

간섭 채널 환경에서 One-bit 피드백에 기반한 분산 에너지 빔포밍 기법 연구

홍용기*, 이종혁*, 박재현^o

Distributed Beamforming Based on One-bit Feedback in Interference Channel

Yong-Gi Hong*, Jonghyeok Lee*, Jaehyun Park^o

요약

본 논문은 정보 송수신기와 에너지 송수신기가 공존하는 간섭 채널 환경에서 정보 송수신기의 성능 저하 없이 효과적인 에너지를 송수신을 위한 One-bit 피드백 기반 분산 빔포밍 기법을 제안한다. 에너지 하베스팅을 위해 분산 빔포밍을 사용하는 환경에서 다수의 에너지 송신 단말기들과 하나의 에너지 수신 단말기가 있는 IoT 환경을 가정한다. 분산된 노드들 사이의 정보 공유 없이 One-bit feedback을 기반으로 한 분산 빔포밍 기법을 활용하여 에너지 수신기로 전송되는 에너지량을 극대화 한다. 이때 동일한 스펙트럼을 공유하는 통신 시스템은 에너지 송신 노드의 송신 신호가 간섭으로 작용한다. 따라서 정보 수신기에서 에너지 송신 신호 즉, 간섭 신호를 줄이기 위해 수신 신호의 SINR 또는 간섭량을 바탕으로 에너지 송신 단말기들에게 1bit 피드백 신호를 전송하여 각 에너지 송신기에서는 각각의 수신기로부터 오는 다수의 1bit 피드백 정보들을 바탕으로 분산 빔포밍을 위한 위상조절 할 수 있다. 즉, 본 논문에서는 분산 노드들에서 에너지 수신기의 수신 전력을 최대화하는 동시에 정보 수신기의 간섭을 최소화하는 One-bit feedback 기반의 분산 빔포밍 기법을 제안하고 모의실험을 통해 제안한 기법의 성능을 검증한다.

Key Words : Distributed Beamforming, Interference Channel, One-bit Feedback

ABSTRACT

In this paper, we propose a one-bit feedback-based distributed beamforming technique for effective energy transmission and reception without degradation of the information transceiver in the interference channel environment where the information transceiver and the energy transceiver coexist. We consider an IoT environment in which multiple distributed energy transmitting nodes transmit their energy signals to a single energy receiving node by using distributed beamforming with one bit feedback. Because the energy signal can be regarded as the interference to the information receiving node, the information receiving node broadcasts one-bit feedback to energy transmitting nodes based on its receiving SINR. In this paper, we propose a one-bit feedback-based distributed beamforming scheme that minimizes the interference of the information receiver while maximizing the received power of the energy receiver in the distributed nodes and verifies the performance of the proposed scheme through simulation.

* 이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2017년)에 의하여 연구되었습니다.

• First Author : Pukyong National University, Department of Electronics Engineering, 학생회원

◦ Corresponding Author : Pukyong National University, Department of Electronics Engineering, jaehyun@pknu.ac.kr, 정회원

* Pukyong National University, Department of Electronics Engineering, 학생회원

논문번호 : 201905-063-A-RN, Received May 1, 2019; Revised June 25, 2019; Accepted June 25, 2019

I. 서 론

최근 4차산업 혁명의 핵심 응용분야인 스마트 팩토리 및 IoT 네트워크와 관련된 기술과 제품들이 많은 관심을 받고 있다^{1,2)}. 그 중 IoT 무선 센서 네트워크는 더욱 작은 크기와 많은 수의 단말기들로 구성된 대량의 센서 네트워크 (Massive Sensor Network) 형태로 연구되고 있다. 이러한 네트워크의 가장 큰 문제점 중의 하나는 대량의 센서 단말기들의 배터리 제약 문제가 있다. 최근 이러한 센서 단말기들의 배터리 제약 문제를 해결하기 위해 RF신호를 이용한 무선 전력 전송 및 에너지 채집 관련 기술들이 개발되어 IoT 센서 네트워크에 적용하는 연구가 많이 진행되었다^{3,4)}. 특히, 기존의 무선 RF 통신 신호는 전력 채집을 위한 채집원으로 활용할 수 있기 때문에 무선 전력 전송을 위한 주파수와 정보 전송을 위한 주파수를 동일하게 두는 무선전력 전송과 정보 전송 시스템의 주파수 공존 환경에서의 전송전략에 대한 연구가 중요하다.

본 논문에서는 무선전력 전송과 정보 전송 시스템이 동일한 주파수 대역을 활용하는 주파수 공존 환경에서의 에너지 전송전략에 대해 살펴본다. 즉, 한 쌍의 정보 송수신기가 있다고 가정하고 분산된 다수의 전력 송신기가 하나의 전력 채집 단말기에 에너지 신호를 전송하는 환경을 고려한다. 센서 노드 단말기들의 크기가 작아지면 가용 전력이 줄어들고 동시에 가용 안테나의 수도 제한을 받게 된다. 이러한 환경에서 각 단말기들의 에너지 관리와 정보전달 또는 무선 전력 전송을 위한 시스템 모델로써 각 노드들은 모두 단일 안테나를 가지고 있는 환경을 고려한다. 이러한 환경에서는 가용 전력이 줄어든 각 단말기의 송신 전력이 줄어들 것이고 또한 통신 거리 제약, 에너지 하베스팅 효율 감소 등의 문제가 생긴다. 따라서 다중 단말기들 간의 협력 통신을 생각할 수 있고 본 논문에서는 이러한 단일 안테나 분산 노드 환경에서의 분산 에너지 빔포밍 기법을 제안하였다.

분산 빔포밍 기법은 다중 송신기가 특정 수신기에 동일한 신호를 전송할 때 최대 수신 전력을 얻기 위한 기법이다. 최대 수신 전력을 얻기 위해 각 송신기들은 송신 신호의 위상을 특정 위상으로 설정한다. 분산 빔포밍 기법은 분산된 단말기들이 정보를 전달할 때의 다이버시티 기법으로 사용할 수 있고 에너지 하베스팅의 효율을 위한 기법으로도 사용할 수 있다. 본 논문에서는 에너지 하베스팅을 위한 에너지 송신기들을 대상으로 한다. 분산된 송신기들은 서로 다른 발진기를 사용하므로, 위상의 오프셋이 존재하고 수신기와의

거리가 서로 다르기 때문에 동기화가 필요하다. 송신기들은 위상 동기화를 위해 채널 정보를 피드백 받아야 하지만 IoT 단말기들의 제약 조건들을 고려하여 1-bit feedback⁵⁾을 이용한 방법으로 위상을 조정한다. 1-bit feedback은 분산된 에너지 송신기들에게 채널 정보를 피드백하기 위한 알고리즘이다. 계산 복잡도를 낮추기 위해 채널 정보가 아닌 1-bit의 정보만을 피드백하고 에너지 송신기들은 수신 받은 다수의 피드백 비트들을 통해 위상의 갱신 여부를 결정한다. 수신 단말기 입장에서 1-bit feedback은 소형화되고 제한된 전력 소모량을 가정하였을 때 낮은 계산도로 인해 매우 유용한 기법이 될 수 있다. 송신기들은 수신 받은 다수의 bit 정보를 바탕으로 위상을 갱신하고 임의의 위상으로 조정하여 신호를 전송한다. 위 과정을 에너지 수신기에서 일정한 수준의 수신 에너지에 도달할 때까지 반복하여 수행한다.

본 논문에서는 분산 빔포밍이 적용되었던 기존의 분산 통신 시스템과 달리 분산 빔포밍을 통한 에너지 송수신기와 정보 송수신기가 동일한 대역의 주파수를 사용하는 공존 환경을 고려한다. 따라서 정보 송수신기가 정보를 주고받는 과정에서 에너지 송수신 신호는 간섭으로 취급된다. 이 과정에서 에너지 하베스팅 효율을 위한 분산 빔포밍 과정과 유사하게 1-bit feedback을 통해 정보 수신기에 간접 신호들의 수신 전력의 크기가 줄어들도록 제어할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 에너지 수신 단말기의 수신 에너지를 최대화함과 동시에 정보 수신기의 Signal to Interference pulse Noise Ratio(SINR)을 최대화하는 기법을 제안한다. 또한, 모의 실험을 통해 무선전력 전송과 정보 전송 시스템이 동일한 주파수 대역을 공존하는 시스템에서 기존의 빔포밍 기법과 성능을 비교, 검증하였다.

이 논문의 2장에서는 본 논문에서 사용한 시스템 모델을 소개한다. 3장에서는 수신 에너지 최대화와 SINR 최대화를 위한 알고리즘을 설명한다. 4장에서는 모의실험 결과를 확인하고 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 Fig. 1.과 같이 정보를 전송하는 Information Transmit Node (ITx) 1개와 전력을 전송하는 Energy Transmit Node (ETx)들 N개가 같은 주파수 대역에 공존하는 환경을 고려한다. ETx들은 Energy Receive Node (ERx)에 수신 신호가 최대 수신 전력을 가질 수 있도록 분산 빔포밍 과정을 수행한

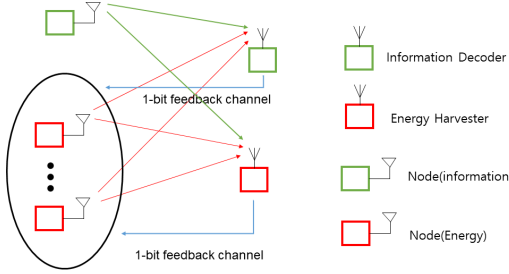


Fig. 1. Interference channel where information transceiver and energy transceiver coexist

다. 또한 ITx는 Information Receive Node (IRx)에게 정보 전달을 위한 신호를 송신한다. 모든 노드들이 단 일 안테나를 가지고 있다고 가정하며 분산된 송신 노드들 사이의 협력은 할 수 없다고 가정한다.

총 N개로 구성된 ETx 중 n번째 노드의 i번째 time-slot에 해당하는 에너지 송신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_n[i] = A_n[i]e^{j(\phi_n + \theta_n[i])} \quad (1)$$

$A_n[i]$ 는 n번째 ETx의 송신 신호의 Waveform이고 모두 동일한 Waveform $A[i]$ 를 사용한다. ϕ_n 는 각 ETx의 발진기가 가지는 위상 오프셋이고 노드별로 고유한 값이다. $\theta_n[i]$ 은 n번째 ETx에서 조정 가능한 송신 위상이고 ERx와 IRx로부터 수신 받은 feedback bit 정보를 바탕으로 갱신할 수 있다. ITx에서 i번째 time-slot의 송신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_I[i] = B_I[i]e^{j\phi_I} \quad (2)$$

B_I 는 Information modulation symbol이고 ϕ_I 는 ITx의 발진기가 가지는 위상 오프셋이다. 이에 따른 ERx에서 수신 받은 수신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_E[i] &= \sum_{n=1}^N h_{En}s_n[i] + h_{E0}s_I[i] + n_E[i] \\ &= \sum_{n=1}^N h_{En}A[i]e^{j(\phi_n + \theta_n[i])} + h_{E0}s_I[i] + n_E[i] \\ &= \sum_{n=1}^N r_{En}A[i]e^{j(\phi_n + \gamma_{En} + \theta_n[i])} + h_{E0}s_I[i] + n_E[i] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $h_{En} = r_{En}e^{j\gamma_{En}}$ 은 n번째 ETx과 ERx 사이의 채널 이득으로 본 논문에서는 분산이 1인 zero-mean complex Gaussian 분포(즉, $CN(0, 1)$)를 따르는 Rayleigh fading 채널이라고 가정한다. n_E 는 ERx의 수신부에서 발생하는 $CN(0, \sigma_n^2)$ 의 noise이다. 따라서 ERx에서 i번째 time-slot에서 채집되는 순간 에너지량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{harv}[i] &= \eta |r_{E[i]}|^2 \\ &\approx \eta r_{E0}^2 A^2[i] \left| \sum_{n=1}^N e^{j(\phi_n + \gamma_{En} + \theta_n[i])} \right|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 η 는 에너지 변환률을 나타내며 전력 전송 효율상 ETx의 수가 ITx의 수보다 상대적으로 많다고 가정하기 때문에 두 번째 근사식을 활용한다. 하지만 근사화하지 않은 수식에도 다음절에서 제안하는 분산 빔포밍 알고리즘을 적용할 수 있다.

IRx에서도 정보 신호를 수신함과 동시에 ETx들의 에너지 신호 또한 수신한다. 따라서 IRx의 수신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_I[i] &= h_{I0}s_I[i] + \sum_{n=1}^N h_{In}s_n[i] + n_I[i] \\ &= h_{I0}B_I[i]e^{j\phi_I} + \sum_{n=1}^N h_{In}Ae^{j(\phi_n + \theta_n[i])} + n_I[i] \\ &= r_{II}B_I[i]e^{j(\phi_I + \gamma_I)} + \sum_{n=1}^N r_{In}Ae^{j(\phi_n + \gamma_n + \theta_n[i])} + n_I[i] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $h_{In} = r_{In}e^{j\gamma_{In}}$ 와 $h_{I0} = r_{I0}e^{j\gamma_{I0}}$ 는 각각 n번째 ETx과 IRx사이의 채널 이득과 ITx와 IRx사이의 채널 이득이고, 모두 $CN(0, 1)$ 을 따른다. n_I 은 ID의 수신 부에서 발생하는 $CN(0, \sigma_n^2)$ 의 noise이다. 수식 (4)의 두 번째 항은 간섭 신호이기 때문에 수신 SINR을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$SINR[i] = \frac{|r_{II}B_Ie^{j(\phi_I + \gamma_I)}|^2}{\left| \sum_{n=1}^N r_{In}A[i]e^{j(\phi_n + \gamma_{In} + \theta_n[i])} \right|^2 + \sigma_n^2} \quad (6)$$

따라서 다음과 같이 Achievable Rate는 다음과 같이 주어진다.

$$Rate_{ID}[i] = \log_2(1 + SINR[i]) \quad (7)$$

계산된 Achievable Rate는 단위 대역폭 당 전송 속
도이며 IR_x는 i번째 time-slot의 Achievable Rate을
계산하여 i-1번째 time-slot의 값과 비교하여 feedback
할 bit를 결정할 수 있다.

III. 간섭 채널에서의 분산 빔포밍 기법

수식 (4)로부터 분산된 ETx에서 송신된 에너지 신
호들은 해당 ERx에서 Coherent 수신이 될 때 즉, 각
노드들로부터 오는 신호가 위상이 일치해야 채집 전
력을 최대화 할 수 있다. 반면, 수식 (6)에서 확인할
수 있듯이 IRx에서는 ITx로부터 수신 받은 신호를 제
외한 에너지 전송 신호들은 모두 간섭 신호가 된다.
본 논문에서는 분산된 ETx 노드들 간의 협력을 할 수
없기 때문에 1bit feedback에 기반한 분산 빔포밍을
활용하여 ETx에서 보내는 에너지 송신신호를 제어하
고자 한다. 이때 에너지 송신신호가 두 수신 노드
(IRx, ERx)에 미치는 영향이 다르므로 IRx에서 SINR
개선을 통해 향상된 Achievable Rate을 얻는 동시에
ERx를 향해 빔을 형성하여 전력을 최대로 하는 것을
목적으로 하는 분산 빔포밍 기법을 제안한다.

3.1 기존 one-bit feedback에 기반한 분산 빔포밍

본 절에서는 전송에너지를 최대화를 위한 기존 분
산 에너지 빔포밍 기법을 살펴본다. 즉, 빔포밍된 에
너지 신호의 IRx로의 간섭 영향을 고려하지 않고 ERx
로의 전송 에너지가 최대가 되도록 one-bit feedback
기반의 Random Gradient Search 기법을 적용하여
ETx들의 위상을 조정할 수 있다⁶⁾. ERx는 현재 수신
된 신호가 이전의 수신신호 크기보다 크면 bit ‘1’을
그렇지 않으면 ‘0’을 피드백하며, 송신단에서는 피드
백 비트의 정보를 보고 현재의 위상값에서 다음 위상
값을 업데이트를 할지, 아니면 현재 위상값을 포기하
고 과거 최적의 위상값에서 업데이트할지를 결정한다.
이러한 원리에 기반한 분산 빔포밍 알고리즘은 다음
과 같이 정리할 수 있다.

Random gradient search 기반 분산 빔포밍 기법	
1)	초기화 노드: $\theta_{best,n} = \theta_n[1]$ 저장 및 $\theta_n[1]$ 이용하여 첫 번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호 전송. BS: 첫 번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호를 수신 하여 그 강도를 다음과 같이 저장 및 T_{fb} 동안 feedback bit ‘1’ 송신.

$Y_{best} = r[1] $	
For $i=2:N_{max}$	
2)	위상 Update 및 피드백 비트 결정 ETx노드: (i-1)번째 T_{fb} 동안 feedback bit ‘1’ 을 수신하면 각 노드들의 위상을 다음과 같이 변화시킴. $\theta_n[i] = \theta_n[i-1] + \delta_n \quad (4)$ 이때, δ_n 는 $[-\frac{\pi}{20}, \frac{\pi}{20}]$ 에서 균일하게 분포함. 만약, feedback bit ‘0’을 수신하면 각 노드들 의 위상을 다음과 같이 변화시킴. $\theta_n[i] = \theta_{best,n} \quad (5)$ $\theta_n[i]$ 를 이용하여 i번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호 전송. ERx 노드: i번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호를 수신하여 그 RSS를 $Y[i]$ 에 저장하고 이전에 수신된 RSS 중 높은 값 Y_{best} 와 비교하여 feedback bit를 다음과 같이 결정. $feedback\ bit = \begin{cases} '1' & Y[n+1] > Y_{best} \\ '0' & otherwise \end{cases}$
3)	Y_{best} 및 그에 해당하는 위상 $\theta_{best,n}$ Update ETx노드: (i-1)번째 T_{fb} 동안 feedback bit 정 보에 따라 다음과 같이 $\theta_{best,n}$ 을 Update함. $\theta_{best,n} = \begin{cases} \theta_n[i-1] & feedback\ bit\ '1' \\ \theta_{best,n} & feedback\ bit\ '0' \end{cases}$ ERx 노드: Y_{best} 를 다음과 같이 Update함. $Y_{best} = \begin{cases} Y[i] & Y[i] > Y_{best} \\ Y_{best} & otherwise \end{cases}$
4)	빔포밍 알고리즘 종료 조건 검사 ERx 노드: 만약 $ Y[i] - Y_{best} < \epsilon_{th}$ 이거나 그 외 수렴조건을 만족하면, ETx노드에 수렴 신 호 알려줌. ETx 노드: ERx의 수렴 신호를 모두 수신하면 알고리즘 종료.

3.2 제안하는 분산 빔포밍 기법

본 절에서는 정보전송 시스템을 추가한 간섭 채널
환경에서 분산 에너지 빔포밍 기법을 살펴본다. 빔포
밍된 에너지 신호의 IRx로의 간섭영향을 고려하여
ERx로의 전송 에너지가 최대가 되도록 one-bit
feedback 기반의 Random Gradient Search 기법을 적

용하여 ETx들의 위상을 조정한다. IRx와 ERx는 각각 ETx로 피드백 비트를 송신하므로 ETx는 총 두 개의 피드백 비트를 수신한다. 마찬가지로 ERx는 현재 수신된 신호가 이전의 수신신호 크기보다 크면 bit '1'을 그렇지 않으면 '0'을 피드백하며, IRx는 현재 수신된 신호의 SINR을 계산하여 Achievable Rate를 이전 수신신호의 Achievable Rate와 비교하여 크기가 크면 bit '1'을 그렇지 않으면 '0'을 피드백한다. 송신단에서는 들어온 피드백 비트가 2개, 즉 경우의 수가 4가지로 이 피드백 비트의 정보를 이용하여 현재 위상값에서 다음 위상값을 업데이트 할지, 아니면 과거 최적의 위상값에서 업데이트 할지를 결정한다.

Random gradient search 기반 분산 빔포밍 기법	
1)	초기화 노드: $\theta_{best,n} = \theta_n[1]$ 저장 및 $\theta_n[1]$ 이용하여 첫 번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호 전송. ERx: 첫 번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호를 수신하여 그 강도를 다음과 같이 저장 및 T_{fb} 동안 feedback bit '1' 송신. $Y_{best} = r[1] $ IRx: 첫 번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호를 수신하여 SINR을 계산한 후에 Achievable Rate 저장 및 T_{fb} 동안 feedback bit '1' 송신. $Rate_{best} = Rate[1] $
For $i=2:N_{max}$	
2)	위상 Update 및 피드백 비트 결정 ETx노드 : (i-1)번째 T_{fb} 동안 두 개의 feedback bit를 수신하므로 4가지 경우 존재. feedback bit '11'을 수신한 경우 : $\theta_n[i] = \theta_n[i-1] + \delta_n$ 이때, δ_n 는 $[-\frac{\pi}{20}, \frac{\pi}{20}]$ 에서 균일하게 분포함. feedback bit '10' 또는 '01'을 수신한 경우 : $\theta_n[i] = \theta_n[i-1] + \delta_n$ 이때, 첫 번째 비트는 ERx로부터, 두 번째 비트는 IRx로부터 받은 것, ETx 노드의 개수가 많으므로 ERx의 feedback bit의 중요성이 더 높음. feedback bit가 '10'인 경우 P_{update} 확률로 Update. '01'인 경우 $(1 - P_{update})$ 의 확률로 Update. feedback bit '00'을 수신한 경우 :

	$\theta_n[i] = \theta_{best,n}$ $\theta_n[i]$ 를 이용하여 i번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호 전송. ERx 노드 : i번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호를 수신하여 그 RSS를 $Y[i]$ 에 저장하고 이전에 수신된 RSS 중 높은 값 Y_{best} 와 비교하여 feedback bit를 다음과 같이 결정. $feedback\ bit = \begin{cases} '1' & Y[n+1] > Y_{best} \\ '0' & otherwise \end{cases}$ IRx 노드 : i번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호를 수신하여 SINR를 계산한 후 Achievable Rate를 $Rate[i]$ 에 저장하고 이전에 수신된 Rate중 높은 값 $Rate_{best}$ 과 비교하여 feedback bit를 다음과 같이 결정. $feedback\ bit = \begin{cases} '1' & Rate[n+1] > Rate_{best} \\ '0' & otherwise \end{cases}$
3)	$Y_{best}, Rate_{best}$ 에 따라 위상 $\theta_{best,n}$ Update ETx노드: (i-1)번째 T_{fb} 동안 feedback bit 정보에 따라 다음과 같이 $\theta_{best,n}$ 을 Update함. $\theta_{best,n} = \begin{cases} \theta_n[i-1] & feedback\ bit\ '11' \\ \theta_{best,n} & feedback\ bit\ '00' \end{cases}$ $\theta_{best,n} = \begin{cases} \theta_n[i-1] & feedback\ bit\ '10' \\ \theta_{best,n} & feedback\ bit\ '01' \end{cases}$ ERx 노드: Y_{best} 를 다음과 같이 Update함. $Y_{best} = \begin{cases} Y[i] & Y[i] > Y_{best} \\ Y_{best} & otherwise \end{cases}$ IRx 노드: $Rate_{best}$ 를 다음과 같이 Update함. $Rate_{best} = \begin{cases} Rate[i] & Rate[i] > Rate_{best} \\ Rate_{best} & otherwise \end{cases}$
4)	빔포밍 알고리즘 종료 조건 검사 ERx 노드: $ Y[i] - Y_{best} < \epsilon_{th}$ 이거나 그 외 수렴조건을 만족하면, ETx노드에 수렴 신호 알려줌. IRx 노드: $ Rate[i] - Rate_{best} < \epsilon_{th}$ 이거나 그 외 수렴조건을 만족하면, ETx노드에 수렴 신호 알려줌. ETx 노드: IRx 및 ERx의 수렴 신호를 모두 수신하면 알고리즘 종료.

IV. 모의실험 결과

다음은 모의실험을 통해, ETx과 ERx들로 구성된 에너지 하베스팅 시스템과 ITx와 IRx의 통신 시스템이 동시에 존재하는 간섭 채널 환경에서 IRx가 feedback bit를 송신하지 않는 경우와 송신하는 경우에 대한 ERx의 Received Signal Power와 IRx의 Achievable Rate 결과를 비교하였다. 본 논문에서는 ITx와 IRx는 single antenna를 가지고 있고 ETx node의 경우 총 6개가 분산되어 에너지를 전송하고 ERx, IRx, 및 ITx의 경우 각각 1개씩 있다고 가정하였다. 수신 SNR이 30dB인 환경을 가정하였고 송신 노드들과 수신 노드들 사이의 모든 채널은 Rayleigh fading channel이라고 가정한다.

두 실험 결과에서 ERx의 수신 전력의 크기가 거의 동일하게 수렴하는 반면 Fig. 2에서는 IRx의 상태를 고려하지 않았기 때문에 one-bit feedback기반 협력이 없었기 때문에 IRx의 Achievable rate이 Fig. 3에 비하여 상대적으로 좋지 않은 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3에서는 Fig. 2와 비교하였을 때 Achievable rate를 수렴해가는 과정에서 수신 전력의 크기가 약간 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 통신 시스템을 고려하지 않았을 때 수신 전력을 최대화 시키는 송신 위상과 두 시스템의 성능을 모두 만족하는 송신 위상들이 다르기 때문에 두 성능을 최적화하기 위한 Trade-off가 존재하기 때문에 발생하는 현상으로 분석할 수 있다. 참고로 수신 단말기는 one-bit피드백을 활용하여 one-bit 정보만 피드백하지만 전체 시스템 관점에서는 수신 단말기 개수에 비례하여 피드백 비트

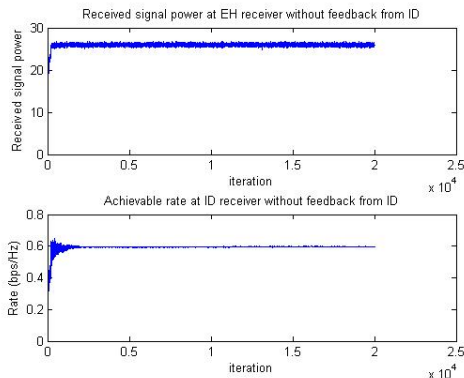


Fig. 2. 기존의 빔포밍 환경에 ID의 feedback이 적용되지 않은 EH의 수신 전력과 ID의 Achievable rate

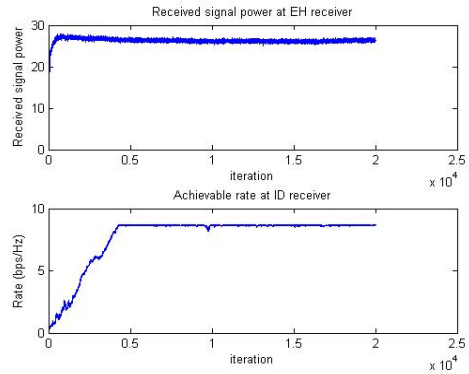


Fig. 3. 기존의 빔포밍 환경에 ID의 feedback을 적용한 EH의 수신 전력과 ID의 Achievable rate

수는 선형적으로 증가하게 된다.

V. 결론

본 논문에서는 정보 송수신기와 에너지 송수신기가 공존하는 간섭 채널 환경에서 정보 송수신 시스템의 SINR을 고려하여 Achievable Rate를 최대화 하는 동시에 에너지 송수신 시스템의 수신 전력의 크기를 최대화하는 One-bit 피드백 기반 분산 빔포밍 알고리즘을 제안하였다. 즉, IRx는 정보 신호를 수신 받는 동시에 분산된 다수의 ETx로부터의 에너지 신호들, 즉 간섭 신호를 받게 되므로 분산된 ETx의 에너지 신호를 적절히 제어하여 간섭을 제거할 필요가 있다. 본 논문에서는 ERx에서의 수신 전력을 향상 시키는 동시에 IRx의 간섭 신호를 제거하기 위해 분산된 ETx 노드들 사이의 정보 공유 없이 각 단말기의 One-bit feedback에 기반한 분산 에너지 빔포밍 기법을 제안하였으며, 이를 통해 전송된 에너지 송신 신호들은 ERx에 전달되는 에너지는 최대화하며 반면 IRx에 도달할 때는 에너지 신호들이 상쇄간섭을 일으키도록 하여 간섭을 최소화 하도록 하였다. 모의 실험을 통해 제안하는 분산 빔포밍 기법을 통해 분산 노드 기반의 무선 전력 전송 시스템과 무선 통신 시스템이 공존하는 환경에서 두 시스템의 서로 다른 성능을 개선시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

References

[1] B. Chen, J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee, and B. Yin, "Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application

- case, and challenges,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6505-6519, Dec. 2017.
- [2] S. F. Abedin, Md. G. R. Alam, R. Haw, and C. S. Hong, “A system model for energy efficient green-IoT network,” *ICOIN*, Cambodia, Jan. 2015.
- [3] I. Krikidis, S. Timotheou, and S. Sasak, “RF energy transfer for cooperative networks: Data relaying or energy harvesting?,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, pp. 1772-1775, Sep. 2012.
- [4] H. Ochiai, P. Mitran, H. Poor, and V. Tarokh, “Collaborative beamforming for distributed wireless ad hoc sensor networks,” *IEEE Trans. Signal Process. [see also IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Process.]*, vol. 53, no. 1053-587X, pp. 4110-4124, 2005.
- [5] R. Mudumbai, U. Madhow, K. Ramchandran, and B. Wild, “Distributed beamforming using 1 bit feedback: From concept to realization,” *Allerton Conf. Commun., Control, and Comput.*, 2006.
- [6] S. Lee, J. Lee, and J. Park, “Fast phase synchronization algorithm based on bisection for distributed beamforming with one-bit feedback,” *J. KICS*, vol. 42, no. 11, Nov. 2017.

홍 용 기 (Yong-Gi Hong)



2014년 3월~현재 : 부경대학교
전자공학과 학사 과정
<관심분야> 통신공학, 디지털
신호처리, MIMO radar

이 종 혁 (Jonghyeok Lee)



2018년 2월 : 부경대학교 전자
공학과 학사
2018년 3월~현재 : 부경대학교
전자공학과 석사 과정
<관심분야> OFDM, 통신공학,
사물인터넷, MIMO radar

박 재 현 (Jaehyun Park)



2003년 2월 : KAIST 전기 및
전자 공학과 학사
2010년 2월 : KAIST 전기 및
전자 공학과 박사
2010년~2013년: 한국전자 통
신 연구원, 선임연구원
2013년~2014년 : Imperial
College London, Research Associate
2014년~현재 : 부경대학교 부교수
<관심분야> 다중안테나 기반 통신 신호처리, 동시
전력 및 정보 전송 기술, 인지무선기술