

PENINGKATAN KINERJA *FUTURE RAILWAY MOBILE COMMUNICATION SYSTEM* UNTUK KERETA CEPAT INDONESIA DENGAN *SINGLE INPUT MULTIPLE OUTPUT - DOPPLER SPREAD COMPENSATOR*

Nisa Noor Amalia¹, Khoirul Anwar², and Nachwan Mufti Adriansyah³

^{1, 2, 3}The University Center of Excellence for Advanced Intelligent Communications (AICOMS)

^{1, 2, 3}Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹nisanamalia@student.telkomuniversity.ac.id, ²anwarkhoirul@telkomuniversity.ac.id,

³nachwanma@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Future railway mobile communication system (FRMCS) merupakan sistem pensinyalan kereta cepat berbasis *the fifth telecommunication generation new radio (5G NR) third generation partnership project (3GPP) TS 22.289* dan *European telecommunication standard institute (ETSI) TR 103 459*. Pergerakan kereta yang cepat mengakibatkan kerusakan sinyal akibat adanya pergeseran frekuensi yang dirasakan oleh penerima, sehingga mengganggu sistem komunikasi kereta cepat. Untuk mendukung pensinyalan kereta cepat yang baik dan berkapasitas besar, makalah ini mengusulkan *single input multiple output (SIMO)* dengan *Doppler spread compensator (DSC)* untuk memanfaatkan *space diversity* kanal antara *transmitter* dan *receiver* yang terletak di atas gerbong kereta. SIMO-DSC yang diusulkan memiliki dua antena array paralel yang berjarak $5\lambda = 1.6$ m di atas gerbong kereta. Evaluasi SIMO-DSC yang diusulkan dilakukan dengan rangkaian simulasi komputer untuk kinerja *bit error rate (BER)* terhadap *signal to noise power ratio (SNR)*, *frame error rate (FER)* terhadap SNR, dan BER terhadap *normalized Doppler spread ($f_d T_s$)* pada model kanal kereta Indonesia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SIMO-DSC mampu menghilangkan Efek Doppler secara signifikan, dan meningkatkan performansi FRMCS meskipun pada kecepatan 1000 km/jam.

Kata Kunci: DSC, Efek Doppler, SIMO

Abstract

Future railway mobile communication system (FRMCS) is a high-speed train signaling system based on the *fifth telecommunication generation new radio (5G NR) of the third generation partnership project (3GPP) TS 22.289* and *European telecommunication standard institute (ETSI) TR 103 459*. The high-speed movement of the train causes signal distortion due to the frequency shift experienced by the receiver, that reduce the performance of high-speed train communication systems. To support high quality and capacity train signalling, this paper proposes a *single input multiple output (SIMO)* system with *Doppler spread compensator (DSC)* to utilize *space diversity* of the channel between *transmitter* and *receiver* located on the train. The proposed SIMO-DSC consist of two parallel array antenna separated by a distance of $5\lambda = 1.6$ m located on the top of the train. We evaluated the proposed SIMO-DSC using a series of computer simulations in terms of the *bit error rate (BER)*, *frame error rate (FER)* and BER to *normalized Doppler spread ($f_d T_s$)* under the Indonesian railway channel model. The results confirmed that the proposed SIMO-DSC can significantly eliminate the Doppler effect and improve the performance of the FRMCS system even at speed of 1000 km/h.

Key Words: DSC, Doppler effect, SIMO

1. Pendahuluan

Kereta cepat adalah kereta yang memiliki kecepatan 500 km/h. Saat ini, kereta cepat menggunakan pensinyalan *global system for mobile communication* –

railway (GSM-R), namun dalam waktu dekat akan digantikan oleh *future railway mobile communication system (FRMCS)*, estimasi pada tahun 2030 [1]. FRMCS merupakan sistem pensinyalan kereta cepat berbasis *the*

fifth generation new radio (5G NR) yang mendukung kereta cepat dengan kecepatan 500 km/h. FRMCS memiliki spektrum frekuensi 891 MHz sampai dengan 895 MHz untuk *uplink*, dan 936 MHz sampai 940 MHz untuk *downlink* [2].

Pergerakan kereta yang cepat akan mempengaruhi kinerja sistem komunikasi akibat adanya pergeseran Doppler [3]. Pergeseran Doppler adalah perubahan frekuensi terhadap penerima yang bergerak dengan kecepatan relatif terhadap sumber yang biasa disebut dengan Efek Doppler [4]. Efek Doppler mengakibatkan *error-floor* pada bit yang diterima. *Error-floor* adalah *error* yang tidak turun meskipun *noise* kecil. Besarnya efek Doppler dipengaruhi oleh kecepatan kereta [5].

Doppler spread compensator (DSC) dapat menghilangkan efek pergeseran Doppler dengan menggunakan antena array [6][7]. Pergeseran Doppler menyebabkan bit yang diterima hilang. DSC dengan metode interpolasi mengembalikan sampel yang hilang akibat pergeseran Doppler.

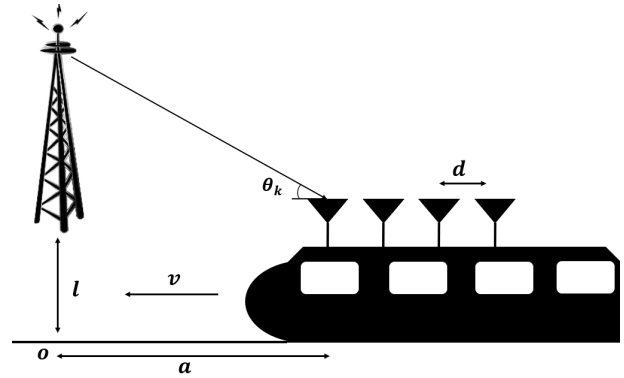
Sistem komunikasi kereta cepat memerlukan kinerja dan kualitas sinyal yang sangat baik [8]. Oleh karena itu, perlu ditambahkan *single input multiple output* (SIMO) dengan DSC. Sistem antena dengan metode *spatial diversity*, yaitu *receive diversity* dapat meningkatkan kinerja dan kualitas sinyal pada sistem komunikasi nirkabel [9]. Makalah ini menggunakan skema *maximal ratio receive combining* (MRRC).

Makalah ini mengusulkan SIMO-DSC untuk kereta cepat Indonesia yang mampu menghilangkan efek Doppler dan meningkatkan kinerja FRMCS. Evaluasi kinerja FRMCS dilakukan dengan menghitung *bit error rate* (BER) terhadap *signal to noise power ratio* (SNR), *frame error rate* (FER) terhadap SNR, dan BER terhadap *normalized Doppler spread* ($f_d T_s$) pada model kanal Indonesia [10]. BER didefinisikan dengan jumlah bit *error* akibat gangguan transmisi sinyal data dibagi dengan total jumlah bit yang ditransmisikan selama proses berlangsung. FER didefinisikan dengan jumlah *frame* yang *error* dibagi dengan total jumlah *frame* yang ditransmisikan. SNR adalah rasio antara daya sinyal yang diterima terhadap daya *noise* di penerima. Seluruh evaluasi kinerja dilakukan dengan serangkaian simulasi komputer.

2. Dasar Teori

2.1 Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)

FRMCS adalah pensinyalan kereta cepat masa depan berbasis 5G NR. FRMCS memiliki spektrum frekuensi yang sama dengan GSM-R, yaitu 891–895 MHz untuk *uplink* dan 936–940 MHz untuk *downlink*. FRMCS memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menyediakan komunikasi dibandingkan GSM-R, diantaranya peningkatan keandalan komunikasi,



Gambar 1. Sistem antena untuk kereta cepat.

latensi data rendah, kecepatan data yang tinggi, dan komunikasi multimedia yang lebih baik [11].

2.2 Efek Doppler

Pergerakan kereta yang sangat cepat mempengaruhi kinerja sistem komunikasi akibat efek Doppler. Efek Doppler terjadi ketika frekuensi yang diterima oleh penerima mengalami perubahan karena perubahan posisi penerima terhadap pemancar. Efek Doppler menyebabkan sinyal yang diterima tidak sempurna karena kanal berubah dengan cepat dalam setiap rentang blok transmisi.

Gambar 1 menampilkan sistem antena untuk kereta cepat, dengan l adalah jarak antara *base transceiver station* (BTS) dan rel, a adalah jarak antara titik O dan antena kereta cepat elemen pertama, dan d adalah jarak antar elemen antena array [12]. Pergeseran Doppler tiap antena dihitung dengan

$$f_d(t) = \frac{f_c \cdot v}{c} \cdot \cos \theta_k(t), \quad (1)$$

$\cos \theta_k(t)$ dinyatakan dengan

$$\cos \theta_k(t) = \frac{a + kd - vt}{\sqrt{(a + kd - vt)^2 + l^2}}, \quad k = 0 - P, \quad (2)$$

dengan f_c adalah frekuensi tengah dalam Hz, v adalah kecepatan kereta dalam m/s, c adalah kecepatan cahaya dalam m/s, θ_k adalah sudut antara pemancar dan penerima, k adalah indeks antena, dan P adalah total elemen antena.

2.3 SISO, MISO, SIMO

Efek Doppler dapat diatasi dengan menggunakan *Doppler spread compensator* (DSC). Makalah ini mengembangkannya pada *multiple input single output* (MISO), dan *single input multiple output* (SIMO) yang sebelumnya telah dilakukan pada *single input single output* (SISO) pada [7].

SISO adalah sistem komunikasi yang terdiri atas sebuah antena pada *transmitter* dan *receiver*. SISO

memiliki struktur yang sederhana yang sinyal terimanya dapat dinyatakan dengan

$$y = hs + n, \quad (3)$$

dengan s adalah simbol yang ditransmisikan, dan n adalah noise.

MISO memiliki M_t antena pada transmitter dan sebuah antena pada receiver. MISO menggunakan sistem transmit diversity dengan mengirimkan dua simbol dari antena yang berbeda pada dua periode waktu yang berbeda. Sinyal terima dapat dinyatakan dengan (4) dan (5):

$$y^1 = h_{11}s_1 + h_{21}s_2 + n^1, \quad (4)$$

$$y^2 = -h_{11}s_2^* + h_{21}s_1^* + n^2. \quad (5)$$

Sinyal terima y^1 dan y^2 masing-masing diterima oleh receiver saat periode pertama dan periode kedua. Sinyal terima dikodekan oleh MISO decoder, dan dinyatakan dengan (6) dan (7):

$$\hat{s}_1 = h_{11}^*y^1 + h_{21}y^{2*} \quad (6)$$

$$\hat{s}_2 = h_{21}^*y^1 - h_{11}y^{2*}. \quad (7)$$

SIMO merupakan sistem receive diversity dengan sebuah antena pada transmitter dan M_r antena pada receiver. Makalah ini menggunakan SIMO dengan skema maximal ratio receive combining (MRRC) 1×2 [13]. Sinyal terima dapat dinyatakan dengan (8) dan (9):

$$y_1 = h_{11}s + n_1, \quad (8)$$

$$y_2 = h_{12}s + n_2. \quad (9)$$

Sinyal terima y_1 dan y_2 masing-masing diterima oleh antena array 1 dan 2. Sinyal yang diterima kemudian didekodekan oleh SIMO decoder, dan dinyatakan dengan (10):

$$\hat{s} = h_{11}^*y_1 + h_{12}^*y_2. \quad (10)$$

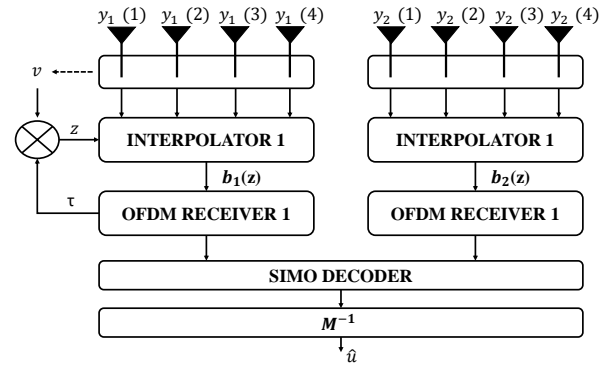
3. Model Sistem dan Perancangan

3.1 Sistem Model SIMO-DSC

Makalah [7] mengusulkan SISO-DSC dengan satu antena array dengan jarak antena array 0.2λ yang diletakkan di atas gerbong kereta. Makalah ini mengusulkan SIMO-DSC yang dapat menghapus efek pergeseran Doppler dan meningkatkan kinerja FRMCS. Makalah ini menggunakan teknik dan penurunan rumus pada [7], dan mengembangkannya pada SIMO, dan MISO untuk kereta cepat. Antena array dengan $P = 4$ elemen antena diletakkan di atas gerbong kereta membentuk dua baris. Gambar 2 menampilkan SIMO-DSC pada sisi penerima. Sinyal yang diterima dinyatakan dengan (11) dan (12):

$$\mathbf{y}_1 = [y_1(1); y_1(2); y_1(3); y_1(4)], \quad (11)$$

$$\mathbf{y}_2 = [y_2(1); y_2(2); y_2(3); y_2(4)]. \quad (12)$$



Gambar 2. SIMO-DSC untuk kereta cepat.

Sinyal terima diproses pada interpolator 1 dan 2.

Weighting vector mengestimasi sinyal yang diterima pada posisi z . Weighting vector dinyatakan dengan (13)

$$\mathbf{m}(z) = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{q}(z), \quad (13)$$

dengan \mathbf{G} adalah matriks korelasi antar elemen antena; $\mathbf{q}(z)$ adalah vektor korelasi silang yang dihitung dengan (14)

$$\mathbf{q}(z) = J_0(2\pi(P \cdot d - z)/\lambda), \quad (14)$$

dengan $J_0(y)$ adalah zero-th order fungsi Bessel jenis pertama, λ adalah panjang gelombang dengan nilai $\lambda = 31.9$ cm, dan P adalah total antena, yaitu $P = 4$. Nilai z dihitung dengan (15)

$$z = v \cdot \tau, \quad (15)$$

dengan v adalah kecepatan kereta dalam m/s, dan τ adalah waktu observasi yang dihitung dengan (16)

$$\tau = \frac{1}{\xi}. \quad (16)$$

Simbol ξ adalah subcarrier spacing, yaitu $\xi = 15$ kHz. Matriks korelasi antar elemen antena dinyatakan dengan (17)

$$\mathbf{G} = J_0(2\pi d(k-4)/\lambda), \quad (17)$$

dengan k adalah indeks antena. Hasil dengan interpolator dinyatakan dengan (18) dan (19)

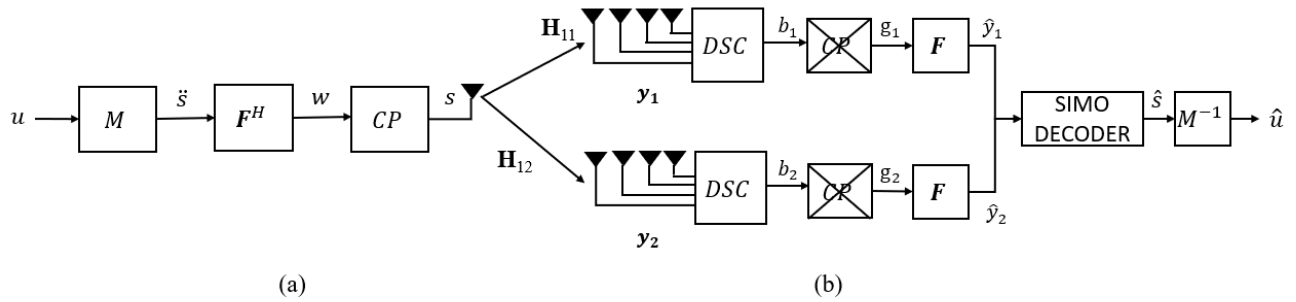
$$b_1(z) = \mathbf{m}^T(z)y_1(k) \quad (18)$$

$$b_2(z) = \mathbf{m}^T(z)y_2(k), \quad (19)$$

dan diteruskan ke OFDM receiver. Sinyal terima dari 2 OFDM receiver didekodekan dengan SIMO decoder.

3.2 Usulan Sistem Komunikasi SIMO-DSC pada Kereta Cepat

Sistem komunikasi SIMO-DSC menggunakan orthogonal frequency division multiplexing (OFDM).



Gambar 3. Struktur: (a) transmitter dan (b) receiver SIMO-DSC pada kereta cepat.

Tabel 1. Parameter sistem FRMCS dengan SIMO-DSC.

Parameter	Nilai Parameter
Modulasi	C-BPSK
Frekuensi tengah	938 MHz
Bandwidth	4 MHz
FFT Size	256 poin
OFDM symbol duration	66.67 μ s
Jarak antena array (d)	6.4 cm
Jarak antara BTS dan rel (ℓ)	100 m
Jarak antara titik O ke elemen pertama antena (a)	100 m
Jarak antena SIMO (d_s)	1.6 m

OFDM dapat menghilangkan *inter-symbol interference* (ISI) dan *inter-carrier interference* (ICI) dengan *inverse fast fourier transform* (IFFT), *fast fourier transform* (FFT), dan *cyclic prefix* (CP) [14]. Gambar 3 menunjukkan sistem komunikasi kereta cepat pada transmitter dan receiver dengan SIMO-DSC.

Pada transmitter, data biner u dikirimkan secara acak dengan probabilitas bit 0 dan 1 yang sama. Pada modulator M , informasi dimodulasi dan dipetakan sehingga menghasilkan simbol \hat{s} . Modulasi yang digunakan ialah *complex binary phase shift keying* (C-BPSK) yang menghasilkan simbol riil dan imajiner (kompleks). C-BPSK adalah modulasi *binary phase shift keying* pada 5G [15]. Pemetaan simbol C-BPSK dinyatakan dengan

$$\hat{s}(i) = \frac{1}{\sqrt{2}}[1 - 2u(i) + \sqrt{-1}(1 - 2u(i))]. \quad (20)$$

Simbol luaran modulator ditransformasikan menggunakan IFFT F^H untuk mengubah simbol dari domain frekuensi menjadi simbol domain waktu, menghasilkan w . Blok CP menambahkan bit akhir simbol w ke bagian awal simbol menjadi simbol s . Simbol s kemudian ditransmisikan melalui kanal, dan

mengalami Efek Doppler.

Makalah ini menggunakan model kanal Indonesia yang telah diteliti pada [10]. Nilai path yang digunakan ialah $h_{ij} = [h_{ij}^0; h_{ij}^1; \dots; h_{ij}^T] = [1; 0.012; 0.077; 0; 0]$ menjadi kanal H_{11} , dan H_{12} yang dinyatakan dengan

$$H_{11} = \begin{bmatrix} h_{11}^0 & 0 & 0 \\ h_{11}^1 & h_{11}^0 & 0 \\ 0 & h_{11}^1 & h_{11}^0 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$H_{12} = \begin{bmatrix} h_{12}^0 & 0 & 0 \\ h_{12}^1 & h_{12}^0 & 0 \\ 0 & h_{12}^1 & h_{12}^0 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

H_{11} adalah kanal antara transmitter 1 dan receiver 1, dan H_{12} adalah kanal antara transmitter 1 dan receiver 2.

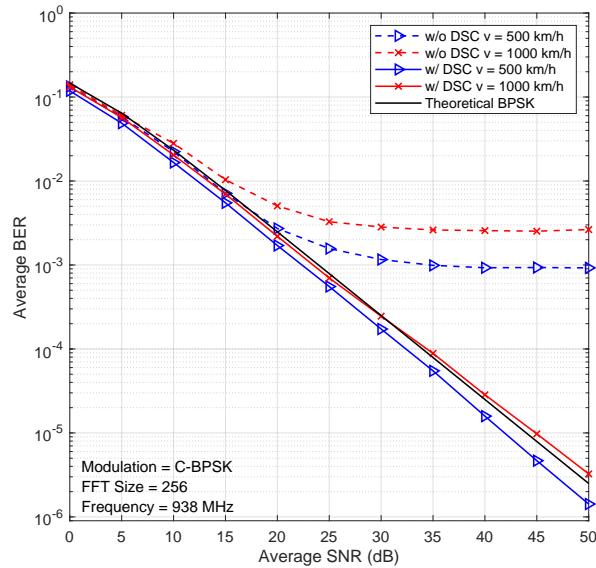
Pada receiver, sinyal terima diproses pada blok DSC untuk memperbaiki kerusakan sinyal akibat efek Doppler, menghasilkan b_1 , dan b_2 . Simbol luaran DSC diproses pada blok CP removal menghasilkan g_1 dan g_2 . Simbol tersebut ditransformasikan kembali dari domain waktu menjadi domain frekuensi dengan FFT F . SIMO decoder mengembalikan simbol asli menghasilkan \hat{s} untuk didemodulasi dengan modulator M^{-1} menghasilkan \hat{u} .

Tabel 1 menunjukkan parameter yang digunakan untuk FRMCS dengan SIMO-DSC. Jarak antar elemen antena array bernilai $d = 0.2\lambda$ berdasarkan [7]. Frekuensi $f_c = 938$ MHz memberikan jarak antena array $d = 6.4$ cm. Jarak antena SIMO $d_s = 5\lambda$ berdasarkan rekomendasi perusahaan elektronik di Inggris (TE Connectivity) merekomendasikan jarak antena SIMO sebesar $4\lambda < d_s < 6\lambda$, dan jika memungkinkan bernilai $5\lambda < d_s < 8\lambda$. Jarak antena SIMO bernilai $d_s = 1.6$ m.

4. Hasil dan Analisis

4.1 Kinerja FRMCS dengan DSC terhadap efek Doppler

Gambar 4 menampilkan kinerja BER FRMCS SISO dengan dan tanpa DSC, kinerja BPSK teori sebagai

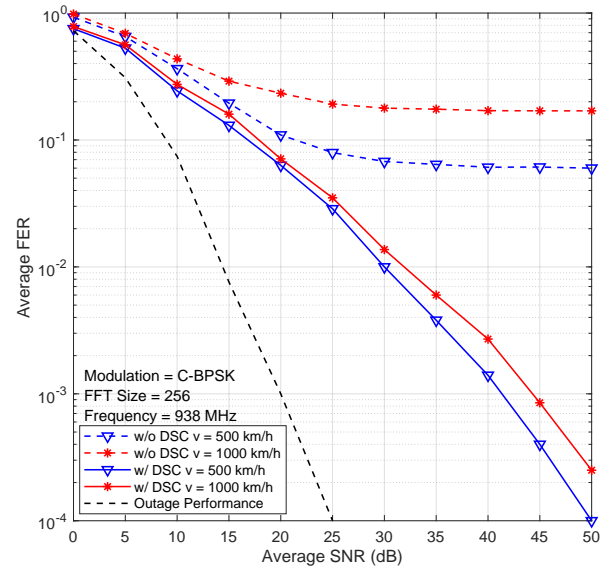


Gambar 4. Kinerja BER FRMCS SISO dengan dan tanpa DSC.

dasar perbandingan. Evaluasi kinerja dilakukan dengan kecepatan berbeda yaitu $v = 500, 1000$ km/jam dalam BER terhadap SNR. BER FRMCS tanpa DSC terjadi *error-floor* pada *average BER* $P_b = 10^{-3}$ hingga $P_b = 2 \times 10^{-3}$ sejak SNR $\gamma = 35$ dB, sedangkan FRMCS dengan DSC menghasilkan BER yang lebih baik yaitu $P_b = 1.5 \times 10^{-5}$ hingga $P_b = 2.8 \times 10^{-5}$ pada SNR $\gamma = 40$ dB dan tidak terjadi *error-floor* pada kecepatan 500 km/jam dan 1000 km/jam.

Kinerja FER FRMCS SISO dengan dan tanpa DSC dengan kecepatan 500 km/h dan 1000 km/h pada kanal FRMCS Indonesia ditampilkan pada Gambar 5. Teori *outage* kanal FRMCS Indonesia dengan *coding rate* $R = 1$ ditampilkan sebagai dasar perbandingan. FER FRMCS tanpa DSC terjadi *error-floor* $P_f = 7 \times 10^{-2}$ hingga $P_f = 1.8 \times 10^{-1}$ sejak SNR $\gamma = 30$ dB. FRMCS dengan DSC memiliki FER yang lebih baik, yaitu $P_f = 3 \times 10^{-3}$ hingga $P_f = 6 \times 10^{-3}$ pada SNR $\gamma = 35$ dB, dan tidak terjadi *error-floor*.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa Efek Doppler menyebabkan perubahan kanal dan terjadi *error-floor*. Besarnya Efek Doppler dipengaruhi oleh kecepatan kereta, semakin besar kecepatan kereta maka Efek Doppler semakin besar dan kinerja BER dan FER semakin buruk. DSC yang diusulkan mampu memperbaiki kinerja BER dan FER FRMCS serta mengkompensasi *error* dan pergeseran Doppler. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada kecepatan $v = 500$ km/h *error-floor* yang terjadi pada *average BER* $P_b = 10^{-3}$ dikompensasi menjadi $P_b = 10^{-5}$ pada kinerja



Gambar 5. Kinerja FER FRMCS SISO dengan dan tanpa DSC.

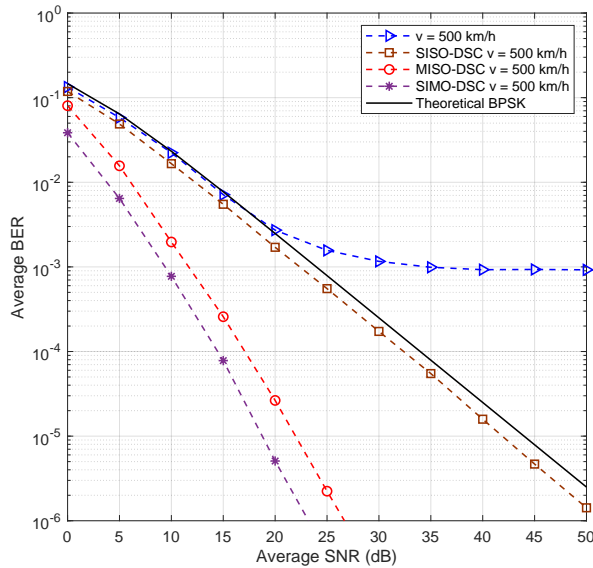
BER FRMCS, dan *error-floor* yang terjadi pada *average FER* $P_f = 7 \times 10^{-2}$ dikompensasi menjadi kurang dari $P_f = 10^{-3}$ pada kinerja FER FRMCS. DSC dengan interpolasi mengembalikan sampel yang hilang akibat Efek Doppler.

4.2 Kinerja FRMCS dengan SIMO-DSC

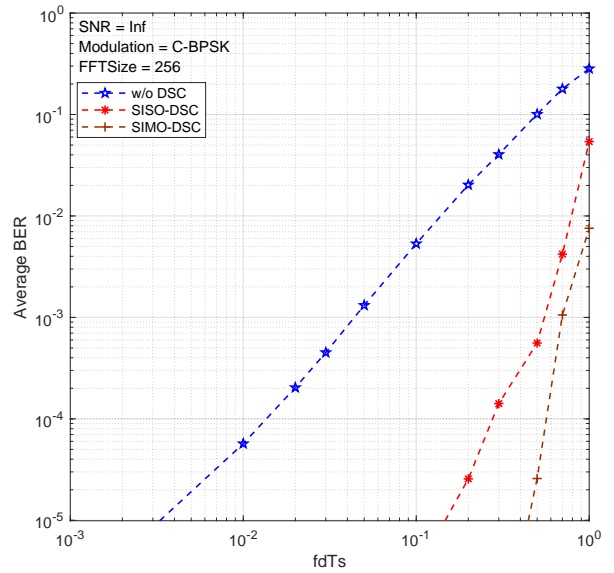
Evaluasi kinerja FRMCS dengan SIMO-DSC dengan menghitung BER dan FER terhadap SNR pada kecepatan kereta $v = 500$ km/jam. Gambar 6 menampilkan kinerja BER FRMCS pada SISO-DSC, MISO-DSC dan SIMO-DSC. SISO-DSC memerlukan SNR $\gamma = 42$ dB, MISO-DSC memerlukan SNR $\gamma = 22$ dB, dan SIMO-DSC yang diusulkan memerlukan SNR $\gamma = 19$ dB untuk mencapai $P_b = 10^{-5}$. Kinerja BPSK Teori sebagai dasar perbandingan.

Kinerja FER FRMCS dengan SISO-DSC, MISO-DSC dan SIMO-DSC ditunjukkan pada Gambar 7. SISO-DSC memerlukan SNR $\gamma = 41$ dB, MISO-DSC memerlukan SNR $\gamma = 22$ dB, dan SIMO-DSC yang diusulkan memerlukan SNR $\gamma = 16$ dB untuk mencapai $P_f = 10^{-3}$. Kinerja *outage* kanal FRMCS Indonesia dengan *coding rate* $R = 1$ sebagai dasar perbandingan.

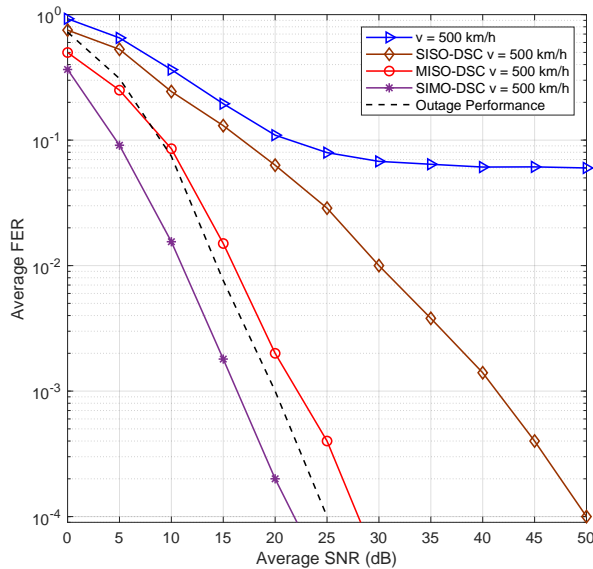
Hasil tersebut menunjukkan bahwa SIMO-DSC dapat meningkatkan kinerja BER dan FER. SIMO-DSC dapat meningkatkan kualitas sinyal terutama dibandingkan SISO-DSC dengan peningkatan SNR $\gamma = 23$ dB untuk mencapai BER $P_b = 10^{-5}$. Bila dibandingkan MISO-DSC terdapat peningkatan SNR



Gambar 6. Kinerja BER FRMCS pada SISO-DSC, MISO-DSC, dan SIMO-DSC.



Gambar 8. Kinerja BER FRMCS dengan SIMO-DSC terhadap *normalized Doppler spread* .



Gambar 7. Kinerja FER FRMCS pada SISO-DSC, MISO-DSC, dan SIMO-DSC.

$\gamma = 3$ dB untuk mencapai BER $P_b = 10^{-5}$. SIMO-DSC memanfaatkan *space-diversity* dengan cara mengirimkan informasi yang sama sehingga diterima oleh dua antena berbeda, sedangkan MISO-DSC memanfaatkan *time-diversity* dengan cara mengirimkan informasi yang sama pada waktu yang berbeda. Kinerja SIMO-DSC

lebih baik daripada MISO-DSC, namun *rate* SIMO-DSC tidak tinggi sebagaimana MISO-DSC. SIMO-DSC memberikan kinerja yang lebih baik, karena *space diversity* yang dipakai selalu memberikan manfaat, yaitu kanal antena 1 dan antena 2 selalu berbeda, tidak tergantung pada kecepatan kereta. MISO-DSC memiliki sedikit kinerja lebih buruk karena *time diversity* tidak selalu memberikan kanal berbeda pada waktu yang berbeda.

4.3 Kinerja FRMCS dengan SIMO-DSC terhadap *normalized Doppler spread*

Gambar 8 menunjukkan evaluasi kinerja BER FRMCS tanpa DSC, dengan SISO-DSC dan SIMO-DSC terhadap $f_d T_s$. Evaluasi kinerja BER dilakukan dengan parameter pada Tabel 1 dan SNR $\gamma = \infty$. Evaluasi kinerja BER dilakukan untuk $f_d T_s$ 10^{-3} hingga 1. Kinerja FRMCS tanpa DSC memiliki BER $P_b = 4 \times 10^{-3}$, SISO-DSC memiliki BER di bawah $P_b = 10^{-5}$, dan SIMO-DSC memiliki kinerja BER yang lebih baik yaitu jauh di bawah 10^{-5} untuk $f_d T_s$ 0.1. SIMO-DSC yang diusulkan mampu meningkatkan kinerja BER. SIMO-DSC yang memberikan kinerja lebih baik daripada MISO-DSC menunjukkan bahwa kanal pada domain *space* lebih banyak memiliki perbedaan daripada kanal dalam domain *time*.

5. Kesimpulan

Makalah ini telah mengusulkan SIMO-DSC untuk meningkatkan kinerja FRMCS kereta cepat Indonesia

sampai kecepatan maksimum 1000 km/h. SIMO-DSC yang diusulkan menggunakan dua antena array paralel berjarak 1.6 m di atas gerbong kereta. Evaluasi kinerja FRMCS dilakukan dengan simulasi komputer untuk kinerja BER, FER, dan $f_d T_s$ dengan kecepatan 500 km/h dan 1000 km/h. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa SIMO-DSC yang diusulkan dapat menghilangkan kerusakan sinyal dan meningkatkan kinerja FRMCS secara signifikan sebesar 3 dB lebih baik dari pada MISO-DSC, dan 23 dB lebih baik dari pada SISO-DSC pada BER $P_b = 10^{-5}$. SIMO-DSC memiliki kinerja lebih baik dari pada MISO-DSC, karena *space diversity* selalu didapatkan, dibandingkan *time diversity* yang tergantung pada kecepatan kereta. Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan penggunaan *channel coding* seperti *Turbo codes*, *Polar codes*, atau *channel coding* lainnya yang sesuai dengan standar FRMCS (jika sudah keluar nanti). Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam perkembangan kereta cepat di Indonesia.

6. Acknowledgment

Penelitian ini didukung oleh BRIN Research Grant on Indonesia High Speed Train, 2021–2022.

Daftar Pustaka

- [1] EIM, "Future Railway Mobile Communication System, EIM Expectation and Key Challenges," Tech. Rep., December 2016.
- [2] ETSI, "GSM-R Networks Evolution," Tech. Rep., February 2017.
- [3] S. H. Takuma Takada, Naoto Lizasa, "Performance Enhancement Technologies in High-speed Moving Mobile Environments in LTE/NR Release 16," *NTT DOCOMO Technical Journal*, vol. 22, January 2021.
- [4] A. Hermanto, "Perhitungan Numerik Efek Doppler dalam Ruang Waktu Schwarzschild dengan Sumber dan Penerima yang Bergerak," *Department of Physics Universitas Gadjah Mada*, vol. Vol 23, No 3 (2019), 2019.
- [5] B. S. Wibawa, N. Azizah, Q. Sholahudin, and M. Yudianto, "Wave Function Analysis of Doppler Effect Using Matlab," *Journal of Computational Physics*, 10 2018.
- [6] S. Hara, A. Nishikawa, and Y. Hara, "A Novel OFDM Adaptive Antenna Array for Delayed Signal and Doppler-shifted Signal Suppression," in *ICC 2001. IEEE International Conference on Communications. Conference Record (Cat. No.01CH37240)*, vol. 7, 2001, pp. 2302–2306 vol.7.
- [7] M. Okada, H. Takayanagi, and H. Yamamoto, "Array Antenna Assisted Doppler Spread Compensator for OFDM," *European Transactions on Telecommunications*, vol. 13, no. 5, pp. 507–512, september-oktober 2002.
- [8] B. Ai, X. Cheng, Z.-D. Z. Thomas Kürner, K. Guan, R.-S. He, L. Xiong, D. W. Matolak, D. G. Michelson, and C. Briso-Rodriguez, "Challenges Toward Wireless Communications for High-Speed Railway," vol. 15, October 2014.
- [9] R. Roy and T. K. Roy, "Performance evaluation of antenna receive diversity in simo-ofdm system over rayleigh fading channel," *Computer Technology and Application*, vol. 4, 01 2013.
- [10] M. Hendra, M. Sambas, and K. Anwar, "Analysis on Doppler Effect for Future Railway Mobile Communications in Indonesia," 2019.
- [11] 3GPP, "Study on Future Railway Mobile Communication System : TR 22.889 V17.4.0," Tech. Rep., March 2021.
- [12] Y. Yang, P. Fan, and Y. Huang, "Doppler Frequency Offsets Estimation and Diversity Reception Scheme of High Speed Railway with Multiple Antennas on Separated Carriages," in *2012 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Oct 2012, pp. 1–6.
- [13] S. M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, 1998.
- [14] A. Katariya, A. Yadav, and N. Jain, "Performance elevation criteria for ofdm under awgn fading channel using ieee 802 . 11 a," 2011.
- [15] 3GPP, "Technical Specification Group Radio Access Network," Tech. Rep., December 2017.