

RF 에너지 하베스팅 네트워크를 위한 Backscatter 통신 기반의 다중 태그 빔포밍 기법

홍승관*, 황유민*, 이선의*, 김진영*

Multi-Tag Beamforming Scheme Based on Backscatter Communication for RF Energy Harvesting Networks

Seung Gwan Hong*, Yu Min Hwang*, Sun Yui Lee*, and Jin Young Kim*

요 약

본 논문에서는 multi-tag를 사용하는 backscatter communication에 MIMO beamforming 기술을 적용하여, 수신신호의 BER과 energy harvesting을 효율을 증대시키고자 한다. multi-tag와 Hybrid-AP(H-AP) 사이의 communication을 통해 기본 채널 정보를 얻었으며, 얻은 채널정보를 이용하여, Spatial Channel Model(SCM)의 전송 시나리오에 맞는 파라미터를 설정하고 SCM 채널을 생성하였다. 그리고 MIMO Beamforming 기술을 이용하여, H-AP는 각 tag에 SINR을 올리기 위한 optimal power를 갖는 신호를 보낸다. tag에서는 optimal power를 갖는 신호를 수신하여 backscatter communication을 수행하고, receiver에서는 multi-tag가 보내는 backscatter 신호를 수신하여 time switching 기법으로 Energy harvesting을 수행한다. 따라서 Receiver에서 energy harvesting 효율과 backscatter 신호의 BER 성능 향상을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

Key Words : Backscatter Communication, MIMO Beamforming, Energy Harvesting, Spatial Channel Model, Multi-Tag

ABSTRACT

In this paper, we propose a scheme for MIMO beamforming for the backscatter communication using a multi-tag to improve the efficiency of energy harvesting and the BER of received signals. We obtain a normal channel information through a communication between the H-AP and multi-tag. The H-AP sets parameters for the transmission scenario of the spatial channel model (SCM) using the obtained channel information and generates a SCM channel information. Then, the H-AP transmits signals that have optimal transmission power to increase the signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) to each of tags. Tags perform a backscatter communication with signals. The receiver performs a time switching technique of energy harvesting using backscatter signals from the multi-tag. Simulation results demonstrate effectiveness of the proposed scheme, and the harvesting efficiency and BER at the receiver is greatly improved.

I. 서 론

IoT 기술이 큰 이슈가 되고 있는 현재, IoT를 위한 센서네트워크의 개발이 크게 대두되고 있다. 특히 센서 네트워크에서의 무선 디바이스의 에너지 보충에 관한 연구가 크게 부각되고 있으며, 센서의 에너지 효율성에 관한 연구들이 많이 진행되고 있다[1],[2]. 그 중 방사되고 있는 RF energy를 reflect하여 energy free condition에서 통신을 할 수 있는 backscatter 기술이 연구되었으며, tag간 통신에서 통신거리

와 신호의 BER을 향상시키는 기술이 연구가 진행 중이다.[1].

Backscatter 통신에서는 송신신호의 패킷의 반사유무를 통해 데이터를 전송한다. AP로부터 받은 패킷을 반사하면 1을 반사하지 않으면 0을 보내는 On/Off 전송 방식으로 전송하며, 이때 송신단의 신호를 이용하기 때문에 송신신호의 세기를 조절하여 신호의 BER을 향상시킬 수 있다[2]. 본 논문에서는 하나의 tag를 사용하는 것이 아닌 multi-tag를 사용하며, 이를 위해 receiver와 transmitter를 동시에 갖는

* 본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2014R1A5A1011478).

광운대학교 전파공학과 소속 유비쿼터스 통신 연구실 (mygwan112@kw.ac.kr),(yumin@kw.ac.kr),(sunyuil22@naver.com),(jinyoung@kw.ac.kr)

접수일자 : 2016년 06월 15일, 최종게재확정일자 : 2016년 06월 22일

H-AP에 MIMO beamforming 기술을 적용한다. 이때 MIMO beamforming은 각 tag에 최대이득을 가지는 빔을 형성하여 신호를 전달하게 된다. 각 tag들에 따른 채널환경을 고려해야 하는데, H-AP는 각 tag에서 reflect 신호를 받아 기본 채널 정보를 파악한다. 그 이후에 송신 과정에서는 공간 채널이 반영된 Spatial Channel Model(SCM)을 사용한다. 따라서 채널의 기본정보와 SCM에서 상황에 맞는 전송 시나리오(suburban macro, urban macro, urban micro)를 설정하여 각 시나리오에 맞는 파라미터를 설정하여 전송환경에 따른 채널을 생성한다[3]. 따라서 각 tag들은 채널환경에 따른 필요 optimal power를 H-AP로부터 제공받고, tag들은 H-AP로부터 받은 신호를 reflect 하는데, 이를 통해 향상된 backscatter 신호를 receiver에 보내게 된다. 또한 향상된 backscatter 신호를 이용하여 receiver에서 energy harvesting을 하게 된다. 시뮬레이션을 통해 beamforming을 적용하지 않은 신호와 beamforming을 적용한 backscatter 시스템을 비교하여, 신호의 BER과 energy harvesting 효율이 향상됨을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 Backscatter 통신을 위한 다중 태그 빔포밍 시스템 모델을, 제 III장에서는 Spatial Channel Model을, 제 IV장에서는 시뮬레이션 대해 알아본다. 마지막으로 본 논문의 결론을 제 V 장에서 맺도록 하겠다.

II. Backscatter 통신을 위한 다중 태그 빔포밍 시스템 모델

그림 1에서는 반경 1m의 backscatter cell boundary 안의 multi-tag는 H-AP로부터 들어오는 신호를 반사하는데, 이때 tag에서는 1과 0으로 이루어진 신호를 이용하기 때문에 BFSK로 변조된 backscatter 신호를 실어 반사한다[2]. backscatter cell boundary의 반경은 1m이며, 이 cell안의 multi-tag에서 보내는 backscatter 신호를 receiver에서 BFSK 복조와 energy harvesting에 이용한다. backscatter 신호가 H-AP의 신호를 이용하기 때문에 H-AP에서 multi-tag에 보내는 신호의 power 세기를 적절히 제어해야 한다. 따라서 MIMO beamforming 기술을 통해 cell 내부의 multi-tag의 채널환경에 따른 필요 power를 제공한다.

Beamforming 기술의 목적은 각 tag에 거치는 신호의 SINR을 극대화하고 interference를 최소화하기 위한 것이다. 본 논문에서는 Optimal Transmit Beamforming(OTF)을 사용하며, OTF는 spectral efficiency나 BER의 향상을 위해 각 파라미터들을 최적화한다.[4].

Beamforming을 위한 optimum weight $\mathbf{w}_{t,i} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 를 구하기 위해서는 다음 식을 통해 구한다.

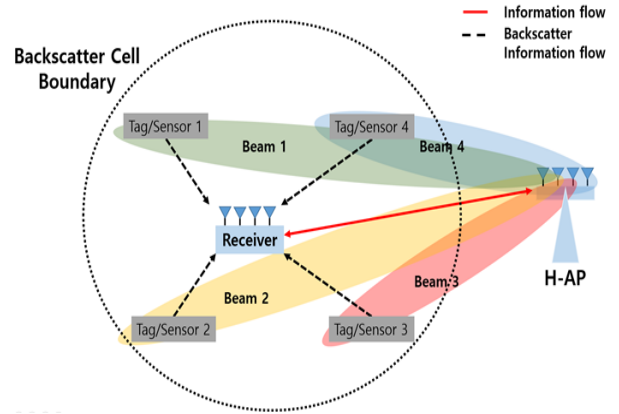


그림 1. Backscatter 기반의 MIMO Beamforming 시스템.

$$\mathbf{w}_{t,i} = \sqrt{p_i} \hat{\mathbf{w}}_i \quad \text{for } i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

p_i 는 optimal power이고, $\hat{\mathbf{w}}_i \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 optimal unit direction이다. 각 파라미터는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_i \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} \sigma^2 \\ \vdots \\ \sigma^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$[\mathbf{M}]_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_i} |\mathbf{h}_{t,i} \hat{\mathbf{w}}_i|^2, & i = j, \\ -|\mathbf{h}_{t,i} \hat{\mathbf{w}}_i|^2, & i \neq j \end{cases}, \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{w}}_i = \frac{(\mathbf{I}_N + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\sigma^2} \mathbf{h}_{t,i}^\dagger \mathbf{h}_{t,i})^{-1} \mathbf{h}_{t,n}^\dagger}{\left\| (\mathbf{I}_N + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\sigma^2} \mathbf{h}_{t,i}^\dagger \mathbf{h}_{t,i})^{-1} \mathbf{h}_{t,n}^\dagger \right\|}. \quad (4)$$

위 식에서 $\mathbf{I}_N (N \times N)$ 은 항등행렬이며, $\mathbf{h}_{t,i}$ 는 H-AP와 sensor/tag간의 채널환경이며, $\mathbf{h}_{t,i}^\dagger$ 는 $\mathbf{h}_{t,i}$ 의 전치행렬이고, λ 는 lagrange multiplier이다. 따라서 위 식들을 통해 optimal weight를 구할 수 있다.

위에서 구한 optimal weight를 이용해, tag_i에 들어오는 $SINR_i$ (signal to interference ratio)를 구할 수 있으며, 아래의 식으로 나타내고,

$$SINR_i = \frac{|\mathbf{h}_{t,i} \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i=n} |\mathbf{h}_{t,i} \mathbf{w}_k|^2 + \sigma^2}, \quad (5)$$

위 식을 통해 반경 1m인 backscatter cell boundary의 receiver에서 BFSK 복조를 통해 신호의 BER을 구할 수 있다.

H-AP는 MIMO 안테나를 이용하여 각 채널에 맞는 신호를 전송한다. tag가 n개로 가정하면, tag에 전송되는 신호는

$$y_{t,i}(t) = \mathbf{h}_{t,i}(t) \left(\sum_{i=1}^n \mathbf{w}_{t,i}^* s_i(t) \right) + n_{t,i}(t) |_{i=1, \dots, n}, \quad (7)$$

와 같이 나타낸다. 여기서 $\mathbf{h}_{t,i}(t) \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 는 채널 특성으로 MIMO 안테나의 공간 채널을 반영한 SCM을 적용한다. $\mathbf{w}_{t,i}$ 는 optimum weight이고, 각 tag별로 채널환경에 따른 수신 신호의 세기는 다르다.

receiver에서 수신되는 tag의 신호는 아래 식과 같으며,

$$y_{r,i} = b(t) * y_{t,i}(t) + n_r(t) |_{i=1, \dots, n}, \quad (8)$$

$b(t)$ 는 backscatter 신호로 0과 1의 bit로 구성되어진다. cell 내부의 채널환경은 Rayleigh Fading을 적용하였다. 여기서 n_r 과 n_t 는 Additive White Gaussian 노이즈이고 σ^2 를 갖는다.

receiver에서는 backscatter 신호는 H-AP에서 보내는 신호와 비교를 통해 검출할 수 있다. H-AP에서 보내는 신호의 변화가 backscatter 신호보다 빠른 비율로 일어나기 때문에, 인접한 두 신호는 uncorrelated 하다. 따라서 receiver에서 쉽게 H-AP의 신호를 제거하여, backscatter 신호를 복조할 수 있다. 따라서 각 tag의 정보를 receiver에서 파악할 수 있다 [5].

송신신호의 power를 식 (2), (3), (4)에 이용하여, 아래의 식으로 receiver에 들어오는 optimal power를 구할 수 있다.

$$P_{rec} = \begin{bmatrix} \frac{(\frac{\lambda}{4\pi d})^2 * P_{t,1}}{\|(\mathbf{I}_N + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H}^+ \mathbf{A} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}_1^+\|} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{(\frac{\lambda}{4\pi d})^2 * P_{t,i}}{\|(\mathbf{I}_N + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H}^+ \mathbf{A} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}_i^+\|} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

구한 optimal power를 receiver에서 energy harvesting을 할 수 있도록 한다. 여기서 $\mathbf{A} = \text{diag}((\lambda_1, \dots, \lambda_k))$ 는 diagonal matrix를 의미한다.

receiver에서는 각 tag에서 들어오는 backscatter 신호를 받아 energy harvesting을 하게 된다.

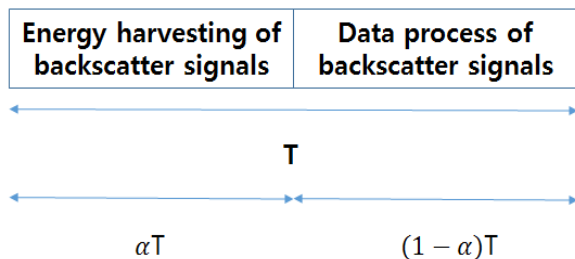


그림 2. Time Switching을 이용한 energy harvesting 기법.

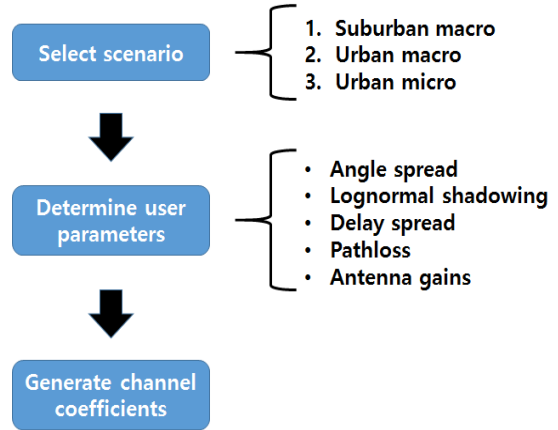


그림 3. SCM 채널 모델 생성 알고리즘.

energy harvesting은 그림 2와 같이 time switching을 이용하여 receiver 측에서 energy harvesting하는 구간과 backscatter 신호 처리 구간을 나누어 처리하는 방법을 사용한다. Time Switching Ratio α 를 $0 < \alpha < 1$ 로 정의하고 α 비율에 따른 T를 블록으로 나눈다. αT 구간에서는 backscatter 신호를 처리하고, $(1-\alpha T)$ 구간에서는 energy harvesting을 한다.

따라서 energy harvesting power는 다음 식을 통해 얻을 수 있다.

$$P_h = \sum_{i=1}^n \eta (1 - \alpha) P_{rec}, \quad (11)$$

η 는 receiver에서의 energy harvesting efficiency이다. 따라서 receiver에서의 수신되는 신호를 통해 energy harvesting power를 구할 수 있다.

III. Spatial Channel Model

다중 안테나가 사용되는 환경에 대한 기술의 실제적인 성능 비교를 위해서는 기존 방식과는 다른 채널 모델이 적용되어야 한다. MIMO 시스템 성능을 평가하기 위해 적합한 채널 모델로, 3GPP에서 TR 25.996 version 6.1.0 Release 6 문서를 통해 SCM(Spatial Channel Model)을 제안하였다[3]. SCM은 상황에 맞는 전송 시나리오에 따라 각 파라미터를 설정 후, 채널환경을 생성한다. 전송 시나리오는 suburban macro, urban macro, urban micro로 나뉜다.

논문에서는 tag가 고정되어있음을 가정하여, user의 이동과 관련된 요소들을 배제하고, 채널환경을 생성하였다.

그림 3은 SCM 채널 모델 생성 알고리즘이며, tag와 H-AP사이의 communication을 통해 기본 채널정보를 파악한 후, SCM의 파라미터를 설정하고, 채널환경을 생성한다.

본 시스템에서는 urban micro 시나리오를 설정하였으며, tag가 고정되어 있고, 중심 주파수는 2 GHz로 설정하였다.

실외환경임을 가정하고, 사용자의 높이는 1m로 고정한다. 또한 H-AP의 높이는 10m로 설정한다. 따라서 channel 환경은 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_{u,s,m}(t) &= \sqrt{\frac{P_n}{M}} \sum_{m=1}^M (A \times B \times C). \\ A &= \sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,AOD})} \exp(jkd_s \sin(\theta_{n,m,AOD})) \\ B &= \sqrt{G_{MS}(\theta_{n,m,AOA})} \exp(jkd_u \sin(\theta_{n,m,AOA})) \\ C &= \exp(jk \|v\| \cos(\theta_{n,m,AOA} - \theta_v)t). \end{aligned} \quad (12)$$

각 파라미터의 관한 설명과 자세한 계산은 3GPP TR 25.966문서를 통해 확인할 수 있다[3].

VI. 시뮬레이션

1. BER 성능 비교

본 시뮬레이션은 MIMO beamforming을 한 경우와 beamforming을 하지 않은 경우의 BER을 비교하였으며, 10^6 개의 비트의 개수를 표본으로 진행하였다. tag의 개수는 4개이고, H-AP와의 거리는 10m 2가지, 12m 2가지, 안테나 각도는 tag 방향으로 45, 30, -30, -45도로 설정하였다. beamforming을 하지 않은 경우는 rayleigh channel model을 적용하여 송신단에서 같은 power로 omni하게 신호를 방사하는 환경으로 시뮬레이션하였다. 그림 4를 보면, 같은 SINR 일 때, beamforming을 하였을 경우 bit당 error가 발생할 확률이 더 낮음을 확인할 수 있었다. 따라서 backscatter 통신에서 MIMO beamforming을 적용하였을 때, BER 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

2. 수신전력 및 energy harvesting 전력 비교

beamforming을 통한 수신 전력과 그에 따른 harvested energy를 그림 5를 통해 확인할 수 있다. 식 (11)의 η 는 정류기와 energy harvesting의 회로적 특성에 따른 energy harvesting efficiency 계수이며, 본 시뮬레이션에서는 0.7로 설정하였다. α 는 time switching ratio이며 $0 < \alpha < 1$ 의 값을 가지며, 0.5로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. T가 25일 때, beamforming을 적용한 harvested power는 0.196uW로, beamforming을 적용하지 않았을 때의 harvested power는 0.124uW로 약 2 배 정도의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 따라서 beamforming을 하였을 때, 보다 많은 전력을 energy harvesting을 할 수 있으며, 시간에 지날수록 더 많은 양의 전력을 공급할 수 있다.

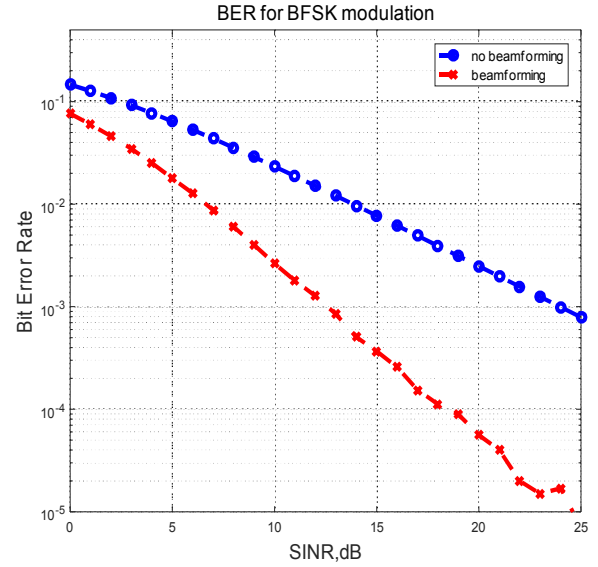


그림 4. MIMO beamforming BER 성능 비교.

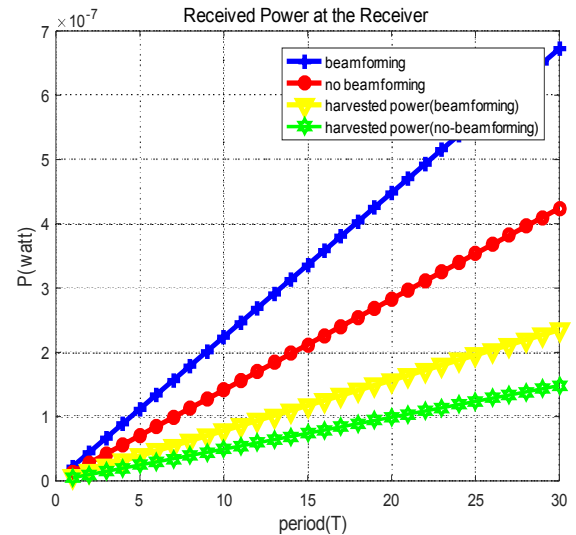


그림 5. receiver에서의 수신 전력과 harvesting 전력.

V. 결론

본 논문에서는 multi-tag를 가지는 backscatter 통신에서 H-AP에 MIMO beamforming 기술을 도입하여, 수신측에서의 BER 성능 및 energy harvesting을 확인하였다. backscatter 통신에서 패킷의 반사량을 조절함으로써, 전송률을 향상시키며, 본 시스템 모델에서 송신신호의 SINR을 올려 이를 확인하였다. 따라서 송신신호를 beamforming 기술을 통해 향상시켜, Receiver에서의 BER 성능향상을 확인할 수 있었으며, 또한 energy harvesting의 효율을 또한 향상됨을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] H. Visser, A. Reniers, and J. Theeuwes, "Ambient rf energy scavenging: Gsm and wlan power density measurements." *Proceedings of Microwave Conference, EuMC 2008. 38th European*, pages 721 - 724, Oct. 2008.

[2] B. Kellogg, A. Parks, S. Gollakota, J. R. Smith and D. Wetherall, "Wi-Fi Backscatter: Internet connectivity for RF-powered devices", *ACM SIGCOMM*, pp. 1-12, 2014

[3] ETSI TR 125 996, UMTS; Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations, v10.0.0, Apr 2011.

[4] Said E. El-Khamy, Karim H. Moussa, Amr A. El-Sherif, "C5. Performance analysis of massive MIMO multiuser transmit beamforming techniques over generalized spatial channel model." *Proceedings of Radio Science Conference (NRSC)*, pp. 139-1446, Mar. 2015

[5] A. N. Parks, A. Liu, S. Gollakota, and J. R. Smith. "Turbocharging ambient backscatter communication." *ACM SIGCOMM*, pages 619 - 630, 2014.

김진영(Jin Young Kim)

종신회원



- 1998년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 2001년 2월 : SK텔레콤 네트워크연구소 책임연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

<관심분야> : 디지털통신, 가시광통신, UWB, 부호화, 인지무선통신, 4G 이동통신

저자

홍승관(Seung Gwan Hong)

학생회원



- 2016년 2월 : 광운대학교 전자융합공학 학사 졸업
- 2016년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전과공학과 석박통합과정

<관심분야> : 무선에너지하비스팅

황유민(Yu Min Hwang)

학생회원



- 2012년 2월 : 광운대학교 전과공학 학사 졸업
- 2012년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전과공학과 석박통합과정

<관심분야> : 4G 이동통신, 디지털 통신, 가시광통신, D2D, LBS, 인지무선통신.

이선익(Sun Yui Lee)

학생회원



- 2013년 2월 : 광운대학교 전과 공학 학사 졸업
- 2013년 2월 ~ 현재 : 광운대학교 전과공학과 석박통합과정

<관심분야> : 가시광 통신, 협력통신, 인지무선통신, 양자통신