

## Movable antenna 기반 간섭 제어를 통한 다중경로 환경에서의 ToA 추정

김재홍, 고승우  
인하대학교

kimjaehong@inha.edu, swko@inha.ac.kr

## ToA estimation in multipath scenario via interference control with a Movable antenna

Jae-Hong Kim, Seung-Woo Ko  
Inha Univ.

## 요약

본 연구에서는 안테나의 위치를 자유롭게 이동할 수 있는 Movable Antenna (MA)를 활용해 다중 경로 상황에서 각 경로의 Time of Arrival (ToA)를 정확히 추정하는 알고리즘을 설계하는 것을 목표로 한다. 본 연구에서는 다중경로의 영향으로 인하여 각 경로의 정확한 ToA를 추정하지 못하는 상황에서, 제안하는 알고리즘을 통해 인접 경로로 인한 간섭을 효율적으로 제어하여 각 경로의 ToA를 정확히 추정할 수 있는지를 확인한다. 다중경로 상황에서 제안하는 기법을 통해 추정된 각 경로의 ToA 정확도가 간섭이 존재하지 않는 시나리오에서의 ToA 추정 결과와 거의 일치함을 보였다.

## I. 서론

기존의 Fixed Positioned Antenna (FPA)와 달리 안테나의 위치를 자유롭게 바꿀 수 있는 MA는 FPA보다 높은 Degree of Freedom (DoF)를 갖는다. MA는 높은 DoF를 바탕으로 기존보다 효율적인 수신 신호 세기 향상, 간섭 완화, 유연한 빔포밍등을 가능하게 한다. 본 연구에서는 다중경로 상황에서 단 한개의 MA를 활용하여 각 경로의 AoA를 추정한 뒤, 이를 기반으로 각 경로의 ToA 추정을 가능하게 하는 알고리즘 설계를 목적으로 한다. 특히 본 연구에서는 인접 경로로 인한 간섭이 존재할 때, 제안하는 기법을 사용하면 효과적으로 간섭을 제어하며 ToA를 추정할 수 있는지를 확인한다.

## II. 시스템 모델

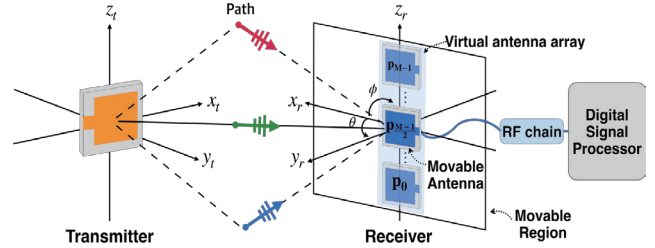
본 논문에서는 한 개의 송신 FPA와 한 개의 수신 MA를 포함한 시스템을 고려한다. 송신 안테나와 수신 안테나 사이에는 다중 경로들이 존재하며, Line-of-Sight (LoS) 경로를 제외한 Non-Line-of-Sight (NLoS) 경로들은 장애물들에 의해 반사되어 수신 안테나로 들어온다. 이때 주변환경은 채널의 변화가 거의 없는 정적인 환경임을 가정한다. [그림 1]에서와 같이 송신 안테나와 수신 안테나는 각각 로컬 좌표계를 갖고 있으며 송신 안테나의 원점은 송신 안테나의 로컬 좌표계의 원점과 같으며, 수신 안테나의 원점은 Movable Region 안에서 자유롭게 정의 가능하다고 가정한다. L개의 다중경로로 이뤄진 Single Input Single Output (SISO) 협 대역 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 시나리오에서 k번째 서브캐리어에 해당되는 L개의 경로에 대한 채널은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{h}(k) = [\alpha_1 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_k}(t-\tau_1)}, \dots, \alpha_L e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_k}(t-\tau_L)}] \mathbf{r}. \quad (1)$$

식(1)의 채널  $\mathbf{h}$ 에서  $\tau$ 는 각 경로의 전파 시간 지연을 의미하고  $\alpha$ 는 복소 채널 계수를 의미한다. 이때 k번째 서브캐리어와 L개의 경로에 대한 복조된 수신 신호는 다음과 같이 나타낸다.

$$y(k) = \sum_{l=1}^L \alpha_l e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_k}(\tau_l)} + n. \quad (2)$$

$n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 은 평균이 0이고 평균 전력  $\sigma^2$ 인 복소 백색 가우시안 잡음을 의미한다. [그림 1]에서와 같이 MA가 Movable Region 안에서 이동하며 여러 위치에 대해서 신호를 수신하면 여러 개의 안테나가 존재하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있는 Virtual antenna array를 형성할 수 있다. MA가 원점에서 임의의 위치  $\mathbf{p} = [p_x, p_y]$ 로 움직인 후 수신한 신호는 원점에서 수신한 신호와  $p_x \cos \theta_l \sin \phi_l + p_y \sin \phi_l$ 에 해당하는 경로차이를 갖는다. 이때  $\mathbf{p}$ 에서 수신한 k번째 서브캐리어와 L개의 경로에 대한 채널과 복조된 수신 신호  $y$ 는 다음과 같다



[그림 1] 단일 송신 안테나와 단일 MA로 구성된 시스템 모델

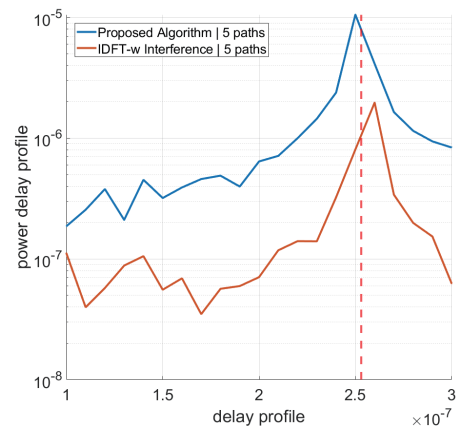
$$\mathbf{h}(\mathbf{p}, k) = \mathbf{h}(k) \cdot e^{p_x \cos \theta_l \sin \phi_l + p_y \sin \phi_l}, \quad (3)$$

$$y(\mathbf{p}, k) = \sum_{l=1}^L \alpha_l e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_k}(\tau_l - p_x \cos \theta_l \sin \phi_l - p_y \sin \phi_l)} + n. \quad (4)$$

채널과 수신 신호에 존재하는  $\theta_l, \phi_l$ 은 각각 l번째 경로에 해당하는 azimuth와 elevation 각도를 의미한다. 이때 MA가 [그림 1]에서와 같이 총 M개의 위치와 K개의 서브캐리어에 대해 신호를 수신하는 경우 수신 신호 매트릭스  $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y(\mathbf{p}_0, 1) & \dots & y(\mathbf{p}_0, K) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y(\mathbf{p}_{M-1}, 1) & \dots & y(\mathbf{p}_{M-1}, K) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

## III. MA 기반 다중 경로 간섭 제어 기법



[그림 2] IDFT 방식과 간섭을 제어한 경우 ToA 추정 결과

IDFT를 통한 ToA 추정 기법은 같은 시간 슬롯 안에 여러 개의 경로가 들어 올 경우 간섭에 의해 [그림 2]에서와 같이 정확한

ToA 추정이 어려울 뿐만이 아니라 개별 경로에 대한 ToA 추정 또한 어렵다는 문제점이 존재한다. 이 문제점을 해결하기 위해 AoA 기반 다중 경로 간섭 제어 기법을 제안한다. 이 기법은 수신 신호 매트릭스  $\mathbf{Y}$  와 스티어링 매트릭스를  $\mathbf{G}$  를 element wise 하게 곱한 합이 제일 큰  $\tau$ 를 해당 경로의 ToA로 추정하는 방식이다. 이때 스티어링 매트릭스는 ToA 추정을 원하는 경로의 AoA 값과  $\tau$ 를 활용해 만들 수 있다. 제안하는 기법을 사용하면 [그림 2]와 같이 주변 경로에 대한 간섭 제어 뿐만이 아니라 원하는 경로에 대한 ToA 추정이 가능하다. 식(5)에서 얻은 수신 신호 매트릭스에 Multiple Signal Classification (MUSIC) 알고리즘을 적용하면 각 경로의 AoA 추정이 가능하다. MUSIC 알고리즘으로 추정한 AoA를 통해 아래와 같이 스티어링 벡터를 만들 수 있다.

$$g_k(\tau; \mathbf{p}) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k}\tau} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k}(p_x \cos \theta_l \sin \phi_l + p_y \sin \phi_l)}. \quad (6)$$

스티어링 벡터는 시간 지연 성분  $\tau$ 와 공간 위상 지연 성분인 AoA 와  $\mathbf{p}$ 로 구성되며  $\mathbf{Y}$ 에 대응하는 스티어링 매트릭스는 아래와 같이 표현할 수 있다. 이때 MA를 원점을 기준으로  $y$ 축에 대해 움직이면 azimuth에 의한 위상차이가 없어져 추정해야 하는 파라미터를 줄일 수 있다는 장점이 존재한다.

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1(\tau; \mathbf{p}_0) & \cdots & g_K(\tau; \mathbf{p}_0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_1(\tau; \mathbf{p}_{M-1}) & \cdots & g_K(\tau; \mathbf{p}_{M-1}) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

L 개의 경로가 존재하는 시나리오에서 [그림 1]과 같이 원점에 대해  $y$ 축으로 움직이며 수신한 수신 신호 매트릭스와 첫번째 경로의 AoA 값과 임의의  $\tau$ 값으로 만든 스티어링 매트릭스간 연산 결과는 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{C}(\tau) = M \sum_{k=1}^K \alpha_1 e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k}(\tau_1 - \tau)} + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l=2}^L \alpha_l e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k}((\tau_l - \tau) + p_y(\sin \phi_l - \sin \phi_l))}. \quad (8)$$

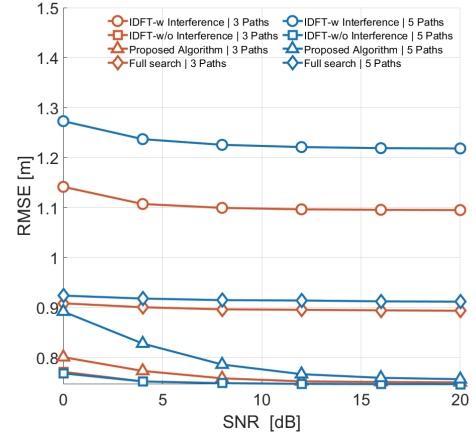
첫번째 항은 추정된 AoA와 실제 AoA가 일치하기 때문에  $\tau$ 가  $\tau_1$ 과 같거나 비슷한 값을 갖을 때 MA가 움직인 위치 개수와 서브캐리어 개수의 곱만큼 선형으로 신호가 증폭된다. 하지만 나머지 경로들의 경우 첫번째 경로의 AoA와 다른 AoA 값을 갖기 때문에 첫번째 경로의 신호가 증폭되는  $\tau$ 에서 신호가 증폭되지 않고 아래와 같이 Dirichlet 커널의 값으로 표현된다.

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l=2}^L \alpha_l e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k} p_y (\sin \phi_l - \sin \phi_l)} = \sum_{l=2}^L \alpha_l e^{j\pi(K-1)\Delta f(\tau_l - \tau) \frac{\sin(\pi K \Delta f(\tau_l - \tau))}{\sin(\pi \Delta f(\tau_l - \tau))}} e^{-j\pi(M-1) \frac{(\sin \phi_l - \sin \phi_l) \sin(\pi \frac{\sin \phi_l - \sin \phi_l}{2})}{\sin(\pi \frac{\sin \phi_l - \sin \phi_l}{2})}}. \quad (9)$$

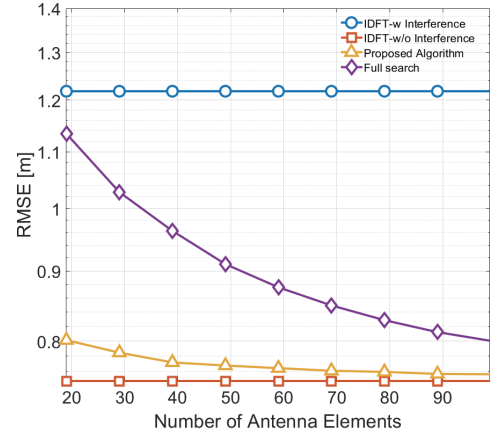
첫번째 항은 시간 지연에 의해 생성된 Dirichlet 커널을 두번째 항은 AoA에 의해 생성된 Dirichlet 커널을 나타낸다. 식(9)를 통해  $\tau$ 와 실제 경로의  $\tau$  차이가 커지거나 AoA와 실제 AoA의 차이가 커질 수록 신호의 세기가 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 ToA 추정을 원하는 경로를 제외한 경로로 인해 발생한 간섭들은 제안하는 AoA 기반 다중경로 간섭 제어기법을 통해 제어가 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 시뮬레이션

본 연구에서 진행한 시뮬레이션은 앞서 제안한 시스템 모델과 알고리즘에 기반하였다. MA는 19개의 위치에서 신호를 수신하고, bandwidth는 100MHz, 서브캐리어의 수는 32개이며 다중 경로의 개수를 3개, 5개인 경우에 대해 몬테카를로 시뮬레이션을 1000번을 진행하여 오차의 평균을 비교 분석하였다. 간섭이 없는 경우 IDFT를 통한 ToA 추정 방법, 간섭이 있는 경우 IDFT를 통한 ToA 추정 방법, 제안하는 기법을 사용한 경우와 AoA와 ToA를 full search로 찾는 경우의 RMSE를 비교 분석하였다. [그림 4]를 통해 SNR이 증가함에 따라 네 개의 scheme 모두 ToA 추정 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 제안하는 방식의 경우 SNR이 증가함에 따라 정확한 AoA 추정이 가능하고, 이를 기반으로 한 간섭 제어를 통해 간섭이 없는 경우의 ToA 추정 결과와 유사한 정도의 성능이 나온다는 것을 확인할 수 있다. Full search 방식의 경우 모든 범위에 대해서 AoA를 탐색하기 때문에 각 경로의 실제 AoA와 높은 상관도를 갖는 인접 AoA의 영향으로 인해 정확한



[그림 4] SNR에 따른 ToA 추정 결과



[그림 5] 움직이는 위치 개수에 따른 ToA 추정 결과

ToA 추정이 어렵다. 이때문에 full search 방식의 경우 간섭이 있는 경우의 IDFT 방식보다 높은 성능을 보이지만 제안하는 방식보다는 낮은 성능이 나타난다. 경로의 개수가 6개인 경우 인접 경로의 간섭 및 AoA 추정의 어려움으로 인해 모든 scheme의 MMSE가 경로의 개수가 3개인 경우보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 경로의 개수가 6개일 때 MA가 움직이는 위치 개수에 따른 MMSE를 나타낸 [그림 5]를 통해 MA가 움직이는 위치의 개수를 증가 시키면 늘어난 정보를 기반으로 간섭 제어가 효과적으로 이뤄질 수 있다는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 다중 경로 상황에서 간섭 제어를 통한 개별 경로의 ToA 추정을 가능하게 하는 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다. 향후 연구에서는 이 기법을 동적인 환경에서 적용할 수 있도록 확장할 계획이다.

#### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021-0-00347, 6G 통신을 위한 Post Mac).

#### 참고 문헌

- [1] L.Zhu, W.Ma and R.Zhang, "Movable Antennas for Wireless Communication: Opportunities and Challenges" IEEE Communication Magazine., vol.62, no.6, pp. 114-120, June 2024
- [2] L.Zhu, W.Ma, B.Ning and R.Jang, "Movable Antenna Enhanced Multiuser Communication via Antenna Position Optimization" IEEE TWC., vol. 23, no.7, pp. 7214-7229
- [3] W.Ma, L.Zhu, and R.Jang, "Multi-Beam Forming with Movable - Antenna Array", IEEE Communications Letters, vol. 28, no. 3, pp.697-701, March 2024