

합산 전송률 개선을 위한 6 차원 이동형 안테나 최적화 기법

김윤동, 최지훈
한국항공대학교

kyd990129@kau.kr, jihoon@kau.ac.kr

Optimization of 6D Movable Antenna for Sum-Rate Enhancement

Yundong Kim and Jihoon Choi
Korea Aerospace University

요 약

본 논문에서는 사용자의 공간적 분포에 유연하게 대응하기 위해 안테나의 위치와 방향을 자유롭게 조절할 수 있는 6 차원 이동형 안테나를 갖춘 기지국을 고려한다. 이동형 안테나 표면이 위치할 수 있는 지점과 회전 각도가 이산적으로 분포한다고 가정하고, 입자 군집 최적화 알고리즘을 이용해서 합산 전송률을 최대가 되도록 하는 최적의 안테나 위치를 찾는다. 사용자 분포를 고려한 모의실험을 통해 이동형 안테나에 의한 성능 이득을 확인한다.

I. 서 론

최근 6 세대 이동통신에서는 셀프리 대규모 다중 입출력 네트워크, 초대규모 다중 입출력 송수신 기법 등 기지국에 대규모 다중 안테나를 장착하여 스펙트럼 효율을 높이는 전송 기술이 활발히 연구되고 있다. 하지만 이러한 기법은 하드웨어 구현 비용, 전력 소모, 복잡도가 매우 높다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위한 방안으로 지능 반사 평면을 통해 링크 성능을 개선하는 방안이 연구되어 왔으나, 위치가 고정된 안테나를 사용할 경우 공간적 자유도에 제약이 발생해서 사용자 분포의 변화에 유연하게 대응하기 힘든 문제가 있다. 또한, 유체 안테나와 2 차원 이동형 안테나 등 안테나의 물리적 이동을 통해 전파 방사 방향을 조절하는 기법이 제안되었으나 안테나가 배치된 선 혹은 평면내에서만 위치를 변경할 수 있으므로 성능 이득이 제한되는 단점이 있다 [1].

기존 안테나 구조의 대안으로 3 차원 안테나 회전과 위치 조절을 모두 지원하는 6 차원 이동형 안테나(6DMA; Six-Dimensional Movable Antenna)가 새로운 대안으로 제시되었다 [2]. 6DMA는 유체 안테나 대비 높은 비용과 에너지 소모를 보이지만, 3 차원 조향각과 위치 조절을 통해 사용자 분포에 따라 안테나 빔 패턴을 능동적으로 조절할 수 있다. 특히 6DMA는 안테나를 구 표면에 균등하게 배치한 기존 구형 안테나에 비해 적은 수의 안테나로 높은 공간적 유연성을 가지며 간섭 억제 성능 개선이 가능하다. 또한, 고정 안테나는 높은 빔도로 안테나 위치를 조정해야 하는 반면에 6DMA는 상대적으로 낮은 빔도의 위치 조정으로 높은 성능을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 분산형 안테나 표면으로 구성된 6DMA를 적용한 다중 사용자 전송 시스템을 정의하고, [3]에서 제안한 합산 전송률 최대화 기반의 6DMA 표면의 위치 및 회전각도 최적화 문제 정의를 도입한다. 합산 전송률을 최대화하는 비볼록 문제의 해를 구하기 위해 [4]에서 제안한 입자 군집 최적화 (PSO; Particle Swarm Optimization) 기법을 사용하여 반복적인 업데이트를 수행한다. 핫스팟(Hotspot) 지역의 단말 분포를 고려한 모의실험을 통해 기존 방식 대비 PSO 최적화 기법의 성능 이득을 확인한다.

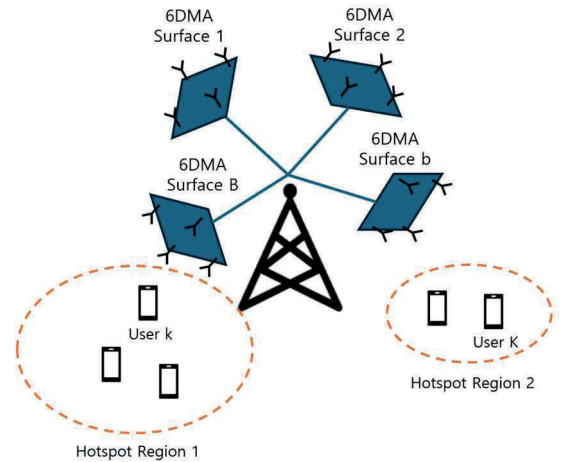


그림 1. 6DMA 적용한 이동통신 시스템 모델

II. 6DMA를 장착한 기지국 시스템 모델

그림 1에서 기지국은 N 개의 안테나를 갖는 B 개의 분산 6DMA 표면으로 구성되고, 단일 안테나를 갖는 K 명의 사용자가 기지국 근처에 핫스팟 형태로 분포한다. 각 6DMA 표면이 위치할 수 있는 지점이 M 개가 있다고 가정하면, 각 지점의 위치와 회전각도는 다음과 같다.

$$\mathbf{q}_m = [x_m, y_m, z_m]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{u}_m = [\alpha_m, \beta_m, \gamma_m]^T \quad (2)$$

M 개의 후보지 중 B 개를 선택할 때, 각 사용자로부터 B 개의 6DMA 표면까지의 채널 $\mathbf{h}_k(\mathbf{q}, \mathbf{u})$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{h}_k(\mathbf{q}, \mathbf{u}) = [\mathbf{h}_{1,k}^T(\mathbf{q}_1, \mathbf{u}_1), \dots, \mathbf{h}_{B,k}^T(\mathbf{q}_B, \mathbf{u}_B)]^T \quad (3)$$

이때 $\mathbf{h}_{b,k}(\mathbf{q}, \mathbf{u})$ 는 k 번째 사용자로부터 b 번째 6DMA 표면까지의 채널이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{h}_{b,k}(\mathbf{q}_b, \mathbf{u}_b) = \sum_{i=1}^{\Gamma_k} e^{-j\phi_{i,k}} \sqrt{\mu_{i,k}} \sqrt{g_{i,k}(\mathbf{u}_b)} \mathbf{a}_{b,i,k}(\mathbf{q}_b, \mathbf{u}_b) \quad (4)$$

이때 Γ_k 는 k 번째 사용자로부터 각 6DMA까지의 다중경로 수를 나타내며, $\mu_{i,k}$, $\phi_{i,k}$ 는 i 번째 다중경로에서의 이득과 위상 천이를 의미한다. 또한 $\mathbf{a}_{b,i,k}(\mathbf{q}_b, \mathbf{u}_b)$ 와

$\mathbf{g}_{i,j}(\mathbf{u}_{ib})$ 는 각각 6 차원 조향 벡터와 안테나 이득을 나타낸다.

III. 6DMA 의 위치 및 회전각도 최적화

전체 K 명의 사용자로부터 6DMA 표면이 위치할 수 있는 M 개의 후보지까지 채널 행렬을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1^T, \dots, \mathbf{H}_M^T]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_m = [\mathbf{h}_{m,1}(\mathbf{q}_m, \mathbf{u}_m), \dots, \mathbf{h}_{m,K}(\mathbf{q}_m, \mathbf{u}_m)] \in \mathbb{C}^{N \times K} \quad (6)$$

이때 선택된 B 개의 후보지에 대한 채널 $\bar{\mathbf{H}}(\mathbf{q}, \mathbf{u})$ 은 다음과 같이 선택 행렬 \mathbf{S} 를 이용해서 표현할 수 있다.

$$\bar{\mathbf{H}}(\mathbf{q}, \mathbf{u}) = (\mathbf{S} \otimes \mathbf{I}_N) \mathbf{H} \quad (7)$$

$$[\mathbf{S}]_{b,m} = \begin{cases} 1, & \text{if the } b\text{-th 6DMA surface selects the } m\text{-th candidate} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

위 식에서 정의한 채널을 이용해서 전체 사용자에게 합산 전송률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(\mathbf{s}) = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_K + \frac{P}{\sigma^2} \mathbf{H}^H (\mathbf{S} \otimes \mathbf{I}_N)^T (\mathbf{S} \otimes \mathbf{I}_N) \mathbf{H} \right) \quad (9)$$

이때 p 는 사용자의 공통 송신 전력이고, σ^2 은 잡음 분산이다. B 개의 6DMA 표면 후보지를 선택한다는 제약조건 하에서 합산 전송률을 최대화하는 문제는 다음과 같이 정의할 수 있다 [3].

$$\max_{\mathbf{s}} \sum_{k=1}^K C(\mathbf{s}), \text{ s.t. } \mathbf{1}^T \mathbf{s} = B, [\mathbf{s}]_i \in \{0,1\} \quad (10)$$

위 문제에서 \mathbf{s} 의 최적해는 6DMA 를 배치할 수 있는 전체 M 개의 위치 중에서 합산 전송률이 최대가 되는 B 개의 후보지를 선택하는 벡터이고, 이를 찾기 위해 [3]에서 제안한 PSO 알고리즘을 사용한다. PSO 알고리즘은 위치 벡터 \mathbf{s} 와 속도 벡터 ξ 로 정의되는 입자들을 반복적으로 업데이트하며 최적의 해를 찾는다. 이때 t 번째 반복 연산 시점에서 i 번째 입자의 속도와 위치 벡터는 다음과 같이 각각 업데이트 한다 [4].

$$\xi_i^{(t+1)} = \kappa \xi_i^{(t)} + c_1 \tau_1 (\mathbf{s}_{i,pbest} - \mathbf{s}_i^{(t)}) + c_2 \tau_2 (\mathbf{s}_{gbest} - \mathbf{s}_i^{(t)}) \quad (11)$$

$$\mathbf{s}_i^{(t+1)} = \mathbf{s}_i^{(t)} + \xi_i^{(t+1)} \quad (12)$$

이때 c_1 은 개별 훈련인수, c_2 는 전역 훈련인수이고, τ_1 과 τ_2 는 $[0,1]$ 범위에서 균일 분포를 갖는 랜덤 파라미터이며, κ 는 관성 가중치를 나타낸다. 위의 식을 이용해서 $(t+1)$ 번째 반복 시점에서 구한 위치 벡터 $\mathbf{s}_i^{(t+1)}$ 를 이용해서 합산 전송률을 계산하고, i 번째 입자의 최적 위치 $\mathbf{s}_{i,pbest}$ 와 전역 최적 위치 \mathbf{s}_{gbest} 를 갱신한다. PSO 알고리즘을 이용한 6DMA 최적화 과정은 다음 그림과 같다.

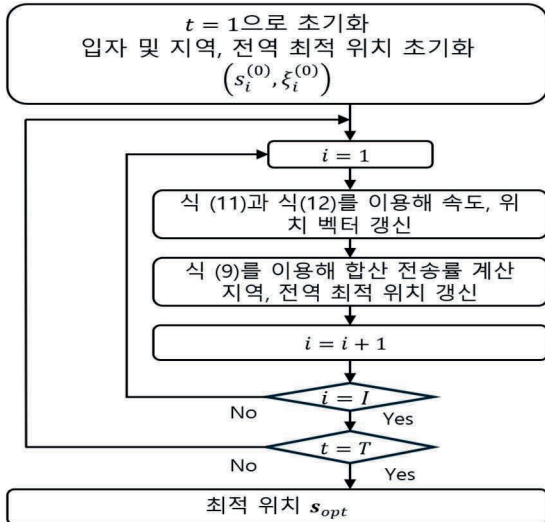


그림 2. PSO 를 이용한 6DMA 최적화 알고리즘

III. 모의실험 결과

모의실험에서 $N = 4, \Gamma_k = 100, f_c = 2.4\text{GHz}$, 6DMA 표면의 개수 $B = 16$, 사용자 수 $K = 30$ 으로 설정했고, 30명의 사용자가 3 개의 핫스팟 영역과 그 외 영역에 존재한다고 가정하였다. 6DMA 가 위치할 수 있는 M 개의 후보지는 구면상에 균등하게 분포한다고 가정한다. 성능 비교를 위해 M 개의 후보지 중 B 개를 랜덤하게 뽑는 과정을 100 회 반복해서 합산 전송률이 최대가 되는 위치를 찾는 방식인 RMS(Random-Max Sampling)와 3 섹터 고정 안테나 기법(FPA; Fixed Position Antenna)을 고려하였다.

그림 3 은 송신 전력에 따른 세 가지 기법의 합산 전송률을 비교해서 나타낸다. FPA 기법은 세 가지 기법 대비 가장 낮은 성능을 보이며, 송신 전력이 증가할 때 합산 전송률 증가 속도가 매우 낮다. RMS 기법은 FPA 대비 상당한 성능 이득을 보이지만, 표면 위치 후보지를 랜덤하게 선택하는 과정에서 일부 성능 손실이 발생한다. PSO 기법의 경우 기존 RMS 기법과 FPA 기법에 비해 우수한 성능을 보이며, 6DMA 표면을 위한 최적의 위치와 조향각을 찾는 것을 확인할 수 있다.

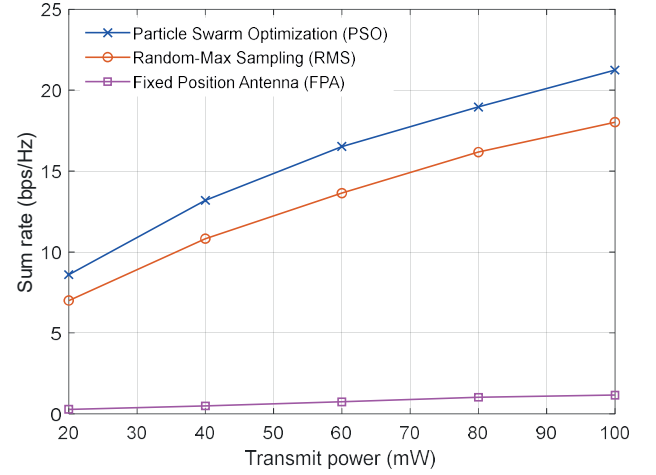


그림 3. 제안된 기법과 기존 기법의 성능 비교

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021 년도 및 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021-0-00874, 시공간 선 부호 기반 차세대 무선 접속 기술 개발, 50%), (RS-2025-02283160, 상향링크 성능향상을 위한 64TRx Massive MIMO O-RU 개발, 50%).

참 고 문 헌

- [1] L. Zhu, W. Ma, and R. Zhang, "Movable-Antenna Array Enhanced Beamforming: Achieving Full Array Gain with Null Steering," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 12, Dec. 2023.
- [2] X. Shao and R. Zhang, "6DMA Enhanced Wireless Network with Flexible Antenna Position and Rotation: Opportunities and Challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 63, no. 4, pp. 121-128, Apr. 2025.
- [3] X. Shao, R. Zhang, Q. Jiang, J. Park, T. Q. S. Quek and R. Schober, "Distributed Channel Estimation and Optimization for 6D Movable Antenna: Unveiling Directional Sparsity," *IEEE J. Select. Topics Signal Process.*, vol. 19, no. 2, pp. 349-365, Mar. 2025.
- [4] M. Clerc and J. Kennedy, "The Particle Swarm - Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 1, pp. 58-73, Feb. 2002.