

ANTENA ARRAY UNTUK MODEL BERBASIS RECONFIGURABLE INTELLIGENT SURFACE (RIS) SEBAGAI APLIKASI PADA JARINGAN KOMUNIKASI BERGERAK 5G

Yassir¹, Ipan Suandi², Rachmawati³, Hanafi⁴, M. Basyir⁵

^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe

Email: yassir.yassir@pnl.ac.id¹, ipan@pnl.ac.id², rachma@pnl.ac.id³, hanafi_hf@pnl.ac.id⁴, m.basyir@pnl.ac.id⁵

Corresponding Author : Yassir

Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe

Email: yassir.yassir@pnl.ac.id

Abstrak – Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) telah muncul sebagai teknologi revolusioner dalam komunikasi nirkabel, menawarkan tingkat kontrol yang belum pernah ada sebelumnya terhadap perambatan gelombang elektromagnetik. RIS terdiri dari sejumlah besar elemen pasif yang mampu memanipulasi fase, amplitudo, dan polarisasi gelombang elektromagnetik yang datang. Kemampuan unik ini memungkinkan RIS untuk secara aktif membentuk lingkungan nirkabel, berpotensi meningkatkan kekuatan sinyal, mengurangi interferensi, dan meningkatkan kinerja komunikasi secara keseluruhan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang model kanal yang secara efektif mengintegrasikan pengaruh RIS pada kanal komunikasi nirkabel. Pertama, dilakukan pengumpulan data komprehensif untuk membangun model yang akurat dari objek penelitian. Ini mencakup pengumpulan data teknis yang diperlukan untuk simulasi wilayah objek penelitian. Tahap kedua melibatkan simulasi menggunakan software Matlab untuk menghitung sifat elektromagnetis dari model RIS yang telah dikembangkan. Simulasi ini mempertimbangkan berbagai parameter seperti konfigurasi elemen RIS, karakteristik gelombang datang, dan kondisi lingkungan propagasi. Analisis mendalam dilakukan pada hasil simulasi, dengan fokus khusus pada amplitudo dan fase koefisien refleksi. Penelitian ini juga menyelidiki bagaimana konfigurasi dinamis dari elemen RIS dapat dioptimalkan untuk meningkatkan kinerja sistem komunikasi. Signifikansi penelitian ini terletak pada potensinya untuk memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang interaksi antara RIS dan gelombang elektromagnetik dalam konteks komunikasi 5G.

Kata-kata kunci: propagasi, RIS, Elektromagnetik, 5G.

Abstract – Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) have emerged as a revolutionary technology in wireless communications, offering an unprecedented level of control over electromagnetic wave propagation. RIS consists of a large number of passive elements capable of manipulating the phase, amplitude, and polarization of incident electromagnetic waves. This unique capability allows RIS to actively shape the wireless environment, potentially increasing signal strength, reducing interference, and improving overall communication performance. This research aims to design a channel model that effectively integrates the influence of RIS on wireless communication channels. This research methodology consists of several key steps. First, a comprehensive data collection was conducted to build an accurate model of the object of study. This includes the collection of technical data required for the simulation of the research area. The second stage involved simulation using Matlab software to calculate the electromagnetic properties of the developed RIS model. The simulation considers various parameters such as RIS element configuration, incident wave characteristics, and propagation environment conditions. An in-depth analysis is performed on the simulation results, with a particular focus on the amplitude and phase of the reflection coefficient. This analysis aims to understand how the RIS affects signal propagation under various scenarios and conditions. The significance of this research lies in its potential to provide a deeper understanding of the interaction between RIS and electromagnetic waves in the context of 5G communications.

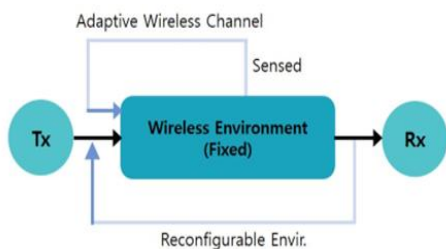
Keywords: propagation, RIS, electromagnetic, 5G.

I. PENDAHULUAN

Kanal radio dalam komunikasi nirkabel konvensional didefinisikan sebagai entitas pasif. Namun, Selama dekade terakhir metasurfaces telah berkembang pesat dan digunakan secara luas dalam desain berbagai

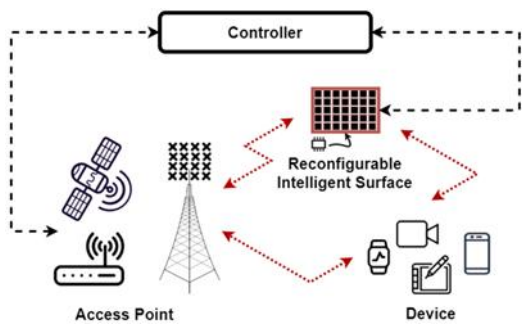
perangkat baru untuk aplikasi gelombang mikro dan terahertz. Salah satu aplikasinya adalah Reconfigurable Intelligent Surface (RIS). RIS terdiri dari reflektor pasif yang dapat memanipulasi amplitudo atau fase sinyal yang masuk secara independen. Dengan menggunakan

RIS di jaringan jaringan komunikasi 5G dan mengatur pantulannya secara cerdas, perambatan sinyal si kanal radio antara pemancar dan penerima dapat dikonfigurasi ulang secara fleksibel. Penelitian berbasis RIS menjadi solusi terkini untuk mengatasi permasalahan pemudaran kanal nirkabel dan interferensi, dan secara signifikan meningkatkan kinerja dan keandalan komunikasi jaringan komunikasi 5G. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, dengan RIS, kanal bisa dikontrol dengan menyesuaikan sifat pantulan atau transmisi gelombang radio di kanal tersebut, menggunakan struktur metasurface yang bergeser fasa. Oleh karena itu, RIS muncul sebagai paradigma baru untuk menciptakan kanal radio atau lingkungan radio yang cerdas sistem komunikasi nirkabel 5G [1].



Gbr. 1 Konsep kanal nirkabel berbasis RIS

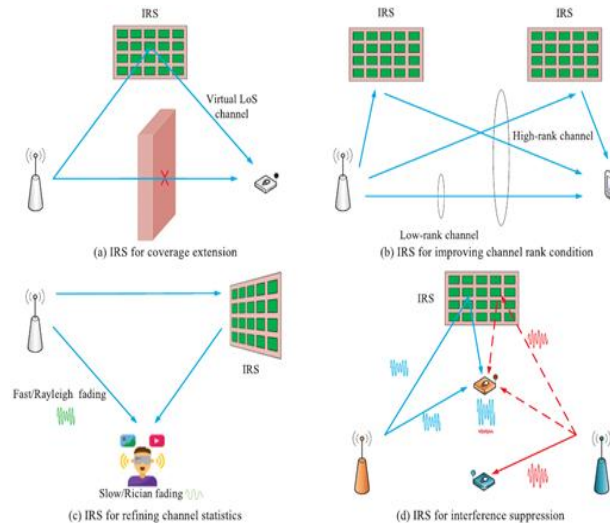
RIS adalah node jaringan modern yang terdiri dari permukaan dengan sifat pantulan atau transmisi yang dapat dikontrol, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Pengontrol RIS dapat memanipulasi permukaan secara pasif atau aktif, untuk mengubah lingkungan nirkabel dari entitas pasif menjadi entitas cerdas yang dapat memprogram kanal. Berdasarkan hal ini, RIS dapat beroperasi dalam enam mode yang berbeda: refleksi, pembiasan, penyerapan, hamburan balik, transmisi, dan penerimaan.



Gbr. 2 Contoh jaringan komunikasi nirkabel berbantuan RIS

Penggunaan RIS menjadi lebih penting untuk komunikasi 5G karena sistem 5G beroperasi pada frekuensi tinggi dan kepadatan jaringan yang lebih tinggi, yang menuntut resolusi spasial yang tinggi, yaitu peningkatan kapasitas kanal, dengan biaya perangkat keras dan daya yang rendah [2]. 3GPP mendefinisikan dua pita frekuensi untuk komunikasi 5G: FR1 (410-7125 MHz), juga dikenal sebagai sub6G, dan FR2 (24,25-52,6 GHz), juga dikenal sebagai mmWave [3]. MmWave menghadapi masalah pemblokiran sinyal oleh rintangan seperti pohon dan bangunan, yang mengurangi

jangkauan komunikasi. Namun, dengan RIS masalah tersebut bisa diatasi dengan memantulkan sinyal untuk menutupi area yang dibayangi, dan dengan demikian meningkatkan jangkauan cakupan.



Gbr. 3 Aplikasi sistem komunikasi nirkabel menggunakan RIS

Gambar 3 mengilustrasikan beberapa fungsi yang dilakukan RIS dalam rekonfigurasi kanal nirkabel, seperti membuat link Line of Sight (LOS) virtual untuk menghindari hambatan antara Base Transceiver Station (BTS) dan perangkat bergerak melalui rekayasa pemantulan. RIS juga meningkatkan distribusi kanal dengan mengubah Rayleigh/fast fading ke Rician/slow fading untuk keandalan yang sangat tinggi, dan meniadakan gangguan co-channel atau interferensi antar sel.

Selain manfaat fungsional untuk meningkatkan kinerja komunikasi, RIS juga memiliki berbagai manfaat praktis. Pertama, RIS pasif yang terdiri dari elemen reflektif, seperti dipole cetak berbiaya rendah, dapat diimplementasikan dan dioperasikan dengan biaya perangkat keras dan energi yang jauh lebih rendah daripada antena array aktif konvensional. Hal ini karena RIS hanya memantulkan gelombang radio yang datang secara pasif tanpa sirkuit Radio Frequency (RF) pada frekuensi radio pemancar. Kedua, RIS beroperasi dalam mode Full-Duplex (FD) dan bebas dari amplifikasi derau antena dan interferensi diri, yang memberikan keunggulan dibandingkan relay aktif tradisional seperti relay Half-Duplex (HD), yang memiliki efisiensi spektral yang lebih rendah, dan relay FD, yang membutuhkan teknik canggih untuk menghilangkan interferensi diri. Ketiga, RIS biasanya berprofil rendah, ringan, dan bentuknya sesuai, sehingga mudah dipasang atau dilepas dan dipasang atau diganti pada objek lingkungan. Terakhir, RIS bertindak sebagai perangkat tambahan dalam jaringan nirkabel dan dapat diintegrasikan secara transparan, menawarkan fleksibilitas dan kompatibilitas yang tinggi dengan sistem nirkabel yang sudah ada seperti seluler atau WiFi [4].

Konsep RIS diperkenalkan pada tahun 2018-2019, dan sejak saat itu, beberapa masalah dan hambatan telah

dibahas terkait manfaat dan implementasinya dalam sistem komunikasi nirkabel [5]. Masalah pertama adalah pemodelan elektromagnetik RIS. Pada tahap ini dibutuhkan pertimbangan desain perangkat keras untuk kontrol fase, karakteristik substrat RIS, karakteristik transmisi, refleksi, dan polarisasi gelombang radio yang datang, dan ukuran RIS. Hal ini dikarenakan sebagian besar penelitian terkait RIS mengasumsikan bahwa metasurface RIS adalah reflektor yang ideal. Sebagai contoh, ukuran RIS sangat penting, karena menentukan kinerja Signal to Noise Ratio (SNR), yang mungkin tidak sepadan dengan relay saat ini jika RIS terlalu kecil.

Masalah kedua adalah pemodelan kanal, yang melibatkan penginderaan dan estimasi kanal, karena sebagian besar penelitian terkait RIS mengasumsikan bahwa Channel State Information (CSI) dapat diperoleh dengan sempurna dari Base Transceiver Station (BTS), RIS, dan perangkat bergerak. Namun, pada kenyataannya tidak demikian, karena BTS maupun perangkat bergerak tidak dapat mengenali RIS, dan kanal komunikasi nirkabel dengan RIS memiliki karakteristik path loss dan multiplicative fading yang berbeda dari kanal konvensional. Oleh karena itu, diperlukan metode penginderaan dan estimasi kanal waktu nyata yang memperhitungkan perbedaan-perbedaan ini.

Masalah ketiga adalah desain RIS yang efisien, yang menuntut ukuran besar dan banyak elemen array untuk beroperasi dalam jarak jauh, serta desain yang mempertimbangkan efisiensi energi dan efisiensi pantulan tergantung pada arah dan lokasi RIS. Masalah keempat adalah parameter kinerja RIS, yang perlu dipelajari dan diuji untuk komersialisasi, karena berbeda dari modul komunikasi biasa dalam hal kompatibilitas frekuensi radio, kompatibilitas sinyal, dan manajemen sumber daya. RIS memiliki berbagai kombinasi arah gelombang radio yang datang dan arah transmisi juga pantulan, serta kinerja pantulan, yang mempengaruhi parameter kinerjanya.

Masalah terakhir adalah skenario operasional untuk RIS, yang memerlukan pertimbangan lokasi, ukuran, fungsi, dan jumlah RIS di jaringan nirkabel, serta kemungkinan kontrol waktu nyata dari server pembelajaran mesin, dan pemeliharaan serta ketahanan di lingkungan nyata. Dalam jaringan nirkabel di dunia nyata, pemasangan RIS oleh satu operator dapat mengganggu kinerja jaringan operator lain, karena mungkin ada beberapa BTS di area atau lokasi yang sama.

Pemodelan kanal adalah bagian penting dari penelitian RIS, karena dengan model komunikasi kita bisa melakukan evaluasi kinerja jaringan nirkabel dan membantu memahami kasus penggunaan RIS di jaringan nirkabel generasi lanjut, seperti sistem komunikasi 5G. Selain itu, mengembangkan model kanal yang akurat dan konsisten yang dapat diverifikasi oleh pengukuran dunia nyata adalah aspek penting dalam mengimplementasikan teknologi komunikasi nirkabel generasi lanjut. Oleh karena itu, penting untuk memperhitungkan tidak hanya efek propagasi fisik di berbagai lingkungan, seperti path loss yang berbeda dan sifat hamburan di lingkungan

indoor atau lingkungan outdoor, tetapi juga efek RIS pada model kanal end-to-end, seperti efek medan dekat dan kemungkinan korelasi spasial dari RIS terdekat, dan kopling timbal balik di antara elemen-elemen RIS. Selain itu, model kanal bergantung pada rentang frekuensi, bandwidth, dan arsitektur RIS, seperti berbasis array reflektif atau berbasis metasurface. Kemudian, lokasi potensial RIS di lingkungan nirkabel yang sebenarnya dapat mempengaruhi probabilitas Line of Sight (LOS) dan indeks path loss [6]. Pemodelan kanal biasanya melibatkan tradeoff antara kompleksitas dan akurasi. Sebagai contoh, berdasarkan penelitian yang telah dilakukan penulis sebelumnya, metode pemodelan kanal berbasis ray tracing, dengan menggunakan hanya satu pantulan akan menyederhanakan model tetapi mengurangi keakuratannya, sementara pantulan lebih banyak, yang dapat menangkap model kanal yang lebih akurat, sangat intensif secara komputasi [7].

Sejumlah penelitian tentang pemodelan propagasi berbasis RIS berfokus pada path-loss dan karakterisasi daya yang tersebar oleh RIS. Peneliti dalam [8] menggunakan teori difraksi skalar umum dan prinsip Huygens-Fresnel untuk mengkarakterisasi path-loss di medan dekat dan medan jauh RIS. Mereka juga menemukan daya yang dipantulkan dari RIS sebagai fungsi dari jarak antara Tx-Rx dan RIS, ukuran RIS, dan pergeseran fasa yang diakibatkan oleh RIS. Dengan memodelkan RIS sebagai lembaran tipis berbahan elektromagnetik, mereka mengidentifikasi kondisi RIS untuk bertindak sebagai cermin anomali. Peneliti dalam [9] menggunakan pendekatan berbasis fisika dan teori antena untuk menghitung medan listrik di medan jauh dan medan dekat RIS dengan ukuran terbatas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RIS dapat bertindak sebagai cermin anomali di medan dekat array, tetapi mereka tidak memformulasikan ekspresi daya yang diterima secara analitis untuk jarak yang berbeda. Penulis dalam [10] menggunakan desain RIS tipe reflektor pasif dan mempertimbangkan ukuran RIS, geometri link dan penguatan praktis elemen RIS untuk menghitung path-loss dalam kasus medan jauh dan medan dekat. Peneliti dalam [11] memperkenalkan hukum penskalaan daya praktis untuk wilayah medan jauh dari array menggunakan teknik optik fisik. Mereka juga menjelaskan mengapa permukaan memiliki sejumlah besar elemen pemantul yang bertindak sebagai penyebar yang menyebar secara individual tetapi dapat memancarkan sinyal secara bersama-sama ke arah yang diinginkan dengan beamwidth tertentu. Dalam [12], pendekatan berbasis fisika dan elektromagnetik digunakan untuk mengkarakterisasi model path-loss ruang bebas untuk sistem komunikasi yang mendukung RIS. Penulis mempertimbangkan jarak dari Tx-Rx ke RIS, ukuran RIS, efek medan dekat/medan jauh dari RIS, dan pola radiasi antena dan sel satuan. Model yang diusulkan divalidasi melalui hasil simulasi komputer yang ekstensif dan pengukuran eksperimental menggunakan RIS yang dibuat secara khusus. Penulis dalam [13] menerapkan generalisasi vektor teorema Green dan menggunakan metode optik fisik untuk

mengkarakterisasi path-loss ruang bebas dari komunikasi yang dibantu RIS. Mereka mengatasi keterbatasan optik geometris dan melakukan analisis untuk metasurfaces homogen 2D yang dapat beroperasi dalam mode refleksi atau refraksi dalam kasus medan jauh dan medan dekat. Peneliti dalam [14] menggunakan model propagasi deterministik dan mempelajari hukum penskalaan daya untuk RIS yang besar secara asimtotik. Mereka mengamati bahwa batas asimtotik hanya dapat dicapai pada kasus medan dekat.

Dalam studi yang disebutkan di atas, Path loss dikarakterisasi dengan menggunakan pendekatan berbasis fisika dan elektromagnetik. Sedangkan peneliti dalam [15] merekomendasikan model kanal ujung-ke-ujung berbasis fisika untuk sistem komunikasi yang diberdayakan oleh RIS dan kerangka kerja pengoptimalan yang dapat diskalakan untuk RIS yang besar. Model ini memperhitungkan dampak dari semua unit RIS, mode transmisinya, dan sudut datang, pantulan, dan polarisasi. Selain itu, setiap unit dimodelkan sebagai reflektor anomali, dan analisis berbasis optik fisik dilakukan dengan menggunakan konsep-konsep dari literatur radar dalam kondisi medan jauh.

A. Karakteristik Propagasi Gelombang Radio

Transmisi sinyal dalam sistem komunikasi nirkabel dipengaruhi oleh propagasi gelombang radio. Kualitas dan keandalan sinyal yang ditransmisikan ditentukan oleh karakteristik propagasi gelombang radio. Di daerah perkotaan, keberadaan bangunan, pohon, dan hambatan lainnya secara signifikan mempengaruhi karakteristik propagasi gelombang radio. Hambatan ini menyebabkan berbagai efek propagasi, seperti redaman sinyal, refleksi, difraksi, dan hamburan. Akibatnya, komunikasi yang andal di lingkungan perkotaan menimbulkan tantangan. Oleh karena itu penting untuk memahami perilaku propagasi gelombang radio di daerah perkotaan untuk mengoptimalkan desain jaringan nirkabel dan meningkatkan kinerja komunikasi.

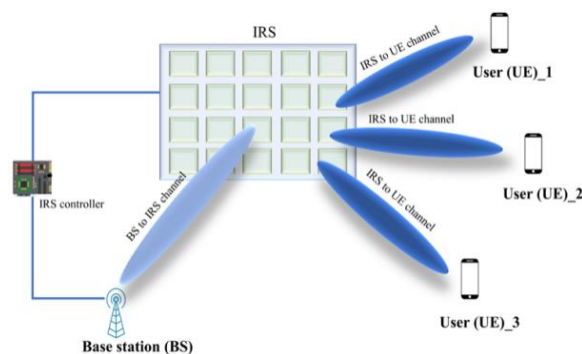
Dengan kehadiran bangunan, pohon, dan struktur lainnya menciptakan lingkungan propagasi yang sangat dinamis dan kompleks di daerah perkotaan. Secara khusus, frekuensi yang lebih tinggi mengalami redaman sinyal yang signifikan karena efek penyerapan, refleksi, dan hamburan objek di lingkungan, yang menyebabkan penurunan kekuatan sinyal yang diterima. Konsentrasi padat bangunan di daerah perkotaan memperkuat dampak redaman sinyal. Refleksi adalah efek propagasi signifikan lainnya di daerah perkotaan, di mana gelombang radio bertemu dengan bangunan atau struktur lain dan dipantulkan dan diarahkan ke berbagai arah, menyebabkan banyak jalur antara pemancar dan penerima, yang dikenal sebagai propagasi lintas jamak. Propagasi lintas jamak menyebabkan interferensi dan memudar, yang dapat memperburuk kualitas sinyal yang diterima. Interaksi sinyal langsung dan pantulan dapat mengakibatkan fluktuasi kekuatan sinyal dan mempengaruhi keandalan komunikasi nirkabel.

Difraksi adalah efek propagasi lain yang terjadi ketika gelombang radio menemui hambatan seperti tepi bangunan, yang mengarah pada pembentukan gelombang sekunder yang dapat mengganggu jalur langsung. Efek ini dapat sangat memengaruhi propagasi sinyal di daerah perkotaan, terutama ketika komunikasi garis pandang terhambat.

Untuk mendesain sistem jaringan komunikasi radio dengan benar, penting untuk memahami karakteristik propagasi radio. Model prediksi propagasi klasik tidak dirancang untuk mempertimbangkan gambaran informasi tentang kondisi kanal, yaitu lingkungan. Sedangkan model ray tracing menyertakan informasi lingkungan. Teknik ini mampu memberikan karakteristik propagasi radio dalam a lingkungan multidimensi [15]. Selain itu, saat gelombang radio merambat, maka terjadi mekanisme propagasi yang berbeda, misalnya difraksi dari tepi yang tajam (seperti sudut bangunan dan atap), pantulan dari permukaan yang halus (misalnya tanah, dinding), transmisi ke media yang berbeda (misalnya dinding), dan hamburan dari permukaan kasar atau benda-benda kecil. Oleh karena itu, perambatan multipath adalah fenomena yang kompleks; Namun, model ray tracing bisa digunakan untuk menemukan kemungkinan jalur antara pemancar dan penerima.

B. Refleksi oleh RIS

Desain model saluran komunikasi nirkabel berbasis RIS ditunjukkan dalam Gambar 4, dimana saluran dari Base Station (BS) ke User Equipment (UE) melalui setiap elemen RIS dibangun oleh tiga komponen. Ketiga komponen tersebut adalah hubungan saluran antara BS dan RIS, refleksi elemen RIS, dan hubungan saluran antara RIS dan UE. Saluran komposit seperti itu berbeda dengan saluran langsung point-to-point konvensional. Namun, dari BS, setiap elemen RIS menerima sinyal multi-path yang disuperposisikan dan kemudian menyebarkan sinyal terkait dengan amplitudo dan / atau fase yang dapat disesuaikan, seperti sumber titik tunggal, yang mengarah ke model saluran “multiplikasi”.



Gbr. 4 Sistem komunikasi nirkabel basis RIS dengan tautan saluran BS dan UE

Kita bisa menyatakan koefisien refleksi kompleks dari sinyal yang dipantulkan oleh elemen ke-n dari RIS secara matematis sebagai berikut:

$$h_n = (\beta_n e^{j\theta_n}) x_n, \quad n = 1, \dots, N, \quad (1)$$

dimana h_n menunjukkan sinyal yang dipantulkan dari elemen ke- n , x_n adalah sinyal yang datang ke RIS, N mewakili jumlah total elemen pemantul pada RIS, dan β_n adalah koefisien refleksi dan θ_n adalah fase sinyal yang dipantulkan. Dengan menggunakan desain yang tepat untuk pergeseran fase RIS, amplitudo, atau keduanya, tujuan metrik tertentu, seperti tingkat yang dapat dicapai sistem atau cakupan, dapat dioptimalkan dengan mengubah lingkungan saluran. Hal ini pada dasarnya berbeda dengan penelitian komunikasi nirkabel konvensional, di mana desain dan peluang optimasi terbatas pada pasangan transceiver.

Selain itu, menurut desain sistem nirkabel berbantuan RIS, untuk hubungan mendasar antara amplitudo pantulan dan pergeseran fasa, kita dapat mengasumsikan model analitis untuk pergeseran fasa. Model ini secara umum dapat diterapkan pada berbagai perangkat semikonduktor yang digunakan untuk penerapan RIS. Kami mempertimbangkan pergeseran fasa dan amplitudo yang sesuai $L_n = \beta_n(\theta_n)e^{j\theta_n}$ dengan $\theta_n \in [-\pi, \pi]$ dan $\beta_n(\theta_n) \in [0,1]$. Oleh karena itu, amplitudo pantulan x dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\beta_n(\theta_n) = (1 - \beta_{min}) \left(\frac{\sin(\theta_n - \phi) + 1}{2} \right)^\gamma + \beta_{min} \quad (2)$$

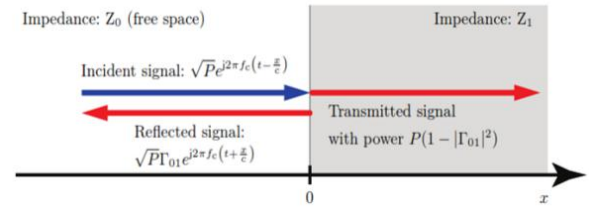
dimana $\beta_{min} \geq 0$, $\phi \geq 0$, dan $\gamma \geq 0$ adalah konstanta yang terkait dengan implementasi sirkuit tertentu.

C. Karakteristik Elektromagnetik RIS

Ketika gelombang sinusoidal mencapai batas antara dua medium, maka impedansi karakteristik masing-masing menentukan fraksi sinyal apa dipantulkan kembali dibandingkan dengan yang ditransmisikan ke dalam medium baru. Kita memisalkan Z_0 sebagai impedansi medium pertama (misalnya, ruang bebas) dan Z_1 menunjukkan impedansi medium kedua (misalnya, permukaan). Koefisien refleksi kemudian dapat dihitung sebagai

$$\Gamma_{01} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (3)$$

yang maksudnya sinyal pantulan dibandingkan dengan sinyal datang pada batas antara medium. Koefisien refleksi dapat menjadi kompleks, dalam hal ini $\arg(\Gamma_{01})$ merepresentasikan pergeseran fasa yang terjadi pada sinyal sebelum dipantulkan. Skenario ini diilustrasikan pada Gambar 5, dimana medium pertama adalah ruang bebas (vakum) yang kecepatan cahayanya dilambangkan dengan c . Sebagian kecil $|\Gamma_{01}|$ dari daya dipantulkan, sedangkan sebagian kecil sisanya $1 - |\Gamma_{01}|$ ditransmisikan ke medium baru dan mungkin diserap olehnya. Kita akan fokus pada sinyal yang dipantulkan.



Gbr. 5 Ilustrasi Gelombang Elektromagnetik saat merambat pada dua medium yang berbeda

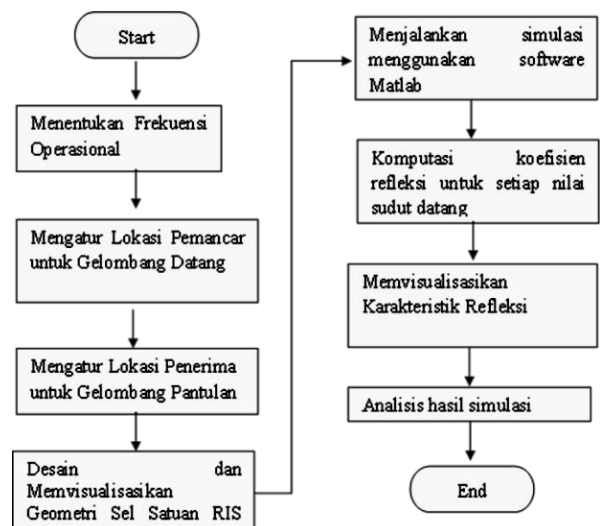
Permukaan yang homogen memiliki impedansi konstan Z_1 , yang menghasilkan daya yang berkurang dengan faktor $|\Gamma_{01}|^2 \in [0, 1]$, tetapi sebaliknya, perilaku pantulan yang sama seperti pada bagian sebelumnya. Namun, anggaplah permukaan dibagi menjadi N unit kecil yang secara struktural serupa tetapi memiliki sifat listrik yang heterogen. Kami menyebutnya metaatom dan masing-masing memiliki impedansi spesifik Z_n untuk $n = 1, \dots, N$. Koefisien refleksi yang sesuai kemudian menjadi

$$\Gamma_{0n} = \frac{Z_n - Z_0}{Z_n + Z_0} \quad (4)$$

II. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian kuantitatif untuk mengevaluasi sistem komunikasi nirkabel berbasis RIS dalam memprediksi propagasi gelombang elektromagnetik. Selanjutnya, penulis juga menganalisis dampak perubahan refleksi gelombang elektromagnetik saat berinteraksi dengan RIS.

Bagan penelitian berisi proses pengerjaan penelitian dan luaran yang akan dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 6.



Gbr. 6 Diagram Alir Penelitian

A. Tahapan Simulasi

Metode dan tahapan yang digunakan untuk mencapai tujuan adalah sebagai berikut:

1. Menetapkan Frekuensi Operasional. Selanjutnya hitung panjang gelombang yang sesuai menggunakan kecepatan cahaya dan frekuensi.
2. Menentukan lokasi sumber pemancar di wilayah medan jauh dengan memilih nilai sembarang untuk sudut azimuth, sudut elevasi, dan jarak radial. Untuk memenuhi kriteria medan jauh, jarak radial adalah 100 kali panjang gelombang. Selanjutnya, dilakukan komputasi arah sinyal gelombang bidang datang dalam sistem koordinat Cartesian.
3. Memilih lokasi pengamatan di daerah medan jauh dengan memilih nilai sembarang untuk sudut azimuth, sudut elevasi, dan jarak radial. Selanjutnya, dilakukan komputasi lokasi penerima dalam sistem koordinat Cartesian.
4. Merancang model antenna dipole yang didukung reflektor pada frekuensi operasi. Model antenna dipole dimiringkan untuk membuatnya horizontal ke bidang tanah.
5. Menetapkan Arah dan Polarisasi ke RIS. Besaran dan fase koefisien pantulan medan diatur untuk konfigurasi gelombang datang yang berbeda. Tentukan polarisasi dan arah gelombang datang. Inisialisasi besaran dan fase koefisien refleksi. Hitung koefisien refleksi untuk setiap nilai sudut datang.
6. Memvisualisasikan Karakteristik Refleksi, yaitu besar dan fase koefisien refleksi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

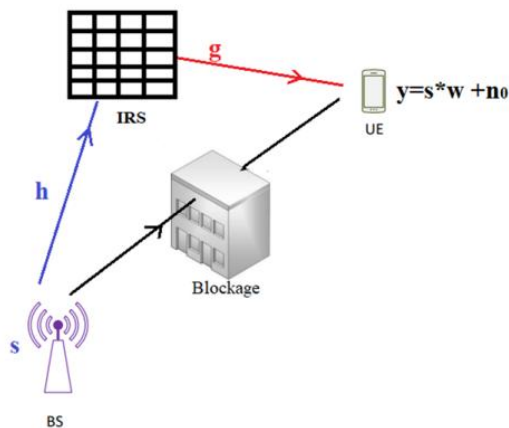
Analisis propagasi gelombang elektromagnetik dibutuhkan dalam desain dan optimalisasi sistem komunikasi nirkabel. Memahami perilaku gelombang elektromagnetik tertentu penting untuk memastikan komunikasi yang handal dan efisien. Dalam bab ini penulis menyajikan analisis propagasi gelombang elektromagnetik untuk aplikasi RIS. Dengan mempelajari karakteristik propagasi gelombang elektromagnetik untuk aplikasi RIS, hasil analisis yang dihasilkan bisa digunakan untuk perencanaan dan penyebaran jaringan komunikasi nirkabel generasi 5G.

Dalam bab ini penulis mengkaji karakteristik propagasi gelombang elektromagnetik untuk aplikasi RIS pada sistem komunikasi nirkabel generasi 5G. Hal ini mencakup analisis dan pemodelan path loss, evaluasi cakupan dan daya terima.

A. Hasil yang Dicapai

Dalam penelitian ini, penulis menunjukkan proses simulasi perilaku permukaan pemantul cerdas (RIS) melalui simulasi elektromagnetik yang komprehensif. RIS telah menarik banyak perhatian dalam bidang komunikasi nirkabel. Terdiri dari berbagai macam elemen sel satuan panjang gelombang, RIS memiliki kemampuan untuk mengubah fase, amplitudo, polarisasi,

atau frekuensi sinyal yang masuk. Dalam skenario di mana halangan menghalangi rute langsung antara Base Station (BS) dan User Equipment (UE), pantulan insidental dari RIS dapat berfungsi sebagai jalur alternatif untuk perambatan sinyal, seperti yang diilustrasikan dalam gambar 7. Selain itu, sistem modulasi fase eksternal dapat digabungkan untuk mengatur sifat reflektif RIS.



Gbr. 7 Skenario Simulasi RIS untuk komunikasi 5G

Penggunaan RIS menghasilkan rute tidak langsung dua segmen untuk perambatan sinyal dari Base Station (BS) ke User Equipment (UE). Segmen awal berkaitan dengan jalur transmisi yang menghubungkan BS dan RIS, sedangkan segmen berikutnya berkaitan dengan jalur yang menghubungkan RIS dan UE. Karakteristik matriks saluran untuk kedua jalur sinyal ini bergantung pada konfigurasi geometris dan sifat pantulan elektromagnetik RIS. Representasi matematis dari sinyal yang diterima oleh UE digambarkan dalam persamaan berikut :

$$r = sw + n_0 = s \frac{\sqrt{G_r G_u G_t A_r A_u}}{4\pi} \sum_{n=1}^N \frac{F_n R}{d_{cn} d_{rn}} e^{-j2\pi \frac{(d_{tn} + d_{rn})}{\lambda}} + n_0 \tag{5}$$

dimana :

$$R = [R_1 R_2 \dots R_n]^T$$

Gu adalah penguatan internal dari elemen RIS ke-n.

Gt adalah penguatan internal pemancar BS.

Gr adalah penguatan internal penerima UE.

$F_n = F_n^r F_n^t F_n^{rx} F_n^{rx}$ adalah hasil kali dari pola daya yang dinormalisasi dari BS, UE, dan RIS.

d_t adalah jarak antara BS dan elemen RIS ke-n.

d_r adalah jarak antara UE dan elemen RIS ke-n.

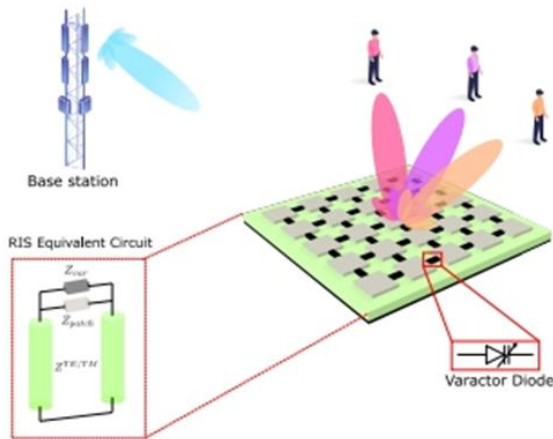
A_r adalah area aperture efektif UE.

A_u adalah area aperture efektif elemen RIS ke-n.

λ adalah panjang gelombang ruang bebas

B. Hasil Perancangan Elemen RIS

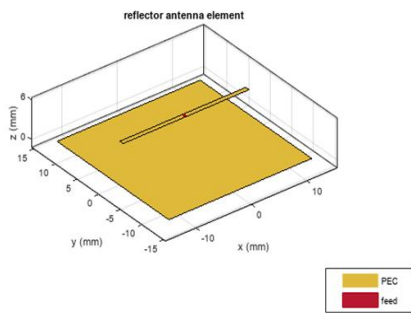
RIS didesain melalui celah resonansi tipis yang sepenuhnya memantulkan gelombang datang dengan fase pantulan yang berubah-ubah. Rekonfigurasi penuh RIS dapat dicapai dengan berbagai cara, tetapi pendekatan yang paling sederhana didasarkan pada penggunaan dioda varaktor di dalam setiap sel, seperti ditunjukkan dalam Gambar 8.



Gbr. 8 Layout 3 Dimensi dari RIS

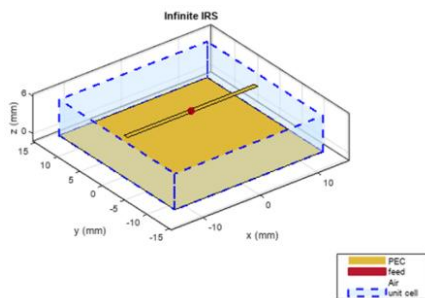
Aspek fisik struktur dengan permukaan periodik disusun oleh patch logam persegi yang mempunyai dengan dioda varaktor. Ketika Permukaan Impedansi Buatan dimuat dengan komponen aktif, sifat pantulan setiap sel satuan permukaan dapat dikontrol sebagai fungsi dari tegangan arus searah (DC).

Sel satuan RIS didesain pada frekuensi operasi 5,8 GHz dengan menggunakan reflektor dan objek dipole. Dipole dimiringkan untuk membuatnya horizontal terhadap bidang ground. Hasil perancangan ditunjukkan oleh Gambar 9.



Gbr. 9 Geometri Unit Sel dari RIS

Umumnya, konfigurasi RIS berisi kumpulan elemen array dalam jumlah yang banyak. Ukuran RIS yang dirancang dalam penelitian ini 20 unit sel Uniform Planar Array (UPA). Mempertimbangkan waktu simulasi yang lama untuk array yang begitu besar, pendekatan array tak terbatas menggunakan fungsi Green. Hasil perancangan RIS ditunjukkan dalam Gambar 10.



Gbr. 10 RIS ukuran 20x20 unit UPA

C. Pola Berkas (Beam Pattern) dari RIS

Pada bagian ini penulis menghitung bentuk sudut dari sinyal yang dipantulkan dari permukaan dua dimensi yang diilustrasikan pada Gambar 11, yang ditempatkan pada bidang yz. Koordinat z menyatakan panjang horisontal sebagai LH dan koordinat y menyatakan panjang vertikal sebagai LV. Permukaan diasumsikan konduktor listrik sempurna (PEC) yang homogen, dan kita memperlakukannya sebagai uniform planar array (UPA) dengan memotongnya menjadi beberapa potongan kecil yang masing-masing memiliki dimensi fisik $\Delta \times \Delta$ dimana $\Delta \leq \lambda/2$. Oleh karena itu, jarak antenna horisontal/vertikal adalah Δ . Setiap antenna memiliki luas Δ^2 yang lebih kecil dari antenna isotropis, yang mengimplikasikan bahwa antenna tersebut juga memiliki pola radiasi yang kurang lebih isotropis. Jumlah antenna horisontal dan vertikal dapat dihitung sebagai $NH = LH/\Delta$ dan $NV = LV/\Delta$. Kita akan menggunakan notasi ini untuk menentukan pola pancaran dan kemudian membiarkan $\Delta \rightarrow 0$ sehingga UPA terbuat dari banyak antenna kecil secara asimtotik yang akan kita sebut sebagai atom.

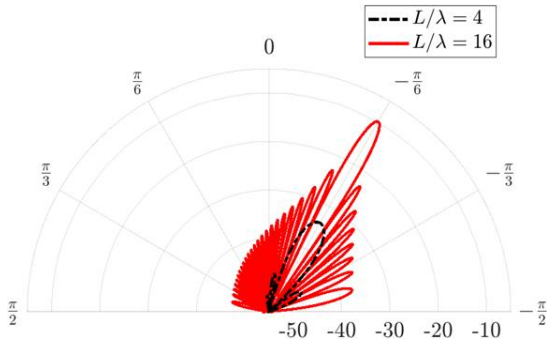
Ketika gelombang bidang mengenai permukaan dari sudut azimuth $\phi_i \in [-\pi/2, \pi/2]$ dan sudut elevasi $\theta_i \in [-\pi/2, \pi/2]$, maka pergeseran fasa relatif di antara atom-atom diberikan oleh masukan vektor respon array $a_{NH,NV}(\phi_i, \theta_i)$. Dengan mengikuti prinsip Huygens-Fresnel, kita dapat memperoleh sinyal yang dipantulkan dengan mempertimbangkan transmisi menggunakan vektor prakode

$$p = a_{NH,NV}(\phi_i, \theta_i) = a^*_{NH,NV}(-\phi_i, -\theta_i) \tag{6}$$

Gain beamforming yang diamati pada arah pengamatan sembarang, diwakili oleh sudut azimuth $\phi_o \in [-\pi/2, \pi/2]$ dan sudut elevasi $\theta_o \in [-\pi/2, \pi/2]$, diperoleh dengan mengalikan dengan vektor respons array $a_{NH,NV}(\phi_o, \theta_o)$ yang merepresentasikan kanal pada arah tersebut:

$$B(\phi_o, \theta_o) = \left| a_{NH,NV}^T(\phi_o, \theta_o) p \right|^2 = \left| a_{NH,NV}^T(\phi_o, \theta_o) a_{NH,NV}^*(-\phi_i, -\theta_i) \right|^2 \tag{7}$$

Untuk menganalisis karakteristik beamforming pada RIS homogen, kami melakukan simulasi dimana pengamatan dilakukan terhadap arah sudut yang berbeda ϕ_o pada bidang azimuth (di mana $\theta_o = 0$) ketika gelombang bidang elektromagnetik datang dari arah $\phi_i = \pi/6, \theta_i = 0$. Kami membandingkan permukaan persegi dengan panjang sisi $L = LH = LV \in \{4\lambda, 16\lambda\}$. Dalam simulasi ini kami asumsikan pathloss sebesar 10-8. Hasil simulasi ditunjukkan dalam Gambar 11.



Gbr. 11 Karakteristik beamforming untuk RIS homogen

Gambar 11 menunjukkan bagaimana sinyal yang dipantulkan adalah berkas yang mengarah ke arah $\phi_0 = -\pi/6 = -\phi_i$, seperti yang diharapkan. Beamwidth horizontal sedikit menyusut ketika permukaan RIS bertambah besar, tetapi efek yang lebih dominan adalah peningkatan penguatan saluran, yang meningkat secara kuadratik dengan luas permukaan. Oleh karena itu, ketika setiap sisi bertambah dengan faktor 4, penguatan saluran bertambah $4^4 = 24$ dB. Hal ini adalah kombinasi penguatan aperture dan penguatan beamforming transmisi.

Sekarang kita akan menganalisa karakteristik beam pattern untuk kondisi RIS heterogen. Untuk kondisi ini RIS memiliki sejumlah unit sel didalamnya dengan nilai impedansi yang bervariasi. Jika gelombang bidang datang dari arah sudut (ϕ_i, θ_i) , maka pergeseran fase datang di atas permukaan diberikan oleh vektor respons array $\mathbf{a}_{NH,NV}(\phi_i, \theta_i)$. Setiap unit sel kemudian menyesuaikan nilai fase kedatangan lokalnya dengan ψ_n ; oleh karena itu, profil fase dari sinyal yang ditransmisikan/dipantulkan diberikan oleh vektor prakode

$$\mathbf{p} = \mathbf{D}_\psi \mathbf{a}_{NH,NV}(\phi_i, \theta_i) = \mathbf{D}_\psi \mathbf{a}_{NH,NV}^*(-\phi_i, -\theta_i) \quad (8)$$

di mana penyesuaian fase permukaan dilakukan dengan menggunakan matriks refleksi diagonal

$$\mathbf{D}_\psi = \text{diag}(e^{-j\psi_1}, \dots, e^{-j\psi_N}) \quad (9)$$

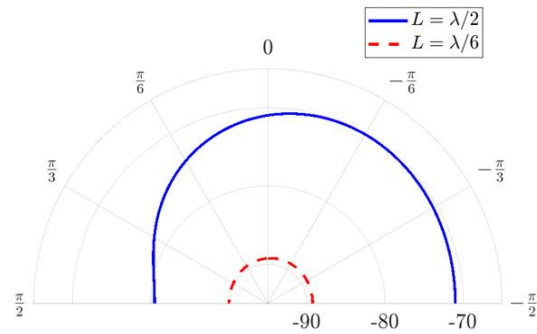
Persamaan gain beamforming kemudian dapat diselesaikan sebagai

$$B(\phi_0, \theta_0) = \left| \mathbf{a}_{NH,NV}^T(\phi_0, \theta_0) \mathbf{p} \right|^2 = \left| \mathbf{a}_{NH,NV}^T(\phi_0, \theta_0) \mathbf{D}_\psi \mathbf{a}_{NH,NV}^*(-\phi_i, -\theta_i) \right|^2 \quad (10)$$

Karena setiap masukan vektor respons array adalah eksponensial kompleks yang sepenuhnya ditentukan oleh nilai fase, kita dapat mengubah \mathbf{p} menjadi vektor respons array apa pun yang kita pilih dengan memilih \mathbf{D}_ψ yang sesuai. Dengan demikian, kita dapat mengontrol arah utama sinar yang dipantulkan. Kita juga dapat menghasilkan vektor prakode yang bukan merupakan vektor respons array jika kita menginginkannya.

Untuk menganalisis karakteristik beamforming pada RIS heterogen, kami melakukan simulasi dimana pengamatan dilakukan terhadap arah sudut yang berbeda

ϕ_0 pada bidang azimuth (di mana $\theta_0 = 0$) ketika gelombang bidang elektromagnetik datang dari arah $\phi_i = \pi/6, \theta_i = 0$. Kami membandingkan permukaan persegi dengan dimensi permukaannya adalah $L \times L$ dengan $L \in \{\lambda/6, \lambda/2\}$. Hasil simulasi ditunjukkan dalam Gambar 12



Gbr. 12 Karakteristik beamforming untuk RIS heterogen

Hasil simulasi menunjukkan kedua ukuran RIS tersebut menghasilkan sinyal pantulan yang tersebar di semua sudut, bahkan kembali ke arah pemancar, tetapi pola radiasi menjadi lebih melingkar (yaitu, lebih dekat ke isotropik) ketika ukuran RIS mengecil. Agar RIS dapat sepenuhnya mengarahkan arah sinyal yang dipantulkan, maka RIS harus memiliki banyak unit sel kecil yang dapat dikontrol yang masing-masing tidak memiliki direktivitas ke arah tertentu, sehingga dapat digunakan bersama-sama memantulkan sinyal yang dipantulkan ke tempat yang kita inginkan.

D. Analisis Pathloss dari RIS

Pada bagian ini penulis menghitung pathloss untuk aplikasi RIS. Pathloss dihitung dengan asumsi propagasi gelombang line of sight (LOS) di ruang ruang bebas. Kita Misalkan jarak dari pemancar ke permukaan adalah d_t dan jarak dari permukaan ke penerima adalah d_r . Jika pemancar memiliki gain antenna $G_t(\phi_t, \theta_t)$ ke arah permukaan dan setiap bagian kecil dari unit sel RIS memiliki luas A_m maka dapat disimpulkan bahwa pathloss saluran di antara pemancar dan RIS adalah

$$\beta_t = \frac{\lambda^2}{(4\pi d_t)^2} G_t(\phi_t, \theta_t) \frac{4\pi}{\lambda^2} A_m = \frac{G_t(\phi_t, \theta_t) A_m}{(4\pi d_t)^2} \quad (11)$$

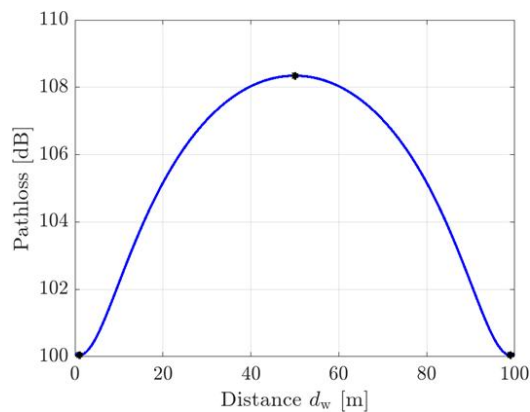
Demikian pula, jika penerima memiliki gain antenna $G_r(\phi_r, \theta_r)$ ke arah RIS, maka gain saluran di antara keduanya adalah

$$\beta_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi d_r)^2} G_r(\phi_r, \theta_r) \frac{4\pi}{\lambda^2} A_m = \frac{G_r(\phi_r, \theta_r) A_m}{(4\pi d_r)^2} \quad (12)$$

Ketika jalur propagasi melalui RIS mendominasi jalur statis, maka dapat disimpulkan bahwa pathloss saluran ujung ke ujung dapat dinyatakan sebagai

$$\text{pathloss} = N^2 \beta_t \beta_r \quad (13)$$

Bukan hanya jumlah unit sel RIS yang menentukan pathloss ujung ke ujung, tetapi juga di mana RIS ditempatkan. Idealnya, pemancar dan penerima harus memiliki saluran LOS ke RIS karena umumnya LOS lebih kuat daripada saluran Non line of sight (NLOS).



Gbr. 13 Hubungan antara Pathloss dengan pemilihan lokasi RIS

Gambar 13 menunjukkan pathloss ujung ke ujung untuk jumlah unit sel RIS 200 buah, yang masing-masing memiliki luas $A_m = (\lambda/4)^2$ dimana panjang gelombang $\lambda = 0,1$ m. Seperti yang ditunjukkan dari hasil simulasi, pathloss minimum dicapai saat RIS diletakkan dekat dengan pemancar dan saat RIS diletakkan dekat dengan penerima, sedangkan nilai pathloss maksimum terjadi jika posisi RIS berada di tengah-tengah pemancar dan penerima. Dari simulasi ini dapat dilihat bahwa pathloss maksimum dan minimum sekitar 8 dB.

IV. KESIMPULAN

Keberhasilan penggelaran dan pengoperasian sistem komunikasi 5G berbasis RIS dipengaruhi oleh perencanaan propagasi gelombang radio yang efektif. Dengan mengevaluasi secara cermat perilaku gelombang radio di suatu lingkungan, perencana jaringan dapat memastikan bahwa jaringan 5G berbasis RIS bisa digunakan dan dioperasikan secara efisien dan andal. Seiring dengan penyebaran jaringan 5G yang terus meluas di seluruh dunia, Riset berbasis RIS penting untuk meningkatkan kualitas layanan tersebut.

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan maka peneliti mempunyai kesimpulan penggunaan metode refleksi berbasis RIS dalam sistem komunikasi seluler, terutama dalam konteks jaringan 5G di lingkungan urban, meningkatkan daya terima sinyal dengan signifikan. Hal ini memiliki dampak positif dalam meningkatkan kualitas dan stabilitas komunikasi seluler di lingkungan yang penuh dengan hambatan dan refleksi, seperti perkotaan

REFERENSI

- [1] Liu, R. (2021). Key use cases and latest progress in prototyping, testing & standardization of RIS. Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, Madrid, Spain.
- [2] Jian, M., Liu, R., & Chen, Y. (2021, July). Standardization for reconfigurable intelligent surfaces: Progresses, challenges and the road ahead. In *2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)* (pp. 337-342). IEEE.
- [3] Jiang, M., Cezanne, J., Sampath, A., Shental, O., Wu, Q., Koymen, O., Bedewy, A., & Li, J. (2022). Wireless fronthaul for 5G and future radio access networks: Challenges and enabling technologies. *IEEE Wireless Communications*, 29(2), 108-114.
- [4] Wu, Q., Zhang, S., Zheng, B., You, C., & Zhang, R. (2021). Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial. *IEEE transactions on communications*, 69(5), 3313-3351.
- [5] Björnson, E., Özdogan, Ö., & Larsson, E. G. (2021). Reconfigurable intelligent surfaces: Three myths and two critical questions. *IEEE Communications Magazine*, 58(12), 90-96.
- [6] Huang, J., Wang, C. X., Sun, Y., Feng, R., Huang, J., Guo, B., Zhong, Z., & Cui, T. J. (2022). Reconfigurable intelligent surfaces: Channel characterization and modeling. *Proceedings of the IEEE*, 110(9), 1290-1311.
- [7] Yassir, Y., Suandi, I., Azmi, S., Suryati, S., & Rachmawati, R. (2024, April). Analisis Propagasi Gelombang Radio Menggunakan Metode Ray Tracing pada Perencanaan Sistem Komunikasi Seluler 5G untuk Wilayah Urban (Studi Kasus Distrik Bisnis di Kota Lhokseumawe). In *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe* (Vol. 7, No. 1, pp. 73-78).
- [8] Di Renzo, M., Danufane, F. H., Xi, X., De Rosny, J., & Tretyakov, S. (2020, May). Analytical modeling of the path-loss for reconfigurable intelligent surfaces—anomalous mirror or scatterer?. In *2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [9] Garcia, J. C. B., Sibille, A., & Kamoun, M. (2020). Reconfigurable intelligent surfaces: Bridging the gap between scattering and reflection. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38(11), 2538-2547.
- [10] Ellingson, S. W. (2021, September). Path loss in reconfigurable intelligent surface-enabled channels. In *2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (pp. 829-835). IEEE.
- [11] Özdogan, Ö., Björnson, E., & Larsson, E. G. (2019). Intelligent reflecting surfaces: Physics, propagation, and pathloss modeling. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(5), 581-585.
- [12] Tang, W. et al. (2020). Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement. *IEEE transactions on wireless communications*, 20(1), 421-439.

- [13] Danufane, F. H., Di Renzo, M., De Rosny, J., & Tretyakov, S. (2021). On the path-loss of reconfigurable intelligent surfaces: An approach based on Green's theorem applied to vector fields. *IEEE Transactions on Communications*, 69(8), 5573-5592.
- [14] Björnson, E., & Sanguinetti, L. (2020). Power scaling laws and near-field behaviors of massive MIMO and intelligent reflecting surfaces. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1, 1306-1324.
- [15] Najafi, M., Jamali, V., Schober, R., & Poor, H. V. (2020). Physics-based modeling and scalable optimization of large intelligent reflecting surfaces. *IEEE Transactions on Communications*, 69(4), 2673-2691.