

수신 안테나 선택을 통한 시공간 선 부호기반 아날로그 함수 연산 시스템의 성능 향상

이영석, 이기훈, 정방철, 정진곤*

충남대학교, *중앙대학교

yslee@o.cnu.ac.kr, kihun.h.lee@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr, *jgjong@cau.ac.kr

Performance Improvement of Space-Time Line Coded Analog Function Computation Systems Through Receive Antenna Selection

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

Chungnam National University, *Chung-Ang University

요약

본 논문은 Fusion Center (FC)에 다중 안테나를 구비한 상향링크 센서 네트워크에서 시공간 선 부호 (Space-Time Line Codes: STLC) 기반 아날로그 함수 연산 (Analog Function Computation: AFC) 시스템의 성능 향상을 위하여 수신단 안테나 선택 (Antenna Selection: AS) 기법을 제안하고, 모의실험을 통해 함수 연산 시스템의 평균 제곱 오차 성능 (Mean Squared Error: MSE)을 확인한다. 제안한 기법이 기존 기법들에 비하여 월등히 향상된 MSE 성능을 갖는다는 것을 확인하였고, 특히 본 기법을 통하여 FC에 다중 안테나를 갖는 통신 환경에서 STLC를 활용할 수 있음을 보였다.

I. 서론

함수 연산 (Function Computation: FC) 기법은 다수의 센서가 존재하는 센서 네트워크에서 채널의 중첩특성을 활용하여, 신호 송수신과 특정 함수 연산을 수행하는 기법이다. 즉, 여러 센서들은 측정된 데이터를 네트워크의 목적함수에 따라 전처리 함수를 적용한 후 동일한 부주파수를 통해 동시에 퓨전센터로 전송하고, 퓨전센터는 수신한 중첩 신호에 후처리 함수를 적용하여 목적함수 연산을 수행한다 [1]. 기존 센서 네트워크에서는 해당 네트워크에서 요구하는 목적함수 연산을 위해 퓨전센터가 각 센서의 측정 데이터를 독립적으로 검출한 후 연산을 수행한다. 이때, 각 센서의 데이터를 검출하기 위해서는 직교하는 부주파수 혹은 시간 슬롯을 통해 송수신해야 하므로, 센서의 수가 급증하는 경우 무선자원 부족 문제를 야기한다. 함수 연산 기법은 각 센서와 퓨전센터가 같은 무선자원을 사용하여 통신함으로써, 이러한 거대 센서 네트워크의 무선자원 부족 문제를 해결할 수 있다 [1-2].

한편, 아날로그 함수 연산 (Analog Function Computation: AFC) 이란 함수 연산의 신호 송수신 과정에 있어, 각 센서가 측정된 데이터를 신호의 송신 전력에 맵핑하여 퓨전센터로 전송하는 기법이다 [3]. 최근 [4]에서 기존 AFC의 채널 피드백에 따른 오버헤드 문제, 채널 보상 과정의 전력 효율 문제, MISO (Multiple-Input Single Output) 시스템에만 적용 가능하다는 문제들을 인지하여, 시공간 선 부호 (Space-Time Line Code: STLC) 기반의 AFC 기법을 제안하고 평균 제곱 오차 (Mean Squared Error: MSE) 성능을 확인하였다. 하지만 두 개의 수신 안테나를 고려하는 STLC 특성에 따라 퓨전센터의 안테나 수를 고정적으로 사용해야 한다는 한계가 있다.

본 논문에서는 [4]에서 고려한 센서 네트워크에서 퓨전센터의 안테나 수를 확장한 안테나 쌍 선택기반 STLC AFC를 제안한다. 먼저 퓨전센터의 수신 안테나를 두 개씩 한 쌍으로 사전 정의한다. 이후 각 센서와 퓨전센터 안테나 쌍 사이의 무선 채널 이득을 고려하여 한 쌍의 안테나를 선택하고 STLC AFC를 수행한다. 성능 평가 기준으로는 송신단의 목적함수 연산 결과와 퓨전센터에서 추정된 연산 결과의 MSE를 사용하며, 모의실험을 통해 기존 STLC AFC와 비교한다.

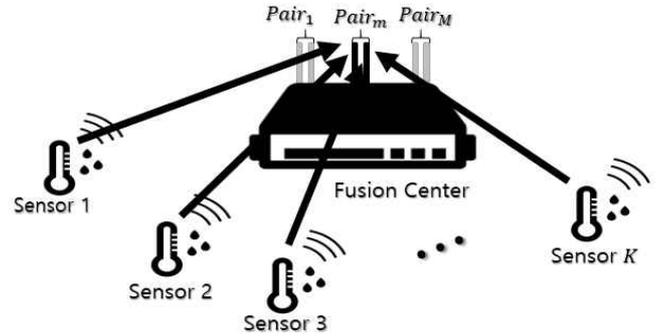


그림 1. AS-STLC AFC 시스템 모델.

II. 안테나 선택기반 시공간 선 부호를 활용한 아날로그 함수 연산

본 논문에서는 그림 1과 같이 각각 단일 안테나를 갖는 K 개 센서와 $2M$ ($M \in \mathbb{N}$) 개 수신 안테나를 갖는 퓨전센터로 측정 데이터를 전송하는 센서 네트워크에서 안테나 쌍 선택기반 STLC AFC를 고려한다. 이때, 각 센서는 퓨전센터에서 광역 전파한 파일럿 신호를 통해 자신과 퓨전센터 사이의 채널 정보를 알고 있으며, 퓨전센터는 블라인드 복호화 기법을 통해 k 짝 센서와 m 짝 안테나 사이의 무선 채널 이득인 $\gamma_{k,m} = |h_{k,2m-1}|^2 + |h_{k,2m}|^2$ 만을 알고 있다고 가정한다 [5].

신호 송수신에 앞서 퓨전센터는 무선 채널 이득에 따라 아래와 같이 사용할 수신 안테나 쌍을 선택한다. 이때, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 짝 수신 안테나 쌍은 $(2m-1, 2m)$ 과 같이 순차적으로 정의한다. $h_{k,j}$ 은 k ($\in \{1, 2, \dots, K\}$) 짝 센서와 퓨전센터의 j ($\in \{1, 2, \dots, 2M\}$) 짝 수신 안테나 사이 무선 채널을 나타내며 본 논문에서 모든 무선 채널은 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정한다.

$$a = \arg \max_m (\min_k (\gamma_{k,m})),$$

여기서 a 는 선택된 안테나 쌍의 인덱스를 나타낸다. 즉, 퓨전센터는 각 센서와 수신 안테나 쌍 사이 무선 채널 이득의 합 중 최솟값이 최대가 되는 안테나 쌍을 선택하고 이 정보를 센서에 전송한다.

한편, 네트워크의 목적함수를 f 로 정의하면 이에 상응하는 전처리 및 후처리 함수를 ϕ_k 와 ψ 를 정의할 수 있다 [2]. 본 논문에서는 목적함수로 산술평균 연산을 고려하며, 이때 f , ϕ_k , ψ 는 다음과 같다:

$$f = \sum_{k=1}^K x_k, \quad \phi_k = x_k, \quad \psi = \frac{1}{K}.$$

각 센서는 측정 데이터를 송신 전력 제한에 맞춰 맵핑하고, 해당 네트워크의 목적함수에 상응하는 전처리 함수 결과와 수신한 안테나 인덱스 a 에 따라 자신과 두 안테나 사이의 채널 정보를 사용하여 다음과 같이 STLC 신호를 형성한다.

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

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

여기서 $x_{k,t}$ 와 $s_{k,t}$ 는 각각 k 제 센서가 $t (\in \{1,2\})$ 제 시간 슬롯에 측정된 데이터의 산술평균 전처리 함수 적용 결과와 t 제 시간 슬롯에 전송하는 STLC 신호를 나타내며, η 는 각 센서의 송신 전력을 최대 전력 P_0 이하로 제한하기 위한 계수로 다음과 같이 유도된다:

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

각 센서는 STLC 신호를 상관 시간(Coherence time) 이내의 두 시간 슬롯에 걸쳐 동일한 부주파수를 통해 동시에 퓨전센터로 전송하고, 퓨전센터의 각 안테나로 수신된 신호는 다음과 같다:

$$[r_{j,1} \ r_{j,2}] = \sum_{k=1}^K h_{k,j} [s_{k,1} \ s_{k,2}] + [n_{j,1} \ n_{j,2}], \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, 2M\},$$

여기서 $r_{j,t}$ 는 퓨전센터의 j 제 안테나로 t 제 시간 슬롯에 수신된 신호를 의미하며, $n_{j,t}$ 는 이때 발생하는 잡음을 나타낸다. 본 논문에서 모든 잡음은 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 의 분포를 따른다고 가정한다.

수신된 신호로부터 퓨전센터는 초기에 선택한 안테나 쌍 인덱스 a 를 사용하여 네 수신 신호 $\{r_{2a-1,1}, r_{2a-1,2}, r_{2a,1}, r_{2a,2}\}$ 를 선택하고, 다음과 같이 송신 전력 제한 계수 η 을 고려하여 선형결합 신호 y_1, y_2 을 생성한다.

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

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

한편, 본 논문에서 네트워크의 목적함수로 고려한 산술평균 연산을 수행하면 t 번째 시간 슬롯의 결과연산 f_t 와 퓨전센터에서 수신된 신호로부터 추정된 결과연산 \hat{f}_t 는 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$f_1 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_{k,1}, \quad \hat{f}_1 = \frac{1}{K} y_1 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_{k,1} + \frac{n_{2a-1,1} + n_{2a,2}^*}{K\sqrt{\eta}},$$

$$f_2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_{k,2}, \quad \hat{f}_2 = \frac{1}{K} y_2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_{k,2} + \frac{n_{2a,1} - n_{2a-1,2}^*}{K\sqrt{\eta}}.$$

결론적으로 f_t 와 \hat{f}_t 의 MSE는 다음과 같이 유도된다:

$$\text{MSE} = \mathbb{E}(|f_t - \hat{f}_t|^2) = \frac{2N_0}{K^2 \min_k \frac{1}{2} (|h_{2a-1}|^2 + |h_{2a}|^2)},$$

$$= \frac{4N_0}{K^2 \min_k (|h_{2a-1}|^2 + |h_{2a}|^2)}.$$

III. 모의실험 결과 및 결론

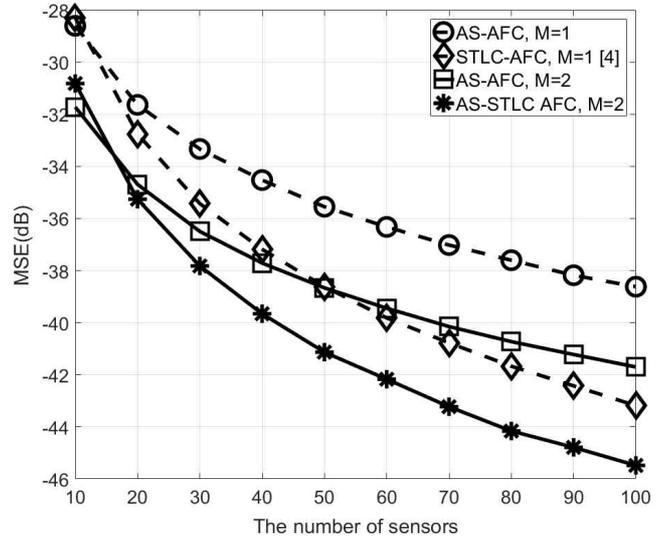


그림 2. AS-STLC AFC, MSE 성능 모의실험 결과.

그림 2는 2M개의 수신 안테나를 가진 퓨전센터를 고려하고 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR)가 20dB일 때, 안테나 선택기만 STLC-AFC (AS-STLC AFC)의 센서 수 대비 MSE 성능 모의실험 결과이다. 퓨전센터 안테나를 확장하는 경우 선택이득 (selection gain)으로 인하여 안테나 선택기만 AFC (AS-AFC)의 MSE 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 본 논문에서 제안한 AS-STLC AFC 또한, 각 센서와 퓨전센터 사이의 무선 채널 이득이 높은 안테나 쌍을 선택함으로써, 선택이득을 통해 MSE 성능이 더욱 향상됨을 확인하였다. 또한, 퓨전센터 안테나 개수가 같은 환경에서 AS-AFC보다 AS-STLC AFC 성능이 훨씬 우수한 것을 볼 수 있으며, 이는 [4]에 보고된 바와 같이 두 안테나에 대한 무선 채널 이득의 합을 통해 전력 제어 계수를 정의할 수 있기 때문이다. 앞으로 퓨전센터의 수신 안테나 확장에 따라 두 안테나에 대한 무선 채널 이득만 활용하는 본 연구 결과를 확장하여, 모든 무선 채널 이득을 활용할 수 있는 방법에 관하여 연구할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래창조과학부 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2019R1F1A1061023).

참고 문헌

- [1] 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.
- [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] 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.
- [4] 이영석, 이기훈, 정방철, 정진근, "시공간 선 부호를 활용한 아날로그 함수 연산 시스템의 성능 향상", *한국통신학회 하계종합학술발표회*, pp. 971-972, Jun. 2019.
- [5] J. Joung and B. C. Jung, "Machine learning based blind decoding for space-time line code systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 5, pp. 5154-5158 May 2019.