

# Desain Gelombang Radar MIMO Menggunakan Teknik *Interleaved-OFDM*

Muhammad Rizky, Gamantyo Hendranto, Devy Kuswidiastuti  
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

[muhammad.rizky12@mhs.ee.its.ac.id](mailto:muhammad.rizky12@mhs.ee.its.ac.id), [gamantyo@ee.its.ac.id](mailto:gamantyo@ee.its.ac.id), [devy@ee.its.ac.id](mailto:devy@ee.its.ac.id)

**Abstrak**— Modifikasi dari MIMO-OFDM konvensional bertujuan untuk meningkatkan ortogonalitas antar *subcarrier* dengan penggunaan *bandwidth* yang sama. Pada makalah ini dibahas mengenai akurasi, resolusi dari jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan (DoA) dari empat modifikasi MIMO-OFDM yaitu MIMO-OFDM konvensional, MIMO-IOFDM model Wiesbeck, MIMO-IOFDM model Yoke, dan MIMO-IOFDM menggunakan *subcarrier* acak. Sinyal OFDM yang dikirim didesain untuk bekerja pada *multiple* antena dan setiap transmiter mengirimkan *subcarrier* yang berbeda atau unik. Algoritma MUSIC digunakan untuk mendeteksi sudut kedatangan target dan periodogram digunakan untuk mendeteksi informasi jarak dan kecepatan target. Penggunaan *virtual antenna* bertujuan untuk meningkatkan akurasi deteksi sudut dan meningkatkan jumlah target yang bisa dideteksi. Untuk mereduksi level daya *sidelobe* maka digunakan Window Hamming namun akan menurunkan resolusi dari hasil deteksi. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, MIMO-IOFDM model Wiesbeck mempunyai nilai akurasi dan resolusi terbaik jika dibandingkan dengan yang lain, namun nilai level daya mirip dengan MIMO-IOFDM Model Yoke dan lebih tinggi jika dibanding MIMO-OFDM konvensional dan MIMO-IOFDM *subcarrier* acak. MIMO-OFDM konvensional memiliki deteksi jarak paling buruk dibandingkan dengan yang lain. Sedangkan MIMO-IOFDM *subcarrier* acak memiliki level *sidelobe* paling rendah dibandingkan dengan yang lain, namun hasil deteksinya masih mengandung interferer justru level daya dari interferer lebih tinggi.

**Kata Kunci**—OFDM; *Interleaved OFDM*; MUSIC; *Virtual Array*; *Periodogram*;

## I. PENDAHULUAN

Radar untuk keperluan *automotive* harus mampu mendeteksi jarak, frekuensi Doppler, dan informasi sudut dari target. Radar seperti ini sering diterapkan pada *smartcar* untuk keperluan *cruise control*, *lane change assistance*, *parking assistance*, dan keperluan mengendara lainnya. Radar dengan sistem SISO (*Single Input Single Output*) hanya bisa mendeteksi jarak dan kecepatan, tidak bisa mendeteksi sudut kedatangan dari target. Untuk mendapatkan informasi sudut kedatangan dari target maka dibutuhkan antena dengan sistem MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), karena menggunakan sistem MIMO salah satu syarat yang harus dipenuhi adalah penggunaan sinyal yang tidak berkorelasi.

Berdasarkan kebutuhan diatas dipilih bentuk sinyal OFDM dengan memodifikasi penggunaan *subcarrier* sehingga tidak semua *subcarrier* dikirim melainkan dipilih beberapa untuk setiap antena sehingga bisa meningkatkan ortogonalitas antar *subcarrier* sehingga lebih tahan terhadap gangguan ICI (*Interchannel Interference*). Radar dengan teknik sinyal OFDM memiliki cara kerja yang sama seperti radar lainnya seperti radar FMCW. Modifikasi OFDM atau

yang nantinya akan disebut *Interleaved-OFDM* sama dengan OFDM konvensional dan mampu mendeteksi jarak, Doppler, dan informasi sudut tetapi nilai *maximum unambiguous range* akan mengalami penurunan

Dengan mempertimbangkan bahwa *automotive* radar kemungkinan digunakan oleh lebih dari satu pengguna yang memiliki sistem sama dan aktif atau bekerja pada waktu yang bersamaan, maka muncul masalah yaitu interferensi antar *automotive* radar. Munculnya interferensi akan menyebabkan turunnya nilai akurasi dan resolusi dari deteksi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan. Untuk menghindari efek dari interferensi maka dibutuhkan teknik *mutiple user acces*[2].

Pada makalah ini dibahas sinyal ortogonal yang sesuai untuk *mutiple user acces*, ada beberapa modifikasi *subcarrier* dari teknik sinyal OFDM yang akan dibahas. Dibandingkan beberapa modifikasi OFDM berdasarkan akurasi dan resolusi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan (DoA), serta menganalisis efek jika masing-masing modifikasi OFDM tadi mendapat gangguan atau interferensi dari user lain baik yang menggunakan *subcarrier* yang sama maupun berlainan, akan dilihat bentuk modifikasi seperti apa yang memiliki akurasi dan resolusi dari jarak, kecepatan, dan arah kedatangan (*Direction of Arrival/DoA*) yang memiliki nilai *error* paling kecil dibandingkan dengan nilai perhitungan matematis.

## II. MODEL SISTEM

### A. Bentuk Gelombang OFDM

#### 1. Sinyal yang Dipancarkan

Sebelum membahas sinyal OFDM modifikasi, pada bagian ini dibahas sinyal OFDM transmit pada domain *basband*  $x(t)$  sebagai berikut[3]:

$$x(t) = \sum_{\mu=0}^{N_{sym}-1} \sum_{n=0}^{N_c-1} D(\mu N_c + n) \exp(j2\pi f_n t) \text{rect}\left(\frac{t - \mu T}{T}\right) \quad (1)$$

dimana  $N_c$  adalah jumlah *subcarrier* dengan  $n$  adalah indeks dari setiap *subcarrier*,  $N_{sym}$  adalah total simbol OFDM yang dikirimkan oleh transmitter,  $\mu$  adalah indeks dari setiap simbol OFDM,  $D(n)$  adalah deretan bilangan kompleks dari modulasi yang digunakan pada kasus ini adalah QPSK,  $f_n$  adalah frekuensi setiap *subcarrier*, dan  $T$  adalah durasi simbol OFDM. Fungsi  $\text{rect}(t/T)$  adalah *window* persegi dari durasi  $T$ . Keortogonalitas dari *subcarrier* ditunjukkan pada persamaan:

$$f_n = n\Delta f = \frac{n}{T}, \quad n = 0, \dots, N_c - 1 \quad (2)$$

Untuk menghindari ISI (*Inter-Symbol-Interference*) pada skenario propagasi *multipath*, setiap simbol OFDM

ditambahkan *cyclic prefix* dengan durasi  $T_p$ , sehingga total durasi OFDM yang dikirimkan adalah  $T_{OFDM} = T + T_p$ .

Setelah mendapatkan model matematis transmitter maka dilakukan simulasi. Pada tahap simulasi terdapat dua langkah utama yaitu *transmitter processing*, dan *target modelling (range, doppler, and angle)*.

- *Transmitter Processing*[3]
  - Transmitter membangkitkan sinyal OFDM dari deretan bit acak dan dilakukan *mapping* menggunakan QPSK
  - Untuk membuat memodifikasi OFDM konvensional, pada tahap ini hanya dikirim *subcarrier* yang diinginkan yaitu dengan cara menjadikan nol (0) *subcarrier* yang tidak diinginkan.
  - Dilakukan IDFT pada sinyal *baseband* untuk setiap simbol OFDM
  - Penambahan *cyclic prefix*

## 2. Pemodelan Target

Simulasi model propagasi dilakukan pada domain *baseband* dengan menambahkan efek *time delay*, frekuensi Doppler, dan informasi sudut kedatangan (DoA)

- Pertama adalah pemodelan jarak, dilakukan dengan cara menambahkan bit zeros sepanjang waktu delay hasil perhitungan, jumlah zeros dihitung melalui persamaan 3

$$Z_b = \frac{T_d}{T_b} \quad (3)$$

$$T_d = \frac{2R}{c}, T_b = \frac{T_{total}}{N_c + N_p}$$

dengan  $Z_b$  adalah jumlah zeros,  $T_d$  adalah *time delay*,  $T_b$  adalah durasi bit dari OFDM

- Step kedua adalah pemodelan kecepatan, diindikasikan dengan adanya frekuensi Doppler ( $f_D$ ), dari persamaan 4 maka akan dikalikan dengan sinyal yang sudah memiliki informasi *delay*

$$k_D(m) = \exp(j2\pi m T_{OFDM} f_D) \quad (4)$$

$$f_D = \frac{2V_r}{\lambda}$$

dimana  $m$  adalah indeks simbol,  $m = 1, \dots, N_{sym}$

- Yang terakhir adalah pemodelan sudut kedatangan (DoA), dilakukan dengan cara menambahkan *steering vector* persamaan 5, pada sinyal yang telah memiliki informasi jarak dan kecepatan[1]

$$AF = \exp(-j\pi \cos(\theta) N_{Rx}) \quad (5)$$

dimana  $N_{Rx} = 0, \dots, (R_x - 1)$ ,  $R_x$  jumlah total antena penerima.

## 3. Sinyal yang Diterima[3]

Sinyal yang diterima oleh receiver sudah memiliki informasi jarak dan kecepatan karena mengenai suatu target. Saat sinyal mengenai suatu target maka sinyal tersebut telah menempuh jarak sejauh  $2R$  dan jika target adalah bergerak maka akan terjadi pergeseran Doppler, maka sinyal terima bisa dimodelkan seperti persamaan:

$$Y(t) = \sum_{\mu=0}^{N_{sym}} \sum_{n=0}^{N_c} D_r(\mu, n) \exp(j2\pi f_n t) \theta_{ch} \quad (6)$$

$$\theta_{ch} = \sum_k^{N-1} \exp\left(-j2\pi k \Delta f \frac{2R}{c_0}\right) \exp(j2\pi f_D t)$$

dimana

$$D_r(\mu, n) = D(\mu, n) \exp\left(-j2\pi k \Delta f \frac{2R}{c_0}\right) \exp(j2\pi f_n t) \theta_{ch} \quad (7)$$

dengan membandingkan antara simbol yang dikirim  $\{D(\mu, n)\}$  dengan simbol yang diterima  $\{D_r(\mu, n)\}$  maka didapatkan transfer fungsi dari kanal, dengan menghitung per-elemen maka didapatkan persamaan:

$$I_{div}(\mu, n) = \frac{D_r(\mu, n)}{D(\mu, n)} \quad (8)$$

## B. Pemrosesan Jarak dan Doppler

Untuk target yang terletak pada jarak tertentu dari radar, semua simbol OFDM memiliki pantulan yang sama sehingga setiap simbol OFDM akan mengalami pergeseran fasa yang sama dengan dua kali waktu tempuh untuk menjangkau jarak  $R$ . Dengan asumsi objek adalah diam, maka transfer function dari kanal dapat ditulis sebagai berikut[4]:

$$I_{div}(n) = \exp\left(-j2\pi \Delta f \frac{2R}{c_0}\right), \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (9)$$

Untuk mendapatkan profil atau informasi jarak dari target maka dilakukan (IDFT) pada  $\{I_{div}(n)\}$

$$h(k) = IDFT(\{I_{div}(n)\}) \quad (10)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_{div}(n) \exp\left(2j\pi \frac{n}{N} k\right), \quad k = 0, \dots, N-1$$

Sinyal radar yang dipantulkan dari objek yang bergerak dengan kecepatan relatif  $v_{rel}$  akan mengalami pergeseran frekuensi Doppler dua kali, yaitu[3]:

$$f_D = \frac{2v_{rel}}{\lambda} \quad (11)$$

Secara umum, window merupakan deretan koefisien yang digunakan untuk pembobotan sinyal, biasanya ketika resolusi frekuensi meningkat maka terjadi:

- Mainlobe akan menjadi lebih sempit
- Dan sidelobe menjadi lebih kecil

Sayangnya, menurunkan level sidelobe selalu menjadikan main lobe semakin lebar jadi selalu ada *trade off* untuk hal ini. Untuk makalah ini akan menggunakan window hamming yang merupakan salah satu window yang sering digunakan, berikut adalah persamaan matematis dari window hamming[7]:

$$\omega_n(n) = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) & \text{when } n \in \{0, \dots, N-1\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

## C. Pemrosesan Direction of Arrival (DoA)

Pada algoritma MUSIC, sinyal yang diterima didapatkan dari nilai *eigenvalue* dan *eigenvector*. Jumlah sinyal disimbolkan dengan huruf  $D$ , jumlah *eigenvalue* dan *eigenvector* sinyal adalah  $D$ , dan *eigenvalue* dan *eigenvector noise* adalah  $M-D$ , dimana  $M$  adalah jumlah dari elemen

array di sisi penerima. Karena algoritma MUSIC juga menggunakan *eigenvector noise subspace*, maka metode ini juga dikenal dengan nama metode *subspace*[5].

Dalam algoritma MUSIC, langkah pertama adalah menentukan matriks kovarian dari sinyal yang diterima ( $\bar{R}_{xx}$ ), yang didapatkan melalui persamaan (13)

$$\bar{R}_{xx} = \bar{A} \bar{A}^H \tag{13}$$

$\bar{A}$  = sinyal terima

Kemudian menentukan *eigenvector noise subspace*  $\bar{E}_N$  yang memiliki ukuran  $M \times (M - D)$ . *Eigenvector noise subspace*  $\bar{E}_N$  dapat diperoleh melalui persamaan (14)

$$\bar{E}_N = [\bar{e}_1 \ \bar{e}_2 \ \dots \ \bar{e}_{M-D}] \tag{14}$$

Maka didapatkan estimasi DoA dengan algoritma MUSIC ( $P_{MU}(\theta)$ ) menggunakan rumus pada persamaan (15)

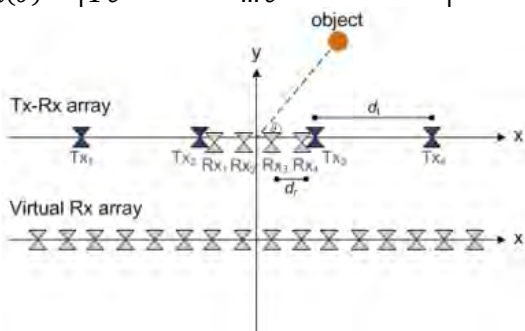
$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{|\bar{a}(\theta)^H \bar{E}_N \bar{E}_N^H \bar{a}(\theta)|} \tag{15}$$

dimana  $\bar{a}(\theta)$  merupakan *array steering vector*.  $\bar{a}(\theta)$  dapat dihitung dengan rumus pada persamaan (16)

$$\bar{a}(\theta) = [1 \ e^{\frac{j\cos(\theta)2\pi d_r}{\lambda}} \ \dots \ e^{\frac{j\cos(\theta)2\pi(P-1)d_r}{\lambda}}]^T \tag{16}$$

Antena MIMO *Linear array* terdiri dari  $N_{Tx}$  elemen transmitter dan  $N_{Rx}$  elemen receiver. Spasi antar elemen antenna diatur menjadi  $d_r = \lambda/2$ , elemen penerima dari antenna array ditransformasikan menjadi ‘*virtual antenna*’ dengan ukuran  $N_{Tx} \times N_{Rx}$  elemen, *virtual antenna* digunakan untuk meningkatkan akurasi, resolusi, dan kemampuan deteksi dari penerima, geometri *virtual array* ditunjukkan pada **Gambar 1**. Antena MIMO array terdiri dari elemen pengirim ( $N_{Tx}$ ) dan elemen penerima ( $N_{Rx}$ ) seperti pada **Gambar 1**. Antena penerima adalah  $d_r$  bergantung dari posisi virtual antenna, pada kasus ini  $d_r = \lambda/2$ , pergeseran jarak antar elemen antenna adalah  $d_{ri} = (P_i - 1) \cdot \lambda/2$ , dimana  $P_i = 1, \dots, N_t N_r$ . Nilai *beamsteering vector* adalah[4]:

$$\bar{a}(\theta) = [1 \ e^{\frac{j\cos(\theta)2\pi d_r}{\lambda}} \ \dots \ e^{\frac{j\cos(\theta)2\pi(P-1)d_r}{\lambda}}]^T \tag{22}$$



**Gambar 1.** Geometri Antena

**D. Indikator Kinerja Radar**

Resolusi radar adalah kemampuan radar untuk mendeteksi 2 target yang berbeda pada posisi yang saling berdekatan. Semakin kecil resolusi radar, maka kemampuan radar akan semakin baik. Seperti dijelaskan pada sub bab 1.1, sistem radar MIMO-OFDM digunakan untuk mendeteksi jarak dan DoA target, maka akan dicari resolusi jarak dan resolusi sudut untuk mengetahui jarak atau sudut minimum dari target yang bisa dideteksi oleh radar. Resolusi jarak ditulis pada persamaan (17)

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \tag{17}$$

dimana  $B$  adalah *bandwidth*. Sedangkan resolusi sudut ditulis pada persamaan (18)

$$t_d = \frac{c/f}{2d((MtMr)-1)\cos(\theta)} \tag{18}$$

dimana  $d$  adalah spasi antar elemen *array antenna* penerima, yang ditentukan pada persamaan (19)

$$d = \frac{2\pi}{c/f} \tag{19}$$

$Mt$  merupakan jumlah elemen pemancar,  $Mr$  merupakan jumlah elemen penerima, dan  $\theta$  merupakan *beamwidth* dari *array antenna* penerima.

Sedangkan resolusi kecepatan adalah:

$$\Delta V = \frac{\lambda}{2 T_{OFDM} T_{ofdm}} \tag{20}$$

Selain resolusi juga terdapat akurasi yang menjadi indikator kinerja radar. Pada radar, hasil pembacaan dikatakan error atau salah jika harga mutlak selisih antara hasil pembacaan (m) dengan nilai aktual target yang seharusnya (n) melebihi resolusi radar ( $\Delta$ ).

$$|m - n| > \Delta \tag{21}$$

**III. EVALUASI**

Untuk melakukan verifikasi performa dari sinyal OFDM hasil modifikasi maka dilakukan simulasi yang sesuai. Konsep simulasi, parameter sistem dan skenario investigasi akan dijelaskan pada subbab ini. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* MatLab 2015b.

**A. Parameter Sistem**

Parameter dari radar OFDM ditunjukkan pada **Table 1**, diasumsikan radar mampu mendeteksi target yang berada pada jarak dekat dan medium untuk keperluan *automotive radar*, jarak maksimum  $R_{max} = 200$  m dirasa sudah cukup. Jumlah *channel* yang dipilih adalah  $N_{ch} = 8$ , sehingga menghasilkan jarak maksimum 206.3 m. Durasi cyclic prefix dipilih setidaknya sama dengan dua kali waktu propagasi untuk menempuh jarak maksimum, yaitu 1.33  $\mu s$ . Kecepatan maksimum diasumsikan 200 km/jam (55.6 m/s) untuk tujuan *automotive radar*, sehingga menghasilkan pergeseran frekuensi Doppler maksimum sebesar 8.9 kHz. Untuk meningkatkan orthogonalitas antar *subcarrier*, jarak antar *subcarrier* diatur tidak kurang dari 10x pergeseran frekuensi *Doppler* maksimum, yaitu  $\Delta f = 90.909$  kHz. Karena resolusi jarak bergantung pada *bandwidth* sinyal, dengan memilih jumlah *subcarrier* sebanyak 1024 akan menghasilkan total bandwidth sebesar 93.1 MHz, sehingga menghasilkan resolusi jarak sebesar 1.61 m. Resolusi Doppler sebanding dengan durasi sinyal yang dikirim, dengan memilih 256 simbol akan menghasilkan durasi simbol 2.816 ms, dengan menambahkan 1/8 *cyclic prefix* menghasilkan resolusi *Doppler* 1.97 m/s.

**Tabel 1** Spesifikasi Radar MIMO-OFDM

Symbol	Parameter	Nilai
$f_c$	Frekuensi <i>carrier</i>	24 GHz
$N_c$	Jumlah <i>Subcarrier</i>	1024
$N_{ct}$	Jumlah <i>subcarrier</i> /transmitter	128
$N_{ch}$	Jumlah <i>channel</i>	8
$T$	Durasi OFDM dasar	11 $\mu s$
$T_{cp}$	Durasi <i>Cyclic prefix</i>	1.375 $\mu s$
$T_{sym}$	Total durasi simbol OFDM	12.375 $\mu s$
$B$	<i>Bandwidth</i>	93.1 MHz
$\Delta r$	Resolusi jarak	1.61 m

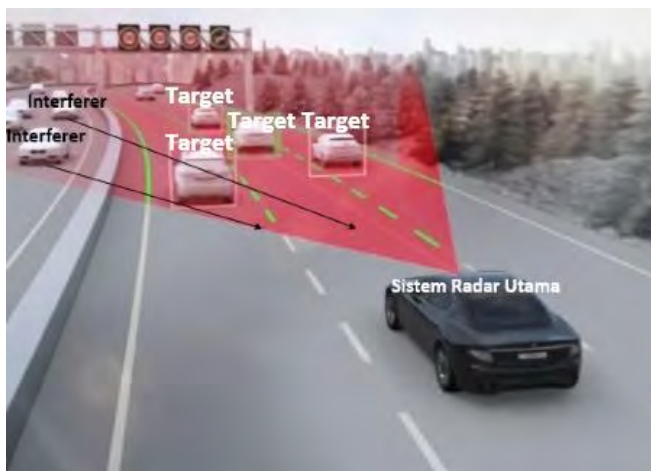
$r_{max}$	Maksimum jarak	206.3 m
$v_{max}$	Maksimum kecepatan	55.6 m/s
$N_{sym}$	Jumlah simbol	256
$\Delta v$	Resolusi kecepatan	1.97 m/s
$\Delta\theta$	Resolusi Sudut	$0.05^\circ$

B. *Pemodelan Interferensi*[2]

Untuk mengetahui ketahanan dari sinyal yang dikirim maka dibangkitkan *interference* dari sistem yang sama, dimana pada interferer ini tidak ada blok *post processing* melainkan hanya sinyal yang dikirim dan pemodelan informasi jarak dan kecepatan. Dimanapun interferer ini berada di jarak tertentu dari radar utama, sehingga informasi target yang sampai dipenerima radar utama akan bercampur dengan informasi dari interferer, nantinya akan dihitung berapa nilai SIR (signal to interference ratio) yang dihitung dari persamaan berikut[2]:

$$SIR = \frac{R_{int}^2 \sigma}{(4\pi)R_{obj}^4} \tag{23}$$

Dari persamaan (23) diatas  $R_{int}$  adalah jarak radar dengan interferer,  $\sigma$  adalah radar cross section,  $R_{obj}$  adalah jarak target dengan radar utama.



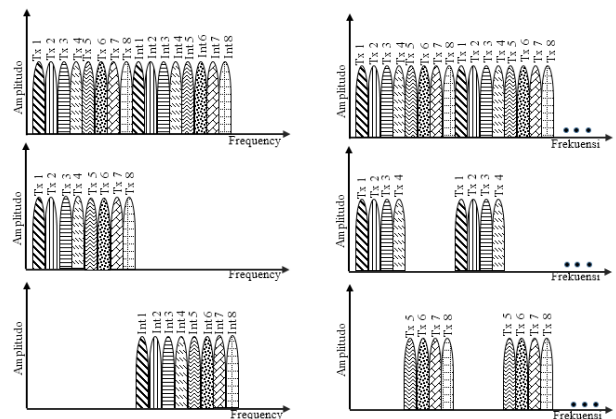
Gambar 2. Skenario Penempatan Interferer

Untuk semua skenario terdapat dua sistem yaitu Sistem1 dan Sistem2 dimana Sistem 1 is the *full radar system* dan Sistem 2 hanya terdiri dari transmitter. Setiap antenna hanya mengirim *subcarrier* yang diinginkan, pada kanal propagasi setiap sinyal akan terpengaruh oleh waktu tunda, pergeseran fasa, dan pergeseran frekuensi Doppler. Setiap sinyal yang dikirim akan diterima kembali oleh antenna penerima dan dilakukan pemrosesan untuk mendapatkan informasi jarak, kecepatan dan sudut kedatangan. Target dimodelkan berada pada jarak 4m, 45m, 50m, 200m, dengan kecepatan 4m/s, 22m/s, 27m/s, dan 54m/s, dan berada pada sudut  $70^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $100^\circ$  dan interferer berada pada jarak 40 m dengan kecepatan 40 m/s dan pada sudut  $110^\circ$ . Selain itu juga akan dibahas mengenai efek penggunaan Window Hamming dan efek arah kedatangan terhadap hasil deteksi jarak dan kecepatan.

C. *Skenario Investigasi*

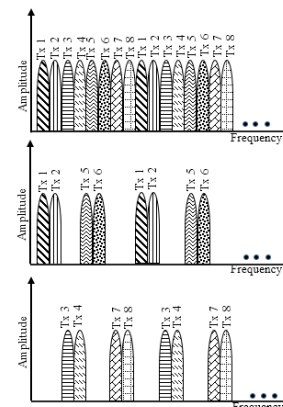
Mekanisme investigasi yang pertama adalah membandingkan antara sistem SISO dengan MIMO-OFDM konvensional, dimana sistem SISO adalah menggunakan satu antenna pengirim dan satu antenna penerima, *subcarrier* yang dikirim adalah seluruhnya yaitu 1024 *subcarrier*. Sedangkan

MIMO-OFDM konvensional menggunakan empat antenna pengirim dan penerima, tidak semua *subcarrier* digunakan melainkan hanya beberapa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Untuk menguji ketahanan terhadap interferer maka dibangkitkan interferer, interferer yang digunakan adalah interferer MIMO dimana tidak semua *subcarrier* digunakan, melainkan hanya beberapa *subcarrier* yaitu seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Setelah itu akan dibandingkan antar sistem MIMO, yaitu MIMO OFDM konvensional, MIMO-IOFDM model Wiesbeck, MIMO-IOFDM model Yoke, dan MIMO-IOFDM menggunakan *subcarrier* acak.



Gambar 3. Konsep Penggunaan *Subcarrier* pada MIMO-OFDM Konvensional

Gambar 4. Konsep Penggunaan *Subcarrier* MIMO-IOFDM model Wiesbeck



Gambar 5. Konsep Penggunaan *Subcarrier* MIMO-IOFDM model Yoke

Sedangkan konsep penggunaan *subcarrier* untuk MIMO-IOFDM model Wiesbeck ditunjukkan pada Gambar 4. Pada pengujian MIMO-IOFDM model Wiesbeck dimodelkan terdapat dua Sistem, dimana Sistem 1 sebagai radar utama yang terdiri dari Tx5, Tx6, Tx7, dan Tx8 bisa dilihat pada Gambar 4, sedangkan Sistem 2 dimodelkan sebagai interferer yang terdiri dari Tx1, Tx2, Tx3, dan Tx4.

Untuk MIMO-IOFDM model Yoke *subcarrier* yang digunakan seperti ditunjukkan pada Gambar 5, dimana terdapat dua Sistem dimana Sistem 1 sebagai radar utama yang terdiri dari Tx1, Tx2, Tx5, dan Tx6 sedangkan Sistem 2 terdiri dari Tx3, Tx4, Tx7, dan Tx8 sebagai interferer.

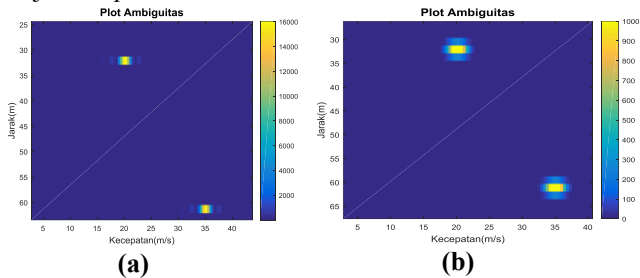
Model MIMO-OFDM yang terakhir adalah MIMO-IOFDM menggunakan *subcarrier* acak dilakukan dengan cara dibangkitkan 128 *subcarrier* untuk setiap antenna pengirim dengan distribusi acak, sehingga untuk setiap kali *running* program akan menghasilkan *subcarrier* yang



berbeda-beda. Interferensi yang dibangkitkan juga mempunyai distribusi acak sehingga peluang terjadinya interferensi antar Sistem tidak bisa direncanakan. Dengan penggunaan *subcarrier* acak memiliki kemungkinan untuk diterapkan pada kenyataan, mengingat nantinya akan banyak Sistem yang ada, sehingga akan sulit untuk mengatur *subcarrier* yang digunakan untuk setiap Sistem yang ada, dengan menggunakan *subcarrier* acak ini akan lebih realistis untuk bisa diterapkan.

D. Analisis Efek Penggunaan Window Hamming

Seperti telah dijelaskan penggunaan Window Hamming bertujuan untuk menekan level *sidelobe* namun berdampak pada turunnya nilai resolusi dari hasil deteksi, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Plot Ambiguitas (a) Tanpa Window Hamming (b) Menggunakan Window Hamming

Dari Gambar 6 (a) dan (b) dapat diketahui bahwa dengan menggunakan window Hamming nilai resolusi jarak dan kecepatan semakin buruk, hal ini ditunjukkan dengan hasil deteksi yang melebar sedangkan nilai *sidelobe level* semakin rendah.

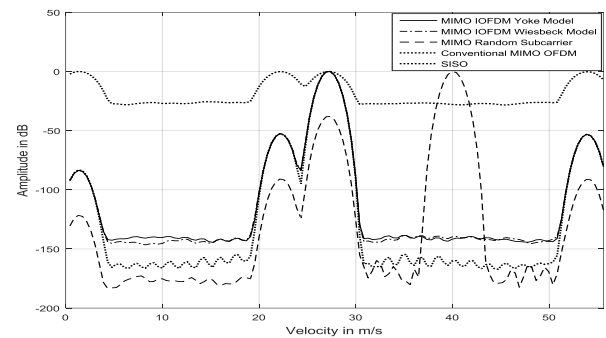
E. Analisis Sistem MIMO dengan SISO

Keunggulan sistem MIMO dibanding SISO adalah kemampuan untuk mendeteksi sudut kedatangan karena sistem MIMO terdiri lebih dari satu antena penerima sehingga saat sinyal diterima masing-masing antena terjadi perbedaan fasa antar antena sehingga dapat diketahui sudut kedatangan dari target. Selain itu keunggulan MIMO adalah memiliki level *sidelobe* yang rendah, dimana level *sidelobe* dari sistem MIMO adalah empat kali lebih rendah jika dibanding SISO seperti ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8, hal ini bisa terjadi karena MIMO yang digunakan adalah berukuran 4x4 sehingga sinyal yang didapat adalah empat kali lebih banyak sehingga level *sidelobe* MIMO juga empat kali lebih rendah.

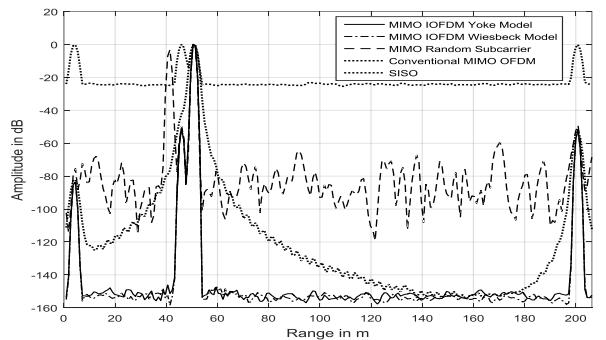
F. Analisis Akurasi dan Resolusi Deteksi Radar MIMO

MIMO-OFDM konvensional memiliki resolusi jarak 2.3m dengan akurasi 94.53%, resolusi kecepatan 2.9m/s dengan akurasi 98.71%, dan resolusi sudut 2° dengan akurasi 100%. MIMO-OFDM Model Wiesbeck memiliki resolusi jarak 2.3m dengan akurasi 94.65% dan resolusi kecepatan 2.8m/s dengan akurasi 98.82%, dan resolusi sudut 2° dengan akurasi 100%, nilai resolusi kecepatan ini paling baik dibandingkan dengan yang lain namun selisihnya kecil. MIMO-IOFDM Model Yoke memiliki resolusi jarak 2.3m dengan akurasi 94.65% dan resolusi kecepatan 2.9m/s dengan akurasi 98.82%, dan resolusi sudut 2° dengan akurasi 100%. Untuk ketiga model MIMO-OFDM diatas memiliki hasil deteksi yang mirip satu sama lain, hal ini dikarenakan penggunaan teknik *interleaving* yang hampir sama, namun MIMO-IOFDM model Wiesbeck lebih unggul dari MIMO-

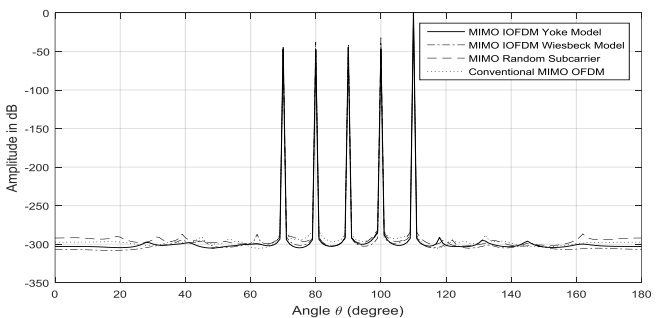
OFDM konvensional dari segi akurasi jarak dan kecepatan serta lebih unggul dalam segi resolusi kecepatan dibandingkan dengan MIMO-IOFDM model Yoke dan konvensional. Pada ketiganya terjadi pergeseran nilai resolusi dari hasil deteksi jarak dan kecepatan, hal ini dikarenakan nilai interferensi yang tinggi, efek dari sudut kedatangan, bahwa sudut kedatangan mempengaruhi nilai deteksi dimana saat target berada pada sudut *broadside* dari *array factor* maka nilai level daya akan maksimum sehingga resolusi dan akurasi semakin baik, selain itu efek dari penggunaan Window Hamming juga sangat mempengaruhi hasil deteksi, dimana penggunaan Window Hamming ini akan menurunkan resolusi hasil deteksi. Pada MIMO-IOFDM menggunakan *subcarrier* acak, *subcarrier* yang digunakan tidaklah sama untuk setiap kali *running* atau untuk setiap kali radar digunakan. Potensi terjadinya kesamaan *subcarrier* yang digunakan antara radar utama dengan interferer lebih tinggi dibanding dengan model yang lain. Oleh karena itu hasil deteksi dari MIMO-IOFDM menggunakan *subcarrier* acak masih mengandung informasi dari interferer justru level daya dari interferer lebih tinggi dibandingkan dengan level daya target yang diinginkan. Untuk nilai resolusi kecepatan dan jarak adalah 2.9m dan 2.3 m/s sama seperti dengan yang lain. Namun kekurangan lain dari model ini adalah saat jarak target berada lebih jauh dari interferer maka radar tidak bisa mendeteksi target tersebut, radar justru mengenali interferer.



Gambar 7. Hasil Deteksi Kecepatan



Gambar 8. Hasil Deteksi Jarak



Gambar 9. Hasil Deteksi Sudut

### G. Analisis Efek Interferer Terhadap Hasil Deteksi

Untuk mengetahui ketahanan sistem radar terhadap interferensi dari sistem radar yang lain untuk skenario pengujian interferer sudah dibahas sebelumnya, dengan nilai parameter pengujian adalah terdapat dua target yang terletak pada jarak 30m dan 60m dengan kecepatan 5m/s dan 8m/s keduanya terletak pada sudut  $90^\circ$ . Sedangkan interferer berada pada jarak 40m dengan sudut kedatangan  $110^\circ$  untuk kecepatan interferer akan diuji dua kali yaitu saat kecepatan 5m/s dan 50m/s hal ini bertujuan untuk menguji sistem radar utama apakah *subcarrier* dari interferer setelah mengalami pergeseran Doppler masuk ke ranah *subcarrier* sistem radar utama. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan didapat hasil bahwa MIMO-OFDM Konvensional paling tahan terhadap interferensi dengan nilai SLL deteksi jarak -160 dB, SLL deteksi kecepatan -150 dB, dan SLL deteksi sudut -300 dB.

### IV. SINTESIS

Sistem radar yang dibangun merupakan *automotive radar* sehingga parameter performansi disesuaikan dengan kebutuhan pada *automotive radar*. Radar untuk keperluan otomotif harus mampu mendeteksi kecepatan, jarak, dan sudut kedatangan (DoA) dari target. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut maka digunakan radar MIMO yang mampu mendeteksi arah kedatangan (DoA). Pada sistem MIMO, bentuk sinyal yang digunakan harus memiliki ortogonalitas yang baik sehingga dipilih bentuk sinyal OFDM yang memiliki keunggulan ortogonalitas antar *subcarrier* yang baik, selain itu keunggulan lain dari bentuk sinyal OFDM adalah sensitif terhadap pergeseran *Doppler* sehingga bisa digunakan untuk mendeteksi kecepatan target.

Radar MIMO-OFDM dengan konfigurasi MIMO 4x4, menggunakan bentuk sinyal OFDM, dan pemrosesan sinyal menggunakan modulasi simbol periodogram untuk mendapatkan informasi jarak dan kecepatan, serta algoritma MUSIC untuk mendapatkan informasi arah kedatangan (DoA).

Untuk meningkatkan ortogonalitas antar pemancar serta membuat sistem radar yang tahan terhadap interferensi dari sistem radar yang sama, maka dari MIMO-OFDM akan dianalisis model pengiriman yang paling tahan terhadap interferensi yang ditunjukkan dari nilai resolusi dan akurasi deteksi jarak, kecepatan, dan sudut yang baik. Untuk itu dianalisis empat bentuk model MIMO-OFDM yaitu MIMO-OFDM konvensional, MIMO-IOFDM model Wiesbeck, MIMO-IOFDM model Yoke, dan MIMO-IOFDM menggunakan *subcarrier* acak.

Dari hasil deteksi jarak dan kecepatan didapatkan nilai *sidelobe* level yang tinggi sehingga digunakan *Window Hamming* untuk menurunkan *sidelobe* level hasil deteksi.

Desain pengolahan sinyal yang dibuat untuk mendapatkan informasi DoA yaitu menggunakan algoritma MUSIC. Namun terdapat beberapa kelemahan dalam algoritma MUSIC, yaitu *error* dan akurasi deteksi akan semakin buruk ketika semakin banyak target yang dideteksi, serta kemampuan algoritma MUSIC yang hanya bisa mendeteksi target kurang dari jumlah antena penerima, untuk mengatasi hal tersebut maka digunakanlah *virtual antenna*. Dengan menggunakan *virtual antenna*, ukuran MIMO yang semula 4x4 maka akan menjadi 1x16 sehingga dapat meningkatkan akurasi deteksi dan mampu mendeteksi target yang lebih banyak.

Sesuai dengan kebutuhan *automotive radar* yang telah dijelaskan, dari keempat model MIMO-OFDM yang telah dianalisis, setiap model memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing MIMO-IOFDM Model Wiesbeck memiliki resolusi kecepatan paling baik dan diikuti oleh MIMO-IOFDM model Yoke dengan perbedaan yang sangat tipis. Akurasi kecepatan dan jarak keempatnya memiliki nilai yang sama. MIMO-OFDM konvensional dan MIMO-IOFDM *subcarrier* acak memiliki level *sidelobe* deteksi jarak yang tinggi. Level *sidelobe* deteksi kecepatan MIMO-OFDM konvensional bernilai paling baik dibanding dengan yang lain.

### V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh adalah sebagai berikut. Sistem radar yang dibangun adalah MIMO-IOFDM yang mampu mendeteksi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan. Guna meningkatkan kemampuan masing-masing deteksi tersebut maka digunakan window Hamming dan *virtual antenna*. MIMO-OFDM konvensional adalah yang paling tahan terhadap gangguan interferensi. MIMO-IOFDM Wiesbeck paling sesuai dengan penggunaan *automotive radar* karena unggul dari beberapa aspek yaitu resolusi dan akurasi kecepatan, untuk resolusi dan akurasi jarak dan sudut adalah sama dengan yang lainnya kecuali model konvensional, jika ditinjau dari segi ketahanan interferensi nilai SLL deteksi kecepatan -60dB dan jarak -100dB serta SLL deteksi sudut -300 dB untuk nilai interferer maksimum, dimana nilai ini dinilai baik karena sangat kecil sehingga masih mampu untuk mendeteksi informasi target dengan baik.

### REFERENCES

- [1] Y. L. Sit, and T. Zwick.,: Automotive MIMO Radar using Spectrally-Interleaved OFDM Signals for Multiple-User Acces, 2014 *Radar Conference*.
- [2] C. Sturm, Y. Sit, M. Braun, and T. Zwick.: Spectrally interleaved multi-carrier signals for radar network applications and multi-input multi-output radar, 2013, *Radar, Sonar Navigation, IET*, vol. 7, no. 3, pp. 261–269.
- [3] Y. L. Sit, L.Reichardt, C. Sturm, and T. Zwick.: Extension of the OFDM Joint Radar-Communication System for a Multipath, Multiuser Scenario, 2011, *Radar Conference, IEEE*, pp.718-723.
- [4] Y. L. Sit, C. Sturm, J. Baier, and T.Zwick.: Direction of Arrival Estimation using the MUSIC algorithm for a MIMO OFDM Radar, 2012, *Radar Conference, IEEE*, pp.226-229.
- [5] Y. L. Sit, T. Nguyen, C. Sturm, and T. Zwick.: 2D Radar Imaging with Velocity Estimation using a MIMO OFDM-Based Radar for Automotive Applications, 2013, *European Radar Conference*, pp.145-148.
- [6] Wiesbeck, W.: The Radar of The Future. *Radar Conference (EuRAD)*, 2013 *European*, pp. 137 – 140
- [7] Blanchet, Gerard. and Charbit, Maurice.:*Digital Signal Processing using MATLAB*, 2006, John Wiley & Sons, pp.101-102.