

PROBABILITAS DETEKSI DAN *FALSE ALARM* SEBAGAI KINERJA DETEKSI PADA RADAR *FULL-PHASED* MIMO

Mizar Ahmad Maulana¹, Syahfrizal Tahcfullloh²

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia

¹mizqrahmad3458@gmail.com

²syahfrizal@borneo.ac.id

Abstract—The Full-Phased MIMO (FPMIMO) radar uses overlapping subarrays with the same number of elements on both sides at transmit and receive (Tx-Rx). Simultaneous use of subarrays (W and X) for the total number of antennas in Tx-Rx, namely U and V , results in the advantages of this radar in beam pattern Tx-Rx gain, signal to interference plus noise ratio (SINR), maximum number of detections, virtual arrays, and detection performance. The detection performance of the radar is generally expressed in terms of detection and false alarm probabilities. In this paper, the two probabilities have been formulated and evaluated based on the signal threshold, the number of antennas in the Tx-Rx subarray, the variation of the SNR, and the variation of the false alarm probability. From the results obtained that the two radar probabilities are more effective and flexible than existing radars in terms of detection performance that adapts to target conditions and their environment. For the number of antennas in Tx-Rx with $U = V$ elements, the Tx-Rx subarray configuration ($W = 1$ and $X = 0.5V$) gives the best detection performance.

Keywords—false alarm, FPMIMO, detection performance, probability of detection, subarray.

Intisari—Radar Full-Phased MIMO (FPMIMO) menggunakan subarray yang saling overlap dengan jumlah elemen sama pada kedua sisi array baik di transmit dan receive (Tx-Rx). Pemanfaatan simultan subarray (W dan X) untuk jumlah total antena di Tx-Rx yaitu U dan V , menghasilkan keunggulan radar ini dalam beam pattern Tx-Rx gain, signal to interference plus noise ratio (SINR), jumlah maksimum deteksi, array virtual, dan kinerja deteksi. Kinerja deteksi radar umumnya disajikan dalam probabilitas deteksi dan false alarm. Pada makalah ini telah diformulasikan dan dievaluasi kedua probabilitas tersebut berdasarkan level ambang batas sinyal, jumlah antena di subarray Tx-Rx, variasi level SNR, dan variasi probabilitas false alarm. Dari hasil yang diperoleh bahwa kedua probabilitas radar tersebut lebih efektif dan fleksibel dibanding radar-radar yang sudah eksis terkait kinerja deteksi yang menyesuaikan terhadap kondisi target dan lingkungannya. Untuk jumlah antena di Tx-Rx dengan $U = V$ elemen maka diperoleh pada konfigurasi subarray Tx-Rx ($W = 1$ dan $X = 0,5V$) memberikan kinerja deteksi terbaik.

Kata Kunci—false alarm, FPMIMO, kinerja deteksi, probabilitas deteksi, subarray.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan radar multi antena untuk tujuan selain militer saat ini berkembang sangat pesat terutama di bidang sipil seperti radar *autonomous vehicular* [1], peralatan *scanning* kesehatan untuk deteksi tumor pada

tubuh [2], dll. Perkembangan terkini dari radar multi antena tersebut berupa radar *subarray* (SAR) dengan elemen antena yang berjumlah sama baik di sisi *transmit* (Tx) saja seperti pada studi [2], [3] dan di sisi *transmit-receive* (Tx-Rx) oleh studi [4]. Penggunaan SAR ini diketahui memiliki kelebihan-kelebihan secara simultan yaitu radar di satu sisi mampu memiliki gain koheren tinggi untuk deteksi target yang *signal to noise ratio* (SNR) lemah dan *radar cross section* (RCS) kecil serta di sisi yang lain mampu meningkatkan deteksi terhadap banyak target karena adanya kemampuan untuk *diversity waveform* [4]. Dampak positif lain dari metode SAR bagi radar antara lain adanya peningkatan gain *beam pattern* pada Tx-Rx, kemampuan meminimalisasi pengaruh interferensi dengan capaian SINR tinggi, jumlah target terdeteksi maksimum, ukuran *array* virtual besar, kinerja deteksi, fungsi ambiguitas, dan fleksibilitas konfigurasi dari radar ke kondisi khusus seperti radar dengan satu SAR yang bertindak sebagai radar *phased-array* (PHA) dan radar dengan SAR satu elemen yang bertindak sebagai radar MIMO [4].

Pada beberapa penelitian sebelumnya telah dibahas terkait kinerja deteksi pada radar SAR seperti yang telah dilakukan [2], [3] untuk radar SAR MIMO pada sisi Tx sedangkan [4] untuk radar SAR di sisi Tx-Rx. Pada studi [2], kinerja deteksi untuk probabilitas deteksi (PD) dan probabilitas *false alarm* (PFA) ditentukan berdasarkan kriteria *Neyman-Pearson* (NP) dengan *waveform* berupa kode *Barker* yang targetnya berfluktuasi mengikuti mode *Swirling*. Sementara kinerja deteksi pada studi oleh [3] menggunakan *likelihood ratio test* (LRT) juga berdasarkan kriteria NP dengan memanfaatkan variabel sinyal dan *noise* berdistribusi *chi-square*. Untuk kinerja deteksi pada studi [4] diperoleh PD dan PFA berdasarkan radar SAR di Tx-Rx menggunakan kriteria NP dengan variabel sinyal dan *noise* berdistribusi eksponensial.

Kinerja deteksi sangat ditentukan oleh penentuan ambang batas tegangan (*threshold* (TH)) atau daya sinyal karena dapat mempengaruhi kondisi *false alarm rate* [5] dimana jika TH terlalu rendah akan mengakibatkan naiknya probabilitas mis-deteksi (PMD) namun jika terlalu tinggi akan mengakibatkan naiknya PFA. Berdasarkan penelitian [4] dan [5], nilai TH berkisar 30 dari tegangan sinyal untuk nilai PFR sekitar 10^{-4} . Begitu juga pengaruh SNR masukan bagi penentuan PD turut menjadi perhatian pada makalah ini karena untuk SAR berelemen banyak atau jumlah SAR kecil maka nilai PD semakin tinggi [4]-[5]. Hal ini bisa diartikan bahwa pada jumlah SAR kecil memiliki gain koheren atau gain

perarahan (*direction gain*) yang lebih fokus sehingga berdampak pada tingginya SNR dan PD. Hal sebaliknya terjadi untuk radar dengan jumlah SAR banyak karena gain koherennya rendah maka PD juga menurun. Pada radar yang menggunakan SAR akan terlihat kemampuan fleksibilitas jumlah SAR yang mengikuti kondisi target yang dideteksi.

Pada makalah ini akan diformulasikan dan dievaluasi kinerja deteksi seperti PD dan PFA berdasarkan radar dengan SAR di Tx-Rx yang belum disajikan pada penelitian yang telah diuraikan sebelumnya [2]-[4] yaitu berdasarkan kriteria NP dengan variabel sinyal dan *noise* berdistribusi *chi-square*. Dengan demikian makalah ini akan menyajikan PD dan PFA yang dipengaruhi oleh level TH sinyal, jumlah antena di SAR Tx-Rx, variasi level SNR, dan PD dengan variasi PFA.

II. MODEL SINYAL RADAR FPMIMO

Untuk radar FPMIMO telah diteliti oleh [4] dimana terdapat SAR pada Tx-Rx. Bila terdapat total antena di Tx dan Rx yang selokasi berturut-turut yaitu U dan V antena dengan rentang jumlah SAR di Tx dan Rx berturut-turut adalah $1 \leq W \leq U$ dan $1 \leq X \leq V$ dimana SAR di Tx-Rx adalah W dan X . Spasi antar elemen antena di Tx dan Rx masing-masing adalah d_{Tx} dan d_{Rx} yang umumnya berukuran setengah panjang gelombang dari frekuensi kerja radar. Jumlah elemen SAR baik W dan X masing-masing ditentukan oleh $U_W = U - W + 1$ dan $V_X = V - X + 1$. Kondisi sinyal yang ditransmisikan oleh radar menuju target dan kembali diterima radar bersifat tanpa dispersif serta memiliki lebar bidang frekuensi yang sempit maka sinyal vektor $X \times 1$ yang diterima dinyatakan dengan

$$\mathbf{y}(t) = \gamma \sum_{i=1}^I \sigma_i(\theta_i) [\mathbf{I}(\theta_i) \circ \mathbf{m}(\theta_i)] [\mathbf{j}(\theta_i) \circ \mathbf{k}(\theta_i)]^T \Phi(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

dengan

$$\mathbf{j}(\theta) = [\mathbf{a}_1^H \mathbf{c}_1(\theta) \quad \dots \quad \mathbf{a}_W^H \mathbf{c}_W(\theta)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{c}(\theta) = [1 \quad \dots \quad e^{-j2\pi(U-1)d_{Tx} \sin(\theta)/\lambda}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{k}(\theta) = [e^{-j2\pi f \mu_1(\theta)} \quad \dots \quad e^{-j2\pi f \mu_W(\theta)}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{l}(\theta) = [\mathbf{b}_1^H \mathbf{d}_1(\theta) \quad \dots \quad \mathbf{b}_X^H \mathbf{d}_X(\theta)]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{d}(\theta) = [1 \quad \dots \quad e^{-j2\pi(V-1)d_{Rx} \sin(\theta)/\lambda}]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{m}(\theta) = [e^{-j2\pi f \mu_1(\theta)} \quad \dots \quad e^{-j2\pi f \mu_X(\theta)}]^T \quad (7)$$

dimana γ adalah $(U/W)^{0.5}$, jumlah target $i = 1, 2, \dots, I$, $\sigma(\theta)$ sebagai koefisien pantulan pada target θ yang diterima radar yang sebanding dengan RCS, vektor koheren dan direktivitas radar masing-masing dinyatakan dengan $\mathbf{j}(\theta)$ dan $\mathbf{k}(\theta)$ berdimensi $W \times 1$ pada antena Tx dan $\mathbf{l}(\theta)$ dan $\mathbf{m}(\theta)$ pada antena Rx berdimensi $X \times 1$. $\mathbf{c}(\theta)$ dan $\mathbf{d}(\theta)$

masing-masing adalah vektor *steering* pada Tx dan Rx. Untuk vektor bobot SAR di Tx dan Rx dinyatakan dengan \mathbf{a} dan \mathbf{b} . Operator transpose *Hermitian*, perkalian *Hadamard*, dan transpose dinyatakan berturut-turut dengan $(\cdot)^H$, “ \circ ”, dan $(\cdot)^T$. Jika frekuensi kerja radar f maka panjang gelombang-nya dinyatakan dengan λ . Sedangkan $\Phi(t)$ adalah *waveform* untuk SAR yang ditransmisikan dimana $\Phi(t) = [\phi_1(t) \quad \phi_2(t) \quad \dots \quad \phi_W(t)]^T$ dan $\mathbf{n}(t)$ merupakan vektor *noise* yang bersifat *white Gaussian* berdimensi $X \times 1$.

Setelah diumpangkan pada suatu *match filter* untuk W *waveform* maka pada sinyal (1) berubah menjadi vektor data sinyal berdimensi $WX \times 1$ yaitu

$$\mathbf{y} = \gamma \sigma \text{kron}\{[\mathbf{j}(\theta) \circ \mathbf{k}(\theta)][\mathbf{l}(\theta) \circ \mathbf{m}(\theta)]\} + \mathbf{n} \quad (8)$$

dimana $\text{kron}\{\cdot\}$ adalah operator perkalian *Kronecker*.

Tampak dari sinyal vektor yang diterima (8) terdapat perbedaan dengan studi [3]. Perbedaan tersebut adalah adanya SAR di Rx sehingga terbentuk vektor koheren dan vektor diversifitas yang berpotensi dalam penambahan *degree of freedom* (DoF) pada fleksibilitas jumlah SAR. Hal inilah yang serius diamati pada formulasi dan evaluasi kinerja deteksi radar FPMIMO khususnya untuk PD dan PFA.

III. KINERJA DETEKSI RADAR FPMIMO

Pada bab ini akan disajikan tahapan dalam formulasi kinerja deteksi radar FPMIMO berdasarkan kriteria NP dengan pendekatan distribusi sinyal dan *noise* berupa distribusi *chi-square* dimana sinyal dan *noise* berdasarkan pada (8). Berdasarkan kriteria NP maka uji hipotesis biner dari radar ini dapat diformulasikan dengan

$$\mathbf{y} = \begin{matrix} \mathbf{n} & H_0 \\ \gamma \sigma \text{kron}\{[\mathbf{j}(\theta) \circ \mathbf{k}(\theta)][\mathbf{l}(\theta) \circ \mathbf{m}(\theta)]\} + \mathbf{n} & H_1 \end{matrix} \quad (9)$$

dimana H_0 dan H_1 masing-masing adalah hipotesis bahwa pada \mathbf{y} hanya terdapat *noise* dan hipotesis pada \mathbf{y} terdapat sinyal dan *noise*. Untuk *noise* dan $\text{kron}\{[\mathbf{j}(\theta) \circ \mathbf{k}(\theta)][\mathbf{l}(\theta) \circ \mathbf{m}(\theta)]\}$ merupakan variabel acak dengan rerata nol dan varians berturut-turut $\sigma_n^2 \mathbf{I}_{WX}$ dan $\sigma_i^2 \mathbf{I}_{WX}$.

Berdasarkan pendekatan distribusi dari sinyal dan *noise* yaitu berdistribusi variabel acak *chi-square* ($\chi^2_{(\text{DoF})}$) maka uji statistik dari permasalahan deteksi pada (9) menjadi

$$\begin{aligned} & \|\mathbf{y}\|^2 \\ &= \frac{U_W V_X W X \sigma_n^2}{2} \chi^2_{(2WX)} \quad H_0 \quad (10) \\ &= \frac{\gamma^2 U_W^2 V_X^2 W^2 X^2 \sigma_i^2}{2} \chi^2_{(2WX)} + \frac{U_W V_X W X \sigma_n^2}{2} \chi^2_{(2WX)} \quad H_1 \end{aligned}$$

Melalui (10) dapat diturunkan ekspresi dari PD, PFA, dan TH dimana ketiganya memiliki relasi satu ke satu. PFA untuk radar FPMIMO dinyatakan dengan ekspresi

$$\begin{aligned}
& \text{PFA} \\
& = P\left(\frac{U_W V_X W X \sigma_n^2}{2} \chi_{(2WX)}^2 > \text{TH}\right) \\
& = P\left(\chi_{(2WX)}^2 > \frac{2\text{TH}}{U_W V_X W X \sigma_n^2}\right) \\
& = 1 - F_{\chi_{(2WX)}^2}\left(\frac{2\text{TH}}{U_W V_X W X \sigma_n^2}\right)
\end{aligned} \quad (11)$$

dimana $P(\cdot)$ adalah probabilitas suatu fungsi, $F_{\chi^2(\text{DoF})}$ dan $F^{-1}_{\chi^2(\text{DoF})}$ berturut-turut adalah fungsi distribusi kumulatif (*cumulative distribution function*, cdf) *chi-square* dan invers-nya.

Melalui (11) dapat diturunkan ekspresi untuk TH yaitu

$$\text{TH} = \frac{U_W V_X W X \sigma_n^2}{2} F_{\chi_{(2WX)}^2}^{-1}(1 - \text{PFA}) \quad (12)$$

Ekspresi untuk PD dinyatakan dengan

$$\begin{aligned}
& \text{PD} \\
& = P\left(\frac{\gamma^2 U_W^2 V_X^2 W^2 X^2 \sigma_i^2}{2} \chi_{(2WX)}^2 + \frac{U_W V_X W X \sigma_n^2}{2} \chi_{(2WX)}^2 > \text{TH}\right) \\
& = P\left(\chi_{(2WX)}^2 > \frac{2\text{TH}}{\gamma^2 U_W^2 V_X^2 W^2 X^2 \sigma_i^2 + U_W V_X W X \sigma_n^2}\right) \\
& = 1 - F_{\chi_{(2WX)}^2}\left(\frac{2\text{TH}}{\gamma^2 U_W^2 V_X^2 W^2 X^2 \sigma_i^2 + U_W V_X W X \sigma_n^2}\right)
\end{aligned} \quad (13)$$

Terakhir adalah substitusi (12) ke (13) akan menjadi

$$\text{PD} = 1 - F_{\chi_{(2WX)}^2}\left[\frac{\sigma_n^2}{\gamma^2 U_W V_X W X \sigma_i^2 + \sigma_n^2} F_{\chi_{(2WX)}^2}^{-1}(1 - \text{PFA})\right] \quad (14)$$

Jika diketahui daya-daya dari sinyal target dan *noise* berturut-turut adalah σ_i^2 dan σ_n^2 dan SNR dapat ditentukan dari σ_i^2/σ_n^2 maka (14) dapat disederhanakan menjadi

$$\text{PD} = 1 - F_{\chi_{(2WX)}^2}\left[\frac{1}{\gamma^2 U_W V_X W X (\text{SNR}) + 1} F_{\chi_{(2WX)}^2}^{-1}(1 - \text{PFA})\right] \quad (15)$$

Tampak pada (15) yang merupakan kontribusi dari makalah ini. Sebagai validasi bahwa radar FPMIMO merupakan bentuk umum dari radar lainnya seperti radar PHA, MIMO, dan *Phased*-MIMO (PMIMO) [3] maka berikut diberikan analisis PD dan PFA untuk radar-radar tersebut mengikuti kondisi SAR yang diimplementasikan ke (15). Untuk radar PMIMO memiliki SAR di Tx yaitu $1 \leq W \leq U$ dan SAR di Rx $X = V$ maka PFA, TH, dan PD dari (11), (12), dan (15) akan menjadi

$$\text{PFA}_{\text{PMIMO}} = 1 - F_{\chi_{(2WX)}^2}\left(\frac{2\text{TH}_{\text{PMIMO}}}{U_W W V \sigma_n^2}\right) \quad (16)$$

$$\text{TH}_{\text{PMIMO}} = \frac{U_W W V \sigma_n^2}{2} F_{\chi_{(2WX)}^2}^{-1}(1 - \text{PFA}_{\text{PMIMO}}) \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
& \text{PD}_{\text{PMIMO}} \\
& = 1 - F_{\chi_{(2WX)}^2}\left[\frac{1}{\gamma^2 U_W W V (\text{SNR}) + 1} F_{\chi_{(2WX)}^2}^{-1}(1 - \text{PFA}_{\text{PMIMO}})\right]
\end{aligned} \quad (18)$$

Tampak bahwa ekspresi untuk PFA, TH, dan PD dari radar PMIMO pada (16)-(18) sejalan yang dinyatakan oleh studi [3] dengan sedikit modifikasi variabel.

Untuk radar MIMO memiliki SAR di Tx yaitu $W = U$ dan SAR di Rx $X = V$ maka PFA, TH, dan PD dari (11), (12), dan (15) akan menjadi

$$\text{PFA}_{\text{MIMO}} = 1 - F_{\chi_{(2WX)}^2}\left(\frac{2\text{TH}_{\text{MIMO}}}{U V \sigma_n^2}\right) \quad (19)$$

$$\text{TH}_{\text{MIMO}} = \frac{U V \sigma_n^2}{2} F_{\chi_{(2WX)}^2}^{-1}(1 - \text{PFA}_{\text{MIMO}}) \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
& \text{PD}_{\text{MIMO}} \\
& = 1 - F_{\chi_{(2WX)}^2}\left[\frac{1}{U V (\text{SNR}) + 1} F_{\chi_{(2WX)}^2}^{-1}(1 - \text{PFA}_{\text{MIMO}})\right]
\end{aligned} \quad (21)$$

Sementara untuk radar PHA memiliki SAR di Tx yaitu $W = 1$ dan SAR di Rx $X = V$ maka PFA, TH, dan PD dari (11), (12), dan (15) akan menjadi

$$\text{PFA}_{\text{PHA}} = 1 - F_{\chi_{(2WX)}^2}\left(\frac{2\text{TH}_{\text{PHA}}}{U V \sigma_n^2}\right) \quad (22)$$

$$\text{TH}_{\text{PHA}} = \frac{U V \sigma_n^2}{2} F_{\chi_{(2WX)}^2}^{-1}(1 - \text{PFA}_{\text{PHA}}) \quad (23)$$

$$\text{PD}_{\text{PHA}} = 1 - F_{\chi_{(2WX)}^2}\left[\frac{1}{U^2 V (\text{SNR}) + 1} F_{\chi_{(2WX)}^2}^{-1}(1 - \text{PFA}_{\text{PHA}})\right] \quad (24)$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah diformulasikan PD, PFA, dan TH dari radar FPMIMO seperti pada (15), (11), dan (12) maka tahap selanjutnya adalah mengevaluasinya terhadap beberapa faktor antara lain: nilai ambang batas (TH), variasi level SNR, variasi PFA, dan variasi jumlah SAR di TX-Rx. Untuk menguji keefektifannya maka dibandingkan dengan kinerja deteksi radar-radar yang sudah eksis seperti radar PHA dengan (22)-(24), radar MIMO dengan (19)-(21), dan radar PMIMO dengan (16)-(18). Bila diasumsikan radar FPMIMO memiliki $U = V = 10$ elemen antena dengan spasi antar elemen setengah panjang gelombang dari frekuensi kerja maka akan dihasilkan rentang jumlah SAR di Tx dan Rx masing-masing $1 \leq W \leq 10$ dan $1 \leq X \leq 10$. Kondisi jumlah SAR untuk radar PHA adalah $W = 1$ dan $X = 10$, radar MIMO adalah $W = 10$ dan $X = 10$, dan radar PMIMO adalah $1 \leq W \leq 10$ dan $X = 10$.

A. Nilai Ambang Batas

Telah diketahui bahwa TH ditentukan sedemikian rupa agar dapat memberikan rekomendasi nilai PFA karena jika terlalu rendah akan mengakibatkan besarnya PMD dan jika terlalu tinggi akan mengakibatkan besarnya PFA. Terlebih jika terdapat *jamming* atau interferensi maka akan berdampak pada penentuan PFA [6]. Dari hubungan satu ke satu antara TH, PFA, dan PD tampak bahwa penentuan TH berakibat langsung terhadap PFA dan PD. Jika diasumsikan diberikan σ_i^2 dan σ_n^2 berturut-turut yaitu 1 dan 0,1 maka diperoleh SNR sebesar 10 dB. Untuk rentang TH diberikan 0-30 maka hasil evaluasi dari kinerja PFA terhadap TH disajikan pada Gambar 1. Tampak dari Gambar 1 bahwa semakin naik TH maka PFA akan turun. Radar PHA ($W = 1, X = 10$) dan radar MIMO ($W = 10, X = 10$) memberikan PFA terkecil untuk naiknya nilai TH. Untuk radar FPMIMO dengan kondisi jumlah SAR di TX besar dan SAR di Rx kecil seperti ($W = 7, X = 2$) maka nilai PFA lebih cepat menurun dibanding kondisi SAR di Tx-Rx ($W = 3, X = 8$). Terlihat juga bahwa untuk mencapai PFA 10^{-4} maka dibutuhkan TH lebih dari 35. Hal ini mendukung penelitian [3] tentang nilai PFA diatas 30 agar tercapai PFA sebesar 10^{-4} . Pada saat TH bernilai 30 maka PFA dari radar PHA ($W = 1, X = 10$), MIMO ($W = 10, X = 10$), PMIMO ($W = 5, X = 10$), FPMIMO ($W = 3, X = 8$), dan FPMIMO ($W = 7, X = 2$) berturut-turut adalah 0,0498; 0,0498; 0,3679; 0,5940; dan 0,5514.

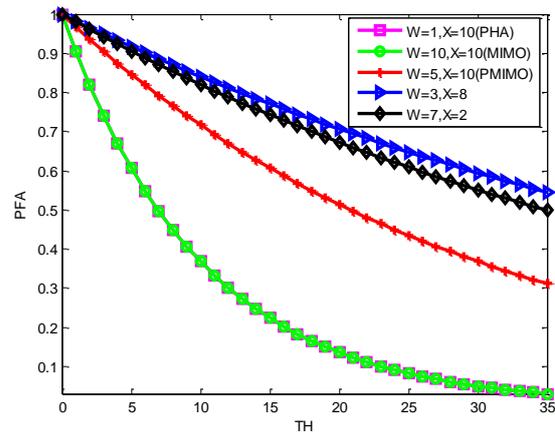
Untuk kinerja PD terhadap TH disajikan pada Gambar 2. Tampak dari Gambar 2 bahwa secara umum pada TH bernilai 30 maka semua radar memberikan PD diatas 0,997. Kinerja PD yang lebih superior adalah radar FPMIMO ($W = 3, X = 8$) dengan PD sebesar 1 dibanding radar-radar yang lain terutama untuk konfigurasi ($W = 7, X = 2$) yang memiliki PD sebesar 0,999. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah SAR di Tx dan Rx keduanya kecil berpotensi memberikan PD terbesar. Penentuan nilai PD sangat bergantung pada nilai PFA. PD pada Gambar 2 ditentukan dari PFA bernilai 10^{-4} dan TH lebih besar 30 sehingga hasil PD tersebut sejalan dengan studi [3].

B. Variasi Level SNR

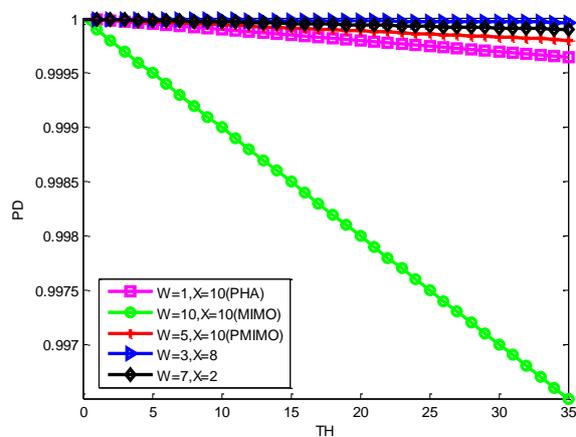
Nilai SNR ditentukan dari rasio antara daya sinyal pantulan target yang diterima antena Rx terhadap daya *noise* di Rx. Sehingga radar yang memiliki kinerja terbaik haruslah mampu menerima sinyal pantulan tersebut walaupun memiliki SNR rendah atau sangat lemah. Pada radar FPMIMO dimana kedua array di Tx dan Rx mengunakan SAR berpotensi meningkatkan kemampuan deteksi terhadap SNR yang lemah karena adanya penggunaan SAR dimana menurut hasil investigasi oleh [7] bahwa metode SAR yaitu konfigurasi hibrid antara PHA dan MIMO bisa meningkatkan kemampuan kinerja deteksi terutama PD. Untuk konfigurasi radar-radar serupa pada percobaan sebelumnya, PFA sebesar 10^{-4} , dan rentang SNR -20 dB - +20 dB sehingga hasil evaluasi PD tampak pada Gambar 3.

Tampak pada Gambar 3 bahwa kinerja PD radar FPMIMO ($W = 3, X = 8$) lebih superior dibanding kinerja PD radar-radar lainnya terutama untuk SNR rendah. Kemudian diikuti kinerja PD dari radar PHA dimana hal ini sejalan dengan hasil studi [3] dimana saat SNR rendah

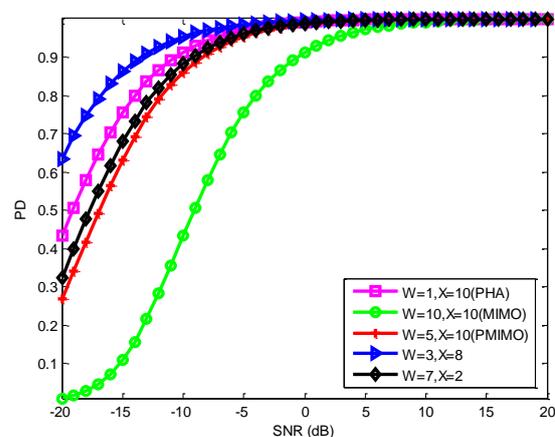
kinerja tersebut lebih baik dari kinerja radar MIMO. Secara umum ketika SNR diatas 10 dB maka PD diatas 99%. Tampak bahwa pengaturan jumlah SAR di Tx dan Rx mempengaruhi PD sehingga memungkinkan adanya optimalisasi PD untuk jumlah SAR di Tx dan Rx dengan jumlah tertentu.



Gambar 1. Kinerja PFA terhadap TH untuk semua konfigurasi radar.



Gambar 2. Kinerja PD terhadap TH untuk semua konfigurasi radar.



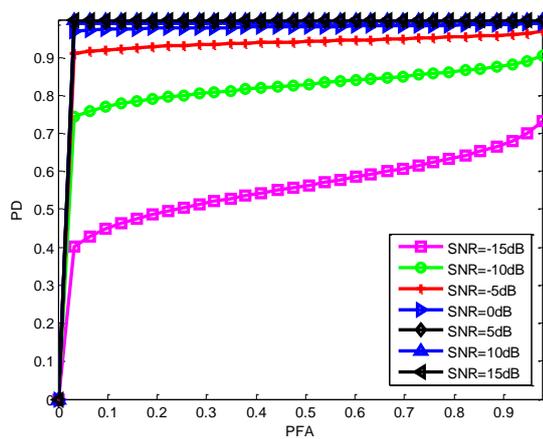
Gambar 3. Kinerja PD terhadap SNR untuk semua jenis radar.

Penggunaan SAR di Tx dan Rx pada radar FPMIMO juga menguatkan hasil studi [7] dan [8] dimana radar ini

mampu mendeteksi target walaupun level SNR rendah. Sebagai contoh untuk SNR 10 dB maka kinerja PD pada radar PHA ($W = 1, X = 10$), MIMO ($W = 10, X = 10$), PMIMO ($W = 5, X = 10$), FPMIMO ($W = 3, X = 8$), dan FPMIMO ($W = 7, X = 2$) berturut-turut adalah 0,9991; 0,9908; 0,9985; 0,9995; dan 0,9987.

C. Variasi PFA

Telah diketahui bahwa nilai PFA sangat mendikte nilai kinerja PD suatu radar. Khusus untuk radar FPMIMO dengan ($W = 7, X = 2$) pada Gambar 4 diperlihatkan kinerja PD terhadap PFA untuk variasi SNR yaitu $\{-15$ dB, -10 dB, -5 dB, 0 dB, $+5$ dB, $+10$ dB, $+15$ dB $\}$. Tampak bahwa untuk SNR lebih besar dari 10 dB maka kinerja PD memberikan nilai diatas 0,95% dengan PFA lebih besar 10^{-3} . Hal ini mendukung percobaan sebelumnya pada subbab B Variasi Level SNR dimana penentuan PD diatas 0,99% diberikan pada PFA bernilai 10^{-4} yang menunjukkan SNR diatas 10 dB.



Gambar 4. Kinerja PD terhadap PFA untuk variasi SNR pada radar FPMIMO.

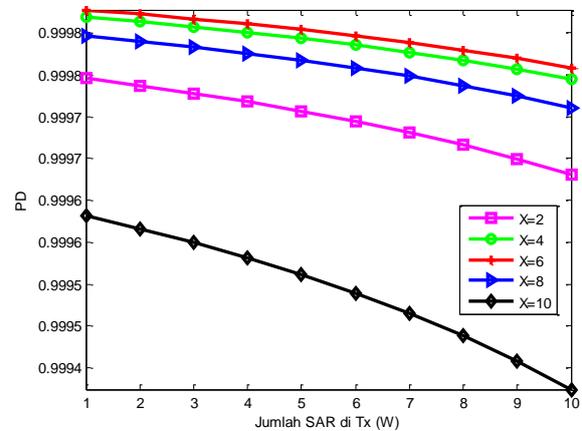
D. Variasi Jumlah SAR di Tx-Rx

Sebagai eksperimen evaluasi terakhir di makalah ini yaitu untuk memperlihatkan pengaruh jumlah SAR di Tx dan Rx terhadap kinerja PD. Serupa kondisinya dengan percobaan sebelumnya yaitu kinerja PD terhadap jumlah SAR di Tx dengan variasi X untuk $X = \{2, 4, 6, 8, 10\}$ dan kinerja PD terhadap jumlah SAR di Rx dengan variasi W untuk $W = \{2, 4, 6, 8, 10\}$ untuk PFA bernilai 10^{-4} dan SNR 10 dB berturut-turut ditampilkan pada Gambar 5(a) dan 5(b).

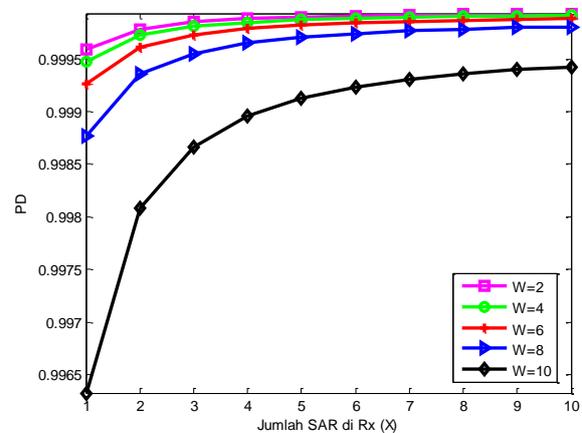
Pada Gambar 5(a) bahwa PD akan turun jika bertambah jumlah dari SAR di Tx yaitu W namun nilai PD diatas 0,9994 untuk $W = 10$. Tampak bahwa jika antenna array di Tx-Rx ada 10 elemen maka nilai PD akan optimum jika jumlah SAR di Rx sekitar $X = 5$ dan $X = 6$ atau ukuran X separuh dari jumlah total antenna Tx yaitu U (lihat Gambar 5(a) untuk kurva dengan garis tanda “+” berwarna merah). Sebagai contoh jika jumlah SAR di Tx yaitu $W = 5$ maka kinerja PD untuk variasi $X = \{2, 4, 6, 8, 10\}$ berturut-turut adalah $\{0,9998; 0,9998; 0,9999; 0,9998; 0,9996\}$.

Terlihat pada Gambar 5(b) bahwa PD cenderung naik dengan bertambahnya jumlah dari SAR di Rx yaitu X

dimana nilai PD diatas 0,9963 untuk $X = 1$. Tampak bahwa jika antenna array di Tx-Rx ada 10 elemen maka nilai PD akan optimum jika jumlah SAR di Tx sekitar $W = 2$ (lihat Gambar 5(b) untuk kurva dengan garis tanda “□” berwarna merah muda) atau W yang kecil. Sebagai contoh jika jumlah SAR di Rx yaitu $X = 5$ maka kinerja PD untuk variasi $W = \{2, 4, 6, 8, 10\}$ berturut-turut adalah $\{0,9999; 0,9999; 0,9998; 0,9997; 0,9991\}$.



(a)



(b)

Gambar 5. Kinerja PD terhadap jumlah SAR: (a) sisi Tx dengan variasi $X = \{2, 4, 6, 8, 10\}$ dan (b) sisi Rx dengan variasi $W = \{2, 4, 6, 8, 10\}$.

V. KESIMPULAN

Kinerja deteksi baik PD, PFA, dan TH dari radar FPMIMO telah berhasil diformulasikan dan dievaluasi dimana telah juga divalidasikan menjadi konfigurasi radar-radar yang sudah eksis sebelumnya yaitu ($W = 1, X = 10$), ($W = 10, X = 10$), dan ($W = 5, X = 10$) berturut-turut sebagai radar PHA, MIMO, dan PMIMO. Hasil evaluasi kinerja deteksi dari radar ini menunjukkan bahwa terdapat relasi yang erat antara TH, PFA, dan PD dimana umumnya PD diatas 0,9997 untuk PFA bernilai 10^{-4} dan TH diatas 30. Untuk pengaruh SNR maka dengan adanya variasi jumlah SAR di Tx dan Rx maka kinerja deteksi tetap bekerja untuk SNR rendah. Untuk SNR diatas 10 dB akan memberikan kinerja deteksi radar tersebut diatas 99%. Terakhir, kinerja deteksi untuk variasi jumlah SAR

di Tx-Rx pada radar ini optimum jika $W = 1$ dan $X = 0,5V$ untuk kondisi jumlah elemen antena $U = V$. Kemampuan dalam pengaturan jumlah SAR di Tx-Rx ini kedepannya bisa menjadi salah satu strategi yang tepat untuk desain radar multiantena yang mampu mendeteksi target dengan resolusi tinggi biarpun level SNR dari sinyal pantul rendah.

REFERENSI

- [1] A. Sharma, S. Chaudhary, J. Malhotra, S. Khichar, and L. Wuttisittikulkiy, "Photonic sensor for multiple targets detection under adverse weather conditions in autonomous vehicles," *J. Sens. Actuator Netw.*, vol. 11, no. 60, pp. 1-15, 2022. <https://doi.org/10.3390/jsan11040060>
- [2] A. Taparugssanagorn, S. Siwamogsatham, and C. Pomalaza-Ráez, "Breast cancer nodes detection using ultrasonic microscale subarrayed MIMO radara," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2016, Article ID 1382960, pp. 1-6, 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1382960>
- [3] S. Tahcfulloh, "Phased-MIMO antenna arrays of radar system in detection performance," in *Proc. Int. Conf. Commun. Networks Satellite*, Batam, Indonesia, 2020, pp. 117-120. <https://doi.org/10.1109/Commnetsat50391.2020.9328962>
- [4] S. Tahcfulloh and G. Hendratoro, "FPMIMO: a general MIMO structure with overlapping subarrays for various radar applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 11248-11267, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965192>
- [5] E. Fishler, A. Haimovich, R. S. Blum, L. J. Cimini, D. Chizhik, and R. A. Valenzuela, "Spatial diversity in radars-models and detection performance," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 54, no. 3, pp. 823-838, Mar. 2006. <https://doi.org/10.1109/TSP.2005.862813>
- [6] X. Chen, M. Hu, and S. Lu, "Modelling and analysis of constant false alarm rate performance in presence of jamming environments," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, Article ID 3780252, pp. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3780252>
- [7] C. Qi, J. Xie, H. Zhang, Z. Ding, and X. Yang, "Optimal configuration of array elements for hybrid distributed PA-MIMO radar system based on target detection," *Remote Sens.*, 2022, 14, 4129, pp. 1-20. <https://doi.org/10.3390/rs14174129>
- [8] Y. Liu, Y. Ma, and H. Jing, "Detection performance analysis of the standard FDA and FDA-MIMO radar in the gaussian background," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2021, Article ID 6001513, pp. 1-11, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6001513>