

# 무선전력전송을 위한 빔포밍 설계 및 성능 분석

송하림, 남성식\*, 고영채  
고려대학교, \*가천대학교

{hhhalims,koyc}@korea.ac.kr, \*ssnam@gachon.ac.kr

## Beamforming Design and Performance Analysis for Wireless Power Transfer

Ha-Lim Song, Sung Sik Nam\*, Young-Chai Ko  
Korea Univ., \*Gachon Univ.

### 요 약

RF 신호를 활용한 무선 전력 전송 기술은 충전이 필요한 디바이스의 방향으로 전력을 집중시켜서 보내야하므로 송신 빔포밍 기술이 요구된다. 디바이스와 전력 송신기 사이의 채널 정보를 기반으로 송신 빔포밍을 설계해야하는데, 이미 잘 알려진 최적의 빔포밍 기법은 채널 추정 정확도에 따라 성능이 좌우된다. 이에 비해 본 논문에서 고려한 주요 경로 기반 빔포밍 기법은 도래각 추정 성능이 어느 특정 값 이상만 보장된다면, 신호 대 잡음비에 좌우되지 않고 일정한 에너지 양을 전달할 수 있는 것을 확인하였다.

### I. 서 론

무선 통신의 발달로 기존의 사용자 간 통신 서비스 외에 디바이스 간의 연결성 확장을 통한 응용 서비스가 확대될 것으로 기대되고 있다. 특히 실내 환경에서 가전 제품 및 각종 디바이스 간의 센서 네트워크의 수요가 증가하고 있다. 이 확장 서비스 중에 RF 신호를 활용하여 디바이스를 무선으로 충전시킬 수 있는 무선 전력 전송 연구가 활발히 진행 중이다 [1]. 특정 디바이스로 무선 전력 전송 서비스를 수행하려면, 빔포밍 연구가 선행되어야 한다. 안테나 배열에서 디바이스로 전력을 집중해서 전송해야 하기 때문이다. 최적의 전력 전송을 위한 빔포밍 설계 기법으로는 채널의 고유 벡터 방향으로 전력을 전송해야 한다. 이 결과는 이미 기존 연구에서 증명된 내용으로, 채널 추정 과정이 선행되어야 한다. 하지만, 잡음의 영향이 큰 실제 실내 환경에서도 최대 전력 전송이 가능한지에 대한 연구 결과는 거의 없었다. 본 논문에서는 채널 잡음의 영향이 비교적 큰 상황에서 무선 전력 전송 플랫폼에 적합한 주요 경로 기반 빔포밍을 통한 에너지 전송 알고리즘을 제안한다. 실내 환경은 신호의 반사, 산란, 회절로 인해 다수의 경로가 생기는데 그 중 대부분의 에너지를 지닌 경로를 주요 경로라고 지칭한다. 모든 경로로 에너지를 전송하는 것을 최적의 빔포밍 방법이라 할 때, 본 논문에서는 주요 경로로만 에너지를 전송하는 것을 방법을 고려한다. 그리고 다양한 실내 환경에서 제안한 방법과 최적의 빔포밍 방법의 성능을 비교 분석한다.

### II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1 과 같은 실내 환경에서, 충전해야 할 디바이스는  $N_D$  개의 안테나가, 에너지 송신기는  $N_E$  개의 안테나가 배치되어 있다. 무선 전력

전송을 위한 신호 프레임은 디바이스에서 전방향으로 파일럿 신호 전송하는 단계와 에너지 송신기에서 설계된 빔포밍 행렬을 통해 디바이스로 전력을 전송하는 단계로 이루어져 있다.

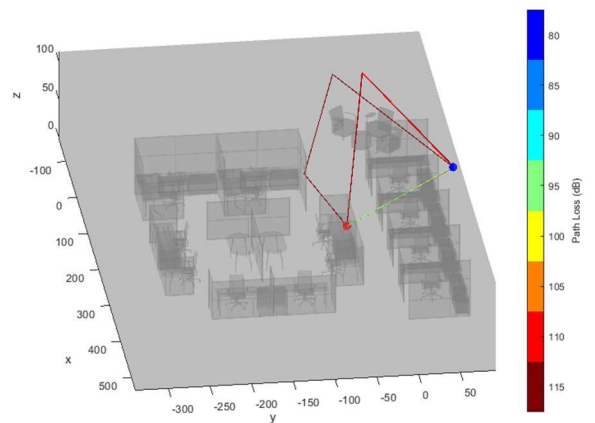


그림 1. 실내 환경에서의 ray tracing 채널 모델

디바이스와 에너지 송신기 사이의 채널은 그림 1 과 같은 ray tracing 모델로 다음과 같이 표현된다 [2].

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}_E \mathbf{D} \mathbf{A}_D^H \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{A}_D = [\mathbf{a}_D(\theta_1), \dots, \mathbf{a}_D(\theta_L)]$  는  $L$  개의 경로로 이루어진 조향벡터로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{a}_D(\theta_i) = [1 \quad e^{j\pi \sin \theta_i} \quad \dots \quad e^{j\pi(N_D-1) \sin \theta_i}] \quad (2)$$

$\theta_i, i = 1, \dots, L$  은 디바이스에서의 출발 각도이다.  $\mathbf{A}_E$  는 수신 도착 각도  $\phi$ 로  $\mathbf{A}_D$ 와 같이 구성된다.  $\mathbf{D} = \text{diag}(\boldsymbol{\alpha})$ 는 각 경로의 전력 성분이 대각 위치에 있다. 여기서,  $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \dots, \alpha_L]$  는  $L$  개의 경로들의 채널 게인이다. 파일럿

신호 전송 단계에서 에너지 송신기에서의 수신 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{F} + \mathbf{N}, \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{F}$  는 디바이스에서의 프리코딩 행렬로 단일 행렬을 가정했다.  $\mathbf{N}$  은 가우시안 잡음 행렬이다.

### III. 무선 전력 전송을 위한 빔포밍 설계

유효 채널을  $\mathbf{H}_e = \mathbf{H}\mathbf{F}$  라 할 때,  $\mathbf{H}_e^H \mathbf{H}_e$  의 고유벡터 방향으로 전력을 전송하는 것이 최대 전력을 보내는 최적의 방법인 것은 많은 연구에서 증명되었다 [1]. 하지만, 채널 정보가 없는 블라인드 상황에서는 수신 신호를 가지고 빔포밍 행렬을 설계해야한다. 즉, 잡음의 영향에 따라 최적의 성능이 아닐 가능성이 있다. 블라인드 상황에서  $\mathbf{G} = \mathbf{Y}\mathbf{Y}^H$  의 고유벡터로 이루어진 최적의 빔포밍 행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{W}_{opt} = [\sigma_1 \mathbf{v}_1 \quad \sigma_2 \mathbf{v}_2 \quad \cdots \quad \sigma_L \mathbf{v}_L], \quad (4)$$

여기서  $\sigma_i$  는 각 경로의 고유값이고,  $\mathbf{v}_i$  는 고유벡터이다. 본 논문에서는 전체 수신 전력의 대부분을 차지하는 주요 경로들의 도래각 성분을 추정하고, 그 방향으로 에너지를 전송하는 방법을 고려한다. 전체 수신 전력의 90% 정도를 차지하는  $L_{dom}$  개의 경로 정보만으로 빔포밍 행렬을 설계하며 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{W}_{dom} = [\sigma_1 \hat{\mathbf{v}}_1 \quad \sigma_2 \hat{\mathbf{v}}_2 \quad \cdots \quad \sigma_{L_{dom}} \hat{\mathbf{v}}_{L_{dom}}], \quad (5)$$

여기서  $\hat{\mathbf{v}}_i$  는 도래각 추정 알고리즘으로 구한  $\hat{\phi}$  으로 해당 방향으로 설계한 조향 벡터이다. 추정 알고리즘은 부공간 기반 알고리즘인 MUSIC(multiple signal classifier), ESPRIT(estimation of signal parameters via the rotational invariance technique) 등의 기법을 고려할 수 있다.

실내 환경 조건에 따라 최적의 빔포밍 기법과 주요 경로 기반 빔포밍 기법의 성능을 비교하여 상황에 적합한 견고한 성능을 보이는 빔포밍 기법을 제안하고자 한다.

### IV. 시뮬레이션 결과 및 결론

디바이스의 안테나 개수는  $N_D = 4$  로, 전력 송신기의 안테나 개수는  $N_E = 8$  로 구성된 선형 배열 안테나를 고려한다. 경로의 개수는  $L = 5$  로 가정하였다. 안테나 방사 특성에 따라 출발 각도와 도착 각도는  $\theta, \phi = [-60^\circ, 60^\circ]$  로 랜덤하게 발생시켜 시뮬레이션을 하였다. 그리고 5초 동안 수신된 에너지양을 비교하였다. 안테나 요소에서의 송신 파워는 36 dBm, 경로 손실 정도는 -50 dBm, 안테나 잡음 전력은 -174 dBm/Hz 로 가정하였다. 도래각 추정 성능은 SNR 값에 따라 변하는 값으로 설정하였다.

모든 경로의 방향으로 빔포밍을 하는 최적의 빔포밍 기법은 SNR 값에 따라 전송되는 에너지 양이 좌우된다. 낮은 SNR 상황에서는 채널 추정 정확도가 낮기 때문에 전송 에너지 양이 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 반면, 주요 경로 기반 빔포밍 기법은 SNR 값 대비 성능 차이가 크지 않고 강건한 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 3 은 도래각 추정 정확도에 따른 주요 경로 기반 빔포밍 기법의 성능을 보여주는데, 약 0.5 도 이하의 정확도만 확보된다면, 전송된 에너지 양은 최대로 보장할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

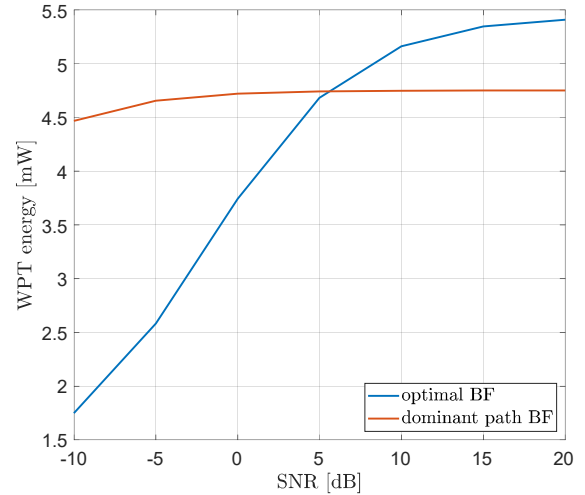


그림 2. 무선 전력 전송 성능 비교 그래프

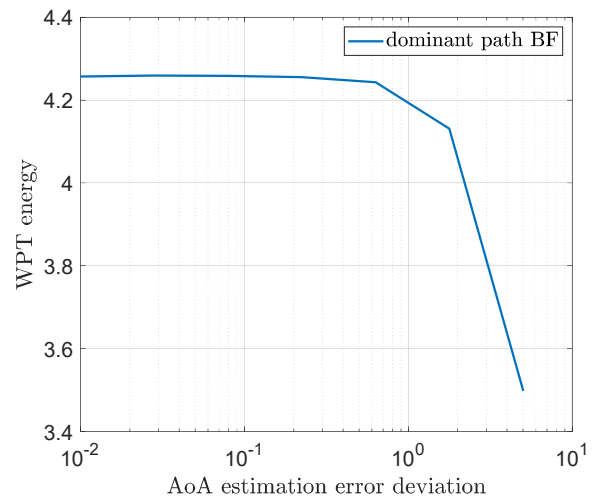


그림 3. 도래각 추정 정확도에 따른 무선 에너지 전송 양

### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(NRF-2020R1A4A1019628).

### 참 고 문 헌

- [1] S. Bi, C. K. Ho, and R. Zhang. "Wireless powered communication: Opportunities and challenges," IEEE Communications Magazine, 53(4), pp. 117-125. 2015.
- [2] C. F. Yang, B. C. Wu, and C. J. Ko. "A ray-tracing method for modeling indoor wave propagation and penetration," IEEE transactions on Antennas and Propagation, 46(6), pp. 907-919, 1998.