

릴레이가 있는 양방향 무선 전력 전달 네트워크에서 성능 최대화

고 영 우[°], 김 상 호^{*}, 노 종 선^{**}

Throughput Maximization in Bidirectional WPCN with Relay

Yeongwoo Ko[°], Sang-Hyo Kim^{*}, Jong-Seon No^{**}

요 약

무선 전력 전달 네트워크는 하향회선으로 전력 전달 신호를 전송하고 이를 전달받은 노드가 받은 신호를 통하여 하베스트한 에너지를 기반으로 정보 신호를 상향회선으로 전송하는 네트워크 모델이다. 본 논문에서는 하나의 하이브리드 릴레이와 릴레이를 기준으로 양 측에 K 개의 멀티유저 쌍이 존재하는 무선 전력 전달 네트워크를 가정하고 해당 네트워크에서 유저들의 총 전송률 합을 최대화 한다. 기존 무선 전력 전달 네트워크에서 주로 사용되는 시 분할 방식의 하베스트-및-전송 프로토콜(harvest then transmit protocol)을 적용하였으며 유저들이 달성하는 전송률을 계산 하고 이를 최대화하기 위한 시간 자원 할당 문제를 제안한다. 컨벡스 최적화(convex optimization)을 통하여 제안된 문제의 해를 구할 수 있음을 증명한다. 시뮬레이션 결과를 통하여 해당 네트워크에서의 전송률이 기존의 균등 자원 할당 기법 대비 높은 성능을 달성함을 보인다.

키워드 : 컨벡스 최적화, 에너지 하베스팅, 릴레이, 자원 할당, 처리량, 무선 전력 전달 네트워크

Key Words : convex optimization, energy harvesting, relay, resource allocation, throughput, wireless powered communication networks (WPCNs)

ABSTRACT

A wireless powered communication networks (WPCNs) is a network model that transmits a power transfer signal on a downlink and transmits an information signal on an uplink based on harvested energy through the received signal. In this paper, we assume a WPCN with one hybrid relay and multi-user pairs, and maximize the throughput of users in the network. We apply the harvest then transmit protocol, which is mainly used in the WPCN. We calculate rates of users and formulate sum rate problem. The convex optimization technique proves that the optimal value of the proposed problem can be obtained. Simulation results show that the sum rate through the proposed optimization problem achieves higher performance than the conventional scheme with equal time allocation.

[°] First and Corresponding Author : Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, INMC, kyw1623@ccl.snu.ac.kr, 학생회원

^{*} College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, iamshkim@skku.edu, 종신회원

^{**} Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, jsno@snu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201912-331-A-RU, Received December 5, 2019; Revised December 15, 2019; Accepted December 23, 2019

I. 서 론

최근 컴퓨터 기술의 급속한 발전으로 인해 기존의 텍스트 위주의 사용자 환경에서 벗어나 이미지, 그래픽, 오디오 및 비디오 데이터 등을 제공하는 멀티미디어 사용자 환경으로 변화하고 있다.

에너지 지속성은 무선 통신 네트워크에서 중요한 문제이며 이와 관련하여 기존의 전자기 유도 혹은 다른 종류의 무선 전력 전달 방식의 대안으로서 무선 주파수 대역 신호(radio frequency signal)을 이용한 무선 전력 전달에 대한 연구가 진행되어왔다¹⁾. 이와 관련된 주요 연구 주제는 크게 두 가지가 있는데 첫째로 무선 정보 및 전력 동시 전달 기법(simultaneous wireless information and power transfer)이며, 두 번째는 본 논문에서 연구한 네트워크 모델인 무선 전력 전달 네트워크(wireless powered communication networks)이다. 해당 네트워크에서는 하나의 hybrid access point(H-AP)과 다중 유저를 가정하며 하향 회선을 통하여 접근점이 유저들에게 무선 전력 전달 신호를 전달하고, 유저들은 받은 신호에서 하베스트한 에너지를 바탕으로 상향 회선으로 정보 신호를 전송한다.

연관된 초기 연구²⁾에서는 네트워크 모델에서 가장 대표적으로 사용되는 하베스트-및-전송 프로토콜(harvest-then transmit protocol)이 제안되었으며 이 프로토콜에서는 시 분할 방식으로 하향, 상향통신을 순차적으로 진행한다. 이 후 연구³⁾에서는 유저 수가 대규모인 상황에서 에너지 하베스팅 랜덤 접속 프로토콜(harvest-or-access) 프로토콜이 제안되었다. 해당 연구에서 각 유저들은 주어진 슬롯에서 에너지를 하베스트 하거나 랜덤 접속을 수행할 수 있다.

이와 더불어 변형된 무선 전력 전달 네트워크 모델들이 제안되었고 그 중에 중요한 모델 중 하나가 릴레이가 존재하는 무선 전력 전달 네트워크 모델이다. 기존 연구⁴⁾에서는 2-유저 무선 전력 전달 네트워크 모델이 제안되었으며 H-AP와 거리가 가까운 유저가 에너지를 전달받고 거리가 먼 유저에게 신호를 릴레이 해주는 상황에 대한 성능이 분석되었다. 다른 연구⁵⁾에서는 다중 소스와 다중 목적지 그룹이 나뉘어진 상황에서 릴레이를 통하여 정보를 전달하는 네트워크 모델을 가정한다. 해당 모델에서는 소스들이 릴레이를 통해 전력 신호를 전달 받은 후 소스에서 정보신호를 릴레이로 전송한다. 릴레이는 받은 정보 신호를 목적지 그룹으로 전달 해주는 역할을 수행한다. 즉, 이러한 두가지 역할을 하는 하이브리드 릴레이를 가정한다.

이와 유사한 연구⁶⁾에서는 세 개의 노드를 가정하는데 하나의 릴레이와 릴레이를 기준으로 양 측에 두 개의 노드가 존재하는 모델을 가정한다. 각 노드들은 서로가 소스이자 목적지이며 서로에게 정보 전송을 하고, 서로에게 원하는 정보를 받고자 하는 상황을 가정한다. 해당 논문에서는 총 전송구간을 릴레이가 에너지를 전달하는 구간 t_1 , 양쪽 노드에서 릴레이로 정보를 전달하는 구간 t_2 , 그리고 릴레이가 양쪽 노드로 전달해주는 구간 t_3 의 총 세 구간으로 나누며 각각의 구간을 동일한 값으로 설정하고 아날로그 네트워크 코딩을 적용한 상황에서의 성능을 분석한다. 앞서 언급한 연구⁵⁾에서는 한쪽 그룹이 소스, 나머지 그룹이 목적지인 상황만을 고려하는 단방향 통신 네트워크 모델이며 이러한 가정은 하나의 노드가 수신단이자 송신단일 수 있는 모바일 환경에는 적용할 수 없는 한계가 있다. 또한 연구⁶⁾에서는 양방향 통신 모델이나 유저 노드가 한 쌍의 경우만을 다루고, 시간 자원을 동일하게 분배하기에 최적화된 성능을 기대하기 어렵다.

본 논문에서는 기존 연구^{5,6)}에서 제안한 모델과 유사한 다중 유저 쌍과 하나의 릴레이가 공존하는 네트워크 모델을 제안한다. 해당 모델에서는 릴레이를 기준으로 양 측에 각각 K 개의 유저 쌍이 존재하며 하나의 쌍에서 두 유저는 서로에게 원하는 정보를 전송 및 송신 받는다. 서로의 유저 그룹은 릴레이를 기준으로 물리적인 방해가 있어 직접적인 회선이 없는 상황이기에 릴레이의 도움을 통하여 통신한다. 이러한 네트워크 모델에서 시간 자원을 동일하게 분배하는 것이 아닌, 각 채널 상황에 대응하여 최적화 하는 문제를 제안하고 컨벡스 최적화 기법을 이용하여 문제를 해결한다. 본 논문에서 제안하는 네트워크 모델은 양방향 통신 모델이며 다중 유저를 가정하기 때문에 기존에 제안되었던 네트워크 모델보다 일반적인 상황에 적용할 수 있으며 릴레이가 있는 상황을 가정함으로써 기존 무선 전력 전달 네트워크 모델보다 유저 사이의 거리가 더 멀리 떨어진 상황까지 허용 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 릴레이와 다중 유저 쌍이 공존하는 무선 전력 전달 네트워크의 시스템 모델을 설명한다. 3장에서는 해당 네트워크 모델에서 유저가 달성하는 전송률을 계산하고 시간 자원 할당을 통한 총 전송률을 최대화 하는 최적화 문제를 제안한다. 또한 제안된 문제를 컨벡스 최적화 기법을 통하여 해결 가능성을 증명한다. 4장에서는 제안된 네트워크 모델에서의 성능을 시뮬레이션을 통하여

분석하고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델 및 평가 척도

2.1 시스템 모델

하나의 하이브리드 릴레이와 k 명의 유저 그룹이 릴레이를 기준으로 양 단에 존재하는 네트워크 모델을 그림 1.과 같이 가정한다. 물리적인 방해로 인하여 양 유저들 간의 직접적인 채널 회선의 파워 세기는 0이며 릴레이의 도움을 받아 통신하는 상황을 가정한다. 릴레이는 양방향으로 하나씩 총 두 개의 방향성 안테나를 가지며 각 안테나사이의 간섭은 0이다. 총 전송시간은 1로 일반화하고, Quasi-static 감쇄 채널 모델과, 채널 reciprocity을 가정한다. 즉, 한번의 전송 구간 내에서는 각각의 채널 세기가 고정되어 있으며 릴레이와 유저 사이의 채널 세기는 상향회선과 하향 회선에서 동일한 값을 가진다. 또한, 릴레이는 완벽한 채널 상태 정보를 가지고 있다.

양 측의 k 번째 유저노드들은 U_k^L, U_k^R 로 정의하고 서로에게 정보를 전송하고자 한다. 각 신호들은 하베스트-및-전송 프로토콜에 따라 순차적으로 전송되며 총 전송구간은 두 개의 구간으로 나뉜다. 첫 번째 구간 τ_0 에서 릴레이는 양 측 유저들에게 무선 전력 전달 신호를 전송하고 각 유저들은 받은 신호를 통하여 에너지를 하베스트 한다. 두 번째 구간은 유저 수 K 개의 보조 구간들로 나뉘며 각 보조 구간은 동일한 길이의 두 개의 홉으로 나뉜다. i 번째 보조 구간의 첫 번째 홉 $\tau_i/2$ 에서는 하베스트한 에너지를 이용하여 유저들은 릴레이에게 신호를 전송하며 두 번째 홉 $\tau_i/2$ 에서는 릴레이가 받은 신호를 양 측으로 증폭및-전달(amplify-and-forward)해 준다. 릴레이는 안정적

인 에너지를 가지고 있고 P_R 의 송신 전력을 가진다.

2.2 평가 척도

릴레이를 기준으로 왼쪽 및 오른쪽 유저들과의 채널 파워 게인(channel power gain)은 각각 h_i, g_i 이고 에너지 하베스트 효율 계수를 η 라고 할 때, i 번째의 왼쪽, 오른쪽유저들이 하베스트하는 에너지 E_i^L, E_i^R 는 다음과 같다.

$$E_i^L = \eta h_i P_R \tau_0 \tag{1}$$

$$E_i^R = \eta g_i P_R \tau_0 \tag{2}$$

각 유저들은 첫 번째 홉 동안 릴레이로 정보 신호를 전송하며 이 때 i 번째 양 측 유저의 전송 파워는 다음과 같다.

$$P_i^L = \frac{E_i^L}{\frac{\tau_i}{2}} \tag{3}$$

$$P_i^R = \frac{E_i^R}{\frac{\tau_i}{2}} \tag{4}$$

수신단에서의 잡음인 가산성 백색 가우시안 잡음의 파워 스펙트럼 밀도는 N_0 이고, 연구^[7]에 따르면, 증폭 및 전달 릴레이 방식에서 수신단이 받는 신호의 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio)는 다음과 같다.

$$SNR_i^L = \frac{\frac{p_i^L g_i}{N_0} \frac{P_R h_i}{N_0}}{\frac{p_i^L g_i}{N_0} + \frac{P_R h_i}{N_0} + 1} \tag{5}$$

$$SNR_i^R = \frac{\frac{p_i^L h_i}{N_0} \frac{P_R g_i}{N_0}}{\frac{p_i^L h_i}{N_0} + \frac{P_R g_i}{N_0} + 1} \tag{6}$$

이 때 달성하는 전송률(nats/s/Hz)은 다음과 같이

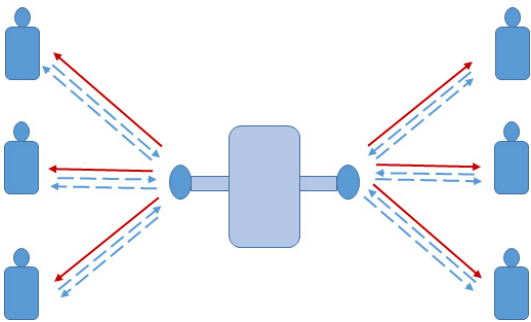


그림 1. 릴레이가 있는 양방향 무선 전력 전달 네트워크
Fig. 1. Bidirectional wireless powered communication network with relay

계산된다.

$$R_i^L = \frac{\tau_i}{2} \log(1 + SNR_i^L) \quad (7)$$

$$R_i^R = \frac{\tau_i}{2} \log(1 + SNR_i^R) \quad (8)$$

III. 총 전송률 최대화 문제 설정 및 컨벡스 최적화를 이용한 문제 해결

이번 장에서는 제안하는 네트워크 모델에서의 시간 자원 할당을 통한 총 전송률을 최대화 하는 문제를 설정하고 컨벡스 최적화를 이용하여 해결 가능성을 증명한다.

3.1 총 전송률 최대화 문제 설정

이전 장의 수식을 이용하여 총 전송률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{sum} = \sum_i^K (R_i^L + R_i^R) \quad (9)$$

각 무선 전력 전달 회선과 정보 전달 회선에 할당된 시간구간의 집합이 $\tau = [\tau_0, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_K]$ 일 때, 총 전송률을 최대화 하는 문제를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{\tau} R_{sum} \\ & \text{subject to} \\ & \text{C2: } \tau_0 + \tau_1 + \dots + \tau_K \leq 1 \\ & \text{C1: } 0 \leq \tau_i \leq 1 \\ & \text{C3: } P_i^L \frac{\tau_i}{2} \leq \eta h_i P_R \tau_0 \\ & \text{C4: } P_i^R \frac{\tau_i}{2} \leq \eta g_i P_R \tau_0 \\ & i = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (10)$$

Constraint C1, C2는 각 전송구간은 0과 1 사이의 값을 가져야 하는 조건과 전송구간의 합에 대한 조건이다. C3, C4는 유저가 릴레이로 정보 신호를 송신할 때에 소모하는 에너지는 하베스트한 에너지를 초과할 수 없다는 것을 의미한다.

3.2 컨벡스 최적화를 이용한 문제 해결

제안한 최대화 문제 (10)을 해결하기 위하여 해당 문제가 컨벡스 최적화 문제임을 증명한다. 이를 위해 우선 목적 함수 R_{sum} 이 볼록 함수(concave function)임을 보인다.

Proposition 1. 문제 (10)의 목적함수 R_{sum} 은 볼록 함수이다.

증명) 다음과 같이 변수를 치환한다.

$$\begin{aligned} P_i^L &= \frac{2P_R h_i \tau_0}{\tau_i} \\ \gamma_i^L &= \frac{h_i^2}{N_0}, \quad \gamma_i^R = \frac{g_i^2}{N_0} \\ \theta_i^L &= P_R g_i, \quad \theta_i^R = P_R h_i \\ \epsilon_i^L &= 2\gamma_i^L P_R \tau_0, \quad \epsilon_i^R = 2\gamma_i^R P_R \tau_0 \end{aligned} \quad (11)$$

치환된 변수를 적용하면 전송률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R_i^L &= \frac{\tau_i}{2} \log(1 + SNR_i^L) \\ &= \frac{\tau_i}{2} \log\left(1 + \frac{\frac{P_i^R g_i}{N_0} \frac{P_R h_i}{N_0}}{\frac{P_i^R g_i}{N_0} + \frac{P_R h_i}{N_0} + 1}\right) \\ &= \frac{\tau_i}{2} \log\left(1 + \frac{2\gamma_i^L P_R \theta_i^L \tau_0}{2\gamma_i^L P_R N_0 \tau_0 + (\theta_i^L + N_0)\tau_i}\right) \\ &= \frac{\tau_i}{2} \log\left(1 + \frac{c\tau_0}{a\tau_0 + b\tau_i}\right) \\ (a &= 2\gamma_i^L P_R \theta_i^L, \quad b = 2\gamma_i^L P_R N_0, \\ c &= (\theta_i^L + N_0)) \end{aligned} \quad (12)$$

$\widehat{R}_i^L = \frac{1}{2} \log\left(1 + \frac{c\tau_0}{a\tau_0 + b}\right)$ 일 때, \widehat{R}_i^L 은 $\tau_i \in (0, \infty)$ 구간에서 볼록 함수이다. R_i^L 은 \widehat{R}_i^L 의 perspective 함수이며 원 함수의 볼록한 성질을 보존한다^[8]. 따라서 R_{sum} 은 볼록함수들의 non negative

weighted 합이고, 볼록함수이다. ■

Proposition 2. 문제 (10)은 컨벡스 최적화 문제이다.

증명) 목적함수 R_{sum} 이 볼록함수이고 제한 조건들이 모두 어파인 함수들의 합이다. 따라서 문제 (10)은 컨벡스 최적화 문제이다.

컨벡스 문제임이 증명되었으므로 컨벡스 solver를 통해 최적의 해를 얻을 수 있으며, 시간 자원을 균일하게 할당하는 기법 대비 선형 제한 조건들만이 추가되었으므로 계산 복잡도는 비슷한 값을 가진다.

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 위한 파라미터 설정은 다음과 같다. path loss 지수가 2인 distance-dependent path loss 모델을 사용하며 quasi-static Rayleigh 감쇄 채널을 적용한다. 모든 채널 파워 변수는 i.i.d.이며 릴레이와 유저 사이의 상향 및 하향 회선에서 reciprocity가 성립한다. 잡음 파워 N_0 는 -160dbm으로 설정하며 1000번의 채널 실험을 통한 평균 성능을 그래프를 통해 나타낸다.

유저 페어 수가 3인 제한된 무선 전력 전달 네트워크 모델에서 각 페어마다 릴레이까지의 거리 분포가 {5, 10, 15}, {5, 15, 30}미터인 경우에 대하여 성능 추이를 그림 2. 와 그림 3.을 통해 볼 수 있다. 그림 2.의 경우 거리 분포의 편차가 작고 상대적으로 평균적인 채널 파워 게인이 높고, 그림 3.의 경우 거리 분포의 편차가 크며 채널 파워 게인의 평균값이 낮다. 이러한 원인으로 달성하는 평균 성능은 그림 2.에서 더 높은 것을 볼 수 있다. 또한 두 경우 모두 시간 자원을 최적화 하지 않는 기존의 균등 자원 할당 기법 (equal resource allocation) 대비 높은 성능을 달성함을 확인하였다.

유저 페어 수가 6일 때, 각각 유저 페어와 릴레이 사이의 거리분포가 {5, 5, 15, 15, 30, 30}인 상황에서의 성능 추이를 그림 4.를 통하여 확인할 수 있다. 유저 수가 3이고 {5, 15, 30}인 경우와 비교하여 더 높은 평균 총 전송률을 달성함을 확인할 수 있으며 마찬가지로 균등 자원 할당 대비 제안한 문제를 통하여 더 높은 성능을 얻을 수 있음을 보인다. 이러한 성능 차이는 균등 자원 할당 기법의 경우 총 전송률을 높이는

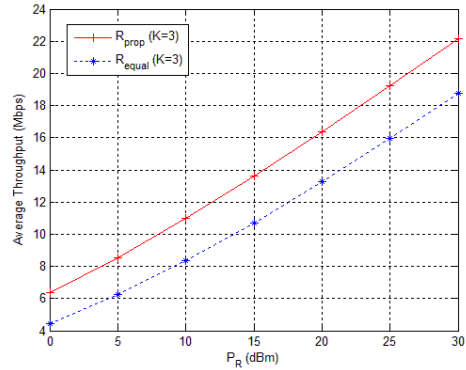


그림 2. {5, 10, 15}의 거리 분포에서 릴레이 전송 전력 P_R 에 대한 무선 전력 전달 네트워크에서의 성능 비교
Fig. 2. Comparison of throughput of WPCN versus P_R with distances {5, 10, 15}

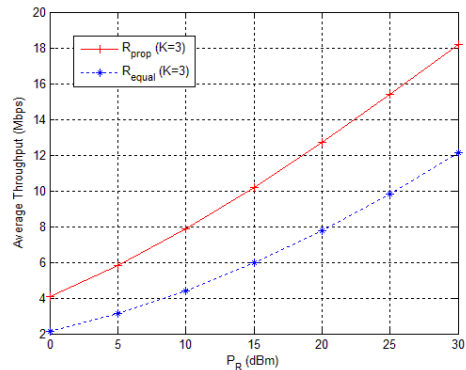


그림 3. {5, 15, 30}의 거리 분포에서 릴레이 전송 전력 P_R 에 대한 무선 전력 전달 네트워크에서의 성능 비교
Fig. 3. Comparison of throughput of WPCN versus P_R with distances {5, 15, 30}

기준에서, 채널 게인이 높지 않은 유저들에게 불필요한 시간 자원을 할당을 해주는 경우가 발생하기 때문이고 제안하는 최적화 문제를 통해 시간 자원 할당을 하는 경우에 더 향상된 성능을 얻을 수 있음을 의미한다. 추가적으로 릴레이를 기준으로 왼쪽으로 거리가 {10}인 1명의 유저만이 있고 오른쪽 방향에는 각각 거리가 {5, 15, 30}인 3명의 유저가 있는 상황에서의 총 전송률 합을 그림 5.에서 보인다. 마찬가지로 균등 자원 할당 대비 높은 전송률을 달성하였으나 두 기법 사이의 성능 차이가 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이는 양 측에 동일한 수의 유저가 있는 경우 보다 시간 할당을 통한 이득이 상대적으로 작아지기 때문인 것을 의미한다.

그림 6.에서는 제안한 기법의 총 전송률과 각 유저 별로 달성하는 전송률을 보였다. 유저와 릴레이간의

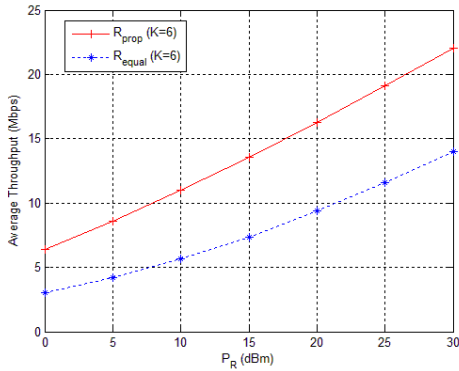


그림 4. {5, 5, 15, 15, 30, 30}의 거리 분포에서 릴레이 전송 전력 P_R 에 대한 무선 전력 전달 네트워크에서의 성능 비교
 Fig. 4. Comparison of throughput of WPCN versus P_R with distances {5, 5, 15, 15, 30, 30}

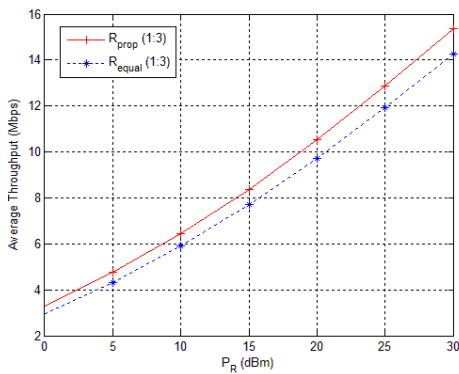


그림 5. 왼쪽 유저와 릴레이의 거리가 {10}, 오른쪽 유저들과 릴레이의 거리가 {5, 15, 30}인 분포에서 릴레이 전송 전력 P_R 에 대한 무선 전력 전달 네트워크에서의 성능 비교
 Fig. 5. Comparison of throughput of WPCN versus P_R with distances {10}, {5, 15, 30}

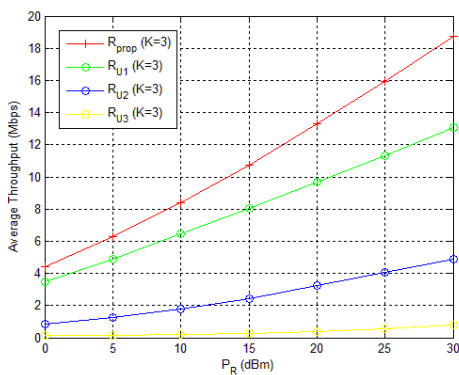


그림 6. {5, 10, 15}의 거리 분포에서 총 전송률과 각 유저별 전송률 비교
 Fig. 6. Comparison of total throughput and user throughput of WPCN versus P_R with distances {5, 10, 15}

거리가 근접할수록, 즉, 채널 세기가 높을수록 달성하는 전송률이 높은 것을 확인할 수 있다. 그러나 유저 공정성 측면에서, 각 유저들이 달성하는 전송률의 차이가 극심한 것을 확인할 수 있다. 예를 들어 $P_R = 15$ 일 때, 유저 별 전송률의 비는 8:2.2:0.2로 할당되며, 이는 채널 세기가 좋은 유저에게 시간 자원이 집중되어 할당되기 때문인 것으로 볼 수 있다. 또한, 유저간의 채널 세기의 차이가 더욱 극심한 상황에서는 채널 세기가 낮은 유저에게 0에 가까운 시간이 할당되어 전송을 하지 못하는 경우가 발생할 가능성도 있다. 이러한 유저 공정성의 불균형 문제를 해결하기 위한 새로운 연구의 필요성을 제기할 수 있으며 이를 위한 연구 방향으로서 최적화 문제의 목적 함수를 총 전송률이 아닌 다른 기준으로 설정하는 것을 생각해 볼 수 있을 것이다. 본 논문에서는 총 전송률만을 최대화 하여 유저 공정성에 대한 고려가 부족하다. 따라서 후속 연구를 통해 연구^[2]에서 제안된 common throughput 및 최소한의 유저 공정성을 확보하는 새로운 criteria에 대해 고려하고자 한다.

V. 결론

본 논문에서는 릴레이와 유저 쌍이 공존하는 무선 전력 전달 네트워크에서 시간 자원 할당을 최적화하여 총 전송률을 최대화 하는 문제를 제안하였다. 해당 네트워크 모델에 기존에 주로 사용된 하베스트-및-전송 프로토콜을 적용하였고 증폭-및-전달 릴레이 방식에 대하여 전송률을 수식으로 나타내었다. 이러한 가정 하에 설정된 최적화 문제를 설정하고 컨벡스 최적화 기법을 이용하여 해결 가능성을 증명하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 최적화 문제를 통하여 얻은 성능은 기존의 균등 자원 할당 기법 대비 높은 성능을 보였다. 총 전송률을 최대화 하는 경우 유저 공정성이 부족하다는 것 보였으며 후속 연구를 통해 이를 고려할 필요성을 확인하였다.

References

[1] Z. Ding, C Zhong, D. W. K. Ng, M. Peng, H. A. Suraweera, R. Schober, and H. V. Poor, "Application of smart antenna technologies in simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 4, pp. 86-93, Apr. 2015.

- [2] H. Ju and R. Zhang, "Throughput maximization in wireless powered communication networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 418-428, Jan. 2014.
- [3] H.-H. Choi and W. Shin, "Energy harvesting random access protocol based on slotted ALOHA in wireless powered communication networks," *J. KICS*, vol. 44, no. 10, pp. 1888-1891, Oct. 2019.
- [4] H. Ju and R. Zhang, "User cooperation in wireless powered communication networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 1-7, Dec. 2015.
- [5] M. Liu and Y. Liu, "Relay-assisted multiuser wireless powered communication with processing costs," in *Proc. IEEE ICC Workshops*, pp. 1-6, May 2018.
- [6] Y. Liu, C. Yan, H. Yang, and X. Bai, "Optimal power splitting in wireless powered communication networks with two-way relay," *2017 17th ICCT*, pp. 545-548, Chengdu, May 2017.
- [7] Y. Zhao, R. Adve, and T. J. Lim, "Improving amplify-and-forward relay networks: Optimal power allocation versus selection," in *Proc. IEEE Inf. Theory*, pp. 1234-1238, Jul. 2006.

고 영 우 (Yeongwoo Ko)



2014년 2월 : 고려대학교 컴퓨터통신공학부 졸업
 2014년 3월~현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 석박사 통학과정
 <관심분야> 통신공학, 무선 전력 통신 네트워크

[ORCID:0000-0003-3507-2269]

김 상 호 (Sang-Hyo Kim)



2014년 2월 : 고려대학교 컴퓨터통신공학부 졸업
 2014년 3월~현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 석박사 통학과정
 <관심분야> 통신공학, 시공간 부호, LDPC 부호, MIMO, OFDM, 이동통신

[ORCID:0000-0002-0660-5516]

노 종 선 (Jong-Seon No)



1981년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학사
 1984년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과 공학석사
 1988년 5월 : University of Southern California 전기공학과 공학박사

1988년 2월~1990년 7월 : Hughes Network Systems Senior MTS

1990년 9월~1999년 7월 : 건국대학교 전자공학과 부교수

1999년 8월~현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 교수
 <관심분야> 시퀀스, 협력통신, 시공간부호, 네트워크코딩, LDPC 부호, OFDM, 이동통신, 암호학

[ORCID:0000-0002-3946-0958]