

SIMO 무선 연산을 위한 Coherent 기법과 Non-Coherent 기법 간 성능 비교

황지준, 이예진, 정해준
경희대학교 전자정보융합공학과

jijun170@khu.ac.kr, vexia@khu.ac.kr, haejoonjung@khu.ac.kr

Performance Comparison between Coherent and Non-Coherent Approaches for SIMO Over-the-Air Computation

Jijun Hwang, Yejin Lee, Haejoon Jung

Department of Electronics and Information Convergence Engineering,
Kyung Hee University

요약

대형 데이터 시스템에서 효과적인 데이터 수집을 위한 방법으로 OAC (Over-the-Air Computation) 기법이 제시되고 있다. 무선 다중 접속 채널의 중첩 속성을 활용한 것으로, 센서의 전처리, 수신기의 후처리를 통해 연산을 진행한다. 일반적으로 Coherent OAC와 Non-Coherent OAC로 분류되는데, 본 논문에서는 동일한 전처리 및 후처리를 적용하여 두 기법 간의 성능을 비교한다. 또한 통신 시스템에서 발생가능한 위상 오차를 적용하여 위상 오차의 영향도 함께 확인한다.

I. 서론

최근 IoT 기기들이 대량 보급되면서 시스템이 수집해야 할 정보가 기하급수적으로 증가하였고, 이에 따라 수집에 필요한 무선 자원도 증가하게 되었다. 무선 다중 접속 채널의 중첩 속성을 활용하는 OAC (Over-the-Air Computation)은 다수의 기기에서 데이터를 빠르고 효율적으로 수집할 수 있는 기법으로 이에 대한 해결책으로 제시되고 있다. 그러나 다수의 디바이스 간 전송 시간 타이밍에 오차가 있을 경우, 공중에서 결합된 정보가 크게 왜곡될 수 있기 때문에 OAC에 있어서 시간 동기화는 매우 중요한 문제가 된다. 일반적으로 Coherent OAC와 Non-Coherent OAC로 분류되는데, 이는 제어 신호를 통한 기기 별 위상 동기화 여부에 따라 구분된다. 기법별로 장단점이 뚜렷하기 때문에 두 접근 방식 중 하나를 선택하는 것은 시스템 별 요구사항에 따라 다르다. 하지만 기존 연구들에서는 두 기법 별로 측정된 계산 정확도를 비교하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 양자화 오류, IQ 불균형 등 위상 오차를 야기할 수 있는 변수들을 포함하여 SIMO (Single-Input Multiple-Output) 환경에서 산술 평균과 기하 평균에 대한 두 OAC 기법을 비교한다.

II. 본론

1) 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 네트워크 환경을 고려한다. K 개의 센서 노드가 R 의 반지름을 가지는 원 내에 균일하게 분포하며, FC (Fusion Center)가 H 의 고도에서 데이터를 수집하고 있다고 가정한다. 센서 노드는 제한된 하드웨어 사양으로 인하여 단일 안테나를 사용하며, 데이터를 수집하는 FC는 N_r 개의 다중 안테나를 사용한다. FC가 상공에 위치하므로, FC와 노드 사이는 LoS (Line-of-Sight) 채널이라고 가정할 수 있다. 또한 각 센서가 수집한 데이터는 $\Delta = d_{max} - d_{min}$ 의 간격을 가진 실수 범위 $[m_{min}, m_{max}]$ 에서 균일하게 분포하며 i.i.d (independently and identically distributed)하다고 가정한다.

2) Coherent OAC (Arithmetic Mean)

Coherent OAC에서 각 기기는 비콘 신호 등을 활용하여 채널을 예측하고, 이를 활용하여 선처리 상수 w_k 를 계산한다.

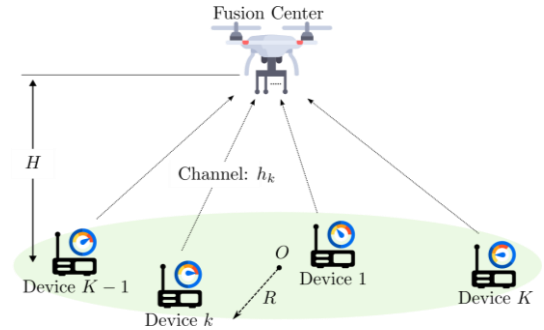


그림 1. 네트워크 환경

이를 통해 FC가 수신하게 되는 신호 \mathbf{Y} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{Y} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k w_k s_k + \mathbf{N} \quad (1)$$

$s_k = \psi(d_k)$ 는 정규화 함수 $\psi(d) = \frac{2d}{\Delta} - \frac{d_{max} - d_{min}}{\Delta}$ 에 의해 $-1 \leq s_k \leq 1$ 를 만족하는 정규화 데이터이다. 또한 $\mathbf{N} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 잡음벡터, $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 는 채널 벡터를 나타낸다. 그리고 FC는 수신된 \mathbf{Y} 를 다음과 같이 후처리 벡터 \mathbf{y} 를 이용하여 예측하려는 함수 \hat{f} 를 계산하면 다음과 같다.

$$\hat{f} = \frac{\mathbf{y}^H \mathbf{Y}}{K} + \frac{d_{max} + d_{min}}{2} \quad (2)$$

3) Non-Coherent OAC (Arithmetic Mean)

Non-Coherent OAC의 경우, 무작위 위상 dithering로만 타이밍 동기화를 진행한다. 측정된 데이터에 대해서 센서 노드는 L 번 반복 전송함으로써 각 기기들이 전송하는 프레임이 충분히 겹치는 한, FC는 측정된 데이터를 복구할 수 있다. 예를 들어 Non-Coherent OAC에서는 채널 위상을 예측하지 않고 위상 dithering만 진행하므로, 전송 시퀀스 별로 k 번째 기기는 $[e^{j\beta_k(1)}, e^{j\beta_k(2)}, \dots, e^{j\beta_k(L)}]^T$ 만큼 위상에 대해 전처리를 진행한다. 또한, $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ 번째 시퀀스에서 $\beta_k(l)$ 는 k 와 l 에 대하여 i.i.d 하며 $[0, 2\pi]$ 에서 균일하게 분포한다. 따라서 시퀀스마다 수신하게 되는 $\mathbf{Y}[l]$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{Y}[l] = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k w_k[l] s_k + \mathbf{N}[l] \quad (3)$$

h_k 는 시불변하다고 가정하며, $w_k[l]$ 과 $\mathbf{N}[l]$ 는 l 번째 시퀀스에서 수행된 전처리와 더해진 잡음 벡터이다. 그러나 Coherent OAC와 다르게, 전처리된 데이터는 반드시 양수여야 한다. 위상을 보상하는 과정이 없기 때문에 해당 데이터가 양수인지 음수인지 구분할 수 없기 때문이다. 따라서 Non-Coherent OAC에서는 정규화된 데이터의 범위가 $0 \leq s_k \leq 1$ 가 된다. 또한 정규화 함수는 다음과 같다.

$$s_k = \psi(d_k) = \sqrt{\frac{d_k - d_{min}}{\Delta} - \frac{d_{min}}{\Delta}} \quad (4)$$

마찬가지로 FC에서 후처리하게 되면 다음과 같다.

$$\hat{f} = \frac{\mathbf{y}^H}{K} \sum_{l=1}^L |\mathbf{Y}[l]|^2 + d_{min} - \frac{\Delta \sigma^2}{PK\alpha_1^2} \quad (5)$$

α^2 는 벡터 \mathbf{a} 에 대한 요소별 제곱을 나타내고, P 는 센서 노드가 전송할 수 있는 최대 전송 에너지이다. 그리고 $\alpha_1 = \min(|\mathbf{H}_k|)$ 이다.

4) Geometric Mean

본 항목에서는 이전 항목과 유사하게 기하 평균에서의 시스템을 설명한다. 기하 평균에서 OAC는 전처리 함수로 $\tau(v) = \log_x(v)$ 를 사용하며, v 는 $[v_{min}, v_{max}]$ 에 균일하게 분포한다. 그리고 Coherent에서 정규화 함수와 후처리된 신호는 다음과 같다.

$$\psi_g(v) = \frac{2(\log_x v - \log_x v_{min})}{\Delta_g} - 1 \quad (6)$$

$$\hat{f}_g = x^{\frac{\mathbf{y}^H \mathbf{y} + \log_x(g_{max})}{K}} \quad (7)$$

$\Delta_g = \log_x(g_{max}) - \log_x(g_{min})$ 이며, $x > 1$ 을 만족한다. 마찬가지로 Non-Coherent OAC에서 정규화 함수와 후처리된 신호는 다음과 같다.

$$\psi_g(v) = \sqrt{\frac{(\log_x v - \log_x v_{min})}{\Delta_g}} \quad (8)$$

$$\hat{f}_g = x^{\frac{\mathbf{y}^H \sum_{l=1}^L |\mathbf{Y}[l]|^2 + \log_x(g_{min}) - \frac{\Delta \sigma^2}{PK\alpha_1^2}}{K}} \quad (9)$$

5) MATLAB 모의 실험

본 항목에서는 Matlab을 통해 구성된 실험 환경에서 안테나 개수에 따른 Coherent OAC와 Non-Coherent OAC 간의 성능을 비교한다. 실험 환경에서 $K = 50, R = 100, H = 200$ 로 가정하였으며 반송 주파수는 5GHz 이다. 위상 오차를 발생하는 요소로 PLL (Phase-Locked Loop) [1], 양자화 [2] 그리고 IQI (In-phase and Quadrature phase Imbalance) [3]를 가정하였다. 각 요소들은 시스템 블록에서 독립적으로 발생한다고 가정하였으며 PLL은 Tikhonov 분포, 양자화는 균일 분포, 그리고 IQI는 Gaussian 분포를 따라 위상 오차가 발생한다고 가정하였다. 그리고 양자화를 제외한 각 오차들은 모두 합산된 형태로 측정되도록 구성하였다. 양자화 정도는 $B_q = 2$ 로 설정하였다. 산술평균의 경우, 데이터가 $[-1, 1]$ 에 분포하며 기하평균의 경우 데이터가 $[1, 4]$ 에 분포하며 $x = 2$ 이다. 또한 각 전처리 및 후처리 기법은 [4, 5]를 참고하였다. 마지막으로 기법별 정확도는 MSE (Mean Squared Error)로 측정하였다.

그림 2는 안테나 개수에 따른 기법별 성능 차이 및 위상 오차에 의한 영향을 확인할 수 있다. 모든 경우에 대해서, 안테나 수가 증가함에 따라 MSE가 감소하는 것을 확인할 수 있으며 이는 산술평균과 기하평균에 모두 동일하였다.

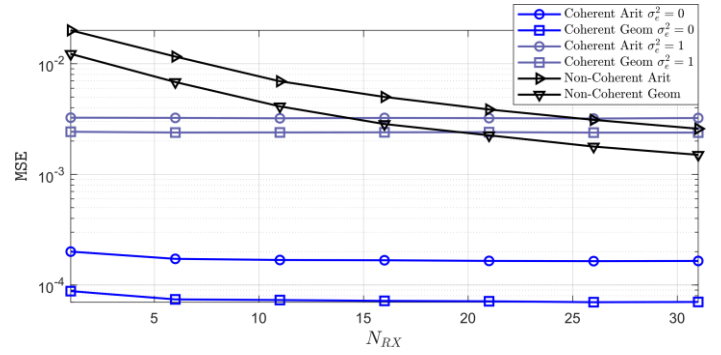


그림 2. 안테나 수에 따른 MSE

또한 Non-Coherent 방식의 경우 위상을 보상하지 않고 dithering만 진행하게 되므로 위상 오차에 대한 영향을 받지 않는 반면, Coherent 방식의 경우 PLL, IQI, 양자화 등 다양한 요소들로부터 발생한 위상 오차로 인하여 MSE가 급격하게 상승함을 확인할 수 있다. 이 역시 산술평균과 기하평균에서도 동일하게 나타남을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 SIMO 환경에서 무선 연산을 위한 Coherent 방식과 Non-Coherent 방식 간의 성능을 비교하였다. 특히, 두 방식의 전처리 및 후처리 방식을 모두 동일하게 적용함으로써 공정하게 두 기법을 비교하였으며 통신 환경에서 유발 가능한 위상 오차들을 고려하여 실험 결과를 제시하였다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the MSIT, Korea, in part under the National Research Foundation of Korea grants (RS-2023-00303757, NRF-2022R1F1A1065367 and NRF-2022R1A4A3033401) and in part under the Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grants (RS-2024-00397480, IITP-2024-2021-0-02046, IITP-2023-RS-2023-00266615).

참고 문헌

- [1] Beaulieu, Norman C., Mostafa Naseri, and Julian Cheng. "Novel theoretical performance comparisons of open-loop and closed-loop timing recovery in Rayleigh fading channels with and without a receiver outage condition." *IEEE Wireless Communications Letters* 8.5 (2019): 1448-1451.
- [2] Dabbagh, Amir D., and David J. Love. "Multiple antenna MMSE based downlink precoding with quantized feedback or channel mismatch." *IEEE Transactions on communications* 56.11 (2008): 1859-1868.
- [3] Xiong, Youzhi, et al. "Channel estimation and IQ imbalance compensation for uplink massive MIMO systems with low-resolution ADCs." *IEEE Access* 5 (2017): 6372-6388.
- [4] Chen, Yilong, Guangxu Zhu, and Jie Xu. "Over-the-air computation with imperfect channel state information." *2022 IEEE 23rd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communication (SPAWC)*. IEEE, 2022.
- [5] Goldenbaum, Mario, and Sławomir Stanczak. "On the channel estimation effort for analog computation over wireless multiple-access channels." *IEEE Wireless Communications Letters* 3.3 (2014): 261-264.