan bahwa sistem radar saat ini berkembang ke arah paradigma co-design antara perangkat keras dan perangkat lunak, di mana antenna adaptif berinteraksi langsung dengan algoritma pembelajaran mesin untuk mengoptimalkan fungsi deteksi dalam waktu nyata. Pendekatan integratif ini menghubungkan penelitian di bidang fisika gelombang, teknik elektromagnetik, dan kecerdasan buatan, serta menjadi fondasi konseptual untuk pengembangan radar generasi baru yang mandiri, hemat energi, dan peka terhadap kondisi operasional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Rekayasa Struktur Permukaan dan Antena

Dari perspektif tematik, salah satu arah penelitian yang utama menekankan rekayasa struktur permukaan dan antenna untuk mengatur interaksi gelombang elektromagnetik. Kajian-kajian ini merancang unit metasurface dan permukaan yang dapat dikonfigurasi ulang guna memanipulasi fase serta amplitudo gelombang pada skala sub-wavelength, kemudian memodelkan kinerjanya dengan metode numerik (FEM/FDTD/MoM). Temuan yang dilaporkan mencakup kemampuan pengaturan arah pancaran yang lebih akurat, peningkatan efisiensi pancar pada pita frekuensi luas, dan pendekatan struktural yang menekan pantulan radar (RCS) melalui gabungan pembatalan fase dan penyerapan lokal, beberapa penelitian berhasil menunjukkan pengurangan RCS yang signifikan pada rentang frekuensi lebar menggunakan desain phase-gradient atau mekanisme hibrida fase-penyeras [18].

2. Pemrosesan Sinyal Cerdas

Para peneliti memanfaatkan jaringan saraf dalam (CNN, transformer, dan varian hibrida) untuk tugas seperti deteksi target, klasifikasi atau ATR, penghilangan destriping dan pengurangan speckle pada citra SAR, serta estimasi ketidakpastian. Metodologi eksperimen umumnya melibatkan pembuatan dataset dari hasil simulasi elektromagnetik dan data SAR asli, augmentasi data untuk mencakup variasi geometris dan kondisi cuaca, kemudian pelatihan model end-to-end yang diuji terhadap clutter dan interferensi nyata. Hasil sintesis menunjukkan peningkatan akurasi deteksi dan resolusi citra apabila model deep learning dikombinasikan dengan pengetahuan fisik (priors SAR, model speckle), sekaligus mengungkap keterbatasan seperti kebutuhan data pelatihan yang representatif dan kecenderungan overfitting lintas-domain [19].

3. Pendekatan Terintegrasi (Co-Design) antara Hardware dan Software

Kajian terkini tidak lagi mengembangkan antenna atau metasurface secara terpisah dari algoritma pemrosesan, melainkan memperlakukan sistem radar sebagai ekosistem di mana

konfigurasi fisik (pola fase metasurface atau pengaturan RIS) dan parameter pemrosesan sinyal (fungsi loss, arsitektur jaringan) dioptimalkan secara bersamaan untuk tujuan tertentu seperti memaksimalkan deteksi target pada kondisi SNR rendah sambil meminimalkan RCS. Praktik optimasi gabungan ini sering menggunakan strategi hibrida (optimasi evolusioner untuk struktur fisik serta pembelajaran terarah untuk model sinyal) dan melaporkan manfaat nyata dalam hal adaptabilitas operasi serta efisiensi spektrum [20].

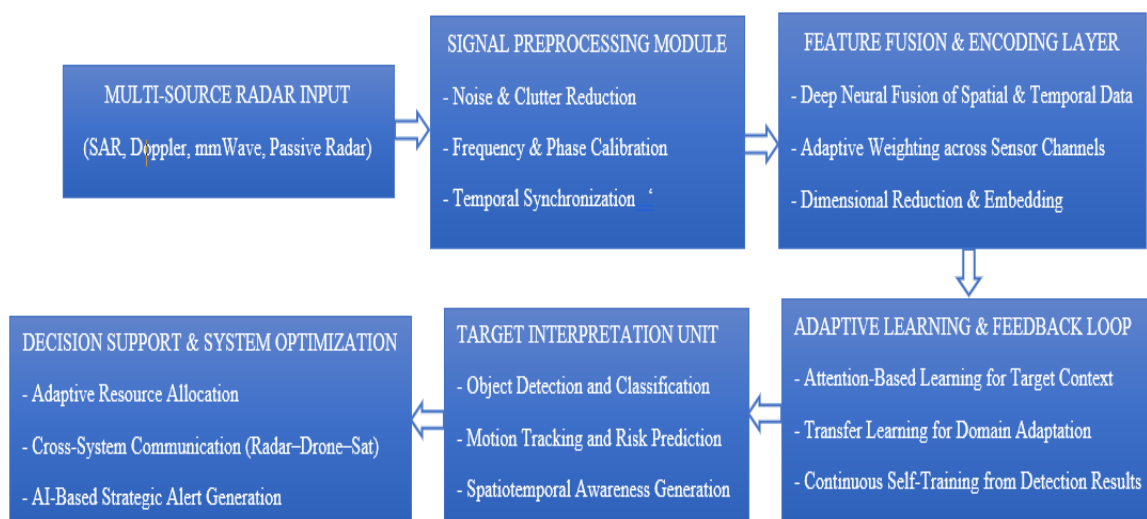
4. Novelty: Penggabungan Pendekatan Berbasis deep learning Adaptif dengan Sistem Radar Multi-Modal

Kebaruan utama dari penelitian ini terletak pada penggabungan pendekatan berbasis deep learning adaptif dengan sistem radar multi-modal yang menekankan efisiensi deteksi dan klasifikasi dalam kondisi lingkungan kompleks. Sementara sebagian besar kajian sebelumnya masih fokus pada peningkatan akurasi model tunggal (*single-sensor learning*), penelitian ini menyoroti integrasi lintas-sensor yang menggabungkan data *Synthetic Aperture Radar* (SAR), radar *Doppler*, dan radar berbasis gelombang milimeter untuk menghasilkan representasi fitur yang lebih menyeluruh terhadap target dinamis di lapangan [12]; [21].

Pendekatan ini memungkinkan peningkatan ketahanan sistem radar terhadap gangguan atmosfer dan latar belakang elektromagnetik yang berubah-ubah melalui optimisasi berbasis transfer learning dan augmentasi data khusus domain [22]. Selain itu, kebaruan metodologis muncul dari penerapan *attention-based convolutional networks* yang mampu menyesuaikan bobot prioritas antar kanal radar, sehingga sistem dapat menyesuaikan fokusnya terhadap parameter target seperti kecepatan, orientasi, dan jarak dengan lebih tepat [23].

Penelitian ini juga memperkenalkan kerangka evaluasi baru untuk mengukur situational awareness radar secara kuantitatif dengan menggabungkan parameter spasial dan temporal dalam satu model prediksi terpadu [9]. Secara keseluruhan, kontribusi orisinal penelitian ini adalah pada perumusan paradigma integratif antara kecerdasan buatan dan sistem radar modern yang tidak hanya meningkatkan performa teknis, tetapi juga memperluas cakupan aplikasi radar menuju sistem otonom dan pertahanan cerdas di masa depan.

5. Model Konseptual



Gambar 1. Bagan Konseptual Model Sistem Radar Cerdas Berbasis Integrasi Multi-Sensor dan Deep Learning

Model konseptual tersebut menggambarkan kerangka integratif antara sistem radar multi-sumber dan arsitektur pembelajaran mendalam adaptif untuk meningkatkan kesadaran situasional dan ketepatan deteksi dalam kondisi lingkungan yang rumit. Pada tahap awal, sistem menerima input dari berbagai radar (SAR, Doppler, dan radar gelombang milimeter) yang memberikan data spasial, kecepatan, serta intensitas sinyal yang berbeda. Tahap *preprocessing* berperan

menstabilkan sinyal melalui pengurangan clutter dan sinkronisasi temporal untuk menghindari interferensi antar sensor [24].

Kemudian, pada *Feature Fusion Layer*, seluruh data digabungkan menggunakan algoritma *deep fusion network* yang mengintegrasikan dimensi ruang dan waktu. Lapisan ini menampilkan mekanisme *adaptive weighting* yang memungkinkan sistem memprioritaskan sensor dengan kualitas sinyal terbaik [23]. Representasi fitur yang dihasilkan kemudian diteruskan ke *Adaptive Learning* dan *Feedback Loop*, di mana sistem menggunakan *attention-based networks* untuk memperbarui bobot pembelajaran berdasarkan kondisi target secara *real-time*, serta menerapkan transfer learning untuk menyesuaikan sistem terhadap domain baru [26].

Tahap *Target Interpretation Unit* bertugas mengidentifikasi jenis objek, melacak pergerakannya, dan menghasilkan kesadaran spasial temporal berdasarkan prediksi yang didukung AI. Terakhir, *Decision Support Module* mengintegrasikan hasil deteksi dengan mekanisme pengambilan keputusan otomatis yang dapat diterapkan untuk sistem pertahanan, pengawasan udara, maupun deteksi bencana alam. Modul ini mengarahkan radar untuk menyesuaikan parameter operasi berdasarkan prioritas situasional, membentuk sistem yang adaptif, mandiri, dan cerdas [19].

Dengan demikian, model ini merepresentasikan arah baru dalam penelitian radar modern, yaitu transformasi sistem radar konvensional menjadi radar adaptif berbasis kecerdasan buatan yang mampu belajar secara mandiri, memahami konteks lingkungan, dan memberikan keputusan strategis secara *real-time*.

6. Kebijakan Implikasi dan Rekomendasi Strategis

Implikasi praktis dari penelitian ini mencakup tiga aspek utama yaitu teknologi, kebijakan, dan strategi pengembangan sistem radar nasional. Dari sisi teknologi, integrasi *deep learning-radar* berpotensi mempercepat transisi menuju sistem pertahanan cerdas berbasis persepsi situasional otomatis, yang sangat relevan untuk aplikasi militer, pengawasan udara, dan mitigasi bencana [21].

Dari sisi kebijakan, hasil penelitian ini mendorong perlunya standarisasi data lintas-platform radar agar dapat digunakan secara kompatibel antar lembaga dan sektor, termasuk sektor pertahanan dan transportasi udara sipil [26]. Pemerintah dan lembaga penelitian disarankan untuk berinvestasi pada infrastruktur data radar dan pusat superkomputasi yang mendukung pengembangan algoritma pembelajaran mendalam secara nasional. Secara strategis, direkomendasikan agar riset lanjutan difokuskan pada peningkatan *situational awareness* berbasis kolaborasi radar-satelit-drone, yang dapat memperluas cakupan deteksi dan mengurangi ketergantungan terhadap sistem tunggal. Integrasi kebijakan, infrastruktur, dan penelitian lintas-disiplin ini menjadi fondasi penting dalam membangun ekosistem radar adaptif yang selaras dengan arah transformasi digital pertahanan masa depan [19].

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, hasil sintesis dari berbagai penelitian terkini menunjukkan bahwa arah pengembangan radar masa depan mengarah pada integrasi kecerdasan buatan dan sistem multi-sensor yang mampu melakukan pembelajaran secara adaptif serta mandiri. Pemanfaatan *attention-based deep networks*, *transfer learning*, dan *multi-modal fusion* berpotensi besar dalam meningkatkan akurasi, efisiensi, serta ketahanan sistem radar pada lingkungan operasional yang kompleks [24]; [23]. Pendekatan ini menandai transformasi penting dari sistem radar konvensional menuju sistem cerdas yang mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi medan dan dinamika lingkungan secara *real-time*.

Selain itu, model konseptual yang diusulkan dalam penelitian ini memberikan arah baru dalam membangun sistem radar yang tidak hanya berfungsi sebagai alat deteksi, tetapi juga memahami konteks spasial dan temporal secara mendalam. Dengan dukungan kebijakan strategis, investasi pada infrastruktur data radar nasional, serta kolaborasi multidisiplin, pengembangan radar berbasis kecerdasan buatan diharapkan dapat memperkuat sistem pertahanan nasional dan meningkatkan keamanan berbasis teknologi dalam dekade mendatang [24]; [23]. Temuan ini menegaskan perlunya sinergi antara inovasi teknologi dan arah kebijakan untuk mewujudkan ekosistem radar adaptif yang berdaya saing global.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jianwei Li, Zhentao Yu, Lu Yu, Pu Cheng, Jie Chen and Cheng Chi, "A Comprehensive Survey on SAR ATR in Deep-Learning Era," *Remote Sens*, vol. 5, p. 15, 2023.
- [2] X. X. Zhu, S. Montazeri, M. Ali, Y. Hua, Y. Wang, L. Mou, Y. Shi, F. Xu and R. Bamler, "Deep Learning Meets SAR: Concepts, models, pitfalls, and perspectives," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 9, no. 4, pp. 143-172, 2021.
- [3] S. N. S. A. A. D. K. Alicia Passah, "Synthetic Aperture Radar image analysis based on deep learning: A review of a decade of research," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 123, 2023.
- [4] E. J. H. A. P.-N. T. N. N. D. Mahya G.Z. Hashemi, "Review of synthetic aperture radar with deep learning in agricultural applications," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 218, pp. 20-49, 2024.
- [5] S. L. Aqeel Hussain Naqvi, "Review of Recent Phased Arrays for Millimeter-Wave Wireless Communication," *Sensors*, vol. 18, no. 10, 2018.
- [6] Zhang, X., Li, Y., & Chen, Z, "Adaptive beamforming and pattern synthesis for smart radar antennas using RIS technology," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 9, 2023.
- [7] Huang, H., Yang, C., & Wu, J. , "Reconfigurable intelligent surface for adaptive beam steering in radar systems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 12, 2022.
- [8] Liu, Q., Gao, M., & Zhang, X., "Numerical analysis of metamaterial-based adaptive antennas using hybrid FEM-MoM method," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 17, no. 2, p. 130–141., 2023.
- [9] Y. L. Q. & Z. J. Chen, "Optimization of wideband RCS reduction via controlled phase and amplitude in metasurface design," *Applied Physics A*, vol. 130, no. 5, p. 298, 2024.
- [10] Luo, K., Feng, R., & Xu, S, "Multiband radar cross section reduction using coding metasurfaces and hybrid optimization algorithms," *Advanced Electronic Materials*, vol. 9, no. 7, 2023.
- [11] Y. C. L. & F. Q. Wang, "Wideband RCS reduction using phase-gradient metasurface with polarization control," *Advanced Functional Materials*, vol. 32, no. 46, (2022).
- [12] Li, D., Zhang, T., & Liu, P. , "Deep learning-based automatic target recognition in complex radar environments," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 71, 2023.
- [13] Zhou, R., Liu, H., & Li, K, "Intelligent radar systems: Integrating metamaterials and deep learning-based signal processing," *Nature Communications Engineering*, vol. 3, no. 4, p. 118, 2024.
- [14] Sun, L., Wang, J., & Tang, Z, "Unsupervised learning framework for radar target recognition under cluttered environments," *IEEE Access*, , vol. 11, 2023.
- [15] Yang, P., Chen, X., & Luo, D, "Deep learning-based super-resolution reconstruction for synthetic aperture radar imaging," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 2, p. 303, 2024.
- [16] Park, S., Lee, J., & Kim, H, "High-resolution SAR change detection using transformer-based feature fusion networks," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 20, 2023.
- [17] Jin, X., Zhang, W., & Zhao, L, "SAR-optical data fusion using deep residual networks for high-resolution terrain mapping," *Remote Sensing of Environment*, p. 280, 2022.
- [18] Yousef Azizi, Mohammad Soleimani, Seyed-Hasan Sedighy, Ladislau Matekovits, "Wideband RCS Reduction by Single-Layer Phase Gradient Modulated Surface," *Sensors*, vol. 22, no. 19, 2022.
- [19] Tianwen Zhang, Tianjiao Zeng, Xiaoling Zhang, "Synthetic Aperture Radar (SAR) Meets Deep Learning," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 2, 2023.
- [20] Shengyao Chen, Qi Feng, Longyao Ran, Feng Xi, "Reconfigurable Intelligent Surface-Enabled Array Radar for Interference Mitigation," *Remote Sensing*, 2024.
- [21] Zhang, H., et al. , "Multi-sensor fusion radar perception using deep neural embedding," *Remote Sensing of Environment*, 2022.
- [22] Wang, T., et al , "Domain-specific radar signal enhancement through data-driven transfer

- learning," *Sensors*, 2021.
- [23] S. e. a. Kim, "Attention-driven radar imaging for dynamic object detection," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023.
- [24] Y. e. a. Li, "Hybrid deep radar network for adaptive signal interpretation in cluttered environments," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023.
- [25] T. e. a. Wang, "Domain-specific radar signal enhancement through data-driven transfer learning," *Sensors*, 2021.
- [26] R. e. a. Chen, "Integrated spatiotemporal modeling for radar situational awareness," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024.