

# 무선전력전송 시스템에서 제한적 피드백 기반 에너지 빔포밍 성능 분석

김 현 민\*, 강 길 모\*,  
이 종 호\*\*, 신 오 soon

## Performance Analysis of Energy Beamforming Based on Limited Feedback in a Wireless Power Transfer System

Hyeon Min Kim\*, Gil-Mo Kang\*,  
Jong-Ho Lee\*\*, Oh-Soon Shin

### 요 약

다중 송신안테나를 이용하는 무선전력전송 시스템에서 효율적인 에너지 빔포밍 기법을 제안하고 성능을 분석한다. 최대 에너지 전달 관점에서 최적의 빔포밍 벡터 도출을 위해 필요한 채널정보를 유한 비트수로 표현하여 수신기에서 송신기로 피드백 하는 기법으로 랜덤 벡터 양자화를 고려한다. 수신기에서 하베스팅한 에너지는 피드백 정보와 데이터를 전송하는데 사용된다. 데이터 전송의 Outage 확률을 수식으로 유도하고, 분석의 검증을 위한 수치해석 결과를 제시한다.

**Key Words** : Energy beamforming, limited feedback, outage probability, random vector quantization, wireless power transfer

### ABSTRACT

We propose an efficient energy beamforming scheme in a wireless power transfer system with multiple antennas at the transmitter. The random vector quantized (RVQ) feedback, which represents the channel information with a finite number of bits, is exploited at the receiver to help the transmitter obtain the optimal energy beamforming vector that maximizes the transferred energy. The harvested energy is used at the receiver for data transmission as well as feedback of the beamforming information. The expression for the outage probability of data transmission is derived and numerical results are presented to verify the analysis.

### I. 서 론

에너지 하베스팅(Energy Harvesting)은 외부 전력망으로부터 전원 공급 없이 자립적으로 동작하는 Off-Grid 통신시스템 실현을 위해 유망한 기술이다. 예를 들어, 셀룰러 네트워크에서 태양열과 풍력 등 신재생 에너지 자원을 통해 기지국에 전원을 공급하면 기지국 설치에 있어서 전력망에 연결해야 하는 제한을 극복할 수 있다<sup>1)</sup>. 최근 라디오 주파수(Radio Frequency: RF) 신호를 사용하는 무선 인프라의 확산과 함께 RF 신호도 새로운 청정 에너지원으로 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 물론, 매우 제한적인 소량의 에너지만 획득할 수 있기 때문에 무선 센서 네트워크와 같은 저전력 시스템으로 그 응용이 제한적이다<sup>2,3)</sup>.

본 논문에서는 무선 센서에 에너지를 공급할 수 있는 무선전력전송 시스템을 고려한다. 무선센서 수신기는 송신기로부터 전송된 신호로부터 에너지를 수확하고, 이를 이용하여 빔포밍 정보의 피드백과 데이터 전송을 수행한다. 전송되는 에너지를 최대화하기 위해 송신기는 다중안테나를 이용하여 에너지 빔포밍을 수

※ 본 연구는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2017R1A5A1015596).

• First Author : (ORCID:0000-0002-8943-3675)Soongsil University, Department of ICMC Convergence Technology, hminplus@ssu.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6984-8240)Soongsil University, School of Electronic Engineering and Department of ICMC Convergence Technology, osshin@ssu.ac.kr, 종신회원

\* (ORCID:0000-0002-6893-1261)Soongsil University, Department of ICMC Convergence Technology, gilmokang@ssu.ac.kr, 학생회원

\*\* (ORCID:0000-0002-7439-1740)Soongsil University, School of Electronic Engineering, jongho.lee@ssu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201908-176-A-LU, Received August 28, 2019; Revised September 24, 2019; Accepted September 30, 2019

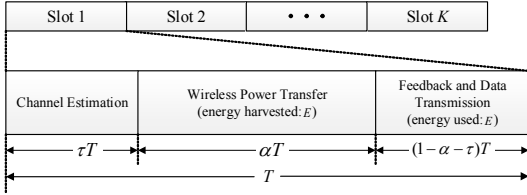


그림 1. 무선전력전송을 위한 시간 슬롯 구조.  
Fig. 1. Structure of time slots for wireless power transfer.

행하는데 이를 위해서는 채널정보 획득이 필요하다. 기존 대부분의 에너지 빔포밍 연구에서는 송신기가 채널정보를 알고 있다는 가정 하에서 빔포밍 최적화에 초점이 맞추어져 왔다. 본 논문에서는 채널정보 획득의 실제적인 과정을 고려하여 송신 시간 슬롯을 채널추정, 무선전력전송, 피드백 및 데이터 전송의 세 구간으로 분할하는 구조를 제시한다. 채널정보의 피드백을 위해 수신기에서의 제한된 전력 및 대역폭을 감안하여 랜덤 벡터 양자화(Random Vector Quantization: RVQ)<sup>[4]</sup> 피드백 방법을 이용한다. 수신기는 파일럿 신호를 이용하여 채널정보를 추정하고 이를 RVQ 코드북(Codebook)에 적용하여 최적의 송신 빔포밍 벡터를 선택한다. 선택된 빔포밍 벡터의 인덱스를 피드백하면 송신기는 이를 이용하여 최적의 에너지 빔포밍을 수행한다. 수신기에서 하베스팅한 에너지는 빔포밍 정보의 피드백뿐만 아니라 센싱 데이터를 송신기로 전송하는데 소모된다. 데이터 전송의 Outage 확률을 수식으로 유도하고 수치 해석 결과를 제시한다. 송신안테나의 수 및 코드북 비트 수에 따른 Outage 확률을 검증한다.

## II. 시스템 모델

무선전력전송 환경으로 점대점 다중입력 단일출력 (Multiple-Input Single-Output: MISO) 페이딩 채널을 고려한다. 송신기는  $M$  ( $M \geq 1$ )개의 안테나를 구비하고 수신기는 하나의 안테나를 이용하여 송신 신호로부터 에너지를 수확한다. 길이가  $T$ 인 슬롯 단위로 에너지 전송을 수행하며  $T$ 는 채널의 Coherence Time보다 작다고 가정한다. 그림 1과 같이 각 슬롯은 세 개의 구간으로 나누어진다. 먼저  $\tau T$  구간 동안 송신기는 파일럿 신호를 전송하고 수신기는 채널추정을 통해 최적의 빔포밍 벡터를 도출하여 피드백 정보를 생성한다. 다음 무선전력전송 구간  $\alpha T$  동안 송신기는 피드백 정보를 이용하여 최적의 빔포밍을 통해 에너지 신호를 전송하고 수신기는 에너지를 수확한다.

남은 구간인  $(1 - \alpha - \tau) T$  동안 수신기는 하베스팅한 에너지를 이용하여 피드백 정보 및 센싱 데이터를 송신기로 전송한다. 송신기에서 수신기로의 채널을  $\mathbf{h} \in C^{1 \times M}$ <sup>1)</sup>, 반대 방향의 채널을  $\mathbf{g} \in C^{M \times 1}$ 라고 하자.

### 2.1 RVQ 피드백

송신기는 채널추정 후 최적의 양자화된 빔포밍 벡터를 추출하고 해당 인덱스를 송신기로 피드백 한다. 피드백 채널은 슬롯  $T$  내에서  $b$  비트의 정보를 피드백하고 Additive white Gaussian Noise (AWGN) 채널로 가정한다. RVQ 코드북  $F = \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_B\}$  ( $B = 2^b$ )은 송신기와 수신기가 공유한다. RVQ 코드북은 단위 구(Unit Sphere) 상의 균일한 분포를 갖는  $B$ 개의 독립적인 랜덤 벡터들로 구성된다. 즉,  $\mathbf{w}_j \in C^{M \times 1}$ 이고  $\|\mathbf{w}_j\| = 1$ 을 만족한다. 수신기에서 채널 벡터  $\mathbf{h}$ 를 정확히 추정한다고 가정하고 수신기는 다음 식 (1)을 이용하여 코드북에 속하는 벡터 중에서 수신 에너지를 최대화하는 빔포밍 벡터를 선택한다<sup>[4]</sup>.

$$\mathbf{v} = \operatorname{argmax}_{\mathbf{w} \in F} |\mathbf{h}\mathbf{w}|^2 \quad (1)$$

수신기는 피드백 및 데이터 전송 구간에서  $\mathbf{v} \in F$ 에 해당되는 인덱스를  $b$  비트의 정보로 표현하여 송신기로 보고한다.

### 2.2 무선전력전송

송신기는 RVQ 피드백 과정을 통해 획득한 최적의 빔포밍 벡터를 적용하여  $\alpha T$  구간 동안 수신기로 빔포밍된 에너지 신호를 전송한다. 송신전력을  $P$ 라고 하면 수신기에서 하베스팅되는 에너지  $E$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$E = \eta P \mathbf{h}\mathbf{v}^2 \alpha T \quad (2)$$

여기서  $\eta$ 는 수신기의 에너지 변환 효율을 나타낸다.

### 2.3 피드백 및 데이터 전송

슬롯의 나머지 구간인  $(1 - \alpha - \tau) T$  동안 수신기는 하베스팅한 에너지를 이용하여  $b$  비트의 채널정보와 센싱 데이터를 송신기로 전송한다. 이 때, 신호의 전송전력  $P_d$ 는 다음과 같다.

$$P_d = \frac{E}{(1 - \alpha - \tau) T} \quad (3)$$

1)  $C^{m \times n}$ 은 각각 평균이 0, 분산이 1이고 서로 독립인  $m \times n$  복소 Gaussian 랜덤 벡터의 집합을 나타낸다.

### III. Outage 확률 분석

데이터 전송 구간에서 에너지 송신기에서의 신호대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio: SNR)를  $\Lambda$ 라고 하자. 데이터 전송 채널  $g$ 를 송신기가 정확히 추정하여 최대비율결합(Maximal Ratio Combining)을 할 때  $\Lambda$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Lambda = \frac{P_d}{\sigma^2} = \frac{\eta P |h\nu|^2 \alpha \|g\|^2}{(1 - \alpha - \tau)\sigma^2} \quad (4)$$

여기서  $\sigma^2$ 은 잡음의 전력을 나타낸다. Outage를 SNR  $\Lambda$ 가 문턱값  $\Lambda_{th}$  보다 작은 사건으로 정의하자. 이 때,  $\Lambda_{th} = 2^{(R+b/TW)/(1-\alpha-\tau)} - 1$ 로 정의되며  $R$ 은 요구되는 최소의 단위 주파수 당 전송률,  $W$ 는 피드백 및 데이터 전송 채널의 대역폭을 나타낸다.  $\Lambda_{th}$ 에는 채널정보 피드백에 따른 데이터 전송률 손실이 반영되어 있다. 식 (4)의 랜덤변수  $G = \|g\|^2$ ,  $H = |h\nu|^2$ 를 정의하면, Outage 확률  $P_{out}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= P(\Lambda < \Lambda_{th}) \\ &= P\left(GH < \bar{\Lambda}_{th} \equiv \Lambda_{th} \frac{(1 - \alpha - \tau)\sigma^2}{\alpha \eta P}\right) \\ &= \int_0^\infty P\left(H < \frac{\bar{\Lambda}_{th}}{g}\right) f_G(g) dg \\ &= \int_0^\infty F_H\left(\frac{\bar{\Lambda}_{th}}{g}\right) f_G(g) dg \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서  $G$ 는 자유도(Degree-of-Freedom)가  $2M$ 인 Central Chi-Square 랜덤변수로 확률밀도함수  $f_G(g)$ 는 다음과 같다<sup>6)</sup>.

$$f_G(g) = \frac{g^{M-1}}{\Gamma(M)} e^{-g}, \quad g \geq 0 \quad (6)$$

여기서  $\Gamma(x) \equiv \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$ 는 Gamma 함수를 나타낸다.  $H$ 는 누적분포함수가  $F_H(h)$ 인 랜덤변수로  $F_H(h)$ 는 다음과 같다<sup>4)</sup>.

$$\begin{aligned} F_H(h) &= \frac{\gamma(M, h)}{\Gamma(M)} + \frac{1}{\Gamma(M)} \sum_{i=0}^{B-1} \binom{B-1}{i} (-1)^i h^M e^{-h} \\ &\quad \Gamma(i(M-1)+1) U(i(M-1)+1, M+1; h) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\gamma(n, x)$ 는 Lower Incomplete Gamma 함수,  $U(a, b; x)$ 는 Kummer U 함수를 나타내고 각각 다음과 같이 정의된다<sup>4)</sup>.

$$\gamma(n, x) \equiv \int_0^x t^{n-1} e^{-t} dt \quad (8a)$$

$$U(a, b; x) \equiv \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^\infty e^{-xt} t^{a-1} (1+t)^{b-a-1} dt \quad (8b)$$

식 (6), (7)을 식 (5)에 대입하면  $P_{out}$ 은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

### IV. 수치해석 결과

이번 장에서는 제안한 무선전력전송 시스템의 Outage 확률에 대한 수치해석 결과를 제시한다. RVQ 에너지 전송 구간의 비율  $\alpha = 0.5$ , 피드백 구간의 비율  $\tau = 0.2$ 로 설정하였다. 슬롯의 길이는  $T = 10$  ms, 피드백 및 데이터 전송 대역폭은  $W = 100$  kHz로 설정하였고, 잡음의 전력은  $\sigma^2 = 1$ 로 정규화 하였다.

그림 2는 안테나 수  $M = 4$ , 피드백 비트 수  $b = 2$ , 주파수 효율 요구 값  $R = 0.5$  bps/Hz인 경우 전체 SNR ( $P/\sigma^2$ )에 따른 Outage 확률을 보여준다.  $P$ 가 증가할수록 수신기에서 하베스팅 되는 에너지 양이 증가하고 결과적으로 데이터 전송에 사용할 수 있는 에너지가 증가한다. 따라서  $P$ 가 증가할수록 Outage 확률이 감소함을 확인할 수 있다. 그림 2에서 식 (9)를 통해 얻은 분석결과와 모의실험 결과가 일치함을 확인할 수 있고 이는 III장의 분석이 정확함을 의미한다.

그림 3은 SNR = 20dB,  $b = 2$ 인 경우 안테나 수  $M$ 의 변화에 따른 Outage 확률을 보여준다. 안테나 수가 증가할수록 하베스팅 되는 에너지 양이 증가하고 데이터 전송에 필요한 에너지는 줄어들기 때문에 Outage 확률이 급격히 감소함을 확인할 수 있다. 한편, 데이터 전송의 주파수 효율 요구 값  $R$ 이 증가하면 식 (5)의 문턱값  $\bar{\Lambda}_{th}$ 가 증가하므로 Outage 확률이 증가한다.

그림 4는 SNR = 20dB인 경우 피드백 비트 수  $b$ 에 따른 Outage 확률을 보여준다. 피드백 비트 수가 증가할수록 빔포밍의 정확도가 향상되므로 Outage 확률이 감소하지만 어느 이상 증가하면 성능 향상이 둔화됨을 확인할 수 있다. 예를 들어,  $M = 3$ 의 경우 피드백

$$P_{out} = \frac{1}{\Gamma^2(M)} \int_0^\infty g^{M-1} e^{-g} \left( \gamma\left(M, \frac{\bar{\Lambda}_{th}}{g}\right) + \sum_{i=0}^{B-1} \binom{B-1}{i} (-1)^i \left(\frac{\bar{\Lambda}_{th}}{g}\right)^M e^{-\frac{\bar{\Lambda}_{th}}{g}} \Gamma(i(M-1)+1) U\left(i(M-1)+1, M+1; \frac{\bar{\Lambda}_{th}}{g}\right) \right) dg \quad (9)$$

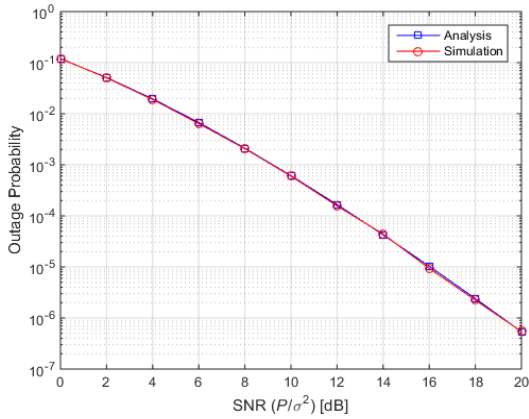


그림 2. SNR에 따른 Outage 확률.  
Fig. 2. The outage probability versus SNR.

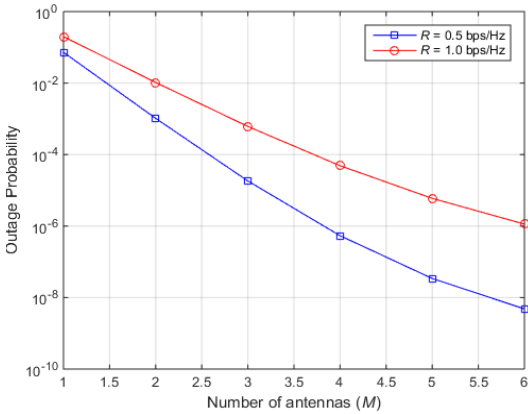


그림 3. 송신안테나 수 M에 따른 Outage 확률.  
Fig. 3. The outage probability versus M.

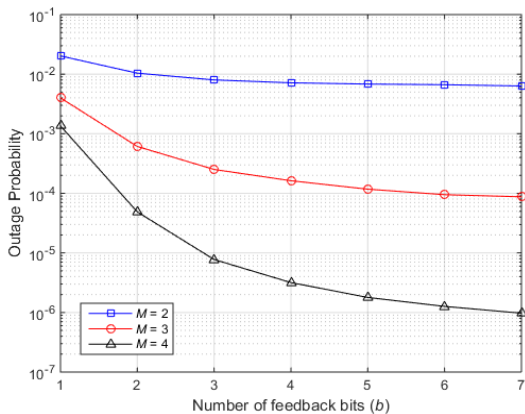


그림 4. 피드백 비트 수 b에 따른 Outage 확률.  
Fig. 4. The outage probability versus b.

비트 수가 6 이상이면 거의 최적의 성능을 얻을 수 있다. 또한, 그림 4를 통해 안테나 수가 증가할수록 피드

백 비트 수 증가에 따른 성능 향상이 상대적으로 크다는 점을 확인할 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 RVQ 피드백 기반의 무선전력전송 시스템을 제안하였다. 무선전력전송을 통해 얻은 에너지는 빔포밍 정보의 피드백과 센싱 데이터 전송에 사용된다. 센싱 데이터 전송에 있어서 Outage 확률을 수학적으로 유도하고 분석 결과를 모의실험 결과와 비교하여 분석의 정확성을 입증하였다. 아울러 송신안테나 수, 피드백 비트 수 등의 영향에 따른 Outage 확률 성능을 검증하였다.

## References

- [1] G. Schmitt, "The green base station," in *Proc. 4th Int. Telecommunication-Energy Special Conf.*, Vienna, Austria, May 2009.
- [2] G. Yang, C. K. Ho, R. Zhang, and Y. L. Guan, "Throughput optimization for massive MIMO systems powered by wireless energy transfer," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 33, no. 8, pp. 1640-1650, Aug. 2015.
- [3] K. Choi, S. Choi, and J. Oh, "Implementation of RF energy harvesting circuit for wireless charging of IoT sensor nodes," *J. KICS*, vol. 44, no. 4, pp. 755-758, Apr. 2019.
- [4] C. K. A. Yeung and D. J. Love, "On the performance of random vector quantization limited feedback beamforming in a MISO system," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 2, pp. 458-462, Feb. 2007.
- [5] X. Chen, C. Yuen, and Z. Zhang, "Wireless energy and information transfer tradeoff for limited-feedback multiantenna systems with energy beamforming," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 1, pp. 407-412, Jan. 2014.
- [6] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, 4th Ed., McGraw-Hill, 2002.