

Estimasi Parameter Sistem Radar Multi-Antena dengan *Generalized-Likelihood Ratio Test*

Kristianto Pasepang, Syahfrizal Tahcfulloh

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Borneo Tarakan
Jl. Amal Lama No. 1, Tarakan 77123
Email: christiantopasepang@gmail.com, tsyahfrizal@gmail.com

ABSTRAK

Ada dua jenis sistem radar multi-antena yaitu *phased-array* dan *Multiple-input Multiple-Output* yang berturut-turut memiliki keunggulan utama yaitu *coherent gain* tinggi dan *waveform diversity* tinggi. Satu parameter terpenting untuk menguji kinerja radar-radar tersebut adalah estimasi parameter yang berkaitan pada kemampuan estimasi sudut kedatangan sinyal dan resolusinya. Makalah ini mengusulkan perluasan estimasi parameter yaitu *Generalized-Likelihood Ratio Test* yang dimanfaatkan selama ini pada analisa spektrum sinyal. Formulasi dan evaluasi kinerja estimator ini diuji mempertimbangkan resolusi sudut antar dua target dan jumlah elemen antena di *transmitter-receiver*. Pendekatan ini memberikan perbaikan resolusi terhadap estimasi sudut kedatangan dari sinyal pantulan target radar yang dikomparasikan dengan estimator konvensional seperti *least squares*. Resolusi sudut deteksi yang diperoleh untuk estimator ini lebih baik dari estimator *least squares*, sebagai contoh untuk $K = L = 8$ maka diperoleh resolusi sudut 3° sedangkan estimator *least squares* sebesar $5,8^\circ$.

Kata Kunci: Estimasi Parameter, *Generalized-Likelihood Ratio Test*, *Phased-Array*, Radar MIMO

ABSTRACT

There are two types of multi-antenna radar systems, i.e. the *phased-array* and the *Multiple-input Multiple-Output* which have the main advantages, namely high coherent gain and high waveform diversity, respectively. One of the most important parameters to test the performance of these radars is the estimation of parameters related to the ability to estimate the direction of arrival and its resolution. This paper proposes an extension of the parameter estimation, namely the *Generalized-Likelihood Ratio Test* which has been used so far in signal spectrum analysis. The formulation and evaluation for the performance of this estimator is carried out considering the angular resolution between the two targets and the number of antenna elements in the transmitter-receiver. This approach provides improved resolution of the direction of arrival estimation of the reflected radar target signal compared to conventional estimators such as *least squares*. The detection angle resolution obtained for this estimator is superior to the *least squares*, for example for $K = L = 8$, the angle resolution is 3° while the *least squares* estimator is 5.8° .

Keywords: Parameter Estimation, *Generalized-Likelihood Ratio Test*, *Phased-Array*, MIMO Radar

Pendahuluan

Radar merupakan singkatan dari *RADio Detection And Ranging*. Radar bekerja pada gelombang elektromagnetik yang merupakan gelombang radio dengan panjang gelombang (*wavelength*) dari beberapa milimeter hingga sekitar satu meter. Gelombang radio tersebut dipancarkan ke seluruh permukaan bumi dan pantulannya akan menuju dan terdeteksi oleh sistem radar yang selanjutnya digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek. Oleh karena itu sistem ini sering disebut sebagai penginderaan jauh yang bersifat aktif. Besar dan kecil dari panjang gelombang elektromagnetik berpengaruh terhadap penetrasi gelombang tersebut pada objek-objek di permukaan

bumi [1]. Semakin besar panjang gelombang yang digunakan maka semakin kuat daya penetrasi gelombang tersebut.

Dalam beberapa tahun yang lalu, muncul pengembangan teknologi di bidang radar multi-antena yang dikenal dengan nama radar *phased array* (PA). Radar PA adalah suatu sistem radar dengan semua elemen-elemen antena diatur fasenya sedemikian sehingga memiliki *beam* atau sorot pancaran radiasi gelombang elektromagnetik menuju ke arah target yang diinginkan karena memiliki penguatan koheren yang tinggi maka radar ini dapat mendeteksi suatu target yang jauh dan kecil [1].

Sementara itu ada juga radar *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO). Radar MIMO

menggunakan beberapa antena untuk memancarkan sinyal ortogonal yang mampu memaksimalkan jumlah target yang dapat dideteksi [2]-[3]. Hal ini terjadi karena tiap-tiap sinyal (*waveform*) yang dipancarkan oleh *transmitter* (Tx) akan mudah dibedakan satu dengan lainnya karena adanya sifat ortogonal tersebut. Melalui beberapa antena yang dimiliki oleh radar MIMO maka ditransmisikan beberapa *waveform* ortogonal yang disebut dengan *waveform diversity* yaitu peragaman sinyal radar sehingga meningkatkan jumlah objek yang dideteksi.

Berbagai kinerja radar telah diuraikan oleh para peneliti di bidang radar multi-antena terutama yang berkaitan dengan identifikasi atau estimasi parameter target. Metode estimasi *least squares* (LS) umum digunakan untuk estimasi parameter [4]. Metode estimasi ini memiliki kelemahan yaitu rendah resolusi namun memiliki *sidelobe* yang tinggi, selain itu juga memiliki deteksi amplitudo yang tidak akurat yang sebanding dengan *radar cross section* (RCS), serta memiliki resolusi sudut yang kurang baik [5]-[7]. Berbeda dengan estimator *Generalized-Likelihood Ratio Test* (GLRT) yang memiliki kelebihan dapat mendeteksi lokasi target dan dapat memperkirakan amplitudo yang kompleks serta memiliki resolusi sudut yang lebih baik [5].

Metode estimasi parameter yang kinerjanya diukur berdasarkan pengaruh variasi RCS dan *direction of arrival* (DoA) untuk metode ini sepengetahuan penulis belum dilakukan, sehingga kontribusi utama pada penelitian ini adalah memformulasikan estimasi parameter untuk amplitudo dan fase dari DoA berdasarkan estimator GLRT yang diterapkan pada radar PA dan MIMO berdasarkan pengaruh banyaknya DoA target, jumlah antena *transmitter-receiver* (Tx-Rx), dan besar resolusi sudut deteksi antar dua target. Selanjutnya dilakukan simulasi dan evaluasi pada radar PA dan radar MIMO dengan menggunakan estimator GLRT yang dibandingkan dengan estimator LS berdasarkan parameter-parameter evaluasi yang disebutkan sebelumnya.

Metode Penelitian

Pada makalah ini diformulasikan estimasi parameter untuk arah kedatangan sinyal pantulan atau DoA pada radar MIMO dengan menggunakan metode GLRT yang diperluas dari studi oleh [8]. Sebelumnya akan diulas estimasi parameter untuk metode LS.

Reviu Estimator *Least Square* sebagai Estimasi Parameter

Metode estimasi parameter target suatu radar MIMO yang sederhana yaitu LS telah diulas pada beberapa studi seperti [2], [4]-[7]. Pada studi yang dilaporkan oleh [2], [5], metode LS diterapkan

husus untuk radar MIMO. Sementara pada studi oleh [4] dan [6] dikembangkan untuk radar *Phased-MIMO* (PMIMO) sedangkan pada [7] dilakukan estimasi LS untuk radar yang menggunakan subarray berupa PA pada elemen array radar MIMO di Tx dan Rx yang dinamakan *Full-PMIMO* (FPMIMO).

Untuk sistem radar multi-antena dengan jumlah antena di Tx-Rx berturut-turut adalah K dan L . Apabila dinyatakan kembali sinyal ekuivalen *baseband* yang diterima oleh L elemen antena pada array Rx dengan arah target θ_p dinyatakan dengan vektor [7]

$$\mathbf{y}_{\text{MIMO}}(t) = \sum_{p=1}^P \sigma_p(\theta_p) \mathbf{b}(\theta_p) \mathbf{a}^T(\theta_p) \boldsymbol{\psi}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

dengan $(\cdot)^T$ adalah operator transpose, $\mathbf{a}(\theta) = [1 \ e^{-j2\pi d_r \sin(\theta)/\lambda} \ \dots \ e^{-j2\pi (K-1) d_r \sin(\theta)/\lambda}]^T$ yaitu vektor *steering* $K \times 1$ pada Tx, $\mathbf{b}(\theta) = [1 \ e^{-j2\pi d_r \sin(\theta)/\lambda} \ \dots \ e^{-j2\pi (L-1) d_r \sin(\theta)/\lambda}]^T$ yaitu vektor *steering* $L \times 1$ pada Rx, $\boldsymbol{\psi}(t) = [\varphi_1(t) \ \varphi_2(t) \ \dots \ \varphi_K(t)]^T$ yaitu vektor *waveform* $K \times 1$ dari Tx dengan $\varphi_k(t)$ adalah sinyal transmisi *baseband* untuk waktu diskrit $t = 1, \dots, Q$, $\sigma_p(\theta_p)$ adalah koefisien refleksi radar dari target yang proporsional dengan RCS, p adalah jumlah target yang memantulkan sinyal pantul ke Rx dimana $p = 1, 2, \dots, P$, θ_p adalah lokasi target, dan $\mathbf{n}(t)$ adalah vektor $L \times 1$ dari *interference plus noise*. Parameter yang akan diestimasi dari $\mathbf{y}_{\text{MIMO}}(t)$ adalah $\{\sigma_p(\theta_p)\}_{p=1}^P$ dan $\{\theta_p\}_{p=1}^P$. Jika diasumsikan $\mathbf{n}(t)$ tidak berkorelasi dengan $\boldsymbol{\psi}(t)$ maka sifat identifiabilitas pada suku pertama dari (1) tidak dipengaruhi oleh suku kedua.

Dari keseluruhan studi tentang metode LS pada radar MIMO maka estimasi amplitudo dan DoA-nya dinyatakan dengan [7]

$$\hat{\sigma}_{\text{LS,MIMO}}(\theta) = \frac{\sum_{q=1}^Q \mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\boldsymbol{\psi}} \mathbf{a}^*(\theta)}{|\mathbf{b}(\theta)|^2 [\mathbf{a}^T(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}} \mathbf{a}^*(\theta)]} \quad (2)$$

dengan

$$\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\boldsymbol{\psi}} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \mathbf{y}(q) \boldsymbol{\psi}^H(q) \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \boldsymbol{\psi}(q) \boldsymbol{\psi}^H(q) \quad (4)$$

dimana $|\cdot|^2$ adalah *Euclidean norm* dari vektor, $(\cdot)^H$ adalah operator *Hermitian transpose*, $(\cdot)^*$ adalah operator konjugat kompleks.

Untuk radar PA maka estimator LS dinyatakan dengan [7]

$$\hat{\sigma}_{\text{LS,PA}}(\theta) = \frac{\sqrt{K} \sum_{q=1}^Q \mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\boldsymbol{\psi}} \mathbf{a}^*(\theta)}{|\mathbf{b}(\theta)|^2 a(\theta) a^*(\theta)} \quad (5)$$

Metode *GLRT* sebagai Estimasi Parameter

Pada radar MIMO telah diakui dapat memperbaiki resolusi radar [8]. Idenya adalah

dengan K antena pada Tx dipancarkan K waveform yang ortogonal satu dengan lain yang kemudian diterima oleh L antena di Rx. Adanya *match filter* (MF) di Rx akan memisahkan K waveform tersebut dengan tepat. Telah dibuktikan bahwa *beam pattern* total pada radar ini merupakan hasil perkalian *beam pattern* pada Tx dan Rx sehingga memberikan resolusi yang tinggi [9]. Radar ini menunjukkan juga bahwa *waveform* yang dipantulkan berasal dari banyak target bersifat independen secara linier sehingga mendukung penerapan banyak teknik estimasi adaptif guna memperoleh resolusi yang tinggi sekaligus mampu menolak interferensi atau *jamming*.

Pada estimasi target $\hat{\sigma}(\theta)$ yaitu amplitudo kompleks dari sinyal *echo* dengan metode LS ternyata mengalami kelemahan berupa *sidelobe* yang tinggi dan beresolusi deteksi yang rendah. Di kondisi dengan interferensi yang kuat dan banyak *jamming* maka metode LS tidak berfungsi dengan baik [6]. Untuk memperoleh estimasi target dengan resolusi tinggi, akurasi estimasi amplitudo tinggi, dan kemampuan menekan interferensi cukup baik maka dapat digunakan metode GLRT. Bila diketahui sinyal ekuivalen *baseband* yang diterima oleh L elemen antena pada Rx array dengan arah target θ dinyatakan dengan vektor seperti pada (1).

GLRT sering dimanfaatkan untuk deteksi target dan pelokasian [8] dan [10]. Berikut perluasan GLRT pada [8] untuk diaplikasikan pada radar multi-antena terutama radar MIMO yang merupakan kontribusi utama pada makalah ini. Jika sinyal vektor yang diterima Rx pada (1) dilewatkan ke MF maka permasalahan uji hipotesisnya yaitu

$$\begin{cases} H_0 : \mathbf{y} = \mathbf{n} \\ H_1 : \mathbf{y} = \sum_{p=1}^P \sigma_p(\theta_p) [\mathbf{a}(\theta_p) \otimes \mathbf{b}(\theta_p)] + \mathbf{n} \end{cases} \quad (6)$$

dengan \otimes adalah operator perkalian Kronecker. Pada (6) digunakan untuk menguji jika ada target pada lokasi θ atau tidak. Pada [8] didefinisikan bahwa GLR yaitu

$$\rho(\theta) = \left\{ 1 - \left[\frac{\max_{\mathbf{U}} f(\mathbf{y}|H_0)}{\max_{\sigma(\theta), \mathbf{U}} f(\mathbf{y}|H_1)} \right]^{1/L} \right\}^L \quad (7)$$

dengan

$$\mathbf{U}(\theta) = \hat{\mathbf{R}}_{yy} - \frac{\hat{\mathbf{R}}_{y\psi} \mathbf{a}^*(\theta) \mathbf{a}^T(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\psi y}}{\mathbf{a}^T(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\psi\psi} \mathbf{a}^*(\theta)} \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_{yy} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \mathbf{y}(q) \mathbf{y}^H(q) \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_{y\psi} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \mathbf{y}(q) \boldsymbol{\Psi}^H(q) \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_{\psi y} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \boldsymbol{\Psi}(q) \mathbf{y}^H(q) \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_{\psi\psi} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \boldsymbol{\Psi}(q) \boldsymbol{\Psi}^H(q) \quad (12)$$

dimana $f(\mathbf{y}|H_0)$ dan $f(\mathbf{y}|H_1)$ adalah fungsi kerapatan probabilitas (*probability density function*, PSD) dari \mathbf{y} untuk masing-masing hipotesis. Pada (7) nilai $\rho(\theta)$ adalah antara 0 dan 1. Berdasarkan

analogi yang disampaikan pada [8] maka estimasi amplitudo kompleks ditentukan melalui pendekatan *amplitudo and phase estimation* (APES) seperti pada (8) kemudian untuk estimasi DoA ditentukan oleh metode GLRT yaitu

$$\rho_{\text{MIMO}}(\theta) = \left\{ 1 - \frac{|\mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{yy}^{-1} \mathbf{b}(\theta)|}{|\mathbf{b}^H(\theta) \mathbf{U}^{-1}(\theta) \mathbf{b}(\theta)|} \right\}^L \quad (13)$$

Untuk kasus radar PA maka $\hat{\mathbf{R}}_{yy}$ pada (13) diperoleh dari korelasi dari $\mathbf{y}(t)$ radar PA dengan persamaan seperti pada [7, pada (43)]. Serupa dalam proses penurunan untuk memperoleh (13) pada radar MIMO yaitu dari (6)-(13) maka pada radar PA diperoleh estimasi DoA dengan GLRT yaitu

$$\rho_{\text{PA}}(\theta) = \left\{ 1 - \frac{|\mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{yy}^{-1} \mathbf{b}(\theta)|}{|\mathbf{b}^H(\theta) \mathbf{U}_{\text{PA}}^{-1}(\theta) \mathbf{b}(\theta)|} \right\}^L \quad (14)$$

dengan

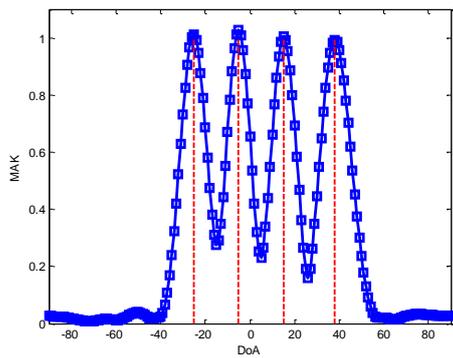
$$\mathbf{U}_{\text{PA}}(\theta) = \hat{\mathbf{R}}_{yy} - \frac{\hat{\mathbf{R}}_{y\psi} \mathbf{a}^*(\theta) \mathbf{a}(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\psi y}}{\mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^*(\theta)} = \hat{\mathbf{R}}_{yy} - \hat{\mathbf{R}}_{y\psi} \hat{\mathbf{R}}_{\psi y} \quad (15)$$

Hasil dan Pembahasan

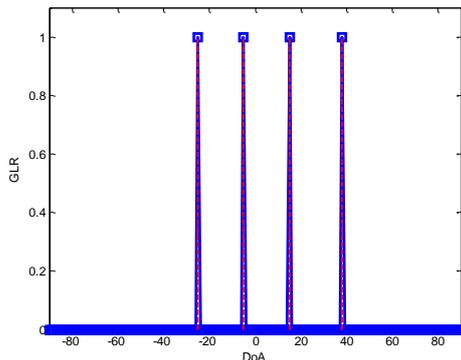
Evaluasi kinerja estimasi parameter target dengan pendekatan GLRT pada radar multi-antena yaitu PA dan MIMO menggunakan (13) sedangkan metode LS menggunakan (2) dan (5). Kinerja semua estimator pada dua jenis radar disajikan sebagai grafik modulus amplitudo kompleks (MAK) yang bervariasi terhadap DoA dimana MAK proporsional dengan RCS dinyatakan sebagai $\hat{\sigma}(\theta)$. Bila diasumsikan jumlah elemen antena pada array di Tx-Rx adalah sama, yaitu $K = L = 8$ elemen. Spasi antar elemen antena pada array Tx-Rx adalah setengah panjang gelombang. Berikut diulas estimasi parameter target dari sinyal *echo* pada DoA dari estimator yaitu LS dan GLRT untuk radar multi-antena berdasarkan pada banyak jenis radar, banyak sudut DoA, resolusi sudut antar dua target, dan jumlah elemen antena di Tx-Rx.

Pengaruh Jenis Radar

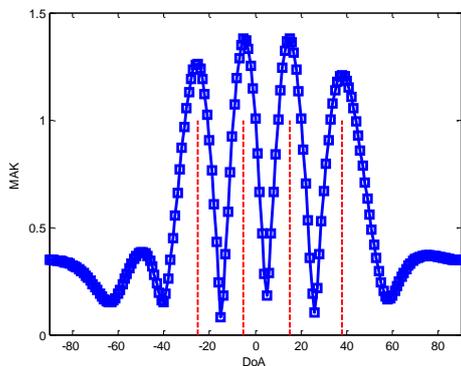
Untuk membandingkan kinerja estimator parameter antara metode yang diusulkan yaitu GLRT dengan metode LS, pada kedua jenis radar multi-antena, yaitu PA dan MIMO, maka diasumsikan ada empat target berlokasi di $\Theta_A = \{-25^\circ, -5^\circ, 15^\circ, 38^\circ\}$ dengan amplitudo kompleks yang proporsional dengan RCS untuk semua target yaitu $\sigma(\Theta_A) = 1$. Pada Gambar 1(a)-(b) menunjukkan MAK untuk kinerja semua estimator terhadap radar MIMO sementara Gambar 1(c)-(d) terhadap radar PA. Lokasi Θ_A pada Gambar 1 ditunjukkan dengan garis vertikal terputus-putus berwarna merah.



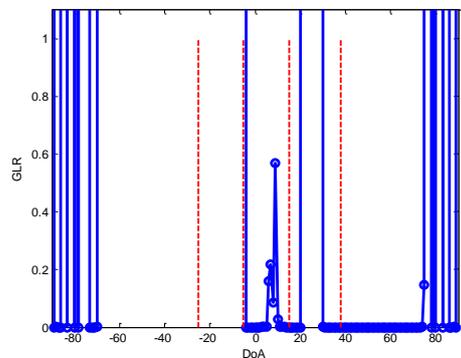
(a) Radar MIMO dengan LS



(b) Radar MIMO dengan GLRT



(c) Radar PA dengan LS



(d) Radar PA dengan GLRT

Gambar 1. Modulus amplitudo kompleks (MAK) dengan θ_A dan RCS sama.

Untuk radar MIMO dilihat pada Gambar 1(a)-(b), kinerja estimator-estimator tersebut secara umum mampu mendeteksi keempat target dengan tepat. Pada Gambar 1(a) dengan estimator LS semua target mampu dideteksi walaupun MAK tidak tepat dengan nilai RCS = 1. Sementara pada estimator GLRT yang ditunjukkan dengan nilai sumbu vertikal sebagai rasio dari GLR dengan maksimum satu dimana pada θ_A memiliki GLR tepat satu. Hal ini menandakan keakuratan estimator GLRT terhadap estimasi DoA. Sedangkan pada estimator LS terdapat *sidelobe* serta *mainlobe* yang lebar sehingga rentan terhadap terjadinya interferensi dan *jamming*. Hal ini membuktikan hasil studi yang dilaporkan oleh [6] yaitu penekanan terhadap *sidelobe*.

Pada kinerja estimator untuk radar PA yang ditunjukkan pada Gambar 1(c)-(d) bahwa hanya estimator LS yang berfungsi mendeteksi keempat target dibanding estimator GLRT. Meskipun MAK dari estimator LS memiliki resolusi yang tidak tepat bahkan terdapat *sidelobe* yang tinggi. Hal ini diulas lebih lanjut pada Subbab Pengaruh Jumlah Elemen Antena Tx-Rx yang menunjukkan pengaruh jumlah elemen array di Tx-Rx terhadap kinerja estimator. Radar PA termasuk memiliki jumlah *waveform* yang ditransmit paling sedikit yaitu semua elemen pada array di Tx, yaitu $K = 8$, memancarkan satu *waveform* saja sehingga sulit untuk mendeteksi banyak target apalagi untuk deteksi DoA maupun MAK yang tepat. Hal tersebut sejalan dengan studi yang dilaporkan oleh [6] yaitu kemampuan deteksi semakin meningkat dengan naiknya jumlah subarray dimana untuk radar PA subarray-nya bernilai 1 sedangkan radar MIMO memiliki subarray K yaitu 8. Untuk radar MIMO kemampuan deteksi target tinggi karena semua elemen antena pada array di Tx memancarkan K *waveform* sehingga berdampak pada tingginya peragaman *waveform* seperti yang telah dibahas oleh [7].

Pengaruh Banyak DoA

Untuk melihat kinerja semua estimator dalam mendeteksi parameter amplitudo maupun DoA maka bisa dilihat dari kemampuannya mendeteksi banyak atau sedikitnya DoA. Pada evaluasi kinerja ini telah dilaksanakan dua macam eksperimen dimana setiap eksperimen diterapkan dengan DoA yang bervariasi jumlah dan nilainya dimana semua target ber-RCS satu. Dua macam eksperimen ini bertujuan untuk melihat pengaruh kemampuan estimasi parameter terhadap banyak sedikit DoA.

Pada Gambar 2(a)-(b) menunjukkan kinerja dari estimasi parameter khusus radar MIMO untuk kedua estimator dengan tujuh DoA yaitu $\theta_B = \{-45^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 60^\circ\}$. Sementara pada

Gambar 2(c)-(d) menunjukkan kinerjanya dengan sebelas DoA yaitu $\Theta_C = \{-50^\circ, -40^\circ, -30^\circ, -20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ\}$.

Terlihat hasilnya bahwa semua DoA target mampu dideteksi untuk kondisi jumlah DoA sebanyak tujuh (lihat Gambar 2(a)-(b)). Namun tidak demikian untuk kondisi jumlah DoA lebih dari jumlah elemen antenna di Tx-Rx yaitu 8 seperti pada Gambar 2(c)-(d) dengan sebelas DoA maka hanya estimator LS yang bekerja namun deteksi MAK-nya tidak akurat. Hal ini sesuai dengan studi yang dilaporkan oleh [7] bahwa untuk $K = L = 8$ maka jumlah maksimum target yang dideteksi sekitar 7 hingga 32 target. Tampak juga pada radar MIMO dengan jumlah DoA lebih rendah dari jumlah elemen antenna Tx-Rx maka dengan estimator GLRT memiliki akurasi deteksi DoA yang superior dibanding estimator LS. Hal ini terbukti pada estimator LS terdapat error deteksi terutama pada DoA yaitu $\{0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 60^\circ\}$ seperti yang terlihat di Gambar 2(a).

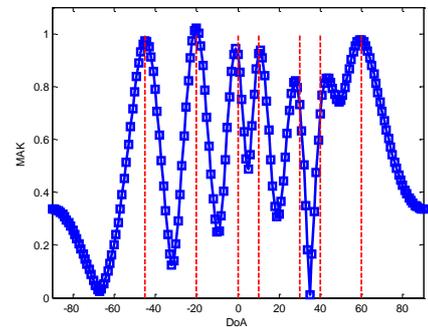
Resolusi Sudut Deteksi

Jika diberikan dua DoA yaitu θ_1 dan θ_2 dan $\delta_\theta = (\theta_2 - \theta_1)$, suatu radar memiliki resolusi sudut yang baik jika δ_θ bernilai sangat kecil dengan nilai minimal $\delta_\theta > 0$. δ_θ yang kecil menunjukkan seberapa mampu radar untuk membedakan dua lokasi DoA target yang sangat berdekatan. Pada Gambar 3(a) untuk estimator LS diperoleh $\theta_1 = 0^\circ$ dan $\theta_2 = 5.8^\circ$ maka resolusinya $\delta_\theta = 5.8^\circ$. Sementara untuk estimator GLRT pada Gambar 3(b) diperoleh $\theta_1 = 10^\circ$ dan $\theta_2 = 13^\circ$ maka resolusinya $\delta_\theta = 3^\circ$. Dengan demikian resolusi sudut estimator GLRT lebih superior dibanding Estimator LS. Hal ini sejalan dengan studi yang dilaporkan oleh [6] bahwa estimator GLRT memiliki resolusi sudut yang superior dibanding LS.

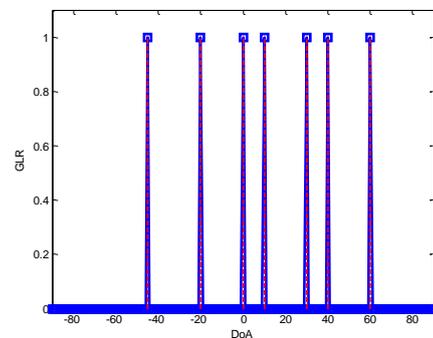
Pengaruh Jumlah Elemen Antena Tx-Rx

Untuk mempertimbangkan pengaruh ukuran elemen antenna pada kinerja estimator terutama estimator yang diusulkan yaitu GLRT maka dilakukan pengamatan terhadap berbagai ukuran K dan L pada Tx-Rx radar MIMO. Ukuran K dan L adalah sama dari 2 hingga 10 elemen dengan asumsi DoA yaitu $\Theta_D = \{-60^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ\}$ dan ber-RCS satu semua. Tampak pada Gambar 4 bahwa kemampuan estimator GLRT untuk mendeteksi DoA cenderung tepat bila ukuran $K = L$ naik. Pada kondisi $K = L$ yaitu $2 \leq (K = L) < 6$ elemen maka target Θ_D sepertinya tidak terdeteksi. Sementara untuk kondisi $(K = L) \geq 6$ maka target Θ_D mampu terdeteksi dengan baik oleh estimator GLRT baik pada jumlah DoA dan resolusinya. Hasil dan analisa ini juga menegaskan bahwa memang benar estimator tersebut tidak berfungsi

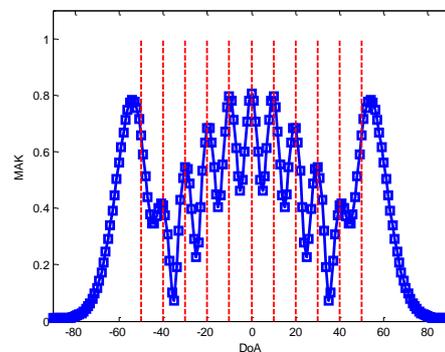
pada radar PA dan seiring bertambahnya jumlah elemen K dan L maka kemampuan estimator juga meningkat seperti yang ditunjukkan pada kinerja radar MIMO.



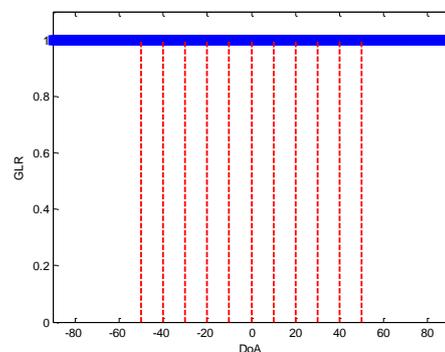
(a) LS untuk Θ_B



(b) GLRT untuk Θ_B

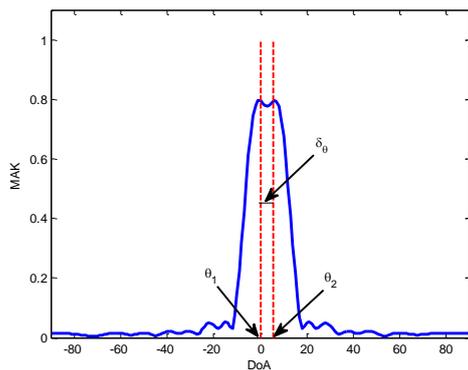


(c) LS untuk Θ_C

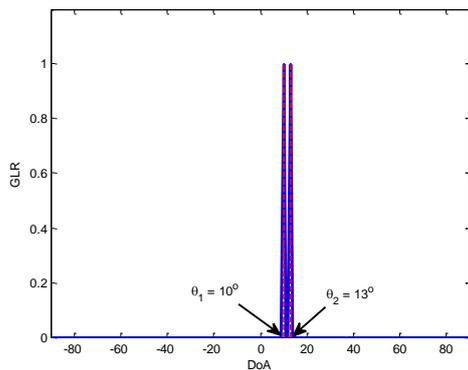


(d) GLRT untuk Θ_C

Gambar 2. MAK pada radar MIMO untuk RCS = 1

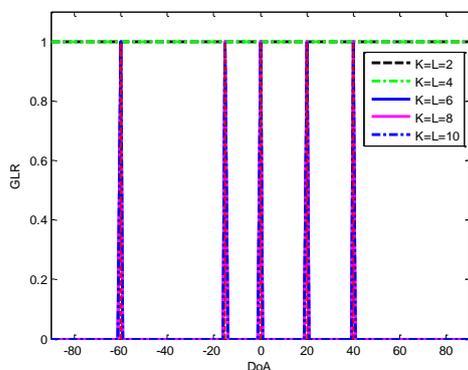


(a)



(b)

Gambar 3. MAK pada radar MIMO ber-RCS = 1 untuk: (a) LS dan (b) GLRT



Gambar 4. MAK pada radar MIMO untuk estimator GLRT dengan Θ_b dan variasi $K = L$ di Tx-Rx

Kesimpulan

Makalah ini telah memformulasi dan mengevaluasi estimasi parameter dari deteksi target dengan metode GLRT. Kinerja estimasi tersebut telah dibandingkan dengan estimasi konvensional seperti LS dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti jenis radar (PA dan MIMO), banyak DoA, resolusi sudut antara dua target, dan jumlah elemen antenna di Tx-Rx. Kedua estimator bekerja dengan baik jika diterapkan pada radar MIMO namun tidak

dengan radar PA karena hanya estimator LS yang berfungsi mendeteksi ketiga target walaupun MAK memiliki resolusi yang tidak tepat. Kemampuan deteksi DoA dari metode GLRT lebih akurat dibanding metode LS dimana resolusi deteksi estimator GLRT lebih baik dibanding LS yaitu 3° berbanding $5,8^\circ$. Jumlah DoA yang mampu dideteksi oleh GLRT lebih rendah dari ukuran jumlah elemen antenna di Tx-Rx yaitu K dan L . Kemampuan estimator GLRT untuk mendeteksi DoA target cenderung tepat bila ukuran $K = L$ naik. Untuk pertimbangan aplikasi dan desain sistem radar terutama ketika berhadapan dengan *strong interference* dan *jamming*, estimator GLRT memiliki resolusi sudut DoA yang baik dan tanpa *sidelobe* sehingga kondisi ini menguntungkan untuk para desainer radar.

Daftar Pustaka

- [1] M.I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, 3rd ed., McGraw-Hill, 2001.
- [2] J. Li, and P. Stoica, MIMO Radar Signal Processing, John Wiley & Sons, 2009.
- [3] J. Li, P. Stoica, and X. Zheng, "Signal synthesis and receiver design for MIMO radar imaging," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 8, pp. 3959-3968, 2008.
- [4] M. Hardiwansyah, S. Tahcfulloh, and G. Hendrantoro, "Parameter identifiability of phased-MIMO radar," *International Conference of Artificial Intelligence and Information Technology*, pp. 192-195, 2019.
- [5] X. Luzhou, J. Li, and P. Stoica, "Target detection and parameter estimation for MIMO radar systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 44, no. 3, pp. 927-939, 2008.
- [6] S. Tahcfulloh and M. Hardiwansyah, "Parameter estimation and target detection of phased-MIMO radar using Capon estimator," *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, vol. 20, no. 2, pp. 60-69, 2020.
- [7] S. Tahcfulloh and G. Hendrantoro, "FPMIMO: a general MIMO structure with overlapping subarrays for various radar applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 11248-11267, 2020.
- [8] C. Gao, H. Zhou, R. Wu, X. Xu, F. Shen, and Z. Guo, "Parameter estimation and multi-pulse target detection of radar MIMO," *IEEE Region 10 Conference*, pp. 909-914, 2016.
- [9] S. Tahcfulloh, "SMIMO radar: MIMO radar with subarray elements of phased-array

antenna,” *International Journal of Information Technology and Electrical Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 37-44, 2021.

[10] P. Stoica and R.L. Moses, *Spectral Analysis of Signals*, Prentice-Hall, 2005.