

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini dideskripsikan perkembangan hasil penelitian terkini. Berbagai penelitian terkait dengan pemrosesan sinyal dan penemuan metode penghilang interferensi banyak dilakukan dalam kurun waktu 5 tahun terakhir. Berdasarkan jurnal ilmiah yang mempunyai kaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, ditemukan banyak teori, metode, metode maupun instrumen yang dapat memberi andil dalam menghilangkan sinyal interferensi.

2.1 Tinjauan Pustaka

Kebutuhan akan teknologi komunikasi nirkabel yang sangat besar menuntut adanya berbagai inovasi dan pengembangan. Pembaharuan terus dilakukan melalui penelitian. Terdapat banyak metode yang ditawarkan guna menghilangkan sinyal interferensi.

Sejalan dengan kebutuhan untuk membatalkan sinyal pengganggu, metode *Sphere Decoding (SD)* telah disimulasikan dan hasilnya menunjukkan performa yang serupa dengan metode *Maximum Likelihood Detection (MLD)*. Hal pembeda antara kedua metode ini adalah metode *Sphere Decoding* menunjukkan tingkat kompleksitas yang lebih rendah dibandingkan metode *MLD* (Jeon dkk, 2017)

Pada tahun 2017, Xueru dkk melakukan penelitian mengenai skema *MMSE (Minimum Mean Square Error)* yang mencakup detector *MMSE* uplink dan precoder *M-MMSE* downlink. Algoritme yang diusulkan menghasilkan perolehan nilai *error* yang rendah dengan kebutuhan alokasi daya yang lebih kecil. Kekurangan dari penelitian ini adalah jumlah algoritma yang sangat banyak dan membutuhkan waktu simulasi yang Panjang (Xueru dkk, 2017).

Pemikiran lain dilakukan oleh Sun dkk pada tahun 2018 yaitu berupa pemberian pelatihan (*training*) terhadap *deep neural network (DNN)* sebagai langkah manajemen interferensi. Langkah yang ditempuh berupa penggunaan

metode dan simulasi pada antenna di stasiun pengirim (*transceiver*). Penelitian ini menunjukkan bahwa ada kondisi di mana suatu metode dapat dipelajari oleh DNN dapat dilakukan optimasi terhadap sinyal interferensi (Sun dkk., 2018).

Perbandingan metode pada *receiver* juga dilakukan dengan menggunakan simulasi 256 QAM, melihat nilai Bit Error Rate (BER) nya serta meneliti faktor-faktor yang mempengaruhi sinyal tersebut. Hasil dari penelitian ini adalah metode ini dapat mengurangi jumlah pencarian angka sebesar 3.6% dibandingkan metode *MLD* dengan perbedaan performa sebesar 0.5dB (Fernandes dkk, 2020)

Sebuah penelitian dilakukan dengan membuat desain struktural pada pemancar sinyal (*transceiver*). Desain ini cocok diimplementasikan dalam sistem *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). OFDM adalah satu metode transmisi yang memungkinkan spektrum sinyalnya dipisahkan ke dalam beberapa frequency subcarrier yang saling tegak lurus (*ortogonal*). Desain struktural yang dikemukakan oleh Huberman ini mampu meningkatkan dimensionalitas pada antenna pemancar. Dengan begitu, proses penghilangan sinyal pengganggu dan *forward beamforming* akan terjadi secara bersamaan di *transmitter*. Desain struktural ini mengimplementasikan skema *pre-processing* seperti QR *decomposition* (QRD), *Sorted QRD* (SQRD) dan *MMSE-SQRD* (Tseng dan Shen, 2017).

Penelitian lain pada tahun 2016 menunjukkan bahwa terdapat pendekatan lain dalam menekan tingkat gangguan pada sinyal dalam sistem komunikasi. Yan menyebutkan bahwa pendekatan berbasis dua langkah yang disebut *minimum mean squared error* (MMSE) dapat direalisasikan untuk memitigasi gangguan sinyal dan deteksi *MIMO*. Keuntungan dari pendekatan ini adalah kemampuan untuk melakukan sinkronisasi sinyal seperti pendeteksian paket, sinkronisasi waktu, dan estimasi kanal untuk dilakukan tanpa adanya informasi kanal yang lengkap. Di dalam pendekatan berbasis dua langkah *MMSE*, metode ini dieksekusi dalam dua tahap yaitu tahap *pre-filtering operation* dan tahap *second-step filter*. Tahap *pre-filtering operation* mengolah informasi sinyal diperkirakan tanpa adanya urutan *sequence*. Sedangkan tahap *second-step filter* menggunakan informasi dari tahap pra-filter serta memprediksi kanal yang dihitung selama

sinkronisasi data. Kedua tahap dalam pendekatan berbasis *MMSE* ini menunjukkan bahwa kinerja BER naik sebesar 0,5 dB dari pendekatan *MMSE* terdahulu. Meskipun peneliti mampu membangun sistem komunikasi dengan kinerja yang baik, pendekatan berbasis dua langkah *MMSE* ini dirasa terlalu kompleks dan tidak optimal dalam penggunaan waktu (Yan, 2016).

Dong mengkombinasikan *space-time code* and *code word space alignment* pada sistem *MIMO*. Kode yang digunakan memanfaatkan *Alamouti Code* untuk mengeliminasi gangguan. Penelitian ini tidak memerlukan informasi status kanal sehingga jumlah umpan balik (*feedback*) berkurang secara signifikan (Dong dan Xinji, 2016).

Pengamatan *MIMO* metodes menggunakan berbagai metode seperti *ZF*, *MMSE*, *KBest*, *Trellis*, *SD* dan *MLD* telah dilakukan di IEEE802.11ac 40MHz dengan laju data sebesar 1.266Gbps pada model kanal kamar kecil. Hasilnya menunjukkan bahwa *ZF* dan *MMSE* adalah metode dengan tingkat kompleksitas dan kinerja yang rendah sedangkan metode *k-best*, *Trellis*, dan *SD* memiliki kinerja yang lebih baik dengan tingkat kompleksitas yang lebih tinggi. Metode *MLD* menunjukkan kinerja terbaik dengan biaya implementasi serta kompleksitas yang tinggi (Syafei, 2016).

Untuk mengoptimalkan proses penghilangan sinyal pengganggu, sebuah studi mengusulkan metode *two-steps modified minimum mean square error (MMSE)* untuk sistem *multi-user multiple input multiple output (MU-MIMO)*. Langkah pertama dalam metode ini adalah menggunakan skema pra-filter untuk meningkatkan kualitas sinkronisasi sinyal lalu menggunakan filter kedua untuk mengestimasi sinyal asli yang telah ditransmisikan. Metode ini menggunakan *gaussian posteriori simbol probability* untuk menekan gangguan dan mendapatkan kinerja BER yang lebih baik. Hasilnya menunjukkan gangguan menjadi 0,5 dB lebih rendah dari solusi *MMSE* klasik sebelumnya (Liu dan Xiao, 2018).

Metode *k-best detection* juga dapat dimanfaatkan dalam usaha mengurangi sinyal gangguan. Penelitian yang dilakukan pada tahun 2018 ini mengkombinasikan metode estimasi dan pendekatan sortir paralel untuk

mengurangi kompleksitas pada metode tersebut. Dengan mengadopsi *pipelined configuration* dan mengimplementasikan metode tersebut pada Xilinx Virtex-6, hasilnya menunjukkan percepatan laju data hingga 2.8 Gbps. Penelitian yang menggunakan empat antena dengan modulasi 64QAM ini mengklaim bahwa performa yang tinggi dalam membatalkan sinyal gangguan dapat diraih dengan penggunaan daya yang rendah (Ramakrishna dan Anil Kumar, 2018).

Pada tahun 2019, Mohammed mensimulasikan metode *SIC* berbasis kanal pilot (*pilot-based channel*). Metode yang disimulasikan berupa metode *decision directed* (DD), *linear interpolation*, *second-order interpolation*, *discrete Fourier transform* (DFT) *interpolation*, dan *minimum mean square error* (MMSE) *interpolation*. Meskipun hasil simulasi menunjukkan bahwa metode DD adalah metode yang memiliki performa terbaik, metode DD membutuhkan biaya implementasi yang sangat tinggi (Mohammed, 2019).

Inovasi dalam penemuan metode penghilang interferensi yang paling optimal perlu dilakukan mengingat belum adanya metode yang mumpuni dalam menghilangkan interferensi pada WLAN IEEE802.11ac. Penelitian ini membandingkan metode linear dan non linear dimana masing-masing metode tersebut memiliki tingkat kompleksitas dan nilai implementatif yang berbeda.

2.2 Dasar Teori

Bab ini menjelaskan dasar teori yang digunakan untuk menemukan metode penghilang interferensi yang paling optimal dengan kompleksitas yang tidak terlalu tinggi. Dasar teori yang dimuat meliputi standar komunikasi nirkabel dari waktu ke waktu, metode *MIMO* dalam pengolahan sinyal pada *receiver* serta metode linear dan metode non linear yang digunakan dalam simulasi metode penghilang interferensi.

2.2.1 Standard *Wireless* LAN IEEE 802.11ac

IEEE 802.11ac adalah standar jaringan Wi Fi generasi kelima yang dirilis pada bulan Desember 2013. Standar ini memiliki kecepatan *data rates* hingga 7 Gbps dengan pita frekuensi 5 GHz. Hal ini menyebabkan IEEE 802.11ac memiliki

kecepatan sepuluh kali lebih cepat dari standar yang telah dikeluarkan sebelumnya. IEEE 802.11ac juga menawarkan teknologi antena dengan *Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO)* dua kali lipat lebih banyak dari IEEE 802.11n, sehingga metode transmisi sinyalnya lebih baik dibandingkan dengan teknologi *wireless LAN* sebelumnya yaitu IEEE 802.11a, b, g dan n. Standar 802.11ac menggunakan kanal yang lebih luas sehingga mampu mendukung lebih banyak pengguna. Apabila metode multi-user *MIMO* diimplementasikan pada sistem telekomunikasi dalam ruangan (*indoor*), maka kisaran jangkauan minimal yang dapat diraih adalah 35m (Yang dan Zhu, 2018).

Pada implementasinya, Standar WLAN 802.11ac memiliki peningkatan laju data (*throughput*) yang tinggi. Kombinasi antara metode modulasi *multi-user MIMO* dan WLAN 802.11ac dapat memberikan peningkatan *throughput* hingga 3 kali lebih tinggi dari standar sebelumnya yaitu 802.11n. WLAN 802.11ac menggunakan kanal yang lebih lebar untuk mendukung pengiriman data lebih banyak. Untuk standar sebelumnya 802.11n hanya memiliki kanal 40MHz, sedangkan pada 802.11ac meningkat 2 kali lipat menjadi 80 MHz dengan pilihan untuk menaikkan jumlah kanal hingga 160 MHz sehingga *bandwidth*-nya pun menjadi lebih besar seperti yang tertera pada tabel 2.1. Selain itu, modulasi yang digunakan juga berbeda dari sebelumnya, yaitu modulasi QAM yang 4 kali lebih efisien daripada 802.11n. Oleh karena itu WLAN 802.11ac disebut sebagai sistem komunikasi nirkabel dengan laju data yang sangat tinggi (*very high throughput*). WLAN 802.11a/g dapat memberikan *maximum data rate* mencapai 54 Mbps dan WLAN 802.11n, menjanjikan kenaikan *data rate* hingga 600 Mbps. Sedangkan untuk WLAN 802.11ac dapat menjanjikan kenaikan *data rate* mencapai 6,9 Gbps. Tabel 2.1 menjelaskan secara rinci perbandingan antara masing-masing lapisan jaringan 802.11 (Liu, dkk 2016).

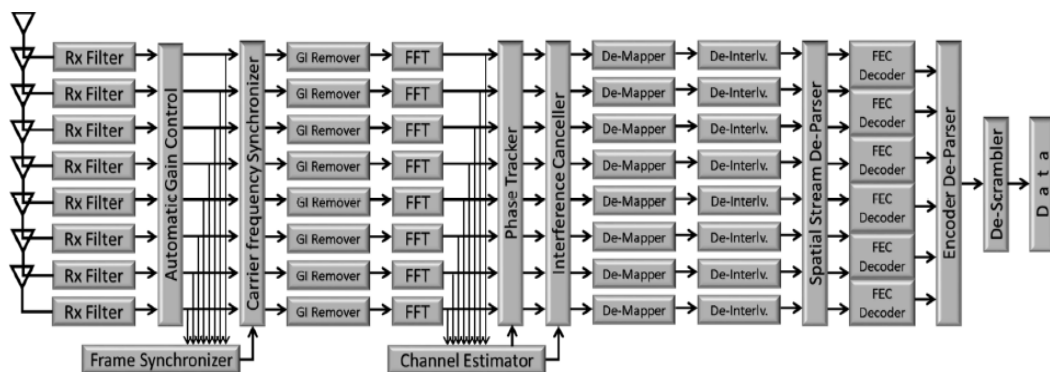
Tabel 2.1 Perbandingan antara IEEE 802.11a, b, g, n dan ac (Qualcomm, 2020)

Standar Physical Layer Jaringan 802.11								
Protokol 802.11	Tanggal Rilis	Frekuensi (GHz)	Pita lebar (MHz)	Aliran Laju	<i>MIMO</i> stream yang diijinkan	Teknologi Modulasi Antena	Jangkauan	
				Data Min-Maks (Mbit/s)			In (m)	Out (m)
802.11	Juni 1997	2,4	22	1-2	1	DSSS, FHSS	20	100
a	September 1999	5	20	6-54	1	OFDM (SISO)	35 -	120 5K
b	September 1999	2,4	20	1-11	1	DSSS (SISO) OFDM,	35	140
g	Juni 2003	2,4	20	6-54	1	OFDM, DSSS (SISO)	38	140
n	Oktober 2009	2,4/5	20	7.2-72.2 (6.5-65)	4	OFDM (<i>MIMO</i>)	70	250
			4	15-150 (13.5-135)			70	250
ac	Desember 2013	5	20	7.2 -96.3 (6.5-86.7)	8	OFDM (MU- <i>MIMO</i>)	35	
			40	15 - 200 (13.5 -180)			35	
			80	32.5 - 433.3 (29.2 - 390)			35	
			160	65 - 866.7 (58.5 - 780)			35	

Standar Wi-Fi sebelumnya seperti 802.11 b/g/n beroperasi pada frekuensi 2.4 GHz, tetapi penggunaan sistem komunikasi pada frekuensi tersebut lebih

rentan terhadap gangguan. WLAN IEEE 802.11ac beroperasi pada frekuensi 5 GHz yang relatif memiliki nilai gangguan yang lebih kecil dengan lebih banyak kanal yang tidak saling tumpang tindih (*overlapping*). IEEE 802.11ac menyediakan pilihan penggunaan *bandwidth* 80 MHz dan 160 MHz. *Bandwidth* 80 MHz dapat dibentuk dengan menggabungkan dua kanal 40 MHz yang berdekatan dan tidak saling tumpang tindih, sedangkan kanal 160 MHz dapat dibentuk dengan menggabungkan dua 80 MHz yang berdekatan. Dalam mode 160 MHz, laju data maksimum yang dapat dicapai menggunakan delapan aliran spasial, 256 QAM modulasi, dan kode *rate* 5/6 adalah 6.933 Gbps (Qualcomm, 2020).

Pembaharuan yang perlu dipertimbangkan dalam mengimplementasikan WLAN IEEE 802.11ac adalah penggunaan beberapa antenna pada *transmitter* dan *receiver* sebagai pemanfaatan metode MU-MIMO. Konfigurasi beberapa antenna pada *transmitter* dan atau *receiver* dapat meningkatkan kapasitas dan kinerja sistem komunikasi nirkabel. Diagram blok *receiver* WLAN IEEE 802.11ac yang dilengkapi dengan *interference canceller* ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Blok diagram penerima WLAN 802.11ac 8 antenna

Gambar 2.1 menunjukkan proses pengolahan sinyal yang dimulai dari filter *receiver* hingga proses akhir berupa data yang siap dibaca. Fungsi dari masing-masing bagiannya adalah:

- a) *Rx Filter* berfungsi untuk menyaring dan menyeleksi frekuensi yang bisa melewati filter.

- b) *Automatic Gain Control* berfungsi untuk memperkuat atau memperlemah sinyal dimana apabila sinyal yang masuk terlalu lemah maka secara otomatis rangkaian *Automatic Gain Control* (AGC) akan menguatkan sinyal masukan tersebut. Apabila sinyal masukan terlalu kuat maka secara AGC akan melemahkan sinyal masukan tersebut.
- c) *Carrier Frequency Synchronizator* adalah proses dimana *receiver* mengadaptasi frekuensi dari sinyal yang diterima.
- d) *GI Remover* merupakan proses dimana interval penjaga (GI) data dihapus dari bidang data lalu data payload yang terkandung dalam pembagian frekuensi ortogonal simbol *domain multiplexing* (OFDM) diekstraksi.
- e) *Fast Fourier Transformation (FFT)* digunakan untuk mengubah waktu simbol OFDM domain menjadi data payload domain frekuensi. Output dari estimator kanal ini dimasukkan ke dalam fase berikutnya yaitu *phase tracker* dan *interference canceller*.
- f) *Phase Tracker* berfungsi sebagai kompensasi pergeseran fase yang dialami oleh data yang didapatkan dari kanal nirkabel *MIMO*.
- g) *Interference Canceller* digunakan untuk membatalkan semua sinyal pengganggu yang muncul bersamaan dari data atau sinyal yang diterima. Pada fase inilah metode linear dan non-linear SIC diimplementasikan. Terdapat metode *ZF* dan *MMSE* pada metode linear. Sedangkan pada metode non-linear terdapat Metode *SD*, *k-best* dan *MLD*.
- h) *De-Mapper* bertugas untuk mengembalikan sinyal digital menjadi bentuk bit.
- i) *De-Interleaver* bertugas untuk mengembalikan urutan bit menjadi bentuk awal.
- j) *Scrambler* berfungsi mengacak data untuk mengurangi kemungkinan urutan panjang yang hanya terdiri dari 1 atau 0.
- k) *Spatial Stream De-Parser* digunakan untuk membagi delapan aliran bit menjadi enam aliran bit dengan aturan round robin. Di sini, enam *Forward Error Correction (FEC) metode* dibutuhkan untuk mencapai jumlah integer dari blok setiap *FEC metode* per simbol OFDM. Proses ini menggunakan *Soft Viterbi Algorithm* untuk men-decode data yang diterima.

- l) *Encoder De-parser* digunakan untuk *de-multiplex stream* enam bit dari enam *FEC metode* menjadi satu aliran bit menggunakan *round robin rule*.
- m) *De-Scrambler* digunakan untuk mengembalikan data menjadi urutan bit asli (Syafei dkk, 2019).

2.2.2 Interferensi

Pada sistem komunikasi digital, interferensi diartikan sebagai sinyal lain yang tidak diinginkan yang mempengaruhi atau mengganggu sinyal informasi yang ditransmisikan kepada *receiver*. Gangguan tersebut dapat berupa sinyal lain yang memancarkan daya atau energi pada pita frekuensi yang sama dengan suatu sinyal informasi yang sebenarnya. Interferensi akan mempengaruhi besar daya sinyal yang diterima pada *receiver*. Besarnya suatu tingkat interferensi akan bergantung pada jarak antara *receiver* dan *transmitter*. Interferensi adalah sinyal dengan frekuensi yang sama atau berdekatan dan berasal dari antenna yang jumlahnya banyak. Semua antenna yang memancar pada frekuensi yang sama menimbulkan interferensi (Bule dkk, 2020).

Dalam teknologi komunikasi digital, interferensi terbagi menjadi 3 macam diantaranya sebagai berikut:

1. Interferensi *Co-Channel* adalah interferensi yang disebabkan oleh sinyal frekuensi carrier sama dengan sinyal informasinya.
2. Interferensi *Adjacent Channel* adalah interferensi yang disebabkan oleh pengaruh dari frekuensi kanal yang berdekatan.
3. Interferensi dari sistem lain adalah interferensi yang disebabkan oleh sistem atau perangkat lain yang mempunyai alokasi dan frekuensi sama atau berdekatan (Xiaolei dkk, 2021)

2.2.3 MIMO

Gagasan awal metode *MIMO* dikembangkan oleh A.R. Kaye dan D.A. George pada tahun 1970 dan oleh W.van Etten pada tahun 1975 hingga 1976. Arogyaswami Paulraj dan Thomas Kailath mengusulkan konsep *Multiplexing Spatial* (SM) menggunakan *MIMO* pada tahun 1992. Konsep *Multiplexing Spatial*

ini dipatenkan di AS dengan nomor paten 5.345.599. Pada tahun 1996, Greg Raleigh dan Gerard J. Foschini memperbaiki pendekatan baru teknologi *MIMO*. Bell Laboratories membuat sebuah purwarupa teknologi *MIMO* pada tahun 1984 (Foschini, 1996).

MIMO menggunakan beberapa antena pada *transmitter* dan *receiver* untuk meningkatkan performansi komunikasi data (Gao dan Sanada, 2019). Berikut adalah persamaan *MIMO* yang menunjukkan bagaimana antena pada *transmitter* (N_t) dan *receiver* (N_r) saling berkomunikasi. Sinyal vektor yang ditransmisikan melalui kanal di simbolkan dengan $\{x_1 x_2 x_3 \dots x_{N_t}\}^T$ dan \mathbf{H} adalah *channel gain matrix of order* dan *channel gains* yang disimbolkan dengan $N_t \times N_r$, h_{ij} . i dan j menerima penguatan antena dan mengirimkan penguatan antena secara acak. Normalisasi dilakukan jika elemen \mathbf{H} acak. Dengan mengirimkan *sequence* tertentu, \mathbf{H} dapat diterima di *receiver* (Khan dkk, 2017).

Sistem dengan 8 antena pengirim dan 8 antena penerima dapat dijabarkan secara matematis dan dalam notasi vektor, dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
Y_1 &= H_{11} \cdot S_1 + H_{12} \cdot S_2 + \dots + H_{18} \cdot S_8 + N_1 \\
Y_2 &= H_{21} \cdot S_1 + H_{22} \cdot S_2 + \dots + H_{28} \cdot S_8 + N_2 \\
Y_3 &= H_{31} \cdot S_1 + H_{32} \cdot S_2 + \dots + H_{38} \cdot S_8 + N_3 \\
Y_4 &= H_{41} \cdot S_1 + H_{42} \cdot S_2 + \dots + H_{48} \cdot S_8 + N_4 \\
Y_5 &= H_{51} \cdot S_1 + H_{52} \cdot S_2 + \dots + H_{58} \cdot S_8 + N_5 \\
Y_6 &= H_{61} \cdot S_1 + H_{62} \cdot S_2 + \dots + H_{68} \cdot S_8 + N_6 \\
Y_7 &= H_{71} \cdot S_1 + H_{72} \cdot S_2 + \dots + H_{78} \cdot S_8 + N_7 \\
Y_8 &= H_{81} \cdot S_1 + H_{82} \cdot S_2 + \dots + H_{88} \cdot S_8 + N_8
\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{16} & H_{17} & H_{18} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{26} & H_{27} & H_{28} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{36} & H_{37} & H_{38} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{46} & H_{47} & H_{48} \\ H_{51} & H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{56} & H_{57} & H_{58} \\ H_{61} & H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{65} & H_{66} & H_{67} & H_{68} \\ H_{71} & H_{72} & H_{73} & H_{74} & H_{75} & H_{76} & H_{77} & H_{78} \\ H_{81} & H_{82} & H_{83} & H_{84} & H_{85} & H_{86} & H_{87} & H_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \\ S_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \\ N_5 \\ N_6 \\ N_7 \\ N_8 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Sistem *MIMO* pada persamaan (2.1) dapat ditulis menjadi:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{HS} + \mathbf{N} \quad (2.2)$$

2.2.4 Metode *MIMO*

Sebagian besar perancang perangkat *receiver* WLAN IEEE 802.11ac menerapkan metode yang sederhana untuk membatalkan sinyal interferensi. Hal ini dilakukan untuk memenuhi kebutuhan pasar dengan ongkos produksi yang tidak terlalu tinggi. Pada sisi lain, untuk memenuhi kebutuhan komunikasi berkinerja tinggi, biasanya diperlukan untuk instansi militer, sebagian desainer merancang perangkat *receiver* WLAN IEEE802.11ac dengan menggunakan metode non-linear. Meskipun terjadi peningkatan kerumitan secara aplikatif serta biaya yang dibutuhkan menjadi lebih besar, metode ini dinilai mampu membatalkan gangguan lebih baik daripada metode linear (Eldan Perahia dan Robert Stacey, 2017).

2.2.5 Metode Linier

Pada dasarnya, metode linier bekerja dengan cara menghilangkan sinyal pengganggu dengan berfokus dan seiring dengan *noise* yang terjadi. Metode linear dapat diimplementasikan pada keperluan sistem komunikasi sehari-hari dimana biaya implementasi yang murah dapat menjadi pertimbangan.

Beberapa keuntungan dari metode linear adalah metode ini memiliki kompleksitas yang sangat rendah dimana pada implementasinya hanya diperlukan perkalian vektor-matriks dan perhitungan jumlah antena secara sederhana. Selain itu, hasil dari implementasi metode ini berkualitas tinggi dilihat dari setiap sinyal informasi yang diproses dapat dikarakterisasi dengan tepat.

Perbedaan kinerja antara satu metode linear dengan metode linear lainnya sangat kecil yaitu hanya 1dB. Metode linear juga dapat memberikan respon pemrosesan sinyal secara *real-time* meskipun harus dibayar dengan performa *Bit Error Rate* (BER) yang tidak signifikan. Metode ini mentransmisikan semua

sinyal yang diterima ke *receiver* lalu menghilangkan atau mengantisipasi pengaruh kanal terhadap sinyal yang dikirimkan (Okyere dkk, 2021).

Metode linier merupakan metode yang bekerja dengan cara mendapatkan kembali sinyal informasi dengan mencari nilai invers dari matriks estimasi kanal. Metode linear mengolah sinyal menggunakan *spreading codes* untuk menciptakan transformasi linier yang memproyeksikan setiap sinyal ke sub ruang *receiver*. Bagian dekorator dari *receiver* menghilangkan sinyal gangguan dengan memproyeksikan arah sinyal ke subruang yang ortogonal ke seluruh subruang interferensi. Selain itu *receiver* juga membatalkan sinyal pengganggu dengan cara memproyeksikan sinyal dan berfokus pada *noise* yang terjadi. Metode yang umum digunakan ada 2 yaitu *Zero Forcing (ZF)* dan *Minimum Mean Square Error (MMSE)*.

2.2.5.1 Zero Forcing (ZF)

Metode *ZF* didasari oleh metode konvensional *adaptive antenna array*, yaitu linear *combinatorial nulling*. Prinsip dasarnya adalah masing-masing bagian diyakini sebagai sinyal yang diinginkan, sedangkan sinyal lainnya dianggap sebagai sinyal penginterferensi. Metode *ZF* merupakan metode sederhana yang mampu menghilangkan pengaruh kanal dengan cara mengkalikan sinyal yang diterima dengan *invers* matriks kanalnya. Sehingga dalam metode *ZF*, sinyal yang diterima berbanding terbalik dengan matriks kanal yang diperkirakan, \mathbf{W} .

Untuk mendapatkan nilai \mathbf{S} dalam metode *ZF* adalah dengan menentukan matriks bobot equalizer \mathbf{W} yang memenuhi $\mathbf{WH} = \mathbf{I}$. Sehingga dapat dituliskan:

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (2.3)$$

dengan *superscript*^H merupakan *transpose konjugate* dari matriks dan \mathbf{H} Metode *ZF* ini mengabaikan masalah daya *noise*. Nilai estimasi informasi yang diterima $\hat{\mathbf{S}}$ adalah:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{S}} &= \mathbf{WY} \\ \hat{\mathbf{S}} &= \mathbf{W}(\mathbf{HS} + \mathbf{N}) \end{aligned}$$

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{S} + \mathbf{WN} \quad (2.4)$$

Matriks ini digunakan pada bentuk matriks umum $m \times n$. Teorema untuk $N_{Tx} = 8$ dan $N_{Rx} = 8$ sebagai berikut:

$$\mathbf{H}^H \mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{1,1}^* & H_{2,1}^* & H_{3,1}^* & H_{4,1}^* & H_{5,1}^* & H_{6,1}^* & H_{7,1}^* & H_{8,1}^* \\ H_{1,2}^* & H_{2,2}^* & H_{3,2}^* & H_{4,2}^* & H_{5,2}^* & H_{6,2}^* & H_{7,2}^* & H_{8,2}^* \\ H_{1,3}^* & H_{2,3}^* & H_{3,3}^* & H_{4,3}^* & H_{5,3}^* & H_{6,3}^* & H_{7,3}^* & H_{8,3}^* \\ H_{1,4}^* & H_{2,4}^* & H_{3,4}^* & H_{4,4}^* & H_{5,4}^* & H_{6,4}^* & H_{7,4}^* & H_{8,4}^* \\ H_{1,5}^* & H_{2,5}^* & H_{3,5}^* & H_{4,5}^* & H_{5,5}^* & H_{6,5}^* & H_{7,5}^* & H_{8,5}^* \\ H_{1,6}^* & H_{2,6}^* & H_{3,6}^* & H_{4,6}^* & H_{5,6}^* & H_{6,6}^* & H_{7,6}^* & H_{8,6}^* \\ H_{1,7}^* & H_{2,7}^* & H_{3,7}^* & H_{4,7}^* & H_{5,7}^* & H_{6,7}^* & H_{7,7}^* & H_{8,7}^* \\ H_{1,8}^* & H_{2,8}^* & H_{3,8}^* & H_{4,8}^* & H_{5,8}^* & H_{6,8}^* & H_{7,8}^* & H_{8,8}^* \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3} & H_{1,4} & H_{1,5} & H_{1,6} & H_{1,7} & H_{1,8} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} & H_{2,4} & H_{2,5} & H_{2,6} & H_{2,7} & H_{2,8} \\ H_{3,1} & H_{3,2} & H_{3,3} & H_{3,4} & H_{3,5} & H_{3,6} & H_{3,7} & H_{3,8} \\ H_{4,1} & H_{4,2} & H_{4,3} & H_{4,4} & H_{4,5} & H_{4,6} & H_{4,7} & H_{4,8} \\ H_{5,1} & H_{5,2} & H_{5,3} & H_{5,4} & H_{5,5} & H_{5,6} & H_{5,7} & H_{5,8} \\ H_{6,1} & H_{6,2} & H_{6,3} & H_{6,4} & H_{6,5} & H_{6,6} & H_{6,7} & H_{6,8} \\ H_{7,1} & H_{7,2} & H_{7,3} & H_{7,4} & H_{7,5} & H_{7,6} & H_{7,7} & H_{7,8} \\ H_{8,1} & H_{8,2} & H_{8,3} & H_{8,4} & H_{8,5} & H_{8,6} & H_{8,7} & H_{8,8} \end{bmatrix}$$

Kompleksitas metode *ZF* diberikan pada persamaan:

$$K = N_{Tx}^2 + N_{Tx} \quad (2.6)$$

Dengan N_{Tx} adalah jumlah antenna pemancar.

Untuk delapan antenna pemancar, diperoleh kompleksitas sebesar $8^2 + 8 = 72$.

2.2.5.2 Minimum Mean Square Error (MMSE)

Minimum Mean Square Error (*MMSE*) adalah opsi metode kedua dalam metode linear. Metode ini memberikan kinerja yang lebih baik daripada *ZF* karena pencarian invers matriksnya memperhitungkan faktor *noise*. Penggunaan metode *MMSE* adalah untuk mengurangi *noise additive* sehingga nilai \mathbf{W} adalah:

$$\mathbf{W} = [\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \mathbf{nI}]^{-1} \mathbf{H}^H \quad (2.7)$$

di mana \mathbf{I} merupakan matriks identitas. Jika dibandingkan, faktor *noise* \mathbf{nI} dari persamaan *ZF* dan *MMSE* adalah sebanding. Ketika faktor *noise* adalah nol, *MMSE* akan sama dengan persamaan *ZF*. Kompleksitas *MMSE* sama dengan kompleksitas metode *ZF* seperti pada persamaan 2.6 di atas (Proakis, 2017).

2.2.6 Metode Non-Linier

Pada dasarnya, metode non-linier bekerja dengan cara memperhatikan simbol yang diterima. Untuk menyaring interferensi, metode ini menghitung jarak terdekat dari simbol yang diterima dengan yang tersedia oleh kandidat simbol. Kinerja *error* yang lebih baik ditunjukkan oleh metode non-linier meskipun metode ini membutuhkan waktu komputasi dan simulasi yang lebih lama. Selain itu, metode non-linier membutuhkan sumber daya tambahan seperti perangkat keras yang mumpuni. Beberapa keuntungan dari metode non-linear adalah metode ini menunjukkan performa *Bit Error Rate* (BER) yang sangat baik. Selain itu, metode ini berkualitas tinggi dilihat dari perbedaan kinerja antara satu metode non-linear dengan metode non-linear lainnya sangat kecil yaitu hanya 1dB. Metode ini dapat diimplementasikan untuk layanan komunikasi organisasi berkinerja menengah hingga tinggi, seperti kebutuhan transfer data krusial, dokumen negara serta dokumen kemiliteran (Dash dkk, 2021).

Metode non-linier terdiri atas metode *Maximum likelihood Detection* (*MLD*) dan turunannya yaitu metode *k-best* dan *SD*. *MLD* merupakan metode dengan kinerja yang sangat optimal. Sedangkan metode turunannya merupakan metode pendekatan *MLD* dengan tingkat kompleksitas yang lebih rendah.

2.2.6.1 *Maximum Likelihood Detection* (*MLD*)

Metode *MLD* bekerja dengan cara menghitung jarak dari simbol yang diterima ke semua kandidat simbol. *MLD* mencari jarak minimum di antara

simbol-simbol tersebut. Semakin kecil perbedaan sinyal yang diterima dengan suatu kandidat simbol, maka semakin besar kemungkinan bahwa kandidat simbol tersebut adalah informasi yang dikirim oleh pemancar, sebagaimana persamaan berikut:

$$\hat{\mathbf{S}} = \arg \min \|\mathbf{Y} - \mathbf{HS}\|^2 \quad (2.8)$$

$\hat{\mathbf{S}}$ melambangkan simbol yang dideteksi, *arg min* berfungsi untuk mencari nilai argumen terkecil dari operasi $\|\mathbf{Y} - \mathbf{HS}\|^2$ sedangkan \mathbf{Y} merupakan simbol yang diterima. Lambang \mathbf{H} merupakan respon impuls kanal sedangkan \mathbf{S} adalah kandidat simbol yang ada. Jadi $\hat{\mathbf{S}}$ didapat dengan mencari jarak *euclidean* antara sinyal yang diterima dan hasil perkalian kanal dengan kandidat simbol sinyal yang ditransmisikan. Dengan kata lain, *MLD* merupakan metode yang membandingkan sinyal yang diterima *receiver* dengan semua kemungkinan informasi yang dikirim atau semua kandidat simbol yang ada. Semakin kecil perbedaan sinyal yang diterima dengan suatu kandidat simbol, maka semakin besar kemungkinan bahwa kandidat simbol tersebut adalah informasi yang dikirim oleh pemancar. Permasalahan *MLD* adalah kompleksitasnya sangat tinggi seiring bertambahnya orde modulasi dan jumlah antena pemancar.

Menggunakan modulasi BPSK dengan 8 antena baik untuk N_{Tx} maupun N_{Rx} , jarak minimum dari 2^8 adalah 256 kombinasi. Jika menggunakan modulasi 256 QAM dengan parameter yang sama akan didapatkan kombinasi sebanyak $256^8 = 6,8719 \times 10^{10}$ dan seterusnya jika menggunakan modulasi lain. Sesuai dengan persamaan kompleksitas *MLD*:

$$K = M^{N_{Tx}} \quad (2.9)$$

Dengan M menunjukkan jumlah konstelasi simbol dan N_{Tx} menunjukkan jumlah antena pemancar.

2.2.6.2 *k-best*

Metode *k-best* menghitung jarak dari simbol yang diterima ke k kandidat simbol terbaik. Nilai k yang didapat akan menentukan nilai kompleksitas dan *error performance* dari metode ini. Jika k yang dipilih bernilai besar maka metode ini memberikan *error performance* tinggi tetapi dengan biaya yang tinggi pula. Sebaliknya, bila k yang dipilih bernilai kecil maka metode ini memberikan *error performance* rendah dengan biaya yang relatif rendah pula. Jumlah perhitungan yang dibutuhkan oleh *k-best* ditentukan oleh jumlah antenna pada *receiver* (Ramakhirsna, 2018). Metode *k-best* menentukan transmit vektor $\hat{\mathbf{S}}$ yang meminimalkan jarak *euclidean* di antara vektor yang diterima \mathbf{y} , dirumuskan sebagai berikut:

Berdasarkan penyederhanaan standar dengan mengaplikasikan dekomposisi \mathbf{QR} pada matrik kanal \mathbf{H} , persamaan tersebut disederhanakan menjadi:

$$\hat{\mathbf{S}} = \arg \min \|\mathbf{Y} - \mathbf{RS}\|^2 \quad (2.10)$$

dengan

$$\mathbf{H} = \mathbf{QR}$$

dan

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{Q}^H \mathbf{y}$$

\mathbf{Q} adalah matriks berukuran $N_{Tx} \times N_{Rx}$ yang memiliki sifat $\mathbf{Q}\mathbf{Q}^H = \mathbf{I}$, dan \mathbf{R} adalah matriks *upper triangular*. Dengan menjabarkan persamaan (2.10) maka didapat persamaan:

$$\hat{\mathbf{s}} = \underset{\mathbf{s}}{\operatorname{argmin}} \left| \sum_{i=1}^{N_{Tx}} \left| \hat{y}_i - \sum_{j=i}^{N_{Tx}} R_{ij} s_j \right|^2 \right. \quad (2.11)$$

Dimulai dari $i = N_{Tx}$ persamaan (2.12) dapat diselesaikan sebagai berikut:

2

$$T_i(P_i) = T_{i+1}(P_{i+1}) + |e_i(P_i)| \quad (2.12)$$

$$T_{N_{Tx+1}}(P_{N_{Tx+1}}) = 0$$

dengan

$$T_i(P_i) > T_{i+1}(P_{i+1})$$

dan

$$e_i(P_i) = \hat{y} - \sum_{j=i}^{N_{Tx}} R_{ij} S_j \quad (2.13)$$

Pada persamaan (2.12) dan (2.13) $P_i = [s_i, s_{i+1}, \dots, s_{N_{Tx}}]^T$ disebut sebagai *partial simbol vector*. Dalam metode *k-best* yang digambarkan dalam diagram pohon, masing – masing *node* (titik percabangan) disebut sebagai *Partial Euclidean Distance* (PED) dan dituliskan dalam persamaan (2.12) sebagai $T_i(P_i)$, dengan $T_{N_{Tx+1}}(P_{N_{Tx+1}}) = 0$. Pada persamaan pada (2.13), $|e_i(P_i)|^2$ menunjukkan penambahan jarak pada 2 *node* yang berurutan pada diagram pohon.

Metode *k-best* hanya menyimpan dan mempertimbangkan sejumlah *k node* yang memiliki PED akumulasi terkecil sebelum melanjutkan ke level pendeteksian berikutnya. Setelah menyelesaikan pendeteksian pada seluruh level di diagram pohon, didapat sejumlah *k* cabang dengan PED terkecil. Tiap-tiap jalur pada diagram pohon melambangkan vektor sinyal *s*. Jalur dengan PED terkecil adalah hasil dari deteksi *k-best*. Pemilihan nilai *k* merupakan faktor penentu dalam performa BER dan pendeteksian nilai kompleksitas. *k-best* dapat memberikan kinerja yang mendekati dengan *Maximum Likelihood*. Kompleksitas metode *k-best* yaitu:

$$K = k^{N_{Tx}} \quad (2.14)$$

dengan:

K = kompleksitas

k = Jumlah simbol terbaik dari kandidat simbol yang tersedia

N_{Tx} = jumlah antena pemancar

Nilai K yang $\leq N_{Tx}$ dipilih sebagai *trade-off* antara performa dan perhitungan kompleksitas.

2.2.6.3 Sphere Detection (SD)

Metode *Sphere Detection* (SD) hanya menghitung jarak simbol yang diterima ke kandidat simbol dalam lingkaran bola (*sphere*). Pusat lingkaran tersebut adalah simbol yang diterima dan diameter lingkaran ditentukan oleh radian (jarak) dari pusat ke kandidat simbol yang ditargetkan. Sama seperti metode *k-best*, menentukan radian SD adalah pertukaran antara *error performance*. Kompleksitas dari SD ditentukan oleh jumlah antena pengirim dan jumlah kandidat simbol yang dibatasi oleh lingkaran. Untuk memecahkan persamaan MLD dalam (2.8), *Sphere Detection* (SD) menghitung semua vector x yang memenuhi:

$$\|Y - RS\|^2 < Z^2 \quad (2.15)$$

dengan Z merupakan jejari lingkaran. Dalam metode ZF ini, memilih nilai Z merupakan hal penting untuk menentukan kompleksitas dan performa dari SD. Ketika nilai Z besar, SD akan memiliki jumlah hipotesis kandidat simbol yang besar pula. Dalam hal ini, SD menunjukkan kompleksitas yang tinggi dan memberikan performa *error* yang tinggi juga. Sedangkan, jika nilai Z kecil, SD akan memiliki hipotesis kosong. Tidak ada kandidat simbol untuk dikalkulasikan dalam jarak euklides bagi sinyal yang diterima sehingga menyebabkan *error*. Saat hal ini terjadi, pencarian harus diulangi dengan meningkatkan radius *Sphere*. Proses pencarian untuk memenuhi persamaan (2.15) dapat dipecahkan dengan menggunakan metode *back-substitution*. Kompleksitas metode *Sphere* dapat dihitung dengan persamaan:

$$K = N_{Tx}^2 + \sum_{i=1}^{N_{Tx}} ((i-1)S_z + 2 + S_z) \quad (2.16)$$

Dengan N_{T_X} menunjukkan jumlah antena pemancar dan S_Z menunjukkan jumlah simbol dalam radius Z

2.2.7 Signal to Noise Ratio

Pada semua jenis sistem transmisi data, *signal to noise ratio* (SNR) merupakan parameter yang harus diperhatikan. SNR digunakan untuk menunjukkan seberapa banyak *noise* mengganggu sinyal yang ditransmisikan. Dengan kata lain, SNR membandingkan daya sinyal yang diinginkan terhadap *background noise*. SNR tidak dipengaruhi oleh format data atau *bandwidth filter* melainkan hanya bergantung pada daya rata-rata sinyal dan *noise*.

Gangguan yang sering muncul pada sinyal adalah *noise*. *Noise* adalah sinyal acak yang ditambahkan oleh kanal pada sinyal yang dikirimkan dimana *noise* tersebut dapat menghancurkan sebagian besar informasi yang ada pada sinyal utama. Dalam beberapa situasi dalam sistem telekomunikasi, jumlah *noise* yang merusak sinyal lebih besar daripada jumlah sinyal yang diinginkan. Oleh karena itu dibutuhkan metode dan analisa perbandingan antara sinyal informasi dengan *noise* yang terdapat pada sebuah media transmisi yang disebut *signal to noise ratio*. Sinyal dapat dirusak oleh *noise* atau terdistorsi oleh gelombang komunikasi, atau dilemahkan oleh percakapan yang lain sehingga hasil yang diterima adalah sinyal diinginkan yang tercampur dengan *noise*.

Semakin tinggi nilai SNR maka semakin baik kualitas sinyal informasi. Dalam banyak penelitian, SNR diukur dengan membandingkan sinyal yang memiliki *noise* dan sinyal hasil *noise handling*, dimana masing-masing sinyal dibandingkan dengan energi dari sinyal informasi. Sinyal hasil *noise handling* didapat melalui proses pemisahan komponen sinyal *noise* dan *threshold* pada hasil iterasi. Selanjutnya proses pembangunan ulang sinyal untuk mendapatkan bentuk sinyal yang lebih baik dari sinyal *noise* lalu dibandingkan terhadap sinyal informasi untuk dicari nilai SNR masing-masing sinyal. Pada akhir penelitian,

dilakukan operasi perbandingan SNR untuk mendapatkan nilai SNR yang baik (Kulshreshtha dan Chauhan, 2020).

2.2.8 Bit Error Rate (BER)

BER didefinisikan sebagai jumlah terjadinya *error* pada tiap jumlah bit. Pada komunikasi digital, nilai BER yang harus dipenuhi adalah BER 10^{-6} yang berarti tiap 10⁹ hingga 10¹²-bit data yang dikirim, *error* yang terjadi hanyalah pada 1-bit.

Sebagai parameter dari keunggulan teknologi modulasi dalam telekomunikasi adalah kecilnya kesalahan dalam pengiriman dan penerimaan data atau lebih dikenal dengan BER (*bit error rate*), semakin kecil nilai BER yang dihasilkan maka sistem tersebut dapat dikatakan handal (Mohanty dkk, 2020).