

논문 2017-54-4-2

밀리미터파를 이용한 빔 조향 기반의 에너지 전송 기술

(Millimeter Wave Energy Transfer based on Beam Steering)

한 용 규*, 정 상 원*, 이 충 용**

(Yonggug Han, Sangwon Jung, and Chungyong Lee[Ⓒ])

요 약

무선 주파수 에너지 전송에 있어 최적의 전처리 기법으로 알려진 전-디지털 에너지 빔포밍은 벡터 양자화를 사용하므로 채널 피드백 부담이 크다. 이러한 피드백 부담을 줄이기 위해 스칼라 양자화를 사용해 채널을 피드백하는 빔 조향 기반의 에너지 전송 기술을 고려할 수 있다. 현재까지의 빔 조향 기반의 에너지 전송 기술에 대한 연구는 특수한 채널 환경 및 기지국-채널 정보를 완벽히 알고 있는 상황에서 진행되었다. 본 논문에서는 현실성을 반영한 채널 모델을 사용하고 채널 추정 오차가 있는 환경에서 빔 조향 기법을 전-디지털 에너지 빔포밍과 비교하여 성능을 분석하였다. 모의실험을 통해 채널 환경, 기지국과 단말의 안테나 수 및 상호 간의 거리, 그리고 채널 추정 오차에 따른 성능을 확인하고 그 원인을 분석한다.

Abstract

Feedback burden of a full-digital energy beamforming, which is known as the optimal precoding scheme for radio frequency (RF) energy transfer, is huge because it uses a vector quantization for a channel feedback. To reduce the feedback burden, we consider a beam steering based wireless energy transfer, which uses a scalar quantization. Researches related to the beam steering based wireless energy transfer have been studied in special channel model with an assumption of full channel state information at the transmitter. In this paper, we analyze the beam steering scheme compared with the full-digital energy beamforming for practical channel models with channel estimation errors. According to characteristics of the millimeter wave channel, the number of antennas of the base station and the user, the distance between them, and channel estimation errors, we simulate the performance of the beam steering scheme and analyze reasons why.

Keywords : 밀리미터파, 무선 에너지 전송, 에너지 빔포밍, 빔 조향, 채널 추정 오차

I. 서 론

사물인터넷 시대가 다가오면서 센서 등을 포함한 무선 전자기기의 수가 급증하고 있다. 무선 전자기기는 모두 전력 공급이 있어야 하고, 현재까지는 이를 배터리에 의존하고 있다. 배터리 자체의 가격은 저렴하지만,

다양한 장소에 위치하는 수많은 무선 전자기기들의 배터리를 관리하고 교체하는 작업은 큰 비용을 수반한다. 배터리 관리 비용을 절감하기 위해, 전자기기에 무선으로 에너지를 공급하는 다양한 방법들이 연구됐다. 초기에는 근거리 에너지 전송에 유리한 자기 유도 방식이나 자기 공명 방식이 주로 연구되었지만, 장거리 에너지 전송에 대한 필요성에 의해 무선 주파수(radio frequency ; RF)를 이용한 에너지 전송이 최근 주목받고 있다^[1].

* 학생회원, ** 정회원, 연세대학교 전기전자공학과 (Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

ⒸCorresponding Author(E-mail : cylee@yonsei.ac.kr)
※ “이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임 (NRF-2015R1D1A1A01058644)”

무선 주파수를 이용한 에너지 전송에 대한 연구는 주로 LTE나 WiFi가 사용하고 있는 800MHz, 2.4GHz, 5GHz 대역에서 진행되었다. 해당 대역은 이미 무선 데이터 전송 서비스에 의해 포화 상태에 이르렀기 때문에, 무선 에너지 전송 시 기존 서비스와 같은 대역을 동시

Received : September 5, 2016 Revised : March 12, 2017
Accepted : March 16, 2017

에 사용해야 한다. 따라서 데이터와 에너지를 동시에 전송하는 simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT), 또는 기지국이 단말에게 에너지를 전송하고, 단말이 그 에너지를 이용하여 데이터를 기지국으로 전송하는 wireless powered communication network (WPCN)에 대한 연구가 진행되어 왔다²⁻³⁾.

최근에는 데이터 통신이 사용하고 있는 대역을 벗어나, 밀리미터파 대역에서의 에너지 전송에 대한 연구가 시작되었다⁴⁻⁶⁾. 밀리미터파 대역은 사용 가능한 대역폭이 넓으므로 대역폭에 비례하여 많은 양의 에너지를 전송하는 데 유리하다. 또한, 현재 밀리미터파 대역을 사용하고 있는 서비스가 없으므로 기존 기기와의 간섭을 고려하지 않아도 된다. 그리고 밀리미터파의 짧은 파장은 거대 (massive) 다중 안테나 (multiple-input multiple-output; MIMO) 시스템을 구현하기 유리하다. 따라서 거대 다중 안테나를 통해 핀-포인트 빔을 형성할 수 있고, 이를 통해 path loss를 극복하고 에너지 전송의 낮은 효율 또는 짧은 전송 거리 등의 한계를 해결할 수 있다.

참고문헌⁴⁾는 밀리미터파 기반의 WPCN에서 푸아송 포인트 프로세스로 기지국 (base station; BS)과 단말 (mobile station; MS)들이 분포되어 있을 때, 평균 하향 링크 에너지 전송량과 평균 상향링크 데이터 전송률을 분석하였다. 이때, 하향링크 에너지 전송을 위해 송, 수신단에서 각각 빔 조향 (beam steering) 기법을 사용하였다. 또한, 밀리미터파 기반의 파워 분할 SWIPT에 대한 연구⁵⁻⁶⁾에서는 확률론적 기하학적 구조를 사용하여 에너지 및 에너지-데이터 커버리지 확률 분포와 평균 에너지 전송량을 분석하였다. 이때, 송신단에서 빔 조향 기법을 사용하였다.

세 연구 모두 밀리미터파 기반의 무선 에너지 전송에 대한 초기 연구 결과이기 때문에, 송신단에서 채널 정보를 완벽히 알고 있다고 가정하였다. 하지만 실제 통신 환경에서는 채널 정보를 완벽히 알고 있다는 가정은 현실성이 떨어진다. 송신단에서 채널 정보를 얻기 위해서는 수신단에서 채널을 추정하고, 송신단에게 피드백 해주어야 한다. 이 과정에서 채널 추정 에러, 그리고 피드백 양자화 에러가 발생하여 송신단이 완벽한 채널 정보를 얻지 못한다. 또한, 세 연구 모두 채널을 구성하는 광선 (ray)의 수가 1개인 채널 모델을 사용하였다. 광선 수가 1개일 경우 빔 조향 기법과 기존의 전-디지털 (full-digital) 에너지 빔포밍 (energy beamforming) 기법은 같은 성능을 보이며, 에너지 전송 관점에서 최적이다.

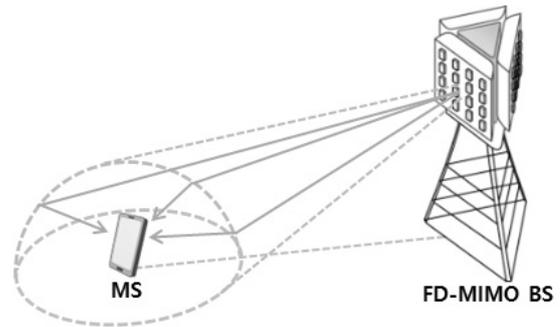


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model.

가장 강한 광선이 채널의 주요 구성 요소가 되긴 하지만, 2개 이상의 광선으로 구성되는 실제 채널의 특징을 모두 반영하지는 못한다. 광선 수가 2개 이상일 경우 빔 조향 기법은 전-디지털 에너지 빔포밍 기법보다 성능이 저하될 여지가 존재하지만, 기존 논문에서는 광선 수가 1개인 채널만을 다루었으므로 이러한 성능 저하에 대한 분석이 이루어지지 않았다.

따라서 본 논문에서는 광선의 수가 2개 이상인 밀리미터파 채널에서 현실적인 채널 추정 과정 기반의 빔 조향 기법을 통해 에너지 전송을 수행하는 시나리오를 가정한다. 그리고 광선의 수 및 채널 추정 오차에 따른 빔 조향 기법의 에너지 전송 성능을 분석한다. 또한, 최적의 에너지 전송 성능을 보이지만 피드백 부담이 큰 전-디지털 에너지 빔포밍 기법과 성능을 비교한다.

II. 본 론

1. 시스템 모델

그림 1과 같이 N_t 개의 균일 평면 배열 (uniform planar array; UPA) 안테나를 가지는 full dimension (FD) MIMO 기지국이 N_r 개의 균일 선형 배열 (uniform linear array; ULA) 안테나를 가지는 단말로 에너지를 전송하는 상황을 가정한다. 기지국과 단말 사이의 채널은 3차원 공간에서 형성되며, 단말 주위에 구 형태로 산란체가 존재하는 3차원으로 확장된 one ring 모델을 사용하였다⁷⁾. 물리 채널 모델은 밀리미터파의 특징을 반영할 수 있는 확장된 Saleh Valenzuela 모델 기반의 유한 광선 채널 모델을 사용하였다⁸⁾. 참고문헌⁸⁾에 따르면, $N_r \times N_t$ 크기의 복소수 행렬로 표현되는 채널 \mathbf{H} 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{N_t N_r}{L}} \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}_r(\phi_l^r, \theta_l^r) \mathbf{a}_t(\phi_l^t, \theta_l^t)^H \quad (1)$$

이때, α_l 은 l 번째 광선의 경로 이득이고, $N_r \times 1$ 크기의 벡터 \mathbf{a}_r 은 l 번째 광선의 수신 방위각 (azimuth angle) ϕ_l^r 와 수신 양각 (elevation angle) θ_l^r 에 의해 결정되는 수신 배열 응답 벡터 (array response vector)를 의미하고, $N_t \times 1$ 크기의 벡터 \mathbf{a}_t 은 l 번째 광선의 송신 방위각 ϕ_l^t 와 송신 양각 θ_l^t 에 의해 결정되는 송신 배열 응답 벡터를 의미한다. 여기서 $(\cdot)^H$ 은 Hermitian 연산을 의미한다. N 개의 안테나를 가지는 y 축으로의 균일 선형 배열과 yz 평면의 균일 평면 배열의 배열 응답 벡터는 각각 식 (2), (3)으로 표현된다.

$$\mathbf{a}^{ULA}(\phi) = \frac{[1, e^{jkd \sin \phi}, \dots, e^{j(N-1)kd \sin \phi}]^T}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

$$\mathbf{a}^{UPA}(\phi, \theta) = \frac{\begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ e^{jkd(m \sin \phi \sin \theta + n \cos \theta)} \\ \vdots \\ e^{jkd((W-1) \sin \phi \sin \theta + (H-1) \cos \theta)} \end{bmatrix}}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

여기서 $k = 2\pi/\lambda$ 이고 λ 는 밀리미터파의 파장, d 는 안테나 간 간격이다. W 와 H 는 각각 y , z 축으로의 안테나 수이고, $0 < m < W-1$, $0 < n < H-1$ 은 각각 y , z 축의 안테나 인덱스를 의미한다.

단말의 수신 신호 \mathbf{y} 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (4)$$

이때, 송신 신호 $\mathbf{x} = \mathbf{F}\mathbf{s}$ 이고, \mathbf{F} 는 $\|\mathbf{F}\|_F^2 = N_t$ 를 만족하는 송신단 전처리기, \mathbf{s} 는 $E\{\mathbf{s}\mathbf{s}^H\} = \mathbf{I}$ 를 만족하는 송신 심볼, \mathbf{n} 은 수신 잡음이다. 여기서 $\|\cdot\|_F^H$ 은 Frobenius norm, $E\{\cdot\}$ 은 기댓값을 의미한다. 단말은 수신 신호 \mathbf{y} 로부터 식 (5)로 표현되는 Q 의 에너지를 수확한다^[2].

$$Q = \eta |\mathbf{y}|^2 \quad (5)$$

여기서 η 는 RF 신호를 직류로 변환하는 효율을 의미하며, 본 논문에서는 편의상 1로 가정한다.

2. 무선 에너지 전송을 위한 전처리기

가. 전-디지털 에너지 빔포밍

논문^[2]에서 증명된 바와 같이, 단일 스트림을 전송하는 것이 에너지 전송량을 최대화하므로, 에너지 전송을 위한 전처리기 \mathbf{F} 는 랭크가 1인 벡터 \mathbf{f} 로 대체할 수 있다. 따라서 식 (6)과 같은 최적화 문제를 통해 에너지 전송량을 최대화하는 최적의 전-디지털 에너지 빔포밍 전처리기 \mathbf{f}_{E-BF} 를 찾을 수 있다.

$$\mathbf{f}_{E-BF} = \operatorname{argmax}_{\mathbf{f}} |\mathbf{H}\mathbf{f}|^2 \text{ s.t. } \|\mathbf{f}\|^2 = N_t \quad (6)$$

이때 최적의 해는 식 (7)과 같음이 알려져 있다^[2].

$$\mathbf{f}_{E-BF} = \mathbf{v}_1 \mathbf{f}_{E-BF} = \mathbf{v}_1 \quad (7)$$

여기서 \mathbf{v}_1 은 \mathbf{H} 를 특이값 분해했을 때 가장 큰 특이값에 대응되는 우 특이벡터이다. 이 때 주목할 점은, 미국에서 \mathbf{v}_1 을 얻기 위해서는 \mathbf{v}_1 을 단말로부터 피드백 받거나, \mathbf{H} 를 피드백 받은 후 특이값 분해를 수행하여야 한다는 점이다. 벡터 \mathbf{v}_1 또는 행렬 \mathbf{H} 를 피드백하기 위해서는 벡터를 양자화 한 벡터 코드북이 필요하므로 피드백 부담이 크다. 그리고 $\|\mathbf{f}\|^2 = N_t$ 의 제약조건은 안테나들에 할당되는 전체 파워에 대한 제약이므로, 각 안테나에 할당되는 파워에는 제약이 걸리지 않는다. 이는 다양한 범위의 파워를 출력할 수 있는 고가의 RF chain을 모든 안테나에 각각 설치해야 함을 의미하고, 이는 제작 단가 면에서 단점으로 작용한다.

나. 빔 조향 기법

앞 절에서 언급한 전-디지털 에너지 빔포밍의 한계를 해결하기 위해 밀리미터파 데이터 통신에서 제안된 빔 조향 기법을 사용할 수 있다^[8]. 빔 조향 기법은 기저대역 전처리기는 고정해두고, RF 이상기 (phase shifter)를 이용해 위상을 변화시켜 빔의 방향을 설정해주는 기법이다. 따라서 최적화 문제 (6)에서 전처리기의 제약조건이 달라진 식 (8) 형태의 최적화 문제를 통해 최적의 빔 조향 전처리기를 구할 수 있다.

$$\mathbf{f}_{BS} = \operatorname{argmax}_{\mathbf{f}} |\mathbf{H}\mathbf{f}|^2 \text{ s.t. } f_l = e^{j\phi_l(\phi_l^t, \theta_l^t)}, \forall l \quad (8)$$

여기서 f_l 은 \mathbf{f} 의 l 번째 원소이고, $f_l(\phi_l^t, \theta_l^t)$ 는 l 번째 안테나 어레이를 ϕ_l^t , θ_l^t 방향으로 조향하기 위한 선형 함수이다. 최적화 문제 (8)에 대한 일반적인 최적해는

구하기 매우 어려우므로, 참고문헌^[8]에서는 매우 큰 N_t 에 대한 최적의 해를 대안으로 제시하였다. 매우 큰 N_t 에 대해 $\mathbf{v}_1 = \mathbf{a}_t(\phi_{l^*}^t, \theta_{l^*}^t)$, $l^* = \operatorname{argmax}_l |\alpha_l|$ 이므로 식 (9)와 같은 최적해를 찾을 수 있다.

$$\mathbf{f}_{BS} = \mathbf{a}_t(\phi_{l^*}^t, \theta_{l^*}^t) \text{ s.t. } l^* = \operatorname{argmax}_l |\alpha_l| \quad (9)$$

\mathbf{f}_{BS} 는 \mathbf{f}_{E-BF} 와는 다르게 각 안테나가 동일한 파워를 가지고 위상이 서로 다른 신호를 송신한다. 따라서 각 안테나에 낮고 일정한 파워 제한이 걸리므로, 제한된 파워 범위를 다루는 낮은 가격의 RF chain으로 기지국을 구성할 수 있다. 또한 기지국이 \mathbf{f}_{BS} 를 구성하기 위해서는 $\phi_{l^*}^t, \theta_{l^*}^t$ 정보만 알면 되므로, 스칼라 양자화를 통한 피드백이 가능하다. 스칼라 양자화를 통한 피드백은 벡터 양자화를 통한 피드백에 비해 피드백 부담이 매우 적은 장점이 있다. 구체적으로, 하나의 실수 스칼라 값을 m bit로 양자화 한다고 할 때, $\phi_{l^*}^t$ 와 $\theta_{l^*}^t$ 를 구성하기 위해서는 $2m$ bit가 필요한 반면, \mathbf{f}_{BS} 를 구성하기 위해서는 $2mN_t$ bit가 필요하다. 밀리미터파 대역을 사용하는 시스템은 보통 거대 다중 안테나 환경에서 운용되므로 N_t 는 매우 크고, 이는 스칼라와 벡터 양자화의 피드백 부담 차이가 매우 큼을 의미한다.

III. 실험

본 장에서는 전-디지털 에너지 빔포밍과 빔 조향 기법의 에너지 전송 성능을 실험을 통해 비교한다. 그리고 오차가 더해진 방위각, 양각 정보를 기반으로 빔 조향 기법을 사용하는 경우 발생하는 성능 저하를 실험을 통해 확인한다. 또한, 유한 광선 채널을 구성하는 광선의 수에 따라 빔 조향 기법의 성능 저하를 확인한다. 모의

표 1. 모의실험 환경
Table1. Simulation environment.

Parameter	Value
Mechanical antenna downtilt of BS	15°
Mechanical azimuth angle of BS to MS	0°
Height of BS	3m
Horizontal distance between BS and MS	4m
Radius of sphere-shaped scatterers	1m
Wavelength of millimeter wave	0.075m
K-factor	3dB

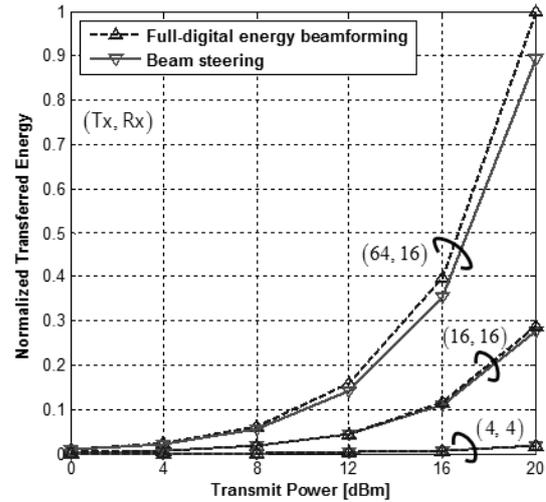


그림 2. 안테나 수와 송신 파워에 따른 정규화된 에너지 전송량 비교

Fig. 2. Comparison of normalized transferred energy according to the number of antennas and transmit power.

실험은 표 1과 같은 환경에서 수행되었다. 여기서 K-factor는 가장 이득이 큰 광선의 평균 이득을 다른 광선의 평균 이득으로 나눈 비율이다. 광선 이득과 잡음은 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정하였다.

그림 2는 다양한 기지국, 단말의 안테나 수와 기지국의 송신 파워에 대해 전-디지털 에너지 빔포밍과 빔 조향 기법의 에너지 전송량을 비교한 그래프이다. 채널의 광선 수는 6으로 설정하였고, 에너지 전송량은 정규화된 상대적인 값으로 비교하였다. 두 기법 모두 기지국에서 채널 정보를 완벽히 알고 있다고 가정하였다. 실험 결과, 빔 조향 기법은 안테나 수에 무관하게 전-디지털 에너지 빔포밍에 비해 10% 미만의 성능 저하를 보여주었다. 하지만 데이터 통신과는 다르게 송, 수신 안테나의 수가 많아져도 두 기법의 성능이 수렴하지 않았다. 그 이유는 데이터 통신의 경우 송, 수신단에서 전, 후처리를 하지만, 에너지 전송의 경우 수신단에서 후처리를 하지 않기 때문이다. 데이터 전송에서는 송신 신호와 잡음의 파워 비율이 중요하기 때문에 적절한 후처리를 통해 신호 대 잡음 비를 높인다. 하지만 에너지 전송에서는 잡음과 무관하게 수신된 신호의 파워 자체가 중요하기 때문에 추가적인 에너지를 소모하는 후처리를 하지 않는다. 채널의 특이값 분해를 통해 전, 후처리기로 우, 좌 특이 벡터를 사용하는 경우, 사용 가능한 모든 파워를 가장 큰 이득을 가지는 광선에 할당할 수 있다. 반면 후처리가 없는 경우 이득이 적은 광선으로

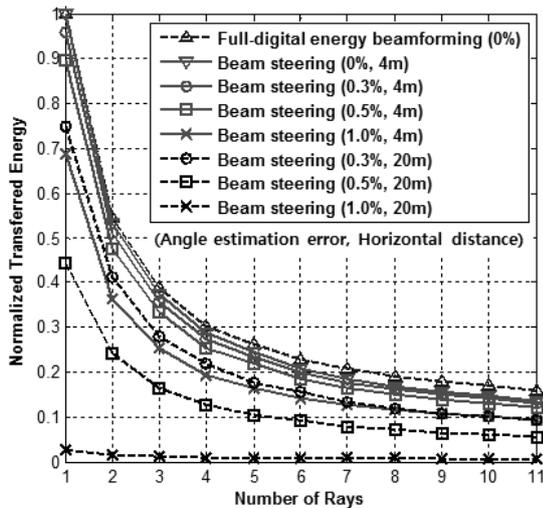


그림 3. 채널의 광선 수와 각도 추정 오차에 따른 정규화된 에너지 전송량 비교

Fig. 3. Comparison of normalized transferred energy according to the number of rays and angle estimation errors.

의 파워 누출이 생겨 가장 큰 이득을 가지는 광선에 모든 파워를 할당하지 못한다.

그림 3은 각도 추정 오차가 있을 때, 오차의 크기와 기지국과 단말 간 수평 거리에 따라 정규화된 에너지 전송량을 채널을 구성하는 광선 수에 따라 비교한 그래프이다. 송신 파워는 20dBm, 송, 수신 안테나 수는 각각 256, 64개를 사용하였다. 기지국과 단말 간 수평 거리는 4m와 20m로 설정하였으며, path loss의 영향을 제거하고 거리에 따른 각도 추정 오차의 영향만 살펴보기 위해 거리와 관계없이 path loss는 일정하다고 가정하였다. 먼저, 광선 수에 따라 에너지 전송량이 감소함을 확인할 수 있다. 이는 빔 조향 기법이 가장 이득이 큰 광선에 모든 파워를 할당하기 때문이다. 광선 수가 많은 채널일수록 가장 이득이 큰 광선이 차지하는 비중이 줄어들기 때문에 에너지 전송량이 감소한다. 에너지 감소량의 정도가 광선 수가 적은 영역에서 크고, 일정 수 이상의 광선을 가지는 채널에서는 감소량이 많지 않다는 점도 주목할 만하다. 그리고 광선의 수가 1개인 경우 전-디지털 에너지 빔포밍과 빔 조향 기법의 성능이 같음을 확인할 수 있다. 이는 광선의 수가 1개이면 채널의 H 의 랭크가 1이므로 $\mathbf{a}_t(\phi_1^t, \theta_1^t) = \mathbf{v}_1$ 이고, $\mathbf{f}_{E-BF} = \mathbf{f}_{BS}$ 이기 때문이다. 한편, 각도 추정 오차가 에너지 전송량에 미치는 영향은 기지국과 단말 사이의 거리가 멀수록 컸다. 왜냐하면 각도 차이가 일정하면 거리가 멀수록 실제 거리의 차이가 커지기 때문이다.

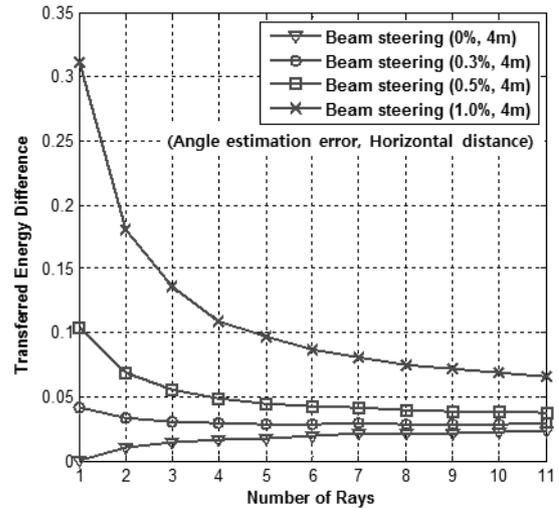


그림 4. 채널의 광선 수와 각도 추정 오차에 따른 전-디지털 에너지 빔포밍 대비 상대 에너지 전송량 오차

Fig. 4. Transferred energy difference from full-digital energy beamforming according to the number of rays and angle estimation errors.

그림 4에서는 그림 3에서 경향만 확인할 수 있었던 각도 추정 오차에 따른 성능 저하 정도를 수치로 계산하여 그린 그래프이다. 광선의 수가 작을 때는 채널 추정 오차에 민감해서 채널 추정 오차에 따른 성능 차이가 크고, 광선의 수가 많을 때는 채널 추정 오차에 의한 영향이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 왜냐하면 빔 조향 기법은 가장 큰 광선 이득을 갖는 광선을 기준으로 전처리를 수행하기 때문이다. 채널을 구성하는 광선의 수가 많을수록, 가장 큰 광선 이득을 갖는 광선이 전체 채널에서 차지하는 비중이 줄어든다. 따라서 빔 조향 기법으로 얻을 수 있는 최대 성능이 제한되고, 따라서 채널 추정 오차가 전체 시스템 성능에 미치는 영향도 제한된다. 또한, 각도 추정 오차가 작은 경우는 광선의 수가 작을수록 전-디지털 에너지 빔포밍 대비 성능 차이가 작고, 각도 추정 오차가 큰 경우는 그 반대임을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 채널 특성에 따라 광선 수가 작을 때는 피드백에 더 많은 시간을 할당하여 채널 추정 오차를 줄이고, 광선 수가 많을 때는 피드백에 할당하는 시간을 줄이고 에너지 전송 시간을 늘리면 시스템 성능을 개선할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 현실성을 반영한 채널 모델에서 채널

추정 오차가 있을 때 빔 조향 기반의 에너지 전송 기술의 성능을 다양한 관점에서 알아보았다. 기지국과 단말의 거리가 멀수록, 채널을 구성하는 광선의 수가 작을수록 채널 추정 오차의 영향이 커짐을 확인할 수 있었다. 다만, 본 연구는 모의실험을 통해 확인하였다는 한계점을 가지므로, 수식적 접근을 통한 추가 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim and Z. Han, "Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, Secondquarter 2015.
- [2] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, May 2013.
- [3] H. Ju and R. Zhang, "Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 13, no. 1, pp. 418-428, January 2014.
- [4] L. Wang, M. Elkashlan, R. W. Heath, M. D. Renzo and K. K. Wong, "Millimeter Wave Power Transfer and Information Transmission," 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2015, pp. 1-6.
- [5] T. A. Khan, A. Alkhateeb and R. W. Heath, "Energy Coverage in Millimeter Wave Energy Harvesting Networks," 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), San Diego, CA, 2015, pp. 1-6.
- [6] T. A. Khan, A. Alkhateeb and R. W. Heath, "Millimeter Wave Energy Harvesting," in IEEE Transactions on Wireless Communications, to be published.
- [7] J. Gong, J. F. Hayes and M. R. Soleymani, "The Effect of Antenna Physics on Fading Correlation and the Capacity of Multielement Antenna Systems," Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2005, Saskatoon, Sask, 2005, pp. 1363-1366.
- [8] O. E. Ayach, R. W. Heath, S. Abu-Surra, S. Rajagopal and Z. Pi, "The Capacity Optimality of Beam Steering in Large Millimeter Wave MIMO Systems," 2012 IEEE 13th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Cesme, 2012, pp. 100-104.

저 자 소 개



한 용 규(학생회원)
2013년 연세대학교 전기전자공학과
학사 졸업
2013년~현재 연세대학교 전기전자
공학과 석박사통합과정
<주관심분야: 통신, 신호처리, MIMO,
SWIPT>



정 상 원(학생회원)
2015년 연세대학교 전기전자공학과
학사 졸업
2015년~현재 연세대학교 전기전자
공학과 석박사통합과정
<주관심분야: 통신, 신호처리, MIMO,
SWIPT>



이 충 용(정회원)-교신저자
1987년 연세대학교 전자공학과 학사
졸업
1989년 연세대학교 전자공학과 석사
졸업
1995년 Georgia Tech. 전자공학과
박사 졸업
1996년~1997년 삼성전자 선임연구원
1997년~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수
<주관심분야: 통신, 신호처리, MIMO>