

시공간 선 부호를 활용한 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 Analog Function Computation via Space-Time Line Codes

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

Chungnam National University, *Chung-Ang University.

요약

본 논문은 각각 단일 안테나를 갖는 다수의 센서와 두 개의 수신 안테나를 갖는 퓨전센터로 이루어진 센서 네트워크에서 아날로그 함수 연산 (Analog Function Computation: AFC)에 시공간 선 부호 기법 (Space-Time Line Codes: STLC)의 적용을 제안하고, 모의실험을 통해 센서 수에 따른 평균 제곱 오차 (Mean Squared Error: MSE) 성능을 분석한다. 모의실험 결과 제안한 방식이 센서 수가 증가할수록 기존 안테나 선택 기법의 성능을 향상할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과는 차후 퓨전센터 안테나 확장에 따른 STLC-AFC 기법 적용 연구에 근간이 되는 중요한 의미를 갖는다.

I. 서론

아날로그 함수 연산 (Analog Function Computation: AFC)이란 센서 네트워크에서 다수의 센서가 데이터를 측정 후 해당 네트워크에서 목표로 하는 결과연산에 따라 전처리 함수를 거쳐 퓨전센터 (Fusion center)로 동시에 신호를 전송하고, 퓨전센터는 중첩되어 수신된 신호로부터 개별 신호 검출 없이 후처리 함수를 적용함으로써 임의의 함수 연산을 신호 송수신과 동시에 수행하는 기법이다. 예를 들어 평균 온도 측정을 목표로 하는 센서 네트워크의 수신 결과로 각 센서의 개별적인 데이터보다 여러 센서 데이터의 평균과 같은 특정 집계함수를 요구하는 경우를 고려할 수 있다. 기존 센서 네트워크는 퓨전센터에서 각 센서의 데이터를 독립적으로 검출한 후 연산을 수행했으나, AFC의 경우 중첩되어 수신된 신호에 함수 연산을 수행한다. 즉, 채널의 중첩 특성을 이용함으로써 거대 (massive) 센서 네트워크의 주파수 효율을 증대시킬 수 있다 [1-3].

시공간 선 부호 (Space-Time Line Codes: STLC) 기법이란 송수신단이 다중 안테나를 갖는 Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 시스템에서 송신단만 채널 정보를 알고 있는 통신 환경에 적용할 수 있는 부호화 기법이다. 구체적으로 송신단은 한 안테나를 갖고 수신단은 두 안테나를 가질 때, 송신단은 전송할 신호와 수신단 사이 채널 정보를 결합하여 두 개의 STLC 신호로 부호화하여 두 시간 슬롯 동안 전송한다. 수신단은 두 안테나로 두 시간 슬롯에 걸쳐 수신한 STLC 신호를 선형결합 하여 송신단에서 전송된 신호를 검파한다. 이때 최적 공간 다이버시티 이득을 획득할 수 있다 [4].

기존에 제안된 AFC는 송수신단 모두 채널 정보를 아는 통신 환경을 고려한다. 퓨전센터가 각 센서까지의 채널 정보를 알려면 파일럿 신호를 센서로부터 수신해야 하며, 이는 거대 센서 네트워크와 같이 센서 개수가 크게 증가하는 경우 치명적인 통신 지연을 야기한다. 본 논문에서는 송신단만 채널 정보를 알고 수신단은 각 센서로부터 무선 채널 이득만 알고 있는 통신 환경을 고려할 때 적용할 수 있는 STLC를 기반으로 한 AFC를 제안한다. 또한, 모의실험을 통해 네트워크에서 요구하는 연산 결과와 퓨전센터에서 수신한 후 연산 결과에 대한 평균 제곱 오차 (Mean Squared Error: MSE) 성능을 센서 수에 따라 비교 분석한다.

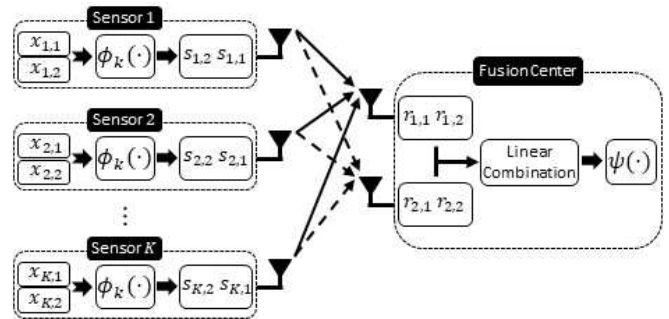


그림 1. STLC-AFC 시스템 모델

II. 시공간 선 부호기반 아날로그 함수 연산

본 논문의 시스템 모델은 각각 단일 안테나를 갖는 K 개 센서와 두 수신 안테나를 갖는 퓨전센터로 구성한다. 모든 센서가 동시에 동일한 부반송파 (sub-carrier)를 이용하여 신호를 퓨전센터로 전송하는 센서 네트워크를 고려하며, 이때 STLC 기법을 적용한 AFC를 제안한다. 우선, 각 센서는 퓨전센터에서 광역 전파한 파일럿 신호를 통해 자신과 퓨전센터 사이의 채널 정보 및 전력 제어 상수 (η)를 획득하고, 채널의 중첩 특성을 이용하여 네트워크에서 목적으로 하는 결과연산을 수행하기 위해 전처리 함수를 거친 후 전송 신호를 STLC 신호로 부호화한다.

결과연산을 f 로 정의하고, 이때 적용되는 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 제 센서의 전처리 함수를 ϕ_k , 퓨전센터에서의 후처리 함수를 ψ 로 정의하며, f 에 따라 적용할 수 있는 ϕ_k 와 ψ 의 예를 표 1에 보였다.

표 1. AFC에 따른 전처리 및 후처리 함수 [5].

함수	ϕ_k	ψ	f
산술 평균	$\phi_k = x_k$	$\psi = \frac{1}{K}$	$f = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k$
기하 평균	$\phi_k = \log(x_k)$	$\psi = e^{\frac{1}{K}(\cdot)}$	$f = \left(\prod_{k=1}^K x_k \right)^{\frac{1}{K}}$
유클리디안 노름	$\phi_k = x_k^2$	$\psi = (\cdot)^{\frac{1}{2}}$	$f = \sqrt{\sum_{k=1}^K x_k^2}$

본 논문에서는 퓨전센터에서 산술평균을 구하는 시스템으로 가정한다. 즉, $\phi_k = x_k$ 이고, $\psi = 1/K$ 이며, 이 전처리 함수를 두 시간 슬롯에 대한 측정 데이터 각각에 적용한 후 다음과 같이 두 STLC 신호로 부호화한다:

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

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

여기서 $s_{k,t}$ 는 k 번째 센서가 $t \in \{1,2\}$ 번째 시간 슬롯에 전송하는 STLC 신호이며, $x_{k,t}$ ($0 \leq x_{k,t} \leq \sqrt{P_0}$)는 k 번째 센서가 t 번째 시간 슬롯에 측정된 데이터를 전력에 맵핑한 후 네트워크에서 산술평균 연산을 수행하기 위한 전처리 함수의 결과를 나타낸다. 또한, $h_{k,j}$ 는 k 번째 센서와 퓨전센터의 $j \in \{1,2\}$ 번째 안테나 사이 무선 채널을 나타내며, 본 논문에서는 모든 채널이 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(0,1)$ 분포를 따른다고 가정한다. η 는 각 센서의 송신 전력을 사용 가능한 최대 전력 이하로 제한하여 STLC 신호를 전송하기 위한 상수로 산술평균 함수에 대해 $|s_{k,t}|^2 \leq P_0$ 일 때 다음과 같이 쓸 수 있다:

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

각 센서는 STLC 신호 $\{s_{k,t}\}$ 를 두 시간 슬롯에 걸쳐 퓨전센터로 전송한다. 이때, 두 시간 슬롯은 상관 시간 (Coherence time) 이내로 가정하며, 퓨전센터의 각 안테나로 수신된 신호는 다음 행렬과 같이 표현할 수 있다:

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

여기서 $r_{j,t}$ 는 퓨전센터의 j 번째 안테나로 t 번째 시간 슬롯에 수신된 신호를 나타내며, $w_{j,t}$ 는 이때 발생하는 $\mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$ 분포를 따르는 잡음을 의미한다.

퓨전센터는 네 수신 신호 $\{r_{1,1}, r_{1,2}, r_{2,1}, r_{2,2}\}$ 로부터 다음과 같이 STLC 복호화 연산에 따라 선형결합 신호를 생성한다:

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

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

최종적으로 본 논문에서 고려한 산술평균 연산을 수행한다. t 번째 시간 슬롯의 네트워크에서 목적으로 하는 결과연산 f_t 와 퓨전센터에서 수신된 신호로부터 계산한 결과 \hat{f}_t 를 다음과 같이 정의할 수 있다:

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

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

따라서 각 시간 슬롯에 대한 f_t 와 \hat{f}_t 의 MSE는 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \text{MSE} &= \mathbb{E}(|f_t - \hat{f}_t|^2) = \frac{2\sigma_n^2}{K^2 \frac{1}{2} \min_k (|h_{k,1}|^2 + |h_{k,2}|^2)}, \\ &= \frac{4\sigma_n^2}{K^2 \min_k (|h_{k,1}|^2 + |h_{k,2}|^2)}. \end{aligned}$$

III. 모의실험 결과 및 결론

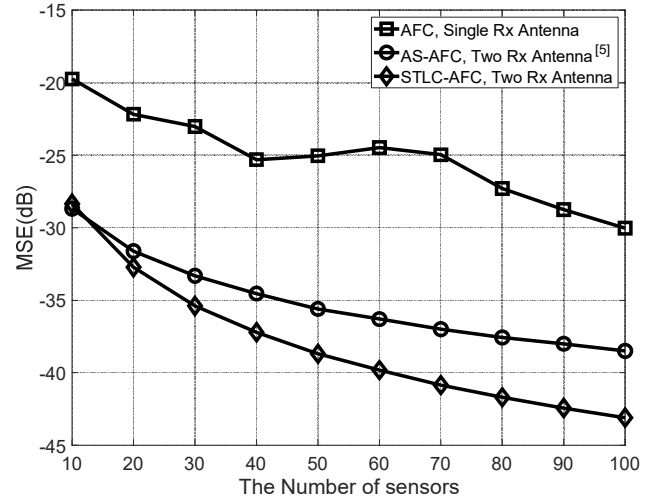


그림 2. 센서 수에 따른 AFC 기법 MSE 성능 모의실험 결과.

그림 2는 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR)가 20dB일 때, STLC-AFC 시스템의 센서 수 대비 MSE 성능 모의실험 결과이다. 퓨전센터가 단일 안테나를 갖는 센서 네트워크에 AFC를 사용하는 경우(□) 딥 페이딩 (deep fading) 현상에 의한 MSE 값이 지배적으로 작용하여 센서 수 증가에 따른 이득이 보장되지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 퓨전센터의 두 안테나 중 하나만 선택하여 통신하는 안테나 선택 기반 AFC (⊕) (AS-AFC)은 딥 페이딩에 의한 영향을 완화하여 센서 수 증가에 따라 MSE 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

한편, 같은 통신 환경에서 센서 수가 증가함에 따라 본 논문에서 제안한 STLC-AFC(◇)는 AS-AFC보다 우수한 성능을 제공하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 전력 제어 상수에 포함된 무선 채널 이득이 AS-AFC의 경우 $|h_{k,j}|^2$ [5] 이고 STLC-AFC의 경우 $\sum_{j=1}^2 |h_{k,j}|^2$ 로 퓨전센터 두 안테나의 무선 채널 이득을 모두 활용할 수 있기 때문이다. 이러한 결과는 STLC-AFC 기법을 사용한 퓨전센터의 수신 안테나 확장을 위한 매우 중요한 근거로써 그 의미를 같으며, 이를 바탕으로 추후 다수의 수신 안테나를 갖는 STLC-AFC에 관한 연구를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음” (IITP-2019-2017-0-01635)

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] 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] M. Goldenbaum and S. Stanczak, “Robust analog function computation via wireless multiple-access channels.” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 9, pp. 3863-3877, Sep. 2013.
- [4] J. Joung, “Space-time line code,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1023-1041, Feb. 2018.
- [5] 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.