Pengembangan Teknik Alokasi Sumber Daya Jaringan 6G untuk Laju Data Tinggi dan Perlusasan Jangkauan Pengguna Jamak

Riset Unggulan ITB

Irma Zakia, Hendrawan, Robithoh Annur
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika

Abstract

Pada jaringan cell-free massive MIMO (CF-mMIMO) arah uplink, perangkat pengguna (UE) yang bergerak memerlukan klasterisasi access point (AP) yang adaptif agar tidak mengalami outage. Namun, rekonfigurasi klaster yang berlebihan menaikkan tingkat handover, sedangkan kompensasi outage dengan daya pancar yang lebih besar meningkatkan interferensi antar-pengguna. Masalah ini diformulaikan sebagai optimasi bersama klasterisasi dan alokasi daya yang sadar-interferensi (IAJCPA), yang menyeimbangkan lima tujuan: overhead klaster, probabilitas outage, konsumsi daya, interferensi antar-pengguna, dan tingkat handover. Karena variabelnya campuran diskret dan kontinu serta fungsi tujuannya nonkonveks, masalah ini berupa MINLP yang bersifat NP-hard. Kami mengusulkan deep reinforcement learning (DRL) berbasis soft actor-critic (SAC) pada kerangka open radio access network (O-RAN). Interferensi dikendalikan melalui himpunan klaster interferensi yang hanya berisi AP yang tidak melayani, dimasukkan ke fungsi reward, dan diperbarui dengan frekuensi jarang oleh O-DU. Simulasi menunjukkan IAJCPA memberikan tingkat handover, probabilitas outage, dan konsumsi daya yang lebih baik daripada DRL tanpa kesadaran interferensi dan DRL dengan klasterisasi heuristik.

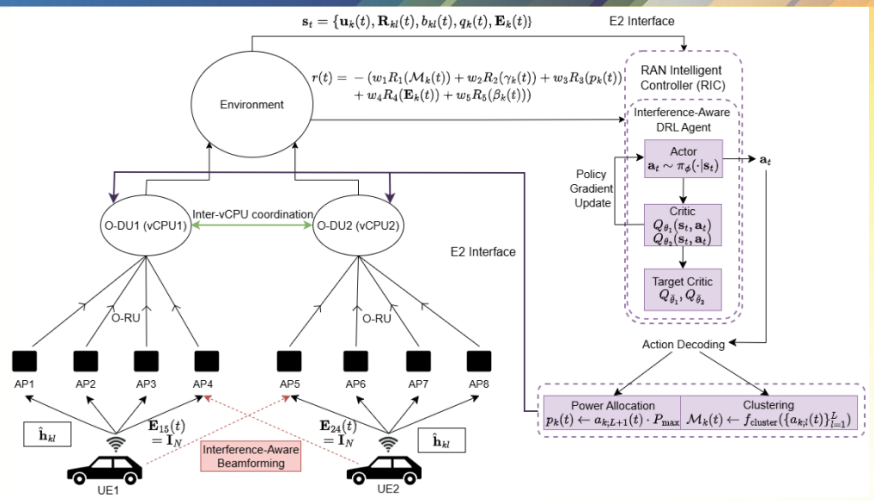
Keyword: cell-free massive MIMO, O-RAN, deep reinforcement learning, soft actor-critic, klasterisasi, alokasi daya

Introduction

Kebutuhan konektivitas masif dengan latensi sangat rendah pada jaringan 6G mendorong arsitektur cell-free massive MIMO (CF-mMIMO), yaitu banyak access point (AP) yang berkoordinasi melayani pengguna secara koheren. CF-mMIMO terpusat sulit diskalakan karena beban pada satu CPU, sehingga pemrosesan didistribusikan ke beberapa CPU virtual (vCPU) yang masing-masing melayani satu klaster AP. Akibatnya, pengguna yang dilayani klaster berbeda saling mengganggu karena koordinasi antar-vCPU terbatas.

Kerangka O-RAN, melalui near-real-time RAN intelligent controller (near-RT RIC), menyediakan platform praktis untuk mengendalikan interferensi tersebut. Metode klasterisasi dan handover konvensional bersifat heuristik, statis, dan reaktif sehingga kurang cocok untuk pengguna bergerak. Penelitian berbasis DRL sebelumnya umumnya mengabaikan interferensi antar-pengguna atau memakai asumsi ideal, seperti kapasitas fronthaul tak terbatas dan CSI sempurna.

Kontribusi penelitian ini: (1) agen DRL SAC untuk klasterisasi dan alokasi daya bersama dengan reward multi-objektif yang sadar-interferensi; (2) mekanisme koordinasi ringan selaras O-RAN yang hanya bertukar informasi dengan frekuensi yang jarang; (3) bukti simulasi bahwa perbaikan outage, handover, dan daya tercapai tanpa menaikkan kompleksitas asimtotik.



Gbr. 1 Arsitektur IAJCPA

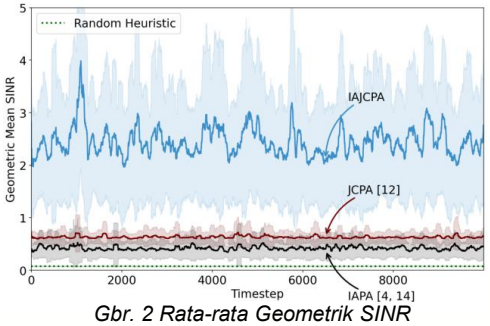
Research Method

Model sistem: uplink CF-mMIMO TDD dengan L AP (masing-masing N antena) dan K UE antena-tunggal yang bergerak, dimodelkan dengan SDE Gauss-Markov. Kanal fading blok dengan blok koherensi 200 simbol (±7,1 ms, setara ±60 km/jam). Dengan τp < K, pilot yang sama bisa dipakai oleh pengguna berbeda; kanal diestimasi dengan MMSE dan sinyal dideteksi dengan P-MMSE. Himpunan klaster interferensi dibentuk dari AP non-melayani yang rasio galat estimasi terhadap korelasi spasialnya melebihi ambang.

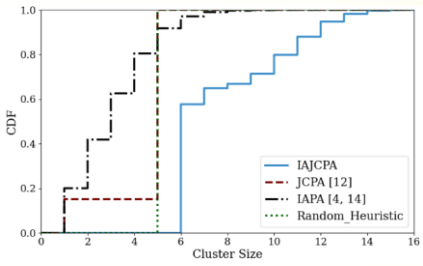
Agen SAC (Gbr. 1) berada di near-RT RIC. State: lokasi UE, statistik kanal, status LoS, indeks pilot, dan matriks klaster interferensi. Action: skor pemilihan AP (softmax dan ambang δ membentuk klaster layanan) serta fraksi daya uplink. Reward = −(w_1R_1 + … + w_5R_5), dengan R_1 ukuran klaster, R_2 outage, R_3 daya total, R_4 interferensi, dan R_5 handover; bobot {0,2; 0,6; 0,3; 0,3; 0,2} dicari dengan Optuna. O-DU melaporkan statistik yang berubah lambat melalui antarmuka E2, lalu RIC menghitung klaster interferensi dan mengirim keputusan kembali. Simulasi (PyTorch, Gymnasium, Stable-Baselines3): area 3 × 3 km, L = 16 AP, K = 6 UE, N = 16, 2,5 GHz, 20 MHz, τp = 2, Pmax = 30 dBm. Pembanding: JCPA (tanpa mitigasi interferensi), IAPA (klaster heuristik), dan heuristik acak (5 AP terkuat, daya seragam).

Discussion & Result

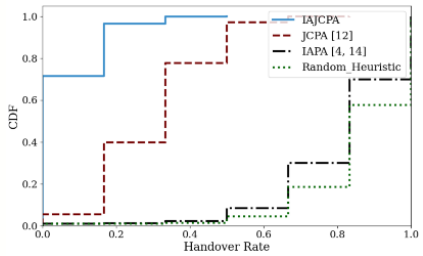
SINR (Gbr. 2): rata-rata geometrik SINR uplink IAJCPA beberapa kali lebih tinggi daripada pembanding, dan perbaikannya merata di seluruh UE, bukan hanya pada UE yang posisinya menguntungkan.



Gbr. 2 Rata-rata Geometrik SINR



Gbr. 3 Ukuran Kluster



Gbr. 4 Tingkat handover

Ukuran klaster (Gbr. 3): IAJCPA memilih klaster besar (|Mk| ≥ 6), sedangkan JCPA memilih 1 atau 5 AP dan IAPA 1 sampai 4 AP. Tanpa koordinasi interferensi, klaster besar justru meningkatkan kontaminasi pilot.
Tingkat handover (Gbr. 4): IAJCPA memiliki tingkat handover terendah, sedangkan heuristik acak tertinggi karena selalu memilih ulang 5 AP terbaik.
Daya: IAJCPA memakai daya uplink total terendah (sekitar 2 W, dibandingkan 4 sampai 6 W pada pembanding) karena diversitas spasial klaster besar sudah cukup.

Conclusion

Penelitian ini mengusulkan DRL selaras O-RAN untuk optimasi bersama klasterisasi dan alokasi daya yang sadar-interferensi (IAJCPA) pada CF-mMIMO dengan pengguna bergerak. Mekanisme koordinasi eksplisit mendorong IAJCPA memilih klaster layanan yang lebih besar, sehingga tingkat handover turun dan diversitas spasial naik. Diversitas yang tinggi dimanfaatkan untuk menurunkan daya pancar yang diperlukan agar terhindar dari outage. Tanpa koordinasi interferensi, seperti pada JCPA, klaster besar justru merugikan karena kontaminasi pilot, sehingga sering diperlukan daya tinggi dan handover.