

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 추정한 각 경로의 ToA 정확도가 간섭이 존재하지 않는 시나리오에서의 ToA 추정 결과와 거의 일치함을 보였다.

I. 서 론

기존의 Fixed Positioned Antenna (FPA)와 달리 안테나의 위치를 자유롭게 바꿀 수 있는 MA는 FPA 보다 높은 Degree of Freedom (DoF)를 갖는다. MA는 높은 DoF를 바탕으로 기존보다 효율적인 수신 신호 세기 향상, 간섭 완화, 유연한 범포밍등을 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 제어하여 ToA를 추정할 수 있는지를 확인한다.

II. 시스템 모델

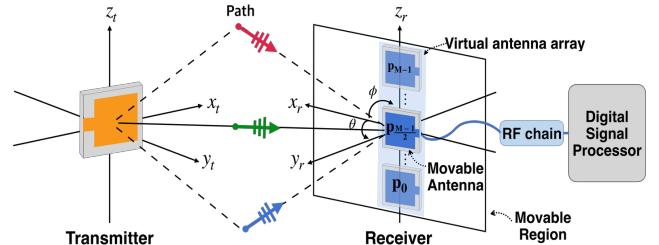
본 논문에서는 한 개의 송신 FPA 와 한 개의 수신 MA 를 포함한 시스템을 고려한다. 송신 안테나와 수신 안테나 사이에는 다중 경로들이 존재하며, Line-of-Sight (LoS) 경로를 제외한 Non-Line-of-Sight (NLoS) 경로들은 장애물들에 의해 반사되어 수신 안테나로 들어온다. 이때 주변환경은 채널의 변화가 거의 없는 정적인 환경임을 가정한다. [그림 1]에서와 같이 송신 안테나와 수신 안테나는 각각 로컬 좌표계를 갖고 있으며 송신 안테나의 원점은 송신 안테나의 로컬 좌표계의 원점과 같으며, 수신 안테나의 원점은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

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

식(1)의 채널 \mathbf{h} 에서 τ 는 각 경로의 전파 시간 지연을 의미하고 α 는 복소 채널 계수를 의미한다. 이때 k번째 서브캐리어와 L 개의 경로에 대한 복조 된 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 전력이 σ^2 인 복소 백색 가우시안 잡음을 의미한다. [그림 1]에서와 같이 MA 가 Movable Region 안에서 이동하며 여러 위치에 대해서 신호를 수신하면 여러 개의 안테나가 존재하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있는 Virtual antenna array 를 형성할 수 있다. MA 가 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 k 번째 서브캐리어와 L 개의 경로에 대한 채널과 복조 된 수신 신호 y는 다음과 같다



[그림 1] 단일 송신 안테나와 단일 MA로 구성된 시스템 모델

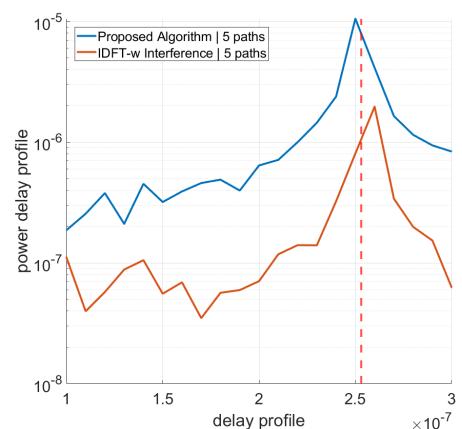
$$\mathbf{h}(\mathbf{p}, k) = \mathbf{h}(k) \cdot e^{p_x \cos \theta_l \sin \phi_l + p_y \sin \phi_l}, \quad (3)$$

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

채널과 수신 신호에 존재하는 θ_l, ϕ_l 은 각각 l 번째 경로에 해당하는 azimuth 와 elevation 각도를 의미한다. 이때 MA 가 [그림 1]에서와 같이 총 M 개의 위치와 K 개의 서브캐리어에 대해 신호를 수신하는 경우 수신 신호 매트릭스 $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

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

III. MA 기반 다중 경로 간섭 제어 기법



[그림 2] IDFT 방식과 간섭을 제어한 경우 ToA 추정 결과

IDFT 를 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 τ 를 해당 경로의 ToA 로 추정하는 방식이다. 이때 스티어링 매트릭스는 ToA 추정을 원하는 경로의 AoA 값과 τ 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 AoA 를 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 τ 와 공간 위상 지연 성분인 AoA 와 \mathbf{p} 로 구성되며 \mathbf{Y} 에 대응하는 스티어링 매트릭스는 아래와 같이 표현할 수 있다. 이때 MA 를 원점을 기준으로 y 축에 대해 움직이면 azimuth 에 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 τ 값으로 만든 스티어링 매트릭스간 연산 결과는 아래와 같이 표현된다.

$$C(\tau) = M \sum_{k=1}^K \alpha_k e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k}(\tau_1 - \tau)} + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l=2}^L \alpha_l e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k}(\tau_l - \tau) + p_y(\sin \phi_1 - \sin \phi_l)}. \quad (8)$$

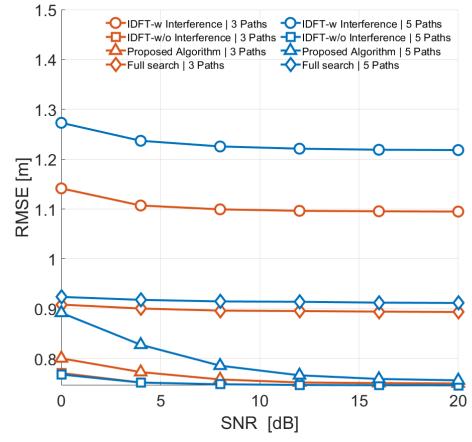
첫번째 항은 추정된 AoA 와 실제 AoA 가 일치하기 때문에 τ 가 τ_1 과 같거나 비슷한 값을 갖을 때 MA 가 움직인 위치 개수와 서브캐리어 개수의 곱만큼 선형으로 신호가 증폭된다. 하지만 나머지 경로들의 경우 첫번째 경로의 AoA 와 다른 AoA 값을 갖기 때문에 첫번째 경로의 신호가 증폭되는 τ 에서 신호가 증폭되지 않고 아래와 같이 Dirichlet 커널의 값으로 표현된다.

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l=2}^L \alpha_l e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k}p_y(\sin \phi_1 - \sin \phi_l)} = \sum_{l=2}^L \alpha_l e^{j\pi(K-1)\Delta f(\tau_l - \tau) \frac{\sin(\pi K \Delta f(\tau_l - \tau))}{\sin(\pi \Delta f(\tau_l - \tau))}} e^{-j\pi(M-1) \frac{(\sin \phi_1 - \sin \phi_l) \sin(\pi \frac{(\sin \phi_1 - \sin \phi_l)}{2})}{\sin(\pi \frac{(\sin \phi_1 - \sin \phi_l)}{2})}}.$$

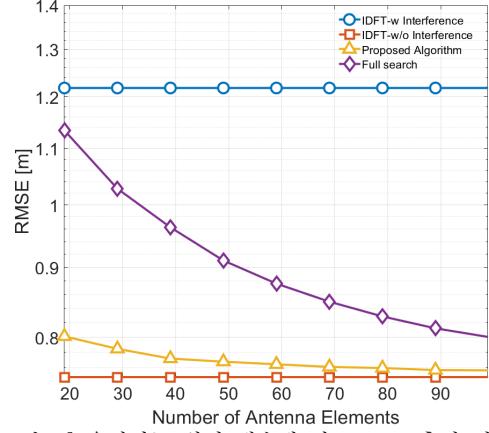
첫번째 항은 시간 지연에 의해 생성된 Dirichlet 커널을 두번째 항은 AoA 에 의해 생성된 Dirichlet 커널을 나타낸다. 식(9)를 통해 τ 와 실제 경로의 τ 차이가 커지거나 AoA 와 실제 AoA 의 차이가 커질 수록 신호의 세기가 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 ToA 추정을 원하는 경로를 제외한 경로로 인해 발생한 간섭들은 제안하는 AoA 기반 다중경로 간섭 제어기법을 통해 제어가 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

IV. 시뮬레이션

본 연구에서 진행한 시뮬레이션은 앞서 제안한 시스템 모델과 알고리즘에 기반하였다. MA 는 19 개의 위치에서 신호를 수신하고, bandwidth 는 100MHz, 서브캐리어의 수는 32 개이며 다중 경로의 개수를 3 개, 5 개인 경우에 대해 몬테카를로 시뮬레이션을 1000 번을 진행하여 오차의 평균을 비교 분석 하였다. 간섭이 없는 경우 IDFT 를 통한 ToA 추정 방법, 간섭이 있는 경우 IDFT 를 통한 ToA 추정 방법, 제안하는 기법을 사용한 경우와 AoA 와 ToA 를 full search 로 찾는 경우의 RMSE 를 비교 분석하였다. [그림 4]를 통해 SNR 이 증가함에 따라 네 개의 scheme 모두 ToA 추정 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 제안하는 방식의 경우 SNR 이 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 AoA 를 탐색하기 때문에 각 경로의 실제 AoA 와 높은 상관도를 갖는 인접 AoA 의 영향으로 인해 정확한



[그림 4] SNR에 따른 ToA 추정 결과



[그림 5] 움직이는 위치 개수에 따른 ToA 추정 결과

ToA 추정이 어렵다. 이 때문에 full search 방식의 경우 간섭이 있는 경우의 IDFT 방식 보다 높은 성능을 보이지만 제안하는 방식보다는 낮은 성능이 나타난다. 경로의 개수가 6 개인 경우 인접 경로의 간섭 및 AoA 추정의 어려움으로 인해 모든 scheme 의 MMSE 가 경로의 개수가 3 개인 경우보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 경로의 개수가 6 개일 때 MA 가 움직이는 위치 개수에 따른 MMSE 를 나타낸 [그림 5]를 통해 MA 가 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).

참 고 문 헌

- [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