 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

Evaluasi Kinerja OTFS pada Kanal EVA, ETU, dan UAV dengan Variasi Grid Delay Doppler untuk Mobilitas Tinggi

Performance Evaluation of OTFS over EVA, ETU, and UAV Channels with Delay Doppler Grid Variations for High-Mobility Communications

[1]Muhammad Idrus Syaban, [2]Endah Setyowati*
[1,2]Sistem Telekomunikasi, Universitas Pendidikan Indonesia
[1,2]Jl. Dr. Setiabudhi No. 229, Bandung, Jawa Barat 40154
*e-mail: endahsetyowati@upi.edu

(***received***: 11 April 2026, ***revised***: 2 June 2026, ***accepted***: 3 June 2026)

Abstrak

Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) merupakan skema modulasi yang dirancang untuk meningkatkan keandalan komunikasi nirkabel pada lingkungan mobilitas tinggi yang dipengaruhi efek Doppler yang besar. Penelitian ini menganalisis performansi OTFS pada tiga model kanal mobilitas tinggi, yaitu *Extended Vehicular A* (EVA), *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), dan *Extended Typical Urban* (ETU), dengan fokus pada pengaruh ukuran grid *delay–Doppler* terhadap *bit error rate* (BER). Simulasi dilakukan menggunakan modulasi *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) pada frekuensi pembawa 5,9 GHz, kecepatan pengguna hingga 350 km/jam, dan rentang *signal-to-noise ratio* (SNR) 0–20 dB. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan ukuran grid dari 16×16 ke 32×32 menurunkan BER dari orde 10^{-3} menjadi 10^{-4} pada seluruh model kanal. Namun, peningkatan grid di atas 32×32 hanya memberikan perbaikan marginal sehingga menunjukkan adanya saturasi kinerja. Temuan ini menunjukkan bahwa konfigurasi grid 16×16 telah mampu memberikan kinerja yang baik pada lingkungan dengan mobilitas tinggi. Namun, peningkatan ukuran grid menjadi 32×32 menghasilkan performansi yang lebih unggul dengan nilai BER yang lebih rendah, sehingga memberikan keseimbangan yang optimal antara peningkatan kualitas transmisi dan kompleksitas komputasi.

Kata kunci: grid *delay–doppler*, BER, efek doppler, mobilitas tinggi, OTFS

Abstract

Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) is a modulation scheme designed to improve the reliability of wireless communications in high-mobility environments, where transmission performance is significantly affected by Doppler effects. This study evaluates the performance of OTFS over three high-mobility channel models: Extended Vehicular A (EVA), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), and Extended Typical Urban (ETU), with a particular focus on the impact of Delay-Doppler grid size on the bit error rate (BER). Simulations were conducted using Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) modulation with a carrier frequency of 5.9 GHz, user mobility of up to 350 km/h, and a signal-to-noise ratio (SNR) ranging from 0 to 20 dB. The results show that increasing the Delay-Doppler grid size from 16 × 16 to 32 × 32 reduced the BER from the order of 10^{-3} to 10^{-4} across all channel models. However, further increasing the grid size beyond 32 × 32 resulted in only marginal performance improvements, indicating a saturation effect. These findings demonstrate that a 16 × 16 Delay-Doppler grid is sufficient to achieve reliable performance in high-mobility communication environments. Nevertheless, increasing the grid size to 32 × 32 provides superior performance by further reducing the BER, thereby offering an optimal balance between transmission reliability and computational complexity.

Keywords: *delay–doppler grid, BER, doppler effect, high mobility, OTFS*

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

1 Pendahuluan

Evolusi pesat sistem komunikasi nirkabel telah menghadirkan kebutuhan yang semakin ketat terhadap transmisi data yang andal dalam kondisi mobilitas tinggi. Aplikasi yang berkembang seperti komunikasi *vehicle-to-everything* (V2X), jaringan UAV, dan sistem kereta berkecepatan tinggi ditandai oleh variasi waktu kanal yang signifikan serta pergeseran Doppler yang besar, yang secara signifikan menantang skema modulasi konvensional [1], [2]. Dalam lingkungan seperti ini, menjaga kinerja tautan yang andal menjadi isu kritis bagi jaringan nirkabel masa depan.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), yang telah banyak diadopsi dalam sistem LTE dan 5G, secara inheren sensitif terhadap efek Doppler karena ketergantungannya pada ortogonalitas *subcarrier* dalam domain waktu–frekuensi [3]. Mobilitas tinggi menyebabkan fluktuasi kanal yang cepat dalam satu durasi simbol OFDM, sehingga menghasilkan *inter-carrier interference* (ICI) dan penurunan kinerja yang signifikan [4]. Meskipun teknik estimasi kanal dan ekualisasi yang canggih telah diusulkan untuk mengurangi efek ini, keterbatasan fundamental OFDM dalam skenario Doppler tinggi masih belum terselesaikan [5].

Untuk mengatasi tantangan tersebut, modulasi OTFS telah diusulkan sebagai bentuk gelombang yang menjanjikan untuk komunikasi nirkabel dengan mobilitas tinggi [6]. Berbeda dengan OFDM yang memetakan simbol informasi pada domain waktu–frekuensi, OTFS beroperasi pada domain *delay–Doppler*, di mana variasi kanal lebih kompak dan terstruktur [7]. Dengan menyebarkan setiap simbol informasi ke seluruh bidang waktu–frekuensi, OTFS memungkinkan pemanfaatan penuh terhadap keragaman waktu dan frekuensi, sehingga menghasilkan ketahanan yang lebih baik terhadap gangguan akibat Doppler [8].

Keunggulan tersebut telah ditunjukkan pada berbagai penelitian sebelumnya. Hameed dkk [9] melaporkan bahwa OTFS menghasilkan nilai BER yang lebih rendah dibandingkan OFDM pada kanal mobilitas tinggi seperti EVA, UAV, dan ETU. Pada rentang SNR menengah hingga tinggi, OTFS mampu mempertahankan BER pada orde 10^{-4} hingga 10^{-5}, sedangkan OFDM masih berada pada orde 10^{-3} akibat meningkatnya ICI yang disebabkan oleh efek Doppler. Hasil tersebut menunjukkan bahwa representasi kanal pada domain *delay–Doppler* memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap variasi kanal yang cepat dibandingkan pendekatan waktu–frekuensi yang digunakan OFDM.

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa OTFS memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan OFDM pada lingkungan mobilitas tinggi, fokus penelitian yang ada masih memiliki beberapa keterbatasan. Penelitian oleh Surabhi dkk. [11] lebih menitikberatkan pada pengembangan skema multiple access berbasis *delay–Doppler resource block* (DDRB) pada sistem *Orthogonal Time Frequency Space Multiple Access* (OTFS-MA) untuk komunikasi multi-pengguna. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa OTFS mampu memberikan performansi yang lebih baik dibandingkan *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) dan *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) pada kanal dengan Doppler tinggi. Namun, kajian tersebut berfokus pada strategi alokasi sumber daya dan belum mengevaluasi pengaruh resolusi grid *delay–Doppler* terhadap performansi sistem maupun kompleksitas komputasi.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu tersebut, dapat diketahui bahwa sebagian besar studi masih berfokus pada pengembangan skema OTFS secara umum, evaluasi performansi pada satu aspek parameter tertentu, atau penerapan pada kanal mobilitas tinggi tanpa analisis komprehensif terhadap konfigurasi grid *delay–Doppler*. Kajian mengenai pengaruh ukuran grid *delay–Doppler* terhadap performansi sistem pada beberapa model kanal mobilitas tinggi secara simultan masih relatif terbatas. Selain itu, hubungan antara peningkatan resolusi grid, penurunan BER, dan peningkatan kompleksitas komputasi belum banyak dibahas secara sistematis.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya, studi ini berfokus pada analisis komparatif performansi OTFS pada tiga model kanal mobilitas tinggi, yaitu EVA, UAV, dan ETU, dengan mempertimbangkan variasi ukuran grid *delay–Doppler* secara sistematis. Penelitian ini tidak hanya mengevaluasi performansi BER, tetapi juga menganalisis *trade-off* antara peningkatan performansi dan kompleksitas sistem akibat perubahan ukuran grid. Selain itu, penelitian ini mengidentifikasi adanya fenomena saturasi performansi pada ukuran grid besar, di mana peningkatan resolusi *delay–Doppler* tidak lagi memberikan peningkatan BER yang signifikan. Melalui analisis tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi berupa identifikasi konfigurasi grid optimal yang lebih relevan

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

untuk implementasi praktis OTFS pada sistem komunikasi mobilitas tinggi seperti V2X, UAV, dan kereta berkecepatan tinggi.

2 Tinjauan Literatur

2.1 OTFS

OTFS merupakan skema modulasi dua dimensi yang memetakan simbol informasi pada domain delay–Doppler. Berbeda dengan representasi waktu–frekuensi konvensional, domain delay–Doppler memungkinkan karakteristik kanal nirkabel direpresentasikan secara lebih kompak dan relatif stabil, terutama pada lingkungan dengan mobilitas tinggi [6]. Melalui operasi *Inverse Symplectic Finite Fourier Transform* (ISFFT) dan *Symplectic Finite Fourier Transform* (SFFT), simbol informasi disebarkan ke seluruh sumber daya waktu dan frekuensi sehingga setiap simbol memperoleh diversitas penuh dari kanal yang dilalui [7]. Karakteristik tersebut menjadikan OTFS mampu mempertahankan performansi yang lebih baik pada kondisi kanal yang mengalami perubahan cepat akibat efek Doppler. Karakteristik tersebut menjadikan OTFS mampu mempertahankan performansi yang lebih baik pada kondisi kanal yang mengalami perubahan cepat akibat efek Doppler.

2.2 Model Kanal Mobilitas Tinggi

Evaluasi performansi OTFS umumnya dilakukan menggunakan model kanal yang mampu merepresentasikan karakteristik propagasi pada lingkungan mobilitas tinggi. Model kanal EVA digunakan untuk menggambarkan komunikasi kendaraan dengan penyebaran *delay* yang moderat dan pergeseran Doppler yang signifikan. Sementara itu, model kanal UAV merepresentasikan komunikasi udara yang memiliki mobilitas tinggi serta karakteristik propagasi yang dipengaruhi oleh perubahan posisi tiga dimensi [10]. Adapun model kanal ETU digunakan untuk menggambarkan lingkungan perkotaan yang kaya multipath dengan penyebaran *delay* yang lebih besar dibandingkan EVA. Perbedaan karakteristik ketiga model kanal tersebut menjadikannya relevan untuk mengevaluasi ketahanan OTFS terhadap variasi kondisi propagasi.

2.3 Pengaruh Grid *Delay–Doppler* terhadap Performansi OTFS

Salah satu parameter penting dalam sistem OTFS adalah ukuran grid *delay–Doppler* yang digunakan untuk merepresentasikan kanal. Ukuran grid menentukan resolusi *delay* dan Doppler yang dapat diamati oleh sistem. Grid dengan resolusi yang lebih tinggi memungkinkan representasi kanal yang lebih akurat karena komponen *multipath* dan pergeseran Doppler dapat dipetakan dengan lebih detail pada domain *delay–Doppler* [12]. Namun, peningkatan ukuran grid juga menyebabkan bertambahnya jumlah elemen yang diproses sehingga meningkatkan kompleksitas komputasi sistem.

Penelitian oleh Surabhi dkk. menunjukkan bahwa representasi sumber daya pada domain *delay–Doppler* memberikan keuntungan dalam pengelolaan interferensi dan peningkatan diversitas sistem OTFS-MA [11]. Di sisi lain, Hameed dkk. melaporkan bahwa performansi OTFS sangat dipengaruhi oleh konfigurasi parameter sistem, termasuk resolusi grid dan karakteristik kanal yang digunakan [9]. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa pemilihan ukuran grid *delay–Doppler* menjadi faktor penting dalam menentukan keseimbangan antara performansi dan efisiensi sistem.

2.4 Ringkasan Penelitian Terdahulu

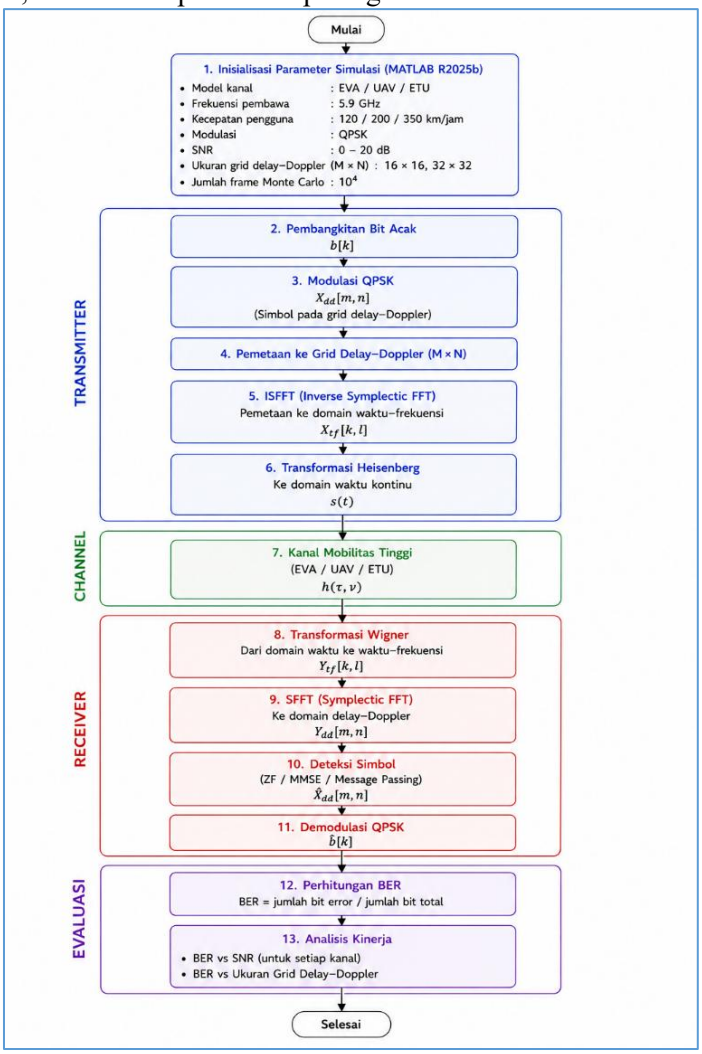
Berdasarkan kajian literatur, sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada pengembangan teknik akses jamak berbasis OTFS, perbandingan performansi OTFS terhadap OFDM, atau evaluasi sistem pada model kanal tertentu [9], [11]. Namun, kajian yang secara khusus menganalisis pengaruh ukuran grid *delay–Doppler* terhadap performansi OTFS pada beberapa model kanal mobilitas tinggi secara simultan masih relatif terbatas. Selain itu, hubungan antara peningkatan resolusi grid dan potensi terjadinya saturasi performansi belum banyak dibahas secara sistematis. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada analisis pengaruh ukuran grid *delay–Doppler* terhadap performansi BER pada kanal EVA, UAV, dan ETU untuk memperoleh konfigurasi yang paling sesuai bagi implementasi OTFS pada lingkungan mobilitas tinggi.

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

3 Metode Penelitian

3.1 Skema Modulasi OTFS

Dalam penelitian ini, model sistem OTFS diimplementasikan menggunakan MATLAB R2025b. Diagram alur penelitian untuk evaluasi kinerja OTFS terhadap variasi ukuran grid *delay–Doppler* pada kanal EVA, UAV, dan ETU dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1 Model sistem OTFS [13]

Gambar 1 menunjukkan diagram alur simulasi sistem OTFS yang terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu *transmitter, channel*, dan *receiver*. OTFS bekerja pada skema modulasi dua dimensi yang memetakan simbol informasi pada domain *delay–Doppler*, berbeda dengan OFDM yang beroperasi pada domain waktu–frekuensi [6]. Representasi *delay–Doppler* memungkinkan kanal nirkabel yang bersifat *sparse* dan *quasi-stasioner* direpresentasikan secara lebih terstruktur, terutama pada lingkungan mobilitas tinggi yang mengalami pergeseran Doppler signifikan [7], [14]. Melalui operasi ISFFT, SFFT, dan transformasi Heisenberg, setiap simbol informasi disebarkan ke seluruh sumber daya waktu dan frekuensi sehingga memperoleh *diversity gain* yang lebih tinggi serta ketahanan yang lebih baik terhadap efek Doppler dibandingkan skema modulasi konvensional [15]. Berikut ini penjelasan dari tahapan penelitian yang dilakukan:

3.1.1 *Transmitter*

Pada sisi *transmitter*, simulasi diawali dengan inisialisasi parameter sistem yang meliputi model kanal EVA, UAV, dan ETU, frekuensi pembawa 5,9 GHz, kecepatan pengguna 120 km/jam, 200 km/jam, dan 350 km/jam, modulasi QPSK, rentang SNR 0–20 dB, serta ukuran grid *delay–Doppler*

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

16×16 dan 32×32. Seluruh simulasi dilakukan menggunakan MATLAB R2025b dengan metode Monte Carlo sebanyak 10^4 *frame*.

Sistem OTFS memproses simbol informasi dengan memanfaatkan representasi dua dimensi pada domain *delay–Doppler*, yang memungkinkan simbol-simbol tersebut tersebar ke seluruh variasi kanal yang disebabkan oleh efek *delay* dan Doppler. Pemancar OTFS terdiri dari dua tahapan utama, yaitu ISFFT dan transformasi Heisenberg, yang secara berurutan memetakan simbol dari domain *delay–Doppler* ke domain waktu untuk transmisi melalui kanal nirkabel.

Pada tahap ISFFT, Bit informasi dibangkitkan secara acak dan dimodulasi menggunakan QPSK sehingga menghasilkan simbol kompleks yang ditempatkan pada grid *delay–Doppler* X[m,n], sebagaimana dinyatakan sebagai berikut:

m : 0,1,..., M - 1 sebagai indeks *delay-bin*
n : 0,1,..., N - 1 sebagai indeks *doppler-bin*

Simbol-simbol tersebut kemudian dipetakan ke domain waktu–frekuensi menggunakan ISFFT. Proses pemetaan ini dinyatakan sebagai:

$$X[k,l] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X[m,n] e^{j2\pi\left(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M}\right)} \text{ [13]} \quad (1)$$

dengan k : 0,1,…, N-1 sebagai indeks waktu
l : 0,1,..., M-1 sebagai indeks frekuensi

Setelah berada pada domain waktu–frekuensi, simbol ditransformasikan ke domain waktu kontinu menggunakan transformasi Heisenberg untuk menghasilkan sinyal transmisi s(t). Proses ini dinyatakan sebagai:

$$s[t] = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} X[k,l] g(t - kT) e^{j2\pi\left(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M}\right)} \text{ [13]} \quad (2)$$

dengan: g(t) : merupakan fungsi *pulse-shaping* pada pemancar
T : menyatakan durasi simbol
Δf : merepresentasikan jarak antar *subcarrier*
X[k,l] : merupakan simbol domain waktu–frekuensi yang diperoleh dari ISFFT

3.1.2 *Channel*

Kanal nirkabel dimodelkan sebagai kanal yang berubah terhadap waktu (*time-varying*) dan selektif terhadap frekuensi (*frequency-selective*), yang merupakan karakteristik khas dari skenario mobilitas tinggi termasuk komunikasi V2X, kereta berkecepatan tinggi, dan UAV. Model kanal yang digunakan secara matematis dikarakterisasi oleh respons impuls domain waktu, representasi *delay–Doppler*, serta derau aditif. Sinyal yang diterima pada domain waktu dinyatakan sebagai:

$$r(t) = \int h(t,\tau)\, s(t-\tau)\, d\tau \text{ [9]} \quad (3)$$

dengan: s(t) : sinyal yang ditransmisikan oleh OTFS.
h(t, τ) : respons impuls kanal yang berubah terhadap waktu.

Representasi kanal dalam domain *delay–Doppler* didefinisikan sebagai:

$$h_{DD}(\tau, v) = \int h(t,\tau) e^{-j2\pi v t} dt \quad (4)$$

Karena kanal OTFS umumnya bersifat *sparse*, respons kanal *delay–Doppler* dapat dimodelkan sebagai kumpulan lintasan dominan sebagai berikut:

$$h_{DD}(\tau, v) = \sum_{p=1}^{P} hp\, \delta(\tau - \tau_p)\, \delta(v - v_p) \text{ [9]} \quad (5)$$

dengan: P : jumlah komponen *multipath* dominan.
h_p : *complex gain* dari lintasan ke-p.
τ_p : *delay* dari lintasan ke-p.
v_p : pergeseran Doppler dari lintasan ke-p.

Respons impuls kanal pada domain waktu–*delay* h(t,τ) dinyatakan sebagai superposisi dari komponen *multipath* sebagai:

$$h_{DD}(t, \tau) = \sum_{p=1}^{P} hp\, e^{j2\pi v_p t} \delta(\tau - \tau_p) \text{ [9]} \quad (6)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa setiap komponen *multipath* mengalami pergeseran Doppler v_p, yang menyebabkan rotasi fase yang berubah terhadap waktu, sementara efek *delay* dimodelkan melalui fungsi delta pada τ_p

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

3.1.3 *Receiver*

Pada sisi receiver, sinyal yang diterima terlebih dahulu diproses menggunakan transformasi Wigner untuk memetakan sinyal dari domain waktu ke domain waktu–frekuensi. Transformasi ini merupakan operasi dual dari transformasi Heisenberg yang digunakan pada sisi transmitter. Proses tersebut dinyatakan sebagai:

$$Y[k,l] = \int r(t)\, g*(t-kT) e^{-j2\pi l\Delta f(t-kT)}\, dt \text{ [13]} \quad (7)$$

dengan: g(t) : fungsi *pulse-shaping* pada penerima.
T : durasi simbol.
Δf : jarak antar *subcarrier*
k dan l : masing-masing merupakan indeks waktu dan frekuensi

Selanjutnya dilakukan SFFT untuk mengubah representasi sinyal dari domain waktu–frekuensi kembali ke domain *delay–Doppler* sehingga diperoleh simbol terima Y[m,n]:

$$Y[m,n] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} Y[k,l] e^{-j2\pi\left(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M}\right)} \text{ [13]} \quad (8)$$

dengan: m : 0,1,..., M - 1 sebagai indeks *delay-bin*
n : 0,1,..., N - 1 sebagai indeks *doppler-bin*

SFFT mengagregasi efek kanal yang tersebar pada domain waktu–frekuensi ke dalam domain *delay–Doppler*, di mana kanal OTFS menjadi lebih terstruktur dan bersifat *sparse*.

Hubungan antara simbol yang ditransmisikan dan simbol yang diterima pada domain *delay–Doppler* dapat dinyatakan sebagai:

$$Y[m,n] = \sum_{m'=0}^{M-1} \sum_{n'=0}^{N-1} h_{DD}[m-m', n-n']\, X[m',n'] + W[m,n] \quad (9)$$

dengan: $h_{DD}[.,.]$: respons kanal *delay–Doppler* diskrit
X[m,n] : simbol yang ditransmisikan oleh OTFS
W[m,n] : derau pada domain *delay–Doppler*

Setelah proses SFFT, dilakukan deteksi simbol dan demodulasi QPSK untuk memperoleh kembali bit informasi yang dikirimkan.

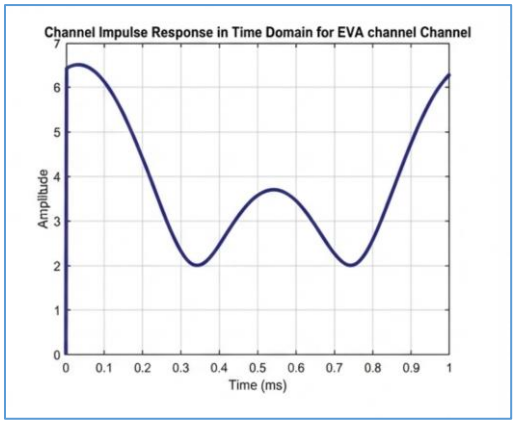
3.2 Kanal Mobilitas Tinggi dan Parameter

3.2.1 EVA

Model kanal EVA merupakan model propagasi *multipath* terstandarisasi yang didefinisikan oleh 3GPP untuk merepresentasikan lingkungan komunikasi kendaraan yang ditandai oleh mobilitas pengguna sedang hingga tinggi serta sebaran *delay* yang signifikan. Model kanal ini menangkap efek *frequency-selective fading* yang disebabkan oleh banyaknya komponen sinyal yang mengalami *delay*, sehingga sesuai untuk mengevaluasi kinerja sistem komunikasi nirkabel yang beroperasi pada skenario kendaraan yang dinamis. Respons impuls kanal EVA umumnya dimodelkan menggunakan representasi *tapped delay line* (TDL) sebagai berikut:

$$h(t,\tau) = \sum_{p=1}^{N} h_p(t)\, \delta(\tau - \tau_p) \text{ [9]} \quad (10)$$

dengan: $h_p(t)$: koefisien *fading* yang berubah terhadap waktu pada lintasan ke-i.
τ_p : *delay* pada lintasan ke-i.
δ : fungsi delta Dirac.



Gambar 2 Kanal EVA [9]

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

Pada gambar 2, simulasi domain waktu dari respons impuls kanal EVA mencakup sembilan komponen *multipath* yang berbeda, masing-masing ditandai oleh spesifikasi *delay* dan daya yang tetap. Dengan memanfaatkan pendekatan *sum-of-sinusoids*, model ini menangkap dinamika *fading* dan efek mobilitas yang autentik melalui penyertaan pergeseran Doppler acak pada setiap lintasan. Fluktuasi yang dihasilkan pada amplitudo respons impuls menunjukkan *Rayleigh fading* yang berubah terhadap waktu. Representasi grafis ini menggambarkan perilaku kanal yang bergantung pada waktu, sehingga memfasilitasi analisis yang lebih mendalam terhadap propagasi sinyal dalam sistem komunikasi kendaraan.

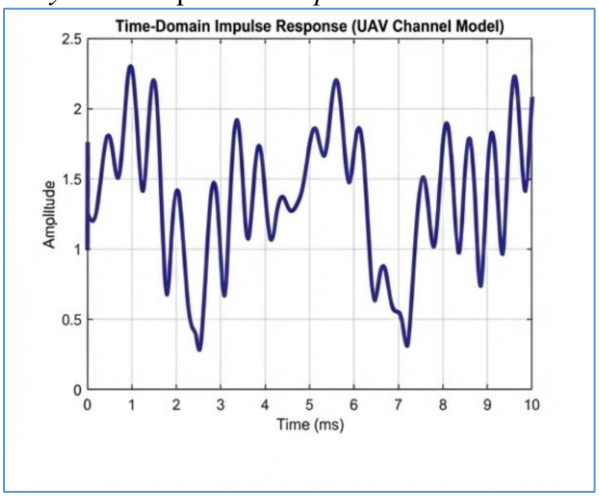
3.2.2 *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV)

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) semakin banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk komunikasi nirkabel, pengawasan perbatasan, penanggulangan bencana, dan misi ilmiah [12], [16]. Beroperasi terutama pada ketinggian rendah, platform UAV dapat berfungsi secara otonom atau di bawah kendali jarak jauh, sehingga menghadirkan kondisi propagasi yang unik dibandingkan dengan sistem komunikasi terestrial konvensional [17]. Sebagai konsekuensinya, karakterisasi yang akurat terhadap kanal komunikasi UAV menjadi sangat penting untuk memastikan operasi yang andal dan aman, sehingga memerlukan upaya terkoordinasi antara penelitian akademik dan badan standardisasi.

Perbedaan mendasar antara sistem berbasis UAV dan jaringan nirkabel tradisional terletak pada klasifikasi kanal *Air-to-Ground* (AG) dan *Air-to-Air* (AA), yang keduanya menunjukkan perilaku non-stasioner yang signifikan dengan variasi pada domain spasial dan temporal [18]. Karakteristik ini menimbulkan tantangan yang signifikan dalam pengelolaan kanal dan perancangan sistem akibat lingkungan propagasi yang berubah dengan cepat, efek Doppler yang diinduksi oleh mobilitas, serta kondisi *line-of-sight* (LoS) yang bergantung pada ketinggian. Berbeda dengan sistem seluler terestrial yang mengandalkan model kanal empiris dan analitis yang telah mapan, tautan komunikasi UAV memerlukan pendekatan pemodelan kanal khusus untuk secara akurat menangkap dinamika propagasi yang unik tersebut [19]. Respons impuls untuk kanal UAV dinyatakan sebagai berikut:

$$h(t,\tau) = h_{LoS}(t)\,\delta\,(\tau - \tau_{LoS}) + \sum_{p=1}^{N} h_{NLos,p}\,(t)\,\delta(\tau - \tau_p)[9] \quad (11)$$

dengan: h_LoS(t) : komponen LoS.
τ_LoS : *delay* lintasan LoS.
h_NLoS,p(t) : merepresentasikan *Non-Line-of-Sight* (NLoS) *multipath fading.*
τ_p : *delay* dari komponen *multipath* ke-i.



Gambar 3 Kanal UAV [9]

Pada gambar 3, respons impuls kanal UAV berubah terhadap waktu akibat mobilitas UAV dan lingkungan yang terus berubah. Variasi ini menimbulkan efek *fading* yang dapat bersifat selektif terhadap frekuensi (*frequency-selective*) maupun selektif terhadap waktu (*time-selective*), tergantung pada pergerakan relatif antara pemancar dan penerima. Seluruh fenomena propagasi, termasuk *path loss*, pergeseran Doppler, dan propagasi *multipath*, direpresentasikan oleh respons impuls kanal tersebut.

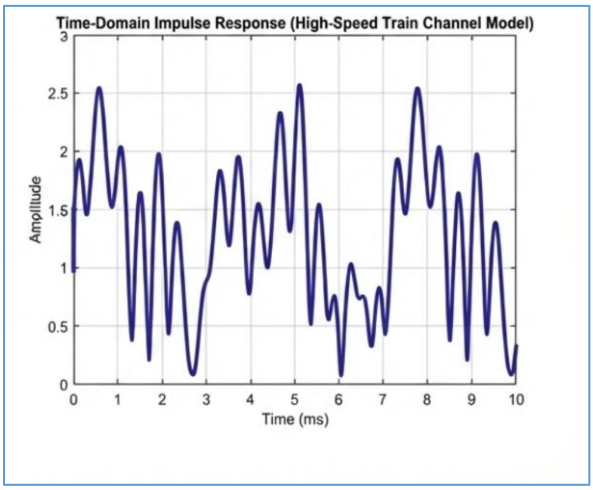
 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

3.2.3 Extended Typical Urban (ETU)

Karakteristik khas kanal komunikasi kereta api, yang umumnya dimodelkan menggunakan kanal ETU, bersama dengan tantangan yang terkait dengan pengodean dan transmisi informasi yang efisien, telah menarik perhatian signifikan dari komunitas penelitian *signal processing* dan komunikasi nirkabel. Model kanal perkotaan seperti ETU banyak digunakan dalam studi evaluasi kinerja, kegiatan standardisasi, dan perancangan jaringan seluler karena kemampuannya dalam merepresentasikan propagasi *multipath* yang parah serta sebaran *delay* yang besar yang ditemui pada lingkungan metropolitan yang padat. Pada model ETU, respons impuls kanal h(t,τ) umumnya dinyatakan sebagai:

$h(t,\tau) = \sum_{k=o}^{N-1} a_k \, \delta(\tau - \tau_k) e^{j2\pi f dt}$ [9]
(12)

dengan: a_k : *complex gain* (amplitudo dan fase) dari lintasan ke-k.
τ_k : *delay* dari lintasan ke-k.
$\delta(\tau-\tau_k)$: fungsi delta Dirac yang merepresentasikan respons impuls pada *delay* tertentu τ_k.
f_d : pergeseran Doppler.
t : variabel waktu.



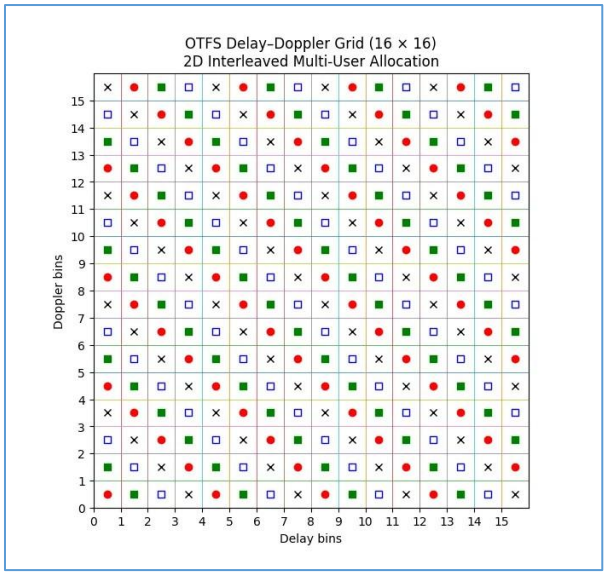
Gambar 4 Kanal ETU [9]

Pada gambar 4, model ETU mampu merepresentasikan lingkungan propagasi *multipath* yang kaya dengan banyak objek pemantul, seperti bangunan dan kendaraan, sehingga sangat sesuai digunakan untuk simulasi lingkungan perkotaan. Model ini menyediakan dasar yang komprehensif untuk analisis dan perancangan sistem pada skenario komunikasi yang dinamis dan realistis, termasuk komunikasi UAV. Respons impuls kanal ETU menggambarkan bagaimana sinyal merambat dari pemancar ke penerima seiring waktu, melalui respons kanal terhadap sinyal impuls masukan (fungsi delta). Selain itu, model ini merepresentasikan komponen *multipath* yang meliputi amplitudo, fase, dan *delay*, serta pergeseran Doppler yang muncul akibat pergerakan relatif antara pemancar dan penerima.

3.2.4 Grid *Delay–Doppler* untuk Multi-Pengguna *2D Interleaved*

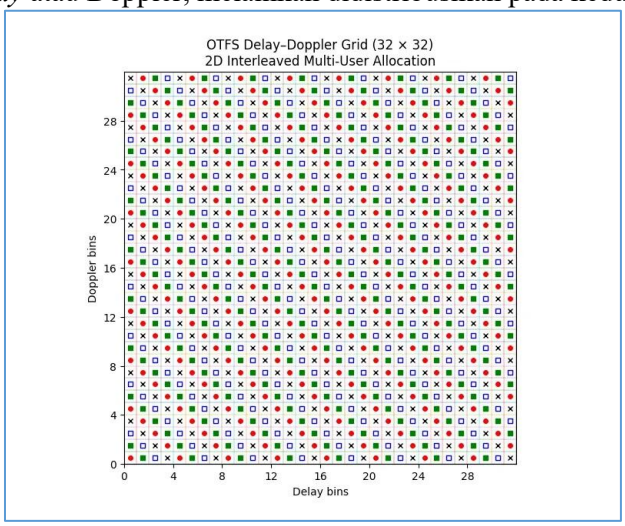
Grid *delay–Doppler* berfungsi sebagai domain fundamental untuk alokasi dan pemetaan simbol dalam modulasi OTFS, di mana setiap simbol informasi yang ditransmisikan ditempatkan pada koordinat diskrit (τ_m, ν_n) yang sesuai dengan *delay bin* dan *Doppler bin* tertentu [6]. Grid dua dimensi ini memiliki dimensi M×N, dengan resolusi *delay* yang didefinisikan sebagai $\Delta\tau = 1/(M\Delta f)$ dan resolusi Doppler yang diberikan oleh $\Delta\nu = 1/(NT)$, yang keduanya secara langsung ditentukan oleh jumlah *subcarrier* dan durasi *frame* OTFS [15].

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719



Gambar 5 Grid Delay–Doppler OTFS (16 × 16) [11]

Pada gambar 5, untuk konfigurasi grid 16×16, resolusi *delay* dan Doppler relatif terbatas karena jumlah *bin* yang lebih sedikit. Dalam skema ini, simbol setiap pengguna dipetakan menggunakan *interleaving* dua dimensi pada grid *delay–Doppler*, sehingga pengguna tidak dipisahkan hanya berdasarkan dimensi *delay* atau Doppler, melainkan didistribusikan pada kedua domain tersebut.



Gambar 6 Grid Delay–Doppler OTFS (32 × 32) [11]

Pada gambar 6, untuk konfigurasi grid 32×32, pemetaan simbol *interleaved* dua dimensi pada grid *delay–Doppler* yang lebih besar menghasilkan jarak yang lebih lebar antar simbol pengguna dalam domain *delay–Doppler*.

3.2.5 Sparsitas Kanal

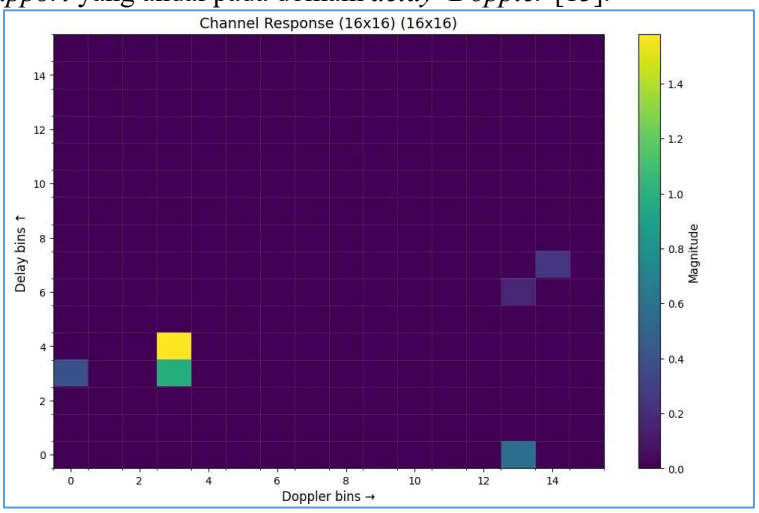
Dalam sistem komunikasi nirkabel konvensional, kanal yang dipengaruhi oleh propagasi *multipath* dan mobilitas pengguna secara inheren bersifat selektif ganda (*doubly selective*), yang menunjukkan variasi baik pada domain waktu maupun frekuensi. Namun, ketika kanal tersebut direpresentasikan dalam domain *delay–Doppler*, muncul karakteristik yang secara fundamental berbeda, yaitu sparsitas kanal. Pada domain ini, hanya sejumlah kecil komponen kanal yang membawa energi signifikan, sementara sebagian besar elemen grid *delay–Doppler* bernilai dapat diabaikan.

Dalam kerangka OTFS, sparsitas kanal menunjukkan bahwa respons kanal efektif terkonsentrasi pada sejumlah terbatas koordinat *delay–Doppler* yang berbeda, yang berkaitan dengan lintasan propagasi fisik yang dominan [6]. Representasi *sparse* ini sangat menguntungkan, karena kanal yang

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

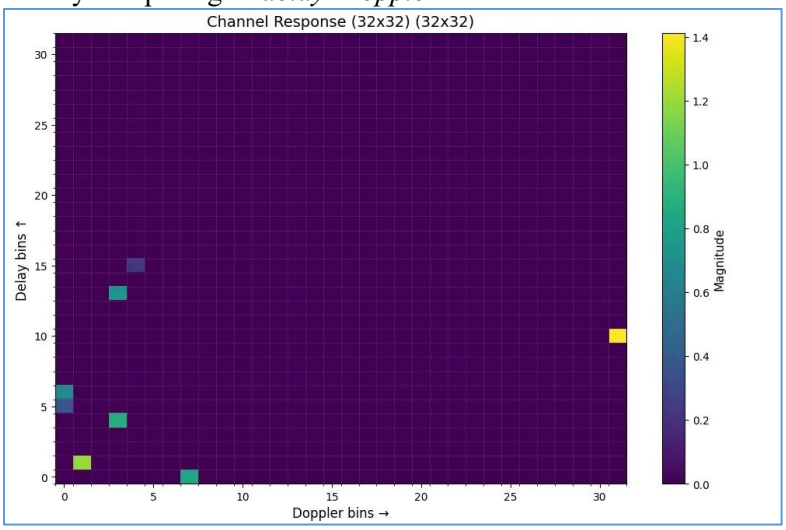
terdiri dari hanya beberapa komponen signifikan dapat dimanfaatkan secara efisien menggunakan teknik estimasi kanal berbasis *compressed sensing* atau *sparse recovery*. Sebagai hasilnya, sistem OTFS memperoleh keuntungan berupa pengurangan *pilot overhead*, kompleksitas komputasi yang lebih rendah, serta peningkatan akurasi estimasi kanal dibandingkan dengan representasi kanal padat (*dense*) konvensional.

Tingkat sparsitas terutama ditentukan oleh jumlah komponen *multipath* dominan, yang berasal dari mekanisme propagasi fisik seperti refleksi, hamburan (*scattering*), dan difraksi yang disebabkan oleh objek di sekitarnya. Oleh karena itu, jumlah *channel taps* signifikan L pada domain *delay–Doppler* biasanya jauh lebih kecil dibandingkan jumlah total titik grid M×N, yaitu $L \ll MN$. Bahkan dengan adanya efek Doppler fraksional, yang dapat menyebabkan energi kanal menyebar ke *Doppler bin* yang berdekatan, struktur *sparse* yang mendasarinya tetap sebagian besar terjaga. Hal ini karena kanal tetap didominasi oleh sejumlah terbatas lintasan fisik, sehingga memungkinkan identifikasi dan estimasi *channel support* yang andal pada domain *delay–Doppler* [15].



Gambar 7 Representasi sparse kanal nirkabel pada domain delay–Doppler untuk grid OTFS 16×16

Pada gambar 7, untuk konfigurasi grid 16×16, resolusi *delay* dan Doppler relatif kasar, sehingga beberapa komponen kanal dipetakan ke *bin* yang sama atau berdekatan. Akibatnya, struktur sparsitas kanal tampak lebih menyebar pada grid *delay–Doppler*.



Gambar 8 Representasi sparse kanal nirkabel pada domain delay–Doppler untuk grid OTFS 32x32

Pada gambar 8, untuk ukuran grid yang lebih besar, seperti 32×32, peningkatan resolusi *delay* dan Doppler memungkinkan setiap komponen *multipath* direpresentasikan dengan lebih presisi.

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

Akibatnya, struktur sparsitas kanal menjadi lebih jelas dan lebih terlokalisasi, yang memberikan dampak positif terhadap kinerja sistem secara keseluruhan.

Analisis dilakukan dalam dua skenario. Pertama, analisis BER terhadap SNR untuk mengevaluasi pengaruh kualitas sinyal terhadap performansi OTFS pada masing-masing model kanal EVA, UAV, dan ETU. Kedua, analisis BER terhadap ukuran grid delay–Doppler untuk mengkaji pengaruh peningkatan resolusi grid dari 16×16 menjadi 32×32 terhadap kemampuan sistem dalam merepresentasikan kanal dan menekan kesalahan bit.

4 Simulasi dan Evaluasi Hasil

4.1 Parameter Simulasi dan Konfigurasi Sistem

Untuk mengevaluasi kinerja sistem OTFS pada skenario mobilitas tinggi, simulasi dilakukan menggunakan parameter yang dirangkum dalam Tabel 1. Parameter-parameter ini dipilih untuk merepresentasikan sistem komunikasi modern yang beroperasi pada kondisi Doppler tinggi, seperti V2X, UAV, dan lingkungan perkotaan.

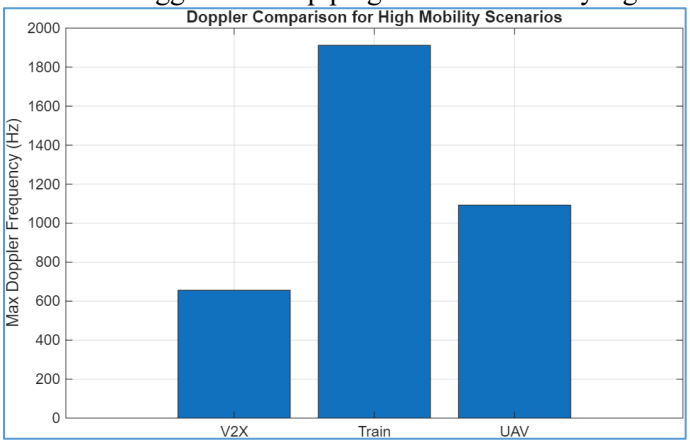
Tabel 1 Parameter Simulasi

Parameter	Nilai / Konfigurasi	Deskripsi
Kecepatan Pengguna	120 km/jam (V2X) 200 km/jam (UAV) 350 km/jam (Kereta Berkecepatan Tinggi)	Mobilitas tinggi perkotaan Mobilitas udara Mobilitas ekstrem
Rentang SNR	0 – 20 dB	Step size sebesar 2 dB
Skema Modulasi	QPSK	Gray mapping
Orde Modulasi	4	-
Bits per Symbol	2	$\log_2(4)$
Normalisasi Energi	$1/\sqrt{2}$	Daya rata-rata satuan
Frekuensi Pembawa	5.9 GHz	-
Model Kanal	Kanal EVA Kanal UAV Kanal ETU	-
Delay taps	[0 1 3 5] µs	Multipath delays

Berdasarkan parameter-parameter tersebut, evaluasi difokuskan pada pengaruh frekuensi Doppler maksimum, kondisi kanal, dan ukuran grid delay–Doppler terhadap kinerja BER pada sistem OTFS.

4.2 Kinerja BER pada Berbagai Model Kanal

Dalam sistem OTFS, efek Doppler dimodelkan secara eksplisit pada domain *delay–Doppler*, sehingga membuat sistem lebih tangguh terhadap pergeseran frekuensi yang besar.



Gambar 9 Frekuensi doppler maksimum

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

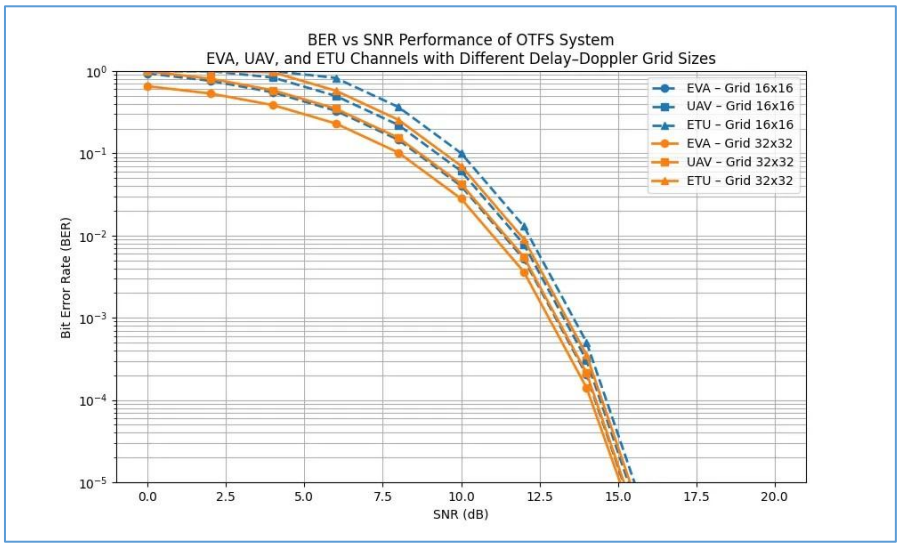
Gambar 9 menunjukkan bahwa frekuensi Doppler maksimum meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan pengguna. Pada skenario V2X, nilai Doppler relatif lebih rendah karena kecepatan kendaraan berada pada kisaran sedang. Sebaliknya, pada skenario kereta berkecepatan tinggi, frekuensi Doppler menjadi yang tertinggi akibat kecepatan yang sangat tinggi, yang menyebabkan kanal berubah sangat cepat terhadap waktu dan menunjukkan selektivitas waktu yang tinggi.

Sementara itu, Tabel 2 kanal UAV menunjukkan nilai Doppler yang berada di antara skenario V2X dan kereta berkecepatan tinggi. Hal ini mencerminkan karakteristik mobilitas UAV yang lebih tinggi dibandingkan kendaraan darat, namun umumnya masih lebih rendah dibandingkan kereta berkecepatan sangat tinggi.

Tabel 2 Model kanal

Model Kanal	Kecepatan Pengguna	Frekuensi Pembawa	Frekuensi Doppler Maksimum
V2X (Kendaraan)	120 km/jam	5.9 GHz	650 Hz
UAV (*Drone*)	200 km/jam	5.9 GHz	1.1 kHz
Kereta Cepat (*Train*)	350 km/jam	5.9 GHz	1.9 kHz

Perbedaan nilai Doppler maksimum ini memiliki dampak langsung terhadap karakteristik kanal yang dialami oleh sistem. Kanal dengan Doppler rendah hingga sedang, seperti pada skenario V2X, cenderung menunjukkan variasi temporal yang lebih lambat, sehingga menghasilkan ICI yang relatif terbatas. Sebaliknya, pada skenario UAV dan kereta berkecepatan tinggi, nilai Doppler yang lebih tinggi menyebabkan kanal berubah dengan cepat terhadap waktu, sehingga menimbulkan sebaran Doppler yang signifikan dan memperparah penurunan kinerja pada sistem konvensional berbasis domain waktu–frekuensi.



Gambar 10 Kinerja BER terhadap SNR pada sistem OTFS

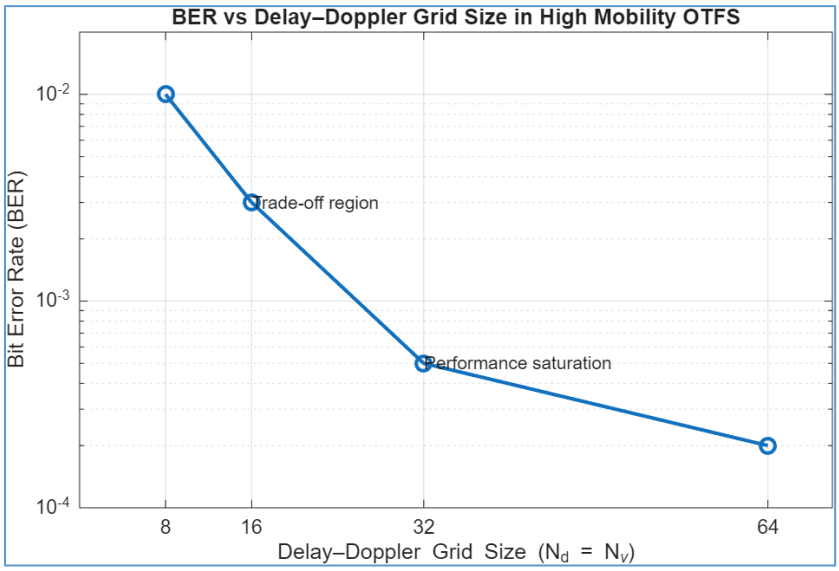
Gambar 10 mengilustrasikan kinerja BER sebagai fungsi dari *SNR* untuk sistem OTFS pada tiga model kanal, yaitu EVA, UAV, dan ETU, dengan menggunakan dua konfigurasi grid *delay–Doppler* sebesar 16×16 dan 32×32. Secara umum, seluruh kurva menunjukkan tren yang konsisten di mana BER menurun seiring dengan peningkatan *SNR*, yang mengindikasikan bahwa sistem OTFS mampu memanfaatkan peningkatan kualitas sinyal untuk mengurangi kesalahan deteksi pada kondisi mobilitas tinggi. Perilaku ini menegaskan karakteristik fundamental sistem komunikasi nirkabel, di mana *SNR* yang lebih tinggi menghasilkan BER yang lebih rendah.

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

Untuk setiap model kanal, konfigurasi grid *delay–Doppler* 32×32 menghasilkan kinerja BER yang lebih baik dibandingkan grid 16×16, khususnya pada rentang *SNR* menengah hingga tinggi. Peningkatan kinerja ini disebabkan oleh resolusi *delay* dan Doppler yang lebih halus pada grid yang lebih besar, sehingga memungkinkan sistem OTFS merepresentasikan dan mengompensasi efek kanal selektif ganda (*doubly selective*) dengan lebih akurat.

Ketika membandingkan berbagai model kanal, kanal ETU menunjukkan kinerja BER terbaik, diikuti oleh kanal UAV, sementara kanal EVA menghasilkan BER tertinggi pada *SNR* yang sama. Perilaku ini berkaitan erat dengan karakteristik masing-masing kanal, khususnya profil *delay* dan sebaran Doppler, di mana kanal EVA mengalami dinamika kanal yang lebih kompleks akibat mobilitas kendaraan darat dan kondisi *multipath* yang dominan. Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya mengevaluasi satu jenis kanal, hasil ini memberikan analisis yang lebih komprehensif dengan mempertimbangkan variasi kondisi kanal secara simultan.

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada grafik BER terhadap ukuran grid *delay–Doppler*, dapat diamati bahwa peningkatan ukuran grid *delay–Doppler* menghasilkan penurunan BER yang signifikan pada sistem OTFS dalam lingkungan mobilitas tinggi.



Gambar 11 Kinerja BER dari ukuran grid delay–Doppler pada sistem OTFS.

Berdasarkan Gambar 11, terlihat bahwa peningkatan ukuran grid *delay–Doppler* memberikan dampak yang signifikan terhadap penurunan BER pada sistem OTFS. Ketika ukuran grid ditingkatkan dari 8×8 menjadi 16×16, BER menurun dari sekitar 10^{-2}menjadi 3×10^{-3}. Penurunan ini mencerminkan peningkatan signifikan dalam akurasi pemodelan kanal dan kemampuan deteksi simbol, sehingga rentang operasi ini diidentifikasi sebagai wilayah *trade-off* antara kompleksitas sistem dan kinerja.

Selanjutnya, pada konfigurasi grid 32×32, BER menurun secara signifikan hingga mencapai sekitar 5×10^{-4}. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan resolusi *delay–Doppler* pada ukuran grid tersebut mampu merepresentasikan karakteristik kanal mobilitas tinggi dengan lebih akurat. Peningkatan ukuran grid menjadi 64×64 hanya menghasilkan perbaikan BER yang marginal hingga sekitar 2×10^(-4), yang mengindikasikan bahwa peningkatan resolusi *delay–Doppler* lebih lanjut memberikan keuntungan kinerja yang semakin kecil dibandingkan dengan peningkatan kompleksitas komputasi.

5 Kesimpulan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa OTFS mampu secara efektif menangani peningkatan frekuensi Doppler maksimum yang sesuai dengan kecepatan pengguna hingga 350 km/jam, yang ditunjukkan oleh penurunan BER yang konsisten seiring dengan peningkatan *SNR*. Untuk grid *delay–Doppler* berukuran 16×16, sistem mencapai BER sekitar 3×10^{-3} pada *SNR* menengah hingga tinggi, sedangkan peningkatan ukuran grid menjadi 32×32 menurunkan BER hingga sekitar 5×10^{-4}, yang

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan akibat peningkatan resolusi *delay* dan Doppler. Namun, peningkatan ukuran grid lebih lanjut hanya memberikan peningkatan BER yang terbatas, yang mengindikasikan adanya saturasi kinerja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan resolusi grid tidak selalu menghasilkan peningkatan performansi yang proporsional, melainkan terdapat titik operasi yang memberikan keseimbangan antara peningkatan kinerja dan kebutuhan komputasi sistem. Dengan demikian, hasil penelitian mengindikasikan bahwa grid 16×16 sudah cukup baik untuk mendukung komunikasi mobilitas tinggi, sedangkan grid 32×32 memberikan performansi yang sangat baik dan menjadi titik kompromi terbaik antara peningkatan BER dan kompleksitas sistem untuk aplikasi komunikasi mobilitas tinggi seperti V2X, UAV, dan kereta berkecepatan tinggi.

Referensi

[1] J. Loor *et al.*, "*Evaluation of 5G Vehicle-to-Everything (V2X) Communications in Urban Scenarios*," in *2024 IEEE Eighth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Oct. 2024, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ETCM63562.2024.10746041.

[2] "*Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore*." Accessed: Mar. 11, 2026. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9140329

[3] Y. Li and G. L. Stüber, Eds., *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications*. in Signals and communication technology. New York: Springer Science+Business Media, 2006.

[4] T. Zemen and C. F. Mecklenbrauker, "*Time-Variant Channel Estimation using Discrete Prolate Spheroidal Sequences*," *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 53, No. 9, pp. 3597–3607, Sep. 2005, DOI: 10.1109/TSP.2005.853104.

[5] P. Schniter, "*Low-Complexity Equalization of OFDM in Doubly Selective Channels*," *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 52, No. 4, pp. 1002–1011, Apr. 2004, DOI: 10.1109/TSP.2004.823503.

[6] R. Hadani *et al.*, "*Orthogonal Time Frequency Space Modulation*," in *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Mar. 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/WCNC.2017.7925924.

[7] R. Hadani and A. Monk, "*OTFS: A New Generation of Modulation Addressing the Challenges of 5G*," *ArXiv*, Feb. 2018, Accessed: Mar. 11, 2026. [Online]. Available: https://www.semanticscholar.org/paper/OTFS%3A-A-New-Generation-of-Modulation-Addressing-the-Hadani-Monk/5e72e33df5fad7fb6fb0a771b681e1bbfa7351dc

[8] "O*TFS vs. OFDM in the Presence of Sparsity: A Fair Comparison | IEEE Journals & Magazine |IEEE Xplore*." Accessed: Mar. 11, 2026. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9632684

[9] S. Hameed, T. Jamel, and H. Khazaal, "*A Performance and Evaluation of OTFS Modulation Systems using Different High Mobility Channel*s," *Int. J. Electron. Telecommun.*, Vol. 71, No. 2, pp. 505–512, May 2025.

[10] S. A. Owaid, A. H. Miry, and T. M. Salman, "*A Survey on UAV-Assisted Wireless Communications: Challenges, Technologies, and Application*," in *2024 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*, Apr. 2024, pp. 333–340. DOI: 10.1109/ICEEE62185.2024.10779287.

[11] G. D. Surabhi, R. M. Augustine, and A. Chockalingam, "*Multiple Access in the Delay-Doppler Domain using OTFS modulation*," Feb. 09, 2019, *arXiv*: arXiv:1902.03415. DOI: 10.48550/arXiv.1902.03415.

[12] D. Mishra and E. Natalizio, "*A Survey on Cellular-Connected UAVs: Design Challenges, Enabling 5G/B5G Innovations, and Experimental Advancements*," *Comput. Netw.*, Vol. 182, p. 107451, Dec. 2020, DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107451.

 ISSN:2302-8149
e-ISSN:2540-9719

[13] A. Eldemiry, A. A. Abdelsalam, H. M. Abdel-Atty, A. Azouz, A. E. Gaafar, and W. Raslan, "*Overview of the Orthogonal Time-Frequency Space for High Mobility Communication Systems*," in *2022 5th International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*, Dec. 2022, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCSPA55860.2022.10019038.

[14] M. Aldababsa, S. Özyurt, G. K. Kurt, and O. Kucur, "*A Survey on Orthogonal Time Frequency Space Modulation*," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, Vol. 5, pp. 4483–4518, 2024, DOI: 10.1109/OJCOMS.2024.3422801.

[15] "*Interference Cancellation and Iterative Detection for Orthogonal Time Frequency Space Modulation | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore*." Accessed: Mar. 11, 2026. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/8424569

[16] Y. Zeng, J. Lyu, and R. Zhang, "*Cellular-Connected UAV: Potential, Challenges, and Promising Technologies*," *IEEE Wirel. Commun.*, Vol. 26, No. 1, pp. 120–127, Feb. 2019, DOI: 10.1109/MWC.2018.1800023.

[17] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, "*Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage*," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, Vol. 3, No. 6, pp. 569–572, Dec. 2014, DOI: 10.1109/LWC.2014.2342736.

[18] "*Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore*." Accessed: Mar. 11, 2026. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/7470933

[19] "*TR 138 901 - V18.0.0 - 5G; Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 18.0.0 Release 18)*".