

국소적 이동형 안테나 기반 근거리장 통신 시스템을 위한 최적 이동 영역 분할 기법

김재홍, 정진곤*

중앙대학교 전자전기공학과

{kjhct9606; jgjoung}@cau.ac.kr

Optimal Movable Region Partitioning Method for Locally Movable Antenna-Enabled Near-Field Communication Systems

Jaehong Kim and Jingon Joung*

Department of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University

요약

최근, 근거리장 채널에서 송·수신 안테나 위치를 조정하여 통신 성능을 향상하는 이동형 안테나 (MA: movable antenna) 기술이 연구되고 있다. 다중 안테나를 전체 안테나 이동 영역 내에 최적 위치로 배치하는 이상적인 MA 기술은 이론적으로 높은 성능을 달성하나, 안테나 사이 간격이 좁을 경우, mutual coupling으로 인한 성능 열화가 발생할 수 있으며, 이를 방지하는 하드웨어 구현 복잡도가 높다는 단점이 있다. 이에 본 연구에선, 개별 MA가 전체 이동 영역 중 일부만 이동하여 다른 안테나와 겹침을 방지하는 국소적 MA 기술을 제안한다. 또한, 각 MA에 주어진 이동 영역 길이에 따라 전체 MA가 얻는 평균 수신 신호 대 잡음비 (SNR: signal-to-noise ratio)가 결정되므로, 이를 최대화하는 최적 이동 영역 분할 기법을 제안한다. 제안하는 최적 이동 영역 분할 기법이 균일 분할 및 무작위 분할 기법 대비 높은 수신 SNR을 얻음을 실험적으로 확인하였다.

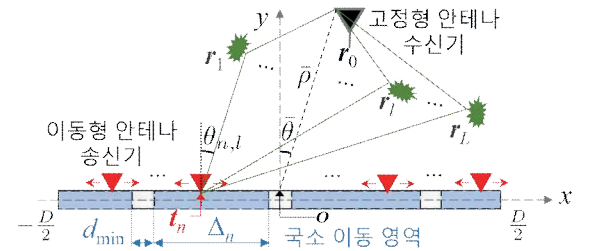
I. 서론

이동형 안테나 (MA: movable antenna)는 다중 경로 무선 채널 환경 변화에 따라 동적으로 안테나 위치를 조정하여, 기존 고정형 안테나 (FPA: fixed-position antenna) 대비 높은 통신 성능을 얻을 수 있다. 최근, 근거리장 통신 시스템에 MA를 활용하여 기존 FPA 대비 송신 전력을 낮추는 다중 MA 위치 최적화 기법이 연구되었다 [1]. 하지만, 다중 MA가 전체 이동 영역을 이동할 수 있는 이상적인 하드웨어 구조는 구현 복잡도가 매우 높으며, mutual coupling에 따른 성능 열화가 발생할 수 있다.

본 연구에선 각 MA가 전체 이동 영역 중 일부 영역 (즉, 국소 이동 영역) 내에서만 이동할 수 있는 국소적 이동형 안테나 개념을 제안한다. 인접한 MA 사이 특정 간격을 두고 국소 이동 영역을 분할하면, mutual coupling에 따른 성능 열화 없이, 낮은 구현 복잡도로 다중 MA를 활용할 수 있다. 이때, 국소 이동 영역 분할 방식에 따라 개별 MA가 활용하는 공간적 자유도가 달라, 전체 MA 시스템이 얻는 평균 채널 이득이 달라진다. 이에 따라, 본 연구에선 근거리장 채널에서 최대 수신 신호 대 잡음비 (SNR: signal-to-noise ratio)를 얻는 최적 이동 영역 분할 기법을 제안한다. 모의실험 결과, 제안하는 최적 분할 기법이 수신 SNR 측면에서 균일 분할 및 무작위 분할 기법을 능가함을 확인하였다.

II. 국소적 이동형 안테나 기반 근거리장 통신 시스템 및 채널 모델

본 연구에선 N 개 MA를 갖는 송신기와 단일 FPA를 갖는 수신기 사이 근거리장 통신 시스템을 고려한다. 그림 1에서 보인 바와 같이, 국소적 MA 시스템에서 n 개 MA는 길이가 D 인 일차원 이동 영역 중 길이 Δ_n 이며 중심 위치가 $\bar{\mathbf{t}}_n = [\bar{x}_n \ 0]^T$ 인 국소 이동 영역 내에서만 이동하도록 제한한다. 이때, 인접한 국소 이동 영역은 d_{\min} 간격을 두고 배치한다. 송신기 중심 위치를 원점 \mathbf{o} 로 둘 때, n 개 MA 위치 벡터는 $\mathbf{t}_n = [x_n \ 0]^T$, MA 위치 행렬은 $\mathbf{T} = [\mathbf{t}_1 \ \cdots \ \mathbf{t}_N] \in \mathbb{R}^{2 \times N}$ 으로 표기한다. 송신기 중심과



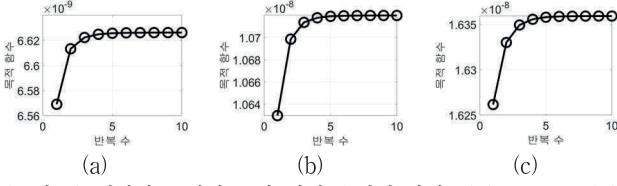
[그림 1] N 개 국소적 이동형 안테나를 갖는 송신기와 단일 고정형 안테나를 갖는 수신기로 구성된 근거리장 통신 시스템 모델.

수신기 사이 거리를 $\bar{\rho}$, 송신기 측에서 바라본 수신기 도래각을 $\bar{\theta}$ 라고 할 때, 수신기 위치는 $\mathbf{r}_0 = [\bar{\rho} \sin \bar{\theta} \ \bar{\rho} \cos \bar{\theta}]^T$ 로 표현할 수 있다.

송신기와 수신기 사이 L 개 산란체가 분포하는 경우, 근거리장 다중 경로 채널 모델은 다음과 같이 쓸 수 있다 [1]:

$$\mathbf{h}(\mathbf{T}, \{\mathbf{r}_l\}) = \sum_{l=1}^L \beta_l \text{diag}(\boldsymbol{\eta}_l) \mathbf{a}(\mathbf{T}, \mathbf{r}_l, \boldsymbol{\theta}_l). \quad (1)$$

여기서, $\beta_l \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 과 $\boldsymbol{\eta}_l = [\eta_{1,l} \ \cdots \ \eta_{N,l}]^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ 은 각각 l 제 경로에 해당하는 복소 채널 이득 및 경로 손실을 의미하며, 이때 $\eta_{n,l} = (\lambda/4\pi)^2 \|\mathbf{t}_n - \mathbf{r}_l\|_2^{-1} \|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_l\|_2^{-1}$ 이다 [1]. 또한, $\rho_{n,l}$ 과 $\theta_{n,l}$ 을 각각 n 제 안테나와 l 제 산란체 사이 거리 및 도래각으로 표기하면, l 제 산란체 위치는 $\mathbf{r}_l = [\rho_{n,l} \sin \theta_{n,l} \ \rho_{n,l} \cos \theta_{n,l}]^T$ 로 쓸 수 있다. 한편, $\mathbf{a}(\mathbf{T}, \mathbf{r}_l, \boldsymbol{\theta}_l) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 은 n 제 원소로 $e^{j2\pi \rho_{n,l}/\lambda}$ 를 갖는 근거리장 위상 조향 벡터이다 [2]. 여기서, $\lambda = f_c/c$ 는 신호 파장을 뜻하며, f_c 와 c 는 각각 중심 주파수와 빛의 속도를 의미한다.



[그림 2] 제안하는 최적 분할 기법 수렴성 확인. (a) $N=4$, (b) $N=8$, (c) $N=16$. ($D=50\lambda$, $\rho_0=100\lambda$, $P=10\text{ dB}$).

III. 수신 SNR을 최대화하는 국소 이동 영역 최적 분할 기법

n 째 MA는 국소 이동 영역 내에서 얻을 수 있는 최대 채널 이득은 $\bar{\gamma}_n = \max_{\mathbf{t}_n \in \mathbb{D}_n} |\bar{\mathbf{h}}(\mathbf{t}_n, \{\mathbf{r}_l\})|^2$ 로 쓸 수 있으며, 이때 $\mathbb{D}_n = \{\mathbf{t} = [x_n \ 0]^T \mid \bar{x}_n - \Delta_n/2 \leq x_n \leq \bar{x}_n + \Delta_n/2\}$ 이다. MA 송신기가 최대 비 결합을 수행할 때 얻는 평균 수신 SNR은 중심 극한 정리 및 확률 변수 최댓값의 평균을 구하는 order statistics를 활용하여, 다음과 같이 근사적으로 유도할 수 있다 (자세한 유도 과정은 [3] 참고):

$$\sum_{n=1}^N \mathbb{E}[\bar{\gamma}_n] \approx \sum_{n=1}^N \bar{\eta}_n^2 (\ln(2\Delta_n/\lambda + 1) + \varsigma). \quad (3)$$

여기서, ς 는 오일러 상수이며, $\bar{\eta}_n^2 = \sum_{l=1}^L \bar{\eta}_{n,l}^2$ 이다. 이때, $\bar{\eta}_{n,l} = (\lambda/4\pi)^2 \|\bar{\mathbf{t}}_n - \mathbf{r}_l\|_2^{-1} \|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_l\|_2^{-1}$ 은 $\bar{\mathbf{t}}_n$ 과 \mathbf{r}_l 사이 경로 손실을 의미한다.

(3)을 통해, 평균 수신 SNR을 최대화하는 국소 이동 영역 최적 분할 문제를 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\max_{\Delta} \sum_{n=1}^N \bar{\eta}_n^2 (\ln(2\Delta_n/\lambda + 1) + \varsigma) \quad (4a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{n=1}^N \Delta_n \leq D - (N-1)d_{\min}, \Delta_n \geq 0. \quad (4b)$$

여기서, $\Delta = [\Delta_1 \dots \Delta_N]^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ 이다. 한편, (4)는 목적함수의 분자와 분모가 각각 $\{\Delta_n\}$ 에 대해 concave와 convex 함수인 분수 계획법 문제로, [4]에서 제시한 quadratic 변환을 통해 다음과 같이 변형할 수 있다:

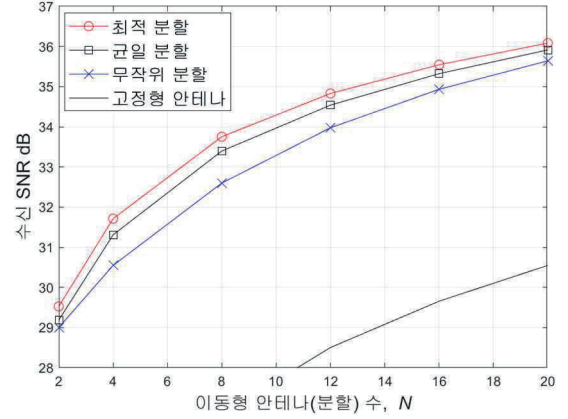
$$\max_{\Delta, \mathbf{Z}} \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L (2\zeta_{n,l} \sqrt{\ln(2\Delta_n/\lambda + 1) + \varsigma} - \zeta_{n,l}^2 \bar{\eta}_n^2) \quad (5a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{n=1}^N \Delta_n \leq D - (N-1)d_{\min}, \Delta_n \geq 0. \quad (5b)$$

여기서, 행렬 $\mathbf{Z} \in \mathbb{C}^{N \times L}$ 은 (n, l) 째 원소가 $\zeta_{n,l}$ 인 여유 변수 행렬이다. 목적함수가 수렴할 때까지 변수 \mathbf{Z} 와 Δ 를 각각 반복적으로 계산하여, 최적 Δ 를 얻을 수 있다. 먼저, 행렬 Δ 가 고정된 상황에서, 여유 변수 $\zeta_{n,l}$ 은 $\zeta_{n,l} = \sqrt{\ln(2\Delta_n/\lambda + 1) + \varsigma} / \bar{\eta}_n^2$ 로 계산한다 [4]. 반대로, $\zeta_{n,l}$ 가 주어졌을 때, (5)는 Δ 에 대한 convex 문제이므로, CVX와 같은 solver를 활용하여 최적 Δ 를 구할 수 있다. 제안하는 최적 국소 이동 영역 분할 기법은 반복 수 약 10번 내로 수렴하는 것을 그림 2를 통해 확인할 수 있다.

IV. 모의실험을 통한 성능 평가

본 장에선 모의실험을 통해, 제안하는 국소 이동 영역 분할 최적화 기법이 얻는 수신 SNR 성능을 확인한다. 모의실험 비교 기법으로, 모든 n 에 대해 $\Delta_n = (D + d_{\min})/N - d_{\min}$ 인 균일 분할 기법과 균일 무작위 분포로 Δ_n 을 결정한 무작위 분할 기법을 고려하였다. 성능 지표는 수신기가 얻는 평균 수신 SNR로, $\text{SNR} = P\sigma^{-2} \sum_{n=1}^N \mathbb{E}[\max_{\mathbf{t}_n \in \mathbb{D}_n} |\bar{\mathbf{h}}(\mathbf{t}_n, \{\mathbf{r}_l\})|^2]$ 이며, P 와 σ^2 은 각각 송신 및 잡음 전력을 의미한다. 모의실험 파라미터



[그림 3] 이동형 안테나 (혹은 이동 영역 분할) 수 N 에 따른 수신 SNR 성능 비교 ($D=50\lambda$, $\rho_0=100\lambda$, $P/\sigma^2=114\text{ dB}$).

는 다음과 같다: $f_c=28\text{ GHz}$; $\lambda=0.01\text{ m}$; $d_{\min}=\lambda/2$; $P=10\text{ dBm}$; $\sigma^2=-104\text{ dBm}$; $D=50\lambda$; $\bar{\rho}=100\lambda$; $\bar{\theta}=-\pi/4$; 산란체로 인한 다중 경로 수 $L=64$ 이며, 모든 산란체는 송신기 중심과 수신기 위치를 초점으로 하며 이심률이 0.8인 타원 내에서 균일 분포로 생성한다.

이동형 안테나 수 (혹은 국소 이동 영역 분할 수) N 에 따른 수신 SNR 성능을 비교한 결과는 그림 3에서 확인할 수 있다. 모의실험 결과, N 이 증가함에 따라, 각 기법에 따라 얻은 수신 SNR이 모두 증가하였으며, 제안한 최적 분할 기법이 가장 높은 수신 SNR을 얻음을 확인하였다. $N=8$ 인 경우, 제안하는 최적 분할 기법이 균일 분할과 무작위 분할 기법 대비 각각 0.36dB와 1.16dB에 해당하는 성능 향상을 달성하였다.

V. 결론

본 논문에선 국소적 이동형 안테나 기반 근거리장 통신 시스템에서 수신 SNR을 최대화하는 최적 국소 이동 영역 분할 기법을 제안하였다. 모의실험 결과, 제안하는 최적 분할 기법이 균일 분할 및 무작위 분할 기법 대비 높은 수신 SNR을 얻음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2024-00405510)과 정보통신기획평가원의 지원(No.2022-0-00635, 28GHz대역/특화망대역/NR-U 대역을 지원하는 5G 산업용 단말 기술 개발, 25%; No.2021-0-00874, 시공간 선 부호 기반 차세대 무선 접속 기술 개발, 25%)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] J. Ding, L. Zhu, Z. Zhou, B. Jiao, and R. Zhang, "Near-field multiuser communications aided by movable antennas," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 14, no. 1, pp. 138-142, Jan. 2025.
- [2] H. Lu and Y. Zeng, "Communicating with extremely large-scale array/surface: Unified modeling and performance analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 6, pp. 4039-4053, Jun. 2022.
- [3] L. Zhu, W. Ma, and R. Zhang, "Modeling and performance analysis for movable antenna enabled wireless communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 6, pp. 6234-6250, Jun. 2024.
- [4] K. Shen and W. Yu, "Fractional programming for communication systems—Part I: Power control and beamforming," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, no. 10, pp. 2616-2630, May 2018.