

6G 대규모 IoT 네트워크를 위한 시공간 부호 기반 디지털 무선 연산 기법

김새봄, 이영석*, 정방철*

충남대학교, *아주대학교

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

Space-Time Coded Digital Over-the-Air Computation Technique for 6G Massive IoT Networks

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

Chungnam National University, *Ajou University.

요약

본 논문에서는 무선 대규모 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 네트워크에서 IoT 센서가 자신의 채널 상태 정보(channel state information: CSI)만으로도 최적 공간 다이버시티 이득을 달성할 수 있도록 시공간 선 부호(space-time line codes: STLC)를 적용한 디지털 무선 연산(over-the-air computation: AirComp) 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 다중 안테나를 갖는 액세스 포인트(access point: AP)가 모든 IoT 센서로부터 전역 CSI를 수집해야만 하는 종래의 AirComp 기법의 오버헤드 문제를 해결할 수 있으며, 실제적인 대규모 IoT 네트워크를 고려해 최대 전력 제약 하에서 목표 함수를 계산할 수 있도록 설계된다. 모의실험을 통해, 제안하는 기법이 기존의 아날로그 및 디지털 AirComp 기법 대비 더 낮은 정규화된 평균 제곱 오차(normalized mean squared error: NMSE) 성능을 달성함을 검증한다.

I. 서론

차세대 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 센서 네트워크에서는 방대한 센싱 데이터 트래픽을 효율적으로 처리하기 위해 낮은 지연과 오버헤드를 갖는 센싱 신호처리 기술이 필수적이다 [1]. 이에 대한 방안으로써, 무선 연산(over-the-air computation: AirComp) 기법은 무선 채널의 중첩(superposition) 특성을 활용하여 효율적으로 센서들의 데이터를 처리할 수 있는 기술로 각광받고 있다. 구체적으로, AirComp 기술은 다수의 센서가 동일한 무선 자원을 활용해 아날로그 변조 신호를 동시에 전송하고, 수신기는 중첩된 수신 신호를 활용해 네트워크에서 요구하는 목표 함수를 직접적으로 계산한다 [2]. [3]에서는 AirComp 프레임워크에서 무선 채널의 페이딩 현상을 효과적으로 보상하기 위한 균일 강제화 송수신기(uniform-forcing transceiver) 구조가 제안되었고, [4]에서는 전력 비효율성과 성능 한계를 극복하기 위해 시공간 선 부호(space-time line codes: STLC)를 적용한 아날로그 AirComp 방식이 제시되었다. 최근 [5]에서는 디지털 변조와 비트 매핑 심볼의 중첩을 이용해 잡음 취약성을 완화시킬 수 있는 디지털 AirComp 프레임워크가 제안되었다.

그러나 기존 디지털 AirComp 방식은 이상적인 채널 반전을 가정하였으며, 최대 전력 제약과 같은 실제적인 IoT 센서 네트워크를 고려하지 않았다. 따라서, 본 논문에서는, 실용적인 대규모 IoT 네트워크 환경을 고려한 STLC 기반 디지털 AirComp 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 IoT 센서의 최대 전력 제약을 가정해 저차 디지털 변조를 위한 비트 슬라이싱 기술을 도입하며, STLC를 이용한 균일 강제화 송수신기 구조를 적용해 전력 효율을 높이면서 최적 공간 다이버시티 이득을 달성하고자 한다. 특히, 제안하는 STLC 기반 디지털 AirComp 기법은 송신기만 자신의 채널 상태 정보(channel state information: CSI)를 알아도 적용 가능하므로, 액세스 포인트(access point: AP)가 모든 IoT 센서의 전역 CSI를 추정해야 하는 기존 AirComp 대비 상당한 오버헤드를 줄일 수 있다. 또한, 모의실험을 통해, 제안하는 기법이 정규화된 평균 제곱 오차(normalized mean-squared error: NMSE) 성능 관점에서 기존의 아날로그 및 디지털 AirComp 방식보다 우수한 성능을 보임을 검증한다.

II. STLC 기반 디지털 AirComp 시스템 모델

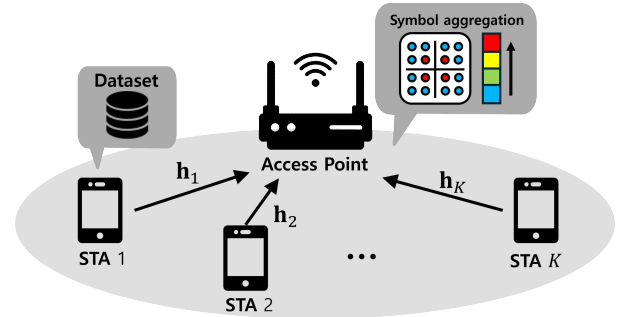


그림 1. STLC 기반 디지털 AirComp 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 다중 안테나를 갖는 AP와 단일 안테나를 갖는 K 개의 IoT 센서 단말(station: STA)이 존재하는 무선 IoT 네트워크를 고려한다. 본 논문에서는 [4]에서 제안된 다중 안테나 쌍 선택 기반의 STLC-AirComp 프레임워크를 디지털 AirComp로 확장하여, 일반성을 잃지 않고 AP 안테나가 두 개일 때 제안하는 STLC 기반 디지털 AirComp 시스템에 대해 서술한다. 또한, AP의 $j(\in \{1, 2\})$ 짝 수신 안테나와 $k(\in \{1, \dots, K\})$ 짝 STA 간의 무선 채널은 $h_{k,j}$ 로 정의되며, 본 논문에서 무선 채널 $h_{k,j}$ 는 통계적으로 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 따르는 레일리(Rayleigh) 페이딩을 가정한다. 한편, 각 STA는 AP가 광역 전파하는 파일럿 신호로부터 자신의 국부 CSI를 추정할 수 있다고 가정하며, AP는 전역 CSI가 아닌 모든 센서들 간의 최소 채널 이득만을 알 수 있다고 가정한다 [4].

먼저, 각 STA는 자신의 관측값을 양자화한 뒤 디지털 변조를 적용하고, 동일한 무선 자원 상에서 AP로 동시에 STLC 심볼을 전송한다. 이때, STA의 최대 전력 제약을 고려하여 저차 디지털 변조를 가능케 하는 비트 슬라이싱을 도입한다 [5]. 구체적으로 관측값을 나타내는 B 비트는 저차 디지털 변조를 적용할 수 있도록 다수의 비트 구성 ($\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_L]$, $\sum_{i=1}^L b_i = B$)으로 비트 슬라이싱되고 비트 구성 내 연

속된 요소는 각각 I축(in-phase) 및 Q축(quadrature)에 매핑되어 하나의 직교 진폭 변조(quadrature amplitude modulation: QAM) 심볼을 이룬다. 예를 들어 $L=2$ 이고 $b_1=2, b_2=1$ 인 경우, 2비트에 해당하는 4진 디지털 변조 신호는 I축에, 1비트에 해당하는 이진 디지털 변조 신호는 Q축에 매핑되어 각 STA는 두 축의 조합으로 8진 QAM 신호를 AP로 전송한다. 이때 사용 가능한 변조 차수는 STA의 최대 전력 제약에 의해 제한된다고 가정한다. 본 논문에서 네트워크는 모든 STA가 전송한 관측값의 합을 계산하는 것을 목표로 한다.

III. 제안하는 STLC 기반 디지털 AirComp 프레임워크

본 논문에서는 STLC 기반 디지털 AirComp 프레임워크를 제안한다. 제안하는 기법에선, 각 STA가 채널 상단 시간(coherence time) 내 두 시간 슬롯에 걸쳐 STLC로 부호화된 신호를 전송하며, 이때 STA의 최대 전력 제약과 AirComp를 위한 채널 반전이 동시에 충족되도록 다음과 같이 STLC 기반 AirComp 신호를 생성한다.

$$s_{k,1} = \sqrt{\eta} \frac{h_{k,1}^* x_{k,1} + h_{k,2}^* x_{k,2}}{|h_{k,1}|^2 + |h_{k,2}|^2}, s_{k,2} = \sqrt{\eta} \frac{h_{k,2}^* x_{k,1} - h_{k,1}^* x_{k,2}}{|h_{k,1}|^2 + |h_{k,2}|^2},$$

여기서 $x_{k,t}$ 는 k 번째 STA가 $t(\in \{1,2\})$ 번째 시간 슬롯에서 전송할 QAM 심볼을 나타내며 η 는 STA의 최대 전력 제약을 만족시키기 위한 전력 제어 상수로 정의되어 각 STA의 송신 전력이 최대 전력 P_0 를 넘지 않도록 다음과 같이 설정된다.

$$\eta = \frac{P_0}{2} \min(|h_{k,1}|^2 + |h_{k,2}|^2).$$

이후, 모든 STA는 동일 주파수 자원 상에서 두 시간 슬롯 동안 STLC 심볼을 동시 전송한다.

AP의 각 수신 안테나에서 두 시간 슬롯 동안 관측되는 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ r_{2,1} & r_{2,2} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_k [s_{k,1} \ s_{k,2}] + \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} \\ w_{2,1} & w_{2,2} \end{bmatrix},$$

여기서 $r_{j,t}$ 와 $w_{j,t}$ 는 각각 t 번째 시간 슬롯에서 AP의 j 번째 안테나에서의 수신 신호와 잡음을 나타내며, 본 논문에서 모든 잡음은 통계적으로 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정한다. 이후, AP는 수신 신호를 다음과 같이 선형 결합한다.

$$y_1 = \frac{1}{\sqrt{\eta}} (r_{1,1} + r_{2,2}^*) = \sum_{k=1}^K x_{k,1} + \frac{w_{1,1} + w_{2,2}^*}{\sqrt{\eta}},$$

$$y_2 = \frac{1}{\sqrt{\eta}} (r_{2,1}^* - r_{1,2}) = \sum_{k=1}^K x_{k,2} + \frac{w_{2,1}^* - w_{1,2}}{\sqrt{\eta}}.$$

[5]에서 제시된 비트-심볼 간 매핑으로 인해, 성상도에서 중첩된 복소수 QAM 심볼은 각 STA가 전송한 개별 비트와 무관하게 각 축에서 동일한 논리적 합을 내제한다. AP는 이 특성을 활용해 최대 사후 확률(maximum a posteriori: MAP) 검파기로 y_1 과 y_2 를 이용하여 중첩 심볼을 검파함으로써 내제된 논리적 데이터 합을 추정할 수 있다. 이후 검파된 중첩 심볼로부터 슬라이스별 비트를 복원한 뒤, 역양자화를 통해 네트워크가 요구하는 함수를 계산한다.

IV. 모의실험 결과 및 결론

그림 2는 STA 수에 따라 제안하는 STLC 기반 디지털 AirComp 기법의 NMSE 성능을 도식화한 결과이다. 본 논문에서는, 제안하는 기법의 성능 평가를 위해 균일 강제화(uniform-forcing) 구조의 안테나 선택(antenna selection: AS) 기반 아날로그 AirComp [3], AS 기반 디지털

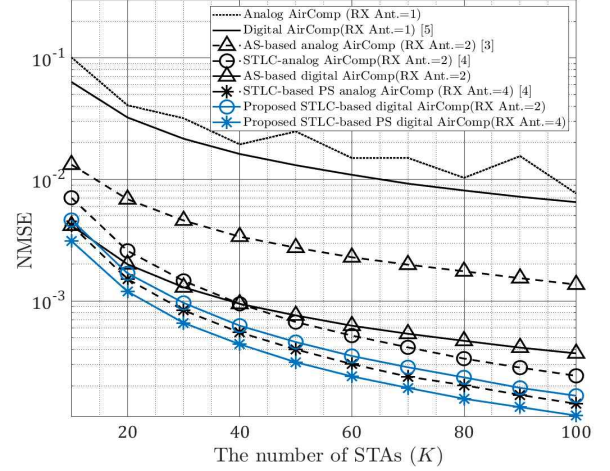


그림 2. 제안하는 STLC 기반 디지털 AirComp 시스템의 NMSE 성능.

AirComp, 및 다중 안테나 쌍 선택 기반 STLC 아날로그 AirComp [4] 기법과 동일한 환경에서 성능 비교를 수행하였다. 본 모의실험에서는 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)를 10 dB로 고정하였으며, 디지털 AirComp 방식은 양자화된 4비트 관측값에 대해 $L=4$ 를 가정하여 각각 1비트 슬라이싱을 도입하였다. 이때, 공정한 비교를 위해 아날로그 AirComp 방식은 L 번 반복 전송한다고 가정하였다. 그림 2를 통해 제안하는 기법이 종래의 아날로그 및 디지털 AirComp 대비 NMSE 관점에서 일관된 성능 향상을 보이는 것을 검증하였다. 이는 STLC에 기반한 공간 다이버시티 이득과, STA의 최대 전력 한계 및 실제 무선 채널 페이딩 특성을 반영한 채널 반전 구조의 결합 효과로 해석되며, 제안하는 STLC 기반 디지털 AirComp 프레임워크는 대규모 IoT 센서 네트워크 환경에서 효율적이고 신뢰성 있는 함수 연산을 가능하게 함을 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the Institute for Information and Communications Technology Promotion (IITP) Grant funded by the Korea Government (MSIP, Development of Cube Satellites Based on Core Technologies in Low Earth Orbit Satellite Communications) under Grant RS-202400396992 and in part by the the National Research Foundation of Korea (NRF) through the Korean Government (MSIT) under Grant No. RS-2025-02303435.

참고 문헌

- [1] A. Perez-Neira et al., "Waveforms for computing over the air: A groundbreaking approach that redefines data aggregation," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 42, no. 2, pp. 57–70, Mar. 2025.
- [2] S. -W. Jeon and B. C. Jung, "Opportunistic function computation for wireless sensor networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 6, pp. 4045–4059, Jun. 2016.
- [3] L. Chen, X. Qin, and G. Wei, "A uniform-forcing transceiver design for over-the-air function computation," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, no. 6, pp. 942–945, Dec. 2018.
- [4] 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.*, Oct. 2025. (Early access)
- [5] J. Liu, Y. Gong, and K. Huang, "Digital over-the-air computation: Achieving high reliability via bit-slicing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 24, no. 5, pp. 4101–4113, May 2025.