# 다중안테나 무선 센서 네트워크에서 아날로그 함수 연산을 위한 송수신 빔포밍 최적화 기술

이영석, 이기훈, 정방철

충남대학교

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

# An Optimized Transmit/Receive Beamforming Technique for Analog Function Computation in MIMO Wireless Sensor Networks

Young-Seok Lee, Ki-Hun Lee, Bang Chul Jung

Chungnam National University

요 약

본 논문은 다중 안테나를 갖는 다수의 센서와 단일 퓨전센터 (Fusion Center: FC)가 존재하는 상향링크 무선 센서 네트워크에서 아날로그 함수 연산 (Analog Function Computation: AFC) 시스템을 위한 최적화 이론 기반의 송수신 빔포밍 기술을 제안한다. 퓨전센터는 SDR (Semidefinite Relaxation)을 이용하여 수신 빔포밍 벡터를 정의하고, 각 센서는 다중 송신안테나의 이득을 최대화하기 위해 MRT (Maximum Ratio Transmission) 기반 송신 빔포밍을 적용한다. 모의 실험을 통해 제안한 기법의 평균 제곱 오차 (Mean Squared Error: MSE) 성능이 기존 기법에 비하여 월등히 향상됨을 보였다.

## Ⅰ. 서론

차세대 IoT (Internet of Things)나 V2X (Vehicle to Things) 등의 네트워크는 매우 많은 양의 센서를 활용할 것으로 예상되며, 이에 따라 미래 센서 네트워크를 위한 함수 연산 기법이 연구되고 있다. 기존 센서 네트워크의 함수 연산 기법은 각 센서가 서로 직교하는 무선 자원을 활용하여 자신의 측정 데이터를 퓨전센터로 전송하고, 퓨전센터에서는 각 센서가 송신한 신호를 독립적으로 검파한 후 네트워크의 목적함수 연산을 수행한다. 이는 센서 수가 증가함에 따라 각 센서의 데이터를 독립적으로 검파하는 과정으로 인한 큰 통신 지연과 한정된 대역 내에서의 직교 무선 자원 사용으로 인한 주파수 부족 문제가 야기될 수 있다 [1].

이와 같은 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나로 아날로그 함수 연산 (Analog Function Computation: AFC)이 제안되었다. AFC는 송신단의 각 센서가 측정한 데이터를 진폭 변조 (Amplitude Modulation: AM)한 후 동시에 같은 부주파수 (sub-carrier)를 이용하여 퓨전센터로 전송하고, 퓨전센터는 개별 센서 신호 검파 과정 없이 중첩된 신호를 이용하여 네트워크에서 요구하는 목적함수를 연산하는 기법이다 [2]. 이를 위해 각 센서는 신호를 전송하기 전 채널에 의한 신호 왜곡을 선 보상 (pre-coding)해 주는 과정이 필요하다. 기존 AFC 기법은 주로 각 센서가 단일 안테나를 갖는 통신 환경을 가정하며 [3-5], 다중 안테나를 갖는 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 센서 네트워크에서 송신안테나 확장을 통해 연산 오류 성능을 향상한 AFC 연구는 아직 수행되지 않은 것으로 확인하였다.

이에 따라 본 논문에서는 센서와 퓨전센터 모두 다중 안테나를 갖는 MIMO 무선 센서 네트워크를 위한 AFC 기법을 제안한다. 송수신단 모두 채널 정보를 알고 있는 상황을 가정하며, 퓨전센터는 주어진 네트워크의 무선 채널 정보에 따라 수신 빔포밍 벡터를 정의하여 각 센서에게 피드백한다. 이후 각 센서는 퓨전센터로부터 주어진 수신 빔포밍 벡터와 자신이 갖고 있는 무선 채널 정보에 따라 정의되는 등가 채널 정보를 기반으로 MRT (Maximum Ratio Transmission) 부호화하여 신호를 전송하는 기법을 제안하며, 모의실험을 통해 실제 연산 결과와 퓨전센터에서 추정한 연산 결과에 대한 평균 제곱 오차 (Mean Squared Error: MSE) 성능을 비교한다.

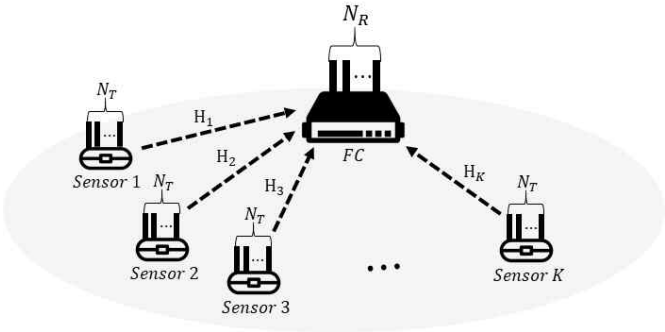


그림 1. MIMO 무선 센서 네트워크 AFC 시스템 모델.

## Ⅱ. MIMO 무선 센서 네트워크를 위한 아날로그 함수 연산

본 논문에서는 그림 1과 같이 $N_T$개의 안테나를 갖는 $K$개의 센서가 $N_R$개의 안테나를 갖는 단일 퓨전센터로 동시에 신호를 전송하는 상향링크 MIMO 센서 네트워크를 고려한다. 이때, 신호 송수신 과정에서 AFC 기법을 적용하며, 본 네트워크의 목적함수는 산술평균 연산을 가정한다. 이에 따라 각 센서의 전처리 함수 ($\phi_k$)와 퓨전센터의 후처리 함수 ($\psi$)는 다음과 같이 정의할 수 있다 [3]:

$$\phi_k(\bullet)=x_k,\ \psi(\bullet)=\frac{1}{K},$$

여기서 $x_k$는 $k\,(\in\{1,2,\cdots,K\})$째 센서의 측정값을 AM으로 실수 값에 맵핑한 값을 의미한다. 또한, 각 센서는 자신과 퓨전센터 사이 무선 채널 정보를 알고 있고, 퓨전센터는 네트워크 전체 채널 정보를 알고 있는 통신 환경을 가정한다.

각 센서는 다중 송신안테나에 대한 이득을 최대화하기 위해 무선 채널 정보를 기반으로 다음과 같이 AM 신호를 MRT 부호화한다:

$$\mathbf{s}_k=\sqrt{\eta}\frac{(\mathbf{a}^H\mathrm{H}_k)^H}{\|\mathbf{a}^H\mathrm{H}_k\|^2}x_k,$$

여기서 $\mathbf{s}_k\in\mathbb{C}^{N_T}$는 $k$째 센서가 각 송신안테나로 전송하는 신호를 나타내며, $\mathrm{H}_k\in\mathbb{C}^{N_R\times N_T}$는 $k$째 센서와 퓨전센터 사이 무선 채널 행렬을 의미한다.

본 논문에서 모든 무선 채널은 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(0,1)$의 분포를 따른다고 가정한다. 또한, $\mathbf{a}\in\mathbb{C}^{N_R}$와 $\eta$는 각각 퓨전센터에서 전체 네트워크의 무선 채널 정보를 기반으로 정의하는 수신 빔포밍 벡터와 각 센서의 송신 전력을 제한하기 위한 전력 제어 상수로써 다음과 같이 정의한다:

$$\eta = P_o \min_k \|\mathbf{a}^H \mathrm{H}_k\|^2.$$

각 센서는 퓨전센터로부터 $\mathbf{a}$와 $\eta$를 피드백 받은 후 $\mathbf{s}_k$를 동일한 부주파수를 이용하여 동시에 퓨전센터로 전송한다. 한편, 퓨전센터는 중첩되어 수신된 신호로부터 AM 신호를 복호하기 위해 사전에 정의한 수신 빔포밍 벡터 $\mathbf{a}$를 통해 아래와 같이 채널을 보상한다:

$$\hat{g} = \mathbf{a}^H \mathbf{y} = \mathbf{a}^H \sum_{k=1}^{K} \mathrm{H}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{a}^H \mathbf{w} = \sqrt{\eta} \sum_{k=1}^{K} x_k + \mathbf{a}^H \mathbf{w},$$

여기서 $\mathbf{w}\in\mathbb{C}^{N_R}$는 수신 과정에서 각 수신안테나에 발생하는 잡음의 벡터를 의미하며, 본 논문에서 모든 잡음은 $\mathcal{CN}(0,N_o)$의 분포를 따른다고 가정한다. 퓨전센터는 수신된 $\hat{g}$을 $\sqrt{\eta}$로 나누고, 앞서 정의한 후처리 함수를 적용함으로써 다음과 같이 네트워크의 목적함수인 산술평균 연산을 수행한다:

$$\hat{f} = \frac{1}{K}\left(\frac{\hat{g}}{\sqrt{\eta}}\right) = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} x_k + \frac{\mathbf{a}^H \mathbf{w}}{K\sqrt{\eta}}.$$

최종적으로 목적함수 $f = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} x_k$와 퓨전센터에서 추정한 함수 연산 결과 $\hat{f}$의 MSE 성능은 다음과 같다:

$$\mathbb{E}[|f-\hat{f}|^2] = \mathbb{E}\left[\frac{\|\mathbf{a}\|^2 N_o}{K^2 P_o \min_k \|\mathbf{a}^H \mathrm{H}_k\|^2}\right] = \mathbb{E}\left[\frac{\|\mathbf{a}\|^2}{K^2 \mathrm{SNR} \min_k \|\mathbf{a}^H \mathrm{H}_k\|^2}\right].$$

한편, 위 MSE 값을 최소화하기 위해 퓨전센터는 수신 빔포밍 벡터 $\mathbf{a}$를 다음 최적화 과정을 통해 정의한다:

$$\text{(P1)} \quad \max \min_k \| \mathbf{a}^H \mathrm{H}_k \|^2$$
$$\text{s. t.} \quad \| \mathbf{a} \|^2 = 1$$

위 문제는 보조변수 $c$를 이용하여 다음과 같이 변형할 수 있다:

$$\text{(P2)} \quad \max c$$
$$\text{s. t.} \quad c \le \| \mathbf{a}^H \mathrm{H}_k \|^2, \quad \forall k$$
$$\| \mathbf{a} \|^2 = 1$$

이때, P2의 각 조건은 볼록 (convex) 조건을 만족하지 않으므로 $\mathrm{A} = \mathbf{a}\mathbf{a}^H$, $\tilde{\mathrm{H}}_k = \mathrm{H}_k \mathrm{H}_k^H$을 가정하여 다음과 같이 SDR(Semidefinite Relaxation)으로 문제를 변형한다 [3]:

$$\text{(P3)} \quad \max c$$
$$\text{s. t.} \quad c \le \mathrm{Tr}(\mathrm{A} \cdot \tilde{\mathrm{H}}_k)), \quad \forall k$$
$$\mathrm{Tr}(\mathrm{A}) \le 1, \ \mathrm{A} > 0$$

여기서 $\mathrm{Tr}(\cdot)$은 행렬 대각 성분의 합을 의미한다. 만약 (P3)을 통해 유도된 A가 $rank(\mathrm{A}) = 1$ 조건을 만족하지 않는 경우 (즉, $rank(\mathrm{A}) \neq 1$의 경우) 행렬 A의 고유값 중 가장 큰 값($\lambda_{\max}$)과 이 고유값에 대응되는 고유벡터($\mathbf{v}$)를 이용하여 다음과 같이 근사 행렬 $\mathrm{A}_{\mathrm{ap}}$를 정의하여 최적화한다:

$$\mathrm{A}_{\mathrm{ap}} = \lambda_{\max} \mathbf{v}\mathbf{v}^{\mathrm{H}}.$$

최종적으로 근사화한 수신 빔포밍 벡터 $\mathbf{a}_{\mathrm{ap}}$는 다음과 같이 정의된다:

$$\mathbf{a}_{ap} = \sqrt{\lambda_{\max}}\mathbf{v}.$$

## Ⅲ. 모의실험 결과 및 결론

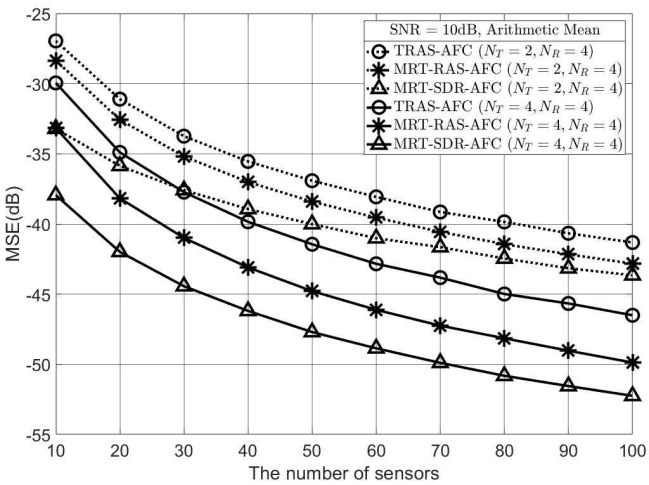


그림 2 MRT-SDR-AFC의 MSE 성능 모의실험 결과.

그림 2는 각 센서의 신호 대 잡음 비 (Signal to Noise Ratio: SNR)가 10dB일 때 본 논문에서 고려한 산술평균 함수 연산에 대한 센서 수 대비 MSE 성능 모의실험 결과이다. TRAS-AFC (⊖)는 각 센서가 퓨전센터의 각 안테나에 대해 무선 채널 이득이 가장 큰 안테나를 선택하고, 퓨전센터는 자신의 안테나와 각 센서가 선택한 안테나 사이 무선 채널 이득 최솟값이 최대에 해당하는 안테나를 선택하여 AFC를 수행한 결과이고 [5], MRT-RAS-AFC (✳)는 퓨전센터에서 무선 채널 이득을 기준으로 하나의 안테나를 선택하고 각 센서는 선택된 퓨전센터의 안테나를 기준으로 MRT하여 AFC한 결과이다.

결과적으로 본 논문에서 제안한 MRT-SDR-AFC (△)의 MSE 성능이 가장 우수한 것을 확인하였다. AFC의 MSE 성능은 각 센서와 퓨전센터 사이 최소 무선 채널 이득에 따라 주어지며, 본 논문에서는 이를 최대화할 수 있도록 수신 빔포밍 벡터를 설계하여 이와 같은 결과를 보인 것으로 분석된다. 추후 본 연구 결과를 기반으로 MRT-SDR-AFC의 최적화 과정에 대한 한계점을 분석하고 기계학습을 기반으로 한 송수신 빔포밍 벡터 설계 연구를 수행할 예정이다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래창조과학부 교육부의 재원으로 한국연구재단 (No. NRF-2019R1F1A1061023) 및 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업 (IITP-2020-2017-0-01635) 의 지원을 받아 수행되었음.

## 참 고 문 헌

[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.

[3] 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.

[4] 이영석, 이기훈, 정방철, 정진곤, "시공간 선 부호를 활용한 아날로그 함수 연산 시스템의 성능 향상", *한국통신학회 하계종합학술발표회*, pp. 971-972, Jun. 2019.

[5] 이영석, 이기훈, 정방철, 정진곤, "수신 안테나 선택을 통한 시공간 선 부호기반 아날로그 함수 연산 시스템의 성능 향상", *한국통신학회 추계종합학술발표회*, pp. 527-528, Nov. 2019.