

BAB II

DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Dalam studi [5], dibahas mengenai pembuatan model kanal V2V beserta perkiraan skenario propagasi, di mana *scatterer local* bergerak pada kecepatan dan arah yang *random*. Dalam konteks komunikasi V2V, kendaraan memiliki kecepatan tinggi, sementara *mobile to mobile* memiliki kecepatan lebih rendah. Dalam studi ini, V2V memiliki tiga unsur, antara lain pergerakan pada sisi *Transmitter*, pergerakan pada sisi *Receiver*, dan pergerakan pada sisi *Scatterer*. Ketiga unsur tersebut menyebabkan efek *Doppler*, mengakibatkan kesulitan komunikasi antara pengirim dan penerima. Riset ini menggunakan *Auto Correlation Function* (ACF) sebagai fungsi validasinya [5].

Studi yang dilakukan oleh [6] membahas kinerja sistem OFDM dengan menerapkan *modulation* 16-QAM dan BPSK pada kanal AWGN, *Rician*, dan *Rayleigh*. Evaluasi kinerja sistem OFDM diamati dari nilai BER yang di dapatkan di sisi penerima. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penggunaan *modulation* 16-QAM, kanal AWGN menunjukkan kinerja yang sangat rendah dibandingkan pada kanal *Rician* dan *Rayleigh*, terlihat dari BER dengan nilai lebih tinggi. Sebaliknya, kanal *Rayleigh* menunjukkan kinerja yang sangat optimal dengan nilai BER lebih rendah dibandingkan dengan kanal *Rician*. Dalam eksperimen kedua, teramati bahwa penggunaan modulasi BPSK memperoleh nilai BER lebih tinggi di semua kanal dibandingkan dengan QAM *modulation*. Dari kesimpulan penelitian, dapat disimpulkan bahwa OFDM menunjukkan sistem kinerja yang lebih baik saat memakai QAM *modulation* dari pada BPSK *modulation*, dan OFDM mencapai optimal kinerjanya pada kanal *Rayleigh* dibandingkan dengan kanal *Rician* dan AWGN [6].

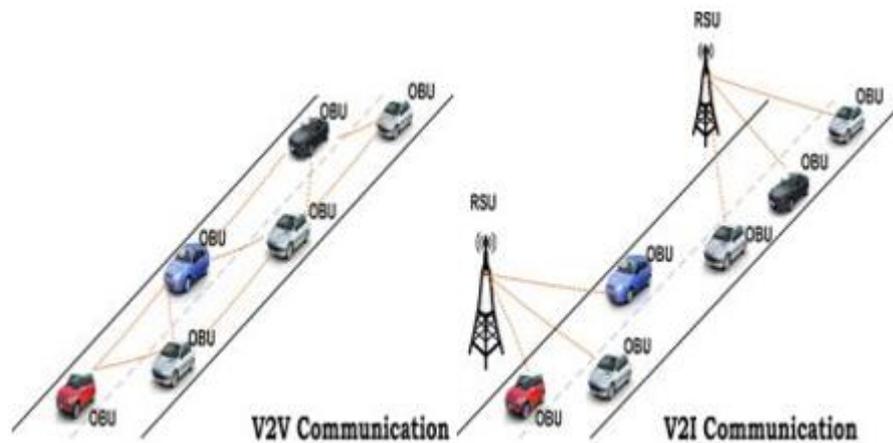
Pada studi [7] fokus utama penelitian ini adalah metode mitigasi *Intercarrier Interference* (ICI) dengan menerapkan estimasi matriks kanal dan *Zero Forcing Equalization*. Estimasi matriks kanal diterapkan dengan cara mengestimasi nilai CFO setelah melakukan *invers* matriks kanal, kemudian menjadi respon dari

equalizer. Ekualisasi bertujuan mengembalikan penyebaran simbol modulasi yang terpengaruh oleh *Intercarrier Interference*. Ekualisasi ini dikerjakan melalui perkalian respon kanal dan *output* simbol FFT. Hasil eksperimen menunjukkan jika *Intercarrier Interference* memiliki dampak besar terhadap performansi OFDM. namun, dengan ditambahkan *Zero Forcing Equalization*, *Intercarrier Interference* bisa ditangani, terbukti dengan meningkatnya performansi senilai 2 dB [7].

2.2 DASAR TEORI

2.2.1 Sistem Komunikasi *Vehicle to Vehicle* (V2V)

Sistem komunikasi V2V adalah suatu sistem yang memfasilitasi interaksi komunikasi antara kendaraan dengan kendaraan lainnya, kendaraan dengan *infrastructure*, serta kendaraan dengan lingkungan sekitar. Seiring dengan pesatnya perkembangan komunikasi nirkabel dalam *Intelligent Transportation System* (ITS), dibutuhkan beragam servis yang bisa memberikan jaminan terhubungnya komunikasi efektif antara kendaraan dengan kendaraan, kendaraan dengan *infrastructure*, serta kendaraan dengan lingkungan sekitar [8].



Gambar 2. 1 Komunikasi V2V dan V2I [9]

Banyaknya penggunaan *WAVE protocol* sudah sampai mewujudkan kemampuan pertukaran informasi antara kendaraan dengan *infrastructure* yang dikenal sebagai *Vehicle to Infrastructure* (V2I), serta pertukaran informasi antar kendaraan dinamakan sebagai *Vehicle to Vehicle* (V2V). Kombinasi keduanya

membentuk dasar dari sistem komunikasi dalam teknologi *Vehicle Ad-Hoc Networks* (VANETs), di mana kendaraan bisa saling komunikasi memanfaatkan jaringan nirkabel baik melalui infrastruktur ataupun secara *ad-hoc*. Ada 2 unit dasar untuk membangun standar WAVE, yaitu *Roadside Unit* dan *On-Board Unit*. *Roadside Unit* atau RSU berfungsi sebagai *infrastructure* yang menjadi titik jalan masuk untuk memberikan fasilitas pertukaran komunikasi dengan kendaraan, memungkinkan akses ke jaringan. Sementara itu, *On-Board Unit* atau OBU merupakan *instrument* jaringan yang terdapat dalam kendaraan. OBU bisa berkomunikasi serta memodifikasi pesan dengan OBU lainnya [9]. Pertukaran informasi antar OBU dikenal sebagai sistem komunikasi V2V, sedangkan pertukaran informasi antara OBU dan RSU dinamakan sebagai sistem komunikasi V2I. Gambar 2.1. adalah gambaran dari kedua sistem komunikasi di atas.

2.2.2 Modulasi Digital

Modulasi yaitu suatu tindakan penyisipan sinyal informasi ke dalam sinyal *carrier*. Proses ini dilakukan dengan cara memodifikasi amplitudo, frekuensi, fase dari sinyal *carrier*. Pada pengiriman informasi digital, sistem modulasi digital membagi interval sinyal waktu serta menciptakan fungsi *continue* yang merepresentasikan simbol. Terdapat tiga teknik dasar modulasi digital, yaitu *Amplitudo Shift Keying* (ASK) yang memodifikasi amplitudo sinyal *carrier*, *Frekuensi Shift Keying* (FSK) yang memodifikasi frekuensi sinyal *carrier*, dan *Phase Shift Keying* (PSK) yang memodifikasi fase sinyal *carrier*. Salah satu bentuk modulasi digital yang lain adalah QAM yang mengombinasikan perubahan amplitudo dan *phase* dari gelombang *carrier* [10].

2.2.3 Modulasi *Binary Phase Shift Keying* (BPSK)

Dalam BPSK, *phase* dari frekuensi pembawa diganti dengan 2 nilai yang mewakili kondisi biner 1 dan 0. Pada BPSK, perubahan *phase* antara dua frekuensi *carrier* berbeda sebesar π radian atau 180° . Oleh karena itu, pensinyalan dalam BPSK kadang-kadang disebut sebagai *Phase Reversal Keying* (PRK). Bentuk persamaan gelombang BPSK dapat dinyatakan [11].

$$S_1(t) = -A \cos \omega_c t \quad (2.1)$$

$$S_2(t) = A \cos \omega_c t \quad (2.2)$$

Atau umumnya dinyatakan dalam bentuk persamaan [11].

$$S(t) = A \cos \omega_c t + \theta \quad (2.3)$$

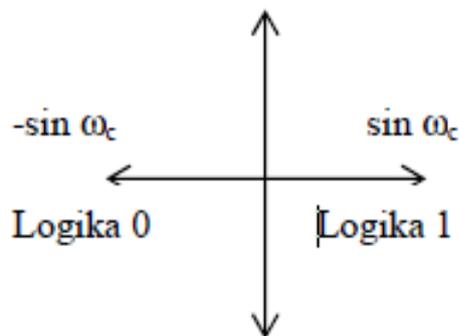
Keterangan:

A = Sinyal Amplitudo (m)

ω_c = Frekuensi *carrier* (Hz)

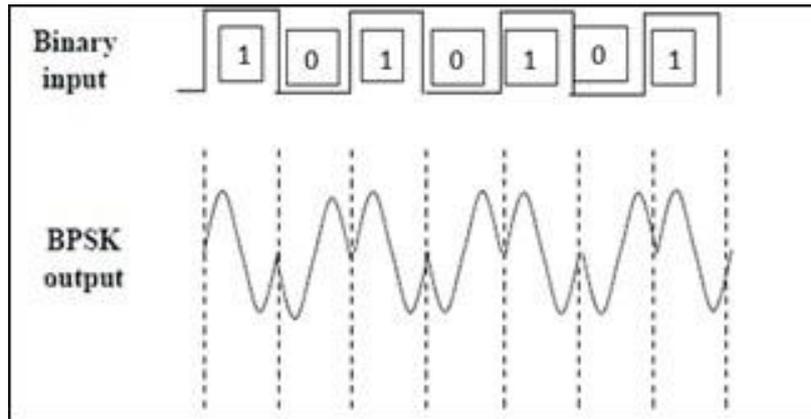
θ_c = Sudut *phasa* pembawa

Sinyal BPSK kerap dinyatakan sebagai sinyal antipodal karena $S_1(t) = -S_2(t)$. Persamaan (2.1) berlaku ketika $\theta_c = \pi$, sementara rumus (2.2) berlaku ketika $\theta_c = 0$. Sinyal ini digunakan pada saat mentransmisikan bit biner 0 dan 1 secara urutan. Pada Gambar 2.2 menunjukkan diagram sinyal BPSK [11].

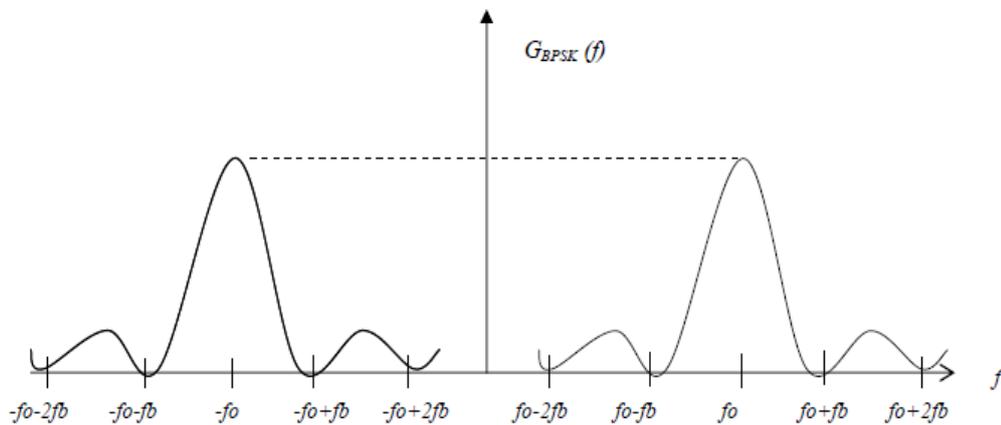


Gambar 2. 2 Diagram Konstelasi pada BPSK [11]

Gambaran sinyal BPSK dengan data *input* 1010101 dapat diilustrasikan seperti yang terlihat di Gambar 2.3, sementara *spectrum* sinyal BPSK ditunjukkan di Gambar 2.4 [11].



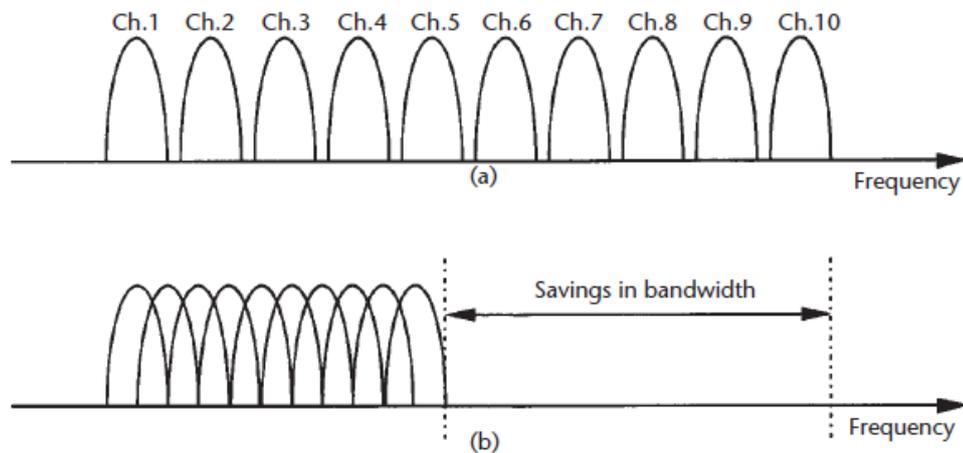
Gambar 2. 3 Sinyal Modulasi BPSK [11]



Gambar 2. 4 Spectrum Sinyal Modulasi BPSK [11]

2.2.4 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

OFDM termasuk varian dari *Multi Carrier Modulation* (MCM). Teknologi ini memisahkan aliran data berkecepatan tinggi menjadi beberapa aliran data berkecepatan rendah, lalu mengirimkannya dengan cara simultan melewati sejumlah *subcarrier*. Dalam OFDM, data inputan dialokasikan ke sejumlah *subcarrier* paralel yang bersifat *orthogonal* satu sama lain, dengan kecepatan data lebih rendah. Karakteristik orthogonalitas memungkinkan *subcarrier* tumpang tindih tanpa menyebabkan *Intercarrier Interference* (ICI). OFDM adalah penyempurnaan dari Teknik *Frequency Division Multiplexing* (FDM). Ketidaksamaan utama antara OFDM dan FDM terdapat pada distribusi *frequency subcarrier*, seperti dalam Gambar 2.5 [12].



Gambar 2. 5 Perbandingan Penggunaan *Frequency* (a) FDM (b) OFDM [12]

Dalam OFDM, *multiple carrier* dipisahkan dengan jarak tertentu sehingga sinyal bisa diterima dengan memakai filter serta demodulator konvensional. Pemisahan antara *carrier* satu dengan *carrier* lain pada domain frekuensi dikenal sebagai *guard band*. Dengan adanya *guard band* ini bisa mengurangi efisiensi spektrum [13].

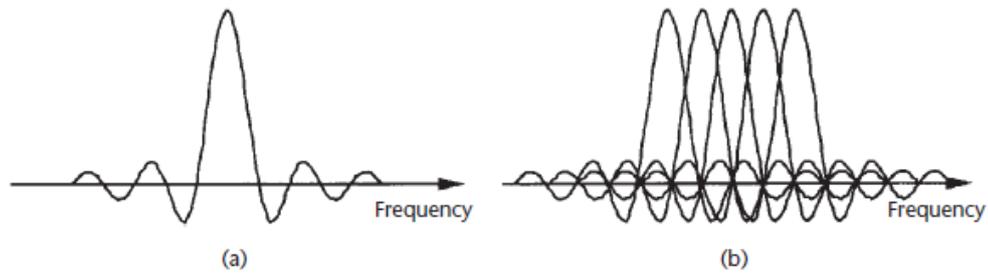
Terlihat di Gambar 2.5 teknik OFDM memberi manfaat pada efisiensi *bandwidth* dikarenakan tidak ada jarak *bandwidth* yang memisahkan antara *subcarrier* satu dengan yang lainnya. Untuk menjaga ortogonalitas, jarak minimal antara setiap frekuensi *subcarrier* harus setara dengan $1/T_s$, yang dapat diungkapkan dalam persamaan 2.4 [14].

$$\Delta f = \frac{1}{T_s} \tag{2.4}$$

Di mana Δf sebagai *spacing* frekuensi *carrier* dan T_s sebagai interval simbol OFDM, ke orthogonalan OFDM dapat dijelaskan menggunakan persamaan 2.5. Misalkan $X_m(t)$ merupakan fungsi *subcarrier* ke- m serta $X_n(t)$ merupakan fungsi *subcarrier* ke- n . Kedua *subcarrier* ini dianggap saling tegak lurus dengan yang lainnya di interval $a < t < b$ apabila mencapai keadaan berikut [14]:

$$\int_a^b X_m(t) * X_n(t) dt = 0 \tag{2.5}$$

Gambar 2.6 (a) memperlihatkan *spectrum* dari setiap *sub*-kanal secara individu, sementara (b) memperlihatkan sinyal OFDM merupakan hasil gabungan dari sejumlah *sub*-kanal pada rentang *frequency* yang sama dengan kecepatan transmisi di masing-masing *sub*-pembawa. Keseluruhan gambar yang dimaksud mengindikasikan dalam frekuensi pusat setiap *sub*-pembawa, tidak tersedia cakupan berhimpitan [13].



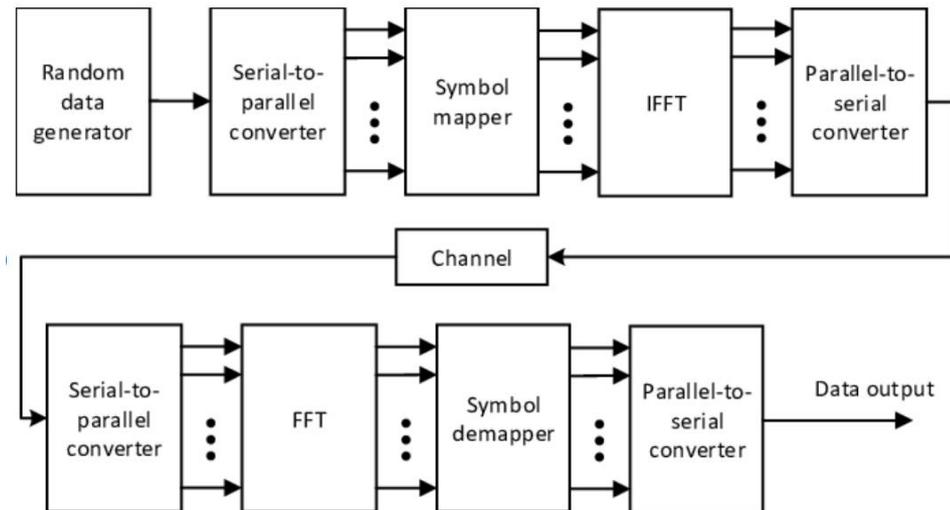
Gambar 2. 6 *Spectrum* OFDM (a) *Sub*-kanal OFDM (b) Sinyal OFDM [12]

OFDM memiliki sejumlah keunggulan, salah satunya adalah kemampuannya untuk mentransmisikan informasi dengan kecepatan bit yang tinggi. Teknik ini juga efektif dalam mengatasi kendala propagasi *multipath*, membantu beragam jalur ganda misalnya MC-CMDA, TDMA, dan FDMA, serta membantu beragam sistem *modulation*, serta memanfaatkan lebar pita dengan efektif. Disamping itu, OFDM sering dipakai dalam sistem komunikasi modern seperti DAB, DVB, HDSL, VHDSL, HDTV, serta teknologi 4G missal LTE dan WIMAX [15].

OFDM juga memiliki kekurangan. Sensitivitas yang tinggi pada *carrier frequency offset* yang dapat muncul karena *jitter* terhadap gelombang pembawa, serta rentan pada *Doppler effect* yang timbul akibat perpindahan *station* pengirim ataupun penerima. Disamping itu, OFDM mudah terpengaruh oleh *distorsi nonlinier* pada *amplifier* daya transmisi, serta sinyal OFDM sulit dalam melakukan sinkronisasi [15].

2.2.4.1 Konfigurasi OFDM

Gambar 2.7 memperlihatkan skema pengiriman dan penerimaan pada OFDM secara sederhana.



Gambar 2. 7 Block Diagram OFDM [16]

Langkah awal pentransmision sinyal dari pengirim diawali dengan pembangkitan bit bit, selanjutnya dimodulasikan menggunakan BPSK, QPSK, atau 16-QAM. Setelah itu, data dikonversikan dari format *serial to parallel*, dan memasuki ke dalam tahap IFFT. IFFT adalah langkah kunci dalam pembentukan simbol-simbol OFDM di sisi pengirim, di mana frekuensi di masing-masing informasi dibentuk *orthogonal*. Prosedur ini tujuannya adalah menciptakan simbol-simbol OFDM yang akan ditransmisikan melalui saluran komunikasi [16].

IFFT memiliki peran penting dalam memodifikasi *spectrum*, yaitu *phase* dan amplitudo, di masing-masing sinyal informasi dalam wujud sinyal *time domain*. Di *block* IFFT diperoleh sinyal yang disebut sebagai sinyal *multi carrier*. Untuk mengurangi *Intersymbol Interference* (ISI), sinyal *multi carrier* ini ditambahkan dengan *Cyclic Prefix* (CP). Penambahan CP memungkinkan pemulihan sinyal yang baik oleh penerima meskipun mengalami *fading interference* pada kanal yang cukup besar. Meskipun demikian, CP bisa mengakibatkan menurunnya kecepatan data karena meningkatnya simbol waktu pada OFDM serta membutuhkan tambahan daya berkaitan dengan peningkatan simbol waktu OFDM [16].

Sinyal OFDM sebelum dikirimkan, yang berbentuk *parallel* dikonversi menjadi serial. Sesudah melalui kanal, sinyal OFDM mengalami proses dari *serial to parallel* di sisi penerima. Pada sisi penerima, CP dihilangkan, dan sinyal *multi carrier* masuk ke dalam *block* FFT. FFT berfungsi dalam membagi *frequency*

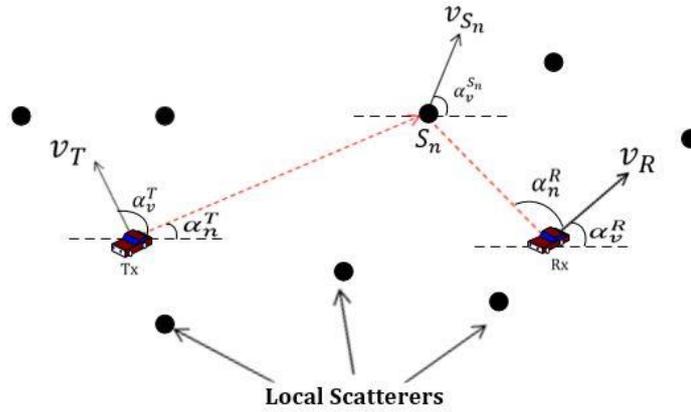
carrier terhadap simbol OFDM di bagian penerima sebelum dilakukan demodulasi serta pengembalian ke dalam bentuk bit informasi. Selain itu, FFT dipakai mengimplementasikan *discrete fourier transform* dengan lebih efisien dan lebih cepat. Dalam *block* FFT, sinyal *multi carrier* dirubah menjadi sinyal *subcarrier* yang berbentuk *parallel*. Sinyal informasi *subcarrier* selanjutnya melewati *block* paralel ke serial, diikuti oleh proses demodulasi untuk memperoleh kembali bit informasi [16]. Representasi sinyal OFDM dijelaskan seperti yang tertera berikut [17]:

$$OFDM \text{ signal} : c(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n(t) \sin(2\pi f_n t) \quad (2.6)$$

Dengan menggunakan notasi yang telah dijelaskan, sinyal OFDM $c(t)$ dapat direpresentasikan sebagai berikut: $s(t)$ merupakan simbol yang digambarkan dalam konstelasi tertentu, f_n merepresentasikan *frequency orthogonal* [17].

2.2.5 Pemodelan Kanal *Vehicle to Vehicle* (V2V)

Kanal V2V adalah representasi model kanal dihasilkan melalui pemodelan *geometry*. Dalam skenario ini, *transmitter* dan *receiver* melaju di kecepatan yang stabil serta dikelilingi oleh *scatterer*. Diperkirakan baik *transmitter* maupun *receiver*, serta *scatterer* yang bergerak di sekitarnya, memiliki kecepatan yang *random*. Dalam saluran V2V, arah propagasi dibagi menjadi 2 kondisi, pertama sinyal yang dikirimkan bebas hambatan *Line of Sight* (LOS) serta sinyal dipengaruhi oleh *scatterer* yang bergerak. Besaran *scatterer* di bagian *transmitter* dan *receiver* dapat bervariasi. Apabila sinyal di sisi pengirim tersentuh *scatterer*, akibatnya *scatterer* tersebut bakal memantulkan sinyalnya ke arah *receiver* [5].



Gambar 2. 8 Skenario Propagasi Kanal V2V [5]

Gambar 2.8 menggambarkan sistem komunikasi V2V di mana pengirim (*transmitter*) dan penerima (*receiver*) dikelilingi oleh *scatterer* lokal, yang disimbolkan dengan N . *Scatterer* lokal tersebut dilambangkan dengan simbol S_n ($n=1,2,\dots,N$), dan diperkirakan sisi pengirim dan penerima bergerak pada kecepatan stabil V_T beserta V_R ke arah yang sudah ditetapkan sudutnya α_v^T dan α_v^R . Setiap *scatterer local* bergerak pada kecepatan v_{S_n} yang bersifat *random* menuju arah yang ditentukan oleh $\alpha_v^{S_n}$. Sinyal yang dipancarkan dari pemancar merambah ke arah *scatterer* kemudian dipantulkan ke semua arah demikian juga termasuk penerima. Sinyal masuk dari pemancar dilambangkan dengan sudut keberangkatan (AoD) α_n^T mencapai ke penerima dengan sudut datangnya (AoA) α_n^R setelah sekali pantulan oleh S_n yang bergerak ke- n di sekitar area propagasi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8 dalam model ini penguatan saluran dihitung dengan mengikuti simbol [5].

$$\mu(t) = \sum_{n=1}^N c_n e^{j(2\pi f_n + \theta_n)} \quad (2.7)$$

Kanalnya disimbolkan dengan $\mu(t)$ nilainya adalah $n=1=N$ sejumlah n , jumlah *scatterer* kemudian dari faktor redaman yang dirumuskan sebagai $c_n = \sigma_0 \sqrt{2/N}$ yang merupakan campuran dari semua redaman disebabkan oleh

semua *scatterer*. Parameter θ_n disebabkan pergeseran fasa dengan adanya *scatterer* di sekitar pemancar dan penerima. Sedangkan parameter f_n adalah total *Doppler Shift* yang disebabkan oleh *Doppler Shift* di sisi pemancar, penerima dan *scatterer*. Perhitungan parameter *Doppler Shift* ini dinyatakan sebagai berikut [5]:

$$f_n = f_n^T + f_n^{TS} + f_n^{SR} + f_n^R \quad (2.8)$$

Parameter f_n^T didefinisikan sebagai *Doppler Shift* dari pemancar. Parameter f_n^{TS} adalah *Doppler Shift* hasil dari interaksi antara pemancar dan *scatterer* yang bergerak. f_n^{SR} adalah *Doppler Shift* sebagai hasil dari interaksi antara *scatterer* dan penerima sedangkan f_n^R adalah *Doppler Shift* dari sisi penerima. Masing-masing Efek *Doppler* dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$f_n^T = f_0 \frac{v_T}{c_0} \cos(\alpha_v^T - \alpha_n^T) \quad (2.9)$$

$$f_n^{TS} = f_0 \frac{v_T}{c_0} \cos(\alpha_v^T - \alpha_n^T) \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} f_n^{SR} &= (f_0 + f_n^{TS}) \frac{v_{S_n}}{c_0} \cos(\pi + \alpha_v^{S_n} - \alpha_n^R) \\ &\approx f_0 \frac{v_{S_n}}{c_0} \cos(\alpha_v^{S_n} - \alpha_n^R) \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} f_n^R &= (f_0 + f_n^{SR}) \frac{v_R}{c_0} \cos(\alpha_v^R - \alpha_n^R) \\ &\approx f_0 \frac{v_R}{c_0} \cos(\alpha_v^R - \alpha_n^R) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Kemudian kesatuan akhir dari rumus sebelumnya menghasilkan bentuk final total *Doppler Shift* [5]:

$$f_n = \frac{k_0}{2\pi} \left[\begin{array}{l} v_T \cos(\alpha_v^T - \alpha_n^T) - v_{Sn} (\cos(\alpha_n^T - \alpha_v^{Sn}) + \cos(\alpha_v^{Sn} - \alpha_n^R)) \\ + v_R \cos(\alpha_v^R - \alpha_n^R) \end{array} \right] \quad (2.13)$$

dengan parameter $k_0 = 2\pi \frac{f_0}{c_0}$ adalah jumlah gelombang ruang bebas [5].

2.2.6 DERAU AWGN

Additive White Gaussian Noise (AWGN) adalah jenis derau umumnya muncul dalam sistem komunikasi. AWGN sering dinamakan sebagai derau putih dikarenakan *spectrum* frekuensinya menyebar secara rata di setiap nilai frekuensi, mirip dengan spektrum cahaya putih [18].

Sesuai dengan artinya, AWGN memiliki beberapa makna khusus. Pertama, sifatnya adalah *additive* artinya penjumlahan *noise* dengan sinyal. Kedua, sifat *white* pada *noise* mengindikasikan bahwa *noise* tersebut tidak bergantung pada frekuensi operasi sistem serta mempunyai rapat daya yang stabil. Ketiga, istilah *Gaussian* menunjukkan bahwa besar tekanan *noise* mempunyai probabilitas yang terdistribusi secara *Gaussian* [14].

$$P(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{n-m}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.14)$$

di mana:

- $P(n)$ = Probabilitas munculnya *noise*
- σ = Standar deviasi
- m = Rata-rata (*mean*)
- π = Konstanta nilai 3,14
- n = Variabel (bisa tegangan atau daya sinyal)
- σ^2 = Varian dari $n(t)$

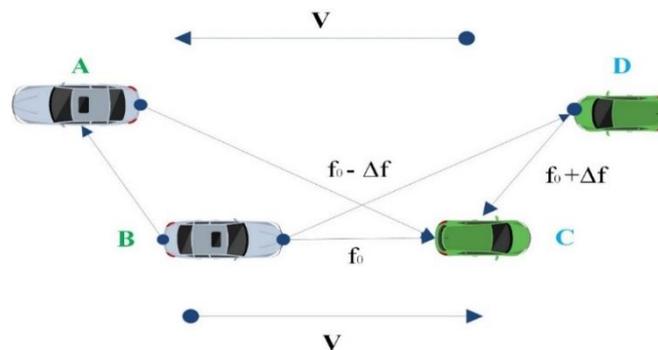
Karakteristik *White Gaussian Noise* yaitu bahwa nilai *Power Spectral Density* (PSD) adalah sama pada semua nilai *frequency* dalam sistem komunikasi, sering dinamakan sebagai distribusi *uniform* [14].

2.2.7 EFEK DOPPLER

2.2.7.1 Doppler Shift

Pada waktu *transmitter* dan *receiver* saling komunikasi dan bergerak, transmisi pada frekuensi mengalami perubahan akibat pergerakan dari keduanya. Jika *transmitter* dan *receiver* menjauhi satu sama lain, frekuensi pemancar akan mengalami penurunan. Akan tetapi, jika *transmitter* dan *receiver* saling mendekat satu sama lain, perubahan frekuensi menjadi lebih besar. Peristiwa berikut dikenal dengan nama *Doppler effect* [19].

Doppler effect dapat diilustrasikan dengan Gambar 2.9, di mana mobil B dan C bergerak satu arah menuju kiri pada kecepatan (V) sama, sehingga tidaklah terdapat *Doppler effect* (f_0). Di saat mobil A dan C bergerak bersama-sama melawan arah serta menjauhi pada kecepatan (V) yang beragam, sehingga terjadi *Doppler shift* pada perubahan frekuensi $f_0 - \Delta f$. Sementara itu, mobil C dan D gerakannya saling mendekat, menyebabkan pergeseran frekuensi menjadi $f_0 + \Delta f$ [19].



Gambar 2. 9 Doppler Shift [19]

Doppler Shift menunjukkan bergesernya *frequency* sisi domain dikarenakan adanya gerakan di sisi penerima atau *Doppler effect*. *Doppler Shift* dapat menaikkan lebar pita sinyal transmisi yang dikirimkan. Persamaannya dirumuskan dibawah ini [19]:

$$\Delta f = f_d = \pm f_c \frac{v}{c} \cos \beta \quad (2.15)$$

Keterangan:

f_d = Doppler Shift (GHz)

f_c = Frekuensi Pembawa (5,8 GHz)

v = Kecepatan Mobil (m/s)

c = Kecepatan gelombang elektro magnetik (3×10^8 m/s)

β = Sudut gerak diantara *transmitter* dan *receiver*

Persamaan diatas menerangkan bahwa untuk nilai Δf bernilai maksimal saat nilai $\beta = 0$.

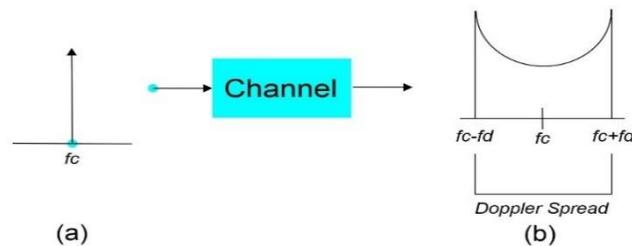
2.2.7.2 Doppler Spread

Gambar 2.10, menggambarkan keadaan sistem komunikasi dengan pencapaian pada jangkauan frekuensi f_c khusus (a). *Carrier frequency* (f_c) melaju ke dalam saluran memakai model kanal *vehicle to vehicle*. Akibat pergerakan ini, maka timbul pelebaran *frequency spectrum* dikarenakan adanya *Doppler effect*, yang dibuat lebih parah oleh pengaruh *multipath*, seperti ditunjukkan di bagian (b). Apabila *frequency* f_c dijumlahkan pada f_d ($f_c + f_d$), spektrum memperlebar ke arah kanan. Sebaliknya, Apabila f_c dikurangkan pada f_d ($f_c - f_d$), spektrum memperlebar ke arah kiri. Peristiwa ini dikenal sebagai *Doppler spread*, yang juga dinamakan perpindahan *Doppler shift* maksimal dikarenakan keadaan *Doppler shift* bisa menaikkan lebar pita sinyal transmisi [19].

$$B_d = 2 f_d \quad (2.16)$$

B_d = *Doppler spread* atau Lebar Pita Koheren (Hz)

β = *Frekuensi Doppler / Doppler Shift* (Hz)



Gambar 2. 10 Doppler Spread [19]

2.2.8 Ekualisasi

Proses ekualisasi merupakan langkah untuk menemukan respons yang dapat mengatasi efek kanal. Pada tahap estimasi kanal, matriks respons kanal diperoleh. Ekualisasi umumnya digunakan baik pada *time domain* ataupun *frequency domain*

pada sistem komunikasi konvensional. Dalam *time domain*, seperti pada sistem FDM konvensional, ekualisasi benar-benar dibutuhkan sebagai penyeimbang untuk karakteristik kanal. Di sisi *receiver*, ekualisasi menimbulkan ciri khas yang bertentangan dengan kanal supaya dapat menyeimbangkan ISI disebabkan oleh variasi waktu dari kanal *multipath*. Akan tetapi, ekualisasi pada domain frekuensi adalah cara supaya ICI berkurang dalam estimasi kanal. Keadaan ini diakibatkan oleh dampak dari sisa *frequency offset* serta bergesernya *Doppler effect*, khususnya terjadi dalam saluran yang mengalami perubahan dengan cepat [4].

2.2.8.1 Zero Forcing (ZF)

ZF adalah salah satu tipe ekualisasi sangat sederhana. Penerapan ZF relatif mudah, yang melibatkan penggunaan matriks kanal H dan matriks W untuk menggambarkan tahap linier pada *receiver*. Dalam ZF, terdapat persyaratan yang harus dipenuhi [4]:

$$WH = 1 \quad (2.17)$$

Untuk memastikan bahwa masing-masing komponen dikehendaki pada simbol data bisa terdeteksi, dibutuhkan suatu tahapan untuk mengeliminasi *interference* hingga mencapai nilai 0. Matriks W dalam *Zero Forcing* adalah *Pseudo Invers* (PI) dari matriks kanal H , sebagaimana dinyatakan dalam rumus dibawah ini [4]:

$$W_{ZF} = H^{-1} \text{ untuk } N_{TX} = N_{RX} \quad (2.18)$$

$$W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H \text{ untuk } N_{TX} \neq N_{RX} \quad (2.19)$$

Menggunakan notasi H^H untuk menyatakan konjugat *transpose matriks* H , PI didefinisikan ketika jumlah *antenna* pengirim (N_{TX}) lebih kecil atau sama dengan jumlah *antenna* penerima (N_{RX}). Akan tetapi, jika N_{TX} lebih besar dari N_{RX} , matriks $H^H H$ nilainya singular, maka lawanannya tidak dapat didefinisikan [4].

2.2.9 Bit Error Rate (BER)

BER adalah pengukur parameter kehandalan sinyal, diukur untuk memadankan total kekeliruan bit yang didapat dari total bit dikirim selama tahapan

transmisi informasi oleh *transmitter to receiver*. Kinerja sistem komunikasi dianggap handal apabila nilai BER diperoleh kecil, yang berarti total bit yang keliru lebih sedikit. BER bisa terbilang menggunakan rumus (2.20) [20]:

$$BER = \frac{\text{Jumlah bit Error}}{\text{Jumlah total bit kirim}} \quad (2.20)$$

Pada dasarnya, nilai BER memiliki hubungan yang setara dengan nilai *Symbol Error Rate* (SER). Yaitu, makin besar nilai SER, maka nilai BER juga semakin besar. SER bisa dihitung, caranya membandingkan simbol di bagian penerima dengan simbol keluaran yang dikirim. Kaitan antara BER dengan SER terkait nilai level *modulation* sistem *M-ary* yang dipakai. Perbandingan antara BER dengan SER dinyatakan pada rumus (2.21) [20]:

$$\frac{1}{k} \leq \frac{P_B}{P_S} \leq \frac{2^{k-1}}{2^{k-1}} = \frac{M/2}{M-1} \quad (2.21)$$

Notasi P_B menyatakan BER, P_S menyatakan nilai SER, $M=2^k$ merupakan level *modulation* sistem *M-ary*, serta k yaitu orde modulasi. Oleh karena itu, untuk sistem BPSK pada simulasi nilai $M=2$ dan $k=1$ [15]. BER BPSK *modulation* dengan AWGN dalam penelitian ini dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [20]:

$$P_e = \frac{1}{2} \times \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (2.22)$$

Di mana E_b/N_0 = Energi bit per *noise* (dB)