

Massive MIMO 시스템을 위한 효율적인 송신 안테나 선택 기법

주상임*, 이병진*, 김영재*, 김진업**, 방영조**, 김경석***

Efficient Transmit Antenna Selection Method for Massive MIMO system

Sang-Lim Ju*, Byung-Jin Lee*, Young-Jae Kim*, Jin-Up Kim**, Young-Jo Bang**, and Kyungseok Kim***

요 약

본 논문에서는 다중사용자 Massive MIMO 시스템 환경에서 계산 복잡도와 성능의 균형을 고려한 효율적인 송신 안테나 선택 기법을 제안한다. Massive MIMO 시스템은 차세대 5G 이동 통신의 목표 성능을 달성하기 위한 핵심 기술 중 하나로, 높은 주파수 효율과 신뢰성, 다중화 이득 등을 얻을 수 있다. 하지만 기지국에 장착되는 대규모 송신 안테나들과 RF chain은 높은 하드웨어 비용과 복잡도, 높은 소비 전력 등의 문제를 야기한다. 따라서 본 논문에서는 기지국의 RF chain의 수를 줄이는데 효과적인 송신 안테나 선택 기법을 연구하고, 기존의 기법에서 성능과 복잡도의 균형을 고려한 새로운 송신 안테나 선택 기법을 제안한다. 또한 주파수 효율 분석과 함께 최적의 안테나를 찾는 데 필요한 탐색 수 분석을 통해 각 송신 안테나 기법 별 성능과 복잡도를 나타낸다.

Key Words : Massive MIMO, transmit antenna selection, RF chain, spectral efficiency

ABSTRACT

This paper proposes the efficient transmit antenna selection (TAS) scheme considering trade-off between the performance and the complexity in massive MIMO system. The massive MIMO system is a core technology to achieve performance objectives for 5 generation wireless communication. It achieve high spectral efficiency, a reliability, and a diversity gain. However many RF chains required by massive transmit antennas equipped in a base station create the problem such as high hardware cost and complexity. Therefor we investigates the transmit antenna selection scheme, in which the number of RF chains of BS is reduced, and the trade-off between the performance and the complexity is considered for proposed scheme. And, the spectral efficiency and complexity are analysed by transmit antenna selection schemes.

I. 서 론

다중사용자 Massive MIMO 시스템은 기지국에서 수십 개에서 수백 개의 안테나를 사용하여 다수의 사용자와 동시에 통신할 수 있는 시스템으로, 차세대 5G 이동 통신을 위한 핵심 기술 중 하나다 [1],[2]. Massive MIMO 시스템은 대규모의 안테나를 기지국에 장착함으로써 채널의 독립성 및 대수의 법칙의 성질에 의해 MRT(Maximum Ratio Transmission)와 ZF(Zero Forcing), MMSE(Minimum Mean Squared Error)와 같은 간단한 정합 필터 및 선형 프리코딩 기법으로 사용자 간 간섭과 안테나 잡음 등을 제거할 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 또한 이를 통해 높은 다중화 이득과 안테나 수와 비례하는 주파수 효율 및 에너지 효율을 획득할 수 있다

[3]. 하지만 기지국에 장착되는 대규모의 안테나들은 각 안테나 마다 ADC와 DAC, 믹서, 필터 및 증폭기 등을 포함하는 RF (Radio Frequency) chain을 요구한다. 따라서 하드웨어의 복잡도와 시스템 비용 등이 매우 증가하게 되며, 높은 전력 소비가 요구되는 문제점이 유발된다. Massive MIMO 시스템에서 이러한 문제를 해결하기 위한 주요 연구로 송신 안테나 선택 기법이 고려되고 있다 [4]-[6].

송신 안테나 선택 기법은 기지국에 장착된 모든 안테나를 사용하는 대신에 최적의 안테나 집합만을 사용하여 최적의 성능을 달성하는 것을 목적으로 한다. 대표적인 송신 안테나 선택 기법으로는 전체 안테나 중 선택할 개수의 안테나로 조합되는 모든 가능한 안테나 부 집합 중 최적의 부 집합을 선택하는 Exhaustive search 방식이 있다 [6]. Exhaustive

* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [B0717-16-0028, 컴퓨팅이 융합된 가상화 기반 5G 이동통신 액세스 플랫폼 기술 개발]

*충북대학교 전자통신공학, **한국전자통신연구원, ***교신저자, 충북대학교 정보통신공학부(kseokkim@cbnu.ac.kr)

접수일자 : 2016년 8월 29일, 최종 게재 확정일자 : 2016년 9월 6일

search 방식은 가장 최적의 성능을 보일 수 있지만 가지의 부 집합에 대한 계산이 요구되므로 송신 및 선택되는 안테나의 개수에 비례하여 복잡도가 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서 Exhaustive search 방식에 비해 낮은 복잡도를 갖는 송신 안테나 기법에 대한 연구가 제안되고 있다 [7]-[13]. [9]-[12]에서는 Exhaustive search 방식에 비해 복잡도를 줄일 수 있도록 단계마다 최적의 안테나를 한 개씩 선택하여 최적의 부 집합을 구성하는 Greedy search 접근 방식의 송신 안테나 기법이 제안되었다. 가장 간단한 방식으로 전체 채널 이득 행렬에서 열벡터의 Norm 연산을 통해 송신 안테나를 선택하는 방식도 사용될 수 있지만, 이러한 연구는 복잡도를 줄이는 대신 사용자가 획득할 수 있는 전송률이 감소되는 문제점을 갖는다.

본 논문은 계산 복잡도와 성능의 균형을 고려한 효율적인 송신 안테나 선택 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 기존 낮은 복잡도를 갖는 기법을 사용하여 선택 안테나 부 집합의 후보군을 조합하고, 이 후보군 중 가장 최적의 성능을 갖는 하나의 부 집합을 선택한다. 본 논문의 다음의 구성을 따른다. II장에서 Massive MIMO 시스템 모델을 설명하고, III장에서는 기존의 송신 안테나 선택 기법에 대해 설명한다. IV장에서는 복잡도와 성능의 균형을 고려한 효과적인 송신 안테나 선택 기법을 제안한다. 기존의 기법과 본 논문에서 제안하는 기법의 주파수 효율 및 복잡도를 분석하여 V장에서 비교한다. VI에서는 결론을 짓는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 N개의 송신 안테나를 가지는 하나의 기지국과 단일 수신 안테나를 가지는 K명의 사용자가 존재하는 다중 사용자 Massive MIMO 시스템을 고려한다. 기지국은 독립된 데이터 스트림을 K명의 사용자에게 동시에 전송하며, 이때 기지국은 L개의 RF chain을 가지고 $N \geq L \geq K$ 를 만족한다. 본 논문에서는 기지국의 RF chain 수와 사용자의 수가 동일한 것으로 고려한다 ($L=K$). 또한 선형 프리코딩 기법 중 유저 간 간섭의 영향을 감소시키는 것에 효과적인 ZF에 의해 빔포밍되는 하향링크 MIMO 시스템을

고려하였다. 다중 사용자 massive MIMO 시스템에서 사용자들에게 수신되는 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y = Hx + n_0 \quad (1)$$

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} & \cdots & h_{1N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ h_{k1} & & \ddots & & h_{kN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ h_{K1} & \cdots & h_{Kn} & \cdots & h_{KN} \end{bmatrix} = [H_{K1} \ H_{K2} \ \cdots \ H_{KN}] \quad (2)$$

식 (1)에서 $H \in C^{K \times N}$ 는 채널 행렬이며, 식 (2)와 같다. h_{kn} 은 n번째 송신안테나로부터 k번째 단말기로의 채널 원소이다. $k=1, 2, \dots, K, n=1, 2, \dots, N$. H_{Kn} 은 n번째 송신 안테나와 K명의 사용자 사이의 $K \times 1$ 의 채널 벡터를 나타낸다. H의 각 원소들은 독립적이고, 평균이 0이고, 분산이 σ_n^2 인 복소 정규 분포를 따른다고 가정한다. 또한 사용자는 채널 행렬 H를 완벽하게 알고 있고 오차와 시간 지연 없이 피드백을 통해 기지국에 전송한다고 고려한다. $n_0 \in C^K$ 는 AWGN (additive white Gaussian noise)을 고려하였다. x는 ZF 프리코딩된 신호 벡터이며, 다음과 같이 표현한다.

$$x = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} Vq \quad (3)$$

$q \doteq [q_1 \ q_2 \ \cdots \ q_K]^T$ 이고, $V \in C^{N \times K}$ 는 ZF 프리코딩 행렬로, $V = H(H^H H)^{-1}$ 이다. 기지국에서 전체 송신 파워를 P_d 라고 할 때, 파워 정규화 팩터 γ 는 식(4)와 같이 표현되며, $E\{\|x\|^2\} = 1$ 을 만족한다.

$$\gamma = \frac{1}{P_d} \text{Tr}\{(HH^H)^{-1}\} \quad (4)$$

따라서, 모든 사용자들에 대한 수신 SNR (Signal to noise ratio)이 동일하다고 가정할 때, k번째 사용자에게 대한 수신 SNR은 다음 식과 같이 주어진다.

$$SNR_k = \frac{\gamma}{\sigma_n^2} = \frac{P_d}{\text{Tr}\{(HH^H)^{-1}\} \sigma_n^2} \quad (5)$$

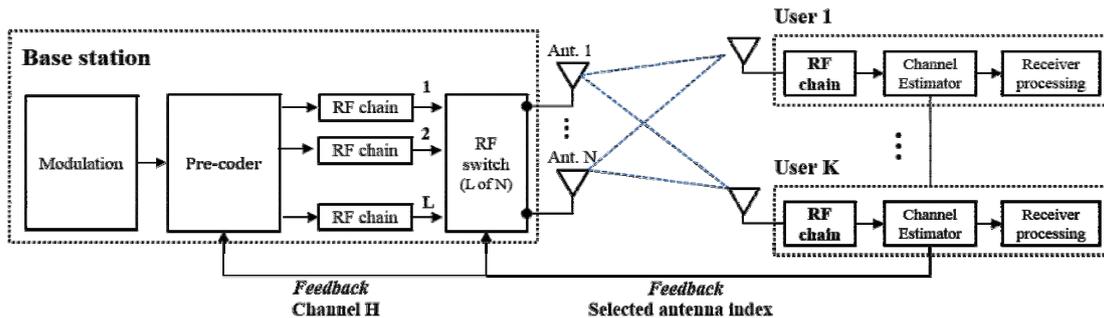


그림 1. Massive MIMO 시스템 모델

또한, 식 (1)-(4)에 따라, k 번째 사용자가 수신하는 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y_k = H_{kN}Vq + n_k \quad (6)$$

$$= H_{kN}v_kq_k + H_{kN} \sum_{i=1, i \neq k}^K v_iq_i + n_k$$

따라서 기지국으로부터 k번째 사용자의 SINR (Signal to interference plus noise ratio)은 다음과 같이 계산된다.

$$SINR_k = \frac{P_d |H_{kN}v_k|^2}{1 + P_d \sum_{k=1, k \neq j}^K |H_{kN}v_k|^2} \quad (7)$$

이에 따라 k번째 사용자가 획득할 수 있는 전송률 (sum-rate)은 다음과 같이 계산된다.

$$R_k = \log_2(1 + SINR_k) \quad (8)$$

Ⅲ. 송신 안테나 선택 기법

이번 장에서는 기존의 송신 안테나 선택 기법을 조사한다. 사용자들은 채널 정보를 기반으로 안테나 선택 기법을 사용하여 N개의 전체 송신 안테나 중 최적의 안테나 L개를 선택하고, L개 안테나의 인덱스를 기지국으로 귀환 채널을 통해 전송한다. 본 논문에서는 송신 안테나 선택 기법들의 연산 방식에 따라 Exhaustive search, Greedy search 방식으로 구분하였다.

1. Exhaustive search 방식

Exhaustive search 방식으로 송신 안테나를 선택하는 방법은 다음과 같다. 우선, 전체 채널 행렬 H에서 모든 가능한 조합에 따라 $K \times L$ 크기의 부 집합을 생성한다. 이 때 부 집합은 $C_L^N = M / (L!(N-L)!)$ 개가 생성되며, 생성된 전체 안테나 부 집합에 대하여 채널 정보에 기반 한 연산을 통해 최적의 안테나 부 집합을 찾는다.

Exhaustive search 방식에 따라 SNR을 최대화 하는 송신 안테나 부 집합을 선택하는 기법으로 ES-SBS (Exhaustive search - SNR based selection)가 있다 [13].

$$p^* = \underset{p \in s}{\operatorname{argmin}} \gamma_p \quad (9)$$

식 (9)에서 s는 전체 탐색 수로, $C_L^N = M / (L!(N-L)!)$ 개의 가능한 부 집합의 수를 나타낸다. γ_p 는 $\operatorname{Tr}\left\{\left(\tilde{H}_p \tilde{H}_p^H\right)^{-1}\right\}$ 이고, 식 (5)에 의해 γ_p 가 최소일 때 SNR이 최대가 된다. \tilde{H}_p 은

전체 부 집합 중 p 번째 $K \times L$ 의 부 집합 행렬을 나타낸다. 전체 부 집합에 대해서 식 (9)의 연산을 통해 SNR이 가장 큰 부 집합의 인덱스 p^* 가 도출되며, p^* 인덱스를 가진 부 집합의 열벡터에 해당하는 송신 안테나들이 최적의 안테나로 선택된다. Exhaustive search 방식은 모든 가능한 부 집합에 대해 조사가 이루어지므로, 가장 최적의 부 집합을 선택할 수 있지만, N과 K, L에 비례하여 기하급수적으로 높아지는 복잡도를 갖게 된다. 따라서 Exhaustive search 방식은 기지국에 대규모의 안테나가 장착되는 Massive MIMO 시스템에서 실제적인 구현이 불가능하다.

2. Greedy search 방식

Greedy search는 Exhaustive search에 비해 근사적인 방식으로, $K \times L$ 의 최적의 부 집합을 도출하기 위해 단계적으로 한 개씩 최적의 안테나를 선택한다. 본 논문에서는 최적의 안테나를 선택하기 위해 채널 용량을 계산하는 방식을 사용하는 CBRCs (Capacity based reduced complexity selection)를 다룬다 [9], [10].

첫 번째 최적의 안테나를 선택하기 위해 전체 채널 행렬 H의 모든 열벡터에 대한 채널 용량이 식(10)에 의해 계산된다.

$$C(H_{Ki}, \rho) = \log_2 \det(I_K + \rho H_{Ki} H_{Ki}^H) \quad (10)$$

식 (10)에 의해 계산된 $C(H_{Ki}, \rho)$, $i=1,2, \dots, N$, 에 대해 식 (11)과 같이 채널 용량이 가장 큰 열벡터의 인덱스를 도출한다.

$$P_1 = \underset{i \in N}{\operatorname{argmax}} \{C(H_{Ki}, \rho)\} \quad (11)$$

도출된 P1은 첫 번째로 선택되는 최적의 송신 안테나의 인덱스이다. 다음 단계로 $H_{K(P_1)}$ 벡터를 포함한 $i \neq P_1, i \in N$ 인 $H_{K(P_1, i)}$ $K \times 2$ 행렬의 채널 용량을 계산하여 채널 용량이 최대가 되는 두 번째 안테나 인덱스 P2를 선택한다. 같은 방식으로 최적의 L번째 안테나는 식(12), (13)에 의해 선택된다.

$$C(H_{K(P_1, P_2, \dots, P_{L-1}, i)}, \rho) \quad (12)$$

$$= \log_2 \det\left(I_K + \frac{\rho}{L} H_{K(P_1, P_2, \dots, P_{L-1}, i)} H_{K(P_1, P_2, \dots, P_{L-1}, i)}^H\right)$$

$$P_L = \underset{i \in N}{\operatorname{argmax}} \{C(H_{K(P_1, P_2, \dots, P_{L-1}, i)}, \rho)\} \quad (13)$$

CBRCs 기법은 P1부터 PL까지 최적의 송신 안테나를 찾기 위해 $\sum_{i=N-L+1}^N i$ 번의 탐색이 요구된다.

IV. 제안하는 송신 안테나 선택 기법

본 논문에서는 성능과 복잡도의 균형을 고려한 송신 안테나 선택 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 전체 송신 안테나 중 선택 안테나 개수에 따라 조합되는 부 집합 후보군을 도출하는 단계와 도출된 부 집합들 중 최적의 부 집합을 선택하는 단계로 구성된다. 먼저, 본 논문에서는 전체 채널 행렬에 대해 앞서 III장에서 설명한 Greedy search 방식을 기반으로 채널 용량을 계산하여 재 정렬한다. 우선 식 (10)-(13)와 같은 방식으로 P1부터 PN까지 안테나 인덱스를 도출하고, 인덱스에 따라 전체 행렬 \tilde{H} 를 식 (14)와 같이 재 정렬한다. 이 때, $\sum_{i=2}^N i$ 번의 탐색이 요구된다.

$$H_{\tilde{K}(P_1, \dots, P_N)} = [\tilde{H}_{\tilde{K}_1} \tilde{H}_{\tilde{K}_2} \dots \tilde{H}_{\tilde{K}_N}] = \tilde{H} \quad (14)$$

다음 단계로 재 정렬된 \tilde{H} 에 대해 부 집합을 구성한다. 선택할 송신 안테나의 개수가 L이므로, 재 정렬된 \tilde{H} 에서 $\tilde{H}_{\tilde{K}_1}$ 부터 $\tilde{H}_{\tilde{K}_L}$ 까지 K×L 행렬을 첫 번째 부 집합으로 구성한다. 계속해서 $\tilde{H}_{\tilde{K}_2}$ 부터 $\tilde{H}_{\tilde{K}_{(L+1)}}$ 까지 행렬을 두 번째 부 집합으로 구성하며, 같은 방식으로 $\zeta = N - L + 1$ 개의 부 집합들을 구성할 수 있다. 이 때, j 번째 부 집합은 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$S^j = [\tilde{H}_{\tilde{K}_j} \tilde{H}_{\tilde{K}_{(j+1)}} \dots \tilde{H}_{\tilde{K}_{(j+L-1)}}] \quad (15)$$

$j \in \zeta$ 이다. 구성된 부 집합들에 대해 식(9)에 의해 SNR을 최대로 하는 부 집합을 도출한다. 이때, γ_p 는 다음과 같이 주어진다.

$$Tr\{(S^j S^{j'})^{-1}\} \quad (16)$$

식 (16)에서 $(S^j S^{j'})^{-1}$ 를 풀면 식 (17)과 같다. S_{kL}^j 는 j번째 부 집합 S에서 L개의 송신 안테나로부터 k번째 사용자로의 $1 \times L$ 채널 벡터다. 따라서 $(S_{kL}^j)^2$ 은 식 (18)과 같이 계산된다.

$$(S^j S^{j'})^{-1} = \begin{bmatrix} (S_{1L}^j)^2 & \dots & S_{1L}^j S_{kL}^j & \dots & S_{1L}^j S_{KL}^j \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{kL}^j S_{1L}^j & & (S_{kL}^j)^2 & & S_{kL}^j S_{KL}^j \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{KL}^j S_{1L}^j & \dots & S_{KL}^j S_{kL}^j & \dots & (S_{KL}^j)^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (17)$$

$$(S_{kL}^j)^2 = |\tilde{h}_{kj}|^2 + |\tilde{h}_{k(j+1)}|^2 + \dots + |\tilde{h}_{k(j+L-1)}|^2 \quad (18)$$

식 (17)에서 $(S^j S^{j'})^{-1} = \tilde{G}^j$, $\tilde{G}^j \in C^{K \times K}$ 라 하면, 식 (19)에 의해 식 (16)의 값이 도출된다.

$$\gamma_j = \sum_{i=1}^K \tilde{g}_{ii}^j \quad (19)$$

식 (5)에 의해서 γ_j 가 최소가 될 때 SNR이 최대가 되므로, 식 (20)에 의해 최소의 γ_j 를 갖는 부 집합의 인덱스를 도출한다.

$$j^* = \arg \min_{j \in \zeta} \{\gamma_j\} \quad (20)$$

결과적으로 도출된 j^* 인덱스를 가진 부 집합 S^{j^*} 가 최적의 부 집합으로 선택된다. 최적의 송신 안테나를 찾기 위해, 총 $\sum_{i=2}^N i + N - L + 1$ 번의 탐색이 요구된다.

V. 실험 및 결과

이번 장에서는 시뮬레이션을 통해 기존의 송신 안테나 선택 기법과 제안하는 기법의 성능 및 복잡도를 비교한다. 본 논문에서는 성능의 비교를 위해 III장에서 설명한 ES-SBS와 CBRCS 외에 전체 채널 행렬에서 송신 안테나의 채널 정보에 해당하는 열벡터에 대해 norm 값을 계산하는 방식의 NBS (Norm based selection), 그리고 안테나 선택 기법을 적용하지 않고 N=L인 MIMO 시스템(No selection)의 성능을 제시한다. 각 송신 안테나 선택 기법 별 성능은 식 (21)에 의해 계산되는 주파수 효율을 통해 나타내었다.

식 (21)에서 R_k 는 k번째 사용자가 획득할 수 있는 전송률을 의미하며, 식 (7)과 같이 계산된다.

$$SE = \sum_{k=1}^K R_k \quad (21)$$

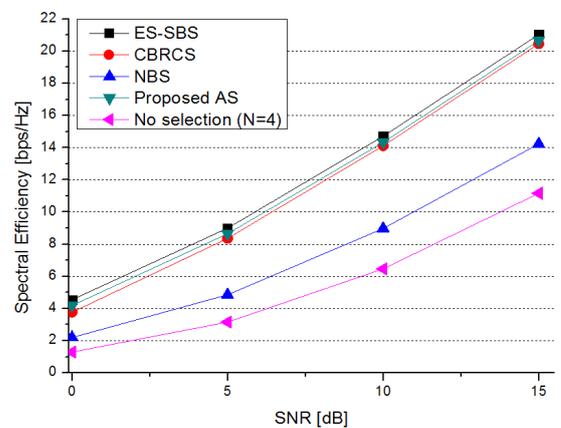


그림 2. N=32, K=4, L=4의 Massive MIMO 시스템에서 송신 안테나 선택 기법에 따른 주파수 효율

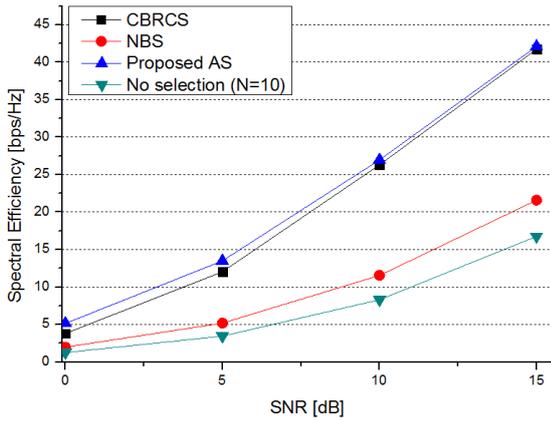


그림 3. N=64, K=10, L=10의 Massive MIMO 시스템에서 송신 안테나 선택 기법에 따른 주파수 효율

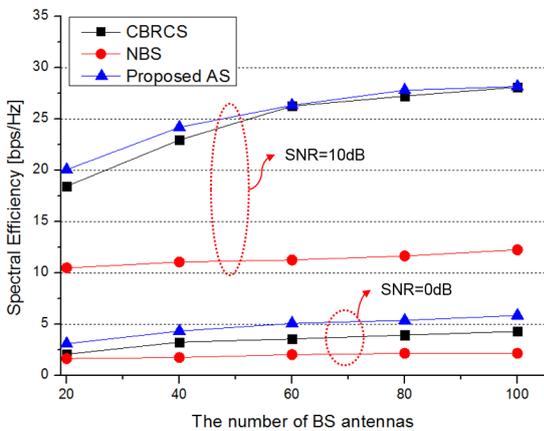


그림 4. 송신 안테나 개수 증가에 따른 안테나 선택 기법의 주파수 효율, K=10, L=10

그림 2는 기지국의 안테나 수(N)가 32개이고, 사용자(K)가 4명, RF chain의 수(L)가 4개인 Massive MIMO 시스템 환경에서 SNR에 따른 전체 사용자에 대한 주파수 효율을 나타낸다. SNR 10 dB를 기준으로, ES-SBS 기법이 14.7 bps/Hz의 가장 높은 주파수 효율을 보였다. 제안한 기법은 14.3 bps/Hz, CBRCS는 14.1 bps/Hz, 마지막으로 NBS는 8.9 bps/Hz의 주파수 효율로, 제안한 기법은 CBRCS보다 최적의 기법인 ES-SBS 기법의 성능에 근접한 주파수 효율을 보였다. 또한 안테나 선택 기법을 적용하지 않은 No selection의 경우 6.4 bps/Hz의 주파수 효율을 보였다. 제안한 기법과 비교하면, 동일한 수의 RF chain을 사용함에도 약 7.9 bps/Hz의 주파수 효율 차이를 보였다. 그림 3은 기지국의 안테나 수(N)를 64개로 증가 시킨 Massive MIMO 시스템의 환경에서의 주파수 효율을 분석한 결과이다. 사용자의 수(K)와 RF chain의 수(K)는 각각 10명, 10개로 설정하였다. ES-SBS의 경우 C_{10}^{64} 의 부 집합에 대한 연산이 요구되므로, 실제적인 구현이 불가능하여 분석에서 제외하였다. 그림 3에서 SNR 10 dB를 기준으로, 제안하는 기법은 26.9 bps/Hz의 주파수 효율을 보였다. CBRCS와 NBS에 비해 각각 0.7 bps/Hz, 15.4 bps/Hz 향상되었으며, 안테나 선택 기법을 사

용하지 않고 RF chain을 10개 사용한 No selection과는 18 bps/Hz의 주파수 효율 차이를 보였다. 전체적인 결과에서 제안하는 기법은 SNR이 낮을 때 보다 더 효과적인 결과를 도출하는 것으로 나타났다.

그림 4는 사용자(K)가 10명이고 RF chain의 수(K)가 10개 일 때, 기지국의 안테나 수(N) 증가에 따른 주파수 효율을 나타낸다. SNR이 0, 10 dB 인 환경에 대해 각각 분석하였다. SNR이 0 dB 일 때, 기존 CBRCS, NBS에 비해 제안한 기법의 주파수 효율은 약 2~3 bps/Hz 높은 결과를 보였다. SNR이 10 dB 인 경우에는 NBS와 10 bps/Hz 이상 크게 차이는 주파수 효율을 보였다. CBRCS와는 기지국의 안테나 수가 60개 이하인 경우에 1~2 bps/Hz 높은 주파수 효율을 보였다.

마지막으로 기존의 송신 안테나 선택 기법과 제안한 기법 간 복잡도를 비교하기 위해, 각 기법 별로 최적의 송신 안테나를 찾기 위해 요구되는 전체 탐색 수와 탐색이 완료하기까지 소요되는 시간을 분석한다. 표 1은 N=32, K=4, L=4인 Massive MIMO 시스템에서 송신 안테나 선택 기법 별 요구되는 탐색 수를 나타낸다. ES-SBS는 C_L^N 에 따라 35,960개의 부 집합에 대한 탐색이 필요하다. 다음 CBRCS는 단계별 최적의 안테나를 선택하기 위해 요구되는 탐색 수를 정리하면

$\sum_{i=N-L+1}^N i$ 로, 총 122번의 탐색이 요구된다. NBS는 32번의 탐색이 요구된다. 마지막으로 제안하는 기법은 먼저 전체 채널 행렬의 재 정렬을 위해 $\sum_{i=2}^N i$ 번의 탐색이 필요하다. 재 정렬된 행렬에서 조합되는 N-L+1개의 부 집합들에 대해 탐색이 수행되므로, $N-L+1 + \sum_{i=2}^N i$ 에 의해 총 556번의 탐색이 요구된다. 각 기법에서 요구하는 탐색 수와 계산 방법에 따라, 최적의 안테나를 찾기까지 소요되는 시간은 그림 5에 나타내었다. ES-SBS가 약 1.95초의 시간이 필요했으며, NBS는 약 0.053초, CBRCS는 0.056초의 시간을 필요로 하였다. 마지막으로 제안하는 기법은 0.06초의 시간이 소요되었다.

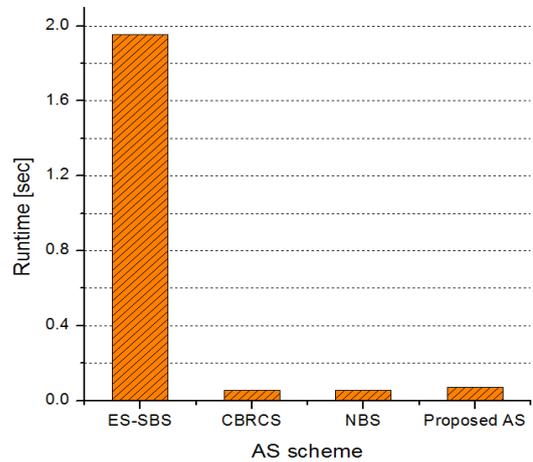


그림 5. 최적의 송신 안테나를 선택하기 위해 소요되는 탐색 시간 (N=32, K=4, L=4)

표 1. 송신 안테나 선택 기법 별 복잡도 (요구되는 탐색 수)

TAS 기법	탐색 수	N=32, K=4, L=4
ES-SBS	C_L^N	35,960
CBRCS	$\sum_{i=N-L+1}^N i$	122
NBS	N	32
Proposed AS	$N-L+1 + \sum_{i=2}^N i$	556

VI. 결론

본 논문은 다중 사용자와 통신하는 Massive MIMO 시스템에서 성능과 복잡도의 균형을 고려하여 최적의 안테나 집합을 선택할 수 있는 효율적인 송신 안테나 선택 기법을 제안하였다. 제안한 송신 안테나 선택 기법과 기존의 기법의 성능을 주파수 효율 분석을 통해 비교하였다. 또한 최적의 안테나를 선택하기까지 요구되는 탐색 수와 소요시간을 분석하였다. 시뮬레이션 결과는 제안한 기법이 최적의 기법인 ES-SBS에 가장 근접한 주파수 효율을 보였고, 특히 낮은 SNR에서 효과적인 성능을 달성하는 것을 보여준다. 복잡도 측면에서 볼 때, 제안하는 기법에 대해 요구되는 탐색 수와 소요시간은 기존의 CBRCS와 NBS에 비해 다소 증가하였지만, ES-SBS에 비해서는 크게 감소한 결과를 보였다.

참고 문헌

- [1] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590 - 3600, Nov. 2010.
- [2] 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. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40 - 60, Jan. 2013.
- [3] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 4, April 2013.
- [4] H. Li, L. Song, and M. Debbah, "Energy Efficiency of Large-Scale Multiple Antenna Systems with Transmit Antenna Selection," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 2, pp. 638-647, February 2014.
- [5] M. Gkizeli and G.N. Karystinos, "Maximum-SNR Antenna Selection Among a Large Number of Transmit Antennas," *IEEE Journal of selected topics in signal processing*, vol. 8, no. 5, pp. 891-901, October 2014.
- [6] B. Lee, L. Ngo and B. Shim, "Antenna group selection based user scheduling for massive MIMO systems," *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) 2014*, pp. 3302-3307, Dec. 2014.

- [7] A. F. Molisch and M. Z. Win, "MIMO systems with antenna selection," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 5, no. 1, pp. 45 - 56, Mar. 2004.
- [8] A. F. Molisch, M. Z. Win, and J. H. Winters, "Reduced-complexity transmit/receive diversity systems," *IEEE Trans. Signal Processing*, special issue on MIMO, p. in press, 2003.
- [9] Alexei Gorokhov, "Antenna Selection Algorithms for MEA Transmission Systems," *Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2002 IEEE International Conference on*. Vol. 3. IEEE, 2002.
- [10] M. Gharavi-Alkhansari and A. B. Greshman, "Fast Antenna Subset Selection in MIMO Systems," *IEEE Trans. Sig. Proc.*, vol. 52, no. 2, pp. 339-347, Feb. 2004.
- [11] P.H. Lin and S.H. Tasi, "Performance Analysis and Algorithm Designs for Transmit Antenna Selection in Linearly Precoded Multiuser MIMO Systems," *IEEE Trans. vehicular technology*, vol. 61, no. 4, pp. 1968-1708, May 2012.
- [12] J. Zheng and J. Chen, "Further Complexity Reduction for Antenna Selection in Spatial Modulation Systems," *IEEE Commun. letters*, vol. 19, no. 6, pp. 937-940, June 2015.
- [13] M. Mohaisen and K. Chang, "On transmit antenna selection for multiuser MIMO systems with dirty paper coding," *2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. IEEE, pp.3074-3078, 2009.

저자

주 상 임(Sang-Lim Ju)



- 2014년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 공학사
- 2016년 2월 : 충북대학교 전자공학과 공학석사
- 2016년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야> : 디지털라디오, 가시광 통신, MIMO-OFDM

이 병 진(Byung-Jin Lee)



- 2013년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 공학사
- 2013년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전자공학과 석박사 통합과정

<관심분야> : 가시광 통신, Cognitive Radio, 전력선 통신, MIMO-OFDM

김 영 재(Young-Jae Kim)



- 2015년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 공학사
- 2015년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전파통신공학과 석사 과정

<관심분야> : 디지털라디오, 가시광통신, 전력선 통신, MIMO-OFDM

김 진 업(Jin-Up Kim)



- 1985년 : 고려대학교 전자공학과 공학사
- 1987년 : 한국과학기술원 전기및 전자공학과 공학석사
- 1996년 : 한국과학기술원 전기및 전자공학과 공학박사

· 1987년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> : SDR 및 Cognitive Radio 기술, 기지국 가상화, 이동통신 시스템, Data Compression, 채널코딩 등

방 영 조(Young-jo Bang)



- 1989년 : 연세대학교 전기공학과 졸업 공학사
- 1991년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업 공학석사
- 1997년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업 공학박사

· 1997년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> : MIMO 모델 기술, 이동통신 신호처리

김 경 석(Kyungseok Kim)



- 1989년 1월 ~ 1998년 12월 : 한국전자통신연구원 무선통신연구단 선임연구원
- 1999년 1월 ~ 2002년 3월 : University of Surrey(영국) 전기전자공학과 대학원 졸업(공학박사)

· 2002년 2월 ~ 2004년 8월 : 한국전자통신연구원 이동통신연구단 책임연구원

· 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 전북대학교 생체정보공학부 전임강사

· 2005년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 정보통신공학과 부교수

<관심분야> : SDR, Cognitive Radio, MIMO-OFDM, 전력선 통신, 가시광통신, 디지털라디오, 전파채널분석, 전파감시/관리시스템, 위성망분석