

상향링크 Massive MIMO 시스템에서 파일럿 할당 알고리즘

장 석 주*, 공 한 배*, 이 인 규^o

Pilot Assignment Algorithm for Uplink Massive MIMO Systems

Seokju Jang*, Han-Bae Kong*, Inkyu Lee^o

요 약

본 논문에서는 상향링크 Massive multiple-input multiple-output 시스템 상황에서의 파일럿 할당 알고리즘을 소개한다. 기존에 제안된 파일럿 할당 알고리즘은 최적 알고리즘에 비해 성능 열화가 크기 때문에, 본 논문에서는 Pre-determined Interference 기법과 Pre-determined Desired-term 기법을 이용한 알고리즘을 제안한다. 제안하는 기법은 최적 알고리즘에 비해 복잡도가 낮음과 동시에 성능 열화가 작다. 실험 결과를 통해 제안하는 기법의 성능을 확인한다.

Key Words : Pilot contamination, Pilot assignment, Massive multiple-input Multiple-output(MIMO), Channel estimation, Mean square error

ABSTRACT

This paper introduces a new pilot assignment algorithm for uplink Massive multiple-input multiple-output (MIMO) systems. Since the conventional pilot assignment algorithm has the performance degradation compared to the optimal algorithm which performs the exhaustive search, we propose a new pilot assignment algorithm using Pre-determined Interference and Pre-determined Desired-term techniques. The proposed algorithm has the low complexity and guarantees negligible performance loss compared to the optimal algorithm. Simulation result verifies that the proposed algorithm achieves a large performance gain over the conventional algorithm.

1. 서 론

Multiple-input multiple-output (MIMO) 시스템은 무선 통신 기술의 많은 발전을 가져왔다¹⁻⁴⁾. 최근 급증하는 데이터 트래픽을 해결하기 위한 차세대 통신 기술로 Massive MIMO 시스템이 활발히 연구 되고

있다^{5,6)}. Massive MIMO 기술은 기존 기지국에 많은 수의 안테나를 설치함으로써 셀 사이즈 축소나 기존의 네트워크 capacity 증대 방식과 같은 효과를 낼 수 있는 기법이다.

Massive MIMO 기술이 적용된 기지국에서 데이터 전송률을 높이기 위해서는 단말과 기지국사이의 채널

* This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korea Government (MSIP) under Grant 2014R1A2A1A10049769.

♦ First Author : School of Electrical Engineering, Korea University, seokju@korea.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Korea University, inkyu@korea.ac.kr, 종신회원

* School of Electrical Engineering, Korea University, kongbae@korea.ac.kr

논문번호 : KICS2015-05-147, Received May 13, 2015; Revised July 6, 2015; Accepted July 23, 2015

정보(CSI, Channel State Information)를 획득하는 것이 중요하다. CSI는 일반적으로 기지국과 단말 간에 약속한 기준 신호인 파일럿(Pilot)을 사용하여 획득할 수 있다. 기지국에서 다수의 단말과의 채널 정보를 한번에 추정하기 위해서는 다수의 사용자가 서로 직교하는 파일럿 신호를 전송해야 한다. 그러나 많은 단말들을 동시에 지원하는 Massive MIMO 시스템에서는 서로 직교하는 파일럿 신호를 사용하기에 자원적인 한계가 있다. 또한, 이로 인해 서로의 파일럿 신호가 간섭으로 작용하는 파일럿 오염 현상이 발생하고 이는 채널을 추정하는데 어려움을 준다.

파일럿 오염 현상으로 인한 채널 추정 오류를 줄이기 위한 연구가 진행되었다^[7,8]. 특히, [7]의 저자는 파일럿 할당 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 최적 알고리즘에 비해 복잡도를 많이 낮추었지만 성능 열화가 크다는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 간섭의 크기를 미리 예측한 값인 Pre-determined Interference (PDI) 기법과 desired-term을 미리 예측한 값인 Pre-determined Desired-term (PDD) 기법을 이용하여 낮은 복잡도를 가지면서 높은 성능을 보이는 파일럿 할당 알고리즘을 제시한다.

II. 본 론

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 L 개의 셀로 구성되어 있는 네트워크 시스템을 고려한다. 각 셀에는 M 개의 안테나를 가진 기지국이 중앙에 위치해 있고 1개의 안테나를 가진 K 개의 단말이 있다. 이 때, i 번째 셀의 기지국이 받는 수신신호 \mathbf{Y}_i 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\mathbf{Y}_i = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \mathbf{g}_{ikl} \psi_k^T + \mathbf{N}_i \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{g}_{ikl} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 은 i 번째 셀의 기지국과 l 번째 셀의 k 번째 단말과의 채널 벡터를 의미한다.

$\psi_k \in \mathbb{C}^{\tau \times 1}$ 는 각 셀의 k 번째 단말이 보내는 직교 파일럿 신호이며 ($\psi_k^H \psi_j = 0$ for $k \neq j$), τ 는 파일럿 신호의 길이이다. 또한, $\mathbf{N}_i \in \mathbb{C}^{M \times \tau}$ 는 i 번째 셀의 기지국으로 들어오는 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 Additive White Gaussian Noise를 나타낸다. 그리고

채널 벡터 \mathbf{g}_{ikl} 은 multipath 채널 모델을 고려하여 다음과 같이 표현 된다.

$$\mathbf{g}_{ikl} = \frac{1}{\sqrt{P}} \sum_{p=1}^P \mathbf{a}(\theta_{ikl,p}) \alpha_{ikl,p} \quad (2)$$

여기서 P 는 임의의 i.i.d. (independent and identically distributed) 경로의 수이고 $\theta_{ikl,p}$ 와 $\alpha_{ikl,p}$ 는 각각 i 번째 셀의 기지국과 l 번째 셀의 k 번째 단말과의 p 번째 경로의 angle of arrival (AOA)와 거리에 따른 파워 감소를 나타낸다. $\alpha_{ikl,p}$ 는 complex gaussian 분포를 따르며 평균은 0이고 분산은 pathloss 값이다. 그리고 $\mathbf{a}(\theta)$ 는 steering 벡터로 다음과 같다.

$$\mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} 1, e^{-\frac{j2\pi D \cos(\theta)}{\lambda}}, \dots, e^{-\frac{j2\pi (M-1) D \cos(\theta)}{\lambda}} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

D 는 기지국에서의 안테나 간 간격이고 λ 는 신호의 파장을 나타낸다. 또한 \mathbf{g}_{ikl} 에 대한 채널 공분산 값은 $\mathbf{R}_{ikl} = E[\mathbf{g}_{ikl} \mathbf{g}_{ikl}^H]$ 로 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 각 셀에서 한 단말씩 동일한 파일럿 신호를 할당 받는다고 가정한다. $\mathcal{E} = 1, \dots, K$ 라고 하면, k 번째 파일럿 신호 ψ_k 를 사용하는 l 번째 셀 안의 단말의 인덱스는 $K_{kl} \in \mathcal{E}$ 이 된다. 그리고 k 번째 파일럿 신호 ψ_k 를 보내는 단말들의 그룹을 U_k 라고 정의한다. 그러면 주어진 단말들의 그룹 U_k 에 대해 normalize된 채널 추정 오류는 다음과 같이 정의된다.

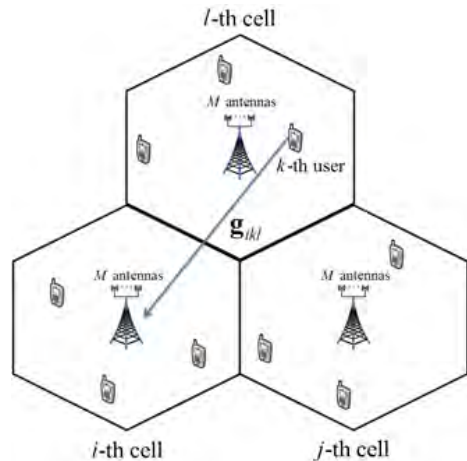


Fig. 1. System Model

$$e(U_k) = \frac{\sum_{j=1}^L MSE_j(U_k)}{\sum_{j=1}^L tr\{R_{jK_{kj}}(U_k)\}} \quad (4)$$

여기서 j 번째 셀의 기지국에서의 Mean Square Error(MSE)는 다음과 같이 정의 된다^[7].

$$MSE_j(U_k) = tr\left\{R_{jK_{kj}} - R_{jK_{kj}}^2 \left(\frac{\sigma_n^2}{\tau} I_M + \sum_{l=1}^L R_{jK_{kl}}\right)^{-1}\right\} \quad (5)$$

$R_{jK_{kj}}$ 은 j 번째 셀의 기지국과 j 번째 셀의 K_{kj} 단말과의 채널의 공분산 값으로 desired-term 이고 $l \neq j$ 일 때, $R_{jK_{kl}}$ 은 j 번째 셀의 기지국과 l 번째 셀의 K_{kl} 단말과의 채널의 공분산 값으로 interference-term 이다. 본 논문에서는 채널 추정 오류 $e(U_k)$ 를 최소화하는 단말들의 그룹을 구성하는 알고리즘을 제안한다.

2.2 종래 기술

본 절에서는 기존의 제안된 Exhaustive search 알고리즘과 Greedy search 알고리즘에 대해 알아본다^[7].

2.2.1 Exhaustive Search 알고리즘

Exhaustive search 알고리즘은 가능한 모든 단말의 조합에 대해서 채널 추정 오류를 계산하고 가장 작은 추정 오류를 가지는 조합에 대해서 같은 파일럿을 할당하는 알고리즘으로 다음과 같다.

Algorithm

Step1) $U^* = \arg \min_U e(U)$

여기서 $e(U) = \frac{\sum_{j=1}^L MSE_j(U)}{\sum_{j=1}^L tr\{R_{jK_{kj}}\}}$ 는

normalize된 채널 추정 오류이며, $MSE_j(U)$ 는 j 번째 셀의 desired 채널의 MSE이다. Exhaustive search 알고리즘은 최적의 성능을 나타낸다. 그러나 가능한 단말조합의 candidate의 수가 K^L 이므로 셀의 수가 증가함에 따라 exponential하게 복잡도가 증가한다는 큰 단점이 존재한다.

2.2.2 Greedy Search 알고리즘

Greedy search 알고리즘은 첫 번째 셀부터 L 번째 셀까지 순차적으로 같은 파일럿을 사용할 단말을 하나씩 선택하는 알고리즘으로 각 단계별로 채널 추정 오류 값이 가장 작은 단말을 선택한다. j 번째 단계에서의 normalize된 채널 추정 오류는 $e(U_k) = \frac{\sum_{j=1}^{|U_k|} MSE_j(U_k)}{tr\{R_{jK_{kj}}\}}$ 이고 $|U_k|$ 는 그룹 U_k 에 속해있는 단말의 개수이다. 그리고 j 번째 셀의 기지국에서의 MSE는 다음과 같이 계산된다.

$$MSE_j(U_k) = tr\left\{R_{jK_{kj}} - R_{jK_{kj}}^2 \left(\frac{\sigma_n^2}{\tau} I_M + \sum_{l=1}^{|U_k|} R_{jK_{kl}}\right)^{-1}\right\} \quad (6)$$

여기서 $R_{jK_{kj}}$ 는 j 번째 셀의 기지국과 j 번째 셀의 K_{kj} 단말과의 채널의 공분산 값이다.

Greedy search 알고리즘은 다음과 같다.

Algorithm

Step1) Initialize $U_k = \phi$

Step2) For $l = 1, \dots, L$

$$K_{kl} = \arg \min_{j \in \Xi} e(U_k \cup \{j\})$$

$$U_k \leftarrow U_k \cup \{K_{kl}\}$$

End

Greedy search 알고리즘은 각 셀에서 순차적으로 K 개의 단말에 대해서 채널 추정 오류를 계산하므로 총 KL 개의 candidate를 고려한다. 그러나 채널 추정 오류를 낮추는 데에 한계가 있다.

2.3 제안된 알고리즘

본 절에서는 PDI와 PDD 기법을 이용하여 새로운 알고리즘을 제안한다.

2.3.1 Greedy search with PDI 알고리즘

본 논문에서 제시하는 greedy search with PDI 알고리즘은 기존의 greedy search 알고리즘과 마찬가지로 각 셀마다 순차적으로 단말을 선택하지만 PDI를 추가적으로 고려한 알고리즘이다.

Greedy search with PDI 알고리즘에서는 greedy search 알고리즘처럼 각 단계별로 채널 추정 오류가 가장 작은 단말을 선택하지만 고려되는 MSE 값이 다

르다. 기존의 greedy search 알고리즘에서는 각 단계에서 MSE를 계산하여 단말을 선택한다. 그러나 MSE 계산 과정에서 이전 단계에서 선택된 단말에서 오는 간섭만 고려하기 때문에 성능 열화가 크다는 단점이 있다. 이는 채널 추정 오류가 적은 단말들을 선택해야 하는데, greedy search 알고리즘의 특성상 순차적으로 각 셀에서 단말을 하나씩 선택해 나가기 때문에, 각 단계에서 이전 단계에서 선택된 단말들만 고려되기 때문이다. 이를 보완해주기 위해서 제안된 알고리즘에서는 이후 단계에서 선택될 단말들을 고려해서 이로부터 오는 간섭 PDI를 추가적으로 고려해준다. 그러면 j 번째 셀의 기지국에서의 MSE 값은 PDI값이 추가되므로 다음과 같다.

$$MSE_{PDI,j}^F(U_k) = \text{tr} \left\{ \left(\mathbf{R}_{jK_{kl}} - \mathbf{R}_{jK_{kl}}^2 \times \left[\left(\frac{\sigma_n^2}{\tau} \mathbf{I}_M + \sum_{l=1}^{|U_k|} \mathbf{R}_{jK_{kl}} + \sum_{l=|U_k|+1}^L \mathbf{R}_{jl}^{IF} \right)^{-1} \right] \right) \right\} \quad (7)$$

여기서 \mathbf{R}_{jl}^{IF} 은 j 번째 셀의 기지국과 l 번째 셀의 단말과의 PDI 값이며 $\mathbf{R}_{jl}^{IF} = E[\mathbf{g}_{jl}^{IF} \mathbf{g}_{jl}^{IFH}]$ 로 나타낸다. \mathbf{g}_{jl}^{IF} 은 j 번째 셀의 기지국과 l 번째 셀에서 선택된 단말과의 채널이다. 그러나 파일럿을 할당하는 단말이 아직 선택되지 않았으므로 정확한 \mathbf{g}_{jl}^{IF} 값을 알 수 없다. 그러므로 정확한 PDI 값을 설정할 수 없다. PDI 값은 공분산 값으로 설정되지만 기지국에서 셀 내의 모든 공간에 대한 공분산 값을 알기에는 엄청난 복잡도가 요구되기 때문에 실질적으로 이를 알기 어렵다. 또한, 실제 시스템에서는 단말의 위치가 정확히 어디인지 알기 어렵기 때문에 공분산 값을 임의로 설정하는데 있어서 정보가 매우 부족하다. 따라서 본 논문에서는 제한적인 공분산 값들로 인해 간단히 단말이 이후 셀의 기지국과 동일한 위치에 있다고 가정한다. 본 논문과 다르게 PDI 값을 설정하여도 간섭으로 보이게 설정한다면 성능은 크게 달라지지 않을 것으로 추정된다.

$|U_k|$ 번째 단계에서, 제안한 알고리즘은 이전 셀에서 선택된 단말들과 j 번째 기지국과의 채널 공분산 값뿐만 아니라, 이후 셀에서 선택될 단말과 j 번째 기지국과의 PDI 값 $\sum_{l=|U_k|+1}^L \mathbf{R}_{jl}^{IF}$ 을 추가로 고려한다. 이 때 normalize된 채널 추정 오류는

$$e_{PDI}(U_k) = \sum_{j=1}^{|U_k|} MSE_{PDI,j}(U_k) / \text{tr}\{\mathbf{R}_{jK_{kl}}\} \text{이다.}$$

다음은 Greedy search with PDI 알고리즘을 나타낸다.

Algorithm

Step1) Initialize $U_k = \phi$

Step2) For $l = 1, \dots, L$

$$K_{kl} = \arg \min_{j \in \Xi} e_{PDI}(U_k \cup \{j\})$$

$$U_k \leftarrow U_k \cup \{K_{kl}\}$$

End

Greedy search with PDI 알고리즘은 Greedy search 알고리즘과 고려하는 candidate의 수는 같다. 그러나 greedy search 알고리즘의 주요 성능 열화의 원인인 각 단계에서 이전 단계에서 선택된 단말들로부터 오는 간섭만 고려하는 점을 보완해 줌으로서 채널 추정 오류를 줄일 수 있다.

2.3.2 Greedy search with PDI and PDD 알고리즘

본 논문에서 제시하는 greedy search with PDI and PDD 알고리즘은 앞에서 제시한 greedy search with PDI 알고리즘에 추가로 아직 파일럿이 할당되지 않은 셀의 desired-term을 고려한 알고리즘이다.

Greedy search with PDI and PDD 알고리즘에서는 각 단계에서 이후 단계에서 선택될 단말로부터 오는 간섭 PDI와 동시에 이후 단계에서 선택될 단말에게 영향을 주는 간섭 PDD를 모두 고려해 주는 알고리즘이다. Desired-term을 미리 고려하기 때문에, 이들은 이후의 셀에게 영향을 주는 간섭으로 고려된다. 따라서 j 번째 셀의 기지국에서의 MSE는 다음과 같이 계산된다.

여기서 PDD_j 는 j 번째 셀의 PDD 값으로, 이후 셀에서 어떤 단말이 선택될지 모르기 때문에 미리 지정한 공분산 값을 이용한다. PDD 값도 앞 절의 PDI 값처럼 공분산 값이고 알 수 있는 공분산 값은 매우 제한적이다. 그러나 PDI 값처럼 간단히 기지국과의 공분산 값으로 설정할 수는 없다. PDD 값은 desired-term으로 각 단계에 해당하는 셀의 기지국과 그 셀 내의 단말과의 공분산 값으로 설정되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 편의상 j 번째 셀의 PDD 값을 j 번째 셀의 기지국과 j 번째 셀에 분포된 각 유저들과의 채널의 공분산 값의 평균으로 고려하였다. 즉, j 번

$$\begin{aligned}
 & MSE_{PDD,j}(U_k) \\
 & = \begin{cases} \left\{ \text{tr} \left\{ \mathbf{R}_{jK_{kj}} - \mathbf{R}_{jK_{kj}}^2 \times \left(\frac{\sigma_n^2}{\tau} \mathbf{I}_M + \sum_{l=1}^{|U_k|} \mathbf{R}_{jK_{kl}} + \sum_{l=|U_k|+1}^L \mathbf{R}_{j_l}^{IF} \right)^{-1} \right\} \right\}, & \text{for } j \leq |U_k| \\ \left\{ \text{tr} \left(PDD_j - PDD_j^2 \times \left(\frac{\sigma_n^2}{\tau} \mathbf{I}_M + \sum_{l=1}^{|U_k|} \mathbf{R}_{jK_{kl}} + PDD_j \right)^{-1} \right) \right\}, & \text{else} \end{cases} \quad (8)
 \end{aligned}$$

제 셀에 K 개의 단말이 있을 때, j 번째 셀의 기지국과 j 번째 셀의 k 번째 단말과의 공분산 값을 \mathbf{R}_{jkj} 라고

하면 $PDD_j = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{R}_{jkj}$ 로 나타낼 수 있다.

기존의 greedy search 알고리즘과 greedy search with PDI 알고리즘에서는 각 단계에서 MSE의 합을 계산할 때, 이전단계에서 선택된 단말들의 MSE를 고려하고 이후단계에서 선택될 단말들의 MSE를 고려하지 않기 때문에 채널 추정 오류를 낮추는 데에 한계가 있다. 따라서 제안된 알고리즘에서는 $|U_k|$ 번째 단계에서, 첫 번째 셀부터 $|U_k|$ 번째 셀까지의 MSE를 고려하는 것이 아닌 모든 셀의 MSE를 고려하여 단말을 선택한다. 그러므로 $j \leq |U_k|$ 인 경우에는 PDI를 고려하고, $j > |U_k|$ 인 경우에는 PDD를 고려한다.

이 때 normalize된 채널 추정 오류는

$$e_{PDD}(U_k) = \sum_{j=1}^{|U_k|} MSE_{PDD,j}(U_k) / \text{tr} \{ \mathbf{R}_{jK_{kj}} \}$$

이다.

다음은 Greedy search with PDI and PDD 알고리즘을 나타낸다.

Algorithm

Step1) Initialize $U_k = \phi$

Step2) For $l = 1, \dots, L$

$$K_{kl} = \arg \min_{j \in \Xi} e_{PDD}(U_k \cup \{j\})$$

$$U_k \leftarrow U_k \cup \{K_{kl}\}$$

End

Greedy search with PDI and PDD 알고리즘도 greedy search 알고리즘과 candidate의 수는 같다. 추가적으로 고려하는 PDI와 PDD 값이 있지만 기존 단말들을 커버하므로 채널 추정 오류를 크게 줄일 수 있다.

III. 실험결과

이 절에서는 본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 실험 결과로 검증해 보도록 한다.

3.1 실험환경

시뮬레이션을 위한 실험 환경 정보는 표 1과 같다. 모든 경로의 AOA은 i.i.d. Gaussian 분포로 평균은 단말과 기지국간의 각도이고 표준편차 $\sigma = 10^\circ$ 이다. 성능 평가는 아래와 같은 normalize된 채널 추정 오류값으로 한다.

$$err = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{l=1}^L \|\hat{\mathbf{g}}_{lK_{kl}} - \mathbf{g}_{lK_{kl}}\|_F^2}{\sum_{l=1}^L \|\mathbf{g}_{lK_{kl}}\|_F^2} \right) \quad (9)$$

$\mathbf{g}_{lK_{kl}}$ 은 l 번째 셀의 k 번째 파일럿 신호 ψ_k 를 사용하는 단말과 l 번째 셀의 기지국간의 채널이고 $\hat{\mathbf{g}}_{lK_{kl}}$ 은 추정된 채널이다. 본 실험에서는 각 셀에 단말은 균일하게 분포한다고 가정하였다.

Table 1. Simulation setting

$L=7$	Number of cells
$r_{cell}[m] = 1000$	Cell radius
20dB	Cell edge SNR
$K=10$	Number of users per cell
3	Pathloss exponent
2GHz	Carrier frequency
$D = \lambda/2$	Antenna spacing
$M = 2 \sim 65$	Number of BS antenna
$P = 50$	Number of paths
$\tau = 10$	Pilot length

3.2 시뮬레이션 결과

3.2.1 채널 추정 오류 비교

그림 2는 7개의 셀로 구성된 cluster에서 기존의 알고리즘과 제안하는 알고리즘의 채널 추정 오류값을 비교한 그림이다. Greedy search 알고리즘의 경우, exhaustive search 알고리즘에 비해 큰 성능 열화가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 greedy search with PDI 알고리즘은 greedy search 알고리즘에 비해 2.5dB 정도 높은 성능을 보인다. 마지막으로

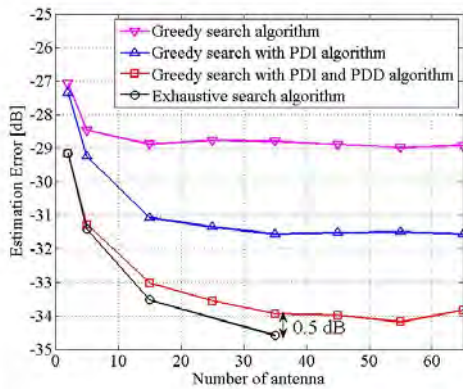


Fig. 2. Channel estimation error

greedy search with PDI and PDD 알고리즘은 exhaustive search 알고리즘에 비해 약 0.5dB만의 성능 열화를 보임을 확인할 수 있다.

3.2.2 복잡도 및 기저공간 시그널링 비교

제안된 알고리즘과 기존 알고리즘의 복잡도, 기저 공간 시그널링은 표 2와 같다. 표 2에서 확인할 수 있듯이 제안한 알고리즘의 복잡도는 exhaustive search 알고리즘에 비해서 매우 낮음을 확인할 수 있다. $K = 10$ 이고 $L = 3$ 인 경우 제안한 알고리즘들은 채널 추정 오류 계산 수면에서 exhaustive search 알고리즘에 비해 97% 이득을 가지며, $L = 7$ 인 경우 99.99% 이상의 이득을 가진다. 또한 시그널링 측면에서도 $L = 3$ 인 경우 25%, $L = 7$ 인 경우 33% 이상의 이득을 가진다. 반면에 제안한 알고리즘들은 기존의 greedy search 알고리즘에 비해서 채널 추정 오류 계산 수면에서 동일하며, 시그널링 측면에서는 $L = 3$ 인 경우 8%, $L = 7$ 인 경우 9%의 오버헤드만 요구된다.

Table 2. Complexity and signaling overhead comparison

Algorithm	Number of candidates	Signaling between BSs
Exhaustive search	K^L	KL^2
Greedy search	KL	$\frac{KL(L+1)}{2} + \frac{L(L-1)}{2}$
Greedy search with PDI	KL	$\frac{KL(L+1)}{2} + L(L-1)$
Greedy search with PDI and PDD	KL	$\frac{KL(L+1)}{2} + (L+1)(L-1)$

IV. 결론

본 논문에서는 상향링크 Massive MIMO에서 대두 되는 파일럿 오염을 최소화하기 위한 파일럿 신호 할당 알고리즘을 다루었다. 기존의 exhaustive search 알고리즘은 가장 좋은 성능을 나타내지만 매우 높은 복잡도를 요구한다. 이에 반해 greedy search 알고리즘은 복잡도가 낮다는 장점이 있지만 성능 열화가 크다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 복잡도는 낮으면서 exhaustive search 알고리즘에 가까운 성능을 가지는 알고리즘들을 제안하였다. 실험 결과를 통해 이를 확인할 수 있다.

References

- [1] H. Lee, B. Lee, and I. Lee, "Iterative detection and decoding with an improved V-BLAST for MIMO-OFDM systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 504-513, Mar. 2006.
- [2] H. Sung, S.-R. Lee, and I. Lee, "Generalized channel inversion methods for multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 11, pp. 3489-3499, Nov. 2009.
- [3] H. Lee, S. Park, and I. Lee, "Orthogonalized spatial multiplexing for closed-loop MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 5, pp. 1044-1052, May 2007.
- [4] K.-J. Lee, K. W. Lee, H. Sung, and I. Lee, "Sum-rate maximization for two-way MIMO amplify-and-forward relaying systems," in *Proc. Veh. Technol. Conf.*, pp. 1-5, Barcelona, Spain, Sept. 2009.
- [5] H. Huh, S.-H. Moon, Y.-T. Kim, I. Lee, and G. Caire, "Multi-Cell MIMO downlink with cell cooperation and fair scheduling: A large-system limit analysis," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 12, pp. 7771-7786, Dec. 2011.
- [6] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Process. Soc.*, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, Jan. 2013.

- [7] H. Yin, D. Gesbert, M. Filippou, and Y. Liu, "A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 264-273, Feb. 2013.
- [8] A. Ashikhmin and T. Marzetta, "Pilot contamination precoding in multi-cell large scale antenna systems," in *Proc. Int. Symp. Inf. Theory Proceedings*, pp. 2157-8095, Cambridge, MA, USA, Jul. 2012.

장 석 주 (Seokju Jang)



2012년 2월 : 고려대학교 전기
전자전파공학부 졸업
2012년 9월~현재 : 고려대학교
전자전기공학과 박사과정
<관심분야> multi-user MIMO,
Massive MIMO, full-duplex
systems

공 한 배 (Han-Bae Kong)



2009년 2월 : 고려대학교 전기
전자전파공학부 졸업
2015년 2월 : 고려대학교 전자
전기공학과 박사
2015년 3월~현재 : 고려대학교
전자전기공학과 Postdoctoral
fellow

<관심분야> Information theory and signal
processing, multi-cell network, relay network,
heterogeneous network

이 인 규 (Inkyu Lee)



1990년 2월 : 서울대학교 제어
계측공학과 졸업
1992년 1월 : 스탠포드대학교 전
자공학과 석사
1995년 6월 : 스탠포드대학교 전
자공학과 박사
2002년 9월~현재 : 고려대학교
전기전자공학부 정교수

<관심분야> Digital communication, signal
processing and coding technique applied to next
generation wireless systems