Journal of Convergence for Information Technology
Vol. 12. No. 3, pp. 280-285, 2022
e-ISSN 2586-4440
DOI : https://doi.org/10.22156/CS4SMB.2022.12.03.280

다중안테나 시스템에서 전력 최소화를 위한 안테나 선택 알고리즘

신경섭
상명대학교 컴퓨터과학전공 교수

Antenna Selection Algorithm for Energy Consumption Minimization in Massive Antenna System

Kyung-Seop Shin
Professor, Department of Computer Science, Sangmyung University

요 약 통신시스템에서 한정된 자원에서 최대의 용량을 얻기 위해서 안테나의 개수를 늘리는 것이 효과적이다. 주어진 주파수 자원에서 안테나 개수의 증가는 또 다른 차원의 신호의 송수신을 가능하게 하고, 추가적인 채널자원을 확보하여, 통신 용량을 증대시킬 수 있기 때문이다. 다수의 안테나가 존재하는 상황에서는 안테나를 한정된 공간에 효과적으로 집적하는 문제가 매우 중요해지게 된다. 이러한 상황에서 채널 자원과 안테나 자원을 효율적으로 분배하는 문제가 발생하여, 본 논문에서는 주어진 다수의 안테나 자원을 안테나간의 상관성을 고려하여 다수의 사용자에게 효과적으로 분배하는 문제를 해결하였다. 사용자를 선택하는 문제와 선택된 사용자에게 안테나를 할당하는 문제로 나누어 Semi-definite Relaxation 방식을 사용하여 최적해를 빠르게 구할 수 있도록 고안되었고, 시뮬레이션 결과를 통하여 편파가 사용된 상황에서는 공간 집적도가 증가함을 보였고, 안테나의 자원이 늘어남에 따라 평균적으로 34% 감소된 전력을 사용하여 전력 효율적인 전송을 하는 결과를 보였다.

주제어 : 편파안테나, 상관성, 다중안테나, 소비전력 최소화, Semi-definite Relaxation

Abstract In order to ensure maximum capacity at a given frequency resource, the number of antennas must be increased. The increase in antennas means that such guaranteed channel resources can be used as an increase in channel capacity by aquiring another channel resource. In order to aggregate antennas in such a situation where there are a plurality of antennas, a problem of miniaturizing and integrating antennas must be accompanied. In this situation, in order to efficiently allocate channel resources and antenna resources in limited device resources, the problem of antenna selection and user scheduling was considered and solved together. By numerical simulation results, the proposed algorithm was proven to effectively reduce 34 % power consumption in averagewith increase in antennas.

Key Words : Polarized Antenna, Correlation, Massive Antenna, Energy Consumption Minimization, Semi-definite Relaxation

1. 서론

1.1 서론

기지국에서 다수의 안테나를 운용하고, 다수의 사용자에게 서비스를 제공하는 경우, 기지국은 사용자 각각의 채널에 대한 정보를 획득하여 그 채널에 정렬된 신호를 생성하여 전송하는 빔포밍을 수행한다[1]. 이 때,

*This work was supported by the Technology development Program(1425149057) funded by the Ministry of SMEs and Startups(MSS, Korea)
*Corresponding Author : Kyung-Seop Shin(ksshin@smu.ac.kr)
Received January 29, 2022 Revised March 6, 2022
Accepted March 20, 2022 Published March 28, 2022

안테나 각각은 송신에 유리하도록 채널 상황에 맞는 RF 구동회로를 선택하여 통신을 수행하게 된다.

이 때, 일반적으로 기지국은 안테나의 개수보다 적은 수의 RF 구동 회로를 갖는다. 여기서 RF 구동회로라 함은, D/A 변환기, 믹서, 증폭기 등을 포함한다. RF 회로의 구동은 비교적으로 안테나 하나를 구동하는데 소요되는 비용보다 상당히 크다. 이에 다중안테나 시스템에서는 RF회로와 안테나의 선택이 중요한 문제로 대두되고 있다.

안테나 사이의 상관성이 존재하는 경우에는 송수신 채널에 영향을 미쳐, 채널 용량이 상당히 감소될 수 있다. 이러한 상황에서 채널은 점점 다양성을 잃고, 하나의 신호가 다수의 사용자에 미치는 간섭이 커지게 된다. 이 때, 상관성의 정도가 각각의 안테나 요소마다 다르기 때문에 만약 기존의 다중안테나 기술처럼 한번에 모든 안테나를 다 사용하여 통신을 하게 된다면 이러한 부담이 더 커져 오히려 성능을 저하시킬 수 있다.

안테나가 병렬로 나열되는 공간 다중안테나를 사용하는 상황에서 이 문제는 더욱 심각하다. 채널의 상관성은 안테나 사이의 이격 거리가 작을수록 커지게 되는데, 다수의 안테나를 사용할 때, 공간의 제약으로 인하여 상관성을 줄이면서 다수의 안테나를 한 곳에 위치시키기 어렵게 된다. 이러한 집적된 안테나 간의 상관성 문제는 편파가 적용된 안테나를 사용하여 문제를 해결하고자 하는 연구가 진행되었으며[2,3], 편파 안테나를 사용한 경우 공간 다중안테나와 비슷한 용량을 보이는 것이 증명되었다[4].

1.2 기존연구

공간 다중안테나의 경우 안테나 사이 이격 거리가 증가함에 따라 안테나끼리의 상관성은 감소한다. [5]에 따르면 안테나 사이의 거리 d가 증가함에 따라서 용량이 감소하게 된다. 편파안테나는 안테나 사이 거리가 $\lambda/2$인 공간 다중안테나와 비슷한 채널 용량을 얻을 수 있음이 기존연구에 의해 증명되었다.

하지만 편파를 사용한다 하더라도, 안테나 사이의 채널 상관성에 의한 성능 저하는 여전히 존재하며, 집적된 안테나의 경우에는 그 문제가 더욱 심각해진다. 이러한 상황에서 채널 상관성에 의한 성능 감소를 효과적으로 완화시킬 수 있는 방안이 필요하다.

기존의 연구[6,7]는 사용자에게 적합한 채널에 맞는 신호를 만들어주기 위하여 최적화 방안들을 제안해왔다. Fig. 1은 기지국에서 사용자에게 전송을 수행한다고 할 때 각 사용자에 맞추어 채널을 전송하는 모습을 나타내고 있다. 다수의 안테나 중에서 사용자의 채널에 맞는 안테나를 선택하여 채널을 형성하여 전송하는 것을 볼 수 있다. 다수의 사용자가 존재하고, 다수의 안테나가 존재하는 상황에서 기존의 연구는 복잡도의 감소를 위하여 signal-to-interference plus noise ratio(SINR) 대신 signal-to-leakage ratio(SLR)를 사용한 방법을 제안하였다.

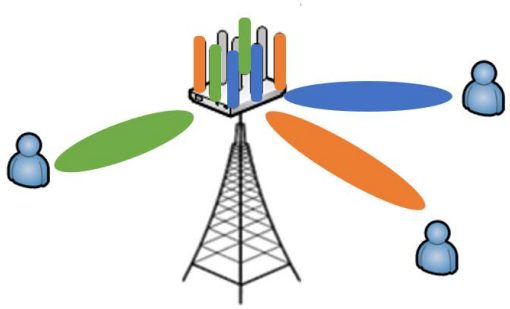

Fig. 1. Generation of Signal for Multiple Users in a Base Station with Multiple Antennas

하지만 이러한 SLR을 사용한 시스템 용량 최적화 방법은 정확한 최적화의 값을 구하기 어렵다. 실제로 다른 사용자가 선택한 채널상황에 따라서 자신의 채널이 달라지게 되고, SLR을 고려하여 자신의 신호를 줄이는 방법은 전체 시스템 용량의 감소로 이어질 수 있기 때문이다.

2. 제안 시스템

2.1 시스템 모델

고려하는 시스템은 기지국의 안테나의 개수가 N개이고, RF 모듈이 제어할 수 있는 안테나의 개수가 K개로 제한되어 있으며, 총 사용자의 수가 X인데 반해, RF 모듈의 개수가 M개일 때(X>M), 사용자에게 적합한 신호를 골라내어 서비스를 제공해주는 스케줄링 및 자원할당 기술을 제안한다.

제안 방안은 크게 두 가지로 접근할 수 있다. 사용자를 선택하는 문제와 신호를 할당하는 자원할당의 문제이다. 기지국이 한 번에 지원할 수 있는 사용자의 수가 M 명인데 반해, 총 사용자의 수가 X명으로 더 많기 때문에, X 명의 사용자 중에서 한 시각에 서비스해 줄 수

있는 M 명을 고르는 문제를 우선적으로 수행하게 된다. 서비스해줄 사용자가 선택되었다면 기지국의 RF의 용량이 K일 때 K개의 안테나를 사용자에게 적절히 배분해줄 수 있는 문제를 풀어 사용자에게 적합한 신호를 제공할 수 있게 된다.

2.2. 사용자 스케줄링 알고리즘

X명의 사용자가 존재한다고 하였을 때, 각각의 사용자 x는 자신의 채널 정보를 기지국에 제공하게 된다. 이 때 자신의 채널 이득 $g(\boldsymbol{h_x}) = | |\boldsymbol{h_x}| |^2$을 제공하게 된다. 이러한 채널정보를 바탕으로 기지국은 RF모듈 각각에 대해 사용자를 선택하게 되는데, 그 과정은 다음과 같다.

우선, 처음의 사용자의 집합 $A_0 = \{1,...,\mathrm{X}\}$에서 첫 번째 사용자 $\pi(1)$을 다음과 같은 조건을 만족하는 사용자를 선택한다.

$$\pi(1) = \arg\max_{x \in A_0} g(\boldsymbol{h_x}) \tag{1}$$

임의의 사용자 i를 선택하고 난 뒤에 $i+1$번째 사용자는 A_i 집합에서 선택되게 된다. 여기서 A_i 집합은 이미 선택된 사용자들과의 correlation이 임의의 디자인 변수 ϵ보다 작도록 아래와 같이 선택된다.

$$A_i = 1 \le \mathrm{x} \le \mathrm{X} : | \mathbf{h_x h^*_{\pi(j)}} | \le \epsilon, 1 \le \mathrm{j} \le \mathrm{i} \tag{2}$$

최종적으로 $i+1$ 번째 사용자는 아래와 같이 선택되게 된다.

$$\pi(i+1) = \arg\max_{x \in A_i} g(\boldsymbol{h_x}) \tag{3}$$

위와 같은 과정을 반복적으로 M 번을 수행하여 M 명의 사용자를 선택하게 되며, 선택된 이후에는 빔포밍을 이용한 전력할당 방안에 의거 자원을 할당하게 된다.

2.3. Semi-definite Relaxation(SDR)을 사용, 안테나 선택을 적용한 전력 최소화 알고리즘

M명의 사용자가 선택된 상황에서, 안테나의 개수가 극다수인 상황에서는 앞서 언급한 바와 같이 채널의 상관성에 의해서 성능이 감소된다. 이 때, 서로의 간섭과 상관성이 적고, 독립성이 보장되는 채널을 선택할 수 있다면 상관성에 의한 성능 감소는 어느정도 완화될 수 있을 것이다.

이렇게 선택하는 안테나의 개수가 늘어남에 따라서 전송용량이 증가하게 된다. 또한, 채널의 상관성이 증가하게 되면 안테나의 상관성이 작은 안테나 쌍부터 신호를 할당할 수 있기 때문에, 최대 용량에 근접하는 속도가 빨라지게 된다. 이는 안테나 선택 문제를 상관성이 강한 다중 안테나 시스템에 적용하는데 매우 큰 이유가 된다. 안테나의 상관성은 안테나의 설계와 통신의 상황 자체와 관련이 있기 때문에, 우리가 제어할 수 없는 부분이다. 하지만 안테나 선택을 적절히 수행함으로서 용량감소를 최소화시킬 수 있게 된다[8,9].

이 때, 기존의 연구에서는 안테나 선택의 문제를 SLR 문제로 근사시켜서 문제를 풀게되지만, 제안하는 알고리즘에서는 최적에 근접한 SINR을 조건으로 두고 최적화 문제를 접근하여 푸는 방법을 제안한다. 하지만 이 문제는 convex 문제가 아니기 때문에 최대한 convex에 가깝도록 SDR 방법을 사용하여 문제를 풀 수 있도록 할 것이다. 자세한 내용은 다음 장의 이론적 분석에서 다룰 예정이다.

3. 성능 분석

3.1 이론적 분석

기존의 다중 사용자의 전력 감소방안을 수식적으로 표현하자면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}_m \in \mathcal{C}^N} \quad & \textstyle\sum_{i \in \mathcal{M}} ||\mathbf{w}_i||_2^2 \\ s.t. \quad & \frac{||\mathbf{w}_m^H \mathbf{h}_m||_2^2}{\sum_{i \in \mathcal{M} \setminus \{m\}} ||\mathbf{w}_i^H \mathbf{h}_i||_2^2 + \sigma^2} \ge \gamma_m, \\ & ||\mathbf{w}_m||_0 \le K,\ \mathbf{w}_m \ge 0, \forall m \in \mathcal{M} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 w_i는 사용자 i에게 할당된 전력을 의미하는 빔포밍 벡터이고, h_m은 기지국과 사용자 m 사이에 존재하는 $N \times 1$ Rayleigh fading 채널을 나타낸다. 주어진 잡음레벨 σ^2에 대하여, SINR 레벨 γ_m을 만족시키는 빔포밍 벡터를 설정한다. 빔포밍 벡터는 N개의 안테나 중 K개의 안테나만 이용하도록 하여 채널의 상관성이 커졌을 때, 빠르게 적응하도록 설계한다. 이 때, 빔포밍 벡터가 안테나에 주어진 전력을 의미하므로 그 합을 최소화하는 문제를 풀고자 한다.

하지만 K개의 안테나를 선택하는 문제는 정수 문제로, 연속적인 방법으로 풀리지 않기 때문에, 패널티 항

목을 추가하여, dual problem을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{array}{ll}\min\limits_{\mathbf{w}_m\in\mathcal{C}^N} & \sum_{i\in\mathcal{M}}||\mathbf{w}_i||_2^2+\lambda_i||\mathbf{w}_i||_1^2 \\ s.t. & \frac{||\mathbf{w}_m^H\mathbf{h}_m||_2^2}{\sum_{i\in\mathcal{M}\setminus\{m\}}||\mathbf{w}_i^H\mathbf{h}_i||_2^2+\sigma^2}\geq\gamma_m, \\ & \mathbf{w}_m\geq 0, \forall m\in\mathcal{M}\end{array} \quad (5)$$

연속적인 문제로 정수 문제를 바꾸었지만, 문제가아직 convex로 풀리지 않기 때문에, 아래와 같이 trace 함수를 사용하여 각각의 변수를 바꿈으로써 convex 문제로 만들어준다 (SDR 알고리즘). 이때, $\boldsymbol{W_i}=\boldsymbol{w_i}\boldsymbol{w_i^H}$, $\boldsymbol{H_i}=\boldsymbol{h_i}\boldsymbol{h_i^H}$이며, $\mathbf{1}_{\boldsymbol{N\times N}}$은 행렬의 모든 요소의 값이 1인 $N\times N$ 정사각 행렬이다.

$$\begin{array}{rcl}||\mathbf{w}_i||_2^2 & = & tr(\mathbf{W}_i), \\ ||\mathbf{w}_i||_1^2 & = & tr(\mathbf{1}_{N\times N}\mathbf{W}_i), \\ ||\mathbf{w}_m^H\mathbf{h}_m||_2^2 & = & tr(\mathbf{H}_i\mathbf{W}_i)=tr(\mathbf{W}_i\mathbf{H}_i)\end{array} \quad (6)$$

따라서, SDR을 사용한 결과 위의 문제는 아래와 같이 바뀌게 된다[10].

$$\begin{array}{ll}\min\limits_{\mathbf{W}_m\in\mathcal{C}^{N\times N}} & \sum_{i\in\mathcal{M}}tr(\mathbf{W}_i+\lambda_i\mathbf{1}_{N\times N}|\mathbf{W}_i|) \\ s.t. & tr(\mathbf{H}_m\mathbf{W}_m) \\ & -\gamma_m\left[\sum\limits_{i\in\mathcal{M}\setminus\{m\}}tr(\mathbf{H}_m\mathbf{W}_m)+\sigma^2\right]\geq 0, \\ & \mathbf{W}_m\geq 0,\ \forall m\in\mathcal{M}\end{array} \quad (7)$$

하지만 이 문제는 안테나 사이의 선택 문제를 어렵게 만든다. 패널티 항목을 추가하였지만, 선택되지 않을 안테나에도 작은 신호가 들어갈 수 있기 때문이다. 따라서 계수 벡터 u 를 추가하여, 안테나의 이격문제 (sparsity 문제) 를 해결한다. 각각의 계수벡터는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{array}{rcl}\left(\sum\limits_{n=1}^{N}u_n|w_n|\right)^2 & = & \mathbf{u}^T|\mathbf{W}|\mathbf{u}=tr(\mathbf{U}|\mathbf{W}|) \\ & = & \sum\limits_{i=1}^{N}\sum\limits_{j=1}^{N}U_{i,j}|W_{i,j}|\end{array} \quad (8)$$

우선적으로 아래와 같은 안테나의 sparsity 문제를 계수 벡터가 $u=1/w$ 일 때로 시작하여, 결과값이 일정한 값으로 수렴할 때까지 수행한다. 이 때, 최적화된 값 자체는 크게 의미가 없다.

$$\begin{array}{ll}\min\limits_{\mathbf{X}^{(r)}\in\mathcal{C}^{N\times N}} & \sum_{i\in\mathcal{M}}tr(\mathbf{U}^{(r)}|\mathbf{W}^{(r)}|) \\ s.t. & tr(\mathbf{W}^{(r)}\mathbf{Q}_m)\geq 1, \forall m\in\mathcal{M} \\ & \mathbf{W}^{(r)}\geq 0\end{array} \quad (9)$$

이렇게 정의된 계수벡터의 hermitian 행렬 U를 $\mathbf{1}_{\boldsymbol{N\times N}}$ 대신에 적용하면, U 벡터가 다른 값에 비해서 큰 경우는 w의 값이 0으로 수렴하기 때문에, 안테나의 선택이 효율적으로 이루어질 수 있도록 해준다.

결론적으로 안테나의 sparsity 문제까지 적용한 결과는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{array}{ll}\min\limits_{\mathbf{W}_m\in\mathcal{C}^{N\times N}} & \sum_{i\in\mathcal{M}}tr(\mathbf{W}_i+\lambda_i\mathbf{U}_{N\times N}|\mathbf{W}_i|) \\ s.t & tr(\mathbf{H}_m\mathbf{W}_m) \\ & -\gamma_m\left[\sum\limits_{i\in\mathcal{M}\setminus\{m\}}tr(\mathbf{H}_m\mathbf{W}_m)+\sigma^2\right]\geq 0, \\ & \mathbf{W}_m\geq 0,\ \forall m\in\mathcal{M}\end{array} \quad (10)$$

3.2 실험결과 분석

Fig. 2와 Fig. 3은 앞 절에서 정의된 문제를 변수를 바꿔가며 최적화 문제의 최종해를 도식화하여 보여준다. 기존 연구[2]에서는 안테나와 편파의 선택을 통한 전송을 위해 다양한 환경을 제시하고 있으나 본 논문에서는 그 중에서 RF 모듈의 용량에 따른 변화를 살펴보기 위하여, 안테나가 8개가 있는 상황을 설정하였고, 다양한 사용자 환경에서의 실험을 수행하기 위해 16개의 노드가 임의의 위치에 존재하는 10,000 가지의 시나리오의 평균으로 시뮬레이션을 수행하였다. 한 번의 전송에는 4개의 노드를 서비스할 수 있도록 설정되었다. 이와 같은 상황에서 RF 회로의 용량인 K를 바꿔가며 성능 실험을 수행하였다. 또한 SNR 한계치인 γ값을 바꾸면서 그래프를 도출하였다.

Fig. 2는 편파안테나를 사용한 시스템에서 주어진 문제의 답을 exhaustive search를 통하여 해를 구한 결과이다. 우선 기준이 되는 SNR threshold 값이 증가하면 기본적으로 필요한 전력의 양이 많아진다는 것을 알 수 있다. 이는 어떤 SNR 값을 만족시키려면 신호의 세기가 더 세야하기 때문이다. 하지만 K값이 증가함에 따라, 그 증가하는 정도가 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이 또한 다른 안테나에 미치는 간섭의 양이 안테나의 개수가 전체 안테나의 수에 가까울수록 더 제어가 용이하다는 해석을 할 수 있다. 덧붙여, K가 늘어날수록, 필

요한 전체 전력의 양이 줄어들게 되는데, 이는 선택할 수 있는 채널이 늘어나서 적은 양의 전력을 사용하더라도 여러 차원의 다양성을 활용하여 요구하는 SNR 값을 만족시킬 수 있기 때문이다.

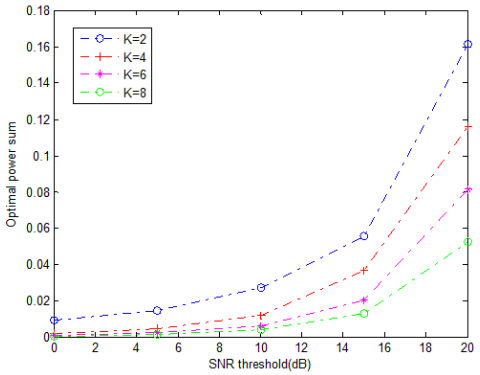

Fig. 2. Optimal power sum according to capacity of RF module and SNR threshold

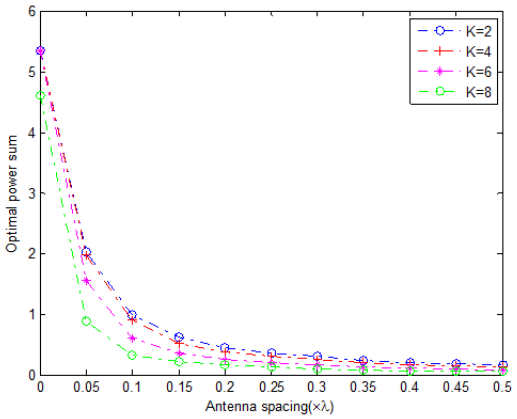

Fig. 3. Change of optimal power sum versus change of correlation represented by antenna spacing

Fig. 3은 공간 다중안테나 상황에서 γ=0dB 인 경우 안테나 사이 상관성의 변화에 따른 결과를 보여준다. 실제로 공간 다중안테나의 경우는 안테나 사이 거리가 짧을수록 상관성이 높아진다. 그러나 현재 성능 분석 수행 환경은 안테나가 8개까지 존재하기 때문에, 안테나의 간격을 늘리면 그 안테나의 크기는 무시하지 못할 수준에 이르러버리게 된다. 하지만 Fig. 2에서는 편파 채널을 고려하여, 4개의 편파가 적용되고, $\lambda/2$만큼 떨어진 곳에 같은 편파안테나가 사용된 상황에서의 실험을 수행하였다. 이에 안테나 사이의 간격이 작음에도 불구하고 앞장에서의 결과와 같은 최적 전력 해가 구해졌다.

기존의 공간 다중안테나 방안보다 이상적인 경우는 편파를 사용한 안테나 선택이 편파안테나 사이의 이격거리가 0임에도 불구하고, 0.15 의 전력으로 최적 전력 할당 결과를 얻은 반면, 기존 다중안테나 시스템에서 안테나 간격이 0일 때를 살펴보면 훨씬 더 큰 전력을 할당하게 되는 것을 확인할 수 있다. 이렇듯, 안테나 사이의 상관성이 큰 경우 편파를 사용하면 더 좋은 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

기존의 다중안테나 시스템의 자원할당 및 스케줄링에서는 사용자의 채널에 적합한 빔포밍을 수행하여 각각의 채널에 맞는 신호를 생성하여 제공해주는 방법에 대한 연구가 많이 수행되어왔다. 또한 안테나의 개수가 상당히 많은 경우는 편파를 이용한 다중안테나를 사용하여 안테나를 집적시켜서 필요한 공간을 최소화하려는 노력이 수반되었다. 안테나가 집적되어 있는 상황에서는 안테나 사이의 상관성이 커지게 되어 전체 시스템 용량의 감소를 일으킨다.

본 연구에서는 안테나를 선택함에 따라서 채널 상관성에 의한 용량 감소를 완화시킬 수 있는 방안을 제안하였다. 안테나를 선택함에 있어서, 시스템 전체를 고려한 SINR 조건을 사용하여 최적화 문제를 수립하고, 그 해를 SDR 방식을 사용하여 convex 최적화 문제로 만들어 최적해를 빠르게 구할 수 있도록 설계되었다. RF 모듈 용량이 커짐에 따라 할당된 최적 전력이 평균적으로 34% 낮아지는 경향을 보이는 것을 확인하였으며, 이상적인 편파안테나의 경우에는 공간 다중안테나를 사용하는 경우보다 매우 작은 공간에 집적되어 있는 상태에서 낮은 전력을 소모하여 집적된 공간을 활용하여 다중 사용자에게 서비스를 제공할 수 있음을 확인하였다.

REFERENCES

[1] A. Alexiou & M. Haardt. (2004). Smart antenna technologies for future wireless systems: trends and challenges. *IEEE Communications Magazine, 42(9)*, 90-97.

DOI : 10.1109/MCOM.2004.1336725.

[2] J. Zhang, K. Kim, A. Glazunov, Y. Wang, L. Ding & J. Zhang. (2020). Generalized Polarization-Space Modulation. *IEEE Transactions on Communications, 68(1),* 258-273. DOI : 10.1109/TCOMM.2019.2947457.

[3] T. Pratt, B. Walkenhorst & S. Nguyen. (2009). Adaptive polarization transmission of OFDM signals in channels with polarization mode dispersion and polarization-dependent loss. *IEEE Transactions on Wireless Communications, 8(7),* 3354-3359. DOI : 10.1109/TWC.2009.080089.

[4] Y. Deng, A. Burr & G. White. (2005, May). Performance of MIMO systems with combined polarization multiplexing and transmit diversity. *Vehicular Technology Conference, 2005.* (pp. 869-873) Sweden: IEEE. DOI : 10.1109/VETECS.2005.1543429

[5] B. Cao, Q. Zhang & L. Jin. (2011). Polarization division multiple access with polarization modulation for LOS. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 1(77),* 1-9. DOI : 10.1186/1687-1499-2011-77

[6] O. Mehanna, N. D. Sidiropoulos & G.B. Giannakis. (2012, June). Multicast beamforming with antenna selection. *Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2012 IEEE 13th International Workshop on.* (pp.70-74). Turkey: IEEE. DOI : 10.1109/SPAWC.2012.6292982

[7] Y. Liu, X. Yang, Y. Jia, & Y. Guo. (2019). A Low Correlation and Mutual Coupling MIMO Antenna. *IEEE Access, 7,* 127384-127392. DOI : 10.1109/ACCESS.2019.2939270.

[8] U. Ullah, M. Al-Hasan, S. Koziel, & I. Mabrouk. (2020). Circular Polarization Diversity Implementation for Correlation Reduction in Wideband Low-Cost Multiple-Input-Multiple-Output Antenna. *IEEE Access, 8,* 95585-95593. DOI : 10.1109/ACCESS.2020.2995723.

[9] K. Zhang, X. Jiang, M. Wen, R. Qiu, & H. Ge. (2020). Precoding-Aided Spatial Modulation With Dual-Polarized Antennas Over Correlated Channels. *IEEE Communications Letters, 24(3),* 676-680. DOI : 10.1109/LCOMM.2019.2963660.

[10] J. Sturm. (1999). Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones. *Optimization Methods and Software, 11(1),* 625-653. DOI : 10.1080/10556789908805766

신 경 섭(Kyung-Seop Shin) [정회원]

- 2011년 1월 : KAIST 전기 및 전자공학과(석사)
- 2015년 1월 : KAIST 전기 및 전자공학과(박사)
- 2015년 2월 ~ 2017년 8월 : KT 융합기술원 인프라연구소 5G TF 선임연구원
- 2017년 9월 ~ 2020년 3월 : 세명대학교 컴퓨터학부 조교수
- 2020년 3월 ~ 현재 : 상명대학교 컴퓨터과학과 조교수
- 관심분야 : 차세대 이동통신, IoT 네트워크, 인공지능
- E-Mail : ksshin@smu.ac.kr