

MIMO 시스템을 위한 저 복잡도 송신 안테나 선택 알고리즘

서동민*, 손혁민^o

Low-Complexity Transmit Antenna Selection Algorithm in MIMO Systems

Dongmin Seo*, Hyukmin Son^o

요 약

안테나 선택 기법은 하드웨어 비용을 줄이며, 최대 채널 용량을 얻기 위한 기술이다. 기존 연구에서는 고정된 개수만큼의 최적의 안테나를 선택하는 연구가 진행되어왔다. 선택해야 하는 안테나 수가 고정되지 않은 환경에서 기존 기술의 적용은 복잡도면에서 부적합하다. 본 논문에서는 선택해야 하는 안테나 수의 제약이 없는 환경에서 최대 채널 용량을 얻을 수 있는 최적의 안테나 선택 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안된 방법이 기존 기술 대비 낮은 복잡도로 완전 탐색 기법과 동일한 성능을 얻을 수 있다.

Key Words : MIMO, Transmit Antenna Selection, Capacity, Complexity

ABSTRACT

Antenna selection techniques have been investigated to reduce the required hardware costs and to maximize the channel capacity. In conventional researches, a fixed number of antennas are selected to maximize the capacity. In this letter, an optimal transmit antenna selection algorithm is proposed to maximize the capacity, in which the number of selected transmit antenna is not fixed.

Through simulation and analysis, it is demonstrated that the proposed algorithm has the identical channel capacity with the exhausted search case. In addition, its computational complexity is decreased compared to the conventional algorithm.

I. 서 론

Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 시스템은 송/수신 양단에 다중 안테나를 사용하여 높은 채널 용량을 얻을 수 있다. 다중 안테나는 RF chain의 수가 증가함에 따라 하드웨어 부품의 설치비용이 증가한다. 기존 연구에서는 RF chain의 수를 특정 개수로 제약하고 RF chain 개수만큼 최적의 안테나를 선택하는 연구들이 수행되었다.^[1,2]

논문 [1]은 수신단에서 특정 개수의 안테나를 선택하기 위해 점진적으로 안테나 개수를 증가시키거나 감소시키는 방법을 제안했으며, 논문 [2]는 논문 [1]에서 점진적으로 안테나 개수를 증가시키는 방식을 송신단으로 확장한 내용이다.

최근 5G 통신에서는 Massive MIMO 시스템에 대한 연구들이 진행 중이다.^[3] 기존 연구에서 선택할 안테나의 수가 많은 경우, 최적의 안테나 선택 기술은 논문 [1]에서 제안한 안테나를 점진적으로 감소시키는 방법이다. 반면, Full digital MIMO 기술과 같이 RF chain에 대해 제약이 없는 환경에서 기존 기술의 적용은 복잡도면에서 적합하지 않다.

따라서 본 논문에서는 점진적으로 안테나를 개수를 감소시키는 방식으로 RF chain의 제약 유무와 상관없이 적용 가능한 송신 안테나 선택 방식을 제안한다. 기존의 제안된 방법들보다 저 복잡도로 완전 탐색 기법과 동일한 성능을 얻을 수 있다.

II. 시스템 모델

N_r 개의 수신 안테나와 N_t 개의 송신 안테나로 구성된 MIMO 시스템을 고려한다. 채널은 Rayleigh frequency flat으로 가정하였으며, 신호모델은 다음과 같다.

*이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1C1B5016402).

• First Author : Wonkwang University Department of Electronic Engineering, sdm3043@gmail.com, 정희원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-1677-8111)Wonkwang University Department of Electronic Engineering, hson102@wku.ac.kr, 정희원

논문번호 : 201812-382-A-LU, Received December 10, 2018; Revised January 4, 2019; Accepted January 7, 2019

$$y = \sqrt{\frac{SNR}{N_t}} Hx + w \quad (1)$$

y 은 $N_r \times 1$ 수신된 신호, x 은 $N_t \times 1$ 송신된 신호, 그리고 w 은 수신 안테나에서 $N_r \times 1$ 를 갖는 백색 가우시안 잡음을 나타낸다. H 는 송/수신 안테나가 형성하는 $N_r \times N_t$ 의 채널 행렬을 의미한다.

채널 H 는 수신단에서 완벽하게 알고 있으며, 채널 정보에 대한 피드백은 오차와 지연 없이 송신단에 전 송된다고 가정하였다. 또한, 식 (1)의 임의의 채널 H 에 대한 채널용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C &= \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{SNR}{N_t} HH^H \right) \\ &= \log_2 \det \left(I_{N_t} + \frac{SNR}{N_t} H^H H \right) \end{aligned} \quad (2)$$

I_n 는 $n \times n$ 크기의 항등 행렬이며, $\det(\cdot)$ 는 행렬식, 그리고 $(\cdot)^H$ 는 에르미트 행렬이다.

식(2)에서 보여 지듯이 송신 안테나 선택의 경우 송신 안테나 수가 감소함에 따라 할당되는 송신 전력 할당량이 변하게 되어 안테나 선택을 하지 않는 경우 대비 채널 용량을 개선시킬 여지가 있다.

III. 송신 안테나 선택 알고리즘

제안하는 알고리즘의 절차는 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 표의 우측 열은 각 절차에 대한 복잡도를 Big-O표기법으로 나타낸 것이다. 제안하는 알고리즘에서는 송신 안테나 선택을 위해 채널 용량 개선에 도움이 되지 않는 송신 안테나를 하나씩 제거하는 방식이다.

Step 1-2 과정은 $N_r \times N_t$ 채널을 H_{N_t} 이라고 가정했을 때, 채널에 대한 행렬의 열 인덱스 I 와 채널 H_{N_t} 의 채널용량을 나타낸 것이다.

Step 4-16 과정은 점진적으로 송신 안테나를 제거하여, 최적의 송신 안테나를 선택하는 과정이다. H_{N_t} 채널에서 하나의 송신 안테나가 제거되는 경우, H_{N_t-1} 채널에 대한 용량은 다음과 같이 유도 된다.

$$\begin{aligned} C_{N_t-1} &= \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{SNR}{N_t-1} (H_{N_t} H_{N_t}^H - h_j h_j^H) \right) \\ &= \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{SNR}{N_t-1} H_{N_t} H_{N_t}^H \right) \\ &\quad + \log_2 \left(1 - h_j^H \left(\frac{N_t-1}{SNR} I_{N_r} + H_{N_t} H_{N_t}^H \right)^{-1} h_j \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$= \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{SNR}{N_t-1} H_{N_t} H_{N_t}^H \right) + \log_2 (1 - h_j^H B h_j) \quad (4)$$

이때, $B = \left(\frac{N_t-1}{SNR} I_{N_r} + H_{N_t} H_{N_t}^H \right)^{-1}$ 로 정의할 수 있다.

식 (3)에서 h_j 는 H_{N_t} 채널에서의 j 번째 송신 안테나 채널에 해당되며, 식 (4)에서 h_j 는 H_{N_t} 채널에서 제거할 J 번째 송신 안테나 채널을 나타낸다. 따라서 식 (4)으로부터 C_{N_t-1} 채널 용량을 최대화하기 위한 제거될 송신 안테나는 step 5을 기준으로 선택된다. 이 중 step 9-14 과정은 step 5에 해당된 B 을 논문 [1]에서 이용된 matrix inversion lemma를 통해 다음과 같이 업데이트 시킬 수 있다.

표 1. 제안하는 알고리즘
Table 1. Proposed algorithm

Step	Pseudocode	Big-O
1	$I = \{1, 2, \dots, N_t\}$	
2	$C_{N_t} = \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{SNR}{N_t} H_{N_t} H_{N_t}^H \right)$	
3	$B = \left(\frac{N_t-1}{SNR} I_{N_r} + H_{N_t} H_{N_t}^H \right)^{-1}$	$\mathcal{O}(N_r^3)$
4	for $n = (N_t - 1) : -1 : 1$	
5	$J := \arg \min_{j \in I} h_j^H B h_j$	$\mathcal{O}(N_r^2 N_t^2)$
6	$I := I - \{J\}$	
7	$H_n := H_{n+1} \setminus \{h_J\}$	
8	$C_n := \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{SNR}{n} H_n H_n^H \right)$	
9	if $n < (N_t - 1)$	
10	$K := \left(B^{-1} - \frac{1}{SNR} I_{N_r} \right)^{-1}$	$\mathcal{O}(N_r^3 N_t)$
11	$\beta := h_J^H K h_J$	$\mathcal{O}(N_r^2 N_t)$
12	$\alpha := K h_J$	$\mathcal{O}(N_r^2 N_t)$
13	$B := K + \frac{1}{1-\beta} \alpha \alpha^H$	$\mathcal{O}(N_r^2 N_t)$
14	end	
15	end	
16	$C_{\max} = \max_{1 \leq n \leq N_t} C_n$	

$$B := \left(\frac{N_t - 2}{SNR} I_{N_r} + H_{N_t} H_{N_t}^H - h_r h_r^H \right)^{-1} = K + \frac{1}{1 - \beta} \alpha \alpha^H \quad (5)$$

Step 17은 N_t 개의 송신 안테나 중 표 1의 알고리즘을 통해 제거할 송신 안테나들을 선택하여 순차적으로 얻을 수 있는 채널 용량 중에서 최대의 채널 용량을 얻을 수 있는 송신 안테나들을 선택하는 과정이다.

IV. 모의실험 결과

논문 [1]에서 제안한 점진적으로 수신 안테나를 감소시키는 방법을 송신단으로 확장시킨 경우, Reference 방식이라 정의한다. 그림 1 그리고 그림 2은 송신 안테나를 점진적으로 감소시켰을 때, 최적의 안테나로 구성된 채널 용량을 나타낸 그림이다. 그림 1은 4×4 채널에서 제안된 방법을 통한 채널 용량은 완전 탐색을 통한 채널 용량, Reference을 통한 채널 용량과 동일한 결과를 얻을 수 있었으며, SNR이 낮은 구간에서 송신 안테나를 모두 사용한 채널 용량보다 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. 그림 2은 SNR이 5dB인 환경에서 4개의 수신 안테나와 4, 8, 16, 32, 64개의 송신 안테나에 따른 채널을 생성하여, 송신 안테나 모두를 사용한 채널 용량과 최적의 송신 안테나로 얻을 수 있는 채널 용량을 비교한 그림이다. 실험 결과를 통해 송신 안테나의 수가 증가함에 따라 송신 안테나를 선택하지 않은 채널 용량 대비 성능이 개선된 것을 확인할 수 있다. 이는 송신 안테나 수에 따른 차원이 증가함에 따라 더 좋은 안테나 선택을 통한 선택적 다이버시티 이득을 통해 채널 용량 개선효과를 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 반면 Reference 복잡도는 고정된 수의 최적의 송신 안테나를 선택하는데

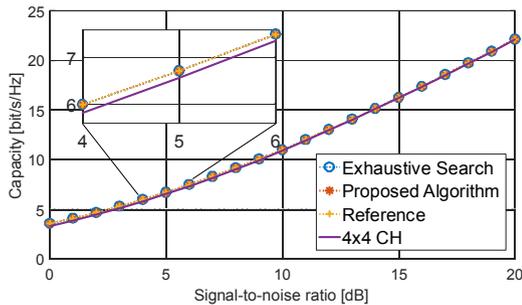


그림 1. 4×4 채널에서 SNR 분포 별 최대 채널 용량
Fig. 1. Maximum channel capacity versus the SNR when 4×4 antenna system

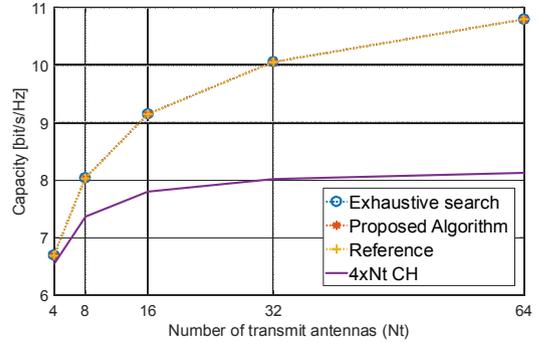


그림 2. SNR=5dB에서 송신 안테나 개수 별 최대 채널 용량
Fig. 2. Maximum channel capacity versus number of transmit antennas when SNR=5dB

$O(N_r^2 N_t^2)$ 를 필요로 하므로^[1], 최적의 안테나 수를 고려하여 찾는 경우 고정된 안테나 수에서 최적의 안테나를 찾는 과정을 $N_t - 1$ 번 수행해야 한다. 그러므로 Reference 복잡도는 $O(N_r^2 N_t^3)$ 가 되며, 제안된 방법은 $O(\max\{N_r, N_t\} N_r^2 N_t)$ 으로 기존 Reference 대비 복잡도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 최적의 송신 안테나를 선택하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법은 SNR이 낮은 구간에서 채널 용량이 개선된 것을 확인할 수 있었으며, 완전 탐색 및 Reference 방식 대비 복잡도를 현저히 줄일 수 있었다.

References

- [1] M. Gharavi-Alkhansari and A. Greshman, "Fast antenna subset selection in MIMO systems," *IEEE Trans. Sig. Proc.*, vol. 52, no. 2, pp. 339-347, Feb. 2004.
- [2] H. Kim, R. Kim, J. Kim, and Y. Byun, "Efficient selection methods of transmit-receive antennas based on channel capacity for MIMO systems," *J. KICS*, vol. 31, no. 11C, pp. 1092-1099, Nov. 2006.
- [3] H. C. Kim and W. Sung, "Design and performance gain evaluation of a multi-rank codebook utilizing statistical properties of the spatial channel model," *J. KICS*, vol. 41, no. 07, pp. 723-731, Jul. 2016.