

6G 대규모 IoT 네트워크를 위한 유체 안테나 시스템 기반 무선 연산 기법

김새봄, 이영석*, 정방철*

충남대학교, *아주대학교

newspring1015@o.cnu.ac.kr, *{youngseoklee; bcjung}@ajou.ac.kr

Fluid Antenna System-based Over-the-Air Computation Technique for 6G Massive IoT Networks

Saebom Kim, Young-Seok Lee*, and Bang Chul Jung*

Chungnam National University, *Ajou University

요약

본 논문에서는 차세대 대규모 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 네트워크를 위한 유체 안테나 시스템(Fluid antenna system: FAS) 기반의 무선 연산(over-the-air computation: AirComp) 기법을 제안한다. 기존 AirComp 시스템은 네트워크에서 요구하는 목적 함수를 연산함에 무선 채널의 페이딩 현상이 매우 치명적이며, 특히 채널 상태가 가장 열악한 센서에 의해 전체 연산 신뢰도가 결정되는 성능 병목 현상을 겪는다. 이러한 제약을 극복하기 위해 본 논문에서는 각 센서 단말(station: STA)이 FAS를 구비하여, 독립적으로 최적 안테나 포트를 선택한 후, 수신기에서 최저 채널 이득을 기준으로 전력 제어를 수행하는 종래의 AirComp 기법을 결합한 새로운 FAS-AirComp 프레임워크를 제시한다. 모의실험 결과, 제안된 기법은 기존의 고정형 안테나(fixed position antenna: FPA) 기반 및 수신단 FAS 기반 기법 대비 평균 제곱 오차(mean-squared error: MSE) 성능을 개선함을 보인다.

I. 서론

차세대 대규모 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 네트워크에서는 다수의 센서 장치로부터 생성되는 방대한 데이터를 효율적으로 수집하고 처리하기 위한 무선 연산 기법(over-the-air computation: AirComp)이 주목받고 있다 [1], [2]. 이는 무선 다중 접속 채널의 중첩 특성을 활용해 통신과 함수 연산을 동시에 수행함으로써, 기존 방식 대비 통신 지연과 무선 자원 소모를 구조적으로 감소시킬 수 있다 [1]. 그러나, 종래의 AirComp 기법은 다수의 센서 중 최소 채널 이득에 의해 전체 연산 성능이 결정되는 구조적 특성을 가진다. 이로 인해 채널 상태가 양호한 센서들 역시 최소 채널 조건에 맞춰 전송이 제한되며, 가용 전력을 충분히 활용하지 못하는 전력 비효율이 발생한다. 결과적으로 이러한 구조적 제약은 전체 연산 성능의 저하로 이어질 수 있다 [2].

이러한 제약을 극복할 방법의 하나로, 최근 유체 안테나 시스템(Fluid antenna system: FAS)이 채널 선택 자유도를 확장할 수 있는 구조로 주목 받고 있다 [3]. FAS는 제한된 공간 내에서 안테나 포트를 동적으로 전환함으로써, 전통적인 고정형 안테나(Fixed Position Antenna: FPA) 시스템과 비교할 때, FAS는 극히 제한된 공간 범위 내에서 채널 상태에 따라 안테나 포트를 선택함으로써 불리한 채널 조건의 영향을 효과적으로 완화할 수 있으며, 매우 좁은 간격에서도 최적의 신호 품질을 확보할 수 있는 새로운 형태의 공간 다이버시티를 제공할 수 있다. [4]에서는 수신단에 FAS를 적용하여 AirComp를 위한 빔포밍 최적화를 고려하였다. 그러나 제안된 구조는 송신 센서 단말의 최소 채널 이득에 의해 성능이 제한되는 종래 AirComp의 병목 문제를 해소하지는 못한다.

본 논문에서는 앞서 기술한 바와 같이, 송신 센서 단말의 최소 채널 이득에 의해 함수 연산 성능이 제한되는 종래 AirComp의 구조적 문제를 해결하기 위해, 송신단에 FAS를 적용한 새로운 형태의 FAS 기반 AirComp 시스템을 제안한다. 제안하는 기법에서는 각 센서가 독립적으로 최대 채널 이득을 제공하는 안테나 포트를 선택한 후, 해당 채널 이득 정보를 수신기로 피드백한다. 이후 수신기는 수집된 채널 이득 중 최소값을 모든 센서에게 광역 전파(broadcast)하며, 각 센서는 이를 기준으로 최대 전력 제

약을 만족하도록 전력 제어 계수를 설정한다. 모의실험 결과, 제안하는 FAS-AirComp 기법은 제한된 안테나 크기의 FPA 기반 AirComp 기법은 물론, 수신단 FAS를 고려한 기존 AirComp 기법과 비교하여도 평균 제곱 오차(mean-squared error: MSE) 측면에서 우수한 성능을 달성함을 확인하였다.

II. 송신 FAS 기반 AirComp 시스템 모델

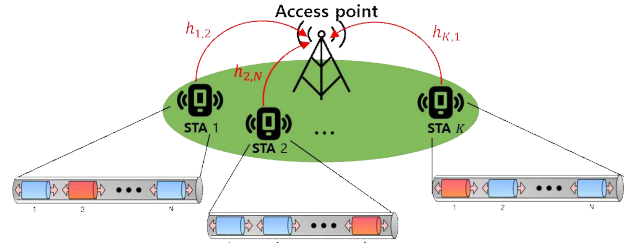


그림1. 송신 FAS 기반 AirComp 시스템 모델.

본 논문에서는 그림 1과 같이 N 포트 FAS를 갖는 K 개의 IoT 센서 단말(station: STA)과 단일 안테나를 갖는 액세스 포인트(access point: AP)로 구성된 대규모 IoT 네트워크 환경을 고려한다. 각 STA의 FA는 길이가 $W\lambda$ 인 선형 공간 내에 단일 RF 체인과 N 개의 포트가 일정한 간격으로 배치되어 있다고 가정한다. 이때, $k (\in \{1, 2, \dots, K\})$ 째 STA의 $i (\in \{1, 2, \dots, N\})$ 째 포트와 AP 사이 무선 채널은 $h_{ki} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 로 정의되며 모든 안테나 포트와 수신기 사이 무선 채널은 $\mathbf{h}_k = [h_{k,1}, h_{k,2}, \dots, h_{k,N}]^T$ 로 정의될 수 있다. 한정된 물리적 길이 내 다수의 안테나 포트가 배치된 경우, 해당 무선 채널은 포트 간 상관 특성을 갖게 된다. 이에 따라, 채널 벡터 \mathbf{h}_k 는 평균이 영 벡터이고 공분산 행렬이 \mathbf{R} 을 갖는 복소 가우시안 분포로 모델링 된다. FAS 내 안테나 포트 간 공간적 상관관계를 나타내는 \mathbf{R} 은 Jakes 모델에 기반해 다음과 같이 정의될 수 있다 [5].

$$R_{n,m} = \sigma^2 J_0\left(\frac{2\pi d_{n,m}}{\lambda}\right),$$

여기서 $J_0(\cdot)$ 은 0차 제1종 베셀 함수이며, $d_{n,m}$ 은 n 제 포트와 m 제 포트 간 물리적 거리를 의미한다.

본 논문에서는 네트워크에서 요구하는 목적 함수로 산술 평균 함수를 가정하였으며 성능 지표로 MSE를 사용한다. MSE는 목표 함수를 $f = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K s_k$ 라 하고, AP에서 AirComp를 통해 얻은 최종 추정값을 \hat{f} 라 할 때 다음과 같이 정의된다.

$$\text{MSE} = \mathbb{E}[\|\hat{f} - f\|^2].$$

III. 제안하는 송신 FAS 기반 AirComp 기법

본 논문에서는 각 STA가 FAS 내 포트를 독립적으로 선택하여 개별 채널 상태를 개선하고, 이를 바탕으로 AP가 전역적인 전력 제어를 수행하도록 전력 제어 상수를 광역 전파하는 송신 FAS 기반 AirComp 기법을 제안한다. 임의의 k 제 STA는 AP로부터 수신된 파일럿 신호를 이용하여 N 개 안테나 포트에 대한 채널 벡터 \mathbf{h}_k 를 추정한다. 이후, 각 STA는 다음과 같이 채널 이득이 최대가 되는 최적의 포트 i_k 를 선택한다.

$$i_k = \arg \max_{i \in \{1, \dots, N\}} |h_{k,i}|^2.$$

이러한 포트 선택 과정은 FPA를 사용하는 기존 방식과 달리, STA가 자신의 채널 환경을 능동적으로 선택하여 MSE 성능 저하 문제와 전력 비효율화 문제를 해결할 수 있는 자유도를 제공한다. 이후 모든 STA는 자신의 선택한 채널 이득을 AP로 피드백하고 이 중 최소 채널 이득을 다시 모든 STA들로 광역 전파한다.

AP에서 모든 STA의 신호가 동일한 크기로 정렬되어 합산되기 위해서는 채널의 위상과 크기를 보상하는 채널 반전 과정이 필요하다. k 제 STA는 자신이 선택한 채널 h_{k,i_k} 를 바탕으로 자신의 측정 데이터 s_k 를 AP로 전송한다. 이때 모든 STA의 최대 전력 제약과 AirComp의 채널 반전 요구를 동시에 만족하도록 송신 신호 x_k 는 다음과 같이 설계될 수 있다.

$$x_k = \sqrt{\eta} \frac{h_{k,i_k}^*}{|h_{k,i_k}|^2} s_k,$$

여기서 η 는 STA의 최대 전력 제약을 만족시키기 위한 전력 제약 상수이며, 각 STA의 송신 전력이 P_0 에 제한되도록 다음과 같이 설계된다 [2].

$$\eta = P_0 \min_{k \in \{1, \dots, K\}} |h_{k,i_k}|^2.$$

이후 모든 STA는 동일한 무선 자원을 사용하여 신호를 AP로 동시 전송한다. AP의 수신 안테나에서 관측되는 중첩 수신 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y = \sum_{k=1}^K h_k x_k + z = \sum_{k=1}^K \sqrt{\eta} s_k + z,$$

여기서 z 는 통계적으로 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 복소 가우시안 분포를 따르는 잡음이라 가정하였다. AP는 수신된 신호 y 에 대해 후처리 과정을 거쳐 목표로 하는 데이터의 산술평균을 추정한다:

$$\hat{f} = \frac{1}{K\sqrt{\eta}} y = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K s_k + \frac{z}{K\sqrt{\eta}}.$$

IV. 모의실험 결과 및 결론

그림 2는 STA 수에 따른 제안된 송신 FAS 기반 AirComp의 MSE 성능을 도시한 결과이다. 본 모의실험에서는 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR, P/σ_n^2)를 10 dB로 고정하였다. FAS 포트 수는 10개로

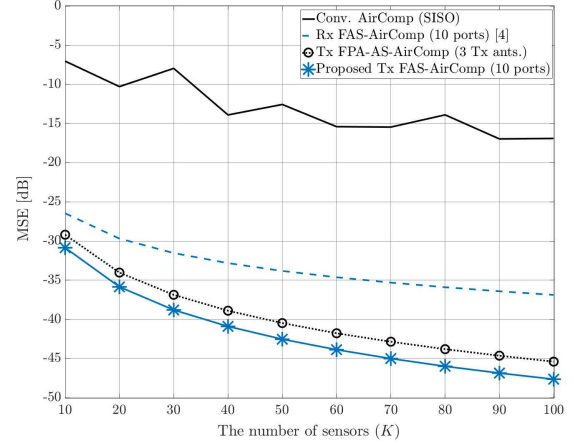


그림 2. 제안하는 송신 FAS 기반 AirComp 시스템의 MSE 성능.

고정하였으며 W 는 1로 설정하였다. 제안하는 기법은 딥페이딩에 취약한 종래의 AirComp, FPA 기반의 송신 안테나 선택 AirComp, 그리고 수신 FAS 기반 AirComp 기법과 비교하였다. FPA 기반 송신 안테나 선택 기법의 경우, 공정한 성능 비교를 위해 제안하는 FAS와 동일한 안테나 길이를 갖는 FPA를 가정하였다. 따라서, 안테나 간 채널이 서로 독립적이라고 가정하기 위해 반파장 간격으로 배치된 3개의 안테나를 고려하였다. 그림 2는 제안하는 송신 FAS 기반 AirComp 기법이 FAS를 통한 공간 다이버시티 이득을 효과적으로 활용함으로써 MSE 성능을 상당히 향상시킴을 검증한다. 특히, 송신단에서의 포트 선택은 STA 간 채널 품질의 편차를 완화하여, 최소 채널 상태에 의해 성능이 제한되는 종래 AirComp의 구조적 병목을 감소시킨다. 즉, 수신 FAS 적용 방식에 비해 송신 FAS 기반 구조가 AirComp 성능 개선에 보다 효과적임을 확인할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. RS-2025-02303435)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] W. Liu, X. Zang, Y. Li, and B. Vucetic, "Over-the-air computation systems: Optimization, analysis and scaling laws," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 8, pp. 5488 - 5501, Aug. 2020.
- [2] Y.-S. Lee, K.-H. Lee, and B. C. Jung, "Space-time coded over-the-air computation with receive diversity for 6G massive IoT networks," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 15, pp. 31 - 35, 2026.
- [3] K.-K. Wong, A. Shojaefard, K.-F. Tong, and Y. Zhang, "Fluid antenna systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 1950 - 1962, Mar. 2021.
- [4] D. Zhang, S. Ye, M. Xiao, K. Wang, M. D. Renzo, and M. Skoglund, "Fluid antenna array enhanced over-the-air computation," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 13, no. 6, pp. 1541 - 1545, Jun. 2024.
- [5] Y. R. Lee, J. Baek, J. M. Kim, and B. C. Jung, "Novel analytical framework for 6G fluid antenna systems utilizing matrix approximation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 74, no. 11, pp. 18232 - 18243, Nov. 2025.