

주파수 공유 기반 6G IoT 네트워크를 위한 주파수 효율적인 무선 연산 기법

김새봄*, 이영석, 정방철

*충남대학교, 아주대학교

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

Spectrally-Efficient Over-the-Air Computation Technique for Spectrum-Shared 6G IoT Networks

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

*Chungnam National University, Ajou University

요약

본 논문에서는 무선 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 네트워크를 고려하여 스펙트럼 효율을 위한 인지 무선(cognitive radio: CR)에서의 무선 연산(over-the-air computation: AirComp) 기술을 제시하고, 높은 함수 연산 성능과 효율적인 주파수 할당을 위한 탐욕(greedy) 알고리즘을 제안한다. 제안하는 기법은 함수 연산 신뢰성을 확보하기 위해 평균 제곱 오차(mean squared error: MSE)를 최소화하는 방향으로 주파수를 할당하되, 주파수가 제한된 고비용 자원임을 고려하여 사용되는 주파수 수를 최소화하도록 설계되었다. 모의실험을 통해 제안하는 기법이 MSE 측면에서 최적 수준의 성능을 달성함과 동시에, 주파수 사용량 측면에서도 기존 기법 대비 우수한 성능 향상을 나타냄을 검증하였다.

1. 서론

차세대 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 네트워크에서는 다수의 IoT 센서로부터 발생하는 데이터를 실시간으로 집계 및 처리함으로써, 다양한 응용 서비스를 지원할 것으로 기대된다. 이러한 응용을 실현하기 위해서는 수많은 IoT 센서가 네트워크에 실시간으로 연결되어야 하며, 이에 따라 주파수 스펙트럼에 대한 수요도 기하급수적으로 증가하고 있다 [1]. 이러한 스펙트럼 수요 증가에 대응하기 위한 방안으로, 인지 무선(cognitive radio: CR) 네트워크가 주목받고 있다. CR 네트워크는 기본(primary) 네트워크와 보조(secondary) 네트워크가 공존하여 제한된 주파수 자원을 동적으로 활용할 수 있으며, IoT 네트워크를 보조 네트워크로 운용함으로써 무선 자원의 활용 효율을 크게 향상시킬 수 있다 [2].

한편, IoT 네트워크는 본질적으로 작업 지향적(task-oriented) 특성을 가지며, 개별적인 원시 데이터의 수집보다는 엣지 학습(edge learning) 및 함수 연산(function computation)과 같은 특정 작업을 효율적으로 수행하는 데 중점을 둔다. 이로 인해, 최근 무선 연산(over-the-air computation: AirComp) 기법은 무선 채널의 신호 중첩 특성을 활용하여 원하는 목적 함수를 효율적으로 계산할 수 있어 작업 지향형 IoT 네트워크 운용의 대표적인 사례로 주목받고 있다 [3]. 구체적으로, AirComp 기법은 센싱 데이터를 아날로그 변조하여 모든 IoT 센서가 동일한 주파수를 사용해 access point (AP)로 동시에 신호를 전송한다. 이후, AP는 수신한 중첩 신호를 이용하여 네트워크에서 요구하는 목적 함수를 연산한다 [4]. 그러나 기존 AirComp 기법은 연산 전용 주파수의 확보를 전제로 하며, 주파수 효율성이 중요한 인지 무선(CR) 네트워크와의 융합은 충분히 고려되지 않았다. 특히, 다중 주파수 환경에서의 효율적인 주파수 할당에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 IoT 센서 네트워크를 위한 주파수 효율적 CR 기반 AirComp 기술을 제시하고, 높은 함수 연산 성능과 효율적인 주파수 할당을 위한 탐욕(greedy) 알고리즘을 제안한다. 구체적으로, 제안하는 주파수 할당 알고리즘은 AirComp 시스템의 함수 연산 신뢰성을 정량적으로 나타내는 평균 제곱 오차(mean square error: MSE)를 수학적으로 유도하고, 이를 기반으로 MSE를 낮게 유지하면서도 사용되는 주파수 수를 최소화하도록 설계되었다. 모의실험을 통해 제안하는 기법이 MSE 측면에서 최적에 가까운 함수 연산 정확도를 달성함과 동시에, 주파수 사용량 측면에서도 기존 기법 대비 향상된 자원 효율성을 나타냄을 검증하였다.

II. Cognitive Radio 기반 AirComp 시스템 모델

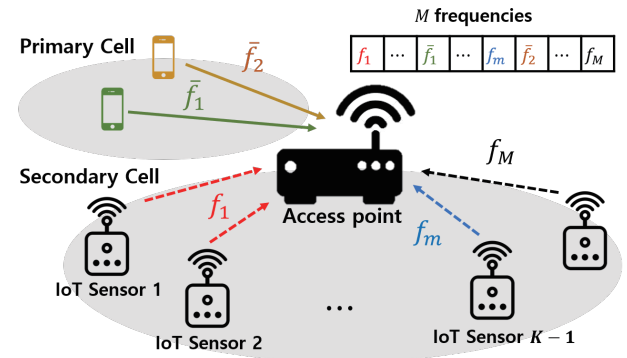


그림 1. Cognitive Radio 기반 AirComp 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 전용 주파수 자원을 할당받은 기본 셀과 동적으로 활용 가능한 주파수 자원을 사용하는 보조 셀에 단일 안테나를 갖는 K 개의 IoT 센서가 공존하는 CR 기반 IoT 네트워크를 고려한다. 두 셀은 동일한 AP와의 통신을 기반으로 하며, M 개의 주파수 자원을 보유한다고 가정한다. 이때 보조 셀은 기본 셀에서 사용하지 않은 N ($N \leq M$) 개의 주파수 자원을 이용하여 IoT 센서의 센싱 데이터를 기지국으로 동시에 전송하는 AirComp를 수행한다고 가정한다. 본 논문에서는 일반성을 잃지 않고, AirComp를 수행하는 보조 셀만을 고려하고 동적으로 변할 수 있는 주파수 자원 수를 N 개로 고정된 상태에서 제안하는 기법을 설명한다. 또한, IoT 센서는 자신의 채널을, AP는 모든 채널 정보를 알고 있다고 가정하였다.

본 논문에서는 복수의 주파수 자원을 활용할 수 있으므로 n ($n \in \{1, \dots, N\}$)째 주파수 자원 f_n 을 활용하는 IoT 센서의 집합을 F_n ($F_n \subseteq \{1, \dots, K\}, F_n \cap F_m = \emptyset \forall n \neq m$)이라 정의할 때 해당 주파수를 통해 수행된 AirComp의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_n = \sum_{k \in F_n} h_{k,n} b_{k,n} x_k + z_n,$$

여기서 x_k ($x_k \in (0,1]$)는 k ($k \in \{1, \dots, K\}$)째 IoT 센서의 센싱 데이터를 정규화하여 아날로그 변조한 신호를 나타내고, $h_{k,n}$ 은 f_n 을 사용할 때 k 째 IoT 센서와 AP 간 무선 채널을 나타낸다. 본 논문에서 모든 무선 채널은 통계적으로 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 따르는 Rayleigh 페이딩을 가정하였다. 또한 z_n 은 주파수 f_n 을 사용한 신호를 수신할 때 발생하는 부가 잡음을 나타내며,

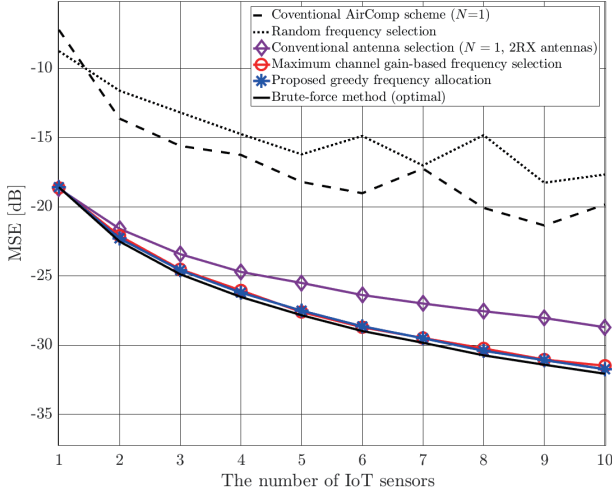


그림 2. 제한하는 주파수 효율적 AirComp 시스템의 MSE 성능.

마찬가지로 본 논문에서 모든 잡음은 통계적으로 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정하였다. $b_{k,n}$ 은 AirComp를 위한 채널 반전과 최대 전력 제한 조건을 충족하도록 설계된 가중치이며 다음과 같이 나타낼 수 있다 [5].

$$b_{k,n} = \sqrt{\eta_n} \frac{h_{k,n}^*}{|h_{k,n}|^2}, \quad \eta_n = P_0 \min_{k \in F_n} |h_{k,n}|^2,$$

여기서 P_0 는 IoT 센서의 최대 전력을 의미한다. 따라서, AP는 모든 주파수 자원을 통해 수신한 신호를 다음과 같이 결합하여 센싱 데이터의 중첩 신호를 얻을 수 있다.

$$y = \sum_{n=1}^N \frac{y_n}{\sqrt{\eta_n}} = \sum_{k=1}^K x_k + \sum_{n=1}^N \frac{z_n}{\sqrt{\eta_n}}.$$

다음과 같은 센싱 데이터의 중첩 신호에 대한 MSE를 통해 각 주파수 자원에서의 최소 채널 이득이 MSE에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

$$\text{MSE} = \mathbb{E} \left[\sum_{n=1}^N \frac{\sigma^2}{P_0 \min_{k \in F_n} |h_{k,n}|^2} \right].$$

III. 제한하는 CR 기반 AirComp 시스템용 Greedy 주파수 할당 기법

본 논문에서는 앞서 수학적으로 유도한 MSE에 기반하여 최소 채널 이득 기반의 Greedy 주파수 할당 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 AP가 IoT 센서들에 대해 순차적으로 주파수를 할당하는 방식으로 구성되며, 첫 번째 IoT 센서는 사용 가능한 주파수 자원 중 채널 이득이 가장 큰 주파수를 선택하도록 한다. 두 번째 IoT 센서에 대해선, 먼저 첫 번째 IoT 센서에게 할당된 주파수 자원에서의 채널 이득과 비교를 수행하며, 두 번째 IoT 센서의 채널 이득이 더 클 경우 해당 주파수를 할당받는다. 그렇지 않으면, 미할당된 주파수 자원 중 최대 채널 이득을 갖는 주파수를 선택하여 할당한다.

이후 k 째 IoT 센서에 대해 AP는 이미 할당된 각 주파수 자원에서의 최소 채널 이득과 해당 센서의 채널 이득을 비교한다. 이때, 특정 주파수 자원에서 해당 센서의 채널 이득이 기존 최소 채널 이득보다 큰 경우, AP는 해당 주파수 자원 중 하나를 선택하여 할당한다. 만약 이러한 자원이 존재하지 않을 경우, AP는 미할당된 주파수 자원이 있다면 그 중 채널 이득이 가장 큰 주파수를 할당하고, 그렇지 않으면 전체 주파수 자원 중 채널 이득이 가장 큰 자원을 선택한 후, 해당 자원의 최소 채널 이득을 갱신한다.

IV. 모의실험 결과 및 결론

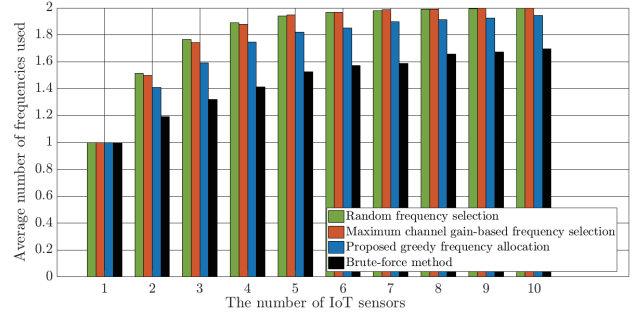


그림 3. 제한하는 주파수 효율적 AirComp 시스템의 평균 주파수사용량.

그림 2와 3은 각각 제한하는 주파수 할당 기법이 적용된 CR 기반 AirComp 시스템의 산술 평균 함수 MSE 성능과 평균 주파수 사용량을 IoT 센서 수에 따라 나타낸 결과이다. 본 모의실험은 송신 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR, P_0/σ^2)를 20dB로 고정된 조건에서, $N=2$ 에 대해 제한하는 Greedy 주파수 할당 기법을 적용한 AirComp 시스템과 최대 채널 이득 기반 주파수 선택 기법, 무작위 주파수 선택 기법 등과의 성능을 비교하였다.

제한하는 Greedy 주파수 할당 기법을 적용한 AirComp 시스템은 각 주파수 자원에서의 최소 채널 이득을 직접 고려함으로써, MSE 성능 측면에서 최적에 근접하는 우수한 결과를 보이는 것으로 확인되었다. 한편, 최대 채널 이득만을 기준으로 주파수를 선택하는 방식 역시 MSE 성능은 유사하게 양호하나, 대부분의 경우 모든 주파수 자원을 활용하게 되어 자원 효율성 측면에서는 한계가 있다. 반면, 제안하는 기법은 최소 채널 이득을 고려한 주파수 할당을 통해 전체 주파수 소요량을 효과적으로 감소시킬 수 있다. Brute-force 방식은 가능한 모든 주파수 선택 조합을 전수 탐색하여 MSE가 최소가 되는 조합을 선택함으로써, MSE 성능과 주파수 사용량 모두에서 최적의 결과를 제공하지만, 계산 복잡도가 매우 높아 실제 시스템에 적용하기에는 어려움이 따른다. 이에 반해, 제안하는 알고리즘은 IoT 센서들에 대해 순차적으로 주파수를 할당하고, 각 주파수 자원의 최소 채널 이득 정보를 지속적으로 갱신하는 구조를 가지므로, 센서 수가 증가하더라도 실시간 주파수 자원 할당이 가능하다는 장점이 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터 사업의 지원(IITP-2025-RS-2024-00436406)과 저궤도 위성통신 핵심기술 기반 큐브위성 개발 과제의 지원(RS-2024-00396992)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] E. H. Houssein, M. A. Othman, W. M. Mohamed, and M. Younan, "Internet of Things in smart cities: Comprehensive review, open issues, and challenges," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 21, pp. 34941-34952, Nov. 2024.
- [2] N. A. Khalek, D. H. Tashman, and W. Hamouda, "Advances in machine learning-driven cognitive radio for wireless networks: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 26, no. 2, pp. 1201-1237, 2nd Quart. 2024.
- [3] Z. Wang, Y. Zhao, Y. Zhou, Y. Shi, C. Jiang, and K. B. Letaief, "Over-the-air computation for 6G: Foundations, technologies, and applications," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 14, pp. 24634-24658, Jul. 2024.
- [4] S. -W. Jeon and B. C. Jung, "Adaptive analog function computation via fading multiple-access channels" *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 2, pp. 213-216, Jan. 2018.
- [5] 이영철, 이기훈, 정방철, "다중안테나 무선 센서 네트워크에서 아날로그 함수 연산을 위한 송수신 빔포밍 최적화 기술," *한국통신학회 동계종합학술 발표회*, Feb. 2020.