

# mmWave/THz ELAA 시스템을 위한 Least Squares 기반 Near-field 각도 및 거리 추정 알고리즘

정현진, 김선우  
한양대학교 융합전자공학과  
{hyeonjingo, remero}@hanyang.ac.kr

## Least Squares-based Near-field AoA and Distance Estimation Algorithm for mmWave/THz ELAA Systems

Hyeonjin Chung and Sunwoo Kim  
Department of Electronic Engineering, Hanyang University

### 요약

본 논문은 mmWave/THz ELAA (Extremely Large Antenna Array) 시스템에서 활용 가능한 near-field 각도 및 거리 추정 알고리즘을 제안한다. mmWave/THz 채널과 같이 line-of-sight 신호가 강한 상황에서는 파면의 모양이 각 안테나로 수신된 신호의 위상에 영향을 미친다. 이 때, 안테나 별 수신 신호의 위상을 측정값으로 활용할 경우 측정값과 각도, 거리 간의 관계를 간단한 수식으로 표현할 수 있으며, 제안 알고리즘은 이 수식을 통해 각도 및 거리를 별도의 탐색 과정 없이 least squares로 추정한다. 시뮬레이션 결과 제안 알고리즘이 기존 2D search 기반 알고리즘에 비해 추정 결과가 더 정확함을 확인하였으며, 계산 복잡도 또한 낮음을 확인하였다.

### I. 서론

6G에서는 FR2-FR4 (Upper-mid band-THz) 대역에서의 통신 커버리지 향상을 위해 수백개 이상의 안테나로 구성된 ELAA (Extremely Large Antenna Array) 활용이 필수적이다 [1]. ELAA 사용 시 파장 대비 안테나 크기가 커져 NF (Near-field) effect가 발생하며, 이 경우 파면의 곡률을 통해 신호의 도래각과 송수신단 간 거리를 추정할 수 있다 [2]. 다만 2D search를 통한 기존의 NF 각도 및 거리 추정 알고리즘은 이산적인 각도 및 거리 탐색으로 인해 정확도가 제한되며, 추정 정확도를 높이기 위해 탐색 구간을 세분화 할 경우 계산복잡도가 과도하게 증가한다는 단점이 존재한다 [2]. 따라서 본 논문은 [2]에서의 소모적인 탐색 과정 없이 LS(Least Squares)를 통해 각도 및 거리를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안 알고리즘 사용 시 기존 2D search 기반 알고리즘 대비 정확도 및 계산복잡도 측면에서 모두 향상됨을 확인하였다.

### II. Near-field mmWave/THz 대역 시스템 모델

본 논문은 그림 1과 같이 안테나 하나로 구성된 신호원으로부터 송신된 신호를 ELAA를 통해 수신하는 상황을 고려한다. 여기서 ELAA는 선형 배열안테나이다. mmWave/THz 대역에서는 약한 회절 및 산란으로 인해 LoS (Line-of-Sight) 신호의 세기가 NLoS 신호 대비 10 dB 이상 강하며 [3], 이러한 특징을 고려하여 본 논문에서는 그림 1과 같이 LoS 이외의 신호는 고려하지 않는다.

그림 1과 같이 ELAA의 중심 지점으로부터  $\Delta$  만큼 떨어진 지점에 위치한 안테나로 수신된 신호  $r_\Delta(t)$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_\Delta(t) = s(t - \tau(\Delta)) + n_\Delta(t) \approx s(t) e^{-2\pi f \tau(\Delta)} + n_\Delta(t), \quad (1)$$

여기서  $s(t)$  는 중심 지점에서 수신된 신호,  $\tau(\Delta)$  는 그림 1과 같이 송신단으로부터  $\Delta$  지점까지의 도달 시간과 송신단으로부터 중심 지점까지의 도달 시간 간의 차이,  $n_\Delta(t)$  는 노이즈,  $f$  는 반송파 주파수를 의미한다.  $s(t)$  가 narrowband 신호일 경우 (1)에서와 같이 시간차는 위상차로 근사할 수 있다. 이 때,  $\Delta$  지점에서 수신된 신호와 안테나 중심 지점에서 수신된 신호 간의 위상차  $p(\Delta)$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\Delta) = \text{mod}\left(2\pi \frac{d(\Delta) - d_{\text{ref}}}{\lambda} + w_\Delta, 2\pi\right), \quad -\frac{D}{2} \leq \Delta \leq \frac{D}{2}, \quad (2)$$

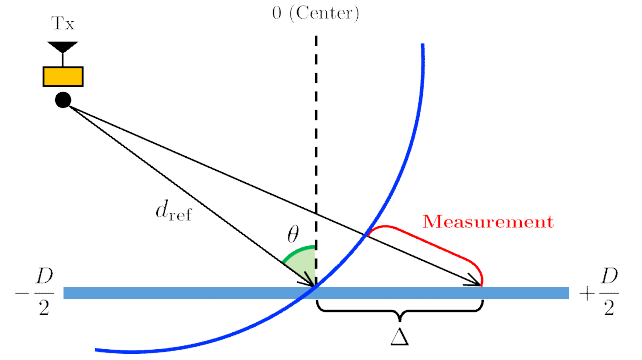


그림 1 NF 내 송신 신호원 및 수신 ELAA 간 기하학적 관계

여기서  $\text{mod}(\cdot)$  는 나머지를 나타내는 연산자,  $d_{\text{ref}}$  는 송신단과 안테나 중심 사이의 거리,  $\lambda$  는 신호의 파장,  $D$  는 ELAA 크기,  $w_\Delta$  는 노이즈로 인한 위상 추정 오차를 의미한다.

(2)에서의 위상값은 주기적이기에 ambiguity가 발생할 수 있는데, 만일 안테나 간 간격이 동일하게 반파장으로 설정되어 있다면 ambiguity가 발생하지 않는다. 만일 ELAA가 총  $2M+1$  개의 안테나로 구성되어 있고 안테나 배치가 중심을 기준으로 symmetric 할 경우  $m$  번째 안테나의 위치  $\Delta_m$  을  $-M \leq m \leq M$  에서  $mD/2M$  과 같이 정의할 수 있다. (2)에서 ambiguity가 존재하지 않는 symmetric ELAA에서의 측정값은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$g(\Delta_m) = (d(\Delta_m) - d_{\text{ref}}) + v_{\Delta_m}, \quad -M \leq m \leq M, \quad (3)$$

여기서  $v_{\Delta_m}$  은  $\lambda w_{\Delta_m}/2\pi$  을 나타내며,  $d(\Delta_m) - d_{\text{ref}}$  은 다음 수식과 같이 정리할 수 있다.

$$d(\Delta_m) - d_{\text{ref}} = \sqrt{d_{\text{ref}}^2 - 2\Delta_m d_{\text{ref}} \sin\theta + \Delta_m^2} - d_{\text{ref}}. \quad (4)$$

여기서  $\theta$  는 안테나 중심 기준 신호원의 도래각을 의미한다.

### III. Least Squares 기반 Near-field 각도 및 거리 추정 알고리즘

(3)에서의 노이즈 부분을 제외하면  $g(\Delta_m)$  과  $g(\Delta_m)$  은 다음과 같이 symmetric한 특성을 가진다.

$$\begin{aligned} g(\Delta_m) + d_{\text{ref}} &= \sqrt{d_{\text{ref}}^2 - 2\Delta_m d_{\text{ref}} \sin\theta + \Delta_m^2}, \\ g(\Delta_{-m}) + d_{\text{ref}} &= \sqrt{d_{\text{ref}}^2 + 2\Delta_m d_{\text{ref}} \sin\theta + \Delta_m^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

(5)에서 양변을 제곱한 후 두 수식을 정리하면 다음과 같은  $M$  개의 수식을 얻을 수 있다.

$$(2g(\Delta_m) + 2g(\Delta_{-m}))d_{\text{ref}} = 2\Delta_m^2 - g(\Delta_m)^2 - g(\Delta_{-m})^2, \quad (6)$$

for  $m = 1, \dots, M$ .

(6)의 결과로부터 다음과 같이  $d_{\text{ref}}$ 의 LS estimator를 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{d}_{\text{ref}}^b &= (\mathbf{a}^T \mathbf{a})^{-1} \mathbf{a}^T \mathbf{b}, \\ \mathbf{a} &= \begin{bmatrix} 2g(\Delta_1) + 2g(\Delta_{-1}) \\ 2g(\Delta_2) + 2g(\Delta_{-2}) \\ \vdots \\ 2g(\Delta_M) + 2g(\Delta_{-M}) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 2\Delta_1^2 - g(\Delta_1)^2 - g(\Delta_{-1})^2 \\ 2\Delta_2^2 - g(\Delta_2)^2 - g(\Delta_{-2})^2 \\ \vdots \\ 2\Delta_M^2 - g(\Delta_M)^2 - g(\Delta_{-M})^2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

다만 위의 LS estimator의 경우 residual에 해당하는  $\mathbf{b} - \mathbf{a}d_{\text{ref}}$ 의 평균이 0이 아니기에 biased estimator이며, 이 경우 노이즈에 취약하다는 단점이 있다 [4]. 따라서 bias를 없애기 위해 다음과 같이 벡터  $\mathbf{c}, \mathbf{d}$ 를 정의한다.

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{M/2+1} - \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_{M/2+2} - \mathbf{a}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{a}_M - \mathbf{a}_{M/2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{M/2+1} - \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_{M/2+2} - \mathbf{b}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_M - \mathbf{b}_{M/2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

여기서  $\mathbf{a}_m, \mathbf{b}_m$ 는 벡터  $\mathbf{a}$ 와  $\mathbf{b}$ 의  $m$ 번째 원소를 의미한다. 이 때,  $d_{\text{ref}}$ 의 unbiased LS estimator  $\hat{d}_{\text{ref}}^{\text{ub}}$ 는  $(\mathbf{c}^T \mathbf{c})^{-1} \mathbf{c}^T \mathbf{d}$ 와 같다.

거리 추정 이후에는 도래각  $\theta$ 를 추정하며, 이 경우에도 (5)를 정리한 다음의  $M$ 개의 수식을 활용한다.

$$-4\Delta_m d_{\text{ref}} \sin\theta = (g(\Delta_m) - g(\Delta_{-m})) (g(\Delta_m) + g(\Delta_{-m}) + 2d_{\text{ref}}), \quad \text{for } m = 1, \dots, M. \quad (9)$$

거리 추정이 정확하다고 가정할 경우 (9)로부터 다음과 같은 수식을 통해  $\sin\theta$ 를 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sin\hat{\theta} &= (\mathbf{x}^T \mathbf{x})^{-1} \mathbf{x}^T \mathbf{y}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} -4\Delta_1 \hat{d}_{\text{ref}}^{\text{ub}} \\ -4\Delta_2 \hat{d}_{\text{ref}}^{\text{ub}} \\ \vdots \\ -4\Delta_M \hat{d}_{\text{ref}}^{\text{ub}} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{y} &= \begin{bmatrix} (g(\Delta_1) - g(\Delta_{-1}))(g(\Delta_1) + g(\Delta_{-1}) + 2\hat{d}_{\text{ref}}^{\text{ub}}) \\ (g(\Delta_2) - g(\Delta_{-2}))(g(\Delta_2) + g(\Delta_{-2}) + 2\hat{d}_{\text{ref}}^{\text{ub}}) \\ \vdots \\ (g(\Delta_1) - g(\Delta_{-1}))(g(\Delta_M) + g(\Delta_{-M}) + 2\hat{d}_{\text{ref}}^{\text{ub}}) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

$\hat{\theta}$ 는 (10)에서의 추정 결과에  $\sin$  역함수를 취함으로써 구할 수 있다.

제안 알고리즘과 [2]의 2D search 기반 각도 및 도래각 추정의 계산 복잡도는 각각  $O(M)$ 과  $O(M(G_\theta + G_d))$ 이다. 여기서  $G_\theta$ 와  $G_d$ 는 각각 각도 및 거리 탐색 구간 분할 수를 의미하는데, 보통  $G_\theta$ 와  $G_d$ 는 안테나 수에 비례하게 설정하므로 [2]의 계산 복잡도는  $M^3$ 과 비교한다.

#### IV. 시뮬레이션 환경 및 결과

시뮬레이션 시 신호의 주파수는 140 GHz, 총 안테나 수는 257 개 ( $M=128$ )로 설정하였다. 수신단 ELAA에서의 안테나 간 거리는 반파장으로 설정하였다. 성능 분석을 위해 총 4개의 알고리즘을 비교하였는데, 첫 번째는 (7)의 biased estimator를 사용한 거리 및 각도 추정 알고리즘, 두 번째는 unbiased estimator를 사용한 거리 및 각도

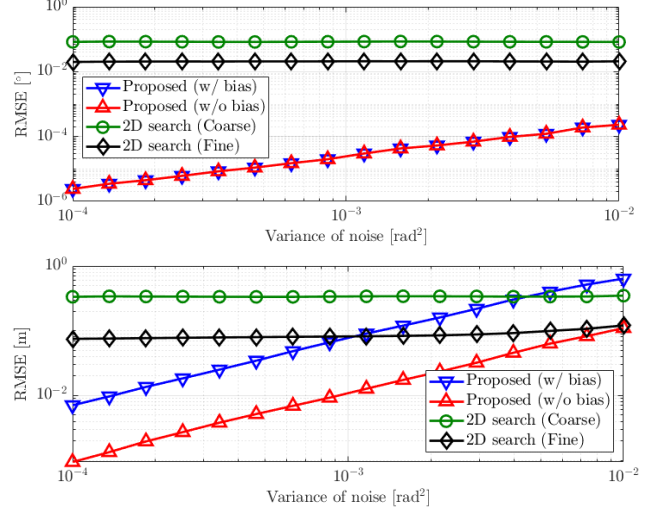


그림 2 위상 추정 오차에 따른 각도 추정 RMSE와 거리 추정 RMSE 결과

추정 알고리즘, 세 번째는  $G_\theta$ 와  $G_d$ 를 각각 512, 256으로 설정한 [2]의 알고리즘, 네 번째는  $G_\theta$ 와  $G_d$ 를 각각 2048, 1024로 설정한 [2]의 알고리즘이다. 네 번째 알고리즘의 경우 세 번째 알고리즘에 비해 계산시간이 크나 추정 결과는 정확할 것으로 예상할 수 있다.

그림 2는 (2)에서 위상 추정 오차를 의미하는  $w_\Delta$ 의 분산에 따른 각도 및 거리 추정 RMSE (Root Mean Square Error) 결과를 나타낸다. 이 때, 위상 추정 오차의 범위는  $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 로 설정하였다. 그림 2에 따르면 제안한 unbiased estimator 각도 및 추정이 기존 2D search 및 biased estimator 대비 더 정확함을 확인할 수 있다. 또한 제안한 biased, unbiased estimator는 평균적으로 각각  $2.9 \times 10^{-5}$ 초,  $8.8 \times 10^{-6}$ 초가 소요되는 반면, 세 번째와 네 번째 2D search 알고리즘은 평균적으로 각각 1.6초, 26초가 소요됨을 확인하였다.

#### V. 결론

본 논문에서는 mmWave/THz ELAA 시스템에서 활용 가능한 NF 각도 및 거리 추정 알고리즘을 개발하였다. 제안 알고리즘은 LoS 신호가 강한 상황에서 각 안테나로 수신한 신호의 위상을 측정값으로 활용하며, 간단한 LS를 통해 별도의 탐색 과정 없이 각도와 거리 값을 추정한다. 시뮬레이션 결과 제안 알고리즘이 기존 2D search 기반 알고리즘에 비해 추정 결과가 더 정확함을 확인하였으며, 추정에 소요되는 시간 또한 기존 알고리즘 대비 짧음을 확인하였다.

#### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2023R1A2C3002890).

#### 참고 문헌

- [1] Z. Wang *et al.*, "A Tutorial on Extremely Large-Scale MIMO for 6G: Fundamentals, Signal Processing, and Applications," *IEEE Commun. Surveys Tut.*, Jan. 2024.
- [2] M. Cui and L. Dai, "Channel estimation for extremely large-scale MIMO: Far-field or near-field?," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 70, pp. 2663 - 2677, Jan. 2022.
- [3] C. Han *et al.*, "Terahertz Wireless Channels: A Holistic Survey on Measurement, Modeling, and Analysis," *IEEE Commun. Surveys Tut.*, vol. 24, no. 3, pp. 1670-1707, 3<sup>rd</sup> qtr. 2022.
- [4] Fumio Hayashi, *Econometrics*. Princeton University Press, 2011.