



Menuju Jaringan Nirkabel 6G yang Kognitif: Optimalisasi Permukaan Cerdas (RIS) Berbasis Kecerdasan Buatan untuk Lingkungan Radio yang Cerdas

Amelia Putri Wulandari^{1*}, Sugeng²

^{1*-2} Universitas Muhammadiyah Kolaka Utara, Indonesia

Alamat: Jalan Lingkar Dalam, Desa Ponggiha, Kecamatan Lasusua, Kabupaten Kolaka Utara, Sulawesi Tenggara

Email : ameliaputriwulandari@Umkota.ac.id¹, Sugeng@Umkota.ac.id²

Korespondensi penulis: ameliaputriwulandari@Umkota.ac.id

Abstract The sixth generation (6G) of wireless networks demands unprecedented capacity, reliability, and adaptability. Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) have emerged as a key technology for realizing smart radio environments, enabling dynamic control over electromagnetic wave propagation. However, optimizing RIS-based systems presents significant challenges due to high-dimensional configuration spaces and complex wireless propagation. This review examines state-of-the-art artificial intelligence (AI) approaches for RIS optimization in 6G networks, focusing on three core applications: (1) RIS configuration and beamforming, (2) RIS channel estimation, and (3) resource management in RIS-assisted networks. Machine learning techniques including supervised learning, deep reinforcement learning (DRL), federated learning (FL), and generative models have demonstrated potential to outperform classical optimization approaches in complex scenarios. Further investigation examines the concept of cognitive radio in the 6G era, where the integration of AI, edge computing, and RIS transforms spectrum management from conventional optimization frameworks toward AI-native paradigms. Remaining challenges include high training overhead, limited model generalization, joint channel estimation complexity, and security and interoperability issues. This review concludes that the synergy between RIS and AI promises intelligent, adaptive, and energy-efficient 6G networks, but requires ongoing research in scalable architectures, robust algorithms, and practical implementation considerations.

Keywords: reconfigurable intelligent surface, artificial intelligence, 6G networks, smart radio environment, deep reinforcement learning, cognitive radio, beamforming, channel estimation.

Abstrak Generasi keenam (6G) jaringan nirkabel menuntut kapasitas, keandalan, dan kemampuan adaptasi yang belum pernah ada sebelumnya. Permukaan Cerdas yang Dapat Dikonfigurasi Ulang (Reconfigurable Intelligent Surface/RIS) telah muncul sebagai teknologi kunci untuk mewujudkan lingkungan radio yang cerdas, memungkinkan kontrol dinamis atas propagasi gelombang elektromagnetik. Namun, optimalisasi sistem berbasis RIS menghadirkan tantangan signifikan karena ruang konfigurasi yang berdimensi tinggi dan propagasi nirkabel yang kompleks. Tinjauan ini mengkaji pendekatan mutakhir kecerdasan buatan (AI) untuk optimalisasi RIS dalam jaringan 6G, dengan fokus pada tiga aplikasi inti: (1) konfigurasi RIS dan beamforming, (2) estimasi kanal RIS, dan (3) manajemen sumber daya dalam jaringan berbantuan RIS. Teknik pembelajaran mesin termasuk pembelajaran terawasi, pembelajaran penguatan mendalam (DRL), pembelajaran federasi (FL), dan model generative telah menunjukkan potensi untuk mengungguli pendekatan optimasi klasik dalam skenario kompleks. Investigasi lebih lanjut mengkaji konsep radio kognitif di era 6G, di mana integrasi AI, komputasi tepi, dan RIS mentransformasi manajemen spektrum dari kerangka optimasi konvensional menuju paradigma AI-native. Tantangan yang masih ada mencakup overhead pelatihan yang tinggi, generalisasi model yang terbatas, kompleksitas estimasi kanal bersama, dan masalah keamanan serta interoperabilitas. Tinjauan ini menyimpulkan bahwa sinergi antara RIS dan AI menjanjikan jaringan 6G yang cerdas, adaptif, dan efisien energi, tetapi memerlukan penelitian berkelanjutan dalam arsitektur yang dapat diskalakan, algoritma yang kuat, dan pertimbangan implementasi praktis.

Kata Kunci: reconfigurable intelligent surface, kecerdasan buatan, jaringan 6G, lingkungan radio cerdas, pembelajaran penguatan mendalam, radio kognitif, beamforming, estimasi kanal.

1. LATAR BELAKANG

1.1. Menuju 6G: Tuntutan dan Teknologi Kunci

Jaringan seluler generasi keenam (6G), yang direncanakan untuk diluncurkan sekitar tahun 2030, menjanjikan kapasitas, keandalan, dan kemampuan adaptasi yang belum pernah ada sebelumnya. Kerangka IMT-2030 yang ditetapkan oleh ITU-R mendefinisikan enam skenario penggunaan yang memperluas kemampuan 5G: komunikasi imersif (membangun eMBB untuk realitas tertambah dan holografis), komunikasi HRLLC (menyempurnakan URLLC dengan kebutuhan keandalan dan latensi yang lebih ketat), komunikasi massal (memperluas mMTC untuk jaringan sensor skala besar), konektivitas di mana-mana, AI dan komunikasi, serta penginderaan dan komunikasi terintegrasi (ISAC).

Teknologi kunci yang memungkinkan 6G mencakup Permukaan Cerdas yang Dapat Dikonfigurasi Ulang (RIS), komunikasi THz, optimasi jaringan berbasis AI, dan komunikasi kuantum. Kemajuan ini akan mendukung aplikasi seperti kota pintar, Internet of Everything (IoE), otomatisasi industri, dan realitas tertambah.

1.2. Permukaan Cerdas (RIS) untuk Lingkungan Radio Cerdas

RIS adalah metasurface planar dengan elemen yang dapat disetel secara elektronik yang memungkinkan konfigurasi ulang lingkungan propagasi nirkabel, memungkinkan lingkungan radio cerdas dalam 6G. Dengan menyesuaikan fase refleksi setiap elemen, RIS dapat membentuk dan mengarahkan gelombang elektromagnetik untuk meningkatkan kualitas sinyal atau cakupan.

RIS menawarkan beberapa keunggulan signifikan:

- a. Peningkatan Sinyal: Memperkuat kekuatan sinyal di area yang sebelumnya memiliki cakupan buruk
- b. Perluasan Cakupan: Memperluas jangkauan seluler tanpa infrastruktur tambahan yang mahal
- c. Efisiensi Energi: Mengurangi konsumsi daya dengan mengarahkan energi secara tepat ke pengguna yang aktif
- d. Pengurangan Interferensi: Mengelola interferensi antar pengguna dan sel

1.3 Urgensi Optimalisasi RIS Berbasis AI

Optimasi tradisional RIS sering mengandalkan metode iteratif atau brute-force yang kesulitan menghadapi sifat dinamis dan berdimensi tinggi dari kontrol RIS dalam skenario dunia nyata. Kecerdasan Buatan (AI) telah mendapatkan perhatian untuk

menangani masalah optimasi RIS dengan memanfaatkan model berbasis data dan algoritma pembelajaran.

Survei terbaru menyoroti spektrum luas teknik AI yang diterapkan pada RIS, dari pembelajaran terawasi dan tidak terawasi hingga pembelajaran penguatan dan pembelajaran federasi, yang dapat mengungguli pendekatan klasik dalam pengaturan yang kompleks. Pendekatan AI-native untuk alokasi sumber daya menggantikan kerangka optimasi konvensional, mencakup pembelajaran penguatan mendalam, kolaborasi multi-agen, dan penggunaan digital twin untuk pemodelan prediktif.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1. *Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)*: Prinsip dan Arsitektur

2.1.1 Prinsip Dasar RIS

RIS adalah permukaan elektromagnetik yang terdiri dari elemen-elemen sub-wavelength yang dapat diprogram untuk memanipulasi gelombang datang dengan mengendalikan fase, amplitudo, atau polarisasi. Setiap elemen RIS dapat secara independen mengubah respons elektromagnetiknya, memungkinkan kontrol atas arah dan intensitas gelombang yang dipantulkan.

Berbeda dengan array antenna aktif konvensional, elemen RIS tidak menghasilkan sinyal; sebaliknya, mereka memantulkan dan mengkonfigurasi ulang gelombang elektromagnetik yang datang secara cerdas dengan menyesuaikan pergeseran fase di seluruh elemen.

2.1.2 Arsitektur RIS

Tiga arsitektur RIS utama telah diidentifikasi dalam literatur: RIS pasif, RIS aktif, dan RIS hibrida. RIS pasif hanya memantulkan sinyal tanpa amplifikasi, sementara RIS aktif dapat memperkuat sinyal yang dipantulkan dengan mengorbankan konsumsi daya yang lebih tinggi. RIS hibrida menggabungkan keduanya untuk menyeimbangkan kinerja dan efisiensi energi.

2.2. Aplikasi AI dalam Optimalisasi RIS

2.2.1 Konfigurasi RIS dan Beamforming

Beamforming dalam komunikasi berbantuan RIS memerlukan optimasi simultan dari beamforming pemancar dan matriks pergeseran fase RIS. Masalah optimasi bersama ini biasanya bersifat non-konveks dan berdimensi tinggi, terutama ketika mempertimbangkan RIS skala besar.

Pendekatan AI untuk beamforming RIS meliputi:

- a. *Deep Reinforcement Learning* (DRL): Memungkinkan penyesuaian real-time terhadap kondisi jaringan yang berubah
- b. *Convolutional Neural Networks* (CNN): Untuk pemrosesan data spasial dan pengenalan pola
- c. *CNN-LSTM*: Untuk menangkap ketergantungan temporal dalam kondisi kanal yang berubah
- d. *BF-Net*: Arsitektur jaringan khusus untuk optimasi beamforming
- e. *Soft Actor-Critic* (SAC): Algoritma DRL dengan eksplorasi ruang keadaan untuk beamforming adaptif

2.2.2 Estimasi Kanal RIS

Estimasi kanal yang efektif sangat penting untuk mencapai kinerja optimal dengan RIS. Namun, sifat pasif RIS yang tidak memiliki kemampuan untuk mengirim dan menerima pilot khusus RIS menjadikan estimasi kanal sebagai tantangan signifikan.

Pendekatan untuk estimasi kanal RIS meliputi:

- a. *Binary Reflection Technique*: Mengaktifkan satu elemen RIS secara berurutan untuk estimasi.
- b. *Minimum Variance Unbiased Estimator*: Menghilangkan kebutuhan untuk menonaktifkan RIS selama fase pelatihan.
- c. *Compressive Sensing* (CS): Untuk estimasi kanal cascaded yang akurat dan efisien.
- d. *Pembelajaran Federasi* (FL): Memungkinkan estimasi kanal terdistribusi dengan privasi data yang terjaga

2.2.3 Manajemen Sumber Daya dalam Jaringan Berbantuan RIS

AI juga digunakan untuk manajemen sumber daya dalam jaringan berbantuan RIS, termasuk alokasi daya, penjadwalan pengguna, dan mitigasi interferensi. Pembelajaran penguatan mendalam mendukung penyesuaian real-time, menciptakan arsitektur RIS yang lebih dapat diskalakan dan tangguh.

2.3. Radio Kognitif dalam Era 6G

Konsep radio kognitif yang awalnya dirancang untuk akses spektrum dinamis sedang dibentuk ulang secara fundamental untuk era 6G melalui konvergensi dengan AI, komputasi tepi, dan lingkungan cerdas yang dapat dikonfigurasi ulang.

Tiga Pilar Transformasi Radio Kognitif:

- a. Evolusi Spectrum Sensing: Peralihan dari teknik klasik seperti deteksi energi menuju pendekatan berbasis data yang memanfaatkan deep learning, kecerdasan federasi, dan AI generatif, yang disesuaikan untuk pita frekuensi THz dan mmWave.
- b. Alokasi Sumber Daya AI-Native: Pergeseran dari kerangka optimasi konvensional menuju paradigma AI-native end-to-end, mencakup deep reinforcement learning, kolaborasi multi-agen, dan penggunaan digital twin untuk pemodelan prediktif.
- c. Koeksistensi Multi-Domain: Investigasi tentang koeksistensi rumit jaringan terestrial, non-terestrial (NTN), dan berbantuan RIS, menangani isu-isu seperti interferensi lintas-teknologi, kerentanan keamanan, dan lanskap regulasi yang dinamis.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi kepustakaan (*library research*) atau tinjauan literatur. Metode ini dipilih karena bertujuan untuk mengumpulkan, menganalisis, dan merangkum berbagai informasi dari sumber-sumber tertulis yang sudah ada tentang topik RIS dan AI di jaringan 6G.

Studi kepustakaan cocok digunakan karena:

- a. Topik masih baru dan berkembang cepat
- b. Banyak informasi tersebar di berbagai jurnal dan prosiding
- c. Peneliti ingin mendapatkan gambaran luas tanpa harus melakukan eksperimen langsung

3.2. Sumber Data

Penelitian ini menggunakan dua jenis sumber data:

3.2.1 Sumber Primer

- a. Artikel jurnal ilmiah dari penerbit terkemuka (*IEEE, Elsevier, Springer, MDPI*)

- b. Prosiding konferensi internasional (misalnya: *IEEE ICC*, *Globecom*, *ASIANComNet*)
- c. Paper yang dipublikasikan di arXiv (*pra-publikasi*)

3.2.2 Sumber Sekunder

- a. Buku teks tentang komunikasi nirkabel dan AI
- b. Laporan teknis dari lembaga riset dan industri
- c. Dokumen standarisasi dari ITU-R, 3GPP

3.3. Kata Kunci Pencarian

Untuk menemukan literatur yang relevan, peneliti menggunakan kombinasi kata kunci berikut:

Kelompok 1 (Teknologi):

- a. *"Reconfigurable Intelligent Surface" OR "RIS" OR "Intelligent Reflecting Surface" OR "IRS"*
- b. *"Smart Radio Environment" OR "Programmable Wireless Environment"*

Kelompok 2 (Metode AI):

- a. *"Artificial Intelligence" OR "Machine Learning" OR "Deep Learning" OR "Reinforcement Learning"*
- b. *"Deep Reinforcement Learning" OR "DRL"*
- c. *"Federated Learning" OR "Transfer Learning"*

Kelompok 3 (Konteks Jaringan):

- a. *"6G" OR "Beyond 5G" OR "B5G" OR "Sixth Generation"*
- b. *"Cognitive Radio" OR "Spectrum Management"*

Kelompok 4 (Aplikasi):

- a. *"Beamforming" OR "Channel Estimation" OR "Resource Allocation"*

Strategi Pencarian:

- a. Menggabungkan kata kunci dari kelompok berbeda menggunakan operator boolean AND dan OR
- b. Contoh: *("RIS" OR "Reconfigurable Intelligent Surface") AND ("Deep Reinforcement Learning" OR "DRL") AND ("6G" OR "Beyond 5G")*

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil

4.1.1 Teknik AI untuk Optimalisasi RIS

Data penelitian disajikan pada table berikut :

Tabel 4.1 Teknik AI untuk Optimalisasi RIS

Aplikasi	Teknik AI	Keunggulan	Tantangan
Konfigurasi RIS & Beamforming	Deep Reinforcement Learning	Penyesuaian real-time, skalabilitas	Kompleksitas pelatihan, konvergensi
	CNN, CNN-LSTM	Pemrosesan spasial, temporal	Membutuhkan data pelatihan ekstensif
	BF-Net	Efisiensi komputasi	Keterbatasan generalisasi
	Soft Actor-Critic	Eksplorasi ruang keadaan	Overhead komputasi
Estimasi Kanal	Compressive Sensing	Efisiensi overhead	Akurasi terbatas dalam skenario kompleks
	Federated Learning	Privasi data, distribusi	Overhead komunikasi
Manajemen Sumber Daya	Multi-Agent DRL	Koordinasi multi-agen	Kompleksitas koordinasi

4.1.2 Aplikasi AI dalam Tiga Domain Inti

Konfigurasi RIS dan Beamforming: Teknik DRL telah menunjukkan hasil yang menjanjikan untuk optimasi beamforming RIS adaptif dalam lingkungan dinamis. Pendekatan CNN-LSTM dan BF-Net menunjukkan potensi kuat untuk beamforming real-time, alokasi sumber daya adaptif, dan mitigasi ketidaksempurnaan perangkat keras RIS.

Estimasi Kanal: Pendekatan pembelajaran federasi memungkinkan estimasi kanal terdistribusi dengan privasi data yang terjaga, yang sangat penting untuk jaringan 6G dengan perangkat edge yang tersebar luas. Namun, overhead pelatihan yang tinggi

dan generalisasi model yang terbatas dalam skenario multi-pengguna dan mobilitas tinggi tetap menjadi tantangan.

Manajemen Sumber Daya: DRL multi-agen memungkinkan koordinasi antara berbagai entitas jaringan untuk optimasi sumber daya yang terdistribusi. Digital twin untuk pemodelan prediktif memungkinkan simulasi dan optimasi sebelum implementasi di dunia nyata.

4.1.3 Radio Kognitif dan RIS dalam 6G

Integrasi radio kognitif dengan RIS menciptakan ekosistem di mana spektrum dikelola secara cerdas dan adaptif. RIS dapat secara dinamis mengkonfigurasi ulang lingkungan propagasi berdasarkan kondisi spektrum yang dirasakan, memungkinkan pemanfaatan spektrum yang lebih efisien.

AI-native resource allocation menggantikan kerangka optimasi konvensional dengan pendekatan end-to-end yang mencakup deep reinforcement learning dan kolaborasi multi-agen. Hal ini memungkinkan jaringan untuk secara otonom beradaptasi dengan perubahan kondisi spektrum dan permintaan pengguna.

4.2. Pembahasan

4.2.1 Keunggulan Pendekatan AI untuk Optimalisasi RIS

Pendekatan AI menawarkan beberapa keunggulan signifikan dibandingkan metode optimasi tradisional:

- a. Skalabilitas: AI dapat menangani ruang konfigurasi berdimensi tinggi yang menjadi ciri RIS skala besar, di mana metode brute-force menjadi tidak praktis.
- b. Adaptasi Real-time: Deep Reinforcement Learning memungkinkan penyesuaian konfigurasi RIS secara real-time terhadap perubahan kondisi kanal dan permintaan pengguna.
- c. Ketahanan: Pendekatan berbasis data dapat belajar dari variasi lingkungan dan mengatasi ketidaksempurnaan perangkat keras tanpa memerlukan pemodelan eksplisit.
- d. Efisiensi Energi: AI-assisted beamforming memungkinkan pengarahan energi secara tepat ke pengguna aktif, mengurangi pemborosan daya dan meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan.

4.2.2 Tantangan Implementasi yang Masih Ada

- a. Overhead Pelatihan yang Tinggi: Algoritma DRL memerlukan pelatihan ekstensif sebelum dapat diterapkan secara efektif, yang dapat menjadi kendala dalam skenario dengan kondisi kanal yang cepat berubah.
- b. Generalisasi Model: Model yang dilatih pada satu skenario mungkin tidak bekerja dengan baik pada skenario lain, membatasi kegunaannya dalam lingkungan yang beragam.
- c. Estimasi Kanal Bersama: Kompleksitas dalam mengestimasi semua kanal secara bersama-sama antara BS, RIS, dan pengguna masih menjadi tantangan signifikan, terutama dalam skenario multi-pengguna dan mobilitas tinggi.
- d. Kompleksitas Perangkat Keras: Desain RIS yang dapat diskalakan dan hemat biaya untuk aplikasi 6G masih memerlukan penelitian lebih lanjut.
- e. Keamanan: RIS dapat digunakan oleh musuh untuk meluncurkan serangan yang lebih kuat seperti penyadapan dan jamming, menciptakan tantangan keamanan baru.
- f. Interoperabilitas: Integrasi RIS dengan infrastruktur yang ada dan standarisasi antarmuka masih menjadi tantangan.

4.2.3 Arah Masa Depan dan Peluang Penelitian

- a. Quantum Machine Learning: Potensi ML berbasis kuantum untuk menangani kompleksitas optimasi jaringan skala besar.
- b. Large Language Models (LLMs): Penggunaan LLM untuk optimasi jaringan dan manajemen sumber daya yang lebih intuitif.
- c. Semantic-Aware Spectrum Sharing: Berbagi spektrum berbasis semantik yang mempertimbangkan makna dan konteks data yang ditransmisikan.
- d. Privacy-Preserving Learning: Pengembangan teknik pembelajaran yang melindungi privasi pengguna sambil tetap memungkinkan optimasi kolaboratif.
- e. Green Sensing: Pengembangan teknik sensing yang hemat energi untuk jaringan 6G yang berkelanjutan.
- f. Quantum-Resistant Security: Keamanan yang tahan terhadap serangan komputasi kuantum untuk melindungi infrastruktur 6G masa depan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

- a. Integrasi AI dan RIS merupakan fondasi untuk lingkungan radio cerdas dalam 6G. Teknik AI termasuk DRL, CNN, FL, dan model generatif telah menunjukkan potensi untuk mengungguli pendekatan optimasi klasik dalam tiga domain inti: konfigurasi RIS dan beamforming, estimasi kanal, dan manajemen sumber daya.
- b. Deep Reinforcement Learning memungkinkan penyesuaian konfigurasi RIS secara real-time terhadap kondisi kanal yang berubah dan permintaan pengguna, menciptakan arsitektur RIS yang lebih dapat diskalakan dan tangguh. Pendekatan CNN, CNN-LSTM, dan BF-Net menunjukkan potensi kuat untuk beamforming real-time dan mitigasi ketidaksempurnaan perangkat keras RIS.
- c. Radio kognitif di era 6G bertransformasi melalui AI, komputasi tepi, dan RIS, bergeser dari deteksi energi klasik menuju pembelajaran mendalam, kecerdasan federasi, dan AI generatif untuk pita THz dan mmWave.
- d. Tantangan yang masih ada mencakup overhead pelatihan yang tinggi, generalisasi model yang terbatas, estimasi kanal bersama yang kompleks, keamanan, dan interoperabilitas.
- e. Penelitian masa depan harus fokus pada quantum machine learning, LLM untuk optimasi, semantic-aware spectrum sharing, privacy-preserving learning, green sensing, dan quantum-resistant security.

5.2. Saran

Bagi Peneliti dan Pengembang:

- a. Kembangkan algoritma DRL yang lebih efisien dengan overhead pelatihan yang lebih rendah untuk memungkinkan adopsi dalam skenario dengan kondisi kanal yang cepat berubah.
- b. Eksplorasi pendekatan transfer learning untuk meningkatkan generalisasi model AI antar skenario dan lingkungan yang berbeda.
- c. Investasi dalam teknik estimasi kanal bersama yang dapat menangani skenario multi-pengguna, wideband, dan mobilitas tinggi secara efisien.
- d. Kembangkan arsitektur RIS yang dapat diskalakan dan hemat biaya untuk aplikasi 6G praktis.

- e. Teliti pendekatan keamanan baru yang memanfaatkan AI untuk mendeteksi dan menangkal serangan yang memanfaatkan RIS.

Bagi Regulator dan Pembuat Kebijakan:

- a. Kembangkan kerangka regulasi yang mendukung adopsi RIS di jaringan 6G, termasuk standarisasi antarmuka dan protokol.
- b. Fasilitasi kolaborasi antara industri dan akademisi untuk mempercepat penelitian dan pengembangan RIS berbasis AI.
- c. Dukung penelitian tentang keamanan dan privasi untuk memastikan bahwa manfaat RIS tidak mengorbankan keamanan pengguna.

DAFTAR REFERENSI

- IEEE Xplore. (2026). Recent Advances in Artificial Intelligence for RIS in 6G Wireless Networks. IEEE Xplore.
- IEEE Xplore. (2026). RIS-Empowered Rate-Splitting Multiple Access Toward 6G and Beyond Wireless Communication Networks: A Comprehensive Survey. IEEE Internet of Things Journal, 13(3), 3913-3937.
- Moghim, M. K., et al. (2025). Cognitive Radio in the 6G Era: Spectrum Sensing, AI-Driven Resource Allocation, and Coexistence Challenges. 2025 Asian Conference on Communication and Networks (ASIANComNet).
- Zhi, K., Pan, C., Ren, H., Chai, K. K., & El Kashlan, M. (2022). Active RIS Versus Passive RIS: Which Is Superior With the Same Power Budget? IEEE Communications Letters, 26(5), 1150-1154.
- Vishwakarma, P., Singh, A. K., Kandar, D., & Sur, S. N. (2026). Joint beamforming optimization frameworks for RIS-assisted SWIPT multi-user communication: Trends, challenges and future directions. ScienceDirect.
- IEEE Xplore. (2026). AI-Assisted Electromagnetic Radiation Reconfigurable Antennas for Energy-Efficient and Green 6G Wireless Networks: A Comprehensive Review. IEEE Xplore.
- Aconf. (2025). Cognitive Radio in the 6G Era: Spectrum Sensing, AI-Driven Resource Allocation, and Coexistence Challenges. 2025 Asian Conference on Communication and Networks.
- ScienceDirect. (2024). A systematic survey on physical layer security oriented to reconfigurable intelligent surface empowered 6G. ScienceDirect.

- IEEE Xplore. (2026). Machine Learning for THz-RIS Enabled 6G: Survey and Key Challenges. IEEE Xplore.
- ORBilu. (2026). RIS-Driven Resource Allocation Strategies for Diverse Network Environments: A Comprehensive Review. ORBilu.
- ACM Digital Library. (2026). Computational intelligence for 6G networks: A survey of machine learning and optimization for enabling technologies and architectures. Journal of Network and Computer Applications.
- IRMA International. (2025). AI-Powered Reconfigurable Intelligent Surfaces: A Review of Functioning, Research Challenge, and Future Directions in Wireless Communication. Applications and Challenges of Reconfigurable Intelligent Surfaces in 6G.
- Pusan National University Library. (2025). 6G Wireless Communications and Artificial Intelligence-Controlled Reconfigurable Intelligent Surfaces: From Supervised to Federated Learning. Applied Sciences, 15(6), 3252.
- Khalili, A., Rezaei, F., Khaleghi, A., et al. (2026). RSMA-Enabled RIS-Assisted Integrated Sensing and Communication for 6G: A Comprehensive Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 28(3), 1456–1493. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11426895>
- Wang, C.-X., You, X., & Gao, X. (2026). Channel Estimation for Reconfigurable Intelligent Surface-Aided 6G NOMA Systems: A Quantum Machine Learning Approach. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 13(4), 2197–2218. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2025.3611273>
- Sen, S., et al. (2026). Recent Advances in Artificial Intelligence for RIS in 6G Wireless Networks. In 2026 IEEE International Conference on Communications (ICC), Tokyo, Japan. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11454252>
- Akyildiz, I. F., Han, C., & Hu, Z. (2026). Machine Learning for THz-RIS Enabled 6G: Survey and Key Challenges. IEEE Transactions on Communications, 74(6), 4210–4237. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11449168>