

6G 다중 사용자 MIMO 시스템을 위한 저복잡도 유체 안테나 포트 선택 기법

조희선, 백주영, 정방철

아주대학교

heesun9351@ajou.ac.kr, jybaek@ajou.ac.kr, bcjung@ajou.ac.kr

Low-Complexity Fluid Antenna Port Selection Technique for 6G Multiuser MIMO Systems

Hee Seon Cho, Juyeong Baek, Bang Chul Jung
Ajou University

요약

본 논문에서는 유체 안테나(fluid antenna: FA) 기반 다중 사용자 MIMO(multiple-input multiple-output) 시스템에서의 저복잡도 포트 선택 기법을 제안한다. 구체적으로 다중 RF(radio frequency) 체인 기반 FAS의 포트 선택 문제를 조합 최적화 문제로 정식화하고, 이를 효율적으로 해결하기 위해 CEO(cross entropy optimization) 기반 탐색 기법을 활용한다. 모의실험을 통해 제안하는 기법이 기존 기법 대비 높은 스펙트럼 효율을 제공할 것을 검증한다.

I. 서론

유체 안테나 시스템(fluid antenna system: FAS)은 안테나 구조 및 위치를 동적으로 재구성할 수 있는 유연성을 바탕으로 대규모 다중 접속을 지원할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있다 [1]. 유체 안테나(fluid antenna: FA)는 안테나 소자들이 미리 정의된 개구 내부에서 물리적 혹은 가상적으로 이동하거나 스위칭될 수 있는 위치 유연 안테나를 의미하며, 전자적·기계적 제어를 통해 RF(radio frequency) 특성을 동적으로 변화시켜 무선 환경에 적응할 수 있다. 이러한 특성을 바탕으로 FAS는 공간적으로 유리한 위치를 능동적으로 활용할 수 있어 사용자 간 간섭을 효과적으로 완화할 수 있으며, 동일한 시간·주파수 자원에서 여러 사용자를 동시에 서비스하는 다중 접속 환경에서 높은 스펙트럼 효율과 향상된 사용자 분리 성능을 제공할 수 있다 [2], [3].

초기 FAS 연구는 낮은 하드웨어 복잡도를 유지하기 위해 단일 안테나 포트 선택 구조를 중심으로 이루어져 왔다. 이러한 구조를 활용한 대표적인 다중 접속 기법으로 FAMA(fluid antenna multiple access)가 제안되었다 [2]. FAMA는 송신단의 채널 상태 정보(channel state information: CSI)없이 동작 가능한 open-loop 방식의 다중 접속 기술로, 사용자 단말에 단일 RF 체인만 존재한다고 가정한다. 각 사용자는 최대 SINR(signal-to-interference-plus-noise ratio)을 가지는 안테나 포트를 선택하여 신호를 수신함으로써 낮은 구현 복잡도에서도 효율적인 다중 사용자 통신을 지원할 수 있다.

한편, 최근에는 FAS에서 다수의 RF 체인을 활용하는 다중 포트 선택 기반의 다중 접속 기법 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. [3]에서는 기존 FAMA를 일반화한 DC(digital combining) 기법과 공간 상관 정보를 활용하는 GEPort(generalized eigenvector port selection) 기법 등이 제안되었다. 그러나 기존 DC 기법은 포트 간 상관성을 고려하지 않은 채 각 포트의 SINR만을 기준으로 포트를 선택하므로 구현은 단순하지만, 상관된 포트가 중복 선택될 가능성이 커 성능 저하가 발생할 수 있다. 또한 GEPort 기법은 순차적으로 포트를 선택하는 greedy 기반 구조를 사용하므로 초기 선택 결과에 크게 의존하며, 전역 최적해를 보장하기 어렵다는 한계를 가진다.

따라서 본 논문에서는 FA 기반 다중 사용자 MIMO(multiple-input multiple-output) 시스템에서의 포트 선택 문제를 조합 최적화 문제로 정식화하고, CEO(cross entropy optimization) 기반 안테나 탐색 기법 [4]을 활용하여 효율적인 포트 선택 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안하는 안테나 선택 기법이 기존 기법 대비 높은 스펙트럼 효율을 제공할 것을 검증한다.

II. 시스템 모델

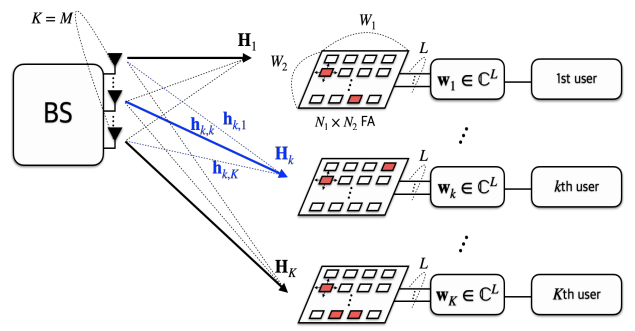


그림 1. Open-loop 유체 안테나 기반 다중 사용자 MIMO 시스템 모델.

본 논문에서는 그림 1에서와 같이 M 개의 고정형 안테나를 갖는 기지국과 FA를 갖는 K 명의 사용자 단말로 구성된 다중 접속 시스템을 고려한다. 각 FA는 $N_1 \times N_2 = N$ 개의 포트를 가지며 모든 경우에 대해 각 차원의 포트는 동일 간격으로 배치된다고 가정한다. $W_1 \times W_2$ 는 파장으로 정규화된 유체 안테나의 길이를 의미한다. 본 논문에서는 [3]과 동일하게 $M = K$ 와 open-loop 구조를 가정하여 각 사용자는 포트 선택을 독립적으로 수행할 수 있다. 임의의 사용자 $k \in \{1, \dots, K\}$ 의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_k = P\mathbf{h}_{k,k}z_k + \sum_{j \neq k} \mathbf{h}_{k,j}z_j + \mathbf{n}_k$$

여기서 P 는 송신 신호 세기를 의미한다. $\mathbf{h}_{k,m} \in \mathbb{C}^{N \times 1} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{R})$ 는 $m \in \{1, \dots, M\}$ 짝 기지국 안테나와 $k \in \{1, \dots, K\}$ 짝 사용자 간의 채널을 의미하며, 상관 행렬 $\mathbf{R} (\in \mathbb{C}^{N \times N})$ 은 [2]의 Jakes 모델을 기반으로 생성한다. $z_k (\in \mathbb{C})$ 는 k 째 사용자로 전송될 정규화된 신호를 의미한다. $\mathbf{n}_k (\in \mathbb{C}^{N \times 1}) \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2)$ 는 k 째 사용자가 지닌 단말기에서 발생하는 부가 열잡음이다.

사용자는 수신된 신호를 평가하여 N 개의 포트 중 L 개의 포트를 선택한다. 이후 수신기는 선형 MMSE(minimum mean square error)를 빔포머를 적용한다. 따라서 k 째 사용자의 수신 SINR은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{h}_{k,k}^H \mathbf{B}_{k,k}^{-1} \mathbf{h}_{k,k}$$

여기서 $\mathbf{w}_k$ 는 k 째 사용자의 포트 선택 벡터를 의미하며, 벡터의 각 원소 $w_{k,n}$ 는 포트 선택여부를 나타낸다. $w_{k,n} = 1$ 이면 $n \in \{1, \dots, N\}$ 짝 포트가 선택됨을 의미하고, $w_{k,n} = 0$ 이면 선택되지 않음을 의미한다. 또한 신

호 선택 벡터는 정확히 L 개의 포트만 활성화되도록 구성한다.

$\mathbf{h}_{\mathbf{w}_{k,m},k} (\in \mathbb{C}^{L \times 1})$, $\mathbf{B}_{\mathbf{w}_{k,k}} (\in \mathbb{C}^{L \times L}) = \sum_{j \neq k} \mathbf{h}_{\mathbf{w}_{k,j}} \mathbf{h}_{\mathbf{w}_{k,j}}^H + \frac{1}{\text{SNR}} \mathbf{I}_L$ 는 각각 선택된 포트들의 채널 벡터와 간섭 공분산 행렬을 의미한다. 여기서 H , $\text{SNR} = P/\sigma^2$, $\mathbf{I}_L$ 는 각각 켈레 진치 연산자, 신호 대 잡음비, L 의 크기를 가지는 항등행렬이다. 따라서, k 제 사용자의 달성 가능한 스펙트럼 효율은 다음과 같이 정의된다.

$$S(\mathbf{w}_k) = \log_2 \left(1 + \mathbf{h}_{\mathbf{w}_{k,k}}^H \mathbf{B}_{\mathbf{w}_{k,k}}^{-1} \mathbf{h}_{\mathbf{w}_{k,k}} \right)$$

III. CEO 기반 안테나 선택 기법

본 논문에서는 FA 기반 다중 사용자 MIMO 시스템에서의 포트 선택 문제를 다음과 같은 조합 최적화 문제로 정식화한다.

$$\mathbf{w}^* = \underset{\mathbf{w}_k \in W}{\operatorname{argmax}} S(\mathbf{w}_k)$$

여기서 W 는 가능한 모든 포트 선택 벡터의 집합을 의미한다. CEO 기법은 조합 최적화 문제를 확률 추정 문제와 연결하여 해결한다. 이를 위해 해 공간 W 에서 임계값 r 과 다음과 같은 베르누이 확률 밀도 함수를 정의한다.

$$f(w_k; \mathbf{p}) = \prod_{n=1}^N p_n^{w_{k,n}} (1-p_n)^{1-w_{k,n}},$$

이를 추정하기 위한 가장 기본적인 방법은 crude Monte Carlo(CMC) 방식으로, 확률 분포로부터 생성된 샘플을 이용하여 unbiased estimator를 계산한다. 그러나 임계값 r 이 최적값에 가까워질수록 대부분의 샘플은 유효하지 않게 되므로 정확한 추정을 위해 매우 많은 샘플이 필요하다. 따라서 CMC 방식은 높은 계산 복잡도로 인해 실제 시스템에 적용하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 IS(importance sampling) 기법을 적용한다.

$$\hat{\ell} = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} I_{\{S(w_k^{(n)}) \geq r\}} \frac{f(w_{k,n}; \mathbf{v})}{g(w_{k,n})}$$

여기서 최적 중요도 분포는 다음과 같이 주어진다.

$$g^*(w_k) = \frac{I_{\{S(w_k) \geq r\}} f(w_k; \mathbf{v})}{\ell}, \quad I_{S(\mathbf{w}_k) \geq r} = \begin{cases} 1, & \text{if } S(\mathbf{w}_k) \geq r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

하지만 최적의 중요도 분포는 사전에 알 수 없으므로 직접 구할 수 없다. 따라서 중요도 분포는 $\{f(\cdot; \mathbf{p})\}$ 에서 선택되며, 목표는 두 분포 사이의 cross entropy를 최소화하는 최적의 파라미터 $\mathbf{p}^*$ 를 찾는 것이다. 이는 다음 최적화 문제와 동치이다.

$$\mathbf{p}^* = \underset{\mathbf{p}}{\operatorname{argmax}} D(\mathbf{p}), \quad D(\mathbf{p}) = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} I_{\{S(w_k^{(n)}) \geq r\}} \ln f(w_k^{(n)}; \mathbf{p})$$

여기서 N_s 샘플 수를 의미한다. $D(\mathbf{p})$ 의 최댓값을 찾기 위해 $\mathbf{p}$ 에 대해 미분하여 0인 지점을 찾으면, 업데이트 규칙은 다음과 같이 유도된다.

$$p_i^{(t)} = \frac{\sum_{n=1}^{N_s} I_{\{S(w_k^{(n,t)}) \geq r\}} w_{k,i}^{(n,t)}}{\sum_{n=1}^{N_s} I_{\{S(w_k^{(n,t)}) \geq r\}}}$$

특정 포트의 선택 확률이 초기에 0 또는 1로 수렴하는 현상을 방지하기 위해 스무딩 인자 λ 를 적용하여 확률 벡터를 다음과 같이 갱신한다.

$$p_i^{(t)} = \lambda \tilde{p}_i^{(t)} + (1-\lambda) p_i^{(t-1)}$$

위 과정을 반복 수행한 뒤, 최종 확률 벡터에서 가장 높은 확률을 갖는 상위 L 개의 포트를 최종 안테나 집합으로 선택한다.

현재 반복의 임계값 $r^{(t)}$ 와 이전 반복의 임계값 $r^{(t-1)}$ 의 차이가 사전에

설정된 허용 오차 β 이하를 만족하면 알고리즘이 수렴한 것으로 판단한다. 알고리즘 종료 후, 최종 확률 벡터 $\mathbf{p}^{(t)}$ 에서 가장 높은 확률을 갖는 상위 L 개의 안테나 포트를 선택한다.

V. 모의실험 결과 및 결론

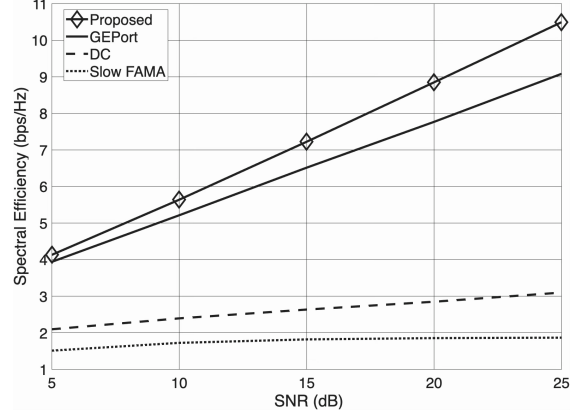


그림 2. CEO 기반 안테나 포트 선택 기법의 스펙트럼 효율 성능

그림 2는 FA 기반 다중 사용자 MIMO 시스템의 신호 대 잡음비 대비 스펙트럼 효율을 도시한 결과이다. 1차원 FA를 가정하였으며 $N=100$, $W=4$, $L=4$ 로 설정하였다. 또한, 상위 10% 샘플의 스펙트럼 효율을 r 로 설정하였으며, $\beta=10^{-2}$, $\lambda=0.8$ 으로 선택하였다. 모의실험 결과, DC 기법은 포트 간 공간 상관성을 충분히 고려하지 못해 성능 열화가 발생하였으며, GEPort 기법은 greedy 기반 선택 과정으로 인해 전역적으로 우수한 포트 조합을 탐색하는 데 한계를 보였다. 반면, 제안하는 기법은 포트 간 상관성과 사용자 간 간섭을 효과적으로 반영하여 모든 SNR 구간에서 가장 우수한 스펙트럼 효율 성능을 달성하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. RS-2024-00420013, No. RS-2026-25489627)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] W. K. New, K. -K. Wong, H. Xu, K. -F. Tong and C. -B. Chae, "An information-theoretic characterization of MIMO-FAS: Optimization, diversity-multiplexing tradeoff and q-outage capacity," *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 23, no. 6, pp. 5541-5556, Jun. 2024.
- [2] P. Ramírez-Espinosa, D. Morales-Jimenez and K. -K. Wong, "A new spatial block-correlation model for fluid antenna systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 11, pp. 15829-15843, Nov. 2024.
- [3] J. P. González-Coma and F. J. López-Martínez, "Slow fluid antenna multiple access with multiport receivers," *IEEE Wireless Commun. Lett.* vol. 15, pp. 1280-1284, Jan. 2026.
- [4] Y. Zhang, C. Ji, W. Q. Malik, D. C. O'Brien and D. J. Edwards, "receive antenna selection for MIMO systems over correlated fading channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 8, no. 9, pp. 4393-4399, Sept. 2009.