

2D MIMO 레이더의 가중 OMP 방법을 이용한 실시간 도래각 추정

Real-Time DOA Estimation Using Weighted-OMP Method for 2D-MIMO Radar

최현환 · 이재원 · 송 림* · 김병성*

Hyun-Hwan Choi · Jae-Won Lee · Reem Song* · Byung-Sung Kim*

요 약

본 논문은 개구면의 크기와 채널의 개수가 주어진 최적화된 2차원 MIMO(multiple input multiple output) 레이더 배열에서 부엽을 최소화하기 위한 채널별 가중치 최적화 방법과 이렇게 얻어진 가중치를 이용한 정밀한 각도 추정 알고리즘을 제안한다. 제안 방법은 수정된 배열 패턴에 유전 알고리즘을 적용하여 가중치를 최적화한 후, 이를 OMP(orthogonal matching pursuit)에 결합하여 정밀 각도 추정을 수행한다. 제안된 방법은 가중치를 통해 부엽 레벨을 0.65 dB 낮추었으며, 각도에 따른 RMSE(root mean square error) 값 또한 감소함을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes a two-step optimization method to suppress the sidelobe levels of a two-dimensional multiple input multiple output (MIMO) radar array, given the aperture size and number of channels. First, a 2-D array is optimized to minimize the sidelobe. Then, successive optimization of the channel weights is performed for additional sidelobe suppression by applying a genetic algorithm to the weighted array pattern and then combining it with orthogonal matching pursuit (OMP) for precise angle estimation. The proposed method lowers the sidelobe level by 0.65 dB through the weights, and the root mean square error (RMSE) values decreased according to the angle estimate.

Key words: Direction of Arrival, Genetic Algorithm, Orthogonal Matching Pursuit

I. 서 론

자율 주행을 위한 4D 이미징 레이더는 높은 각도 해상도와 정밀한 각도 추정이 요구된다^[1]. 각도 해상도를 개선하기 위해서는 개구면의 크기가 커야 하는데, 이 경우 센서 간격을 그레이팅 로브가 없는 0.5파장 단위로 배치

하면 센서의 수가 과도해져 시스템 구현의 난이도 및 비용이 급증해 실질적인 구현이 제한된다. 따라서, 각도 해상도를 위한 개구면 크기를 유지하면서도 센서 수를 줄이기 위한 회소 배열 최적화 기법이 많이 연구되었다^{[2][3]}. 특히, MIMO(multiple input multiple output) 배열의 경우 다수의 송수신기 간 격리도를 확보하기 위해 일정 거리

「이 논문은 산업통상자원부 ‘산업혁신인재성장지원사업’의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임(2024년 반도체특성화대학원지원사업(성균관대학교), 과제번호: P0023704).」

성균관대학교 반도체융합공학과(Department of Semiconductor Convergence Engineering, Sungkyunkwan University)

*성균관대학교 정보통신대학(College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University)

· Manuscript received February 28, 2025 ; Revised March 10, 2025 ; Accepted March 24, 2025. (ID No. 20250228-023)

· Corresponding Author: Byung-Sung Kim (e-mail: bskimice@skku.edu)

이상을 이격시켜 배치해야 하므로, 배열 배치 최적화 과정에 추가적인 제약이 발생한다. 이러한 제약은 배열 배치의 자유도를 감소시키며, 결과적으로 낮은 부엽 레벨을 가지는 배열 설계를 어렵게 만든다. 따라서, 개구 크기와 송수신기 수가 제한된 MIMO 레이다의 안테나 배열에서 부엽 레벨을 최소화하기 위해서는 센서의 각 채널별로 최적화된 가중치를 적용한 수신 데이터를 사용해 개선된 각도 추정을 수행할 필요가 있다.

각도 추정의 실시간 신호처리는 전통적으로 FFT 기반 계산 방법이 사용되어 왔다⁴⁾. 그러나 이러한 방식은 다중 타겟으로 인해 여러 피크를 동시에 탐지하는 데 어려움이 존재한다. 이러한 문제는 OMP(Orthogonal Matching Pursuit) 기법을 통해 해결할 수 있으며, 또한 반복 수행을 통해 각도 추정 오차를 줄일 수 있다^{5)[6]}. 하지만 반복적인 계산을 통해 정확도를 높일 수는 있으나, 대규모 채널 레이다 시스템에서는 실시간 신호처리에 부적합하다. 그러므로 실시간 처리가 요구되는 2D-MIMO 레이다에서는 반복 계산 없이도 각도 추정 성능을 향상시킬 수 있는 FFT 기반 OMP 기법이 필요하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 2D-MIMO 레이다 각도 추정의 신호 모델을 기술한다. III절은 가중치를 최적화하는 방식에 대해 간단히 설명하고 IV절은 가중치를 포함한 OMP 방법론에 대해 설명한다. V절에서 시뮬레이션 결과와 분석을 하고 VI절에서 결론을 제시한다.

II. 신호 모델

2D-MIMO 안테나 배열은 M 개의 송신기와 N 개의 수신기로 구성되며, 동일 평면 상에 배치된다. 여기에 K 개의 원거리 표적 신호가 입사한다고 가정하면, 식 (1)과 같은 신호 모델을 정의할 수 있다.

$$x = A \cdot s + n \quad (1)$$

x 는 각 채널의 데이터 벡터 ($MN \times 1$)이다. $A = [a(\theta_1, \phi_1) a(\theta_2, \phi_2) \dots a(\theta_K, \phi_K)]$ 는 조향 행렬 ($MN \times K$)로서 각 열벡터가 조향 벡터를 나타낸다. 일반적으로 사용되는 조향 벡터는 식 (2)로 표현된다³⁾.

$$a(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} e^{i\pi[(m_1^x + n_1^x)u + (m_1^y + n_1^y)v]} & \dots & e^{i\pi[(m_M^x + n_M^x)u + (m_M^y + n_M^y)v]} \\ \dots & e^{i\pi[(m_M^x + n_M^x)u + (m_M^y + n_M^y)v]} & \dots & e^{i\pi[(m_N^x + n_N^x)u + (m_N^y + n_N^y)v]} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

식 (2)는 계산 편리성을 위해 각도 변수 대신 $u = \sin\theta\cos\phi$, $v = \sin\theta\sin\phi$ 를 사용하였다. 이 조향 벡터는 2차원 최소 배열을 기반으로 하며, m_1^x, \dots, m_M^x 와 m_1^y, \dots, m_M^y 가 각각 송신기의 x , y 좌표를 거리 단위 0.5λ 로 정수화한 값이다. 아래 첨자는 송신기의 번호를 나타낸다. 유사하게, n_1^x, \dots, n_N^x 와 n_1^y, \dots, n_N^y 는 각각 수신기의 x , y 좌표를 거리 단위 0.5λ 로 정수화한 값이며, 아래 첨자는 수신기의 번호를 의미한다. s 는 신호의 복소 진폭 벡터 ($K \times 1$)이다. 마지막으로, $n \sim N(0, \sigma^2 I)$ 는 백색 가우시안 노이즈 벡터 ($MN \times 1$)이다.

III. 가중치 최적화를 위한 유전 알고리즘

본 절에서는 최적화된 MIMO 배열에 대해 가상 수신 채널의 가중치를 유전 알고리즘을 이용한 최적화 방법에 대해 설명한다^{7)[8]}. 일반적으로 가중치가 부여된 배열 패턴은 3 dB 빔 폭이 다소 늘어나는 대신, 부엽 레벨이 낮아지는 특성이 있다. 이에 비해 본 제안 방법은 해상도의 열화를 최소화하며 부엽 레벨을 낮추는 특성을 갖는다. 일반적인 배열 패턴 함수는 식 (3)으로 표현된다.

$$f(\theta, \phi) = \frac{|\mathbf{1}^T \cdot a(\theta, \phi)|}{MN} \quad (3)$$

식 (3)은 조향 벡터와 모든 요소가 1인 열벡터($\mathbf{1} = [1 \ 1 \dots 1]^T$)의 내적을 나타낸다. 주엽 대비 부엽을 최소화하기 위해 변형된 배열 패턴은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$g(\theta, \phi) = \frac{\sqrt{f(\theta, \phi)} \sqrt{|\mathbf{1}^T \cdot \tilde{a}(\theta, \phi)|}}{NM} \quad (4)$$

$\tilde{a}(\theta, \phi) = w \odot a(\theta, \phi)$ 는 가중치 w 를 조향 벡터에 요소별로 곱(\odot)한 변형된 조향 벡터이다. 모든 가중치 변수 요소들은 배열 패턴의 상대적 크기를 고려하여 0과 1 사이의 실수로 정의된다. 제안된 식 (4)는 기존의 배열 패턴과 가중치가 반영된 배열 패턴의 곱으로 표현되며, 식 (3)이 포함된 이유는 가중치에 의한 빔폭 증가를 최소화

하기 위함이다. 식 (4)에서 $|\mathbf{1}^T \cdot \tilde{\mathbf{a}}(\theta, \phi)|$ 은 $f(\theta, \phi)$ 와 유사한 주엽 모양을 가지지만, 부엽 분포는 다르게 형성한다. 그러므로 $f(\theta, \phi)$ 의 높은 부엽이 $|\mathbf{1}^T \cdot \tilde{\mathbf{a}}(\theta, \phi)|$ 의 부엽에 의해 억제되어 $g(\theta, \phi)$ 은 더 낮은 부엽 레벨을 성취할 수 있다. 식 (3) 및 식 (4)는 빠른 계산을 위해 2D-FFT를 이용하여 계산될 수 있다. 목적함수는 다음과 같이 표현된다.

$$h = \max_{(\theta, \phi) \in S} g(\theta, \phi) \quad (5)$$

식 (5)에서, S 는 부엽 영역의 각도 집합을 나타내고 h 는 부엽 레벨을 나타낸다. 총 MN 개의 가중치 변수는 위 목적함수(식 (5))를 최소화하는 방향으로 최적화된다. 제안된 목적함수 자체가 비선형성을 가지기 때문에 여러 국소적 최소 지점이 존재하여 해가 국소 최소 지점에 갇힐 수 있다. 유전 알고리즘은 이러한 비선형 목적함수에 대해 글로벌 최소 해를 찾기 위해 주로 사용된다^[8]. 또한, 적절한 모집단 수와 교차율, 돌연변이율 등의 파라미터를 선정함으로써 최적 성능을 향상시킬 수 있으며, 이를 통해 빠른 수렴성을 확보할 수 있다.

IV. 가중치가 포함된 OMP

이번 절에서는 기존의 OMP를 확장하여 가중치 벡터를 반영한 새로운 Weighted-OMP 기법을 제안한다^[5]. 초기 조건으로 잔여 벡터 $r_1 = x$ 와 조향 행렬 $A_0 = \emptyset$ (공집합)을 설정한다. 총 표적 수 K 는 최대 반복 수와 동일하게 정의된다. 이 알고리즘은 $k = 1$ 부터 시작하여 정지기준을 만족할 때까지 반복되며 정지기준은 모든 소스를 추정한 후 남은 잔여 벡터가 주로 노이즈 성분만 포함하는지에 따라 결정된다. FMCW 레이더를 예로, 실제 측정에 의해 얻어진 2D-FFT 거리 도플러 스펙트럼에서 주 신호 피크 주변에 대해 클러터 또는 노이즈 배경 전력 대 신호비를 데시벨 단위

로서 $20\log_{10} \frac{|r_1|}{|r_{K+1}|}$ 와 같다고 놓을 수 있다. 이를

$20\log_{10} (|r_1|/|r_{K+1}|) = \alpha$ 로 두면, $|r_{K+1}| = |r_1|10^{-0.05\alpha}$ 로 계산할 수 있다. 여기에 경험 매개변수 $\beta > 1$ 을 도입하면 정지기준은 $|r_{K+1}| \leq \beta|r_1|10^{-0.05\alpha} = \epsilon$ 로 사용할 수 있다. 즉, $|r_{K+1}| \leq \epsilon$, ϵ 는 신호의 SNR(signal to noise

ratio)에 의해 결정되는 임계값이다. 기존의 OMP의 식 (3) 대신, 부엽 레벨이 낮아진 식 (4)을 반영하여, 각도 추정에 관련된 식은 식 (6)과 같다.

$$C_k(\theta, \phi) = \frac{\sqrt{r_k^H \cdot a(\theta, \phi)} \sqrt{\tilde{r}_k^H \cdot \tilde{a}(\theta, \phi)}}{NM} \quad (6)$$

식 (6)는 $\tilde{r}_k = w \odot r_k$ 을 포함한다. 이 식은 식 (4)와 유사하게 2D-FFT를 사용할 수 있다.

$$(\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k) = \arg \max_{\theta, \phi} C_k(\theta, \phi) \quad (7)$$

위 식 (7)을 통해 추정된 각도는 조향 행렬을 다음과 같이 업데이트한다.

$$A_k = [A_{k-1}, a(\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k)] \quad (8)$$

그런 다음 복소 진폭을 최소제곱법을 통해 추정한다.

$$\hat{s}_k = \min_s \|x - A_k s\| \quad (9)$$

마지막으로, 잔여 벡터는 $r_{k+1} = r_k - A_k \hat{s}_k$ 으로 놓이며 위 단계들은 정지기준을 만족할 때까지 반복된다.

V. 시뮬레이션 결과 및 분석

2D-MIMO 배치에 놓인 송신기 4개와 수신기 8개로 구성된 안테나 배열은 참고문헌의 유전 알고리즘을 활용하여 최적화된 것으로 사용하였다^[2]. 안테나 배열에 속한 송수신기 좌표들은 0.5λ 단위로 표 1에 기록되어 있다.

가중치 벡터는 그림 1에서 볼 수 있듯이, 유전 알고리즘을 통해 -7.02 dB(부엽 레벨)에서 수렴하여 0과 1 사이의 실수 요소들로 얻어졌다.

표 1. 안테나 배열의 2차원 좌표
Table 1. 2D coordinates of an antenna array.

Antenna array	Rx	n^x	13	17	17	18	21	22	23	25
		n^y	8	15	6	11	10	7	19	15
	Tx	m^x	7	8	8	8	12			
		m^y	11	5	15	7				

그림 2는 2D-FFT(식 (3))와 가중치를 반영한 2D-FFT(식 (4)) 결과를 비교하여 가중치에 의한 효과를 시각화한 것이다. 그림 2(a)의 부엽 레벨은 -6.37 dB인 반면, 가중치를 적용한 그림 2(b)는 더 낮은 -7.02 dB값을 보임을 확인할 수 있다. 또한, 방위 및 고도 빔폭은 각각 $\Delta \theta_{3dB} = 5.04^\circ$, $\Delta \theta_{3dB}^{weight} = 5.27^\circ$ 그리고 $\Delta \psi_{3dB} = 7.05^\circ$, $\Delta \psi_{3dB}^{weight} = 6.17^\circ$ 로 나왔다. 평균적인 3dB 빔폭 $\left(\frac{\Delta \theta_{3dB} + \Delta \psi_{3dB}}{2} \right)$ 은 0.055° 차이만 나타났다.

II 절에서 정의한 신호 모델을 기반으로 같은 진폭 크기의 두 신호 ($\theta_1=5^\circ$, $\phi_1=30^\circ$, $\theta_2=20^\circ$, $\phi_2=-5^\circ$)를 생성하여 백색 가우시안 노이즈 환경(SNR=20 dB)에서 1,000회 몬테카를로 반복 시행을 통해 구한 각도 추정의 RMSE(root mean square error) 값을 표 2에 제시하였다. 표

표 2. SNR=20 dB에서의 RMSE 값

Table 2. RMSE values for SNR=20 dB.

	θ_1	ϕ_1	θ_2	ϕ_2
OMP	0.49°	5.21°	0.40°	1.06°
W-OMP	0.41°	3.92°	0.32°	0.89°

2에서 볼 수 있듯이, 주어진 안테나 배열에서 가중치를 적용한 경우가 전반적으로 더 작은 RMSE 값이 있음을 확인할 수 있다. 이는 가중치를 통해 각도 추정의 정확도를 개선함을 의미한다.

VI. 결론

본 논문은 유전 알고리즘을 통해 최적화된 가중치를 적용하여 안테나 배열에서 결정된 부엽 레벨을 효과적으로 억제하고, 이에 의해 각도 추정의 정확도를 개선시키는 데 기여한다. 가중치를 적용한 제안된 방법이 기존 OMP보다 부엽 레벨을 0.65 dB 낮추었으며, 각도에 따른 RMSE 값 또한 전반적으로 감소하였고 각도 정확도 개선을 확인하였다. 따라서, 제안 방법은 실시간 4D-이미징 레이더의 각도 정밀도 개선에 기여할 것으로 기대된다.

References

- [1] N. Karimian-Sichani, M. Alae-Kerahroodi, B. S. M. R. Rao, E. Mehrshahi, and S. A. Ghorashi, "Antenna array and waveform design for 4-D-imaging mmWave MIMO radar sensors," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 60, no. 2, pp. 1848-1864, Apr. 2023.
- [2] R. L. Haupt, "Thinned arrays using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 7, pp. 993-999, Jul. 1994.
- [3] A. D. Serio, P. Hügler, F. Roos, and C. Waldschmidt, "2-D MIMO radar: A method for array performance assessment and design of a planar antenna array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no.

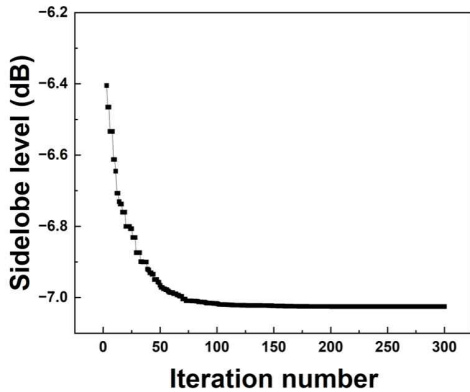


그림 1. 가중치 최적화에 따른 부엽레벨의 감소.

Fig. 1. Decrease of sidelobe levels according to weight optimization.

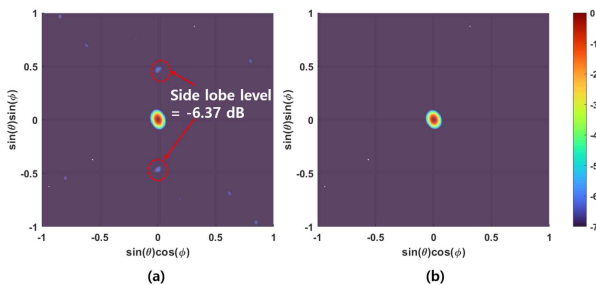


그림 2. 2D-FFT (a)와 가중치를 포함한 2D-FFT (b)

Fig. 2. 2D-FFT (a) and Weighted 2D-FFT (b).

- 6, pp. 4604-4616, Jun. 2020.
- [4] X. Li, X. Wang, Q. Yang, and S. Fu, "Signal processing for TDM MIMO FMCW millimeter-wave radar sensors," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 167959-167971, Dec. 2021.
- [5] J. A. Tropp, A. C. Gilbert, "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 12, pp. 4655-4666, Dec. 2007.
- [6] W. Wang, R. Wu, "High resolution direction of arrival (DOA) estimation based on improved orthogonal mat-

- ching pursuit (OMP) algorithm by iterative local searching," *Sensors*, vol. 13, no. 9, pp. 11167-11183, 2013.
- [7] J. R. Mohammed, "An optimum side-lobe reduction method with weight perturbation," *Journal of Computational Electronics*, vol. 18, no. 2, pp. 705-711, Aug. 2019.
- [8] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Boston, MA, Addison-Wesley, 1989.

최 현 환 [성균관대학교/석사과정]

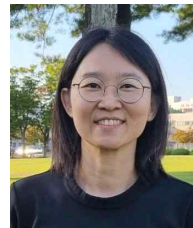
<https://orcid.org/0009-0007-7011-4678>



2022년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2023년 9월 ~ 현재: 성균관대학교 반도체 융합공학과 석사과정
[주 관심분야] RF 시스템 추정 알고리즘 설계

송 립 [성균관대학교/연구교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7088-1777>



1997년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학석사)
2006년 8월: 미국 USC 전기공학부 (공학박사) 2013년 5월 ~ 현재: 성균관대학교 정보통신 대학 연구교수

[주 관심분야] 밀리미터파 회로, 안테나 및 시스템

이 재 원 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0009-7677-7995>



2023년 2월: 강남대학교 전자공학과 (공학사)
2023년 9월 ~ 현재: 성균관대학교 반도체 융합공학과 석사과정
[주 관심분야] HW 설계 및 RF 시스템 신호처리

김 병 성 [성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-3084-6499>



1989년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1991년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
1997년 3월 ~ 현재: 성균관대학교 정보통신대학 교수

[주 관심분야] RFIC 설계, RF 소자 모델링