

ESTIMASI SUDUT DAN AMPLITUDO DARI ARAH KEDATANGAN SINYAL RADAR MIMO DENGAN *APPROXIMATION MAXIMUM LIKELIHOOD*

Ashar¹⁾, Syahfrizal Tahcfullloh*²⁾

^{1), 2)} Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Borneo Tarakan
Jl. Amal Lama No.1 Tarakan, Indonesia
Email : ¹⁾Ecca1212@gmail.com, ²⁾rizalubt@gmail.com

Abstrak

Penentuan jumlah parameter target dari suatu sistem radar sangat ditentukan dari kemampuan estimasi arah kedatangan sinyal target. Hal ini amat bergantung pada tingkat akurasi dan resolusi deteksi arah dari estimasi tersebut terutama untuk target-target yang saling berdekatan. Estimasi arah kedatangan sinyal ini sangat besar dipengaruhi oleh estimasi *radar-cross section* (RCS) dari target. RCS ini proporsional dengan keberadaan target yang nantinya berimbas pada penentuan jumlah target terdeteksi. Banyak sekali pendekatan untuk mengestimasi hal tersebut pada radar *multiple-input multiple-output* (MIMO) salah satunya *approximation maximum likelihood* (AML). Makalah ini akan memberikan penurunan formulasi dan evaluasi dari estimasi parameter dengan pendekatan AML untuk sistem radar MIMO yang sekaligus juga membandingkannya dengan radar konvensional seperti *phased-array* (PA). Untuk menunjukkan keefektifan kinerja dari estimasi AML terhadap radar-radar tersebut maka akan dibandingkan dengan implementasi pendekatan sebelumnya seperti *least squares* (LS) dalam hal seperti magnitudo dari RCS, jumlah sudut kedatangan yang proporsional dengan jumlah target terdeteksi, dan jumlah elemen antenna di *transmitter* (Tx) dan *receiver* (Rx) dari sistem radar. Berdasarkan dari hasil evaluasi untuk jumlah elemen antenna Tx-Rx dengan 10 elemen, resolusi sudut deteksi untuk estimator AML yang diusulkan pada radar MIMO ternyata unggul dibanding estimator LS dengan resolusi sudut berturut-turut adalah 5,8 dan 2 dalam satuan derajat.

Kata kunci: *Approximation Maximum Likelihood*; Estimasi Parameter; *Phased-Array*; Radar MIMO.

Abstract

Determining the number of target parameters for a radar system is largely determined by the ability to estimate the direction of arrival of the signal from the target. This is very dependent on the accuracy and detection resolution of the estimated direction of arrival, especially for targets that are close to each other. The estimated direction of arrival of this signal is greatly influenced by the estimated radar-cross section (RCS) of the target. This RCS is proportional to the presence of targets which will have an impact on determining the number of targets detected. There are many approaches to estimate this on multiple-input multiple-output (MIMO) radar, one of which has high angular detection resolution is approximation maximum likelihood (AML). This paper will provide a formulation and evaluation of parameter estimation using this approach for MIMO radar systems while also comparing it with conventional radars such as phased-array (PA). To show the effectiveness of the performance of the proposed estimate for these radars, it will be compared with the implementation of previous approaches such as least squares (LS) in terms such as the magnitude of the RCS, the number of angles of arrival proportional to the number of targets detected, and the number of antenna elements in the transmitter (Tx) and receiver (Rx) of the radar system. Based on the evaluation results for the number of Tx-Rx antenna elements with 10, the detection angle resolution for the proposed estimator on the MIMO radar turns out to be superior to the LS estimator with an angle resolution of 5.8 and 2 in degrees, respectively.

Keyword: *Approximation Maximum Likelihood*; Parameter Estimation; *Phased-Array*; MIMO Radar.

PENDAHULUAN

Perkembangan radar multi-antena begitu cepat dan menarik [1], [2]. Hal ini tidak terlepas dengan banyaknya riset tentang radar tersebut hingga kini seperti radar *phased-array* (PA) [3]–[5] dan radar *multiple-input multiple-output* (MIMO) [6], [7]. Radar PA umumnya memiliki kemampuan deteksi dengan gain koheren direksional yang tinggi dengan beam pensil sehingga sangat cocok untuk mendeteksi target jauh dan memiliki *radar-cross-section* (RCS) kecil [5]. Di lain sisi, gain koheren yang dimiliki oleh radar PA sangat ditentukan oleh penentuan dan desain dari antenanya sebagai penyusun elemen *array* [8]. Sementara radar MIMO memiliki keunggulan memancarkan banyak *waveform* sebanyak elemen antena *array*-nya sehingga memaksimalkan kemampuan gain peragaman *waveform* yang berefek meningkatkan kemampuan deteksi untuk multi-target [7]. Radiasi *waveform* ke target pada radar MIMO bersifat independen dan ortogonal satu dengan lainnya sehingga hal ini menguatkan untuk pendeteksian banyak target. Disamping itu terdapat beberapa studi terkait radar-radar tersebut [9]–[11] dimana studi oleh [11] telah mengamati pembentukan *beam pattern* pada *transmit-receive* (Tx-Rx), *gain processing* di Tx-Rx, estimasi parameter khususnya dengan metode LS, deteksi arah kedatangan target (*direction of arrival*, DoA), *virtual array*, *signal-to-interference-plus-noise ratio* (SINR), dan seterusnya, studi oleh [10] untuk aplikasi radar-radar ini untuk radar migrasi burung dan kendaraan (*vehicular radar*), serta studi oleh [9] untuk membantu dalam berlatih tembak-menembak di bidang militer.

Makalah ini memanfaatkan estimator AML untuk diimplementasikan pada radar PA dan MIMO sebagai estimasi parameter target yang studi-studi sebelumnya hanya berupa studi spektrum sinyal. Terdapat berbagai metode estimasi parameter target untuk sistem radar terutama untuk estimasi DoA yang telah diinvestigasi seperti metode *least squares* (LS) [7], [10], [11] dan AML [12]. Penerapan estimator LS telah diulas detail di

beberapa penelitian terdahulu seperti pada radar MIMO oleh [7], radar dengan penggunaan subarray di Tx-Rx oleh [10], dan pada radar subarray di Tx yang dikenal dengan radar *phased-MIMO* yang dilaporkan oleh [13]. Banyaknya penelitian mempertimbangkan estimator LS karena estimator ini sangat simpel dan butuh beban komputasi rendah untuk melakukan proses estimasi. Namun begitu metode ini memiliki kelemahan terutama resolusi sudut DoA dan estimasi amplitudo yang rendah serta munculnya *sidelobe* yang sangat berefek dan berpotensi menimbulkan interferensi dan *jammer* [13].

Estimasi parameter pada radar penting sekali untuk diinvestigasi dan dianalisis karena berperan untuk penentuan keberadaan target seperti estimasi posisi manusia berjalan di belakang dinding [14], [15], estimasi objek di bidang otomotif untuk navigasi kendaraan [16], dst. Sementara estimasi dengan pendekatan *maximum likelihood* (ML) masih tetap diteliti karena pendekatan ini memberikan resolusi deteksi DoA yang tinggi [17] dan beban komputasinya tidak kompleks [18]. Telah diketahui bersama bahwa estimator AML merupakan bagian dari filter adaptif yang digunakan untuk estimasi suatu sinyal sinusoido dalam spektrum kompleks untuk parameter-parameter seperti amplitudo dan fase. Menurut [18] bahwa estimasi AML bersifat tak bias dalam sifat statistiknya sehingga sangat efisien untuk ukuran data berjumlah besar. Di sisi lain, studi [19]–[21] telah menyebutkan bahwa estimasi spektral yang dicapai oleh metode ini bersifat akurat baik pada amplitudo, fase, dan sudutnya. Di lain sisi, studi terhadap estimator AML yang telah diimplementasikan pada radar MIMO yang diinvestigasi hanya terhadap pengaruh RCS-nya. Sementara makalah ini lebih luas investigasinya yang tidak hanya sebatas pada estimasi RCS target saja, namun metode AML yang diterapkan pada radar MIMO ini diterapkan untuk estimasi target yang mempertimbangkan pengaruh jumlah DoA, besar resolusi sudut deteksi di antara target-target yang saling berdekatan, dan banyak elemen antena yang terpasang di Tx-Rx. Dengan demikian

makalah ini memiliki sumbangan kunci pada penelitian dan sains terutama bidang sistem radar berupa ekspresi dan evaluasi dari estimasi DoA target dengan metode AML untuk radar MIMO dan PA.

Berdasarkan uraian tersebut diatas maka makalah ini akan mengestimasi DoA target dari sinyal terpantulnya berupa amplitudo dan fase yang memperhatikan beberapa faktor seperti tipe radar, ukuran RCS target, jumlah DoA, besar resolusi sudut antar target, dan banyak elemen antenna yang terpasang di Tx-Rx. Sementara keefektifan dari kinerja metode ini terhadap radar-radar tersebut dikomparasikan dengan metode konvensional seperti LS

METODE PENELITIAN

Secara metodologi bahwa makalah ini memanfaatkan studi oleh [12] untuk menurunkan ekspresi dan evaluasi metode AML sebagai estimasi DoA untuk radar MIMO dan PA dimana sebagai pendahuluan dijelaskan mengenai estimasi DoA yang sudah eksis yaitu LS pada radar MIMO dan PA [7], [22].

1. Radar PA dan MIMO

Sebagai radar multi-antena, radar PA dan MIMO adalah radar yang memiliki konfigurasi dengan banyak elemen antenna di Tx dan Rx untuk membangun array antenna. Menurut [2] bahwa radar PA mampu mendeteksi target ber-RCS lemah karena memiliki gain koheren direksional yang tinggi serta mampu menekan level *sidelobe* pada arah datangnya *interferer*. Sedangkan menurut [7] bahwa radar MIMO mampu mendeteksi banyak target karena memiliki gain peragaman *waveform* yang tinggi dan saling ortogonal satu sama lainnya. Di lain sisi, radar MIMO terdiri dari banyak *waveform* yang ditransmisikan *omni*-direksional oleh setiap elemen antenna Tx. Transmisi banyak *waveform* pada radar MIMO ini yang akhirnya mendukung diterapkan teknik estimator adaptif. Teknik estimasi ini yang dapat meningkatkan resolusi sudut yang tinggi sekaligus meminimumkan pengaruh *interferer* dan *jammer*.

Untuk radar PA dengan jumlah elemen antenna di Tx dan Rx selokasi berturut-turut adalah K -unit dan L -unit. Radar PA ini memiliki vektor sinyal $L \times 1$ yang diterima radar dari sinyal pantulan target berupa output dari *matched-filter* (MF) yaitu [11]

$$\mathbf{y}_{PA} = \sum_{p=1}^P \sigma_p(\theta_p) \beta \mathbf{b}(\theta_p) + \mathbf{n} \quad (1)$$

dimana $\sigma_p(\theta_p)$ menotasikan koefisien refleksi target yang menunjukkan besar RCS-nya, p menunjukkan banyak target yang diestimasi untuk $p = 1, 2, \dots, P$, θ_p menunjukkan keberadaan target, β sebagai gain koheren direksional pada array antenna Tx, $\mathbf{b}(\theta)$ adalah vektor array $L \times 1$ karena adanya perambatan yang berasal dari Tx menuju Rx, dan \mathbf{n} menotasikan vektor noise Gaussian berukuran $L \times 1$ dengan *means* nol dan matriks kovarians $\sigma_n^2 \mathbf{I}_{LL}$.

Serupa jumlah elemen antenna di Tx dan Rx pada radar PA maka pada radar MIMO memiliki K -unit antenna Tx yang meradiasikan K -*waveform* yang bersifat independen dan ortogonal satu sama lain. Semua *waveform* yang dipancarkan ini selanjutnya diteruskan ke L -unit antenna di Rx yang sebelumnya telah mengenai target-target yang dikehendaki. Keberadaan MF di Rx dari antenna radar MIMO nantinya untuk memilah K -*waveform* tersebut secara tepat dan unik. Ekspresi vektor sinyal yang diterima Rx berukuran $KL \times 1$ yaitu

$$\mathbf{y}_{MIMO} = \sum_{p=1}^P \sigma_p(\theta_p) \cdot \text{kron}(\mathbf{a}(\theta_p), \mathbf{b}(\theta_p)) + \mathbf{n} \quad (2)$$

dimana $\text{kron}(\cdot)$ menunjukkan operator perkalian Kronecker.

2. Estimasi Metode LS

Berdasarkan studi yang dilaporkan oleh [7], [22], [23] bahwa metode LS telah diterapkan pada radar MIMO untuk estimasi DoA target. Dengan sedikit modifikasi berikut telah diberikan ekspresi estimasi DoA untuk metode LS pada radar MIMO yaitu

$$\hat{\sigma}_{LS, MIMO}(\theta) = \frac{\mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{y\psi} \mathbf{a}^*(\theta)}{|\mathbf{b}(\theta)|^2 [\mathbf{a}^T(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\psi\psi} \mathbf{a}^*(\theta)]} \quad (3)$$

dengan

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

$$\hat{\mathbf{R}}_{\psi\psi} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \psi(q)\psi^H(q) \quad (5)$$

dimana $(\cdot)^H$, $(\cdot)^*$, $|\cdot|^2$, dan $(\cdot)^T$ berturut-turut menotasikan operator Hermitian transpose, operator konjugat kompleks, operator *Euclidean norm* suatu vektor, dan operator transpose. Sementara $\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\psi}$ dan $\hat{\mathbf{R}}_{\psi\psi}$ berturut-turut sebagai matriks korelasi antara sinyal $\mathbf{y}(t)$ dan $\psi(t)$ dan matriks auto-korelasi dari $\psi(t)$ dimana $\psi(t) = [\varphi_1(t) \varphi_2(t) \dots \varphi_K(t)]^T$ dengan vektor *waveform* berdimensi $K \times 1$ di array antenna Tx dengan $\varphi_k(t)$ merupakan sinyal *baseband* teradiasi untuk waktu diskrit $t = 1, \dots, Q$.

3. Estimasi Metode AML

Menurut studi [12] bahwa dengan konfigurasi banyak elemen memancarkan *waveform* maka diperoleh resolusi sudut radar yang tinggi. Adanya K -unit antenna pada Tx dan L -unit antenna di Rx menghasilkan *virtual array* sekitar KL -unit di Rx dimana *virtual array* ini yang nantinya memberikan kemampuan mendeteksi banyak target karena memiliki resolusi sudut yang tinggi. Resolusi sudut tinggi bermaksud kemampuan antara dua target berdekatan terdeteksi memiliki nilai selisih sudut yang kecil [24]. Pada radar MIMO, pancaran *waveform* yang mengenai banyak target selanjutnya diterima oleh antenna Rx melalui MF akan mampu dipisahkan secara unik karena *waveform* tersebut bersifat independen sehingga mudah diimplementasikan teknik estimasi adaptif serta sekaligus mampu meminimumkan efek dari *interferer* dan *jammer*. Dilatarbelakangi karena adanya estimasi DoA dengan level *sidelobe* yang tinggi dan beresolusi sudut rendah pada metode LS maka teknik estimasi adaptif seperti AML diterapkan pada radar MIMO. Tujuan penerapan metode ini adalah untuk memperbaiki resolusi sudutnya serta menurunkan level *sidelobe* yang mengandung adanya *interferer* dan *jammer*.

Bila diberikan vektor sinyal diterima pada radar MIMO sepintas sebelum lewat MF adalah

$$\mathbf{y}_{\text{MIMO}}(t) = \sum_{p=1}^P \sigma_p(\theta_p) \mathbf{b}(\theta_p) \mathbf{a}^T(\theta_p) \psi(t) + \mathbf{n}(t) \quad (6)$$

dimana $\mathbf{a}(\theta) = [1 \ e^{-j2\pi d_K \sin(\theta)/\lambda} \dots \ e^{-j2\pi (K-1) d_K \sin(\theta)/\lambda}]^T$ merupakan vektor array perarahan berdimensi $K \times 1$ pada sisi Tx, $\mathbf{b}(\theta) = [1 \ e^{-j2\pi d_L \sin(\theta)/\lambda} \dots \ e^{-j2\pi (L-1) d_L \sin(\theta)/\lambda}]^T$ menotasikan vektor array perarahan berdimensi $L \times 1$ pada sisi Rx, dan $\mathbf{n}(t)$ sebagai vektor noise total berdimensi $L \times 1$. Pada (6) memiliki dua parameter yang diestimasi berturut-turut yaitu $\{\theta_p\}_{p=1}^P$ dan $\{\sigma_p(\theta_p)\}_{p=1}^P$ dengan $\mathbf{n}(t)$ diasumsikan tidak saling berkorelasi terhadap $\psi(t)$ maka sifat identifiabilitas dari suku pertama pada (6) sama sekali tidak dipengaruhi oleh suku keduanya.

Berdasarkan pada metode AML yang dilaporkan oleh [12] maka dapat diturunkan ekspresinya untuk kedua radar dimana hal ini merupakan sumbangan kunci bagi sains dan iptek terutama bidang sistem radar pada makalah ini. Estimasi metode AML untuk vektor sinyal diterima (6) dinyatakan dengan

$$\hat{\sigma}_{\text{AML,MIMO}}(\theta) = \frac{\mathbf{b}^H(\theta) \mathbf{Y}^{-1} \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\psi} \mathbf{a}^*(\theta)}{[\mathbf{b}^H(\theta) \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{b}(\theta)] \odot [\mathbf{a}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\psi\psi} \mathbf{a}(\theta)]} \quad (7)$$

dimana

$$\mathbf{Y} = \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}} - \frac{\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\psi} \mathbf{a}^*(\theta) \mathbf{a}^T(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\psi\psi}}{[\mathbf{a}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\psi\psi} \mathbf{a}(\theta)]} \quad (8)$$

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

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

dengan \odot merupakan operator perkalian Hadamard.

Pada (8) bentuk dari $\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}$ untuk radar PA merupakan korelasi dari $\mathbf{y}(t)$ yang dinyatakan pada (1). Sama halnya ketika mendapatkan ekspresi dari (7) pada radar MIMO yang dinyatakan oleh (7)-(10) maka estimasi DoA untuk radar PA dengan metode AML dinyatakan dengan

$$\hat{\sigma}_{\text{AML,PA}}(\theta) = \frac{\mathbf{b}^H(\theta) \mathbf{Y}_{\text{PA}}^{-1} \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\psi} \mathbf{a}^*(\theta)}{[\mathbf{b}^H(\theta) \mathbf{Y}_{\text{PA}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)] \mathbf{a}^*(\theta) \mathbf{a}(\theta)} \quad (11)$$

dimana

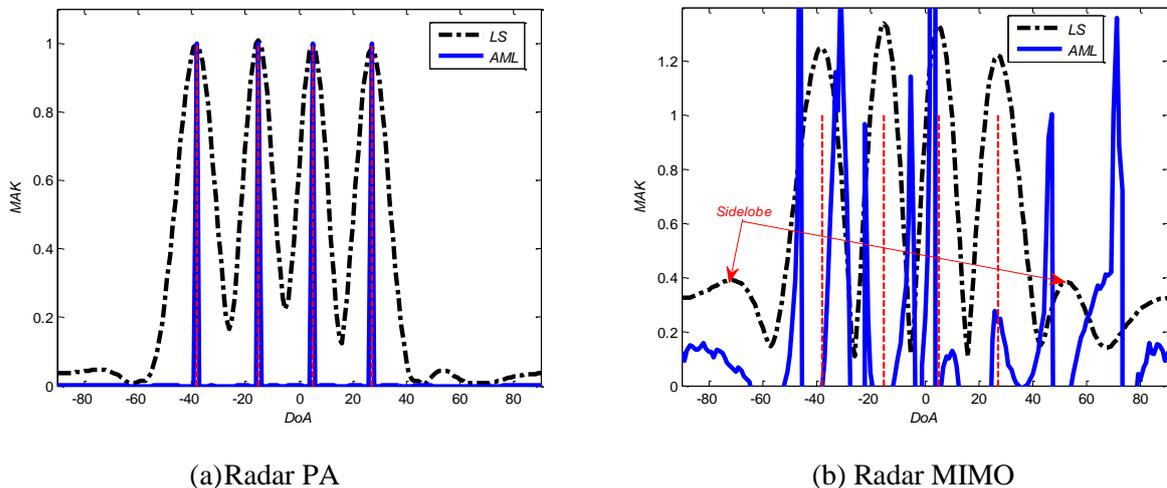
$$\mathbf{Y}_{\text{PA}} = \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}} - \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\psi} \hat{\mathbf{R}}_{\psi\psi} \quad (12)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut diberikan evaluasi dan pembahasan dari estimasi DoA menggunakan estimator AML baik untuk radar PA dan MIMO yang secara berurutan menggunakan ekspresi (7) dan (11). Di lain sisi untuk ekspresi estimator LS seperti yang diberikan oleh [10]. Baik estimator LS dan AML dari kedua jenis radar hasil evaluasinya disajikan dalam grafik dari modulus-amplitudo-kompleks (MAK) sebagai fungsi DoA dimana MAK ini sebanding dengan RCS target yang dinotasikan dengan $\hat{\sigma}(\theta)$. Untuk kedua jenis radar multi-antena ini diberikan jumlah elemen antenanya adalah $K = L = 8$ elemen baik di Tx dan Rx yang spasinya antar elemen antenna Tx-Rx berukuran setengah panjang gelombang.

1. Pengaruh Jenis Radar

Eksperimen pertama ini menyajikan perbandingan kinerja estimasi DoA dengan metode AML terhadap LS untuk kedua jenis radar. Bila diasumsikan terdapat tiga target dengan DoA bervariasi di $\Theta_A = \{-38, -15, 5, 27\}$ dalam derajat yang memiliki amplitudo kompleks semuanya sama dan sebanding dengan RCS yaitu $\sigma(\Theta_A) = 1$. Gambar 1(a)-(b) memperlihatkan MAK dari kedua estimator untuk kedua jenis radar.



Gambar 1. Perbandingan MAK untuk estimasi Θ_A dari estimator AML dan LS yang ber-RCS satu

Gambar 1(a) menunjukkan bahwa kedua estimator bekerja dengan baik pada radar MIMO. Hal ini terbukti dengan kedua estimator tersebut secara tepat mampu mendeteksi keempat target yang diberikan Θ_A secara tepat dimana deteksi MAK mendekati atau hampir sama dengan nilai RCS-nya yaitu 1. Namun hal ini tidak terjadi pada radar PA (lihat Gambar 1(b)) karena hanya estimator LS yang bekerja tepat dalam mengestimasi DoA yang diberikan pada Θ_A walaupun estimasi MAK untuk RCS-nya masih kurang tepat bahkan memiliki level *sidelobe* yang tinggi. Kemampuan radar PA tidak sebagus radar MIMO ini dipengaruhi oleh jumlah *waveform* yang

dipancarkan relatif sangat sedikit karena semua elemen antenna di Tx memancarkan *waveform* yang sama sehingga berpengaruh terhadap kemampuan mendeteksi banyak target. Di sisi lain, pada radar PA memiliki akurasi deteksi MAK untuk DoA yang rendah. Hal ini memperkuat studi sebelumnya oleh [25] yang menyatakan bahwa deteksi target suatu radar berbanding lurus dengan banyaknya elemen array atau subarray yang meradiasikan *waveform*. Bila terdapat K -subarray pada radar multi-antena maka radar PA memiliki jumlah deteksi target kurang lebih satu sedangkan radar MIMO mampu mendeteksi sekitar K -target. Kemampuan deteksi pada radar MIMO ini juga

memperkuat studi oleh [10], [26] yang mampu mendeteksi banyak target karena memiliki banyak *waveform* radiasi.

Gambar 1(a) juga menunjukkan bahwa estimator AML memiliki resolusi sudut deteksi untuk target θ_A lebih tinggi dan akurat dibanding LS. Dis sisi lain, estimator AML juga memiliki estimasi MAK dari DoA tersebut juga dengan akurasi yang lebih tinggi dibanding LS yang diperlihatkan pada Gambar 1(b). Terlihat juga pada Gambar 1(a) bahwa estimator AML pada radar MIMO hampir tidak memiliki *sidelobe*. Dengan demikian metode AML pada radar MIMO dapat

membantunya untuk melawan pengaruh *interferer* dan *jammer*. Hal ini membuktikan studi sebelumnya oleh [22] tentang kemampuan estimator AML dalam menekan *sidelobe*.

Untuk melihat detil dari komparasi kinerja kedua estimator khususnya pada radar MIMO untuk estimasi DoA disajikan pada Tabel 1. Tabel 1 ini memberikan perbandingan estimasi dari keempat DoA pada θ_A untuk kedua estimator yang selanjutnya akan ditentukan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dari MAK target tersebut yang ber-RCS satu.

Tabel 1. Komparasi estimasi MAK dari θ_A ber-RCS satu dari estimator LS dan AML

DoA	LS	AML
-38°	0,995	1,000
-15°	1,009	1,000
5°	0,995	1,000
27°	0,985	1,000

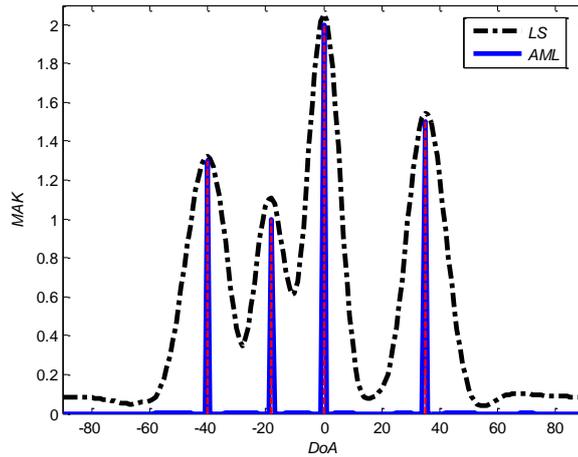
Menurut data di Tabel 1 maka diperoleh RMSE (dalam persen) untuk MAK dari estimasi θ_A pada metode AML relatif rendah dibanding metode LS sebesar 0,94%. Hal ini membuktikan bahwa kinerja estimasi DoA dari estimator AML lebih superior dibanding estimator LS.

2. Pengaruh RCS Bervariasi

Pada eksperimen kedua ini hanya menerapkan kedua estimator untuk mengestimasi DoA pada radar MIMO saja. Hal ini dikarenakan kemampuan dari akurasi dan resolusi sudut pada radar ini dalam mendeteksi banyak target mengungguli radar PA. Bila diberikan kondisi empat target lain dengan bervariasi RCS yang berturut-turut diberikan DoA dan RCS-nya yaitu $\theta_B = \{-40, -18, 0, 35\}$ dalam derajat dan ber-RCS

yang bernilai $\{1,3; 1; 2; 1,5\}$ seperti terlihat di Gambar 2.

Terlihat pada Gambar 2 bahwa kemampuan untuk mendeteksi terhadap DoA dari estimator AML kembali lagi masih lebih akurat jika dibandingkan dengan estimator LS walaupun sekilas keduanya mampu bekerja dengan baik dalam mendeteksi DoA untuk θ_B . Perbandingan estimasi DoA untuk θ_B diberikan di Tabel 2 yang menunjukkan nilai MAK dari estimasi θ_B untuk kedua estimator pada radar MIMO. Hasil perhitungan RMSE dari Tabel 2 untuk kedua estimator yaitu AML dan LS berturut-turut besarnya dalam persentase adalah 0,1% dan 6,6%. Dengan demikian dari hasil penentuan RMSE tersebut nyatalah bahwa kinerja estimasi DoA dari estimator AML superior dibanding estimator LS.



Gambar 2. Komparasi nilai MAK estimator LS dan AML dari estimasi DoA Θ_B untuk radar MIMO yang bervariasi RCS-nya

Tabel 2. Komparasi kinerja estimasi DoA Θ_B untuk estimator AML dan LS yang bervariasi RCS

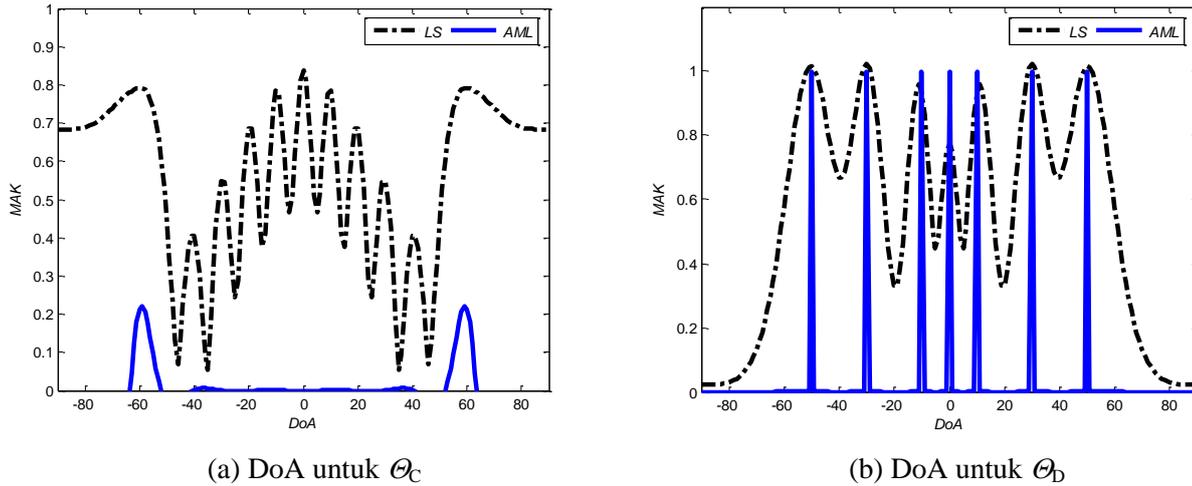
DoA	RCS target	LS	AML
-40°	1,3	1,326	1,299
-18°	1,0	1,108	0,997
0°	2,0	2,053	1,998
35°	1,5	1,546	1,499

3. Pengaruh DoA Bervariasi

Pada eksperimen ketiga ini diperlihatkan kemampuan estimasi DoA dari kedua estimator untuk jumlah DoA kurang dan lebih dari banyaknya elemen antena yang terpasang di Tx. Terdapat dua eksperimen yang dilaksanakan pada tahap ini yaitu untuk estimasi 13 DoA dan untuk estimasi 7 DoA dimana semua DoA tersebut ber-RCS satu. Bila diberikan dua macam kelompok DoA yang diestimasi oleh kedua estimator yaitu 13 DoA yang berlokasi pada $\Theta_C = \{-60; -50; -40; -30; -20; -10; 0; 10; 20; 30; 40; 50; 60\}$ dan 7 DoA yang berlokasi di $\Theta_D = \{-50; -30; -10; 0; 10; 30; 50\}$ dalam derajat. Gambar 3(a) menunjukkan kinerja kedua estimator mengestimasi DoA untuk Θ_C dan hasilnya hanya estimator LS yang berfungsi untuk mendeteksi keberadaan dari DoA untuk Θ_C walaupun tidak semua dari ketigabelas DoA sukses terestimasi dengan tepat dan estimasi MAK-nya buruk karena hampir semua ber-RCS kurang dari satu. Sementara estimator AML tidak mampu mendeteksi

dengan baik ketigabelas DoA untuk Θ_C yang diberikan. Hal ini turut mendukung hasil studi yang dilaporkan oleh [23] bahwa untuk kondisi jumlah antena di Tx dan Rx ada 8 elemen maka kira-kira jumlah target yang terdeteksi sekitar 7 hingga terbanyak 32 target.

Untuk eksperimen dengan DoA yang berlokasi di Θ_D pada Gambar 3(b) dengan tujuh DoA diperoleh hasil bahwa kedua estimator mampu mendeteksi dan mengestimasi keberadaan DoA untuk Θ_D dengan tepat. Terlihat bahwa estimator AML mampu dengan sempurna mengestimasi kesemua DoA untuk Θ_D serta memiliki estimasi MAK dari DoA yang diberikan tersebut tepat bernilai satu. Sedangkan estimator LS mampu mengestimasi DoA kesemua target Θ_D namun hanya beberapa yang memiliki estimasi MAK dari RCS yang tepat bernilai satu. Dengan demikian estimator AML mampu mengestimasi lokasi target DoA termasuk mengestimasi MAK sesuai RCS yang diberikan jika jumlah target DoA tidak melebihi jumlah antena yang terpasang di Tx.

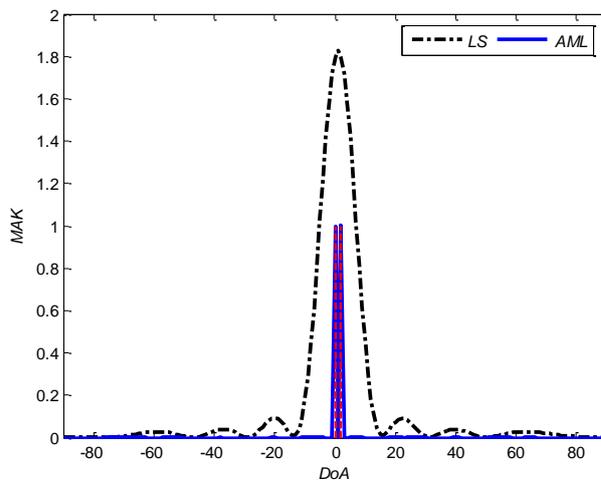


Gambar 3. Kinerja estimasi MAK kedua estimator (AML dan LS) untuk radar MIMO yang ber-RCS satu

4. Resolusi Sudut Deteksi

Bila diberikan dua DoA pada eksperimen keempat yang berlokasi di θ_1 dan θ_2 maka resolusi sudut dapat dihitung dengan mencari selisih sudutnya yang dinyatakan dengan $|\Delta_\theta| = (\theta_2 - \theta_1)$. Resolusi sudut suatu sistem radar dianggap baik jika $|\Delta_\theta|$ bernilai positif kecil sekali hingga bernilai nol. Kemampuan dari sistem radar beresolusi sudut baik jika radar ini mampu memilah dan membedakan secara tepat dari dua lokasi DoA target yang saling berdekatan. Gambar 4 memperlihatkan kemampuan kedua estimator untuk mendeteksi target jika terdapat dua DoA yang

berlokasi di $\theta_1 = 0^\circ$ dan $\theta_2 = 2^\circ$ atau memiliki resolusi sudut yaitu $\Delta_\theta = 2^\circ$. Terlihat hanya estimator AML yang mampu mendeteksi kedua DoA tersebut terbukti dari adanya dua *mainlobe* di lokasi DoA sementara estimator LS tidak mampu yang dibuktikan hanya terdapat satu *mainlobe*. Hal ini menandakan bahwa resolusi sudut estimator AML lebih superior dibanding estimator LS. Hasil ini kembali menegaskan bahwa estimator AML memiliki resolusi sudut target lebih baik dibanding estimator LS seperti yang sebelumnya telah dilaporkan oleh [12], [22].

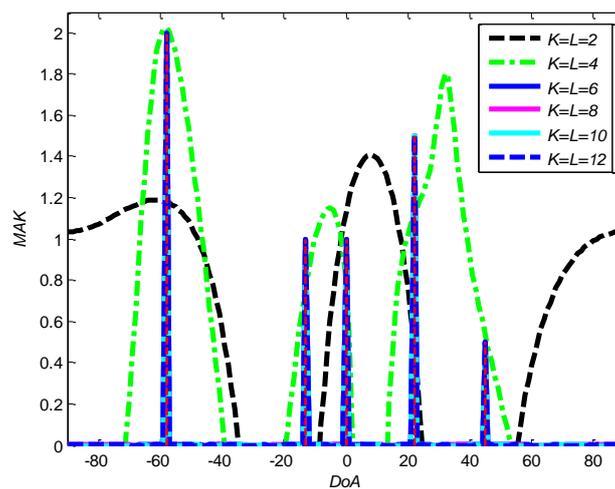


Gambar 4. Komparasi estimasi MAK kedua estimator (AML dan LS) pada radar MIMO yang ber-RCS satu untuk lokasi DoA θ_2 dan θ_1 ditunjukkan garis berwarna merah putus-putus

5. Implikasi Banyak Elemen Antena di Tx-Rx

Pada eksperimen kelima dilakukan untuk menunjukkan kemampuan estimasi DoA untuk radar MIMO dari khususnya estimator AML terhadap pengaruh banyaknya elemen antena yang terpasang di Tx dan Rx dengan memvariasikan ukuran $K = L$. Bila diberikan $K = L$ yang terdiri dari 2 elemen antena hingga 12 elemen yang berlokasi di Θ_E dan bervariasi RCS berturut-turut yaitu $\{-58, -13, 0, 22, 45\}$ dalam derajat dan RCS-nya yaitu $\{2; 1; 1; 1,5; 0,5\}$. Gambar 5 memperlihatkan hasil ekperimen tersebut dimana kemampuan mengestimasi DoA di Θ_E pada metode AML cenderung tepat bila $K = L$ naik sekitar lebih dari empat elemen antena. Untuk kondisi $K = L$ dalam

rentang 2 hingga kurang dari 6 elemen maka estimasi DoA di Θ_E terdeteksi di antara dua hingga tiga DoA target. Sedangkan jika $K = L$ pada kondisi lebih besar atau sama dengan 6 elemen antena maka semua DoA di Θ_E mampu dengan tepat terdeteksi oleh estimator AML termasuk banyak DoA-nya, MAK-nya, dan resolusinya. Hasil maupun analisa ini turut menegaskan jika memang benar bahwa estimator ini tidak dapat bekerja dengan baik di radar PA dimana hal ini ditunjukkan pada Gambar 5 untuk kurva berwarna hitam putus-putus. Sementara semakin bertambah banyak elemen K dan L maka kemampuan mengestimasi dari estimator ini juga turut naik seperti halnya yang telah diperlihatkan pada kinerja dari radar MIMO.

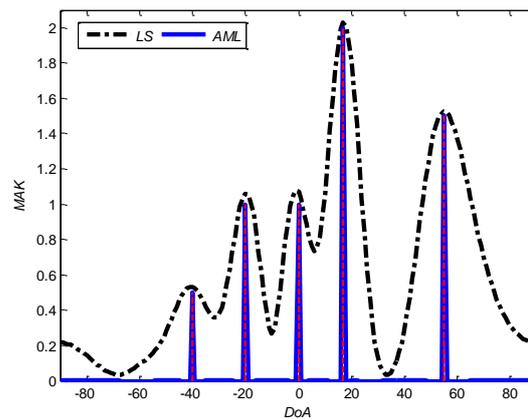


Gambar 5. Komparasi estimasi MAK dari Θ_E untuk estimator AML pada radar MIMO dengan variasi $K = L$ pada Tx-Rx

6. Tingkat Akurasi Deteksi MAK dari DoA

Untuk eksperimen terakhir ini yang memperlihatkan kemampuan kedua estimator di radar MIMO dalam hal akurasi mendeteksi MAK dari DoA target. Dengan menggunakan perolehan RMSE dari MAK semua DoA untuk kedua estimator maka estimator AML-lah yang lebih unggul dimana hasil eksperimen disajikan di Gambar 6. Diberikan ada lima DoA target yang berlokasi di Θ_F dan bervariasi RCS yang berturut-

turut adalah $\{-40; -20; 0; 17; 55\}$ dalam derajat dengan RCS-nya yaitu $\{0,5; 1; 1; 2; 1,5\}$. Hasil perhitungan RMSE (dalam persen) dari MAK untuk DoA target di Θ_F bagi kedua estimator (AML dan LS) berturut-turut didapatkan sebesar 0,3% dan 4,6%. Sekali lagi hasil tersebut memperlihatkan bahwa kinerja estimator AML dalam hal mengestimasi MAK dari DoA ternyata lebih unggul dibanding estimator konvensional seperti LS.



Gambar 6. Komparasi estimasi MAK kedua estimator (AML dan LS) pada radar MIMO untuk θ_F yang bervariasi RCS-nya

KESIMPULAN

Makalah ini telah berhasil melakukan formulasi dan evaluasi terhadap estimasi DoA target terdeteksi dengan metode AML. Kinerja estimator tersebut telah juga dikomparasikan dengan estimator konvensional yang sering digunakan pada radar multi antena yaitu estimator LS. Komparasi ini turut mempertimbangkan faktor-faktor seperti tipe radar (MIMO dan PA), jumlah DoA target, variasi RCS-nya, resolusi sudut di antara dua target berdekatan, dan banyaknya elemen antena yang terpasang di Tx-Rx. Untuk radar MIMO maka implementasi kedua estimator mendeteksi DoA target bisa bekerja baik walaupun estimasi MAK tidak sepenuhnya tepat dimana seperti yang terjadi pada estimator LS. Sementara jika diterapkan pada radar PA maka hanya estimator LS saja yang berperan. Kapabilitas estimasi DoA untuk estimator AML jauh lebih akurat jika dibandingkan dengan estimator LS dimana hal ini ditunjukkan bahwa RMSE dari estimator AML lebih rendah dibanding yang diperoleh oleh estimator LS. Begitu juga kapabilitas estimasi MAK dari DoA target untuk metode AML cenderung lebih tepat dibanding LS apalagi bila banyaknya elemen antena yang dipasang di Tx-Rx naik. Selanjutnya sebagai bahan rekomendasi pada aplikasi dan desain sistem radar terutama terkait menghadapi tantangan *interferer* dan *jammer* yang kuat maka estimator AML sangat

cocok diterapkan mengingat bahwa estimator ini punya resolusi sudut DoA baik (nilainya kecil) dan hampir tidak memiliki *sidelobe*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. R. Mahafza, *Introduction to radar analysis*. Chapman and Hall/CRC, 2017.
- [2] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, vol. 3. McGraw-hill New York, 1980.
- [3] Y. Konishi, "Phased array antennas," *IEICE Trans. Commun.*, vol. 86, no. 3, pp. 954–967, 2003.
- [4] R. J. Mailloux, *Phased array antenna handbook*. Artech house, 2017.
- [5] R. C. Hansen, *Phased array antennas*. John Wiley & Sons, 2009.
- [6] C.-Y. Chen, *Signal processing algorithms for MIMO radar*. California Institute of Technology, 2009.
- [7] J. Li and P. Stoica, *MIMO radar signal processing*. John Wiley & Sons, 2008.
- [8] N. S. Bestari and A. Wagya, "Rancang Bangun Antena Bowtie pada Video Sender sebagai Pemancar TV Streaming," *J. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 2, pp. 59–63, 2018.
- [9] Ip. E. Yulianto, "ANALISIS KOMUNIKASI DATA PADA LESAN TEMBAK UNTUK LATIHAN TEKNIK TEMPUR CEPAT

- BERBASIS LORA 1278,” *MULTITEK Indones.*, vol. 13, no. 2, pp. 120–127, 2019.
- [10] 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.
- [11] S. Tahcfulloh and G. Hendrantoro, “Full phased MIMO radar with colocated antennas,” *Int. J. Commun. Antenna Propag.*, vol. 9, no. 2, pp. 144–154, 2019.
- [12] C. Gao, H. Zhou, R. Wu, X. Xu, F. Shen, and Z. Guo, “Parameter estimation and multi-pulse target detection of MIMO radar,” in *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, 2016, pp. 909–914.
- [13] M. Hardiwansyah, S. Tahcfulloh, and G. Hendrantoro, “Parameter identifiability of phased-MIMO radar,” in *2019 International Conference of Artificial Intelligence and Information Technology (ICAIIIT)*, 2019, pp. 192–195.
- [14] Z. Sun, J. Wang, J. Sun, and P. Lei, “Parameter estimation method of walking human based on radar micro-Doppler,” in *2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, 2017, pp. 567–570.
- [15] C. Thajudeen and A. Hoorfar, “A hybrid bistatic–monostatic radar technique for calibration-free estimation of lossy wall parameters,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 1249–1252, 2016.
- [16] Y.-C. Lin, T.-S. Lee, Y.-H. Pan, and K.-H. Lin, “Low-complexity high-resolution parameter estimation for automotive MIMO radars,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 16127–16138, 2019.
- [17] F. Vincent, O. Besson, and E. Chaumette, “Approximate unconditional maximum likelihood direction of arrival estimation for two closely spaced targets,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 22, no. 1, pp. 86–89, 2014.
- [18] R. Alizadeh and Y. Savaria, “Performance analysis of a reduced complexity SCMA decoder exploiting a low-complexity maximum-likelihood approximation,” in *2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, 2016, pp. 253–256.
- [19] K. D. Rao, M. N. S. Swamy, K. D. Rao, and M. N. S. Swamy, “Spectral analysis of signals,” *Digit. signal Process. theory Pract.*, pp. 721–751, 2018.
- [20] P. Stoica and R. L. Moses, *Spectral analysis of signals*, vol. 452. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2005.
- [21] H. Li, J. Li, and P. Stoica, “Performance analysis of forward-backward matched-filterbank spectral estimators,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 46, no. 7, pp. 1954–1966, 1998.
- [22] L. Xu, J. Li, and P. Stoica, “Target detection and parameter estimation for MIMO radar systems,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 44, no. 3, pp. 927–939, 2008.
- [23] J. Li, P. Stoica, L. Xu, and W. Roberts, “On parameter identifiability of MIMO radar,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 14, no. 12, pp. 968–971, 2007.
- [24] M. S. Davis, G. A. Showman, and A. D. Lanterman, “Coherent MIMO radar: The phased array and orthogonal waveforms,” *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 29, no. 8, pp. 76–91, 2014.
- [25] S. Tahcfulloh and M. Hardiwansyah, “Parameter estimation and target detection of phased-MIMO radar using capon estimator,” *J. Elektron. dan Telekomun.*, vol. 20, no. 2, pp. 60–69, 2020.
- [26] 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, 2006.