

IoT 센서 네트워크를 위한 시공간 선 부호기반 무선 함수 연산 기법의 성능 분석

이영석, 이기훈, 정방철, *정진곤
충남대학교 전자공학과, *중앙대학교 전자전기공학부
e-mail : yslee@o.cnu.ac.kr, kihun.h.lee@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr, jgjoung@cau.ac.kr

Performance Analysis of Space-Time Line Coded Over-the-Air Function Computation Technique for IoT Sensor Networks

Young-Seok Lee, Ki-Hun Lee, Bang Chul Jung, and *Jingon Joung

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University
*School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University

Abstract

In this paper, we investigate the over-the-air function computation (AirComp) with space-time line codes (STLC) for wireless internet of things (IoT) sensor networks, which computes an objective function by exploiting the superposition property of wireless multiple access channel (MAC). In particular, we mathematically analyze the mean squared error (MSE) performance of the proposed STLC AirComp technique according to the number of IoT sensors. The mathematical analysis is matched well with the computer simulation result.

I. 서론

제4차 산업혁명(Industrial 4.0)의 핵심 기술 중 하나로 거론되는 사물 인터넷(Internet-of-things: IoT)은 공장 자동화(factory automation)로 대표되는 산업 IoT(Industrial IoT: IIoT) 및 자율주행 등 여러 분야에서 응용할 것으로 예상된다. 특히, 자동화를 위한 기반으로써 수많은 센서의 활용이 예상되며, 이에 따라 거대 IoT 네트워크에서 센서의 측정 데이터를 보다 효율적으로 처리할 수 있는 기술이 활발히 연구되고 있다.

무선 함수 연산(over-the-air function computation: AirComp) 기술은 이러한 거대 센서 네트워크에서 효율적으로 센서의 측정 데이터를 처리할 수 있는 기술 중 하나이다. 이는 무선 채널의 중첩 특성을 통해 수신단에서 각 송신기의 개별 신호 검파 없이 통신과 동시에 연산을 수행하는 기술이며, 기존 검파-후-연산 방법에서 야기되는 무선 자원 부족 및 통신 지연 문제를 완화할 수 있다 [1]. 구체적으로, 각 센서는 측정한 데이터를 진폭 변조한 후, 동일한 시간과 주파수(sub-carrier) 자원을 사용하여 퓨전센터로 전송한다. 이후 퓨전센터는 중첩되어 수신한 여러 신호로부터 네트워크에서 요구하는 목적 함수를 각 센서와 사전에 정의한 전/후처리 과정을 통해 다양한 함수를 연산한다.

최근 AirComp 시스템의 성능 향상을 위해 주로 송수신 빔포밍 최적화에 기반한 기술들이 제안되고 있다 [2, 3]. 이러한 빔포밍 최적화 기반 기술들은 거대 센서 네트워크에서 최적화 파라미터 수가 증가함에 따라 높은 복잡도가 요구되며, 이는 큰 지연을 야기할 수 있다. 한편, [4]에서는 시공간 선 부호(space-time line code: STLC)를 AirComp에 적용한 시스템을 제안하고 평균 제곱 오차(mean squared error: MSE) 성능을 모의실험을 통해 검증하였다. 특히, STLC 기반의 AirComp (STLC AirComp) 시스템이 종래 최적화 기반 기술 대비 매우 낮은 복잡도를 가지면서 비교적 우수한 MSE 성능을 보이는 것을 실험적으로 확인하였다.

본 논문에서는 STLC AirComp 시스템 연구의 기반으로써 MSE 성능을 수학적으로 분석한다. 또한, 모의실험을 통해 분석 결과가 수치적 결과와 일치함을 검증한다.

II. STLC AirComp

본 논문에서는 각각 단일 안테나를 갖는 K 개 센서가 두 수신 안테나를 갖는 퓨전센터로 측정 데이터를 전송하는 상향링크 센서 네트워크를 고려한다. 각 센서는 퓨전센터에서 광역 전파(broadcast)한 파일럿 신호로부터 자신과 퓨전센터 각 안테나 사이 무선 채널 정보를 획득하며, 퓨전센터는 자신과 각 센서 사이 최소 채널 이득 합을 알고 있다고 가정한다.

각 센서는 측정 데이터를 진폭 변조하고, 목적 함수에 따라 정의되는 전처리 함수($\phi_k(\cdot)$)를 적용한다 [2]. 이후 자신의 무선 채널 정보를 사용하여 다음과 같이 두 STLC 신호 $s_{k,t}$ ($k \in \{1, 2, \dots, K\}$, $t \in \{1, 2\}$)로 부호화한다:

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

여기서 $x_{k,t} (\in (0:P_0])$ 는 k 째 센서가 t 째 시간 슬롯에 측정된 데이터를 진폭 변조한 신호를 나타내며, $h_{k,m}$ 는 k 째 센서와 퓨전센터의 $m (\in \{1,2\})$ 째 수신 안테나 사이 무선 채널을 나타낸다. 본 논문에서 모든 무선 채널은 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정한다. 또한, 각 센서의 최대 송신 전력을 P_0 이하로 제한하는 전력 제어 상수 η 는 다음과 같이 유도된다:

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

이후, 모든 센서는 두 시간 슬롯에 걸쳐 동시에 같은 반송파를 통해 퓨전센터로 STLC 신호를 송신한다. 이때, 퓨전센터의 m 째 안테나로 시간 슬롯 t 에 수신되는 신호 $r_{m,t}$ 는 다음과 같은 행렬로 표현할 수 있다:

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

여기서, $w_{m,t}$ 는 신호 송수신 과정에서 발생하는 열잡음을 의미하며, 본 논문에서 모든 잡음은 정규잡음으로 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 분포를 따른다고 가정한다.

퓨전센터는 네 수신신호($r_{m,t}$)로부터 다음과 같은 선형결합 신호 y_1 과 y_2 를 생성한다:

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

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

끝으로 퓨전센터는 목적 함수에 따라 정의한 후처리 함수 $\psi(\cdot)$ 를 적용함으로써 t 째 시간 슬롯에 결과인 연산 $\hat{f}_t = \psi(y_t)$ 값을 계산한다.

III. STLC AirComp의 성능 분석

본 논문에서는 네트워크에서 요구하는 목적 함수로 산술평균 함수를 고려하였으며, 이때, f_t , ϕ_k , ψ 는 다음과 같이 정의한다 [2]:

$$f_t = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_{k,t}, \quad \phi_k = x_k, \quad \psi = \frac{(\cdot)}{K}.$$

또한, 산술평균 함수 연산에 대한 f_t 와 $\hat{f}_t = y_t/K$ 의 MSE는 다음과 같이 유도된다:

$$\begin{aligned} \text{MSE} &= \mathbb{E}(|f_t - \hat{f}_t|^2) = \frac{2N_0}{K^2 P_0 \min_k (|h_{k,1}|^2 + |h_{k,2}|^2)}, \\ &= \frac{2}{K^2 \text{SNR} \min_k (|h_{k,1}|^2 + |h_{k,2}|^2)}. \end{aligned}$$

이로부터 수학적 분석을 통해 도출한 STLC AirComp 시스템의 평균 MSE 성능은 다음과 같다:

$$\text{MSE} = \frac{2K e^K}{K^{K+2} \text{SNR}} \Gamma(K, K),$$

여기서, 불완전 감마 함수 $\Gamma(s, t)$ 는 다음과 같다:

$$\Gamma(s, x) = \int_x^\infty t^{s-1} e^{-t} dt.$$

IV. 시뮬레이션 결과 분석 및 결론

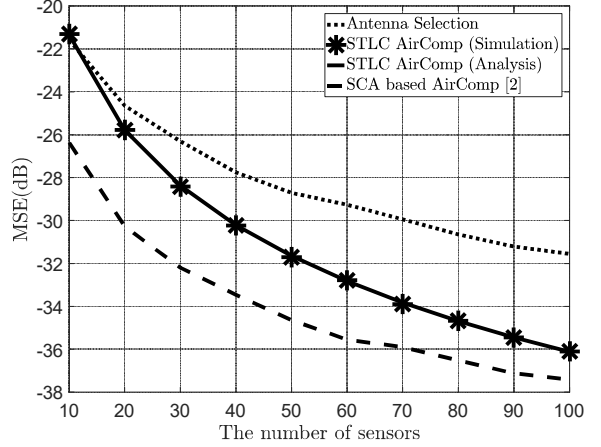


그림 1. STLC AirComp의 산술평균 함수 연산 모의실험 및 성능 분석 결과.

그림 1은 단일 안테나를 갖는 다수의 센서와 두 개의 안테나를 갖는 퓨전센터가 존재하는 센서 네트워크에서 산술평균을 목적 함수로 고려한 AirComp 시스템의 센서 수 대비 MSE 성능의 모의실험 결과이다. STLC AirComp는 매우 낮은 복잡도를 가지면서 센서 수가 증가할수록 종래 송수신 빔포밍 최적화에 기반한 연속 볼록 근사(successive convex approximation: SCA) AirComp와 유사한 성능을 보이는 것을 확인했다. 또한, 본 논문에서 제안한 STLC AirComp의 수학적 분석 결과가 모의실험 결과와 정확히 일치하는 것을 검증했으며, 이는 차후 STLC AirComp 시스템 성능 개선 연구에 기반으로써 활용할 수 있음을 시사한다.

Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2019R1A2B5B01070697 & 2019R1A2C1084168).

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Y. -S. Lee, K. -H. Lee, and B. C. Jung, "Beamforming techniques for over-the-air computation in MIMO IoT networks," *MDPI Sensors*, vol. 20, no. 22, pp. 6464, Nov. 2020.
- [4] 이영석, 이기훈, 정방철, 정진곤, "시공간 선 부호를 활용한 아날로그 함수 연산 시스템의 성능 향상," *한국통신학회 하계종합학술발표회*, pp. 971-972, Jun. 2019.