

# 셀프리 대규모 다중안테나 시스템에서 유전알고리즘 기반 파일럿 할당기법 연구

명정호, 김근영, 장갑석, 고영조  
한국전자통신연구원

jhmyung@etri.re.kr, kykim12@etri.re.kr, kschang@etri.re.kr, koyj@etri.re.kr

## Genetic Algorithm Based Pilot Allocation for Cell-Free massive MIMO Systems

Jung Ho Myung, Keunyoung Kim, Kapseok Chang, Young-Jo Ko  
Electronics and Telecommunications Research Institute

### 요약

본 논문에서는 셀프리 대규모 다중안테나 시스템의 업링크 성능향상을 위하여 다수 사용자를 위한 파일럿 할당기법에 대한 연구를 수행하였다. 제안하는 파일럿 할당 기법은 다수 사용자간 간섭 정보를 행렬화하고, 유전 알고리즘을 이용하여 다수 사용자에게 파일럿을 할당하는 것을 특징으로 한다. 유전 알고리즘 내의 후보 파일럿 집합 간 성능 비교를 위해 간섭 정보 행렬을 이용하여, 동일한 할당을 받은 사용자에 대해 간섭 정보 행렬의 원소값을 합산하도록 비용함수를 설계했으며, 전체 사용자의 비용함수를 줄이는 방향으로 동작하도록 유전 알고리즘을 디자인하였다. 실험결과를 통해 제안하는 기법은 기존 방식들 대비 더 높은 주파수 이용효율을 달성하는 것을 확인할 수 있다.

### I. 서론

최근 대규모 다중안테나 통신은 간단한 신호 처리를 기반으로 높은 전송용량과 신뢰도 향상을 달성하는 6G 후보 기술로 각광받고 있다. 하지만, 지리적으로 동일한 위치에 있는 안테나 배치 구조로 인해, 여전히 shadow fading 과 셀 경계 사용자의 성능에는 여전히 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하고자, 안테나 배치를 분산시키는 cell-free massive MIMO (CF-MIMO) 연구가 최근 활발하게 진행 중이다. [1-3].

CF-MIMO의 모든 장점을 얻기 위해서는 정확한 채널 정보를 얻는 것이 중요하다. 일반적으로 기지국에서의 채널 추정은 사용자에게 할당된 업링크 파일럿에 의해 수행된다. 다수사용자 동시 접속 시스템을 고려할 때, 실제로는 코히런트 타임의 길이가 제한되어 있으므로 파일럿을 재사용하거나 비직교 파일럿을 사용하여 파일럿 오버헤드를 줄여야 한다. 일반적으로 파일럿 재사용은 파일럿 오염을 통해 동일한 파일럿을 공유하는 사용자 간에 간섭 및 채널 추정 오차를 발생한다. 다수 사용자의 채널 추정을 위한 방법으로, 정해진 파일럿 set 내에서 Exhaustively searching 사용하면 궁극적으로 최적의 답을 얻을 수 있지만 복잡성이 높기 때문에 실용적이지 않다. [1],[2]에서는 파일럿을 랜덤한 방식으로 할당하는 방법을 사용했다. 이는 분산된 CF-MIMO에 적용하기 가장 심플한 방법이지만, 가까운 사용자가 동일한 파일럿을 사용하는 경우를 고려하지 않기 때문에 심각한 파일럿 오염을 발생시키게 되고, 이를 통해 성능 열화가 발생한다.

본 논문에서는 CF-MIMO 환경에서 유전알고리즘 기반 파일럿 할당 방법을 제안하였다. 제안된 기법에서는 다수 사용자와 액세스 포인트 (AP)의 정보를 기반으로, 간섭 정보를 갖는 행렬을 계산한다. 이후, 파일럿 할당 후보군을 생성하여, 간섭 정보 행렬 기반 비용함수와

유전알고리즘을 이용하여, 비용함수를 최소화하는 최적의 파일럿 할당 기법을 찾아낸다. 제안한 기법은 간섭을 고려하여 파일럿을 할당했기 때문에 기존 기법들 보다 더 높은 주파수 이용효율을 달성할 수 있다.

### II. 본론

본 장에서는 CF-MIMO에서 파일럿 할당 기법을 제시한다. 제안하는 시스템에서는 한 개의 안테나를 갖는  $M$  개의 AP와 한 개의 수신 안테나를 가진  $K$  명의 사용자를 고려한다. 채널

업링크 훈련과정에서,  $m$  번째 AP가 받는 신호는 다음과 같다.

$$y_m = \sqrt{\tau\rho_p} \sum_{k=1}^K g_{mk} \boldsymbol{\varphi}_k^H + \mathbf{n}_m$$

여기서  $\tau, \rho_p, g_{mk}, \boldsymbol{\varphi}_k, \mathbf{n}_m$ 는 파일럿 시퀀스의 길이, 파일럿 시퀀스의 정규화된 신호대잡음비,  $m$  번째 AP와  $k$  번째 사용자와 채널 정보( $g_{mk} = \beta_{mk}^{1/2} h_{mk}$ ),  $k$  번째 사용자가 사용하는 파일럿 시퀀스 벡터, 가우시안 노이즈를 각각 의미한다. Minimum mean square error (MMSE) 추정기를 가정할 경우, 채널 정보는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{g}_{mk} = c_{mk} \left( \sqrt{\tau\rho_p} \left( g_{mk} + \sum_{\hat{k} \neq k} g_{m\hat{k}} \boldsymbol{\varphi}_k^H \boldsymbol{\varphi}_{\hat{k}} \right) + \boldsymbol{\varphi}_k^H \mathbf{n}_m \right)$$
$$c_{mk} \triangleq \frac{\sqrt{\tau\rho_p} \beta_{mk}}{\tau\rho_p \sum_{\hat{k}=1}^K g_{m\hat{k}} |\boldsymbol{\varphi}_k^H \boldsymbol{\varphi}_{\hat{k}}|^2 + 1}$$

여기서  $\beta_{mk}$ 는 채널 정보 중 large-scale 페이딩 값을 의미한다. 파워 조절 파라미터( $\eta_k$ )를 포함한 업링크 전송과정에서  $m$  번째 AP의 수신 신호는 아래와 같다.

$$y_m = \sqrt{\rho_u} \sum_{k=1}^K g_{mk} \sqrt{\eta_k} q_k + \mathbf{n}_m$$

여기서  $\rho_u, q_k$ 는 UE에서 사용하는 업링크 송신파워,  $K$

번째 사용자의 송신 신호를 의미한다. 이때,  $k$  번째 사용자의 업링크 수신 신호( $r_k$ ) 다음과 같이 분해할 수 있으며, 신호간섭잡음비를 이용하여 전송률을 계산한다.

$$r_k = \sqrt{\rho_u \eta_k} q_k \mathbb{E} \left\{ \sum_{m=1}^M g_{mk} \hat{g}_{mk}^* \right\} + \sqrt{\rho_u \eta_k} q_k \left( \sum_{m=1}^M g_{mk} \hat{g}_{mk}^* - \mathbb{E} \left\{ \sum_{m=1}^M g_{mk} \hat{g}_{mk}^* \right\} \right) + \sqrt{\rho_u} \sum_{m=1}^M \sum_{\hat{k} \neq k} \sqrt{n_{\hat{k}}} g_{mk} \hat{g}_{mk}^* q_{\hat{k}} + \hat{g}_{mk}^* n_k.$$

제안하는 시스템에서는 파일럿 할당을 위해 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 사용한다. 유전 알고리즘은 다양한 분야에서 최적화 문제를 해소하는데 많이 사용되어 왔다. 유전 알고리즘은 진화론을 기반으로 유전자의 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(Mutation) 연산을 통해 최적의 변수를 탐색하는 알고리즘이다.

최적의 파일럿 할당 집합을 찾기 위하여, 초기 모집단 수는 50 개를 설정하였으며, 해당 모집단은 중복되지 않는 랜덤기반 파일럿 할당 결과를 채용했다. 모집단 내의 적합도 평가(Fitness evaluation)를 위해, 우리는 다수 UE 간 간섭 정보에 대한 행렬( $\mathbf{B}$ )을 아래와 같이 정의하였다.

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^T \mathbf{A},$$

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & i - \text{th AP serves } j - \text{th UE} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

여기서 행렬  $\mathbf{A}$ 는 AP와 UE의 연결성을 나타내는 행렬을 의미하며, 행렬  $\mathbf{B}$ 는  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$  연산을 통해 UE 사이의 간섭 여부를 표현하는 행렬을 의미한다. 행렬  $\mathbf{B}$ 를 통해, 후보 모집단의 파일럿 할당 인덱스가 같은 것들에 대해  $\mathbf{B}$  행렬의 원소 값을 합산한 결과를 비용함수로 정의했으며, 해당 비용 값이 적을수록 파일럿 할당이 잘 수행되었다고 판단하였다. 추가적으로, 유전 알고리즘 동작을 위해 돌연변이 확률은 10%로 설정하였다. 전반적으로 제안하는 유전 알고리즘은 그림 1과 같이 동작한다.

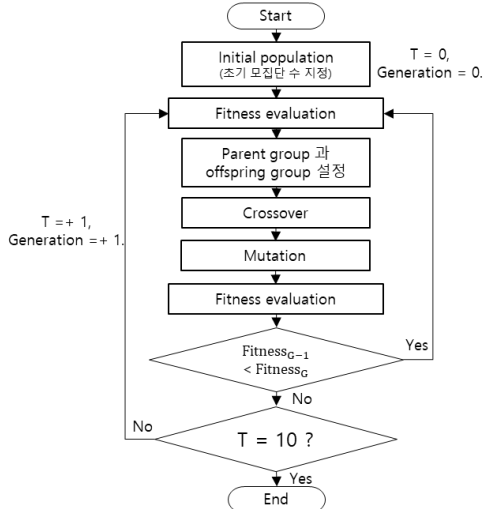


그림 1. 유전 알고리즘 동작 순서

기존 기법 대비 성능 분석을 위하여 시뮬레이션은  $1 \times 1 \text{ km}^2$ 의 직사각형 공간에 균등한 AP와 랜덤한 UE 위치 생성 환경을 가정하고, 채널 생성 및 기타 시뮬레이션 관련 파라미터는 [4]와 동일하게 설정하였다.

그림 2는 AP 수 100개, UE 수 20개, 가용 파일럿 수 10개 일 때의, CF-MIMO의 업링크 주파수 이용 효율을 보여준다. 해당 시뮬레이션 환경은 가용 파일럿 수보다 UE 수가 많기에 파일럿 중복 현상이 발생하고, 파일럿 오염으로 인한 채널 추정 오차가 크게 일어나는 환경을 의

미한다. 기존 기법으로 언급된 랜덤 할당 및 Greedy 방식과 대비하여, 본 연구에서 제안하는 기법은 GA 과정을 통해 중복되는 파일럿을 오염도가 최소화하게 하는 파일럿 할당을 수행하고 그에 따른 간섭 완화 및 업링크 성능 향상을 이끌어 내는 것을 확인 할 수 있다.

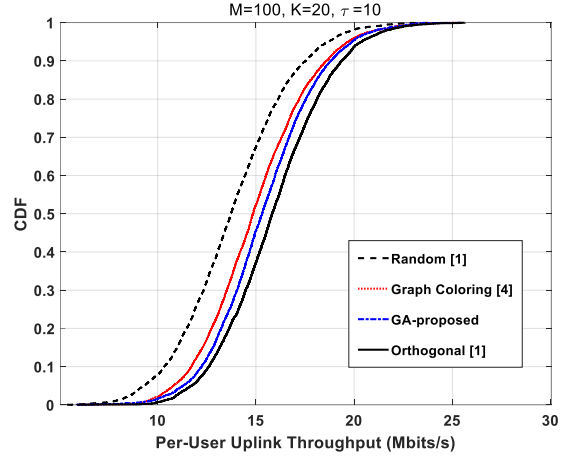


그림 2. 파일럿 할당에 따른 업링크 성능 결과

### III. 결론

본 연구에서는 cell-free MIMO 환경에서 다수 사용자를 위한 파일럿 할당 기법을 제안하였다. 본 실험 결과를 토대로 파일럿 할당에 유전 알고리즘을 이용할 경우, 기존 방식 대비 업링크 성능 향상이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 최적의 성능을 보여주는 상계값에 거의 유사한 성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 우리는 이러한 연구 결과를 확장하여, 더 많은 사용자가 있을 경우에도 동작할 수 있는 유연한 파일럿 할당 기법에 대한 연구를 할 예정이다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2018-0-00218, 초고주파 이동통신 무선백홀 전문연구실)

### 참고 문헌

- [1] H. Q. Ngo et al., "Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 3, pp. 1834-1850, March 2017.
- [2] G. Interdonato et al., "Ubiquitous Cell-free Massive MIMO Communications," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Aug. 2019.
- [3] J. Zhang et al., "Cell-Free Massive MIMO: A New Generation Paradigm," IEEE Access, vol. 7, pp. 99878-99888, Aug. 2020.
- [4] H. Liu, J. Zhang, S. Jin and B. Ai, "Graph Coloring Based Pilot Assignment for Cell-Free Massive MIMO Systems," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 8, pp. 9180-9184, Aug. 2020.