

무선 정보 전력 동시전송을 위한 안테나 분할 기법에 관한 연구

김용재 윤장혁*, 정방철**

한국해양과학기술원, *덕산 넵코어스, **충남대학교

yongjaekim@kiost.ac.kr, *jhyoun@oneduksan.com **bcjung@cnu.ac.kr

A Study on the Antenna Partitioning
for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

Yongjae Kim, Janghyuk Youn*, Bang Chul Jung**

Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), *Duksan Navcours Co., Ltd,

**Chungnam National University

요약

본 논문에서는 무선 정보 전력 동시전송(Simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT) 네트워크를 위하여 안테나 분할 기법에 대해 연구하였다. 제안하는 알고리즘을 통해 유저의 수신기에서는 정보복호 안테나와 에너지 하베스팅 안테나 그룹으로 나누어, SWIPT가 가능한 multi-cell multiuser MIMO 네트워크에서 sum-rate과 sum harvested energy의 weighted sum을 최대화 하고자 한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 알고리즘이 기존 다른 기술에 비해 rate-energy region 성능을 향상시킴을 보였다.

I. 서론

6G 무선 통신 시스템에서 배터리로 동작하는 많은수의 IoT 디바이스를 운용하는데 있어서 무선 정보 전력 동시전송(Simultaneous wireless information and power transf, SWIPT)은 큰 관심을 받아오고 있다 [1]. 그러나 RF 기반의 SWIPT 기술은 전송 효율과 하드웨어 구현제약으로 인해 IoT 네트워크가 요구하는 전력을 만족시키기에는 부족함이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 연구들에서 MIMO 기술을 적용해 왔다 [2].

일반적인 무선통신 네트워크에서 간섭은 주된 성능 열화 요인으로 여겨져왔다. 하지만 SWIPT 네트워크에서 간섭은 에너지 하베스팅 관점에서 유용한 자원으로 활용될 수 있다 [3]. 또한, 간섭정렬 기술은 SWIPT 네트워크에서 간섭을 효과적으로 제어할 수 있는 방안으로써 고려되고 있다 [4, 5]. [4]과 [5]에서는 간섭정렬 기반 K -user SWIPT MIMO 네트워크에서 각각 수신 안테나 선택 기술과 최적의 전력 분할 알고리즘을 개발하여 적용시켰다. 하지만 위에 언급한 연구들은 오직 K -user MIMO 네트워크를 고려하였다. 이에 본 논문에서 우리는 multi-cell, multiuser MIMO 네트워크에서 일반화된 간섭정렬 기술 기반의 새로운 수신 안테나 분할 기술을 제안하고자 한다.

II. 시스템모델

본 논문에서 우리는 M 개의 안테나를 지닌 K 개의 기지국 L 개의 렉테나를 지닌 S 개의 단말 환경을 고려한다. 여기서 렉테나는 다이오드와 low-pass 필터로 구성되어 RF 신호를 DC 전류로 변환시켜 배터리를 충전시킬 수 있는 특수 안테나를 의미하며 본 논문에서 안테나와 렉테나의 용어는 구별해서 사용하지 않는다. i 번째 기지국내의 j 번째 단말과 k 번째 기지국 사이의 채널은 $\sqrt{\beta_k^{[i,j]}} \mathbf{H}_k^{[i,j]}$ 이며, 여기서 $\beta_k^{[i,j]}$ 와 $\mathbf{H}_k^{[i,j]}$ 는 각각 large-scale path-loss gain과 small-scale fading 채널 행렬을 의미한다. $\mathbf{H}_k^{[i,j]}$ 의 각 성분들은 independent, identically distributed (i.i.d.)의 complex Gaussian 분포를 따른다고 가정한다. 모든 단말은 자신이 속한 기지국 뿐만아니라 다른 기지국으로부터의 pilot 신호를 통해 채널정보를 추정할 수 있다. j 번째 기지국의 j 번째 단말에서 수신되는 신호는 다음과

같다.

$$\mathbf{y}^{[i,j]} = \sum_{k=1}^K \sqrt{\beta_k^{[i,j]}} P_k \mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{V}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{z}^{[i,j]}. \quad (1)$$

여기서 P_k 는 k 번째 기지국의 전송 전력, $\mathbf{V}_k$ 는 Zero-forcing (ZF) 기반의 전송 빔포밍 행렬, $\mathbf{x}_k$ 는 전송 신호 벡터, $\mathbf{z}$ 는 AWGN이다.

III. 안테나 분할 기법

1) 송·수신 빔포밍 설계

본 논문에서는 기지국들의 pilot 신호를 통해 완벽하게 채널 추정을 할 수 있다고 가정한다. $\mathbf{u}_{L_{ID},j}^{[i,j]}$ 을 j 번째 기지국의 j 번째 단말의 수신 빔포밍 벡터라고 하자. 여기서 L_{ID} 는 정보복호 안테나 수, L 은 안테나 구성의 index를 의미한다. $\mathbf{U}_{L_{ID},j}^{[i,j]}$ 와 $\mathbf{u}_{L_{ID},j}^{[i,j]}$ 를 각각 안테나 구성 행렬과 정보복호 안테나 빔포밍 벡터라고 정의를 하면, 수신빔포밍은 $\mathbf{u}_{L_{ID},j}^{[i,j]} = (\mathbf{U}_{L_{ID},j}^{[i,j]})^H \mathbf{u}_{L_{ID},j}^{[i,j]}$ 로 표현할 수 있다. 여기서, 각 단말은 수신 간섭을 최소화 하는 방향으로 정보복호 안테나 빔포밍 벡터를 설계할 수 있다.

$$\mathbf{u}_{L_{ID},j}^{[i,j]} = \arg \min_{\mathbf{u}_{L_{ID},j}^{[i,j]}} \sum_{k=1, k \neq j}^K \left\| \mathbf{u}_{L_{ID},j}^{[i,j]} \mathbf{U}_{L_{ID},j}^{[i,j]} \mathbf{H}_k^{[i,j]} \right\|^2 = \arg \min_{\mathbf{u}_{L_{ID},j}^{[i,j]}} \left\| \mathbf{u}_{L_{ID},j}^{[i,j]} \mathbf{G}_{L_{ID},j}^{[i,j]} \right\|^2. \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{G}_{L_{ID},j}^{[i,j]}$ 는 aggregated 행렬으로써 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{G}_{L_{ID},j}^{[i,j]} = \left[\left(\mathbf{U}_{L_{ID},j}^{[i,j]} \mathbf{H}_1^{[i,j]} \right), \dots, \left(\mathbf{U}_{L_{ID},j}^{[i,j]} \mathbf{H}_{i-1}^{[i,j]} \right), \left(\mathbf{U}_{L_{ID},j}^{[i,j]} \mathbf{H}_{i+1}^{[i,j]} \right), \dots, \left(\mathbf{U}_{L_{ID},j}^{[i,j]} \mathbf{H}_K^{[i,j]} \right) \right]^H. \quad (3)$$

식 (2)는 $\mathbf{G}_{L_{ID},j}^{[i,j]}$ 의 sigluar value decomposition (SVD)를 통해 간단히 해를 구할 수 있다.

$$\mathbf{u}_{L_{ID},j}^{[i,j]} = \mathbf{q}_{L_{ID},j}^{[i,j]}. \quad (4)$$

기지국 송신단에서의 빔포밍 행렬은 $M \geq S$ 인 경우에 한해서 완벽하게 intra-cell 간섭을 제거하기 위하여 ZF기반 필터링 기법을 사용한다. 각

단말들은 각자의 수신 빔포밍 벡터를 기지국으로 피드백을 해주게 되고, 각 단말의 수신 빔포밍 벡터 정보와 채널 정보를 바탕으로 기지국에서는 수신빔포밍 행렬을 계산할 수 있다 [6].

2) 최적 안테나 구성 선택 알고리즘

각 단말의 최적 안테나 구성을 찾기위하여 본 논문에서는 완전 탐색 알고리즘을 사용한다. 안테나 구성 한가지에 대한 송수신 빔포밍 계산 복잡도는 크지 않기 때문에 완전 탐색 알고리즘을 활용 할 수 있다. 최적 안테나 구성을 찾기위해 아래의 목적함수를 활용한다.

$$\mathcal{L}(L_{ID})^* = \arg \max_{\mathcal{L}(L_{ID})} \Delta \cdot \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^S \bar{R}_{L_{ID}, j_{L_{ID}}}^{[i,j]} + (1-\Delta) \cdot \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^S \bar{Q}_{L_{ID}, j_{L_{ID}}}^{[i,j]}. \quad (5)$$

여기서 $\mathcal{L}(L_{ID}) = \{\mathcal{L}(L_{ID}, 1), \dots, \mathcal{L}(L_{ID}, K)\} = \{I_{L_{ID}}^{[1,1]}, I_{L_{ID}}^{[1,2]}, \dots, I_{L_{ID}}^{[K,S]}\}$ 를 의미하며, $\bar{R}_{L_{ID}, j_{L_{ID}}}^{[i,j]}$ 와 $\bar{Q}_{L_{ID}, j_{L_{ID}}}^{[i,j]}$ 는 각각 정규화된 data rate과 정규화된 harvested energy를 의미한다. 이에 대해 성취가능한 rate과 harvested energy는 다음과 같이 계산된다.

$$R_{L_{ID}, j_{L_{ID}}}^{[i,j]} = \log_2 \left(1 + \frac{\beta_i^{[i,j]} P_i \gamma_{L_{ID}, j_{L_{ID}}}^{[i,j]} |x^{[i,j]}|^2}{\left(\left(\mathbf{u}_{L_{ID}, j_{L_{ID}}}^{[i,j]} \right)^H \mathbf{z}^{[i,j]} + I_{L_{ID}, j_{L_{ID}}}^{[i,j]} \right)^2} \right), \quad (6)$$

$$Q_{L_{ID}, j_{L_{ID}}}^{[i,j]} = \left\| \sum_{k=1}^K \sqrt{\beta_k^{[i,j]} P_k} \bar{\mathbf{u}}_{L_{ID}, j_{L_{ID}}}^{[i,j]} \mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{V}_{L_{ID}, k}^{[k]} \mathbf{x}_k \right\|^2. \quad (7)$$

여기서 $I_{L_{ID}, j_{L_{ID}}}^{[i,j]} = \sum_{k=1, k \neq i}^K \beta_k^{[i,j]} P_k \left| \mathbf{f}_{k, L_{ID}, j_{L_{ID}}}^{[i,j]} \mathbf{V}_{L_{ID}, k}^{[k]} \right|^2$ 를 의미한다.

IV. 시뮬레이션 결과

제안하는 기법의 성능평가를 위하여 [4]의 수신안테나선택 (RAS) 알고리즘과의 성능을 비교하여 평가하였다. [4]의 RAS 알고리즘의 경우 수신단에서 간단한 안테나 선택 기법이 사용되었으며, 송신기에서는 간섭정렬의 개념이 적용되었다. 수신 빔포밍은 무작위의 치환행렬을 통해 만들어지고 송신 빔포밍은 leakage 간섭의 양을 최소화 하는 방향으로 설계된다. 자세한 RAS 알고리즘은 [4]를 참고하면 된다. 간단한 시뮬레이션을 위하여 모든 i, j, k 에 대하여 $\beta_k^{[i,j]}=0.8$, $P_k=1W$ 로 고정하였다.

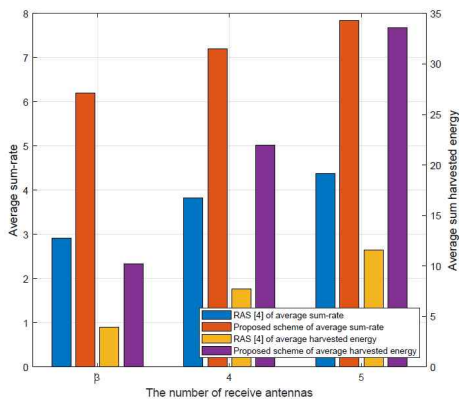


그림 1. 수신안테나 수에 따른 성능 비교

그림 1에서는 $K=2$, $M=3$, $S=2$, $SNR=0dB$ 일 때 단말의 수신안테나 수에 따른 평균 sum-rate과 평균 harvested energy를 비교했다. 수신안테나 수에 대해서 기존 RAS 알고리즘과 비교시 평균 sum-rate의 경우 각각 112%, 88.2%, 79.4% 성능향상이, 평균 harvested energy의 경우 각각 160%, 184%, 189% 성능향상을 보였다.

그림 2에서는 제안하는 기법과 기존 기법의 R-E region 성능을 비교하

였다. R-E region을 L_{ID} 수에 따라 그래프를 그렸으며 L_{ID}^* 는 L_{ID} 를 고정시키지 않고 최고의 weighed sum-rate and harvested energy 성을일때를 의미한다. 그림 2가 보여주는 것과 같이 제안하는 기법의 성능이 더 넓은 R-E region을 성취함을 보인다.

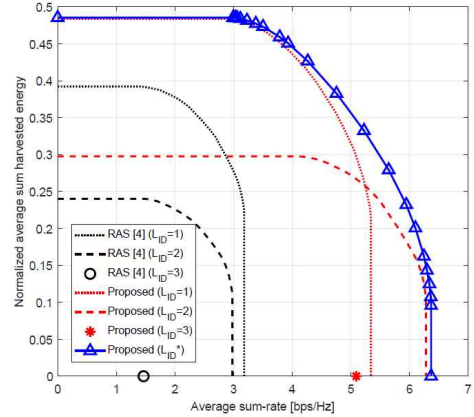


그림 2. R-E region 성능 비교

V. 결론

본 논문에서는 SWIPT 네트워크를 위한 안테나 분할 기법에 대해 연구하였다. 간단한 안테나 분할 기법을 활용하여 기존의 기법대비 월등한 R-E region 성능을 보였다. 추후에는 각 안테나 별로 binary로 선택/미선택했던 제안방식을 power splitting receiver에 적용시킴으로써 보다 일반적인 환경을 위한 기법에 대해 연구할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021R1F1A1A1057901).

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & evaluation (IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2020-0-00144-001, Development of core technologies for unlicensed-band industrial IoT network to overcome limits of wireless connectivity in manufacturing factory).

참고 문헌

- [1] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 12, no. 5, pp. 1989 - 2001, May 2013.
- [2] D. W. K. Ng, E. S. Lo, and R. Schober, "Wireless information and power transfer: Energy efficiency optimization in OFDMA systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 12, pp. 6352 - 6370, Dec. 2013.
- [3] N. Zhao, *et al*, "Exploiting interference for energy harvesting: A survey, research issues, and challenges," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 10403 - 10421, May 2017.
- [4] B. Koo, D. Park, "Interference alignment and wireless energy transfer via antenna selection," *IEEE Commun. Lett.* vol. 18, no. 4, pp. 548 - 551, Jan. 2014.
- [5] N. Zhao, F. R. Yu, V. C. M. Leung, "Wireless energy harvesting in interference alignment networks," *IEEE Commun. Mag.* vol. 53, no. 6, pp. 72 - 78, Jun. 2015.
- [6] H. J. Yang, *et al*, "Opportunistic downlink interference alignment for multi-cell MIMO networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1533 - 1548, Mar. 2017.