

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.1.43>
JIIBC 2021-1-6

대용량 안테나 시스템의 성능 향상을 위한 적응형 검파기 설계

Adaptive Detector Design for the Performance Improvement of Massive Antenna Systems

서방원*

Bangwon Seo*

요약 데이터 전송률을 증가시키기 위한 가장 효과적인 방법 중의 하나는 대용량 안테나 기술을 사용하는 것이다. 대용량 안테나 방식에서는 기지국에 수십 또는, 수백 개의 안테나를 설치하고 다중 사용자 기법을 통해 공간 다이버시티 이득을 향상시키는 방식이다. 다중 사용자 기법을 적용하면 사용자간 간섭이 발생하는데, 기존에는 수신기의 복잡도를 줄이고 간섭 신호를 제거하기 위하여 최대 비율 결합기를 사용하였다. 그러나, 동시 전송 단말 개수가 증가하면, 기존 수신기의 성능이 크게 열화되는 현상이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 등록된 단말로부터의 간섭은 완벽하게 제거하고, 등록되지 않은 단말들로부터의 간섭은 줄여주는 검파기를 제안한다. 그리고 나서, 제안하는 검파기의 복잡도를 줄이기 위하여 적응형 검파기를 제안한다. 모의실험을 통하여, 제안하는 검파기가 기존의 검파기보다 더 우수한 비트 오류 성능을 갖는다는 것을 보인다.

Abstract One of the effective ways to increase data transmission rate is to use massive antenna technique where tens or hundreds of antennas are deployed in base station and spatial diversity gain is improved by multiuser method. If multiuser method is applied, there will be inter-user interference and maximal ratio combiner (MRC) is conventionally used to reduce the complexity of the receiver and to eliminate interference. However, as the number of mobile devices increases, the performance of the conventional receiver becomes deteriorated. To solve this problem, we propose a new detector that completely eliminates the interference from the registered devices and reduces that from the unregistered devices. Then, to reduce the complexity of the proposed scheme, we propose adaptive algorithm of the proposed scheme. Through simulation, we show that the proposed scheme has better bit error rate performance than the conventional scheme.

Key Words : massive antenna system, uplink, receiver design, adaptive receiver

*종신회원, 공주대학교 전기전자 제어공학부/ IT융합기술연구소
접수일자 2020년 11월 6일, 수정완료 2021년 1월 6일
게재확정일자 2021년 2월 5일

Received: 6 November, 2020 / Revised: 6 January, 2021 /
Accepted: 5 February, 2021

*Corresponding Author: seobw@kongju.ac.kr

Division of Electrical, Electronic, and Control Engineering, the
Institute of IT Convergence Technology (IICT), Kongju National
University, Korea

I. 서 론

지난 10년간 전 세계적으로 스마트폰 개수가 폭발적으로 증가함에 따라, 데이터 스트리밍 서비스 및 대용량 파일 다운로드 서비스가 증가하였다. 이로 인해 사용자들이 요구하는 데이터 전송률은 크게 증가하고 있다. 또한, 앞으로는 스마트폰 외에도 모바일 태블릿 기기 및 스마트 워치 등과 같은 제품들도 크게 증가할 것이기 때문에, 사용자들이 요구하는 데이터 전송률은 앞으로도 계속해서 증가할 것으로 전망된다^[1]. 따라서, 차세대 통신시스템의 성능을 향상시키기 위해서 가장 중요한 요소 중의 하나는 데이터 전송률을 증가시키는 것이다^[2]. 데이터 전송률을 증가시키기 위한 방법 중의 하나로 가장 쉽게 생각할 수 있는 기술은 전송 대역폭을 증가시키는 것이다. 그러나, 무선 통신시스템에서 사용할 수 있는 주파수 자원들은 거의 포화 상태이기 때문에, 전송 대역폭을 늘려서 데이터 전송률을 증가시키는 방법은 현실적으로 쉽지 않은 방법이다. 데이터 전송률을 증가시키기 위한 또 다른 방법은 송신안테나 또는, 수신안테나의 개수를 증가시키는 것이다.

송신기 또는 수신기에서 수십 개 또는, 수백 개의 안테나를 배치해서 사용하는 기술을 대용량 다중입력 다중출력 (Massive Multiple-Input Multiple-Output, Massive MIMO) 기술이라고 한다^{[3]-[6]}. 대용량 MIMO 기술이 높은 데이터 전송 효율을 얻기 위해서는 다중 사용자 MIMO (Multiuser MIMO, MU-MIMO) 기술과 결합해서 동작해야 한다. 무선 통신 하향링크 시스템에서의 MU-MIMO 기술은 기지국이 동일한 시간 및 주파수 자원을 사용하여 여러 개의 단말들에게 동시에 데이터를 전송함으로써 데이터 전송 효율을 증가시키는 기술이다. 그리고, 무선통신 상향링크 시스템에서의 MU-MIMO 기술은 여러 개의 단말들이 동일한 시간 및 주파수 자원을 사용하여 동시에 기지국으로 데이터를 전송하는 기술이다^{[7]-[8]}.

무선통신 상향링크 시스템에서 MU-MIMO를 적용하는 경우에, 동일한 시간 및 주파수 자원을 사용하여 동시에 데이터를 전송할 수 있는 단말의 개수는 기지국의 수신 안테나 개수에 의해서 제한된다.

대용량 MIMO 시스템의 경우, 기지국에서 사용하는 수신 안테나의 개수가 수십 개 또는, 수백 개에 달하기 때문에, 이론적으로는 동시에 데이터를 전송할 수 있는 단말의 개수도 수십 개 또는, 수백 개에 이르게 된다. 그러나, 동시에 데이터를 전송하는 단말의 개수가 증가하면, 다중 사용자 간섭 신호가 크게 증가해서 수신단의 검

파 성능이 매우 악화되게 된다.

대용량 MIMO 시스템에서 기지국의 수신단은 적절한 검파기를 사용함으로써 다중 사용자 간섭을 줄일 수 있다. 가장 잘 알려져 있는 검파기들은 최대 비율 결합기 (Maximal Ratio Combiner, MRC), Zero-Forcing (ZF) 검파기, 최소 평균 제곱오차 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 검파기 등이 있다. 일반적으로 MMSE 검파기와 ZF 검파기가 우수한 성능을 나타내지만, ZF 검파기는 모든 단말에 대한 채널 정보를 알아야 되는 단점이 있고, MMSE 검파기는 매우 큰 사이즈의 행렬에 대한 역행렬을 계산해야 되기 때문에, 너무 많은 계산량을 필요로 한다는 단점이 존재한다. 따라서, 대용량 MIMO 시스템에서는 계산량을 줄이기 위하여 MRC 검파기를 사용하게 된다.

대용량 MIMO 시스템에서는 기지국에 매우 많은 수신 안테나가 있기 때문에, 데이터를 동시에 전송하는 단말의 개수가 매우 많지 않은 경우에는 MRC 검파기만으로도 다중 사용자 간섭을 충분히 제거할 수 있다. 그러나, 데이터 전송 효율을 증가시키기 위하여 단말의 개수를 증가시키면, 다중 사용자 간섭에 의해 MRC 검파기의 검파 성능이 크게 저하되는 단점이 있고, 이로 인해서 동시 전송 단말의 개수를 충분히 키울 수 없는 단점이 발생한다.

본 논문에서는 기존의 MRC 수신기의 성능을 향상시키기 위하여 평균 제곱 오차 (Mean Square Error, MSE)를 최소화시키는 수신 기법을 제안한다. 기지국 주변에는 등록된 단말들과 등록되지 않은 단말들이 같이 존재한다고 가정한다. 등록된 단말들은 기지국으로 채널 추정을 위한 파일럿 심볼들을 전송할 수 있기 때문에, 기지국은 등록된 단말들에 대한 채널을 완벽하게 알고 있다고 가정한다. 반면에, 기지국에 등록되지 않은 단말들에 대해서는 기지국이 채널 정보를 알 수 없다고 가정한다. 이러한 환경에서, 기지국 수신기는 등록된 단말들로부터 발생하는 간섭신호는 완벽하게 제거하고, 등록되지 않은 단말들로부터 발생하는 간섭신호는 억제하도록 검파기를 설계한다. 이렇게 설계한 검파기는 사이즈가 큰 행렬에 대한 역행렬을 계산해야 되기 때문에, 실제 시스템으로 구현하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 검파기의 계산 복잡도를 줄이기 위하여 적응 수신 기법을 추가적으로 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장은 시스템 모델을 제시하고, III장은 본 논문에서 제안하는 수신 기법을 설명한다. IV장은 모의실험을 통하여 제안하는 수신 기법과 기존의 MRC 기법 간의 성능을 비교한다. 마지막으로, V장은 본 논문의 결론을 제시한다.

II. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 상향링크 대용량 안테나 시스템에 대한 모델을 보여준다. 여러 개의 단말들이 한 개의 기지국에게 데이터를 전송하는 환경이며, 기지국에 등록된 단말 (R-UE)과 등록되지 않은 간섭 단말 (I-UE)가 존재한다고 가정한다. 기지국의 수신 안테나 개수는 M 이며, 대용량 안테나 시스템이므로, M 은 50 이상의 값을 갖는다고 가정한다. R-UE의 개수는 K , I-UE의 개수는 J 라고 가정하고, 모든 단말들은 한 개의 송신 안테나를 가지고 있다고 가정한다.

기지국에서 모든 수신 안테나로부터 받은 수신 신호 $\mathbf{y} \in C^{M \times 1}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_k s_k + \sum_{k=K+1}^{K+J} \mathbf{h}_k s_k + \mathbf{z} \quad (1)$$

여기에서 $\mathbf{h}_k \in C^{M \times 1}$ 는 단말 k 로부터 기지국까지의 채널 벡터를 나타내고, \mathbf{z} 는 평균이 0이고 분산이 σ_z^2 인 백색 가우시안 부가잡음을 나타낸다. 그리고, s_k 는 k 번째 단말이 전송한 데이터를 의미하며, $E[s_k] = 0$ 이고, $E[s_k s_j^*] = \delta(k-j)$ 인 특성을 갖는다. 한편, 기지국은 R-UE 단말들에 대한 채널 벡터 $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K$ 는 완벽하게 알고 있다고 가정하고, I-UE 단말들에 대한 채널 벡터 $\mathbf{h}_{K+1}, \mathbf{h}_{K+2}, \dots, \mathbf{h}_{K+J}$ 는 모른다고 가정한다.

기존의 수신기 설계 방식은 계산량을 줄이기 위하여 최대 결합 수신기 (Maximal Ratio Combining, MRC)를 사용하였다. 즉, 데이터를 추정하고자 하는 단말을 편의상 1번 단말이라고 가정하고, 검파기를 \mathbf{w}_1 이라고 가정하면, 기존의 수신기는 $\mathbf{w}_1 = \mathbf{h}_1$ 에 의해 주어진다. 이 때, s_1 에 대한 추정 방법은 다음과 같이 주어진다.

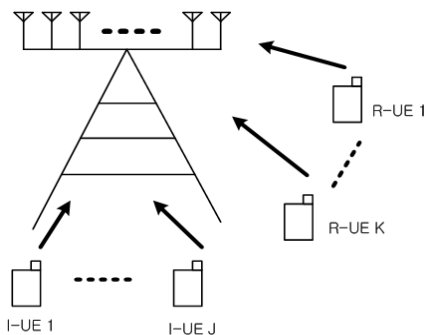


그림 1. 상향링크 대용량 안테나 시스템 모델
 Fig. 1. System model for uplink massive MIMO

$$\tilde{s}_1 = \mathbf{w}_1^H \mathbf{y} = \mathbf{h}_1^H \mathbf{y} \quad (2)$$

이와 같은 기존의 수신기는 M 이 매우 큰 값이므로 전체 단말의 개수 ($K+J$)가 값이 작을 때는 우수한 성능을 나타낸다. 그러나, ($K+J$) 값이 클 때는 간섭 신호가 크게 증가해서 데이터 심볼 추정 성능이 매우 떨어지게 된다.

III. 제안하는 수신기 설계 방법

본 장에서는 기존의 MRC 수신기의 성능을 향상시키기 위하여 MSE 기반의 검파기를 제안하고, 검파기의 계산 복잡도를 줄이기 위하여 추가적으로 적응형 검파기를 제안한다.

수신단에서 검파기 \mathbf{w}_1 를 적용했을 때, 검파기 출력에서의 평균 제곱 오차 Q 를 다음과 같이 정의한다.

$$Q = E[|\mathbf{w}_1^H \mathbf{y} - s_1|^2] \quad (3)$$

기지국은 R-UE에 대한 채널 정보는 완벽하게 알고 있기 때문에, 이 정보들을 이용하여 R-UE들이 미치는 간섭은 완벽하게 제거하도록 검파기 \mathbf{w}_1 을 설계한다.

$$\min_{\mathbf{w}_1} E[|\mathbf{w}_1^H \mathbf{y} - s_1|^2] \quad s.t. \quad \mathbf{w}_1^H \bar{\mathbf{H}}_1 = [0, \dots, 0] \quad (4)$$

여기에서, $\bar{\mathbf{H}}_1 \in C^{M \times (K-1)}$ 는 단말 1을 제외한 R-UE 단말들의 채널 행렬을 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\mathbf{H}}_1 = [\mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K] \quad (5)$$

식 (4)에서 주어진 최적화 문제에서 조건식이 존재하지 않는다면, 최적화 문제에 대한 해는 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\mathbf{w}}_{1,opt} = \frac{1}{\mathbf{h}_1^H \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{h}_1} \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{h}_1 \quad (6)$$

여기에서 $\mathbf{R}_y \in C^{M \times M}$ 은 수신 신호의 상관행렬을 나타내며, $\mathbf{R}_y = E[\mathbf{y}\mathbf{y}^H]$ 에 의해 주어진다.

이제 식 (4)에서 주어진 조건식으로부터 $\mathbf{w}_{1,opt}$ 는 $\bar{\mathbf{H}}_1$ 에 직교해야 되므로, 최적화 문제 (4)에 대한 최적해는 다음과 같이 주어진다^[9].

$$\mathbf{w}_{1,\text{opt}} = \frac{1}{\mathbf{h}_1^H \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{h}_1} \left\{ \mathbf{I}_M - \bar{\mathbf{H}}_1 (\bar{\mathbf{H}}_1^H \bar{\mathbf{H}}_1)^{-1} \bar{\mathbf{H}}_1^H \right\} \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{h}_1 \quad (7)$$

여기에서 \mathbf{I}_M 은 사이즈가 $M \times M$ 인 단위행렬을 나타낸다.

식 (7)을 보면, 최적해를 구하기 위해서는 상관 행렬 \mathbf{R}_y 의 역행렬을 구해야 된다. 그런데, 행렬 \mathbf{R}_y 의 사이즈가 $M \times M$ 이고, 대용량 안테나 시스템에서는 M 이 매우 큰 값이므로, \mathbf{R}_y 의 역행렬을 구하는 것은 너무 많은 계산량을 필요로 한다. 따라서, 식 (4)에서 주어진 최적화 문제에 대한 해를 구하기 위하여 추가적으로 적응형 검파기를 제안한다.

식 (4)에서 조건식이 존재하지 않는 경우에, \mathbf{w}_1 에 대한 최소 평균 오차 (Least Mean Square, LMS) 적응형 알고리즘은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{w}_1(n+1) = \mathbf{w}_1(n) - \mu_p \left\{ \mathbf{y}(n)^H \mathbf{w}_1(n) - s_1^*(n) \right\} \mathbf{y}(n), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

여기에서 n 은 n 번째 심볼을 의미하고, μ_p 는 적응 알고리즘의 스텝 크기를 나타낸다.

이제, 식 (4)에 대한 조건식을 만족시키기 위하여, $\mathbf{w}_1(n)$ 중에서 $\bar{\mathbf{H}}_1$ 에 직교하는 성분을 구하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\left\{ \mathbf{I}_M - \bar{\mathbf{H}}_1 (\bar{\mathbf{H}}_1^H \bar{\mathbf{H}}_1)^{-1} \bar{\mathbf{H}}_1^H \right\} \mathbf{w}_1(n+1) \Rightarrow \mathbf{w}_1(n+1) \quad (9)$$

따라서, 본 논문에서 제안하는 적응형 검파기는 식 (8)과 (9)에 의해서 주어진다.

IV. 모의 실험

대용량 안테나 시스템에서 제안하는 적응형 수신기와 기존의 MRC 기법 간의 성능을 비교하기 위하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다.

각각의 채널 벡터는 평균이 $E[\mathbf{h}_k] = \mathbf{0}$ 이고 공분산 행렬이 $E[\mathbf{h}_k \mathbf{h}_j^H] = \mathbf{I}_M \delta(k-j)$ 인 Rayleigh 가우시안 채널 모델을 사용하였다. 기지국 수신 안테나의 개수는

$M=64$ 를 사용하였고, R-UE 단말의 개수 K 는 5를 사용하였다. 또한, I-UE 단말의 개수 J 는 5, 10을 사용하였다.

그림 2는 개별 수신 안테나에서의 신호대 잡음비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)가 20dB인 경우에, 제안하는 적응 수신기와 기존 수신기의 신호대 간섭 잡음비 (Signal-to-Interference plus Noise Ratio, SINR)를 나타낸다. R-UE 단말의 개수 K 는 5이고, I-UE 단말의 개수 J 는 5이다. 독립적인 채널을 1000번 발생시키고, 각 채널에 대한 결과들을 평균한 값들이다. 그림에서 제안하는 수신기의 성능은 Prop.로 표시된 그래프이며, 기존 수신기의 성능은 Conv.로 표시된 그래프이다. 그리고, 제안하는 적응 수신기에 대한 결과에서 파란색 곡선은 스텝 크기 μ_p 가 1×10^{-4} 인 경우이고, 빨간색 곡선은 μ_p 가 5×10^{-5} 인 경우이다. 이 결과로부터 제안하는 적응 수신기가 수렴 상태에서 기존의 MRC 수신기보다 SINR이 4dB 정도 개선된다는 것을 알 수 있다.

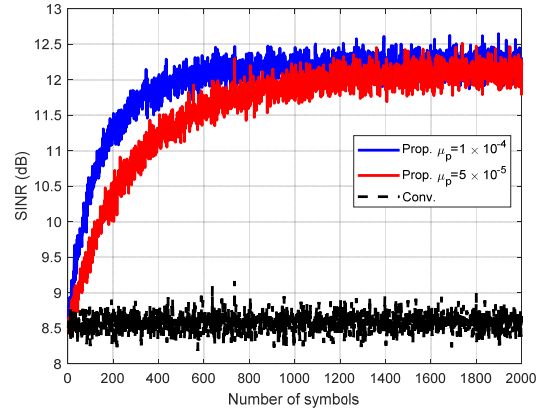


그림 2. $K=5, J=5$ 일 때, 제안하는 적응 수신기의 SINR 학습 곡선
Fig. 2. SINR learning curve of the proposed adaptive receiver when $K=5$ and $J=5$

그림 3은 제안하는 적응 수신기와 기존의 MRC 수신기 간의 비트 오류 확률 (Bit Error Rate, BER)을 비교한다. 제안하는 기법은 적응 수신기이기 때문에, 적응 검파기가 일정한 값으로 수렴한 후에 BER 성능을 획득하였다. R-UE의 개수는 $K=5$ 로 고정하였고, I-UE의 개수를 $J=5$ 인 경우와 $J=10$ 인 경우를 고려하였다. 이 결과로부터, 기존의 MRC 수신기는 SNR이 증가함에 따라 BER 값이 1×10^{-2} 근처에서 수렴하지만, 제안하는 적응형 수신기는 BER 값이 1×10^{-4} 근처에서 수렴한다는 것을 알 수 있다.

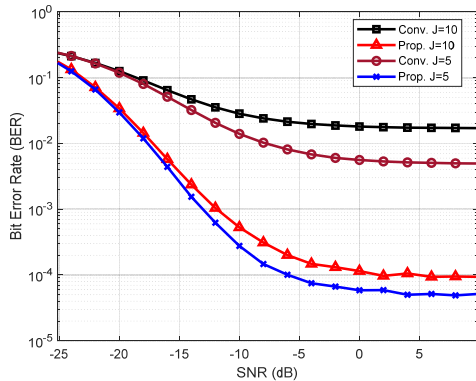


그림 3. 제안하는 적응 수신기와 기존 MRC 수신기 간의 BER 성능 비교

Fig. 3. BER performance comparison between the proposed adaptive receiver and the conventional MRC receiver

V. 결 론

본 논문에서는 상향링크 대용량 안테나 시스템을 위한 수신 기법에 대해서 다루었다. 대용량 안테나 시스템에서는 기지국 수신 안테나의 개수가 매우 크기 때문에, 간단한 MRC 기법으로도 우수한 성능을 나타낸다고 알려졌다. 그러나, 기지국으로 동시에 데이터를 전송하는 단말의 개수가 증가하면, 간섭 신호가 크게 증가하고, 이로 인해 기존의 MRC 기법은 성능이 크게 저하되게 된다. 따라서, 본 논문에서는 등록된 단말들의 채널 정보를 이용하여 등록된 단말들의 간섭신호를 완벽하게 제거하는 MSE 수신기를 제안하였고, 수신기의 계산량을 줄이기 위하여 추가적으로 적응형 검파기를 제안하였다. 모의실험을 통하여, 제안하는 적응 수신기의 SINR 학습 곡선을 제시하였고, 제안하는 수신기가 기존의 MRC 수신기보다 더 우수한 SINR 성능과 BER 성능을 갖는다는 것을 보였다.

References

[1] M. Agiwal, A. Roy, N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey", *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, Vol. 18, No. 3, pp. 1617-1655, July 2016.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>

[2] M. Shafi et al., "5G: A tutorial overview of standards,

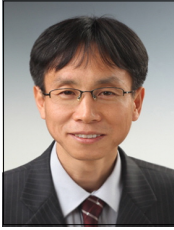
trials, challenges, deployment, and practice", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 35, No. 6, pp. 1201-1221, June 2017.

DOI: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2692307>

- [3] X. Gao, O. Edfors, F. Rusek, F. Tufvesson, "Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 14, No. 7, pp. 3899-3911, July 2015.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2414413>
- [4] S.-L. Ju, B.-J. Lee, N.-I. Kim, K.-S. Kim, "Combined Hybrid Beamforming and Spatial Multiplexing for Millimeter-Wave Massive MIMO Systems", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol. 18, No. 5, pp. 123-129, Oct. 2018.
 DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.5.123>
- [5] J. Lee, H. Lim, D. Yoon, "Soft-decision detection for iterative MIMO systems", *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 15, No. 6, pp. 45-51, Jun. 2017.
 DOI: <https://doi.org/10.14801/jkiit.2017.15.6.45>
- [6] Y.-J. Hong, "Performance of M-ary OSTBC MIMO system", *Journal of the Korea Academia-Industrial*, Vol. 16, No. 9, pp. 6269-6273, Sept. 2015.
 DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.9.6269>
- [7] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst, M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels", *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 32, No. 2, pp. 461-471, Feb. 2004.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/TSP.2003.821107>
- [8] M. Sadek, A. Tarighat, A. H. Sayed, "A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels" *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 6, No. 5, pp. 1711-1721, May 2007.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2007.360373>
- [9] S.-C. Hong et al., "Constrained MMSE receiver for CDMA systems in frequency-selective fading channels", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 3, No. 5, pp. 1393-1398, Sept. 2004.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2004.833414>

저 자 소 개

서 방 원(종신회원)



- 1997년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학 학과 (공학사)
- 1999년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학 학과 (공학석사)
- 2010년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학 학과 (공학박사)
- 2004년 11월 ~ 2013년 2월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 부교수
- 주 관심분야 : 이동통신, 단말간 직접통신 (D2D), 다중 안테나 기술 (MIMO), 프리코더 설계, 인공지능

※ 이 논문은 2020년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원에 의하여 연구되었음.