

Extremely Large Antenna Array 시스템을 위한 근거리장 빔포밍 파라미터 추정 기법

김영준
육군사관학교

yjkim@kma.ac.kr

A Near-Field Beamforming Parameter Estimation Method for Extremely Large Antenna Array Systems

Yeong Jun Kim
Korea Military Academy

요 약

본 논문에서는 중첩 서브어레이 구조를 사용하는 초대규모 균일 평면 배열(ELUPA)을 위한 빔포밍 파라미터 추정 기법을 제안한다. 인접한 서브어레이 간 위상 정보를 이용하여 빔포밍 파라미터를 추정함으로써 환경에서도 효율적인 빔포밍 파라미터 추정이 가능함을 보인다.

I. 서 론

6 세대(6G) 이동통신 시스템은 초고속·초저지연 통신을 기반으로 확장현실(XR), 홀로그래픽 통신, 디지털 트윈과 같은 차세대 서비스를 지원하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 밀리미터파(mmWave) 및 서브 테라헤르츠(sub-THz) 대역과 같은 고주파 영역의 활용과 함께, 초대규모 안테나 배열(Extremely Large Antenna Array, ELAA)이 핵심 기술로 주목받고 있다[1][2].

ELAA 는 큰 어레이 크기로 인해 레일리 거리가 증가하여 다수의 사용자가 근거리장 영역에 위치하게 된다. 이로 인해 각도와 거리 정보를 함께 고려한 빔 제어와 사용자 이동성을 고려한 효율적인 빔포밍 파라미터 추정 기법이 요구된다[3].

본 논문에서는 중첩 서브어레이 구조를 사용하는 초대규모 균일 평면 배열(Extremely Large Uniform Planar Array, ELUPA) 시스템을 고려하여, 근거리장 환경에서 추가적인 채널 정보나 복잡한 모델 가정 없이 서브어레이 간 위상 정보를 이용해 빔포밍 파라미터를 추정하는 기법을 제안한다.

II. 본론

Fig. 1 은 제안된 빔포밍 파라미터 추정 기법의 서브어레이 구조 개념도를 보여준다. 그림에서 전체 어레이는 $2B$ 개의 서브어레이로 구분된다. 여기서 B 는 짝수이다. $2b$ 번째 서브어레이와 $2b+1$ 번째 서브어레이는 하나의 안테나 원소 만큼 변위가 존재한 채로 겹쳐진 서브어레이 구조를 갖는다. 여기서 b 의 범위는 $0 \sim B-1$ 이다. $x_p^b(t)$ 는 p 번째 기지국의 b 번째 서브어레이로 전송되는 프리앰블 신호이다. 각각의

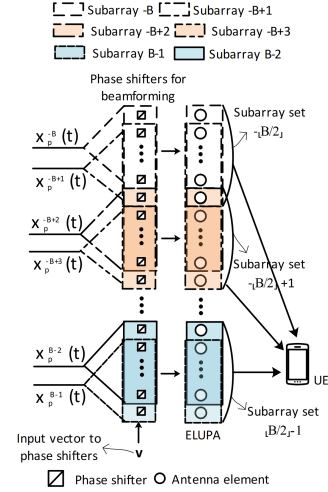


Fig. 1. 제안된 근거리장 빔포밍 파라미터 추정 기법의 서브어레이 구조 개념도

서브어레이로 전송되는 $x_p^b(t)$ 들은 서로 직교 특성을 갖는다고 가정한다. 기지국(BS)이 y -축 서브어레이 모드로 동작하는 경우, p 번째 BS로부터 단일 안테나 사용자 단말(UE)로 수신되는 프리앰블 신호는 구면파 전파 특성을 고려하여 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$y_p^y(n) = h_p \sum_{b=-B}^{B-1} \zeta_p^{y,b} x_p^b(n) + w(n) \quad (1)$$

$$\text{where } [\alpha_p^{y,b}]_{(m_{y,b}-B_{y,b})+m_z M_y^{sub}} = e^{j2\pi r_p^{m_{y,b},m_z}/\lambda},$$

$$[v_p^{y,b}]_{(m_{y,b}-B_{y,b})+m_z M_y^{sub}} = e^{j2\pi(r_{p,BF}^{m_y,m_z}-r_{p,BF}^{0,0})/\lambda}, \quad \zeta_p^{y,b} = (v_p^{y,b})^H \alpha_p^{y,b},$$

$B_{y,b} \leq m_{y,b} < B_{y,b} + M_y^{sub}$, $B_{y,b} = \lfloor b/2 \rfloor M_y^{sub} + b_{\%2}$, and $-\lfloor M_y/2 \rfloor \leq m_y < \lfloor (M_y+1)/2 \rfloor$. 여기서 %는 모듈로 연산을 의미하며, $w(n)$ 은 가산 백색 가우시안 잡음(AWGN)을 의미한다. M_y 와 M_z 는 각각 ELUPA의 y -축 및 z -축 방향 안테나 요소 개수를 나타낸다. M_y^{sub} 는 y -축 서브어레이에 포함된 안테나 요소의 개수이며, $B_{y,b}$ 는 b 번째 서브어레이의 안테나 인덱스 오프셋을 의미한다. M_y^{sub} 는 홀수(또는 짝수) 인덱스를 갖는 y -축 서브어레이들이 서로 중첩되지 않고 $M_y - 1$ 개의 연속적인 안테나 요소로 구성되기 때문에 $(M_y - 1)/B$ 가 된다. m_y 와 m_z 는 각각 ELUPA의 y -축 및 z -축 방향 안테나 요소 인덱스를 나타낸다. 또한, $r_p^{m_y,m_z=0}$ 채널 경로에서 y -축 m_y 번째 및 z -축 m_z 번째 안테나 요소로부터 UE까지의 거리를 의미한다. $r_{p,BF}^{m_y,m_z=0}$ 는 빔포밍 가중치 벡터 계산에 사용되는 p 번째 BS와 UE 간 빔포밍 거리를 나타내며, λ 는 파장을 의미한다. $m_{y,b}$ 는 b 번째 서브어레이의 y -축 안테나 인덱스를 나타낸다.

p 번째 기지국(BS)의 b 번째 y -축 서브어레이에서 송신된 빔 추적 프리앰블 신호와, 단일 안테나 사용자 단말(UE)에서 수신된 신호 $y_p^y(n)$ 간의 상관(correlation)은 다음과 같이 정의된다.

$$R_p^{y,b} = \frac{1}{N_{sym}} \sum_{n=0}^{N_{sym}-1} y_p^y(n) (x_p^b(n))^* = h_p \zeta_p^{y,b} + \tilde{w}_p^b \quad (2)$$

where

$$\zeta_p^{y,b} \approx e^{j2\pi r_p^{0,0}/\lambda} \underbrace{\sum_{m=0}^{M_y^{sub}-1} e^{-j\frac{2\pi \tilde{\Psi}_p^y(m+B^y b)}{(M^y-1)}} e^{j\frac{\pi \tilde{\Delta}_p^y(m+B^y b)^2}{(M^y-1)}}}_{=\eta_p^{y,b}} \sum_{m=0}^{M_z^{sub}-1} e^{-j\frac{2\pi \tilde{\Psi}_p^z m}{(M^z-1)}} e^{j\frac{\pi \tilde{\Delta}_p^z m^2}{(M^z-1)}}}_{=\eta_p^z}$$

$\lfloor b/2 \rfloor$ 번째 서브어레이 세트에 포함된 서브어레이들의 상관 결과에 대한 1차 미분 곱은 다음과 같이 정의된다.

$$\Xi_p^{y,\lfloor b/2 \rfloor} = R_p^{y,2\lfloor b/2 \rfloor+1} (R_p^{y,2\lfloor b/2 \rfloor})^* \quad (3)$$

이러한 결과를 바탕으로, Ψ_p^y 와 Ω_p^y 는 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{\Psi}_p^y = -\frac{(M^y-1)}{2\pi} \left(\angle \Xi_p^{y,\lfloor b/2 \rfloor} + \angle \Xi_p^{y,-\lfloor b/2 \rfloor-1} \right) + \Psi_{p,BF}^y \quad (4)$$

$$\hat{\Omega}_p^y = \frac{M^y-1}{2\pi(\lfloor b/2 \rfloor + 0.5)M_y^{sub}} \left(\angle \Xi_p^{y,\lfloor b/2 \rfloor} - \angle \Xi_p^{y,-\lfloor b/2 \rfloor-1} \right) + \Omega_{p,BF}^y \quad (5)$$

여기서 $\Psi_{p,BF}^y$ 와 $\Omega_{p,BF}^y$ 정보는 주어진 것으로 가정한다.

(4)와 (5)를 이용하여 빔포밍 파라미터 추정을 수행하여 거리와 각도를 추정한다.

III. 모의실험

본 절에서는 제안한 프리앰블 설계를 활용한 빔포밍 파라미터 추정 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 평가한다. 시뮬레이션에서 사용된 파라미터 B , M^y , 및 M^z 는 각각 4, 257, 그리고 257로 설정하였다. 또한 M_{sub}^y 와 M_{sub}^z

는 모두 64로 설정하였다.

본 모의실험에서는 UE 이동시 빔 트래킹을 위한 빔포밍 파라미터 추정 상황을 가정한다. 단일 안테나를 갖는 사용자 단말(UE)은 $z=0$ 으로 고정된 평면 상에서 0.1m 간격으로 이동한다고 가정했다. x 좌표는 15m에서 100m까지, y 좌표는 -50m에서 50m까지 변화한다.

Fig. 2는 제안된 기법을 적용 시 근거리 장 ELUPA 빔포밍 파라미터 추정 RMSE (Root Mean Square Estimation) 결과이다. 근거리 장 ELUPA 빔포밍에서는 ELUPA와 UE의 거리(Distance), 방위각(Azimuth angle), 고도각(Elevation angle)을 이용하여 빔포밍을 수행한다. 그림에서는 비교를 위해 제안된 방식(Overlap)과 비중첩 서브어레이(Non-overlap) 구조를 사용하는 경우의 성능을 같이 보여준다. 그림에서 거리, 방위각, 고도각 모두 제안된 방식이 우수함을 볼 수 있다.

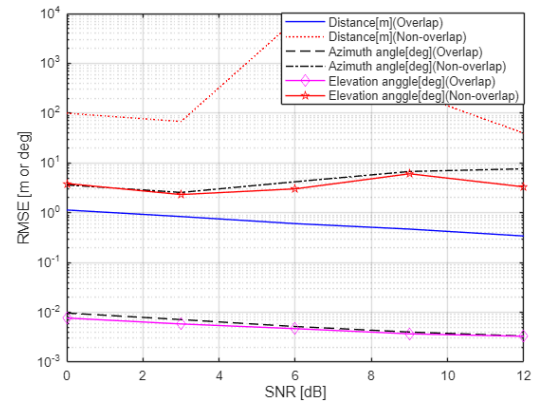


Fig. 2. 빔포밍 파라미터 추정 RMSE 결과

III. 결론

본 논문에서는 중첩 서브어레이 구조를 갖는 ELUPA 시스템을 위한 근거리장 빔포밍 파라미터 추정 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 단일 안테나 소자 변위를 갖는 중첩 서브어레이 구조를 활용하여 서브어레이 간 근거리장 위상 차를 이용하여 빔포밍 파라미터를 추정한다. 이러한 구조적 특성으로 인해 제안 기법은 비중첩 서브어레이 기반 기법보다 우수한 성능을 달성한다. 따라서, 6G 초대규모 안테나 배열 환경에서 강인한 근거리장 빔포밍 파라미터 추정을 가능하게 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-002777799).

참 고 문 헌

- [1] M. Shafi, R. K. Jha, and A. Jain, "6G: Technology Evolution in Future Wireless Networks," IEEE Access, vol. 12, pp. 57548–57573, Apr. 2024.
- [2] Y. Liu, Z. Wang, J. Xu, C. Ouyang, X. Mu, and R. Schober, "Near-Field Communications: A Tutorial Review," IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 4, pp. 1999–2049, Aug. 2023.
- [3] K. T. Selvan, and R. Janaswamy, "Fraunhofer and Fresnel Distances: Unified derivation for aperture antennas," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 59, no. 4, pp. 12–15, Aug. 2017.