

Pengaruh Pembobotan Desain Codebook terhadap Kinerja Sistem Sparse Code Multiple Access

Shilvy Fatma Fitria Rachmawati¹, Linda Meylani¹, Vinsensius Sigit Widhi Prabowo¹

¹ Program Studi Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Telkom University, Bandung, Jawa Barat 40287, Indonesia

[Diserahkan: 31 Agustus 2023, Direvisi: 17 Oktober 2023, Diterima: 18 Maret 2024]

Penulis Korespondensi: Shilvy Fatma Fitria Rachmawati (email: Shilvyfatmafitriar@student.telkomuniversity.ac.id)

INTISARI — *Sparse code multiple access* (SCMA) dapat mendukung sistem saat terjadi *overloading* di sisi penerima sehingga meningkatkan efisiensi spektrum sistem dengan merancang pemetaan simbol secara tepat. Kinerja SCMA ditentukan dengan *codebook* yang bersifat *sparse* dengan cara memetakan bit secara langsung ke *codeword* multidimensi yang dipengaruhi oleh keragaman energi dan jarak minimum Euclidean dari *multidimensional constellation* (M_C). Simulasi perancangan desain *codebook* dilakukan menggunakan pembangkit Latin dan non-Latin terhadap fase 60° dan 45° serta menambahkan nilai pembobotan $w_1 = 0,6$; $w_2 = 0,3$; $w_3 = 0,1$, konstelasi *line* dengan kanal *additive white Gaussian noise* (AWGN), pudaran (*fading*) Rayleigh, dan kanal Rician. Penelitian ini menunjukkan hasil optimal dari ketiga kanal: pada kanal AWGN adalah Latin 60° dengan BER 10^{-3} , di pudaran Rayleigh adalah non-Latin 60° dengan BER 10^{-3} , dan pada kanal Rician adalah di non-Latin 45° dengan BER 10^{-3} . Lalu, hasil pada pembobotan desain *codebook* yaitu sebagai berikut: di kanal AWGN adalah Latin 60° dengan BER 10^{-1} , di pudaran Rayleigh adalah non-Latin 45° dengan BER 10^{-1} , dan pada kanal Rician adalah Latin 45° dengan BER 10^{-3} . Hasil simulasi menyatakan pengaruh pembobotan pada setiap kanal. Didapatkan bahwa pembangkit Latin dapat meningkatkan kinerja BER dengan menekan tumpang tindih pada titik konstelasi dengan menghilangkan galat (*error*) yang terjadi di *codebook* SCMA dan hanya dapat bekerja dengan baik di kanal AWGN, serta tidak untuk pembangkit non-Latin.

KATA KUNCI — *Sparse Code Multiple Access*, Pembobotan Desain *Codebook*, Rotasi Fase, Konstelasi Dasar, BER.

I. PENDAHULUAN

Komunikasi nirkabel generasi kelima (5th Generation, 5G) diharapkan dapat mendukung kasus pengguna yang berbeda-beda, konektivitas yang kuat, konsumsi daya yang rendah, keandalan yang tinggi, dan latensi yang rendah [1]. International Data Corporation (IDC) memperkirakan perangkat pintar akan meningkat menjadi 41,6 miliar pada tahun 2024 [2].

Akses jamak merupakan teknik untuk mengatur akses dari multipengguna ke sumber daya secara bersamaan pada komunikasi nirkabel. Skema *orthogonal multiple access* (OMA) berfungsi menghilangkan interferensi multipengguna dan dapat digunakan pada *transceiver* yang sederhana [3]. Contoh skema OMA adalah *time division multiple access* (TDMA), *frequency division multiple access* (FDMA), dan *code division multiple access* (CDMA) [4]. Namun, teknik ini tidak dapat mendukung sistem 5G yang membutuhkan jumlah pengguna dan perangkat yang banyak [5].

Terbentuknya *non-orthogonal multiple access* (NOMA) [6] dapat meningkatkan kapasitas sistem, sehingga menjadikannya teknik yang dapat diimplementasikan untuk komunikasi nirkabel 5G. Referensi [7] menyatakan bahwa NOMA mempunyai kapasitas multipengguna yang besar di saluran *additive white Gaussian noise* (AWGN) *downlink*. Teknik NOMA bernama *sparse code multiple access* (SCMA) [8] berhasil diciptakan pada tahun 2013. Teknik ini dapat mendukung sistem saat terjadi *overloading*, sehingga meningkatkan efisiensi spektrum [9].

SCMA merupakan teknik akses jamak nonortogonal berdasarkan penggunaan *codebook*. Kinerja SCMA dipengaruhi desain *codebook* dan proses *decoding* dengan menggunakan *message passing algorithm* (MPA) [10]. Banyaknya lapisan pada SCMA memungkinkan konektivitas besar [11], sehingga cocok untuk memenuhi persyaratan konektivitas jaringan nirkabel 5G. Desain *codebook*

memengaruhi nilai *bit error rate* (BER) yang dapat dirancang menggunakan dua langkah, yaitu merancang *multidimensional constellation* (M_C) dan membuat operasi tertentu pada M_C untuk membangkitkan *codebook* [12].

Referensi [13] digunakan sebagai referensi utama dalam penelitian ini. Penelitian tersebut menguji *codebook* SCMA menggunakan rotasi konstelasi dan menggunakan matriks pembangkit (*generator*) bersifat Latin dan non-Latin. Keluaran yang dihasilkan adalah kinerja BER dengan modulasi *quadrature phase-shift keying* (QPSK) dan *binary phase-shift keying* (BPSK) dengan nilai fase $\frac{\pi}{3}$, $\frac{\pi}{4}$, $\frac{\pi}{5}$, dan $\frac{\pi}{6}$ pada kanal AWGN.

Penelitian ini menghasilkan BER seperti pada [13], dengan memodifikasi menggunakan konstelasi *line*, menambahkan bobot pada desain *codebook* dengan nilai fase $\frac{\pi}{4}$ dan $\frac{\pi}{3}$, serta menguji pada kanal AWGN, pudaran Rayleigh, dan kanal Rician.

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah merancang desain *codebook* pada sistem SCMA dan menganalisis pengaruhnya terhadap kinerja sistem yang diukur, yaitu BER. Penelitian ini diharapkan dapat mengetahui pengaruh desain *codebook*, mengetahui pengaruh pembobotan desain *codebook*, mendapatkan pengaruh pembobotan desain *codebook* terhadap ϕ_0 , dan mendapatkan pengaruh pergeseran fase pada konstelasi *line*. Tujuan utama penelitian ini adalah mengetahui pengaruh pembobotan terhadap desain *codebook* SCMA yang pada referensi utama belum dilakukan.

II. METODOLOGI

A. MODEL SISTEM

Pada sebuah sistem SCMA *uplink*, pengguna J terbagi ke elemen sumber daya ortogonal $(RE)_s$ -K melalui stasiun pangkalan (*base station*, BS). *Encoder* SCMA berperan sebagai

peta dari $\log_2 M$ bit ke *codebook* kompleks K -dimensi yang berukuran M , setiap pengguna menempati N sumber daya frekuensi waktu ortogonal, J adalah $\binom{K}{N}$, dan *overloading factor* $\lambda = J/K > 1$. *Codebook* bersifat *sparse* dan MPA memiliki karakter iteratif yang berfungsi mendeteksi multipengguna dengan kompleksitas rendah yang mengambil keuntungan dari pertukaran pesan berulang antara *node* sumber daya dan lapisan *node*. Jika pengguna $J = 6$ berbagi ke $K = 4$ elemen sumber daya ortogonal (RE), titik konstelasi yang digunakan dalam *codebook* adalah $M = 4$, dengan *overloading factor* $\lambda = 150\%$. $F_{4 \times 6}$ menunjukkan hubungan antara sumber daya dan pengguna. Melalui gambaran graf faktor, dengan memasukkan baris $K-N$ elemen nol ke dalam matriks unit I_N dan matriks *sparse* yang diperoleh, V memiliki baris nol-nol yang sama dengan $F_{4 \times 6}$.

B. SKEMA SIMULASI

Skema simulasi dapat dilakukan setelah membuat perancangan sistem yang sesuai kriteria. Pada Gambar 1 dijelaskan proses-proses yang terstruktur dalam perancangan sistem sehingga mempermudah penelitian.

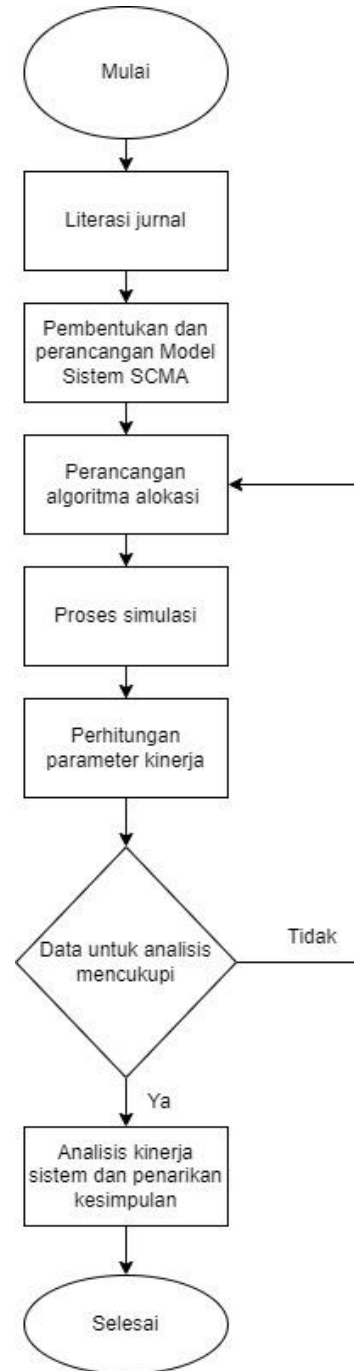
C. KONSEP DASAR SCMA

Pada sistem CDMA, ketika jumlah pengguna bertambah, kompleksitas deteksi yang dihasilkan dapat meningkat secara eksponensial di sisi penerima. Namun, kompleksitas ini berhasil diturunkan ketika sistem mengalami *overloading* (jumlah pengguna lebih banyak daripada sumber daya) oleh beberapa penelitian yang sudah dilakukan. Kompleksitas yang terjadi menyebabkan sulitnya mempertahankan kestabilan sistem di sisi penerima, ketika faktor yang menyebabkan *overloading* makin besar.

Berdasarkan desain urutan *chip* pada CDMA, yaitu *sparse spreading*, terbentuklah *low density signature* (LDS), yang pertama kali diusulkan oleh Reza Hoshyar [14]. CDMA ditingkatkan menjadi LDS-CDMA yang mampu bekerja ketika sistem dalam keadaan *overloading* dengan cara menyebarkan simbol termodulasi di elemen-elemen bukan nol dari *spreading code* [15] karena terdiri atas panjang *signature* yang besar dan beberapa elemen bukan nol yang dapat mengurangi kompleksitas MPA.

Untuk memenuhi persyaratan sistem 5G, diciptakanlah SCMA, yaitu peningkatan dari sistem LDS-CDMA [16]. Dalam sistem LDS, bit langsung dipetakan ke simbol *quadrature amplitude modulation* (QAM) dan dilakukan pengulangan yang ditransmisikan melalui subpembawa berdasarkan *signature* yang ditentukan. Akan tetapi, di SCMA bit langsung dipetakan ke *codeword* kompleks multidimensi dari *codebook* yang telah ditentukan. SCMA tidak melakukan pengulangan simbol QAM, tetapi menyediakan *shaping gain* dengan desain konstelasi multidimensi [17]. Kesamaan kedua sistem ini adalah jumlah dimensinya yang kecil untuk mengirimkan data, sehingga jumlah *codeword* pada SCMA sangat sedikit.

SCMA merupakan teknik akses jamak nonortogonal berdasarkan penggunaan *codebook* yang terbentuk dari M_C dan *shaping gain*. SCMA dapat menurunkan interferensi antar pengguna [11] karena *codebook*-nya memiliki sifat *sparse* dan juga terdapat elemen “nol” di *codeword* yang menerima masukan data langsung. Banyaknya lapisan pada SCMA memungkinkan terjadinya konektivitas besar, sehingga SCMA mendukung persyaratan konektivitas jaringan nirkabel 5G. SCMA merupakan solusi saat terjadi peningkatan pengguna dengan keadaan *overloading*.



Gambar 1. Skema simulasi.

Codebook bersifat *sparse* dan dapat menghasilkan kinerja BER yang optimal dari hasil pemetaan simbol. Kinerja SCMA dipengaruhi oleh keragaman energi dan jarak minimum Euclidean dari M_C . MPA berfungsi sebagai algoritma pendeteksian pengguna di sisi penerima. Proses sistem SCMA bekerja dimulai dari bit informasi sampai terbentuknya *codeword* pada sistem.

Kriteria dalam konsep SCMA adalah sebagai berikut [9].

1. Data biner disandikan ke *codeword* multidimensi dari set *codebook*.
2. Dimungkinkan bahwa satu *codebook* berlaku untuk satu pengguna atau satu lapisan.
3. *Codeword* pada *codebook* dibuat bersifat *sparse*, sehingga deteksi multipengguna pada MPA dapat mendeteksi *codeword* yang telah dimultipleks dengan kompleksitas yang cukup.

4. Jumlah lapisan yang termultipleks melebihi faktor penyebaran.

Struktur *codebook* SCMA digambarkan oleh matriks graf faktor [8], yang dinyatakan dengan (1).

$$F = (f_1, f_2, \dots, f_f) \quad (1)$$

dengan f_1, f_2, \dots, f_f melambangkan pengguna spesifik dan dapat direpresentasikan dalam (2) [8].

$$f_j = \text{diag}(V_j v_j^T) \quad (2)$$

dengan V_j adalah matriks pemetaan *sparse binary* yang menurunkan *codebook* dari konstelasi multidimensi untuk setiap pengguna dan v_j^T merupakan *transpose* matriks dari V_j .

Jumlah pengguna (J) dan *resource element* (K) terhubung jika dan hanya jika $(F)_{KJ} = 1$. Pembentukan matriks graf faktor untuk enam pengguna di empat *resource element* yaitu $J = 6$, $K = 4$, $N = 2$, dan *overloading factor* (λ) = 0,1. Penetapan banyaknya pengguna ditentukan dengan (3) [9].

$$J = \binom{K}{N} \quad (3)$$

dengan N adalah elemen bukan nol. Pengguna yang dilayani di setiap sumber daya ditetapkan dengan (4) [9].

$$d_{fj} = d_f = \binom{K-1}{1} = K - 1. \quad (4)$$

Dengan menjumlahkan $K-N$ baris elemen nol pada matriks identitas berukuran N , dapat dibentuk matriks pemetaan.

D. SKENARIO SISTEM SCMA

Alur penelitian dimulai dengan inisiasi parameter sistem yang akan digunakan, yaitu $K = 4$, $N = 2$, $J = 6$, $M = 4$, *codebook* 4×4 , dan *signal frame*. Lalu, masukan data berupa bit dapat dibangkitkan untuk dilakukan iterasi *signal-to-noise ratio* (SNR). Selanjutnya, bit data dipetakan ke *codeword* berdimensi *codebook* 4×4 , konstelasi akan berputar sesuai fase, dan masing-masing pengguna akan membentuk enam matriks pemetaan, lalu membentuk matriks graf faktor yang akan dikonversi ke dalam bentuk simbol dan masuk ke sistem *encoder* SCMA, propagasi kanal, dan *decoder* SCMA. Kemudian, simbol dikonversi kembali sehingga kembali ke bentuk awal, yaitu bit, dan nilai BER pada sistem SCMA dihitung.

E. MULTIDIMENSIONAL CONSTELATION (M_C)

Perancangan dan pengoperasian spesifik M_C pada pengguna berfungsi untuk membangkitkan *codebook*. M_C didesain dan dioptimalkan untuk mendapatkan nilai maksimum *shaping gain* dan nilai jarak minimum Euclidean yang ternormalisasi paling jauh. Jarak minimum Euclidean didapatkan menggunakan (5) [18].

$$d_{min} = \min \{|x_i - x_i|, i \neq i'\} \quad (5)$$

dengan x_i adalah superposisi elemen *codeword* pada sumber daya k yang menghasilkan M^{df} dari titik konstelasi $1 \leq i \leq M^{df}$ dengan m_{df} bernilai 1, 2, ..., df menggunakan (6) [19].

$$x_i = x_{m_1}^{(K)} + x_{m_2}^{(K)} + \dots + x_{m_{df}}^{(K)} \quad (6)$$

Codebook di SCMA dioptimalkan supaya lapisan yang saling bertumpuk pada *resource element* dapat dibedakan, sehingga mempermudah proses *decoding*.

Perancangan konstelasi sulit dilakukan karena banyak lapisan bertabrakan dengan *resource element*. Jarak minimum Euclidean yang optimal dari konstelasi multidimensi akan

menghasilkan kinerja sistem yang baik, terlebih jika jumlah lapisan sedikit dan tanpa tabrakan antarlapisan [20]. Hal ini terjadi karena makin banyak jumlah lapisan yang bertambah, kemungkinan terjadi tabrakan antarlapisan akan meningkat. Oleh karena itu, dibutuhkan rotasi pada konstelasi untuk mengontrol ketergantungan dimensi dan variasi daya dengan tetap mempertahankan jarak Euclidean.

F. PEMBENTUKAN CODEBOOK SCMA

Codebook dibentuk dengan menyesuaikan matriks pemetaan dengan graf faktor serta memilih parameter vektor permutasi dan operator rotasi fase yang dipengaruhi oleh konstelasi multidimensi dan *shaping gain* [21]. Setiap lapisan *codebook* dapat dibangkitkan untuk menentukan nilai konstelasi multidimensi dan nilai operator yang tepat. Operator dapat membuat tingkat daya rata-rata di dimensi konstelasi berbeda-beda, sehingga MPA mudah mendeteksi dan memisahkan simbol yang berinterferensi. Operator dibagi menjadi tiga jenis, yaitu operator *complex conjugate*, operator fase, dan vektor permutasi.

Pengoptimalan *codebook* dilakukan supaya setiap lapisan tidak saling bertumpuk di *resource element* karena dapat dibedakan satu dengan yang lainnya dan mempermudah proses *decoding*. Perancangan desain *codebook* harus dilakukan dengan memperhatikan jarak titik-titik di konstelasi dan energi rata-rata simbol. Energi rata-rata titik di konstelasi dinyatakan dengan (7) [9].

$$E_s = \frac{1}{M^{df}} \sum_{i=1}^{M^{df}} \|x_i\|^2. \quad (7)$$

Pembentukan *codebook* dimulai dengan mengalikan nilai matriks pemetaan, parameter vektor permutasi, dan operator rotasi fase yang disesuaikan dengan kondisi konstelasinya. Lalu, dilakukan operasi permutasi dengan konstelasi multidimensi, sehingga dapat menghasilkan bentuk *codebook*. Proses ini dapat dihitung menggunakan (8) [21].

$$x_j = V_j(\Delta_j) M_C \quad (8)$$

dengan V_j adalah matriks pemetaan; Δ_j dapat terdiri atas tiga jenis, yaitu operator fase, vektor permutasi, dan *complex conjugate*; dan M_C adalah bentuk konstelasi dasar yang dirancang.

Codebook berperan untuk menggantikan skema modulasi dan *signature* pada LDS dengan memiliki sifat *sparse*, sehingga dapat memperoleh kinerja BER yang optimal dengan cara merancang pemetaan simbol dengan tepat. Jarak minimum Euclidean, jumlah tabrakan di titik konstelasi, dan pasangan d_{min} juga memengaruhi kinerja sistem BER yang bergantung pada *codebook*. *Codebook* yang berbeda menggunakan blok sumber daya yang sama dengan *sparse* elemen "nol" di *codeword* dengan cara menurunkan interferensi antar pengguna.

G. PARAMETER SIMULASI

Tabel I menunjukkan parameter yang sudah ditetapkan untuk digunakan dalam pelaksanaan simulasi. Sesuai dengan referensi utama [14], penelitian ini menggunakan pengguna, *resource element*, elemen bukan nol, titik konstelasi, rotasi fase, dan matriks pembangkit yang sama. Modifikasi dilakukan dengan menggunakan konstelasi dasar, rentang nilai SNR, panjang data bit yang berbeda, penambahan nilai pembobotan yang jika dijumlahkan sama dengan 1, dan variasi kanal, sehingga perbedaan yang lebih signifikan dapat terlihat.

Fungsi matriks pembangkit Latin adalah mengoptimalkan struktur *codebook*. Untuk membandingkannya, dibuatlah pembangkit non-Latin untuk sistem SCMA (4, 6).

TABEL I
PARAMETER SIMULASI

Parameter	Simbol	Jumlah/Jenis
Pengguna (lapisan)	J	6
Resource element	K	4
Elemen bukan nol	N	2
Titik konstelasi	M	4
Konstelasi dasar	M_C	Line
Rotasi fase	Δ	$\frac{\pi}{4}$ dan $\frac{\pi}{3}$
Nilai pembobotan	w	$w_1 = 0,6; w_2 = 0,3; \text{ dan } w_3 = 0,1$
Matriks pembangkit	-	Latin dan non-Latin
Signal-to-noise ratio	SNR	0 – 20 dB
Panjang data	-	10^7 bit
Kanal	-	AWGN, Rayleigh, dan Rician

Kanal berfungsi untuk merancang komunikasi nirkabel dan menganalisis kinerja sebuah sistem. Kanal AWGN, pudaran Rayleigh, dan kanal Rician digunakan untuk menganalisis kinerja BER yang berfungsi untuk meningkatkan ketelitian dalam proses simulasi sistem. AWGN adalah derau alami yang ada pada kanal komunikasi yang berfungsi untuk menganalisis kinerja dasar sistem terhadap parameter yang akan diukur. Derau ini berada di sisi penerima dan memiliki sifat-sifat *additive*, putih (*white*), dan Gaussian. Pudaran Rayleigh pada komunikasi nirkabel menggambarkan variasi waktu yang mengubah statistik alami di sisi penerima dan menjelaskan fluktuasi sinyal Rayleigh di fungsi distribusi dari daya terima ternormalisasi. Kanal Rician merupakan kanal pada sisi penerima yang hanya memiliki satu sinyal dominan akibat *line of sight* (LOS). Dalam kanal Rician pada sistem komunikasi terdapat variansi pada kekuatan sinyal, yang terjadi akibat adanya respons (pantulan, *shadowing*, dan *scattering*) dari lingkungan yang berbeda-beda.

H. METODOLOGI

Model sistem SCMA pada penelitian ini melakukan simulasi perancangan dua jenis desain *codebook*, yaitu desain *codebook* terhadap fase dan desain *codebook* pembobotan dengan nilai bobot $w_1 = 0,6; w_2 = 0,3; \text{ dan } w_3 = 0,1$, dengan menggunakan rotasi fase $\frac{\pi}{4}$ dan $\frac{\pi}{3}$, menggunakan pembangkit Latin dan non-Latin [22], konstelasi *line* dengan kanal AWGN, pudaran Rayleigh, dan kanal Rician. Kinerja sistem yang diukur adalah BER.

Perancangan konstelasi *line* dengan titik konstelasi $[-\frac{3}{\sqrt{5}}, -\frac{1}{\sqrt{5}}, \frac{1}{\sqrt{5}}, \frac{3}{\sqrt{5}}]$ dilakukan dengan simulasi menggunakan rotasi fase $\Delta = \frac{\pi}{4}$ dan $\Delta = \frac{\pi}{3}$. Selain itu, dilakukan penambahan nilai bobot pada desain *codebook* dengan nilai $w_1 = 0,6; w_2 = 0,3; \text{ dan } w_3 = 0,1$ pada rotasi fase $\Delta = \frac{\pi}{4}$ dan $\Delta = \frac{\pi}{3}$.

Proses simulasi sistem SCMA dilakukan menggunakan empat skema matriks pemetaan, yaitu pada skema pertama adalah matriks pembangkit Latin yang memiliki fase berbeda pada baris ataupun kolom dan matriks pembangkit Latin yang diberi nilai bobot tidak seragam; serta matriks pembangkit non-Latin yang memiliki nilai fase sama pada baris atau kolom yang lainnya dan matriks pembangkit non-Latin yang diberi nilai bobot tidak seragam. Berikut matriks Latin yang digunakan.

$$G_{(4 \times 6)}^{Lat} = \begin{bmatrix} \varphi_0 & \varphi_1 & \varphi_2 & 0 & 0 & 0 \\ \varphi_1 & 0 & 0 & \varphi_2 & \varphi_0 & 0 \\ 0 & \varphi_2 & 0 & \varphi_0 & 0 & \varphi_1 \\ 0 & 0 & \varphi_0 & 0 & \varphi_1 & \varphi_2 \end{bmatrix}$$

Nilai pembobotan desain *codebook* pada matriks pembangkit Latin dengan pembobotan desain *codebook* tidak seragam adalah $w_1 = 0,6; w_2 = 0,3; \text{ dan } w_3 = 0,1$.

$$G_{(4 \times 6)}^{PLat} = \begin{bmatrix} w_1 \cdot \varphi_0 & w_2 \cdot \varphi_1 & w_3 \cdot \varphi_2 & 0 & 0 & 0 \\ w_1 \cdot \varphi_1 & 0 & 0 & w_1 \cdot \varphi_2 & w_2 \cdot \varphi_0 & 0 \\ 0 & w_2 \cdot \varphi_2 & 0 & w_1 \cdot \varphi_0 & 0 & w_3 \cdot \varphi_1 \\ 0 & 0 & w_3 \cdot \varphi_0 & 0 & w_2 \cdot \varphi_1 & w_3 \cdot \varphi_2 \end{bmatrix}$$

Skema ketiga, yaitu matriks pembangkit dengan non-Latin, memiliki sifat berkebalikan dengan matriks pembangkit Latin. Berikut matriks non-Latin yang digunakan.

$$G_{(4 \times 6)}^{NLat} = \begin{bmatrix} \varphi_0 & \varphi_1 & \varphi_2 & 0 & 0 & 0 \\ \varphi_0 & 0 & 0 & \varphi_2 & \varphi_1 & 0 \\ 0 & \varphi_1 & 0 & \varphi_2 & 0 & \varphi_0 \\ 0 & 0 & \varphi_2 & 0 & \varphi_1 & \varphi_0 \end{bmatrix}$$

Nilai pembobotan desain *codebook* pada matriks pemetaan non-Latin dengan pembobotan desain *codebook* tidak seragam adalah $w_1 = 0,6; w_2 = 0,3; w_3 = 0,1$.

$$G_{(4 \times 6)}^{PNLat} = \begin{bmatrix} w_1 \cdot \varphi_0 & w_2 \cdot \varphi_1 & w_3 \cdot \varphi_2 & 0 & 0 & 0 \\ w_1 \cdot \varphi_0 & 0 & 0 & w_1 \cdot \varphi_2 & w_2 \cdot \varphi_1 & 0 \\ 0 & w_2 \cdot \varphi_1 & 0 & w_1 \cdot \varphi_2 & 0 & w_3 \cdot \varphi_0 \\ 0 & 0 & w_3 \cdot \varphi_2 & 0 & w_2 \cdot \varphi_1 & w_3 \cdot \varphi_0 \end{bmatrix}$$

dengan φ_α adalah faktor operasi rotasi fase dengan bentuk sistematis seperti pada (9) [23].

$$\varphi_\alpha = e^{i \cdot \alpha \cdot \theta} \quad (9)$$

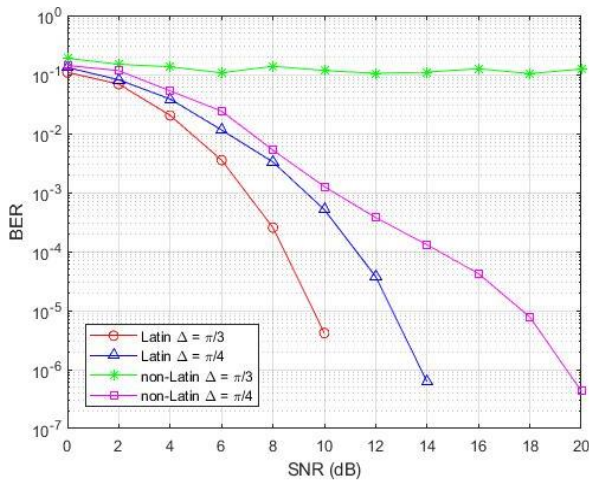
dengan α merupakan bilangan integer yang memenuhi $0 \leq \alpha \leq d_f - 1$. Dengan nilai $d_f = 3$, terdapat $\alpha = 0, \alpha = 1, \text{ dan } \alpha = 2$. Parameter θ adalah interval dari dua titik konstelasi yang berdekatan. Pada penelitian ini, digunakan nilai $\Delta = \frac{\pi}{4}$ dan $\Delta = \frac{\pi}{3}$.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

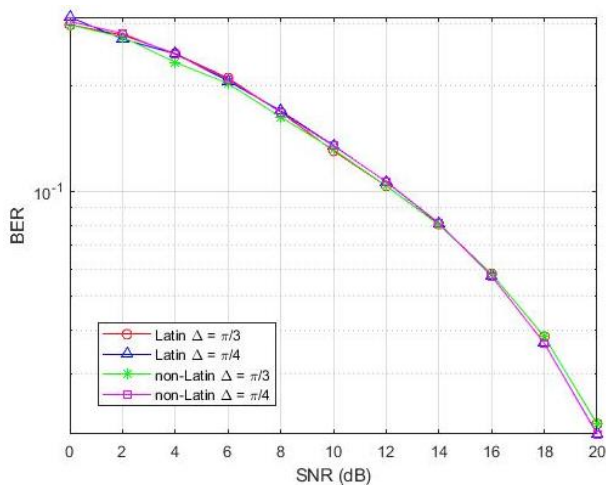
Dari simulasi yang dilakukan, diperoleh hasil perancangan *codebook* berupa nilai BER. Penelitian ini melakukan simulasi pada enam pengguna yang disebar pada empat *resource element*. Pada simulasi yang dilakukan, masing-masing pengguna membentuk enam matriks *codebook* berukuran 4×4 , yaitu dalam satu matriks *codebook* akan dibangkitkan dua sumber daya pada masing-masing matriks *codebook*.

Grafik pada Gambar 2 menunjukkan kinerja BER menggunakan konstelasi dasar *line* pada kanal AWGN. Hasil menunjukkan bahwa kinerja sistem optimal dengan rotasi fase $\frac{\pi}{3}$ menggunakan pembangkit Latin, sedangkan rotasi fase $\frac{\pi}{4}$ menggunakan pembangkit non-Latin. Latin $\frac{\pi}{3}$ menghasilkan nilai SNR 6,96 dB dan non-Latin $\frac{\pi}{4}$ menghasilkan SNR 10,38 dB pada BER 10^{-3} .

Grafik tersebut menunjukkan bahwa pembangkit Latin dapat meningkatkan kinerja sistem pada kanal AWGN dengan menghilangkan galat yang terjadi di *codebook* SCMA. Oleh karena itu, sistem ini dapat menekan tumpang tindih pada titik konstelasi utama di fase $\frac{\pi}{3}$ yang paling optimal. Hasil non-Latin



Gambar 2. Grafik kinerja BER dengan konstelasi dasar *line* pada kanal AWGN.



Gambar 3. Grafik kinerja BER dengan konstelasi dasar *line* pada kanal AWGN dengan penambahan pembobotan.

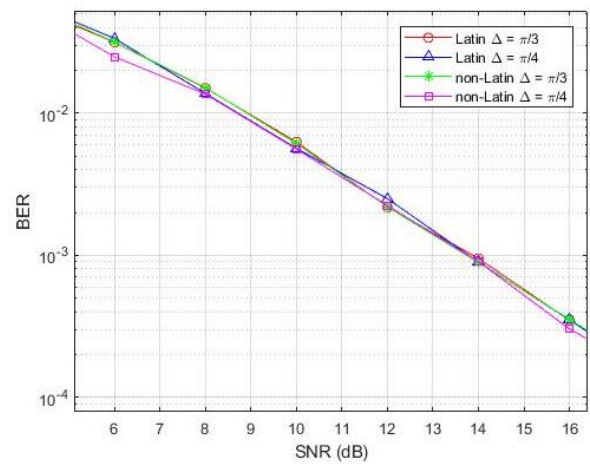
$\frac{\pi}{3}$ menunjukkan kinerja sistem yang lebih buruk dibandingkan lainnya. Hal tersebut terjadi karena nilai probabilitas galat deteksi simbol lebih besar dan nilai minimum Euclidean yang diperoleh lebih kecil.

Grafik pada Gambar 3 adalah kinerja BER pada kanal AWGN dengan penambahan bobot. Kinerja sistem optimal di rotasi fase $\frac{\pi}{3}$ pada Latin dan non-Latin. Pada BER 10^{-1} di pembangkit Latin, dihasilkan nilai SNR 12,26 dB dan pada pembangkit non-Latin dihasilkan SNR 12,28 dB.

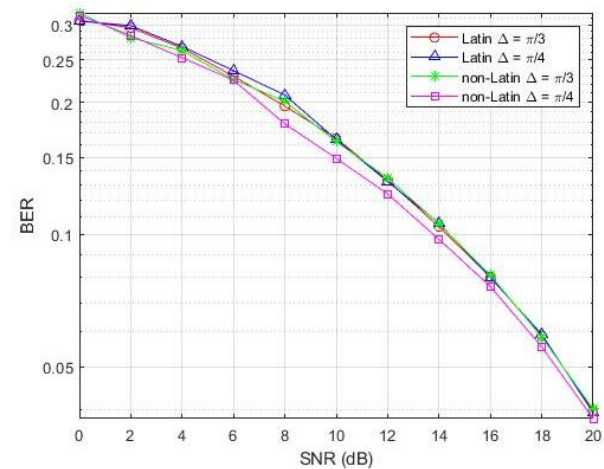
Pengaruh penambahan bobot pada kanal AWGN ini mengubah hasil BER dari 10^{-3} menjadi 10^{-1} dan menghasilkan gambar kurva antarsistem yang tidak mengalami perubahan signifikan. Hal ini terjadi karena nilai d_{min} yang dihasilkan lebih kecil dan menghasilkan probabilitas galat deteksi simbol lebih banyak.

Gambar 4 menunjukkan kinerja BER pada pudaran Rayleigh. Hasil menunjukkan bahwa kinerja sistem optimal dengan rotasi fase $\frac{\pi}{4}$ menggunakan pembangkit Latin dan non-Latin. BER 10^{-3} di rotasi fase $\frac{\pi}{4}$ menghasilkan nilai SNR 13,78 dB pada pembangkit Latin dan SNR 13,73 dB pada pembangkit non-Latin.

Pembangkit Latin tidak bekerja di pudaran Rayleigh dan hasil sistem yang paling optimal berbanding terbalik dengan hasil di kanal AWGN. Hal tersebut terjadi karena pudaran Rayleigh mengganggu kondisi sinyal yang dikirim. Oleh



Gambar 4. Grafik kinerja BER dengan konstelasi dasar *line* pada pudaran Rayleigh.



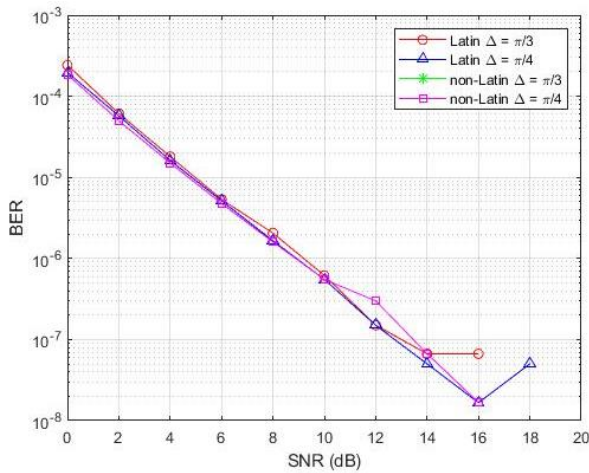
Gambar 5. Grafik kinerja BER dengan konstelasi dasar *line* pada pudaran Rayleigh dengan penambahan bobot.

karena itu, hasil sistem yang dihasilkan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan antara sistem-sistem yang diuji.

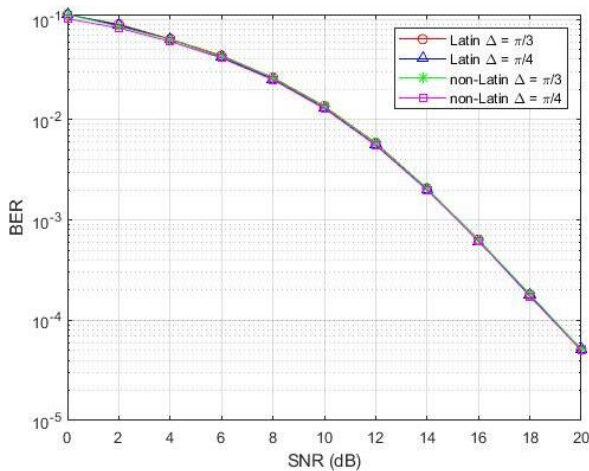
Gambar 5 menunjukkan kinerja BER pada pudaran Rayleigh dengan penambahan bobot. Hasil menunjukkan bahwa kinerja sistem optimal dengan rotasi fase $\frac{\pi}{3}$ menggunakan pembangkit Latin, sedangkan rotasi fase $\frac{\pi}{4}$ menggunakan pembangkit non-Latin. Pada BER 10^{-1} dihasilkan nilai SNR 13,8 dB pada rotasi fase $\frac{\pi}{3}$ pembangkit Latin dan SNR 14,3 dB pada rotasi fase $\frac{\pi}{4}$ pembangkit non-Latin. Penambahan bobot pada pudaran Rayleigh ini mengubah hasil BER 10^{-3} menjadi 10^{-1} dan mengubah hasil data yang optimal di pembangkit Latin dari $\frac{\pi}{4}$ menjadi Latin $\frac{\pi}{3}$.

Pada Gambar 6 tampak kinerja BER menggunakan konstelasi dasar *line* pada kanal Rician. Kinerja sistem optimal ditunjukkan oleh rotasi fase $\frac{\pi}{4}$ pada pembangkit Latin dan non-Latin. BER 10^{-6} di rotasi fase $\frac{\pi}{4}$ menghasilkan nilai SNR 8,91 dB pada pembangkit Latin dan SNR 8,88 dB di pembangkit non-Latin. Pada kanal Rician, non-Latin $\frac{\pi}{4}$ tidak menghasilkan nilai BER. Hasil di kanal Rician ini tidak memperlihatkan perbedaan signifikan antara sistem-sistem karena sinyal yang dikirim terganggu.

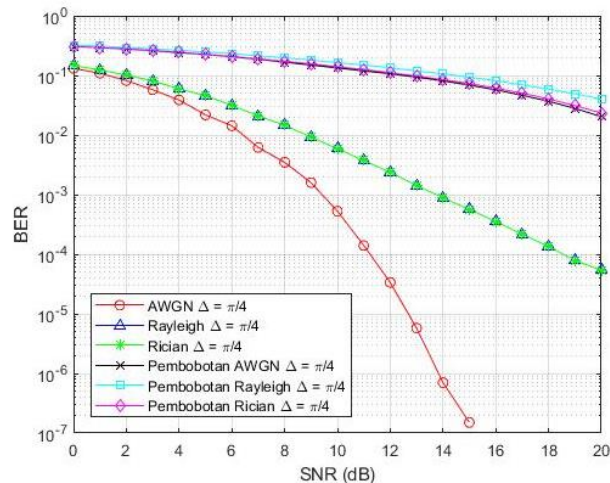
Gambar 7 menunjukkan kinerja BER menggunakan konstelasi dasar *line* pada kanal Rician dengan penambahan bobot. Kinerja sistem optimal ditunjukkan oleh rotasi fase



Gambar 6. Grafik kinerja BER dengan konstelasi dasar line pada kanal Rician.



Gambar 7. Grafik kinerja BER dengan konstelasi dasar line pada kanal Rician dengan penambahan bobot.



Gambar 8. Grafik kinerja BER dengan perbandingan fase dan pembobotan pada ketiga kanal.

$\frac{\pi}{4}$ menggunakan pembangkit Latin dan non-Latin. BER 10^{-3} di rotasi fase $\frac{\pi}{4}$ menghasilkan nilai SNR 15,15 dB pada pembangkit Latin dan SNR 15,2 dB di pembangkit non-Latin. Pengaruh penambahan bobot pada kanal Rician ini mengubah hasil BER dari 10^{-6} menjadi 10^{-3} dan mengubah pembangkit yang optimal dari non-Latin $\frac{\pi}{4}$ menjadi Latin $\frac{\pi}{4}$.

Gambar 8 memperlihatkan perbandingan fase dan pembobotan pada kanal AWGN, pudaran Rayleigh, dan kanal

Rician. Hasil optimal terjadi di kanal AWGN dengan nilai BER 10^{-3} pada SNR 9,42 dB, sedangkan pada kanal Rician dan pudaran Rayleigh tidak terlihat adanya perbedaan, dengan BER 10^{-3} pada SNR 12,81 dB dan 14,47 dB, secara berurutan.

Berdasarkan data yang diperoleh, pembobotan ini paling memengaruhi sistem di kanal AWGN, dengan menghasilkan nilai BER sebesar 10^{-1} pada SNR 12,48 dB. Lalu, yang kedua adalah kanal Rician, dengan BER sebesar 10^{-1} pada SNR 12,81 dB. Hasil ketiga adalah pudaran Rayleigh, dengan nilai BER 10^{-1} pada SNR 14,47 dB.

IV. KESIMPULAN

Perancangan desain *codebook* yang sesuai adalah faktor utama yang menentukan kinerja sistem SCMA. Konstelasi dasar, variasi rotasi fase, dan variasi matriks pembangkit diperlukan untuk sistem SCMA. Jarak minimum Euclidean yang optimal di konstelasi dapat meningkatkan kinerja BER, sedangkan rotasi fase dapat memengaruhi variasi daya dengan mempertahankan jarak minimum Euclidean.

Hasil desain *codebook* yang optimal terjadi di non-Latin $\frac{\pi}{4}$ kanal Rician dengan BER 10^{-6} dan SNR 8,88 dB, dengan jarak minimum Euclidean 0,3423. Sementara itu, desain *codebook* dengan pembobotan yang terjadi di kanal Rician memiliki nilai BER 10^{-3} dan SNR 15,15 dB di Latin $\frac{\pi}{4}$ dengan jarak minimum Euclidean 0,0894. Dari kedua pembangkit tersebut, yang dapat meningkatkan kinerja sistem adalah pembangkit Latin.

Dari perbandingan fase pada ketiga kanal, diperoleh hasil yang optimal di kanal AWGN dengan nilai BER 10^{-3} pada SNR 9,42 dB. Sementara itu, pada kanal Rician dan pudaran Rayleigh tidak terlihat adanya perbedaan yang signifikan.

Pengaruh pembobotan pada konstelasi modulasi *line* membuat jarak minimum Euclidean dan energi rata-rata titik lebih rendah, sedangkan pengaruh pada jarak minimum Euclidean dan energi rata-rata titik membuat jaraknya berdekatan dan hasil nilai untuk kedua fasenya sama. Pembobotan ini paling berpengaruh di kanal AWGN dengan menghasilkan nilai BER sebesar 10^{-1} dan SNR 12,48 dB.

Pada penelitian ini tidak terlihat adanya perubahan yang signifikan antarsistem, terutama pada desain *codebook* dengan penambahan bobot. Oleh karena itu, untuk penelitian selanjutnya disarankan ditambahkan lebih banyak variasi nilai pembobotan, jenis modulasi, nilai rotasi fase, dan konstelasi modulasi.

KONFLIK KEPENTINGAN

Tidak terdapat konflik kepentingan dalam penulisan makalah ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Linda Meylani; metodologi, Linda Meylani; perangkat lunak, Shilvy Fatma; validasi, Vinsensius Sigit; analisis formal, Shilvy Fatma, Linda Meylani; sumber daya, Linda Meylani; penulisan—penyusunan draf asli, Shilvy Fatma; penulisan—peninjauan, Vinsensius Sigit.

REFERENSI

- [1] S. Khan dkk., "Highly accurate and reliable wireless network slicing in 5th generation networks: A hybrid deep learning approach," *J. Netw. Syst. Manag.*, vol. 30, no. 2, hal. 1-22, Jan. 2022, doi: 10.1007/s10922-021-09636-2.
- [2] A.E. Grant dan J. Meadows, Eds., *Communication Technology Update and Fundamentals*, 17th ed., New York, NY, AS: Routledge, 2020.

- [3] B. Clerckx dkk., "A primer on rate-splitting multiple access: Tutorial, myths, and frequently asked questions," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 41, no. 5, hal. 1265-1308, Mei 2023, doi: 10.1109/JSAC.2023.3242718.
- [4] L. Zhu, Z. Xiao, X.-G. Xia, dan D.O. Wu, "Millimeter-wave communications with non-orthogonal multiple access for B5G/6G," *IEEE Access*, vol. 7, hal. 116123-116132, Agu. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935169.
- [5] C.B. Mwakwata dkk., "Cooperative scheduler to enhance massive connectivity in 5G and beyond by minimizing interference in OMA and NOMA," *IEEE Syst. J.*, vol. 16, no. 3, hal. 5044-5055, Sep. 2022, doi: 10.1109/JSYST.2021.3114338.
- [6] M. Ligwa dan V. Balyan, "A comprehensive survey of NOMA-based cooperative communication studies for 5G implementation," dalam *Expert Clouds and Applications*, I.J. Jacob, F.M. Gonzalez-Longatt, S.K. Shanmugam, I. Izonin, Eds., Singapura, Singapura: Springer, 2021, hal. 619-629, doi: 10.1007/978-981-16-2126-0_49.
- [7] M. Hassan, M. Singh, dan K. Hamid, "BER performance of NOMA downlink for AWGN and Rayleigh fading channels in (SIC)," *EAI Endorsed Trans. Mobile Commun. Appl.*, vol. 7, no. 21, hal. 1-7, Jun. 2022, doi: 10.4108/eai.20-6-2022.174227.
- [8] H. Nikopour dan H. Baligh, "Sparse code multiple access," *2013 IEEE 24th Annu. Int. Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, 2013, hal. 332-336, doi: 10.1109/PIMRC.2013.6666156.
- [9] A. Sultana dkk., "Efficient resource allocation in SCMA-enabled device-to-device communication for 5G networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 5, hal. 5343-5354, Mei 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.2983569.
- [10] W.B. Ameer dkk., "Performance study of MPA, Log-MPA and MAX-Log-MPA for an uplink SCMA scenario," *2019 26th Int. Conf. Telecommun. (ICT)*, 2019, hal. 411-416, doi: 10.1109/ICT.2019.8798841.
- [11] X. Zhang dkk., "An efficient SCMA codebook design based on lattice theory for information-centric IoT," *IEEE Access*, vol. 7, hal. 133865-133875, Agu. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2938637.
- [12] K. Hassan, K. Raouf, dan P. Chargé, "Multi-dimensional codebooks for multiple access schemes," dalam *Coding Theory Essent*, D. Harkut, K.N. Kasat, Eds., London, Inggris: IntechOpen, 2023, doi: 10.5772/intechopen.110032.
- [13] Y. Zhou, Q. Yu, W. Meng, dan C. Li, "SCMA codebook design based on constellation rotation," *2017 IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, 2017, hal. 1-6, doi: 10.1109/ICC.2017.7996395.
- [14] R. Hoshyar, F.P. Wathan, dan R. Tafazolli, "Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 4, hal. 1616-1626, Apr. 2008, doi: 10.1109/TSP.2007.909320.
- [15] M. Kulhandjian, H. Kulhandjian, C. D'amours, dan L. Hanzo, "Low-density spreading codes for NOMA systems and a Gaussian separability-based design," *IEEE Access*, vol. 9, hal. 33963-33993, Feb. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060879.
- [16] M. Jia, S. Meng, Q. Guo, dan X. Gu, "Design of codebook for high overload SCMA," dalam *Communications, Signal Processing, and Systems – CSPS 2019*, Q. Liang, W. Wang, X. Liu, Z. Na, M. Jia, B. Zhang, Eds., Singapura, Singapura: Springer, 2020, hal. 2654-2662, doi:10.1007/978-981-13-9409-6_324.
- [17] R. Thirunavukkarasu, R. Balasubramanian, dan V. Bhaskar, "An optimum probabilistic shaping based uplink SCMA codebook design using hybrid firefly-bat algorithm," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 130, no. 1, hal. 527-549, Mei 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10297-4.
- [18] Y.M. Tabra dan B.M. Sabbar, "New computer generated-SCMA codebook with maximized Euclidian distance for 5G," *Iraqi J. Inf. Commun. Technol. (IJICT)*, vol. 2, no. 2, hal. 9-24, Jun. 2019, doi: 10.31987/ijict.2.2.64.
- [19] D.A. Pokamestov, Y.V. Kryukov, E.V. Rogozhnikov, dan I. Kanatbekuli, "Adapting SCMA codebooks to channel state," *2021 3rd Int. Youth Conf. Radio Electron. Electr. Power Eng. (REEPE)*, 2021, hal. 1-4, doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9388063.
- [20] Q. Luo dkk., "A design of low-projection SCMA codebooks for ultra-low decoding complexity in downlink IoT networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 10, hal. 6608-6623, Okt. 2023, doi: 10.1109/TWC.2023.3244868.
- [21] M. Rebhi, K. Hassan, K. Raouf, dan P. Chargé, "Sparse code multiple access: Potentials and challenges," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, hal. 1205-1238, Mei 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3081166.
- [22] Z. Qin, Y. Su, R. Liu, dan C. Liu, "Codebook optimization design of serial encoding SCMA system," *2022 Int. Symp. Netw. Comput. Commun. (ISNCC)*, 2022, hal. 1-4, doi: 10.1109/ISNCC55209.2022.9851751.
- [23] Z. Hou, Z. Xiang, P. Ren, dan B. Cao, "SCMA codebook design based on decomposition of the superposed constellation for AWGN channel," *Electron.*, vol. 10, no. 17, hal. 1-10, Agu. 2021, doi: 10.3390/electronics10172112.